

# **Hochkantschille: Bivalven-Akkumulationen im Wattenmeer**

**Beschreibung, Taphonomie, Genese sowie zeitliche und räumliche  
Entwicklung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften

der Geowissenschaftlichen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von  
Christian Max Jens Federolf  
aus Jundiaí, São Paulo

2009

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Mai 2009

Dekan: Prof. Dr. Peter Grathwohl

1. Berichterstatter: Prof. Dr. James Nebelsick

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Franz Theodor Fürsich

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1 -</b>	Allgemeine Einführung	1
<b>Kapitel 2 -</b>	<i>Mya arenaria</i> dominierende Schill-Akkumulationen im intertidalen Gezeitenbereich des Wattenmeeres unter besonderer Betrachtung von Hochkantschill-Anordnungen	37
<b>Kapitel 3 -</b>	Taphonomie von <i>Mya arenaria</i> dominierenden Schill-Akkumulationen im Gezeitenbereich des Wattenmeeres: Vergleichende Untersuchung mittels uni- und multivariaten Analysemethoden	117
<b>Kapitel 4 -</b>	Genese von Hochkantschill-Strukturen am Beispiel von <i>Mya arenaria</i> : Experimentelle Untersuchungen im Wellenkanal	229
<b>Kapitel 5 -</b>	Zeitliche und räumliche Entwicklung von <i>Mya arenaria</i> dominierenden Schill-Akkumulationen im Wattenmeer: Eine thematische Verknüpfung mittels Luftbildkartierung und Wellenparametern	291
	<b>Zusammenfassung/Summary</b>	367
	<b>Danksagung</b>	373

# Detailiertes Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1 -</b>	Allgemeine Einführung.....	1
	Schalenakkumulationen.....	1
	Biostratonomie.....	2
	Taphonomie.....	4
	Fossile Schalenakkumulationen.....	5
	Zielsetzung.....	6
	Arbeitsgebiet.....	8
	Untersuchungsobjekt: <i>Mya arenaria</i> .....	13
	Literaturverzeichnis.....	17
	Tafeln.....	29
<b>Kapitel 2 -</b>	<i>Mya arenaria</i> dominierende Schill-Akkumulationen im intertidalen Gezeitenbereich des Wattenmeeres unter besonderer Betrachtung von Hochkantschill-Anordnungen.....	37
	Kurzfassung.....	38
	Einleitung.....	39
	Arbeitsgebiet.....	42
	Material & Methoden.....	44
	Ergebnisse.....	48
	Diskussion.....	64
	Schlussfolgerung.....	88
	Literaturverzeichnis.....	89
	Tafeln.....	99
<b>Kapitel 3 -</b>	Taphonomie von <i>Mya arenaria</i> dominierenden Schill-Akkumulationen im Gezeitenbereich des Wattenmeeres: Vergleichende Untersuchung mittels uni- und multivariaten Analysemethoden.....	117
	Kurzfassung.....	118
	Einleitung.....	119
	Arbeitsgebiet.....	122
	Material & Methoden.....	124
	Ergebnisse.....	133
	Diskussion.....	160
	Schlussfolgerung.....	185
	Literaturverzeichnis.....	187
	Tafeln.....	197
	Tabellenanhang.....	213

<b>Kapitel 4 -</b>	Genese von Hochkantschill-Strukturen am Beispiel von <i>Mya arenaria</i> : Experimentelle Untersuchungen im Wellenkanal.....	229
	Kurzfassung.....	230
	Einleitung.....	231
	Material & Methoden.....	233
	Ergebnisse.....	237
	Diskussion.....	256
	Schlussfolgerung.....	263
	Literaturverzeichnis.....	265
	Tafeln.....	271
	Tabellenanhang.....	283
<b>Kapitel 5 -</b>	Zeitliche und räumliche Entwicklung von <i>Mya arenaria</i> dominierenden Schill-Akkumulationen im Wattenmeer: Eine thematische Verknüpfung mittels Luftbildkartierung und Wellenparametern.....	291
	Kurzfassung.....	292
	Einleitung.....	293
	Arbeitsgebiet.....	296
	Material & Methoden.....	297
	Ergebnisse.....	301
	Diskussion.....	315
	Schlussfolgerung.....	320
	Literaturverzeichnis.....	323
	Tafeln.....	329
	Tabellenanhang.....	335
	<b>Zusammenfassung/Summary.....</b>	<b>367</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>373</b>



## **KAPITEL 1**

### **Allgemeine Einführung**

## Allgemeine Einführung

Das Wattenmeer ist ein klassisches Untersuchungsgebiet für aktuopaläontologische Forschung. Besonders die Untersuchung der vorkommenden Muschelgattungen wie beispielsweise *Cerastoderma edule*, *Mytilus edulis*, *Macoma balthica* und *Mya arenaria* haben dazu beigetragen biologische und ökologische Parameter innerhalb des Gezeitenbereiches der Nordsee besser zu verstehen (z. B. Schäfer 1962, 1970; Hertweck 1971, 1979a, b; Hallman et al. 1996; Hertweck & Liebezeit 2002; Wehrmann 1999, 2003).

## Schalenakkumulationen

Unter dem Begriff „Schill“ werden generell Anreicherungen und Anhäufungen von postmortalem Schalenmaterial verstanden (Schäfer 1962). Muschelansammlungen können durch eine Vielfalt von Prozessen konzentriert werden (Brett & Baird 1986; Fürsich 1990; Brett & Seilacher 1991). Durch Strömungs- und Welleneinwirkung werden Schalenelemente reorientiert, transportiert und teilweise sortiert (Etter 1994). Neben bioturbaten, aber sedimentologisch gesteuerten biotischen Vorgängen ist das steuernde Moment der Schill-Akkumulation die Wasserbewegung. Gerichtete und turbulente Wasserbewegungen, langfristiges Geschehen und plötzliche Ereignisse (z. B. Sturmschille) steuern die verschiedenen Schilltypen (Strauch 1990).

Rezente Schill-Vorkommen im Wattenmeer entstehen vorwiegend durch landwärtigen Schalentransport. Ausgangspunkt für eine Schill-Akkumulation auf einer Ebene ist zum einen die Bereitstellung aus der entsprechenden Bioproduktion, zum anderen der Transport bzw. die Erosion des Sedimentes einschließlich einer lateralen Bewegung der Klappen-Komponente (Strauch 1990).

Aus paläontologischer Sicht werden zwei wichtige Schill-Typen von einander unterschieden. Als autochthon werden Schille bezeichnet, die an Ort und Stelle d. h. am ehemaligen Lebensort abgelagert wurden. Durch das Fehlen des entsprechenden Transportmechanismus ist dieser Schilltyp besonders für paläontologische Betrachtungen interessant, da der Erhaltungsgrad des entsprechenden Materials sehr hoch ist.

Im Gegensatz dazu werden Schill-Anreicherungen die von ihrem ursprünglichen Bildungsort durch Verfrachtung entfernt wurden als allochthone Vorkommen bezeichnet. Ihr Erhaltungszustand ist durch entsprechende mechanische Beanspruchung während des Transports im Vergleich meistens schlechter. Ein Vorteil gegenüber den autochthonen Schillen besteht darin, dass die allochthonen Schille oft den Vorort herrschenden hydrodynamischen Prozessen unterliegen. Nach Strauch (1990) spiegeln allochthone Schille die Normalsituation, also den „Alltag“ in einem Sedimentationsraum wider. Somit kann dieser Schilltyp zur Rekonstruktion von den vorherrschenden hydrodynamischen Bedingungen herangezogen werden. Ausführliche Beschreibungen und Klassifikationen von Schalenkonzentrationen geben unter anderem Seilacher (1970), Seilacher et al. (1985), Kidwell et al. (1986) sowie Fürsich (1995).

Massenansammlungen von Muschelklappen im Gezeitenbereich der Nordsee wurden in der Vergangenheit von einigen Autoren beschrieben, doch liegen viele dieser Untersuchungen teilweise schon mehrere Jahrzehnte zurück (z. B. Kühl 1950; Van Straaten 1950, 1952, 1956; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Reineck 1984; Dörjes 1987; Schubert 1990; Flemming et al. 1992; Cadée 1992, 1994a, b, c, 2002; Cadée & Wesselingh 2005).

Auch in anderen Regionen wurden bereits zahlreiche Untersuchungen an Schalenansammlungen durchgeführt, wie beispielweise am Golf von Kalifornien von Fürsich & Flessa (1987), Flessa et al. (1993), Kidwell (1988), Kowalewski et al. (1994), Meldahl & Cutler (1992), Meldahl (1993, 1995), Cutler (1995), Springer & Flessa (1996), an der Ostküste der USA in Georgia (z. B. Wiedemann 1972; Dörjes et al. 1986; Frey & Dörjes 1988; Salazar-Jimenez et al. 1982), an der Küste Englands (z. B. Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Neal et al. 2002, 2003) und Australiens Woodroffe & Grime (1999) sowie Tsunami bedingte Schalenakkumulationen im Oman (Donato et al. 2008).

Jüngere Arbeiten geben Auskunft über die morphologische Struktur sowie internen Aufbau von rezenten Schalenakkumulationen (z. B. Carroll et al. 2003; Bonnot-Courtois et al. 2004; Tomašových & Rothfus 2005; Quaresma et al. 2007).

### Biostratinomie

Oftmals spielen beim Akkumulationsprozess von Schalen biostratinomische Prozesse eine wichtige Rolle. Die Biostratinomie ist ein Teilgebiet der Taphonomie, die die Vorgänge untersucht, welche vom Absterben eines Organismus bis zur definitiven Einbettung auf diesen Körper oder dessen Teile einwirken (Müller 1992). Diese Prozesse sind überwiegend physikalischer Natur (Seilacher 1973). Es lassen sich dabei verschiedene Prozesse unterscheiden, welche sequentiell aneinandergereiht sind. Nach dem Absterben des Organismus erfolgt meist zuerst ein Transport, eine Sortierung und Reorientierung sowie eine Disartikulation. Diese Prozesse wirken dabei meist unmittelbar erst nach dem Tod des Organismus auf diesen ein (Etter 1994).

Nach Müller (1992) sind folgende Begriffe im deutschen Sprachgebrauch üblich: Als Einregelung bezeichnet wird jegliche Reorientierung des Klappenmaterials. Von einer Einkippung wird gesprochen, wenn ein Objekt um eine horizontale Achse gedreht bzw. gekippt wird. Als Einsteuerung wird die Drehung um eine vertikale Achse bezeichnet. Eine gehemmte Einkippung oder Einsteuerung erfolgt, wenn die Reorientierung bei Muschelklappen erfolgt, welche auf der Sedimentoberfläche liegen.

Ausführliche Untersuchungen zu biostratinomische Abläufen in denen Einstreuungen, Einregelungen sowie Orientierungen von Muschelklappen beschrieben werden geben z. B. Weigelt (1927), Schäfer (1962), Nagle (1967), Brenchley & Newall (1970), Seilacher (1973), Futterer (1974-1977), McKittrick (1987), Allen (1990) und Wendt (1995).

Einige grundlegende historische Arbeiten zu Transportmechanismen von Schalenmaterial, deren Einbettung und Verteilung im Wattenmeer sollen an dieser Stelle besonders



hervorgehoben werden (z. B. Richter 1922, 1942; Schäfer 1941; Lüders 1929; Trusheim 1931; Hecht 1930; Jessen 1932, 1933; Häntzschel 1939).

Nach Richter (1922, 1942) ist die allgemeine Einbettungslage von rezenten, regelmäßig gebauten, d. h. schüsselförmigen Körpern (wie einige Muschelschalen) im Sediment „gewölbt oben“ (konvex oben, s. Tafel 1-1 A & B). Diese Einbettung erfüllt jene Grundbedingung, dass jedes gewölbte Objekt mit einem geraden Unterrand von einer über ihn hinweg streichende Wassermasse solange hin und her bewegt wird, bis er in die stabile Lage „gewölbt oben“ umschlägt (Richter 1922). Erfolgt eine entsprechende Einbettung so unterliegen Muschelschalen einer raschen Übersandung und werden dadurch einem Transport entzogen. Ausnahmen für eine derartige Einregelung erwähnt Richter (1942) im Bereich von Spülsäumen, da dort Klappen oft andersherum also „gewölbt unten“ abgelagert werden. Schwache Strömungen können im Schelfbereich ebenfalls zu einer Ablagerung konvex unten führen (Emery 1968). Bei schwachen Strömungsbedingungen können verschiedene Muschelarten also unterschiedlich orientiert werden. Eine Ursache für derartige Lagerungsverhältnisse ist der jeweilige Schwerpunkt der Klappenart (Futterer 1974). Eine „regellose Lage“ von Klappen beschreibt Richter (1942) bei Schillanhäufungen. Hierbei sind die Schalen ohne Sediment zusammengespült worden und lagern infolge gegenseitiger Behinderung wirt durcheinander. Auch bei schüsselförmigen, fossil abgelagerten Muscheln zeigen die Wölbungen der Klappen im allgemeinen bei ungestörter Einbettung nach dem Hangenden (z. B. Richter 1922; Aigner 1977).

Werden viele Einzelklappen mit ihrer konvexen Seite nach oben gerichtet auf einer Ebene abgelagert, so spricht man allgemein von einem Schillpflaster (Tafel 1-1 A). Jessen (1932) unterschied hierbei Voll- von Streupflaster. Bei einem Vollpflaster kommt es zu einer Größensortierung der Klappen, welche bei den Streupflastern fehlen (Tafel 1-1 B). Bei offenen Pflastern liegen die Schalen vereinzelt, bei geschlossenen Pflastern berühren sie sich einander. Die Schillpflaster markieren oftmals Erosionshorizonte (Reineck 1984). Mit einer Dachziegellagerung oder auch Imbrikation werden zwei oder mehr Klappen bezeichnet, die sich so hintereinander Staffeln, dass deren Anordnung an überlappende Dachziegel erinnern. Die Imbrikation ist ein wichtiger Indikator für die Strömungsrichtung während der Ablagerung des Klappenmaterials. Der Übergang von einer Pflasterlagerung in eine Imbrikationslagerung erfolgt durch eine Erhöhung der Schalenkonzentration, so dass infolge dessen die Klappen übereinander geschoben werden (Häntzschel 1939).

In der vorliegenden Arbeit werden rezente Schill-Vorkommen innerhalb der Wattenmeer-Region zwischen Jadebucht und Außenelbe beschrieben (Tafel 1-1 C & D). Im Gegensatz zur relativ häufigen „normalen“ d. h. horizontalen Lagerung von Einzelklappen (Richter 1942), ist die Einregelung innerhalb der untersuchten Vorkommen außergewöhnlich, da die Einzelklappen in bestimmten Bereichen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage abweichen und somit senkrecht, folglich hochkant stehen (Tafel 1-1 E & F, Tafel 1-2 A & B). Die von *M. arenaria* dominierten Akkumulationen sind nach dem bisherigen Kenntnisstand die weltweit ausgedehntesten Schill-Flächen mit Bereichen in denen vertikal eingeregelter Muschelklappen innerhalb eines intertidalen Gezeitenbereiches vorkommen.

Vergleichbare rezente Hochkantstrukturen wurden bisher nur an wenigen Küsten lediglich als Einzelfälle beobachtet, ohne jedoch eine schlüssige Erklärungen ihrer Genese zu liefern (z. B. Mii 1957; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Grinnell 1974; Ball 1976; Sanderson & Donovan 1974; Salazar-Jimenez et al. 1982; Ensom 1984; Hanamgond 2001). Hochkant eingeregelt Schillanhäufungen im Wattenmeer wurden erstmals von Schäfer (1941) an der südlichen Küste der Jadebucht beschrieben.

Hochkant-Einregelungen beschränken sich im Allgemeinen nicht nur auf Muschelschalen, sondern wurden auch bei flach ausgebildeten Gesteinsobjekte wie Schieferplatten, Konglomeraten, diversen Bruchstücken sowie an Seeigeln beschrieben (z. B. Gregory 1930; Schmitthenner 1930; Dege 1941; Dionne 1971; Kostyaev 1973; Ball 1976; Mount & Kidder 1993; Hanamgond 2001; Nebelsick & Kroh 2002; Wilson 2002; Wilson & Edwards 2004). Bislang wurde davon ausgegangen, dass die Bildung von Hochkantstrukturen, ob aus Schalenmaterial oder Gesteinen bestehend mit hochenergetischen Prozessen einhergeht bzw. auf erhöhte Wellenenergie zurückzuführen sind (z. B. Dionne 1971; Sanderson & Donovan 1974; Wilson 2002; Hanamgond 2001).

### Taphonomie

Untersuchungen von Schalenansammlungen umfassen neben einer großen Variation von biologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Prozessen sehr häufig auch taphonomische Ereignisse (z. B. Kidwell & Jablonski 1983; Kidwell & Bosence 1991; Flessa & Kowalewski 1994; Meldahl et al. 1997; Carrol et al. 2003). Die Taphonomie (auch Fossilisationslehre) beschäftigt sich mit der Frage wie Organismen oder ihre Reste von der Biosphäre in die Lithosphäre übergehen. Zudem untersucht die Taphonomie die Prozesse, welche nach dem Absterben auf einen Organismenrest einwirken und zu Fossilierung respektive Zerstörung führen (Etter 1994). Seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts fanden zahlreiche neue Konzepte Eingang in die taphonomische Forschung. Mit den Konzepten der vergleichenden Taphonomie (Brett & Baird 1986) und der Taphofazies (Speyer & Brett 1986) ist es möglich, anhand der Fossil- oder auch Subfossilierung direkte Rückschlüsse auf das Ablagerungsmilieu zu ziehen.

Grundlegende taphonomische Untersuchungen im Wattenmeer wurden dabei beispielweise u. a. von Richter (1922, 1924, 1942), Pratje (1929), Schäfer (1941, 1962), Tauber (1942) und Hollmann (1968a, b) durchgeführt. Ausführliche taphonomische Untersuchungen unter Einbezug der jeweiligen Ablagerungsbedingungen im Gezeitenbereich der Nordsee führten z. B. Hertweck (1971, 1979a, b), Eisma et al. (1981), Cadée (1984, 1992, 1994a, b, 1995), Cadée & Wesselingh (2005), Cutler (1995), Hallman et al. (1996), Flessa (1998) und Schneider-Storz et al. (2008) durch.

Bei einigen dieser Untersuchungen wurden bio-ökologische, taxonomische, geologisch-sedimentologische und natürlich auch taphonomische Aspekte mit starkem Bezug auf paläoökologische Fragestellungen bearbeitet. In anderen Arbeiten dienten taphonomische Fazies-Modelle als nützliches Werkzeug sowohl bei fossilen als auch bei modernen

Umweltanalysen (Speyer & Brett 1986, 1988). Die Bestimmung des sogenannten „taphonomischen Fingerabdruckes“ spielt eine wichtige Rolle bei der Aufstellung von derartigen Taphofazies Modellen (z. B. Davies et al. 1989; Fürsich & Flessa 1987; Powell et al. 1987). Schon in einigen Arbeiten haben sich taphofazielle Untersuchungen besonders von marinen Invertebraten als nützliches Konzept erwiesen (z. B. Brandt 1989; Jiménez & Braga 1993; Cantalamessa et al. 2005; Lockwood & Work 2006 u. a.). Auch in aktualistischen Untersuchungen wurden Taphofazies-Analysen bereits erfolgreich angewandt (z. B. Fürsich & Flessa 1987, 1991; Parson 1989; Davies et al. 1989; Meldahl & Flessa 1990; Powell et al. 1989; Nebelsick 1992; Kowalewski et al. 1994; Best & Kidwell 2000a, b). Diese Fazies basierten aktualistischen Untersuchungen konnten in der Vergangenheit dazu beitragen fossile Taphofazies-Modelle zu kalibrieren, quantifizieren und damit weiter zu entwickeln. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Untersuchung von Schalenakkumulationen ist zudem der Vergleich von lebenden Populationen mit postmortalem bzw. subfossilem Schalenmaterial, die von äußeren Prozessen wie z. B. Strömungen, Wellengang und die dadurch bedingte Umlagerungen beeinflusst wurden (z. B. Wilson 1963; Alexandrowicz 1977, 2001; Alexandrowicz & Florek 1999; Fürsich 1990; Kidwell & Bosence 1991; Cummins 1994; Kidwell 2002a, b). Einen allgemeinen und zusammenfassenden Überblick über Datenerhebungen sowie verschiedene Analysemethoden geben beispielsweise Kidwell et al. (2001).

### Fossile Schalenakkumulationen

Das wissenschaftliche Interesse an fossilen Schalenkonzentrationen hat in den letzten Jahren stark zugenommen, da die Untersuchungen fossiler Schalenakkumulationen in der Vergangenheit dazu beigetragen hat Paläoumweltbedingungen zu rekonstruieren (z. B. Aigner 1977; Kidwell 1986, 1991; Kidwell & Brenchley 1994; Fürsich et al. 1991; Abbott 1997; Boyer & Droser 2003; Fürsich & Pandey 1999). Sowohl in karbonatischen als auch in silikatischen Gesteinsabfolgen können Schalenansammlungen detaillierte Auskunft über ökologische Zustände, sedimentäre Um- und Ablagerungsprozesse, Aussagen über relative Meeresspiegelschwankungen sowie über physikalische-hydrodynamische Parameter geben (Kidwell 1986, 1991; Brett 1995, 1998; Fürsich & Pandey 2003). Muscheln sind seit dem Kambrium bekannt (Faupl 2003) und daher nahezu in der gesamten Erdgeschichte vertreten, so dass sie bei der Rekonstruktion fossiler Lebensgemeinschaften in modernen paläontologischen- und sedimentologischen Arbeiten Verwendung fanden (z. B. Kidwell 1989; Shou-Wan et al. 1996; Brett et al. 1997; Kowalewski et al. 1998; Moffat & Bottjer 1999; Mandic & Piller 2001; Di Celma et al. 2002; Dominici 2004). Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde eine Vielzahl von Arbeiten zu fossilen Schalenansammlungen verfasst (z. B. Fürsich 1984; Brett & Bordeaux 1990; Brett & Seilacher 1991; Cuffe et al. 1991; Wendt 1995; Meldahl 1993, 1995; Anderson & McBride 1996 u. a.).

Um fossile Lagerstätten besser interpretieren zu können, sind Kenntnisse über rezente Ablagerungsprozesse sowie Entstehungsbedingungen von modernen Schalen-

konzentrationen unabdingbar. Sind die Rahmenbedingungen wie beispielsweise Wassertiefe, Tidenhöhe, Strömungsrichtungen sowie allgemeine Wellenparameter bekannt, können diese Erkenntnisse teilweise auch auf fossile Vorkommen angewandt werden. Einige Forschungsbeispiele zeigen, dass rezente Schalenansammlungen sehr gut als aktualistischer Vergleich in der Interpretation von fossilen Schalenkonzentrationen genutzt werden können (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa 2002; Hallman et al. 1996; Neal et al. 2002; Kowalewski et al. 2000, 2003).

### Ziele der Untersuchung

Im fossilen und rezenten Systemen können Regelagen von Schalen nur dann sinnvoll als Strömungs- oder Wellenindikatoren verwendet werden, wenn die Vielfalt der Erscheinungsmuster bereits bekannt sind und diese mit den jeweils entsprechenden hydrodynamischen Prozessen verknüpfen werden können. Bisher wurden in sedimentären Systemen den senkrecht angeordneten Komponenten nur wenig Beachtung gewidmet. Vertikal eingeregelter Komponenten, sei es rezent oder auch fossil, sind bislang nur in wenigen Einzelfällen beschrieben worden, ohne jedoch eine schlüssige Erklärung ihrer Genese zu liefern.

Nahezu alle rezenten Beschreibungen von Hochkantanordnungen beziehen sich auf Vorkommen an Stränden, Brandungs- oder Spülsäumen. Bisher wurden jedoch keine länger andauernden Untersuchungen oder erklärende, experimentelle Messungen diesbezüglich durchgeführt.

Bereits Seilacher & Meinschner (1965) sowie Greensmith & Tucker (1969) wiesen in ihren Arbeiten darauf hin, dass derartige vertikale Anordnungen eventuell zur Rekonstruktion von ehemaligen hydrodynamischen Bedingungen bzw. als Fazies-Indikatoren herangezogen werden könnten.

Innerhalb der Wattenmeer-Region zwischen Jade und Außenelbe finden sich diese vertikalen Einregelungsmuster als „Normalfall“, die an anderen Küsten bisher lediglich als Einzelfall beobachtet wurden.

Die Erforschung der zum Teil drastischen Umweltveränderungen und dessen Vergleich mit der erdgeschichtlichen Vergangenheit ist daher von ungeheurer wissenschaftlicher Wichtigkeit, um die aktuellen Umwälzungen besser verstehen und künftig prognostizieren zu können. Nach den Ergebnissen dieser Promotionsarbeit steht ein „Werkzeug“ zur Verfügung, dass eine Rekonstruktion der Energieniveaus einer Küstenregion erlaubt. Liegen längere Sedimentabfolgen, z. B. in Form von Bohrkernen vor in denen vertikal angeordnete Fossilien oder ähnliche Aggregate enthalten sind, können daraus mögliche Veränderungen des Paläoenergieniveaus rekonstruiert werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zunächst detaillierte Informationen über den strukturellen Aufbau der *M. arenaria* dominierenden Schill-Vorkommen im südöstlichen Gezeitenbereich des Deutschen Wattenmeeres zu erhalten. Besondere Aufmerksamkeit soll dabei den unterschiedlichen Lagerungszuständen und Orientierungen der Schalen auf den Oberflächen

der Schill-Vorkommen gewidmet werden. Ein wesentlicher Fokus soll hierbei auf die Hochkantstrukturen sowie auf dessen Genese-Prozesse gelegt werden.

Ein zweiter Schwerpunkt der Untersuchung soll die Taphonomie von *M. arenaria* Einzelklappen innerhalb der Schill-Vorkommen sein. Hierbei werden detaillierte Informationen über die taphonomische Beanspruchung der *M. arenaria* Schalen erfasst.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden: (1) Gibt es Unterschiede innerhalb der Größenhäufigkeitsverteilung zwischen ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten und den eigentlichen Schill-Akkumulationen? (2) Kommt es zu Frachtsonderungen zwischen linken und rechten Klappenhälften? (3) In wieweit spielt die Schalengröße eine Rolle bei der taphonomischen Erhaltung?

Des Weiteren geprüft werden soll, ob es taphonomische Differenzen zwischen unterschiedlichen Oberflächenbereichen gibt. Hierzu ergeben sich folgende Fragen: (4) Wie wirken sich unterschiedliche Lagerungsvariation auf den taphonomischen Erhaltungszustand der *M. arenaria* Klappen aus? (5) Können Lagerungsvariationen mit Hilfe der taphonomischen Erhaltung voneinander differenziert werden? (6) Finden sich Unterschiede in der taphonomischen Beanspruchung zwischen verschiedenen Schill-Lokationen?

Eine weiterer Fokus der vorliegenden Dissertation sind Experimentreihen an einem großen Wellenkanal der Universität Marburg. Mit Hilfe von Versuchsreihen im Wellenkanal sollen die Geneseprozesse sowie die hydrodynamischen Randparameter bestimmt werden, die zu einer vertikalen Hochkantstellung von *M. arenaria* Einzelklappen führen. Ziel der Untersuchung ist es zudem detaillierte Informationen über den eigentlichen Geneseablauf von Hochkantschillstrukturen zu erhalten. Es soll zudem geprüft werden, ob die Geländeuntersuchungen sich mit den Laborexperimenten am Wellenkanal decken. Ergänzend zu den Naturbeobachtungen im Arbeitsgebiet sollen die Experimentreihen dazu dienen Kriterien zu finden, die es ermöglichen die Bildungsgeschichte sowie die hydrodynamischen Wellen- und Randparameter die zu den verschiedenen Lagerungsstrukturen auf den Schill-Vorkommen führen zu entschlüsseln. Einen besonderen Stellenwert soll hierbei die Genese der Hochkantstrukturen einnehmen.

Abschließend sollen anhand von Luftbildkartierungen Informationen über die Entwicklung und Veränderung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Vorkommen in Raum und Zeit gesammelt werden. Es soll geprüft werden, ob und in welchem Umfang die Schill-Bedeckung mit den hydrodynamischen Prozessen im Arbeitsgebiet einher gehen. Zudem wird die Frage geklärt, ob Schill-Vorkommen im Arbeitsgebiet als eventueller Indikator zur Rekonstruktion von hydrodynamischen Aktivitäten genutzt werden können. Um einen Zusammenhang zwischen Schill-Bedeckung und den hydrodynamischen Prozessen herzustellen wird zu diesem Zweck eine thematische Verknüpfung von Luftbildkartierung- und Wellenparametern hergestellt.

## Arbeitsgebiet

Die Gesamtfläche des Wattenmeeres in der südlichen Nordsee beträgt ca. 8.000 km<sup>2</sup> wovon etwa die Hälfte dem Tidewechsel unterliegt. Der niedersächsische Teil des Wattenmeeres hat eine Flächenausdehnung von ca. 2.400 km<sup>2</sup> (Helbig 1991). Die gesamte eulitorale Wattfläche beträgt in etwa 1.350 km<sup>2</sup> (mündl. Mitt. Dr. Gerald Millat 2008).

Das Untersuchungsgebiet liegt in der südöstlichen inneren Deutschen Bucht und entspricht der Ausdehnung der Wattflächen zwischen der Jadebucht im Südwesten und der Elbmündung im Nordosten (Abb. 1-1).



**Abb. 1-1.** Satellitenbild des Niedersächsischen Wattenmeeres bei Niedrigwasser. Bild vom Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, Original Landsat Data ESA 1992.

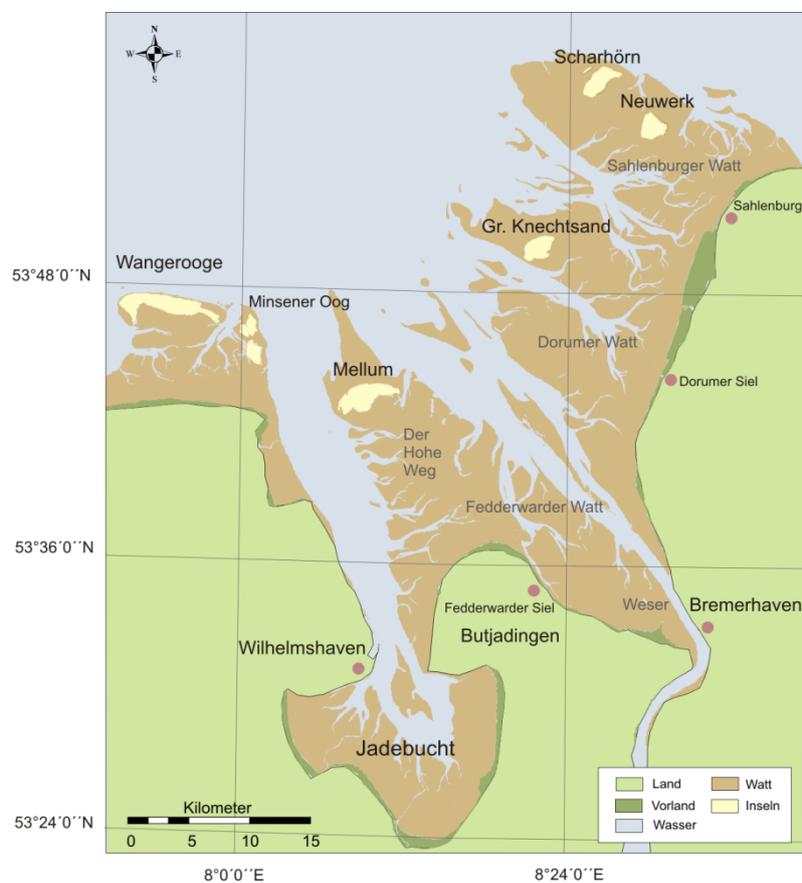
Seewärts folgt die Grenze in etwa dem Verlauf der mittleren Tideniedrigwasser-Linie, sofern nicht Sandbankinseln eine natürliche Begrenzung darstellen. Damit umfasst das Arbeitsgebiet mit etwa 590 km<sup>2</sup> den gesamten eulitoralen Bereich des Niedersächsischen Wattenmeeres zwischen den Inseln Mellum (inkl. Hohe Weg) und Neuwerk (Abb. 1-2).

Das Wattgebiet zwischen Jade und Elbe unterliegt einem dauernden morphologischen Wandel durch Wind, Seegang, Strömung und dem täglichen Tidenstrom. Für das Gebiet charakteristisch ist die tiefe Weser-Schiffahrtsstraße, großräumige von Prielen durchzogene Wattgebiete sowie die vorgelagerten großen Sandbank-Inseln Mellum, Knechtsand, Scharhörn und Neuwerk.

Die Morphodynamik im Wattenmeer wird von vielen Faktoren wie z. B. Sedimentkorngröße, Strömungsgeschwindigkeiten, Schubspannung und vom anthropogenen Verbau bestimmt (Reineck 1963; Wunderlich 1983; Niemeyer et al. 1995; Flemming et al. 2002).

Hauptfaktoren für Sedimentation, Erosion und resultierender Sedimentverteilung sind die windinduzierten Wellenbewegungen und die tideabhängigen Strömungsmuster.

Die Sedimentoberflächen innerhalb des Arbeitsgebietes bestehen überwiegend aus Mittel- und Feinsanden, die infolge starker Entwicklung der Endofauna verhältnismäßig reich an organischer Substanz sind. Die Sedimentpartikel sind daher gut verkittet und weisen eine relative feste Konsistenz auf. Zum Teil finden sich auf den fein- bis mittelsandigen Wattflächen auch anschlickige Sandbereiche (Reineck & Siefert 1980). Für die Sedimentverhältnisse im Arbeitsgebiet spielen die Salzgehalte bzw. der Brackwassereinfluss eine bedeutende Rolle. Die Brackwasserzone der Weser reicht seewärts über Bremerhaven hinaus und beeinflusst die auf der nördlichen Stromseite liegenden Wattgebiete (Göhren 1975). Unter günstigen Standortbedingungen bilden sich Muschelschill-Flächen, die sich durch ihre Struktur und Form deutlich von der Wattoberfläche abheben.

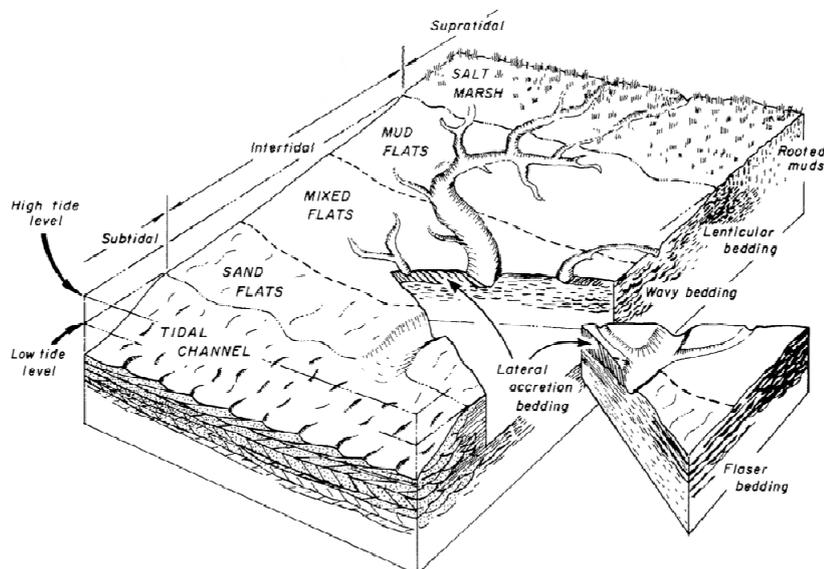


**Abb. 1-2.** Arbeitsgebiet innerhalb der südöstlichen Deutschen Bucht mit dem eulitoralen Wattgebiet zwischen Jadebucht und Elbmündung.

Das Gezeitenwatt im Arbeitsgebiet unterteilt sich nach Nyandwi & Flemming (1995) von der Küstenlinie aus in Richtung Meer in die Faziesbereiche Schlickwatt, Mischwatt sowie Sandwatt, die durch unterschiedliche Energieniveaus und Wasserbedeckungszeiten charakterisiert sind (Abb. 1-3). Eine graphische Verteilungs-Zonierung gibt Dörjes (1978) für die typischen Makrobenthonten innerhalb dieser drei Faziesbereiche (Abb. 1-4). Die typischen Vertreter des Mischwattbereiches sind demnach unter anderem *M. arenaria*, *M.*

*balthica* und *C. edule* (ehemals *Cardium edule*). Der Faziesraum Watt ist jedoch auch durch sehr kleinräumige Fazieswechsel geprägt, die das übergeordnete Muster einer entsprechenden Zonierung in Schlick-, Misch- und Sandwattbereiche durchbrechen bzw. ineinander übergehen können (Schäfer 1962; Reineck 1984).

Der Salzgehalt liegt in der Nordsee nicht über 34 ‰ auf den Watt, in der Jade und den Mündungen der Weser und Elbe sinkt er beträchtlich (Reineck 1963). Nach Böhnecke 1922 zählen die Wassermassen der südlichen Nordsee mit einem Salzgehalt < 34 ‰ zum Küstenwasser. Der mittlere Salzgehalt bei Wremen beträgt etwa 14 ‰ und steigt bis zum Dorumertief auf etwa 20 ‰ an. Die durchschnittliche Wasser-Halinität im gesamten Arbeitsbereich beläuft sich auf ca. 23 ‰ (polyhaliner Bereich). Eine Ausnahme bildet das Wasser der Elb- und Wesermündung, das halin geschichtet ist (Reineck 1963).



**Abb. 1-3.** Blockbild eines typischen Wattes. Die Sedimente werden gegen die Hochwasserlinie feinkörniger und das Watt kann in Sand-, Misch-, Schlickwatt und schließlich den Salzwiesenbereich unterteilt werden (verändert aus Dalrymple 1992).

Die Strömungsgeschwindigkeiten über den Wattgebieten der Deutschen Bucht betragen ca. 30 bis 50 cm/s, bei Sturmfluten max. 150 cm/s, in den Wattprieln zwischen 100 bis 150 cm/s (Ehlers 1988). In den Rinnen und unmittelbar an der Küste im Bereich des Nassen Strandes werden 80 cm/s überschritten (Dietrich 1950; Sager 1961). Da das Strömungsmuster im Bereich der Wattes durch die Prielverläufe bestimmt wird, können diese laut Göhren (1975) durch Windeinfluss und Triftströmungen erheblich modifiziert werden.

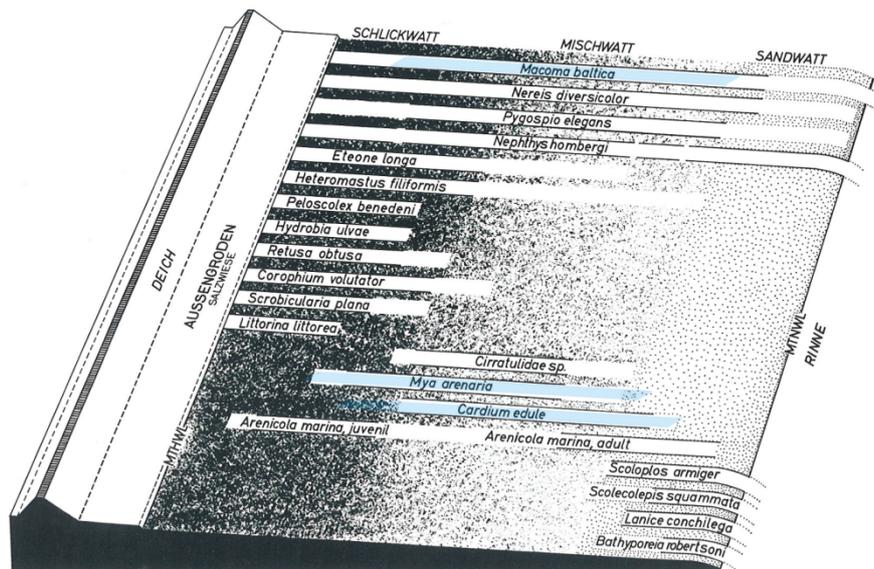
Die Wassertemperaturen in den Sommermonaten erreichen im Arbeitsgebiet um die 20 °C, in den Wintermonaten sinken die Temperaturen auf ca. 6 °C ab. Die jährliche Temperaturschwankung beträgt ca. 15 °C (Niemeyer 1972).

Die dominante Windrichtung bzw. Seegangsrichtung über dem Arbeitsgebiet ist im Jahresdurchschnitt aus Südwest bis Nordwest. In den Sommermonaten überwiegen meist



Winde aus Nordwest, im Winterhalbjahr dominieren Winde aus südwestlicher Richtung (Bruns 1955).

Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit liegt etwa bei Stufe 4 (ca. 20 bis 28 km/Std.) auf der Beaufort-Skala (Lüders & Luck 1976). Die Monate Mai bis Juli sind die windschwächsten Zeiten. Von Oktober bis Dezember treten häufig West- und Südwest-Winde der atlantischen Tiefs mit Windstärken um Bft 8 (ca. 65 km/Std.) und teilweise über Bft 10 (90 km/Std.) auf (Millat 1996a).



**Abb. 1-4.** Siedlungszonen der wichtigsten Makrobenthonten in einem Buchtenwatt zwischen mittlerer Tidenhochwasserlinie (MTHWL) und mittlerer Tidenniedrigwasserlinie (MTNWL). Das Hauptvorkommen der Tierarten liegt jeweils im Bereich der ausgezogenen schwarzen Linien; geringere Populationsdichten oder sporadische Funde sind durch nicht eingegrenzte Felder angedeutet. Die erwähnten Muschelarten im Text sind hellblau gekennzeichnet (verändert aus Dörjes 1978).

Durch die Einwirkung von Wind auf die Wasseroberfläche entstehen Wellen, deren Höhe von der Intensität und Wirkungsdauer des Windes, vom Fetch (Anlaufstrecke des Windes) sowie von der Wassertiefe abhängig ist. Die im Wattenmeer registrierten Wellenhöhen überschreiten in der Regel die Einmeter-Marke nicht (Meyer & Ragutzki 1999). Die Stürme kommen im Jahresdurchschnitt am häufigsten aus Südwest, dann aus West und aus Nordwest. Der häufigste und stärkste Seegang läuft aus nordwestlicher und westlicher Richtungen an (Bruns 1955). Bei schweren Wetterlagen kann es durch grundberührenden Seegang an vielen Stellen des Bodens zu Umlagerungen kommen (Reineck 1963).

Im Bereich der niedersächsischen Küste sind die Gezeitenverhältnisse maßgeblich von der um den in der zentralen Nordsee gelegenen Amphidromienpunkt rotierenden Gezeitenwelle bestimmt, die sich von West nach Ost gegen den Uhrzeigersinn bewegt (Meyer & Ragutzki 1999). Die Gezeitenwelle ruft eine Wasserstandsschwankung von 2,4 m in der freien See hervor. In den Ästuaren wird dieser Wert übertroffen. Der größte Tidenhub innerhalb der Deutschen Bucht besteht in der Jade mit 3,6 m (Reineck 1963). Der mittlere Gezeitenhub

(Tidenhub) in diesen Wattgebieten beträgt im nördlichen Untersuchungsbereich 3,3 m, im südlichen 3,6 m und entspricht somit einem makrotidal Regime (Niemeyer & Kaiser 1998). Nach Meyer & Ragutzki (1999) kann der Tidenhub zwischen Jade und Cuxhaven bis zu 3,9 m betragen. Die mittleren Tideniedrigwasserstände betragen 3,1 bis 3,3 m, die mittleren Tidehochwasserstände liegen zwischen 6,5 und 6,7 m (bezogen auf Pegel Null; nach Lassen & Siefert 1991).

## Untersuchungsobjekt *Mya arenaria*

Die *M. arenaria* wird der Ordnung Desmodonta zugeordnet und in die Oberfamilie der Myacea bzw. in die Familie der Myidae gestellt. Ihr Auftreten ist seit dem Oligozän bekannt. Charakteristisch ist das kräftige, interne Ligament sowie die langen, relativ dicken vereinigten Siphonen (Tafel 1-2 C bis F).

Die Muschelart *M. arenaria* (auch Sandklaffmuschel) ist in europäischen, küstennahen Gewässern eine eingewanderte Spezies (Petersen et al. 1992). Laut Strasser (1999a) stammt die Muschelgattung ursprünglich von der atlantischen Küste Nordamerikas und wurde noch vor Kolumbus durch die Wikinger in den Nordseeraum eingeschleppt.

Petersen et al. (1992) datierten ein erstes Auftreten der Muschel vor Dänemark mit  $720 \pm 80$  Jahren vor heute (B. P.). Für die südliche Ostsee wurde dagegen ein erstes Auftreten von *M. arenaria* durch Behrends et al. (2005) mit  $1300 \pm 70$  A. D. datiert.

Mit einer Klappenlänge von bis zu 15 cm ist die *M. arenaria* eine der größten endobenthisch lebende, doppelklappige Bivalvenart im zentralen Bereich des Deutschen Wattenmeeres (Linke 1939; Nordsieck 1969). Vermutlich ist es der *M. arenaria* daher auch möglich, bedingt durch ihre ursprüngliche Abstammung, sich an unterschiedliche Salinitäten, Temperaturen und Substraten anzupassen (Beres & Pierce 1981; Jones et al. 1989). Sowohl die linke als auch die rechte Schalenklappe besitzt eine annähernde und in etwa gleich große elliptische Form (Abb. 1-5a & b). Die Außenoberfläche zeigt konzentrische, feine Wachstumslinien (Hayward & Ryland 1995, s. Abb. 1-5b). Die *M. arenaria* kann durchschnittlich ein Alter von 10 bis 12 Jahren erreichen (Brousseau 1978a, b). Ein maximales Alter von 28 Jahren ist in Kanada beschrieben worden (MacDonald & Thomas 1980).

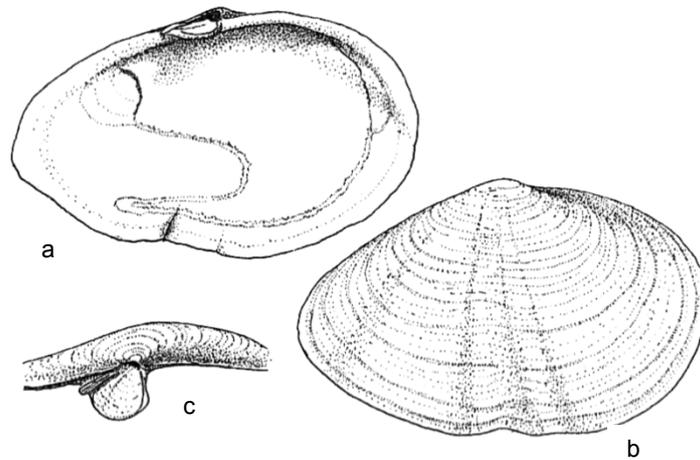
Der Wirbel liegt in der Nähe des Schalenzentrums und tritt nicht besonders hervor. Der Hinterrand der Schale ist mehr oder weniger abgestützt (Müller 1993). Die linke Klappe besitzt einen charakteristischen Ligamentlöffel (Chondrophor) der in einem rechten Winkel zur Schale absteht (Abb. 1-5c). Dieses am Rand befindliche Scharnier ist desmodont und besitzt keine Zähne. Die Schließmuskeln der Muschel sind zwei geteilt und bestehen aus einem vorne gelegenen langen, dünnen sowie einem hinten gelegenen kurzen und runden Muskel. Die Schließmuskelabdrücke der *M. arenaria* sind heteromya geformt, so dass der vordere einen länglichen, der hintere einen ovalen Umriss zeigt.

Charakteristisch ist die tiefe Manteleinbuchtung (sinuspalliat, Abb. 1-5a). Die aragonitische Schale besteht im inneren Teil aus einer komplizierten kreuzlamina Schichtung. Die Außenschicht besitzt dagegen eine raue lamina Oberfläche (Kennedy et al. 1969; MacDonald & Thomas 1980).

Die *M. arenaria* Schale zählt zu den homogenen Klappentypen und besteht aus scheinbar zufällig orientierten Kristallen. Diese homogene Schalenstruktur ist sehr hart und findet sich vorwiegend bei grabenden, endobenthisch lebenden Bivalven (Dodd & Stanton 1990). Der Schalenaufbau steht also im engen Zusammenhang mit der Lebensweise der *M. arenaria* und den einwirkenden Umwelteinflüssen (Dodd & Stanton 1990).

Im Gegensatz zu den ebenfalls heimischen Muschelarten *Mytilus edulis* (Miesmuschel), die mit versponnenen Bysussfäden sessil in Miesmuschelbänken auf dem Wattsediment zu

finden ist sowie der *Cerastoderma edule* (Herzmuschel) die freibeweglich in der obersten Schicht (2 bis 3 cm Tiefe) der Wattböden anzutreffen ist, lebt die *M. arenaria* je nach Alter in verschiedenen Bodentiefen (Kühl 1954).



**Abb. 1-5.** *Mya arenaria* Schale. Innere Ansicht der linken Klappe (a) und äußere Ansicht der rechten Klappenseite (b). Desmodontes Schloss mit Ligamentlöffel (c). Abbildung verändert aus Hayward & Ryland (1995).

Die kleinsten d. h. jüngsten Individuen sind noch freibeweglich, später mit steigendem Lebensalter wächst der Siphon mit zunehmender Schalenlänge mit, so dass die Muschel sesshaft werden und in einer Sedimenttiefe von 15 bis 30 cm anzutreffen sind (Richter 1922; Kühl 1950). Die Besiedlungsdichte nimmt mit zunehmendem Muschelalter ab, so dass bei einer Klappenlänge von 6 bis 13 cm häufig nur noch 30 bis 150 Ind./m<sup>2</sup> anzutreffen sind (Kühl 1951).

Durch ihre endobenthische Lebensweise sind die Muscheln durch äußere Einflüsse wie beispielsweise Wind, Wellen und Nahrungsräuber gut geschützt (Tafel 1-2 C & D). Dieser Lebensraum kann jedoch allmählich durch Prielverlagerung, Sturmereignisse oder rasche Überdeckung mit Schlack oder Sand gestört werden. Tritt dies ein, so sind die Muscheln nicht mehr fähig mittels ihres einziehbaren, bis zu ca. 30 cm langen Siphons den Verbindungsweg zu dem Sauerstoff und Nährstoffreichen Meereswasser freizuhalten. Die Folge ist ein abruptes, lokales und gleichzeitiges Massenabsterben mehrerer Individuen eines Siedlungshorizontes (Tafel 1-3 A & B). Durch ihre Siedlungsweise im Sediment behalten die Muscheln nach ihrem Ableben ihre Lebensstellung bei (Tafel 1-3 C bis F). Diese postmortale, im Sediment eingebettete Ruhelage kann bedingt durch Sturmereignisse und folgender Erosion freigelegt werden, so dass die Doppelklappen der *M. arenaria* aus ihren ehemaligen Siedlungshorizonten freierodiert und als Einzelklappen einen lateralen Transport erfahren.

Die im Sediment eingebetteten *M. arenaria*, ob als postmortale Doppelklappen in Lebensstellung oder als verfrachtete Einzelklappen, unterliegen im Wattenmeer hydrodynamischen, geologischen sowie sedimentologischen Prozessen.

Größenhäufigkeitsuntersuchungen an *M. arenaria* Klappen wurden beispielweise von Brousseau (1978a), Brousseau & Baglivo (1987), Jones et al. (1989), Cadeé (1989, 1992) und Strasser et al. (1999b) durchgeführt. Untersuchungen zur Frachtsortierungen von disartikulierten *M. arenaria* Schalenhälften führten z. B. Richter (1922, 1924), Schäfer (1962) und Cadeé (1992) durch.



---

**Literaturverzeichnis**

- Abbott, S. T. (1997) Mid-cycle condensed shell bed from mid-Pleistocene cyclotherms, New Zealand: Implications for sequence architecture. *Sedimentology*, 44, 805-824.
- Aigner, T. (1977) Schalenpflaster im Unteren Hauptmuschelkalk bei Crailsheim (Württ., Trias, mo1) - Stratinomie, Ökologie, Sedimentologie. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 153, 193-217.
- Alexandrowicz, S. W. (1977) A Quantitative study of the origin of *Dreissena polymorpha* shell accumulations in Szczecin Bay, Baltic Sea. *Serie des Sciences de la Terre*, XXV, 75-82.
- Alexandrowicz, S. W. (2001) Mollusc shell accumulations in north-eastern alpine rivers and lakes. *Earth Sciences*, 49, 165-175.
- Alexandrowicz, S. W. & Florek, W. (1999) Shell accumulations in the recent and ancient littoral zone of the Gardno Lake (Northern Poland). *Earth Sciences*, 47, 227-237.
- Allen, J. R. L. (1990) Transport - Hydrodynamics. Shells. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 227-230, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Anderson, L. C. & McBride, R. A. (1996) Taphonomic and paleoenvironmental evidence of Holocene shell-bed genesis and history on the northeastern Gulf of Mexico Shelf. *Palaios*, 11, 532-549.
- Ball, D. F. (1976) Close-packed patterned arrangement of stones and shells on shore-line platforms. *Biuletyn Peryglacialny*, 25, 5-7.
- Behrends, B., Hertweck, G., Liebezeit, G. & Goodfriend, G. A. (2005) Earliest Holocene occurrence of the soft-shell clam, *Mya arenaria*, in the Greifswalder Bodden, southern Baltic. *Marine Geology*, 216, 79-82.
- Beres, L. S. & Pierce, S. K. (1981) The effects of salinity on the electrophysiological properties of *Mya arenaria* neurons. *Journal of Comparative Physiology B*, 144, 165-173.
- Best, M. M. R. & Kidwell, S. M. (2000a) Bivalve taphonomy in tropical mixed siliciclastic-carbonate settings. I. Environmental variation in shell condition. *Paleobiology*, 26, 80-102.
- Best, M. M. R. & Kidwell, S. M. (2000b) Bivalve taphonomy in tropical mixed siliciclastic-carbonate settings. II. Effect of bivalve life habits and shell types. *Paleobiology*, 26, 103-115.
- Böhnecke, G. (1922) Salzgehalt und Strömungen der Nordsee. *Veröffentlichungen des Instituts für Meereskunde an der Universität Berlin. A, Geographisch-Naturwissenschaftliche Reihe*, 10, 34.
- Bonnot-Courtois, C., Fournier, J. & Dreau, A. (2004) Recent morphodynamics of shell banks in the western part of Mont-Saint-Michel Bay (France). *Geomorphologie*, 1, 65-80.
- Boyer, D. & Droser, M. L. (2003) Shell beds of the Kanosh and Lehman Formations of western Utah: Paleocological and paleoenvironmental interpretations. *Birgham Young University Geology Studies In Geology*, 47, 1-15.
- Brandt, D. S. (1989) Taphonomic grades as a classification for fossiliferous assemblages and implications for paleoecology. *Palaios*, 4, 303-309.
- Brenchley, P. J. & Newall, G. (1970) Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 7, 185-220.
- Brett, C. E. (1995) Sequence stratigraphy, biostratigraphy, and taphonomy in shallow marine environments. *Palaios*, 10, 597-616.

- Brett, C. E. (1998) Sequence stratigraphy, paleoecology, and evolution; biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaios*, 13, 241-262.
- Brett, C. E. & Baird, G. C. (1986) Comparative taphonomy; a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, 1, 207-227.
- Brett, C. E. & Bordeaux, Y. L. (1990) Taphonomy of brachiopods from a middle Devonian shell bed: Implications for the genesis of skeletal accumulations. In: MacKinnon, D. I., Lee, D. E. & Campbell, J. D. (Eds.), *Brachiopods through time*, 219-226, Balkema, Rotterdam.
- Brett, C. E. & Seilacher, A. (1991) Fossil-Lagerstätten: A taphonomic consequence of event sedimentation. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. 283-297, Springer, New York, Berlin, Heidelberg.
- Brett, C. E., Baird, G. C. & Speyer, S. E. (1997) Fossil Lagerstätten: Stratigraphic record of paleontological and taphonomic events. In: Brett, C. E. & Baird, G. C. (Eds.), *Paleontological events: Stratigraphic, ecological, and evolutionary implications*, 3-40, Columbia University Press, New York.
- Brousseau, D. J. (1978a) Spawning cycle, fecundity, and recruitment in a population of soft-shell clam, *Mya arenaria*, from Cape Ann, Massachusetts. *Fishery Bulletin*, 76, 155-166.
- Brousseau, D. J. (1978b) Population dynamics of the soft-shell clam *Mya arenaria*. *Marine Biology*, 50, 63-71.
- Brousseau, D. & Baglivo, J. (1987) A comparative study of age and growth in *Mya arenaria* (soft-shell clam) from three populations in Long Island Sound. *Journal of Shellfish Research*, 6, 17-24.
- Bruns, E. (1955) *Handbuch der Wellen, der Meere und Ozeane*. Veröffentlichungen des Seehydrographischen Dienstes DDR, Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 246.
- Cadée, G. C. (1984) Macrobenthos and macrobenthic remains on the Oyster Ground, North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 18, 160-178.
- Cadée, G. C. (1989) Size-selective transport of shells by birds and its palaeoecological implications. *Palaeontology*, 32, 429-437.
- Cadée, G. C. (1992) Eolian transport and left/right sorting of *Mya* shells (Mollusca, Bivalvia). *Palaios*, 7, 198-202.
- Cadée, G. C. (1994a) *Mya* shell manipulating by turnstones (Aves) results in concave-up position and left/right sorting. *Palaios*, 9, 307-309.
- Cadée, G. C. (1994b) Floating shells, Dutch Wadden Sea. *Journal of Paleontology*, 68, 903-904.
- Cadée, G. C. (1994c) Eider, shelduck, and other predators, the main producers of shell fragments in the Wadden Sea, palaeoecological implications. *Palaeontology*, 37, 181-202.
- Cadée, G. C. (1995) Birds as producers of shell fragments in the Wadden Sea, in particular the role of the Herring Gull. *Geobios*, 18, 77-85.
- Cadée, G. C. (2002) Floating articulated bivalves, Texel, North Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183, 355-359.
- Cadée, G. C. & Wesselingh, F. (2005) Van levend schelpdier naar fossiele schelp: Taphonomie van Nederlandse strandschelpen. *Spirula*, 343, 36-52.
- Cantalamesa, G. & Di Celma, C. (2005) Sedimentary features of tsunami backwash deposits in a shallow marine Miocene setting, Mejillones Peninsula, northern Chile. *Sedimentary Geology*, 178, 259-273.



- Carroll, M., Kowalewski, M., Simões, M. G. & Goodfriend, G. A. (2003) Quantitative estimates of time-averaging in terebratulid brachiopod shell accumulations from a modern tropical shelf. *Palaeobiology*, 29, 381-402.
- Cuffe, C. K., Gibbs, A. E. & Allmon, W. D. (1991) Taphonomic signature of shell accumulations in cores: Indicator of depositional environments in Holocene nearshore sediments, west central Florida. *Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies*, XLI, 123-131.
- Cummins, R. H. (1994) Taphonomic processes in modern freshwater molluscan death assemblages: Implications for the freshwater fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 55-73.
- Cutler, A. H. (1995) Taphonomic implications of shell surface textures in Bahia la Choya, northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 114, 219-240.
- Dalrymple, R. W. (1992) Tidal depositional systems. In: Walker, R. G. & James, N. P. (Eds.), *Facies models - response to sea level change*. 195-218, Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland.
- Davies, D. J., Powell, E. N. & Stanton, R. J. (1989b) Taphonomic signatures as a function of environmental process: Shells and shell beds in a hurricane-influenced inlet on the Texas coast. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, 317-356.
- Dege, W. (1941) Landformende Vorgänge im eisnahen Gebiet Spitzbergens. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, Heft 3, 11-122.
- Di Celma, C., Ragaini, L., Cantalamessa, G. & Curzio, P. (2002) Shell concentrations as tools in characterizing sedimentary dynamics at sequence-bounding unconformities: Examples from the lower unit of the Canoa Formation (Late Pliocene, Ecuador). *Geobios*, 25, 72-85.
- Dietrich, G. (1950) Die natürlichen Regionen von Nord- und Ostsee auf hydrographischer Grundlage. *Kieler Meeresforschung*, 7, 35-69.
- Dionne, J. C. (1971) Vertical packing of flat stones. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 1585-1591.
- Dodd, J. R. & Stanton, R. J. (1990) *Paleocology, concepts and applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, 502 pp.
- Dominici, S. (2004) Quantitative taphonomy in sandstones from an ancient fan delta system (Lower Pleistocene, Western Emilia, Italy). *Palaios*, 19, 193-205.
- Donato, S. V., Reinhardt, E. G., Boyce, J. I., Rothaus, R. & Vosmer, T. (2008) Identifying tsunami deposits using bivalve shell taphonomy. *Geology*, 36, 199-202.
- Dörjes, J. (1978) Das Watt als Lebensraum. In: Reineck, H.-E. (Ed.), *Das Watt - Ablagerungs- und Lebensraum*, Dritte Auflage, 107-143, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M.
- Dörjes, J. (1987) Postglaziale Schillablagerungen südlich der Doggerbank (Nordsee). *Natur und Museum*, 117, 190-196.
- Dörjes, J., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1986) Origins of, and mechanisms for mollusk shell accumulations on Georgia Beaches. *Senckenbergiana Maritima*, 18, 1-43.
- Ehlers, J. (1988) *The morphodynamics of the Wadden Sea*. Balkema, Rotterdam, 397 pp.
- Eisma, D., Mook, W. G. & Laban, C. (1981) An early Holocene tidal flat in the Southern Bight. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 5, 229-237.
- Emery, K. O. (1968) Positions of empty pelecypod valves on the continental shelf. *Sediment Petrology*, 38, 1264-1269.

- Ensom, P. C. (1984) Vertical packing of oyster shells in the Cinder Bed of Worbarrow Tout. *Proceedings of the Dorset Natural History And Archaeological Society – Natural History Reports*, 105, 167-168.
- Etter, W. (1994) *Palökologie. Eine methodische Einführung*. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 294 pp.
- Faupl, P. (2003) *Historische Geologie. Eine Einführung*. 2. verbesserte Auflage, Facultas, Wien, 271 pp.
- Flemming, B. W., Schubert, H., Hertweck, G. & Müller, K. (1992) Bioclastic tidal-channel lag deposits: A genetic model. *Senckenbergiana Maritima*, 22, 109-129.
- Flemming, B. W., Bartholomä, A., Irion, G., Kröncke, I. & Wehrmann, A. (2002) *Naturraum Wattenmeer*. Akademie der Geowissenschaften zu Hannover Veröffentlichungen, 20, 150-159.
- Flessa, K. W. (1998) Well-travelled cockles: Shell transport during Holocene transgression of the southern North Sea. *Geology*, 26, 187-190.
- Flessa, K. W. (2002) Conservation paleobiology. *American Paleontologists*, 10, 2-5.
- Flessa, K. W., Cutler, A. H. & Meldahl, K. H. (1993) Time and taphonomy: Quantitative estimates of time-averaging and stratigraphic disorder in a shallow marine habitat. *Paleobiology*, 19, 266-286.
- Flessa, K. W. & Kowalewski, M. (1994) Shell survival and time-averaging in nearshore and shelf environments: Estimates from the radiocarbon literature. *Lethaia*, 27, 1-13.
- Frey, R. W. & Dörjes, J. (1988) Fair- and foul-weather shell accumulations on a Georgia Beach. *Palaios*, 3, 561-576.
- Fürsich, F. T. (1984) Distribution patterns of benthic associations in offshore shelf deposits (Upper Jurassic, Central East Greenland). *Geobios*, 8, 75-84.
- Fürsich, F. T. (1990) Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D. E. G. & Crowther, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 235-239. Blackwell Scientific, Oxford.
- Fürsich, F. T. (1995) Shell concentrations. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 88, 643-655.
- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: Paleoenviromental analysis despite the perils of preservation. *Palaios*, 2, 543-559.
- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1991) The origin and interpretation of Bahia la Choya (northern Gulf of California) taphocoenoses: Implications for paleoenvironmental analysis. *Zitteliana*, 18, 165-170.
- Fürsich, F. T., Oschmann, W., Jaitly, A. K. & Singh, I. B. (1991) Faunal response to transgressive-regressive cycles: Example from the Jurassic of western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 85, 149-159.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (1999) Genesis and environmental significance of upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145, 119-139.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (2003) Sequence stratigraphic significance of sedimentary cycles and shell concentrations in the upper Jurassic lower Cretaceous of Kachchh, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 285-309.

- Futterer, E. (1974) Untersuchungen zum Einsteuerungsverhalten der Einzelklappen von *Cardium echinatum* L. und *Cardium edule* L. im Strömungskanal. Neues Jahrbuch Geologische Paläontologische Monatshefte, 8, 449-455.
- Futterer, E. (1975) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975, 83-89.
- Futterer, E. (1976) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil II, Paläontologie, 5/6, 261-271.
- Futterer, E. (1977) Einreglung, Transport und Ablagerung biogener Hartteile im Strömungskanal. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tübingen, 133 pp.
- Göhren, H. (1975) Zur Dynamik und Morphologie der hohen Sandbänke im Wattenmeer zwischen Jade und Eider. Die Küste, 27, 28-49.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1966) Morphology and evolution of inshore shell ridges and mud-mounds on modern intertidal flats near Bradwell, Essex. Proceedings of the Geologists Association Geological Society Publishing House, 77, 329-346.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1968) Imbricate structure in Essex offshore shell banks. Nature, 220, 1115-1116.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1969) The origin of Holocene shell deposits in the chenier plain facies of Essex (Great Britain). Marine Geology, 7, 403-425.
- Gregory, J. W. (1930) Stone polygones beside Loch Lomond. The Geographical Journal, 76, 415-418.
- Grinnell, R., Jr. (1974) Vertical orientation of shells on some Florida oyster reefs. Journal of Sedimentary Petrology, 44, 116-122.
- Hallman, D. P., Flessa, K. W., Kowalewski, M., Hertweck, G., Aggen, J. A. & Carlton, J. (1996) Ternary taphograms and the comparative taphonomy of recent mollusks from the North Sea and the Gulf of California. Senckenbergiana Maritima, 27, 67-75.
- Hanamgond, P. T. (2001) Coastal photo by P.T. Hanamgond. Journal of Coastal Research, 17, 140-142.
- Häntzschel, W. (1939) Schlick-Gerölle und Muschel-Klappen als Strömungs-Marken im Wattenmeer. Natur und Volk, 119, 412-417.
- Hayward, P. J. & Ryland, J. S. (1995) Handbook of the marine fauna of north-west Europe. Oxford University Press, Oxford, 800 pp.
- Hecht, F. (1930) Ausgeworfene Muscheln (*Mya arenaria* L.) in Lebensstellung, zur Beurteilung eines Beweismittels in der Küstensenkungs-Frage. Senckenbergiana, 12, 261.
- Helbig, C. (1991) Zwischen Land und See. Nationalpark, 2/91, 60-63.
- Hertweck, G. (1971) Aktuopaläontologische Urkunden, 1. *Polydora ciliata* auf lebenden Herzmuscheln. Natur und Museum, 101, 458-466.
- Hertweck, G. (1979a) Aufwuchs von Seepocken auf Hartteilen anderer Tiere, Teil I. Natur und Museum, 109, 305-311.
- Hertweck, G. (1979b) Aufwuchs von Seepocken auf Hartteilen anderer Tiere, Teil II. Natur und Museum, 109, 361-367.
- Hertweck, G. & Liebezeit, G. (2002) Historic mussel beds (*Mytilus edulis*) in the sedimentary record of a back-barrier tidal flat near Spiekeroog Island, southern North Sea. Helgoland Marine Research, 56, 51-58.

- Hollmann, R. (1968a) Zur Morphologie rezenter Molluskenbruchschille. *Paläontologische Zeitschrift*, 42, 217-235.
- Hollmann, R. (1968b) Über Schalenabschliff bei *Cardium edule* aus der Königsbucht bei List auf Sylt. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 18, 169-193.
- Jessen, W. (1932) Über rezente und fossile Organismenpflaster. *Paläontologische Zeitung*, 14, 67.
- Jessen, W. (1933) Die postdiluviale Entwicklung Amrums und seine subfossilen und rezenten Muschelpflaster. *Jahrbuch preußische-geologische Landesanstalt*, 53, 1-69.
- Jiménez, A. P. & Braga, J. C. (1993) Occurrence and taphonomy of bivalves from the Níjar reef (Messinian, Late Miocene, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 102, 239-251.
- Jones, J. R., Cameron, B. & Rollins, H. B. (1989) Paleoeological implications for cohort survivorship for *Mya arenaria* in Massachusetts estuarine waters. *Palaios*, 4, 468-474.
- Kennedy, W. J., Taylor, J. D. & Hall, A. (1969) Environmental and biological controls on bivalve shell mineralogy. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 44, 499-529.
- Kidwell, S. M. (1986) Models for fossil concentrations: Paleobiologic implications. *Palaeobiology*, 12, 6-24.
- Kidwell, S. M. (1988) Taphonomic comparison of passive and active continental margins: Neogene shell beds of the Atlantic coastal plain and northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 201-223.
- Kidwell, S. M. (1989) Stratigraphic condensation of marine transgressive records: Origin of major shell deposits in the Miocene of Maryland. *The Journal of Geology*, 97, 1-23.
- Kidwell, S. M. (1991) The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record. Topics in Geobiology*, 9, 211-290, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M. (2002a) Mesh-size effects on the ecological fidelity of death assemblages: A meta-analysis of molluscan live–dead studies. *Geobios*, 24, 107-119.
- Kidwell, S. M. (2002b) Time-averaged molluscan death assemblages: Palimpsests of richness, snapshots of abundance. *Geology*, 30, 803-806.
- Kidwell, S. M. & Jablonski, D. (1983) Taphonomic feedback: Ecological consequences of shell accumulation. In: Tevesz, M. J. S. & McCall, P. L. (Eds.), *Biotic interaction in recent and fossil benthic communities*. 195–248, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M., Fürsich, F. T. & Aigner, T. (1986) Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, 1, 228-238.
- Kidwell, S. M. & Bosence, D. W. J. (1991) Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record. Topics in Geobiology*, 9, 115-209, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M. & Brenchley, P. J. (1994) Patterns in bioclastic accumulation through the Phanerozoic; changes in input or in destruction? *Geology*, 22, 1139-1143.
- Kidwell, S. M., Rothfus, T. A. & Best., M. M. R. (2001) Sensitivity of taphonomic signatures to sample size, damage scoring system, and target taxa. *Palaios*, 16, 26-52.
- Kostyaev, A. G. (1973) Some rare varieties of stone circles. *Biuletyn Peryglacjalny*, 22, 347-352.

- Kowalewski, M., Flessa, K. W. & Aggen, J. A. (1994) Taphofacies analysis of recent shelly cheniers (Beach Ridges), northeastern Baja California, Mexico. *Facies*, 31, 209-242.
- Kowalewski, M., Goodfriend, G. A. & Flessa, K. W. (1998) High-resolution estimates of temporal mixing within shell beds: The evils and virtues of time-averaging. *Paleobiology*, 24, 287-304.
- Kowalewski, M., Serrano, G. E. A., Flessa, K. W. & Goodfriend, G. A. (2000) Dead delta's former productivity: Two trillion shells at the mouth of the Colorado River. *Geology*, 28, 1059-1062.
- Kowalewski, M., Lasso, D. G. & Carroll, M. (2003) Quantitative fidelity of brachiopod-mollusk assemblages from modern subtidal environments of San Juan Islands, USA. *Journal of Taphonomy*, 1, 43-65.
- Kühl, H. (1950) Studien über die Sandklaffmuschel *Mya arenaria*: Die Gewinnung der Klaffmuschel an der deutschen Nordseeküste in den Jahren 1945-1949. Aus dem Institut für Küsten- und Binnenfischerei der Bundesforschungsanstalt für Fischerei, 25-39.
- Kühl, H. (1951) Über die Siedlungsweise von *Mya arenaria*. Sonderdruck aus "Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Wilhelmshaven 1951", 385-391.
- Kühl, H. (1954) Studien über die Klaffmuschel *Mya arenaria*: Das Junggut. Aus dem Institut für Küsten- und Binnenfischerei der Bundesforschungsanstalt für Fischerei, 6, 33-44.
- Lassen, H. & Siefert, W. (1991) Mittlere Tidenwasserstände in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 52, 85-137.
- Linke, O. (1939) Die Biota des Jadebusenwattes. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1, 201-348.
- Lockwood, R. & Work, L. A. (2006) Quantifying taphonomic bias in molluscan death assemblages from the upper Chesapeake Bay: Patterns of shell damage. *Palaios*, 21, 442-450.
- Lüders, K. (1929) Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebbiträchtern der Außenjade. *Senckenbergiana*, 11, 123-142.
- Lüders, K. & Luck, G. (1976) Kleines Küstenlexikon. *Natur und Technik an der deutschen Nordseeküste*. 3 Auflage, Hildesheim, pp. 240.
- MacDonald, B. A. & Thomas, M. L. H. (1980) Age determination of the soft-shell clam *Mya arenaria* using shell internal growth lines. *Marine Biology*, 58, 105-109.
- Mandic, O. & Piller, W. E. (2001) Pectinid coquinas and their palaeoenvironmental implications - Examples from the early Miocene of northeastern Egypt. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 172, 171-191.
- McKittrick, M. A. (1987) Experiments on the settling of gastropods and bivalve shells: Biostratigraphic implications. In: Flessa, K. W. (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene inter-tidal deposits Gulf of California*, 150-163, The Palaeontological Society, Tucson, Arizona.
- Meldahl, K. (1993) Geographic gradients in the formation of shell concentrations: Plio-Pleistocene marine deposits, Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 101, 1-25.
- Meldahl, K. (1995) Pleistocene shoreline ridges from tide-dominated and wave-dominated coast: Northern Gulf of California and western Baja California, Mexico. *Marine Geology*, 123, 61-72.
- Meldahl, K. H. & Flessa, K. W. (1990) Taphonomic pathways and comparative biofacies and taphofacies in a recent intertidal/shallow shelf environment. *Lethaia*, 23, 43-60.
- Meldahl, K. H. & Cutler, A. H. (1992) Neotectonics and taphonomy: Pleistocene molluscan shell accumulations in the northern Gulf of California. *Palaios*, 7, 187-197.

- Meldahl, K. H., Flessa, K. W. & Cutler, A. H. (1997) Time-averaging and postmortem skeletal survival in benthic fossil assemblages: Quantitative comparisons among Holocene environments. *Paleobiology*, 23, 207-229.
- Meyer, C. & Ragutzki, G. (1999) KFKI Forschungsvorhaben Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse. Dienstbericht Forschungsstelle Küste, Norderney, 21, 38 pp.
- Mii, H. (1957) Peculiar accumulation of drifted shells. *Saito Ho-on Kai Museum Research Bulletin*, 26, 17-24.
- Millat, G. (1996) Entwicklung eines methodisch-inhaltlichen Konzeptes zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring im niedersächsischen Wattenmeer. Schriftenreihe der Nationalparkverwaltung „Niedersächsisches Wattenmeer“, 1, Wilhelmshaven, 125 pp.
- Moffat, H. & Bottjer, D. (1999) Echinoid concentration beds: Two examples from the stratigraphic spectrum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 149, 329-348.
- Mount, J. F. & Kidder, D. (1993) Combined flow origin of edgewise intraclast conglomerates: Sellick Hill Formation (Lower Cambrian), south Australia. *Sedimentology*, 40, 315-329.
- Müller, A. H. (1992) Lehrbuch der Paläozoologie. Band I: Allgemeine Grundlagen. 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Fischer Verlag, Jena, 514 pp.
- Müller, A. H. (1993) Lehrbuch der Paläozoologie. Band II: Invertebraten. Teil 1 Protozoa - Mollusca 1. 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Fischer Verlag, Jena, 685 pp.
- Nagle, J. S. (1967) Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Research*, 37, 1124-1138.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2002) Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Marine Geology*, 185, 435-469.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2003) Sedimentology of coarse-clastic beach-ridge deposits, Essex, southeast England. *Sedimentary Geology*, 162, 167-198.
- Nebelsick, J. H. (1992) Echinoid distribution by fragment identification in the northern bay of Safaga, Red Sea, Egypt. *Palaios*, 7, 316-328.
- Nebelsick, J. H. & Kroh, A. (2002) The stormy path from life to death assemblages: The formation and preservation of mass accumulations of fossil Sand Dollars. *Palaios*, 17, 378-393.
- Niemeyer, H. D. (1972) Ostfriesische Inseln. Sammlung Geographischer Führer, Band 8, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 183 pp.
- Niemeyer, H. D., Goldenbogen, R., Schroeder, E. & Kunz, H. (1995) Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. *Die Küste*, 57, 66-93.
- Niemeyer, H. D. & Kaiser, R. (1998) Hydrodynamik als ökosystemarer Gestaltungsfaktor im Wattenmeer. *Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaften*, 20, 45-62.
- Nordsieck, F. (1969) Die europäischen Meeresmuscheln (Bivalvia): Vom Eismeer bis Kapverden, Mittelmeer und Schwarzes Meer. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 256 pp.
- Nyandwi, N. & Flemming, B. W. (1995) A hydraulic model for the shore-normal energy gradient in the East Frisian Wadden Sea (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima*, 25, 163-171.

- Parsons, K. M. (1989) Taphonomy as indicator of environment: Smuggler's Cove, St. Croix, U.S. V.I. In: Hubbard, D. K. (Ed.), *Terrestrial and marine ecology of St. Croix, U.S. Virgin Islands*, 135-143, West Indies Laboratory Special Publication, St. Croix.
- Petersen, K. S., Rasmussen, K. L., Heinemeier, J. & Rud, N. (1992) Clams before Columbus? *Nature*, 359, 679.
- Powell, E. N., Davies, D. J. & Stanton, R. J. (1987) Taphonomic signature as a function of environmental process: A quantitative approach to biostratigraphy. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 19, 809.
- Powell, E. N., Staff, G. M., Davies, D. J. & Callender, W. R. (1989) Macrobenthic death assemblages in modern marine environments: Formation, interpretation, and application. *CRC Critical Reviews in Aquatic Sciences*, 1, 555-589.
- Pratje, O. (1929) Fazettieren von Molluskenschalen. *Paläontologische Zeitung*, 11, 151.
- Quaresma, V. d. S., Bastos, A. C. & Amos, C. L. (2007) Sedimentary processes over an intertidal flat: A field investigation at Hythe flats, Southampton Water (UK). *Marine Geology*, 241 117-136.
- Reineck, H.-E. (1963) Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. *Abhandlung der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 505, 1-138.
- Reineck, H.-E. (1984) *Aktuo-Geologie, klastische Sedimente*, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M., 348 pp.
- Reineck, H.-E. & Siefert, W. (1980) Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuerker Watt. *Die Küste*, 35, 26-51.
- Richter, R. (1922) Die Lage schüsselförmiger Körper bei der Einbettung. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. III-VI. *Senckenbergiana*, 4, 105-137.
- Richter, R. (1924) Weiteres zur Verschieden-Häufigkeit der beiden Klappen einer Spezies bei Muscheln und Brachiopoden. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. VII-XI. *Senckenbergiana*, 6, 119-163.
- Richter, R. (1942) Die Einkippungsregel. *Senckenbergiana*, 25, 181-206.
- Sager, G. (1961) Die Größtgeschwindigkeiten der Gezeitenströme zur mittleren Springzeit in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Beiträge der Meereskunde, Band 1*, Berlin, 19-26.
- Salazar-Jimenez, A., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1982) Concavity orientations of bivalve shells in estuarine and nearshore shelf sediments, Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, 566-586.
- Sanderson, D. J. & Donovan, R. N. (1974) The vertical packing of shells and stones on some recent beaches. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 680-688.
- Schäfer, W. (1941) Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres – 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens – 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 457, 1-54.
- Schäfer, W. (1962) *Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee*. *Senckenberg-Buch*, 41, Frankfurt a. M., 666 pp.
- Schäfer, W. (1970) *Aktuopaläontologische Beobachtungen – 9. Faunenwechsel*. *Senckenbergiana Maritima*, 2, 85-102.
- Schmitthenner, H. (1930) Der Wutaischan. Eine Reise auf den heiligen Berg des Windes in Nordchina. *Mitteilung der Gesellschaft für Erdkunde zu Leipzig*, 50, 5-23.

- Schneider-Storz, B., Nebelsick, J. H., Wehrmann, A. & Federolf, C. M. J. (2008) Comparative taphonomy of three bivalve species from a mass shell accumulation in the intertidal regime of North Sea tidal flats. *Facies*, 54, 461-478.
- Schubert, H. (1990) Entstehung, Vorkommen und Nutzung sublitoraler Schillanreicherungen im Gebiet um Spiekeroog. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Clausthal-Zellerfeld, 190 pp.
- Seilacher, A. (1970) Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten (Fossil-Lagerstätten No 1). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatsheft* 1970, 34-39.
- Seilacher, A. (1973) Biostratinomy: The sedimentology of biologically standardized particles. In: Ginsburg, R. N. (Ed.), *Evolving concepts in sedimentology*, 21, 159-177, John Hopkins University Press, Baltimore.
- Seilacher, A. & Meischner, D. (1965) Fazies-Analyse im Paläozoikum des Oslo-Gebiets. *Geologische Rundschau*, 54, 596-619.
- Seilacher, A., Reif, W. E. & Westphal, F. (1985) Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil Lagerstätten. In: Whittington, H. B. & Conway, M. S. (Eds.), *Extraordinary fossil biotas; their ecological and evolutionary significance*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Science*, 311, 5-24.
- Shou-Wan, K., Tian-Fang, C., Aguirre, J., Braga, J. C., Jimenez, A. P. & Rivas, P. (1996) Substrate-related changes in pectinid fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 291-308.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1986) Trilobite taphonomy and middle Devonian taphofacies. *Palaios*, 1, 312-327.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1988) Taphofacies models for epeiric sea environments: Middle Paleozoic examples. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 225-262.
- Springer, D. A. & Flessa, K. W. (1996) Faunal gradients in surface and subsurface shelly accumulations from a recent clastic tidal flat, Bahia la Choya, northern Gulf of California, Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 261-279.
- Strasser, M. (1999a) *Mya arenaria* – an ancient invader of the North Sea coast. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 52, 309-324.
- Strasser, M., Walensky, M. & Reise, K. (1999b) Juvenile-adult distribution of the bivalve *Mya arenaria* on intertidal flats in the Wadden Sea: Why are there so few year classes. *Helgoland Marine Research*, 53, 45-55.
- Strauch, F. (1990) Zur Gliederung einiger känozoischer Schill-Typen. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 181, 417-430.
- Tauber, A. F. (1942) Postmortale Veränderungen an Molluskenschalen und ihre Auswertbarkeit für die Erforschung vorzeitlicher Lebensräume. *Palaeobiologica*, 7, 448-495.
- Tomašových, A. & Rothfus, T. A. (2005) Differential taphonomy of modern brachiopods (San Juan Islands, Washington State): Effect of intrinsic factors on damage and community-level abundance. *Lethaia*, 38, 271-292.
- Trusheim, F. (1931) Versuche über Transport und Ablagerung von Mollusken. *Senckenbergiana*, 13, 124.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1950) Environment of formation and facies of the Wadden Sea sediments. *Tijdschrift (K.) Nederlands Aardrijkskund*, 67, 94-108.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea. *Process (K.) Nederlands Akademik Wetenschappen*, (B) 55, 500-516.



- Van Straaten, L. M. J. U. (1956) Composition of shell beds formed in tidal flat environments in the Netherlands and in the Bay of Arachon (France). *Geologie en Mijnbouw*, 18, 209-226.
- Wehrmann, A. (1999) Long-term survival of epibenthic *Cerastoderma edule* (L.) in bivalve clusters on backbarrier tidal flats, North Sea. *Senckenbergiana Maritima*, 30, 47-61.
- Wehrmann, A. (2003) Biogenic and taphonomic processes affecting the development of shell assemblages: An actuopaleontological case study from mussel banks on North Sea tidal flats. *Facies*, 49, 19-30.
- Weigelt, J. (1927) Über Biostratonomie. *Der Geologe*, 42, 1069-1082.
- Wendt, J. (1995) Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, 161-186.
- Wiedemann, H. U. (1972) Shell deposits and shell preservation in Quaternary and Tertiary estuarine sediments in Georgia. *Sedimentary Geology*, 7, 103-125.
- Wilson, J. B. (1963) The Relation of shell beds to living molluscan faunas. *Transactions of the Dumfriesshire and Galloway Natural History and Antiquarian*, 40, 98-101.
- Wilson, P. (2002) Coastal photographs by Peter Wilson. *Journal of Coastal Research*, 18, 409-411.
- Wilson, P. & Edwards, E. J. (2004) Further examples of ventifacts and unusual patterned ground from the Falkland Islands. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 86, 107-115.
- Woodroffe, C. D. & Grime, D. (1999) Storm impact and evolution of a mangrove-fringed chenier plain, Shoal Bay, Darwin, Australia. *Marine Geology*, 159, 303-321.
- Wunderlich, F. (1983) Sturmbedingter Sandversatz vor den Ostfriesischen Inseln und im Gebiet des Großen Knechtsandes, Deutsche Bucht, Nordsee. *Senckenbergiana Maritima*, 15, 199-217.



**Tafeln**  
**Kapitel 1**

## Tafel 1-1

**Bild A:** Schillpflaster aus *Mya arenaria* Einzelklappen auf der Wattoberfläche bei Niedrigwasser. Lokation Dorumer Wattgebiet.

**Bild B:** Vollpflaster aus überwiegend *Mya arenaria* Einzelklappen mit einer Größensortierung bei Niedrigwasser. Lokation Dorumer Wattgebiet

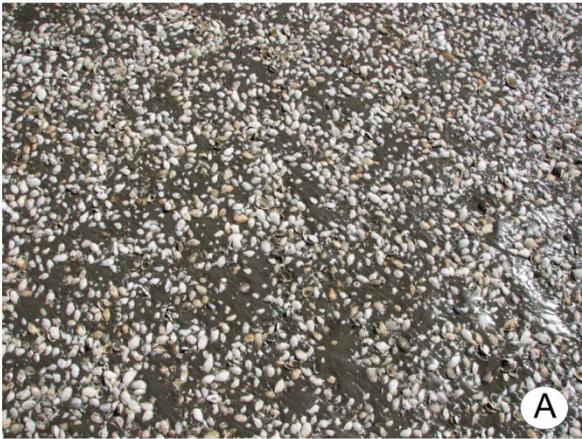
**Bild C:** Rezent es *Mya arenaria* dominierendes Schill-Vorkommen innerhalb der eulitoral en Gezeitenfläche bei Niedrigwasser zwischen Jadebucht und Außenelbe. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild D:** Rezent es *Mya arenaria* dominierendes Schill-Vorkommen innerhalb der eulitoral en Gezeitenfläche bei Niedrigwasser zwischen Jadebucht und Außenelbe. Lokation Dorumer Watt.

**Bild E:** Hochkantschill-Anordnung am leewertigen Saum eines *Mya arenaria* Schill-Vorkommens bei Niedrigwasser. Lokation Dorumer Watt.

**Bild F:** Detailansicht einer Hochkantschill-Anordnung am leewertigen Saum einer *Mya arenaria* Schill-Akkumulation bei Niedrigwasser. Die Einzelklappen weichen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage ab und stehen somit senkrecht, folglich hochkant. Lokation Dorumer Watt.

Tafel 1-1



## Tafel 1-2

**Bild A:** Aufsicht auf eine Hochkantschill-Anordnung am leewertigen Saum einer *Mya arenaria* Schill-Akkumulation bei ablaufendem Wasser. Die Einzelklappen weichen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage ab und stehen somit senkrecht, folglich hochkant. Lokation Dorumer Watt.

**Bild B:** Hochkantschill-Anordnung am leewertigen Saum eines *Mya arenaria* Schill-Vorkommens bei ablaufendem Wasser. Lokation Dorumer Watt.

**Bild C:** Lebende *Mya arenaria* in ihrer Lebensposition im eulitoralen Gezeitenbereich. Die Muschel hat als Schutzmechanismus ihren Siphon eingezogen. Länge der Muschel ca. 6 cm. Sedimenttiefe ca. 20 cm (Muschel wurde unbeschadet wieder vergraben). Lokation Sahlenburger Watt.

**Bild D:** Detailansicht der lebenden *Mya arenaria* Muschel in ca. 20 cm Bodentiefe. Länge der Muschel ca. 6 cm. Lokation Sahlenburger Watt.

**Bild E:** Detailansicht einer heraus gespülten und bereits verstorbenen *Mya arenaria* Muschel. Länge der Muschel ca. 5 cm. Lokation Sahlenburger Watt.

**Bild F:** Halb freierodierete, noch lebenden *Mya arenaria* Muschel in Lebensposition. Lokation Sahlenburger Watt.

Tafel 1-2



### Tafel 1-3

**Bild A:** Freierodierte *Mya arenaria* Siedlung mit postmortalen Doppelklappen in Lebensstellung bei Niedrigwasser. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild B:** Postmortale und freierodierte *Mya arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung bei ablaufendem Wasser. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild C:** Postmortale und freierodierte juvenile *Mya arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung bei Niedrigwasser. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild D:** Aufsicht auf postmortale und halb freierodierte juvenile *Mya arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung bei Niedrigwasser. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild E:** Postmortale und freierodierte adulte *Mya arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung bei ablaufendem Wasser. Lokation Dorumer Watt.

**Bild F:** Detailansicht der postmortalen adulten *Mya arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung bei ablaufendem Wasser. Lokation Dorumer Watt.



Tafel 1-3







## KAPITEL 2

***Mya arenaria* dominierende Schill-Akkumulationen im intertidalen  
Gezeitenbereich des Wattenmeeres unter besonderer Betrachtung  
von Hochkantschill-Anordnungen**

## Kurzfassung

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Dissertation werden drei Schill-Vorkommen innerhalb der Deutschen Wattenmeer-Region zwischen Jade und Außenelbe beschrieben.

Ziel der Untersuchung ist es detaillierte Informationen über dessen strukturellen Aufbau sowie ihrer Genese zu erhalten. Das Interesse galt dabei den unterschiedlichen Lagerungszuständen auf den Oberflächen der Schill-Ansammlungen, die hauptsächlich aus Schalenmaterial der *Mya arenaria* aufgebaut wurden. Besondere Beachtung wurden dabei bislang selten beschriebenen Hochkantstrukturen gewidmet. Hierbei handelte es sich um vertikal eingeregelter Einzelklappen, die mit ihrer Längsachse nahezu senkrecht stehen und hintereinander angeordnet sind.

Die Schill-Vorkommen wurden während des Untersuchungszeitraumes mehrmals bei Geländekampagnen aufgesucht. Hierbei erfolgten detaillierte Aufnahmen der Oberflächenstrukturen sowie die Entnahme und Anfertigung mehrerer Reliefgussprofile. Es zeigte sich, dass die Schill-Akkumulationen hauptsächlich durch laterale Priel-Wanderungen verursacht werden. Aufgrund von Erosionsprozessen wurden dadurch ehemalige *M. arenaria* Siedlungshorizonte freigelegt. Durch biostratinomischen Prozesse die durch hydrodynamische Ereignisse gesteuert wurden entstanden auf den Oberflächen der Schill-Vorkommen wiederkehrende und charakteristische Lagerungs- und Einregelungsmuster.

Die Ergebnisse zeigen, dass die unterschiedlichen Lagerungs- und Einregelungsvariationen der Klappen sich nur auf bestimmten Oberflächenbereichen beschränken. Aufgrund dessen erfolgte eine allgemeine Einteilung in sieben unterschiedliche Zonenbereiche. Die Zonen umfassen dabei die ehemalige *M. arenaria* Siedlungshorizonte mit postmortalen Doppelklappen (Zone 1), verschiedenen Pflastervariationen (Zone 2a bis c), Schill-Streifen (Zone 3), Rosettenanordnungen (Zone 4), richtungsorientierte Hochkantschill-Strukturen (Zone 5) sowie Terrassenanordnungen (Zone 6) und inselartige Schill-Felder (Zone 7). Ferner konnte festgestellt werden, dass die ansteigende Morphologie der Schill-Vorkommen eine Veränderung der hydrodynamischen Wirkungsgrenze des Wassers während der Tidenzyklen verursacht und für die unterschiedlichen Lagerungszustände verantwortlich ist.

## Einleitung

Das wissenschaftliche Interesse an Schalenkonzentrationen hat in den letzten Jahren stark zugenommen, da die Untersuchungen fossiler Schalenakkumulationen in der Vergangenheit dazu beigetragen hat Paläoumweltbedingungen zu rekonstruieren (z. B. Aigner 1977; Kidwell 1986, 1991; Kidwell & Brenchley 1994; Fürsich et al. 1991; Abbott 1997; Boyer & Droser 2003; Fürsich & Pandey 1999). Sowohl in karbonatischen als auch in siliklastischen Gesteinsabfolgen können Schalenansammlungen detaillierte Auskunft über ökologische Zustände, sedimentäre Um- und Ablagerungsprozesse, Aussagen über relative Meeresspiegelschwankungen sowie über physikalische-hydrodynamische Parameter geben (Brett 1995, 1998; Fürsich & Pandey 2003). Muscheln sind seit dem Kambrium bekannt (Faupl 2003) und daher nahezu in der gesamten Erdgeschichte vertreten, so dass sie bei der Rekonstruktion fossiler Lebensgemeinschaften in modernen paläontologischen- und sedimentologischen Arbeiten Verwendung fanden (z. B. Kidwell 1989; Shou-Wan et al. 1996; Brett et al. 1997; Kowalewski et al. 1998; Moffat & Bottjer 1999; Mandic & Piller 2001; Di Celma et al. 2002; Dominici 2004). Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde eine Vielzahl von Arbeiten zu fossilen Schalenansammlungen verfasst (z. B. Fürsich 1984; Brett & Bordeaux 1990; Brett & Seilacher 1991; Cuffe et al. 1991; Wendt 1995; Meldahl 1993, 1995; Anderson & McBride 1996 u. a.). Um fossile Lagerstätten besser interpretieren zu können, sind Kenntnisse über rezente Ablagerungsprozesse sowie Entstehungsbedingungen von modernen Schalenkonzentrationen unabdingbar. Sind die Rahmenbedingungen wie beispielsweise Wassertiefe, Tidenhöhe, Strömungsrichtungen sowie allgemeine Wellenparameter bekannt, können diese Erkenntnisse teilweise auch auf fossile Vorkommen angewandt werden. Einige Forschungsbeispiele zeigen, dass rezente Schalenansammlungen sehr gut als aktualistischer Vergleich in der Interpretation von fossilen Schalenkonzentrationen genutzt werden können (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa 2002; Hallman et al. 1996; Neal et al. 2002; Kowalewski et al. 2000, 2003).

Untersuchungen von Schalenansammlungen umfassen neben einer großen Variation von biologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Prozessen sehr häufig auch taphonomische Ereignisse (z. B. Kidwell & Jablonski 1983; Kidwell & Bosence 1991; Flessa & Kowalewski 1994; Meldahl et al. 1997; Carrol et al. 2003).

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Untersuchung von Schalenakkumulationen ist zudem der Vergleich von lebenden Populationen mit postmortalem bzw. subfossilem Schalenmaterial, die von äußeren Prozessen wie z. B. Strömungen, Wellengang und die dadurch bedingte Umlagerungen beeinflusst wurden (z. B. Wilson 1963; Alexandrowicz 1977, 2001; Alexandrowicz & Florek 1999; Cummins 1994; Fürsich 1990; Kidwell 2002a, b).

Arbeiten über rezente Schalenansammlungen an Küstenbereichen wurden unter anderem von Salazar-Jimenez et al. (1982), Dörjes et al. (1986), Meldahl & Flessa (1990), Meldahl & Cutler (1992), Meldahl (1993, 1995), Kowalewski et al. (1994), Cutler (1995), Hallman et al. (1996), Springer & Flessa (1996), Flessa et al. (1993), Boyajian & Thayer (1995), Woodroffe & Grime (1999), Donato et al. (2008) verfasst. Jüngere Arbeiten geben Auskunft über Struktur sowie Aufbau von modernen Schalenakkumulationen (z. B. Neal et al. 2002, 2003;

Carroll et al. 2003; Bonnot-Courtois et al. 2004; Tomašových & Rothfus 2005; Quaresma et al. 2007; Schneider-Storz et al. 2008). Ausführliche Beschreibungen und Klassifikationen von Schalenkonzentrationen geben unter anderem Seilacher (1970), Seilacher et al. (1985), Kidwell et al. (1986) sowie Fürsich (1995).

Muschelansammlungen können durch eine Vielfalt von Prozessen konzentriert werden (Brett & Baird 1986; Fürsich 1990; Brett & Seilacher 1991). Oftmals spielen dabei biostratinomische Prozesse eine große Rolle. Ausführliche Untersuchungen zu biostratinomische Abläufen in denen Einstreuerungen, Einregelungen sowie Orientierungen von Muschelklappen beschrieben werden geben z. B. Weigelt (1927), Schäfer (1962), Nagle (1967), Brenchley & Newall (1970), Seilacher (1973), Futterer (1974-1977, 1981), McKittrick (1987), Allen (1990) und Wendt (1995). Massenansammlungen von Muschelklappen im Gezeitenbereich der Nordsee wurden in der Vergangenheit von einigen Autoren beschrieben, doch liegen viele dieser Untersuchungen teilweise schon mehrere Jahrzehnte zurück (z. B. Kühl 1950; Van Straaten 1950, 1952, 1956; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Reineck 1984; Dörjes 1987; Schubert 1990; Flemming et al. 1992; Cadée 1992, 1994a, b, c, 2002; Cadée & Wesselingh 2005). Einige grundlegende historische Arbeiten zu Transportmechanismen von Schalenmaterial, dessen Einbettung und Verteilung im Wattenmeer sollen an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden (z. B. Richter 1922, 1924, 1942; Schäfer 1941; Lüders 1929; Trusheim 1931a; Hecht 1930; Jessen 1932, 1933; Häntzschel 1939).

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden drei rezente Schill-Vorkommen innerhalb der Wattenmeer-Region zwischen Jadebucht und Außenelbe beschrieben. Im Gegensatz zur relativ häufigen „normalen“ d. h. horizontalen Lagerung von Einzelklappen (Richter 1942), ist die Einregelung innerhalb der untersuchten Vorkommen eindrucksvoll, da die Einzelklappen in bestimmten Bereichen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage abweichen und somit senkrecht, folglich hochkant stehen. Die von *Mya arenaria* dominierten Akkumulationen sind nach dem bisherigen Kenntnisstand die weltweit ausgedehntesten Vorkommen mit vertikal eingeregelten Muschelklappen innerhalb eines intertidalen Gezeitenbereiches. Vergleichbare rezente Hochkantstrukturen wurden bisher nur an wenigen Küsten lediglich als Einzelfälle beobachtet, ohne jedoch eine schlüssige Erklärungen ihrer Genese zu liefern (z. B. Mii 1957; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Grinnell 1974; Ball 1976; Sanderson & Donovan 1974; Salazar-Jimenez et al. 1982; Ensom 1984; Hanamgond 2001). Vertikale Einregelungen von fossilem Schalenmaterial wurden äußerst selten aufgefunden und bislang nur von Seilacher & Meinschner (1965) beschrieben.

Hochkant-Einregelungen beschränken sich im Allgemeinen nicht nur auf Muschelschalen, sondern wurden auch schon bei flach ausgebildeten Gesteinsobjekte wie Schieferplatten, Konglomeraten, diversen Bruchstücken sowie an Seeigeln beschrieben (z. B. Gregory 1930; Schmitthenner 1930; Dege 1941; Dionne 1971; Kostyaev 1973; Ball 1976; Mount & Kidder 1993; Hanamgond 2001; Nebelsick & Kroh 2002; Wilson 2002; Wilson & Edwards 2004). Bislang wurde davon ausgegangen, dass die Bildung von Hochkantstrukturen ob aus Schalenmaterial oder Gesteinen bestehend, mit hochenergetischen Prozessen einhergeht

bzw. auf erhöhte Wellenenergie zurückzuführen sind (z. B. Dionne 1971; Sanderson & Donovan 1974; Wilson 2002; Hanamgond 2001).

Nahezu alle rezenten Beschreibungen von Hochkantanordnungen beziehen sich auf Vorkommen an Stränden, Brandungs- oder Spülsäumen. Bisher wurden jedoch keine länger andauernden Untersuchungen oder erklärende, experimentelle Messungen diesbezüglich durchgeführt. Bereits Seilacher & Meinschner (1965) sowie Greensmith & Tucker (1969) wiesen in ihren Arbeiten darauf hin, dass derartige vertikale Anordnungen eventuell zur Rekonstruktion von ehemaligen hydrodynamischen Bedingungen bzw. als Fazies-Indikatoren herangezogen werden könnten.

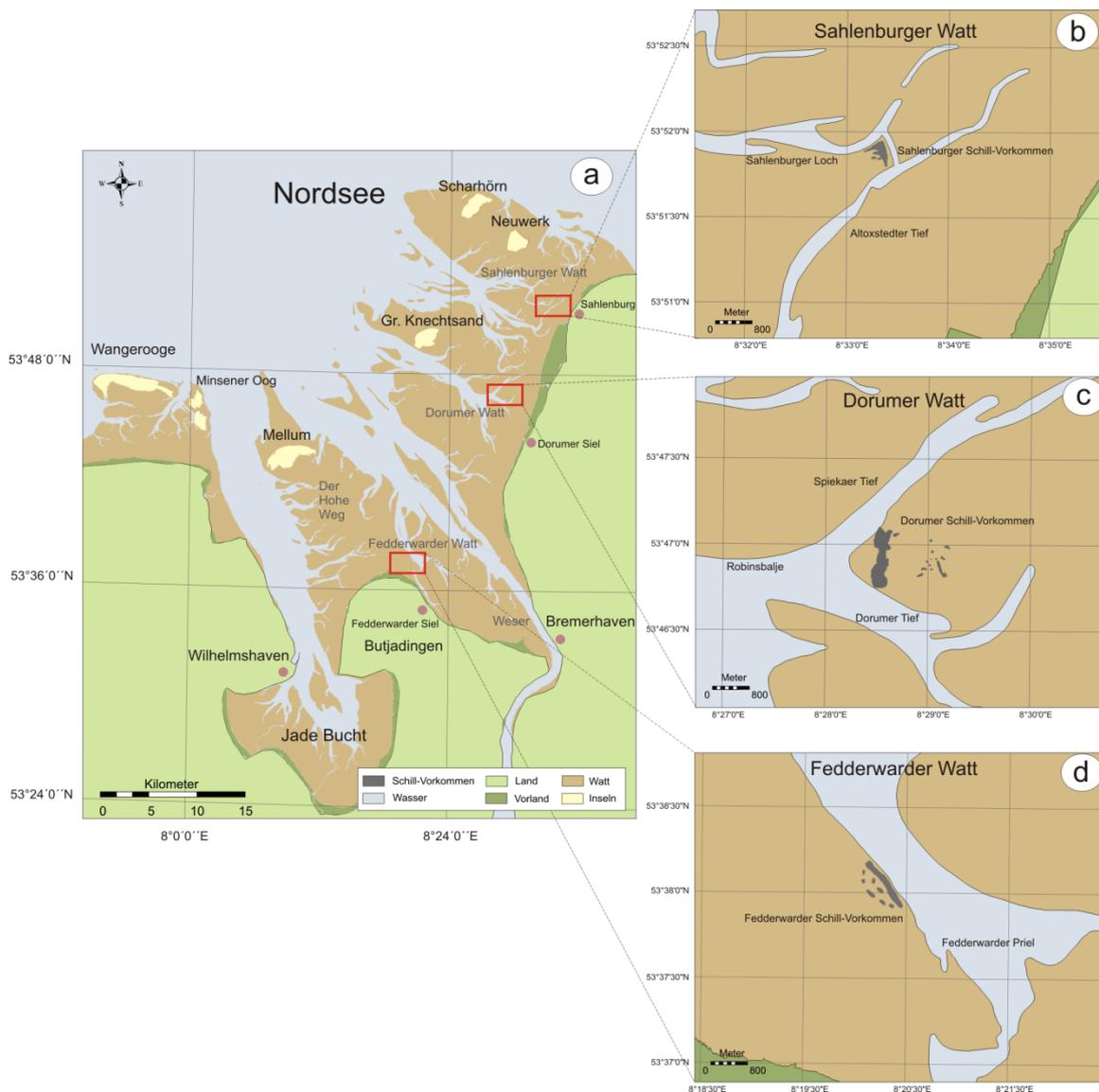
Innerhalb der Wattenmeer-Region zwischen Jade und Außenelbe finden sich diese vertikalen Einregelungsmuster als „Normalfall“ vor, die an anderen Küsten bisher lediglich als Einzelfall beobachtet wurden. Durch die besondere vertikale Einregelung heben sich die hier untersuchten Schill-Konzentrationen von den bislang beschriebenen Schalenakkumulationen deutlich ab, da für die ungewöhnliche Einregelung anscheinend bestimmte Randbedingungen erforderlich sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zunächst detaillierte Informationen über den strukturellen Aufbau der *M. arenaria* dominierenden Schill-Vorkommen im südöstlichen Gezeitenbereich des Deutschen Wattenmeeres zu erhalten. Besondere Aufmerksamkeit soll dabei den unterschiedlichen Lagerungszuständen und Orientierungen der Schalen auf den Oberflächen der Schill-Vorkommen gewidmet werden. Ein wesentlicher Fokus soll hierbei auf die Hochkantstrukturen sowie auf dessen Genese-Prozesse gelegt werden.

## Arbeitsgebiet

Die untersuchten Schill-Vorkommen befinden sich im zentralen Bereich der südöstlichen Deutschen Bucht innerhalb der Niedersächsischen Wattenmeer-Region zwischen Jadebucht und Außenelbe (Abb. 2-1a).

Das Wattgebiet zwischen Jade und Elbe unterliegt einem dauernden morphologischen Wandel durch Wind, Seegang, Strömung und dem täglichen Tidenstrom. Für das Gebiet charakteristisch ist die tiefe Wesermündung, großräumige von Prielen durchzogene Wattgebiete sowie die vorgelagerten großen Sandbank-Inseln Mellum, Knechtsand, Scharhorn und Neuwerk (s. dazu auch Kap. 1).



**Abb. 2-1.** a) Arbeitsgebiet im eulitoralischen Gezeitenbereich der südöstlichen Deutschen Bucht. Rote Rechtecke markieren die Lokation der Schill-Vorkommen. b) Sahlenburger Schill-Vorkommen. c) Dorumer Schill-Vorkommen. d) Fedderwarder Schill-Vorkommen.



## Die untersuchten Schill-Vorkommen

Während des Untersuchungszeitraumes wurde im Arbeitsgebiet eine hohe Anzahl von unterschiedlich ausgebildeten Schill-Vorkommen entdeckt. Auf einigen Wattflächen wurden Schill-Vorkommen vorgefunden, die sich durch ihren morphologischen und strukturellen Aufbau von gewöhnlichen Schalen-Anhäufungen unterscheiden. Aus diesem Grund wurden drei dieser Vorkommen aus unterschiedlichen Bereichen des Arbeitsgebietes für die vorliegende Untersuchung ausgewählt.

Das flächenmäßig größte Schill-Vorkommen wurde auf den Gezeitenflächen des Dorumer Watt-Gebietes entdeckt (Abb. 2-1a & c). Das bis zu max. 400 m lange und 100 m breite Schill-Vorkommen erstreckt sich zwischen zwei Randprielen (Dorumer Tief und Spiekaer Tief) in einer Nordost-Orientierung (Abb. 2-1c). In nordwestlicher Richtung des Vorkommens, in ca. 8,5 km Entfernung befindet sich die Sandbankinsel „Großer Knechtsand“. Die geschützte Küstenlinie mit dem Hafenort Dorumer Siel erstreckt sich in südöstlicher Richtung, in ca. 4 km Entfernung (Abb. 2-1a).

Das zweite untersuchte Schill-Vorkommen liegt im südlichen Arbeitsgebiet auf den Wattflächen des „Hohe Weg“ (Abb. 2-1a). Das Vorkommen erreicht eine Länge von bis zu 500 m und eine Breite von bis zu 30 m. Zu Niedrigwasserzeiten verläuft die Bankmorphologie in einer Nordwest-Südost Orientierung parallel zur Priel-Abbruchkante (Fedderwarder Prielkante, Abb. 2-1d). Die Fedderwarder Küstenlinie „Butjadingen“ befindet sich in einer Entfernung von ca. 2 km in südwestlicher Richtung.

Das am nördlichsten gelegene und kleinste Schill-Vorkommen befindet sich auf den Gezeitenflächen des Sahlenburger Wattgebietes (Abb. 2-1a). Das Vorkommen konnte eine Länge von bis zu 50 m und eine maximale Breite von ca. 30 m erreichen. Bei Niedrigwasser erstreckt sich das Schill-Vorkommen in einer Nordwest-Südost Orientierung zwischen zwei Nebenprielen (Sahlenburger Loch/Altoxstedter Tief, Abb. 2-1b). Die niedersächsische Küstenlinie, mit dem Ort Sahlenburg, befindet sich nordöstlich in einer Entfernung von ca. 2,7 km. Die Sandbankinsel Neuwerk liegt in nordwestlicher Richtung in ca. 6,6 km Entfernung.

## **Material und Methoden**

### Detailuntersuchungen der Oberflächen-Topografie

Erstmals als Untersuchungsobjekt wahrgenommen wurde das Schill-Vorkommen im Dorumer Wattgebiet bei einer Forschungsausfahrt des Senckenberg Instituts im Jahr 2002. Die beiden anderen hier beschriebenen Schill-Akkumulationen wurden im Zuge von Luftbildkartierungen vom Verfasser entdeckt und nach entsprechender Verifizierung im Gelände für die hier vorgestellten Untersuchungen ausgewählt (s. auch Kap. 5).

Die Geländearbeiten fanden vom Oktober 2004 bis Oktober 2007 statt. Die Untersuchungen im Gezeitenbereich wurden mit einem Motorschlauchboot durchgeführt, mit dessen Hilfe auch bei Niedrigwasserzeiten flache Wattgebiete erreicht werden konnten. Am häufigsten aufgesucht wurde dabei das Dorumer Schill-Vorkommen. Aufgrund der relativ guten Erreichbarkeit konnte das Vorkommen auch bei schlechten Wetterverhältnissen erreicht werden.

Die Schill-Vorkommen wurden während der drei jährigen Untersuchung zu verschiedenen Jahreszeiten mehrmals aufgesucht. Hierbei wurden neben Fotos, Skizzen und Reliefgüsse auch Detailuntersuchungen der Bankoberflächen durchgeführt. Die Abschätz- und Zählprozesse auf den Bankoberflächen wurden mit 1 m<sup>2</sup> Zählrahmen durchgeführt.

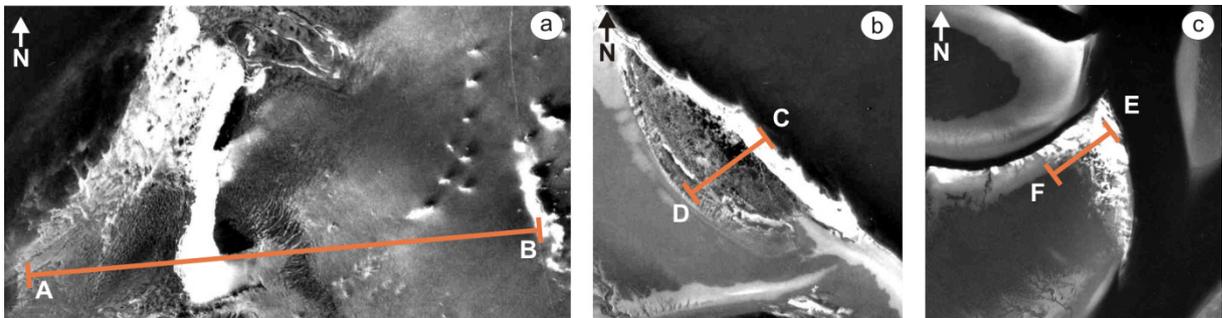
Bei den Detailuntersuchungen der Oberflächen wurden Unterschiede zwischen den Zustandsformen, Lagerungsverhältnissen sowie strukturellen und internen Aufbau der Schill-Flächen dokumentiert. Folgende Kriterien wurden bei den Untersuchungen aufgenommen: Primäre Lagerungsstruktur, Anordnung und Orientierung der Schalen sowie deren visuelle Häufigkeit und Ausdehnung auf der Bankoberfläche. Für die Orientierung im Gelände stand das Global Positioning System (GPS) „GPS 72“ der Firma GARMIN zur Verfügung, was das Auffinden der Schill-Vorkommen im Watt ermöglichte. Die Lagegenauigkeit des satellitengestützten Navigationsgerätes liegt nach Herstellerangabe je nach Witterung und Anzahl der empfangenen Satelliten zwischen 3 m und 15 m.

Bedingt durch den täglichen Tidenzyklus fallen die untersuchten Schill-Vorkommen bei entsprechendem Niedrigwasser zweimal am Tag frei und ermöglicht eine relativ kurzzeitige Untersuchungsmöglichkeit. Bei Hochwasserstand werden die Schill-Vorkommen, je nach Abweichungen von einer 2 bis 3 m hohen Wassersäule überdeckt. Die Oberflächenuntersuchungen verliefen jeweils senkrecht zur Länge der Vorkommen und wurden entlang eines ca. 10 bis 15 m breiten Profils erstellt. Die GPS-Positionierung kam auch bei der Entnahme der Stechkästen (Reliefgüsse) zum Einsatz.

## Probenentnahme und Reliefgüsse

Neben den Oberflächenuntersuchungen wurden an allen drei Standorten während des gesamten Untersuchungszeitraumes an ausgewählten Bereichen Stechkästen-Reihen entnommen. Die Reliefgüsse wurden für die jeweiligen schematischen Querprofil-Darstellungen (s. auch Abb. 2-3 bis 2-5) zusammengestellt (s. auch Tafel 2-6 bis 2-8). Die Reliefgussprofile wurden senkrecht zur jeweiligen morphologischen Länge des Schill-Vorkommens gelegt (Abb. 2-2).

Die Bezeichnungen der Reliefgüsse erfolgten je nach Lokation spezifisch (Dorum = Do, Fedderwarden = Fw, Sahlenburg = Sb). Einige ältere Kerne stammen aus den Jahren 2002/2003 und wurden im Zuge erster Voruntersuchungen im Dorumer Wattgebiet vom Senckenberg Institut entnommen und labortechnisch bearbeitet. Sie wurden dem Verfasser für weitere Bearbeitungen zur Verfügung gestellt.



**Abb. 2-2.** Luftbildvergrößerung mit den jeweiligen Profilverläufen der entnommenen Reliefgüsse. (a) Dorumer Transekt A-B. (b) Fedderwarder Transekt C-D. (c) Sahlenburger Transekt E-F.

Mittels der Stechkästen können die Wechschichten- und bioturbate Gefüge sowie die Schill-Lagen sichtbar und haltbar gemacht werden. Ähnlich wie bei einem Lackfilm springen die einzelnen Schichtlagen reliefartig hervor und zurück. Das Relief ist aber weit stärker ausgebildet als bei einem Lackfilm, vor allem ragen Gänge und Muscheln deutlich sichtbar heraus (Reineck 1961). Reliefgüsse geben einen zweidimensionalen Einblick in die geologischen, biologischen und paläoökologischen Zeiträume und ermöglichen die Untersuchung von Sedimentstrukturen, internen Gefügen sowie Akkumulationszeiträume der oberflächennahen Wattsedimente.

Für die verschiedenen Reliefkästen-Profile wurden je nach Verfügbarkeit und Sedimentbeschaffenheit zwei unterschiedliche Kästen-Längen verwendet. Die kürzeren Wattstechkästen sind 17 x 6 x 25 cm, die Taucherstechkästen haben eine Dimension von 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Bei den Probenentnahmen wurden die Edelstahl-Kästen in die Wattsedimente bzw. Schill-Horizonte vorsichtig bis zur Kastenoberkante eingeschoben. Die Kästen wurden orientiert genommen, das heißt die Ausrichtung der breiten Kastenseite erfolgte parallel zur Gesamtprofil-Orientierung bzw. senkrecht zur Schichtung. Nach dem Versenken der Kästen erfolgte die Entnahme mittels Spaten, so dass die Kerne vorsichtig ausgegraben wurden. Nach der Entnahme wurden die Kästen aufgrund der enthaltenen Feuchtigkeit drei bis sechs Monate lang in einem Kühlkeller bei 5 °C gelagert. Die relativ lange Lagerzeit war nötig, um eine langsame Verdunstung des enthaltenen Wassers und so

einer Salzverkrustung sowie einem Sedimentschrumpfen mit eingehender Riss-Bildung entgegen zu wirken.

### Profilaufnahme am Dorumer Vorkommen

Am Dorumer Schill-Vorkommen wurde ergänzend zu den Reliefgüssen im Oktober 2007 ein Profil an der Bank-Hinterkante aufgenommen. Die Grabung wurde mittels Spitzhake und Schaufel durchgeführt. Insgesamt konnte eine Abfolge von 53 cm aufgenommen werden (Abb. 2-7a).

### Aufbereitung der Reliefgüsse

Die Aufbereitung der Reliefgüsse erfolgte mit leichten Modifikationen nach den Beschreibungen von Reineck (1963, 1970).

Nach der erwähnten relativ langen Vortrocknungszeit der Sedimentkästen im Kühlkeller erfolgte die weitere Bearbeitung im Labor. Nach dem Aufschrauben der Kästen und der Abnahme des Deckels wurden die sandig bis schlickigen Proben bei 80 bis 110 °C für 36 Stunden in einem Labor-Ofen getrocknet. In noch warmen Zustand erfolgte das Begießen der Proben mit Araldit Gießharz F und einem Härter HY905 (Gewichtsverhältnis 1:1). Auf 10 cm<sup>2</sup> kamen etwa 35 bis 50 cm<sup>3</sup> Gießharz. Vor dem Tränken mit Harz wurden die Proben teilweise mit einem feuchten Schwamm vorsichtig abgetupft, um dünne Salzkrusten zu entfernen. Das Begießen der Reliefproben mit Gießharz erfolgte dabei immer im heißen Zustand, was ein leichteres Eindringen des Harzes ermöglichte.

Zum Gießen wurde das Harz möglichst gleichförmig auf die Probe gegossen, um gleichmäßige Gießstreifen zu erhalten. Beim gießen wurde zudem darauf geachtet, dass das Gießharz bei kleinen Kästen maximal 3 cm, bei den größeren Kästen maximal 5 cm in das Sediment versickerte. Das jeweilige Begießen wurde bei sandigen Proben dreimal, bei Proben mit einem schlickigen-feinsiltigen Charakter maximal viermal wiederholt.

Um ein Aushärten des Gießharzes zu erreichen wurden die Proben für 36 Stunden bei 120 °C erneut im Ofen getrocknet. Nach dem Aushärten wurden die Reliefgüsse mit einem Messer halbiert, so dass der ungetränkte Teil des Reliefgusses für eventuelle Sedimentanalysen archiviert werden konnte. Der eigentliche Reliefguss wurde von lockeren Sedimentresten unter fließendem Wasser befreit. Die anschließende Endtrocknung des Reliefgusses bei Zimmertemperatur benötigte etwa eine Woche.

Kleine Schäden an den Reliefkästen wurden gewöhnlich mit dem transparenten Kleber UHU-Hart (UHU GmbH & Co. KG) behoben. Größere Beschädigungen, wie abgebrochene Einzelteile, wurden durch ein Einlegen der Reliefgüsse in Polyesterharz (Viapal UP-303/65) beseitigt. Das Polyesterharz wurde mit 2 % Polyester-Beschleuniger (C-101) und 2 % Polyester-Härter (Curox M 300) angesetzt und anschließend in eine zuvor passend geformte

Aluminiumschale gegossen. Nach dem Einlassen der Reliefgüsse wurden bestehende Risse und Löcher mit Sedimentresten bedeckt, um ein durchdringen des Harzes von unten zu vermeiden. Nach ca. 3 Stunden war das Polyesterharz ausgehärtet, so dass der Reliefguss aus der Aluminiumwanne entnommen und unter fließendem Wasser von den Sedimentresten befreit werden konnte. Anschließend erfolgte eine Trocknungszeit bei Raumtemperatur von ca. 48 Stunden.

## Ergebnisse

### Übersicht der Schill-Vorkommen

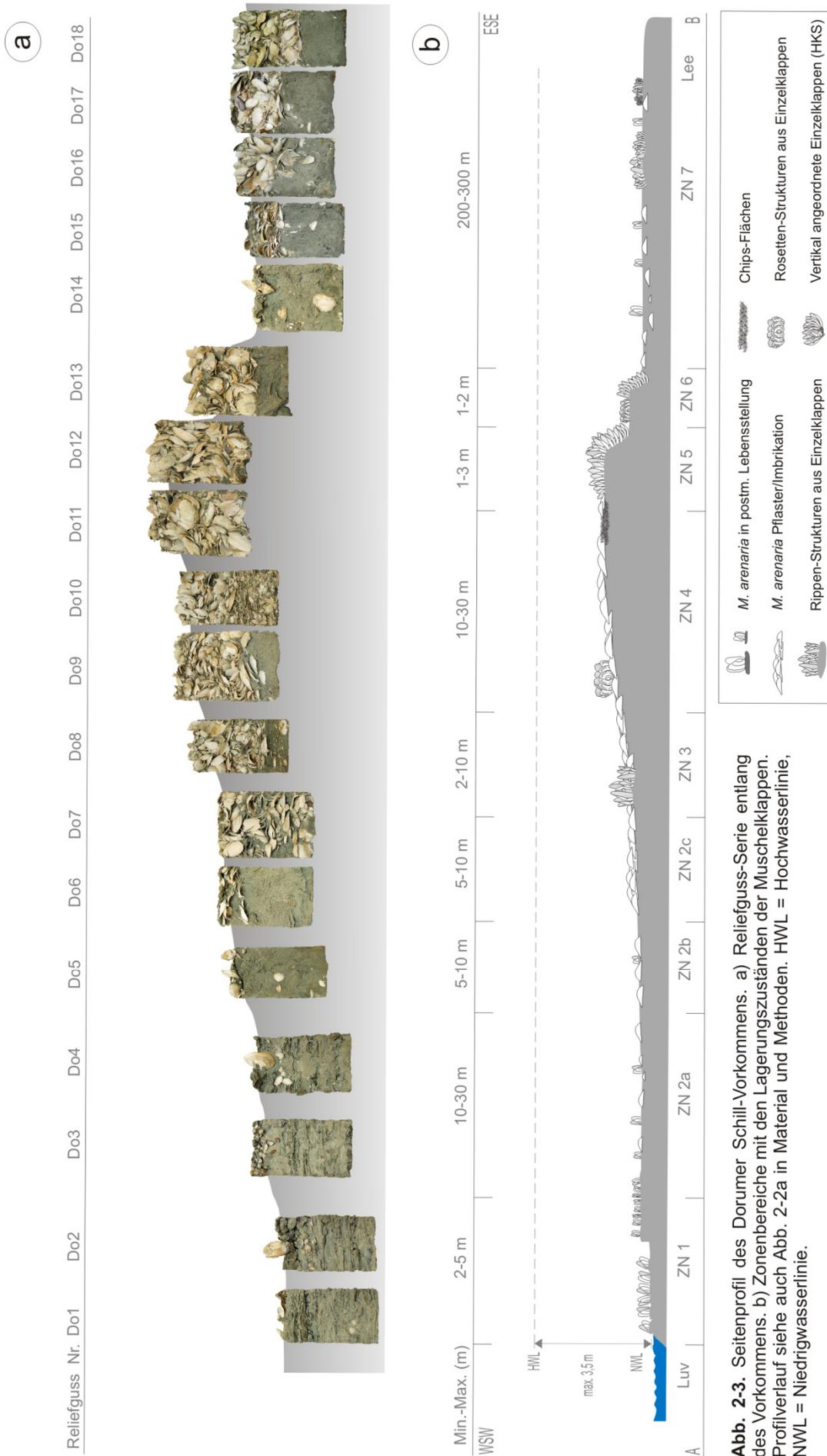
#### Dorumer Vorkommen

Das größte hier untersuchte Schill-Vorkommen befindet sich auf den Gezeitenflächen des Dorumer Watt-Gebietes (Tafel 2-1 A). In nordwestlicher Richtung des Vorkommens liegt in ca. 8,5 km Entfernung die Sandbankinsel „Großer Knechtsand“. In ca. 4 km Entfernung erstreckt sich in südöstlicher Richtung die Küstenlinie mit dem Hafenort Dorumer Siel (Abb. 2-1a). Das bis zu 400 m lange und 100 m breite Dorumer Schill-Vorkommen erstreckt sich zwischen den zwei Randprielen Dorumer Tief und Spiekaer Tief, in einer Nord-Süd Orientierung (Abb. 2-1c). Das Schill-Vorkommen ragt zu Niedrigwasserzeiten leicht ansteigend von der luvwertigen Niedrigwasserkante zur leewertigen Küstenseite empor (Abb. 2-3a & b). Der anfangs sanft ansteigende Neigungswinkel erreicht auf der relativ langgezogenen Oberfläche des Vorkommens eine Steigung von ca. 15 bis 20°. Dem Schill-Vorkommen vorgelagert sind an der Prielkante in westlicher Richtung *M. arenaria* Siedlungshorizonte.

In den stufenartig freierodierten, oftmals parallel ausstreichenden Horizonten steckten *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung (Tafel 2-1 D & E). Je nach Erosionsfortschritt wurden dabei unterschiedliche *M. arenaria* Altersklassen stufenweise freigelegt, so dass die ältesten Exemplare stets in tieferen Horizonten vorgefunden wurden. Ein freigelegter Horizont entsprach meistens einem Siedlungs-Ereignis (s. dazu auch Kap. 1). Von der Niedrigwasserkante ausgehend erstreckt sich das Dorumer Schill-Vorkommen in küstenwertiger Richtung bis es hinter einem Hochkantschill-Saum (HKS-Saum) endet (Abb. 2-3). Die HKS-Abbruchkante erreichte eine Höhe von bis zu 1,2 m und bewirkte dabei einen abfallenden Steigungswinkel von bis zu 70°. Danach erfolgt abrupt ein Übergang der HKS-Kante in eine flache sandige Wattoberfläche. In ca. 200 bis 300 m Entfernung in küstenwertiger Richtung befinden sich 15 bis 20 flachausgebildete von einander getrennte Schill-Felder (Patch-Felder, Tafel 2-4 F).

#### Fedderwarder Vorkommen

Das zweite untersuchte Schill-Vorkommen befindet sich im südlichen Arbeitsgebiet südwestlich der Wesermündung auf den Wattflächen des „Hohe Weg“ (Tafel 2-1 B). Die Butjadinger Küstenlinie befindet sich in einer Entfernung von ca. 2 km in südwestlicher Richtung. Der kleine Hafenort Fedderwarder Siel liegt ca. 3,5 km südöstlich der Schill-Lokation (Abb. 2-1a). Das Fedderwarder Vorkommen ist im Durchschnitt ca. 500 m lang und ca. 30 m breit. Zu Niedrigwasserzeiten verläuft die Bankmorphologie in einer Nordwest-Südost Orientierung parallel zum Fedderwarder Hauptpriel und grenzte unmittelbar an dessen Priel-Abbruchkante (Abb. 2-1d). Das Schill-Vorkommen ragt bei Niedrigwasser ausgehend von der Prielkante leicht ansteigend zur Küstenseite hin hervor (Abb. 2-4).



**Abb. 2-3.** Seitenprofil des Dorumer Schill-Vorkommens. a) Reliefguss-Serie entlang des Vorkommens. b) Zonenbereiche mit den Lagerungszuständen der Muschelklappen. Profilverlauf siehe auch Abb. 2-2a in Material und Methoden. HWL = Hochwasserlinie, NWL = Niedrigwasserlinie.



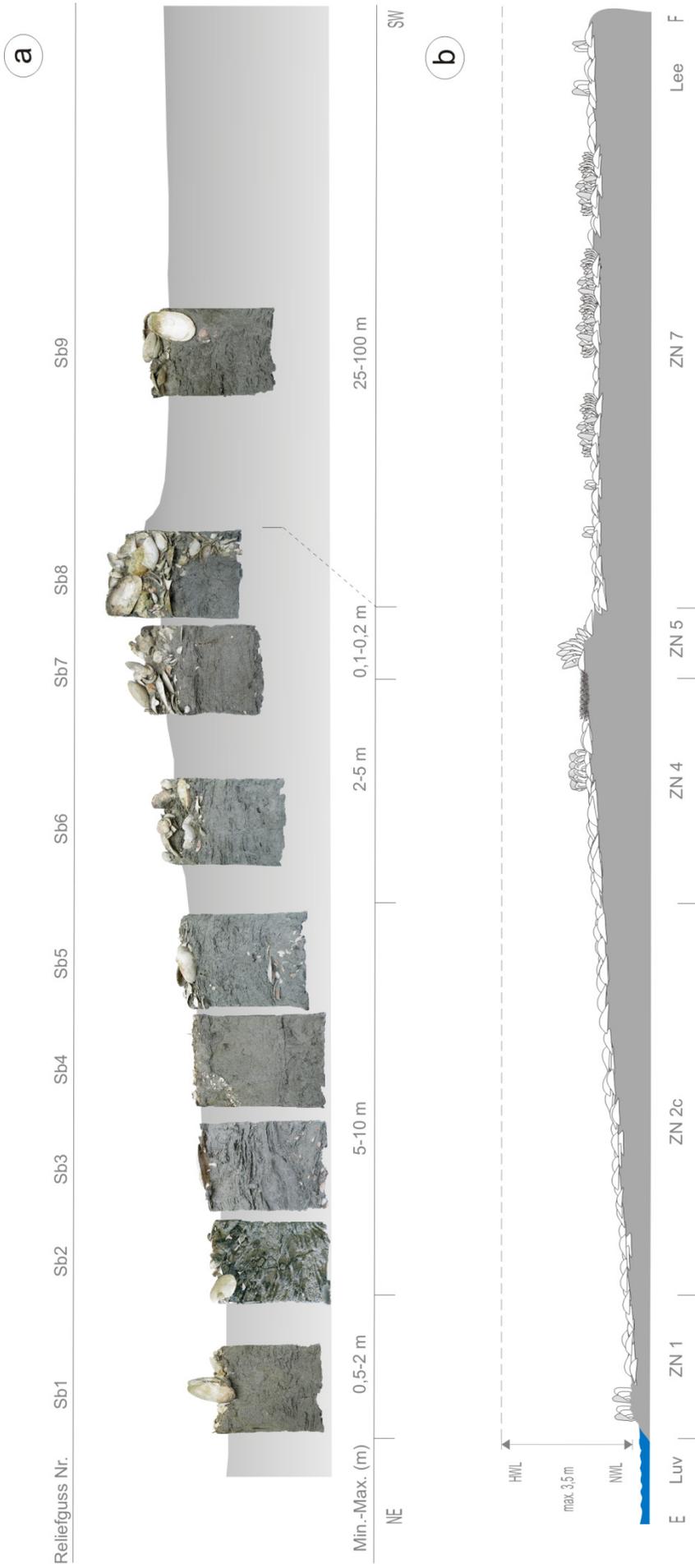
**Abb. 2-4.** Seitenprofil des Feddenwarder Schill-Vorkommens. a) Reliefguss-Serie entlang des Vorkommens. b) Zonenbereiche mit den Lagerungszuständen der Muschelklappen. Profilverlauf siehe auch Abb. 2-2b in Material und Methoden. HWL = Hochwasserlinie, NWL = Niedrigwasserlinie.



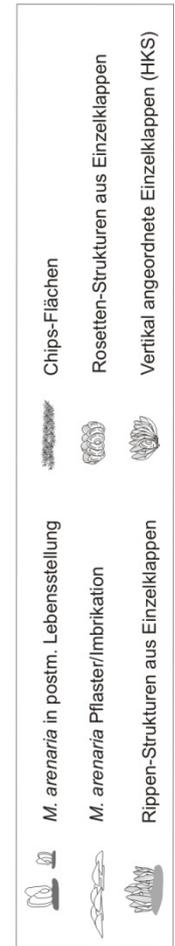
Im Vergleich zum Dorumer-Vorkommen erfolgt unmittelbar hinter der Prielkante ein ansteigen der Schill-Bank in einem Neigungswinkel von anfangs  $15^\circ$  und erreichte auf der Hälfte der Bankoberfläche eine Steigung von  $20^\circ$  bis  $30^\circ$ . Die Priel-Abbruchkante wurde während des Untersuchungszeitraumes durch drei bis vier übereinander liegende, teilweise in der Fläche freierodierte *M. arenaria* Siedlungshorizonte gebildet (Abb. 2-4b). In den parallel ausstreichenden Horizonten steckten *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Im Vergleich zum Dorumer-Vorkommen wurden deutlich mehr Einzelklappen pro Quadratmeter angetroffen. Des Weiteren wurden unterschiedlich alte *M. arenaria* Siedlungen freigelegt, so dass jeder Horizont jeweils unterschiedliche Altersklassen beherbergte. Die jungen *Mya*-Doppelklappen befanden sich in den hangenden, die deutlich größeren Doppelklappen wurden in den liegenden Siedlungshorizonten vorgefunden. Die Fedderwarder Hochkantschill-Kante war im Vergleich zum Dorumer Vorkommen deutlich niedriger und erreichte eine Höhe von bis 0,6 m. Der abfallenden Steigungswinkel der Kante war mit  $70^\circ$  bis  $80^\circ$  etwas steiler als beim Dorumer Vorkommen. Nach der Steilkante erfolgte abrupt ein Übergang in eine relativ ebene Wattoberfläche auf der sich eine flachausgebildete Schill-Fläche (Patch-Fläche) erstreckte. Die in küstenwertiger Richtung verlaufende Patch-Fläche erstreckte sich ca. 50 bis 100 m bevor sie an einer kleinen ca. 20 cm hohen Sandkante endete (Abb. 2-4b).

### Sahlenburger Vorkommen

Das im nördlichen Arbeitsgebiet gelegene kleinste Schill-Vorkommen befindet sich auf den Gezeitenflächen des Sahlenburger Wattgebietes (Tafel 2-1 C). Die niedersächsische Küstenlinie mit dem kleinen Ort Sahlenburg liegt in einer Entfernung von ca. 2,5 km in nordöstlicher Richtung (Abb. 2-1a). Ebenfalls in Sichtweite befindet sich die nordwestlich der Lokation gelegene, etwa 2,5 km entfernte Insel Neuwerk. Zu Niedrigwasserzeiten erstreckt sich das Sahlenburger Schill-Vorkommen in einer Nordwest-Südost Orientierung zwischen den beiden Randprieln Sahlenburger Loch und Altoxstedter Tief (Abb. 2-1b). Die Schill-Bank konnte eine Länge von ca. 50 m und eine Breite von ca. 30 m erreichen. Im Vergleich zu den beiden größeren Schill-Vorkommen erfolgte der morphologische Anstieg, ausgehend von der Prielkante, in einem deutlich flacheren Neigungswinkel von ca.  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  (Abb. 2-5). An der Prielkante befand sich im Vorfeld des Schill-Vorkommens nur noch ein reliktsch erhaltener *M. arenaria* Siedlungshorizont mit wenigen postmortalen Doppelklappen. Die etwa 30 m von der Prielkante entfernte Hochkantschill-Kante war im Vergleich zu den beiden anderen Vorkommen deutlich niedriger ausgebildet und erreichte eine Höhe von ca. 0,2 m. Im Anschluss der HKS-Kante erfolgte in südwestlicher Richtung ein Übergang in eine flachausgebildete Schill-Ebene (Patch-Fläche). Nach ca. 20 bis 30 Meter befanden sich innerhalb dieser Schill-Ebene zwei bis drei relativ neu entstandene, inselartig ausgebildete Schill-Flächen (Patch-Felder). Im Anschluss dieser Patch-Felder erstreckte sich ca. 60 m weit erneut die flachausgebildete Schill-Ebene bis diese in eine Sandwattfläche übergang (Abb. 2-5b).



**Abb. 2-5.** Seitenprofil des Sahlburger Schill-Vorkommens. a) Relieffuss-Serie entlang des Vorkommens. b) Zonenbereiche mit den Lagerungszuständen der Muschelklappen. Profilverlauf siehe auch Abb. 2-2c in Material und Methoden. HWL = Hochwasserlinie, NWL = Niedrigwasserlinie.



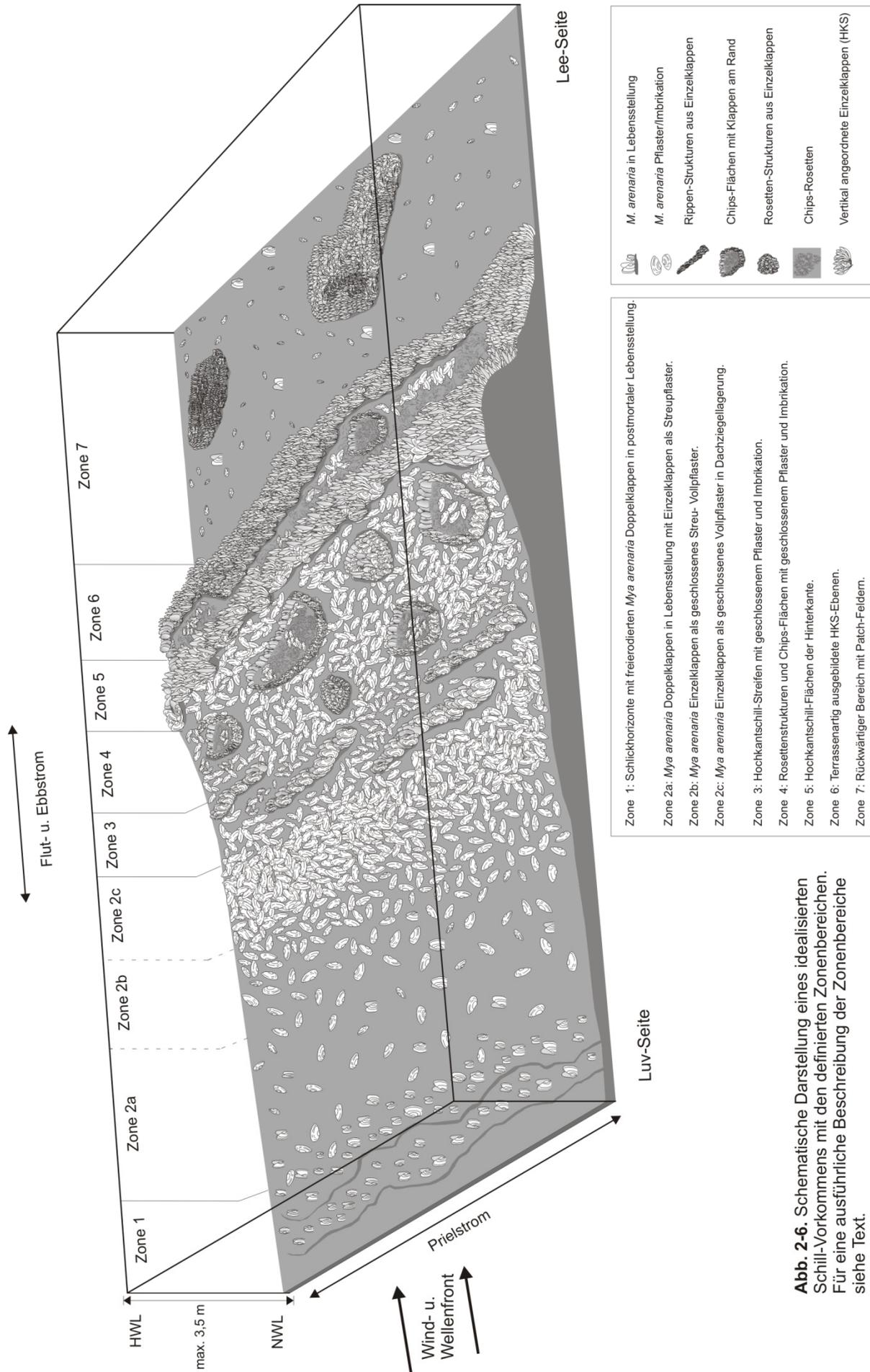
## Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen

Mit Hilfe der durchgeführten Oberflächenuntersuchungen sowie nach Auswertung der entnommenen Reliefgüsse wurde eine für das Arbeitsgebiet allgemeingültige, schematische Darstellung eines idealisierten Hochkantschill-Vorkommens angefertigt (Abb. 2-6). Aufgrund der abwechselnden Ausprägungen jedes Schill-Vorkommens und der an verschiedenen Lokationen genommenen Reliefguss-Serien wurde für jedes Vorkommen ein entsprechendes, schematisches Querprofile erstellt (Abb. 2-3 bis 2-5). Insgesamt wurden sieben Zonenbereiche definiert (Abb. 2-6). Die entsprechenden Zonenbereiche des idealisierten Hochkantschill-Vorkommens werden im Folgenden anhand der Abbildung 2-6 sowie der Abbildungen 2-3 bis 2-5 (Seitenprofile) illustriert und beschrieben.

Zonenbereich 1: Schlickhorizonte mit *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung (Abb. 2-6, Abb. 2-3 bis 2-5)

In unmittelbarer Nähe zu allen drei Schill-Vorkommen wurden zu Niedrigwasserzeiten flächenhaft freierodierte, parallel ausstreichende Schlickhorizonte vorgefunden (Tafel 2-1 D & E). Die Ausbissflächen der zu weit stufig erodierten Horizonte befanden sich unmittelbar am Rand des jeweiligen Hauptprieles. Die Horizonte führten auf ihren Schichtflächen je nach Lokation unterschiedlich viele, zur Hälfte aus dem Sediment herausragende, sich in Lebensposition befindliche postmortale *M. arenaria* Doppelklappen (Abb. 2-3 bis 2-5, Tafel 2-6 B bis D, Tafel 2-7 A bis C). Die relativ steil abfallenden Ausbissflächen wurden vorwiegend aus einem schlickigen Sand aufgebaut. In den entsprechenden Reliefgüssen wurden dementsprechend feine Wechselschichtungen zwischen Feinsand und Schlicksand in diesen Zonenbereichen vorgefunden (Tafel 2-6 A bis D, Abb. 2-3a Do1 & Do2, Abb. 2-4a Fw1 & Fw2, Abb. 2-5a Sb2 & Sb3). Die jeweiligen Bankmächtigkeiten der zwar übereinander abgelagerten, jedoch unterschiedlich weit erodierten Horizontoberflächen variierten je nach Lokation zwischen 10 bis 25 cm. Die Ausbissflächen der einzelnen Horizonte endeten unmittelbar an der Prielabbruchkante und waren nur zu extremen Niedrigwasserzeiten vollständig sichtbar. Die durch fortschreitende Erosion hervorgerufene stufenartige Morphologie der Horizonte verlief dabei annähernd parallel zum jeweiligen Prielverlauf. Die Ausbissflächen der Horizonte wiesen sägezahnartige ausgebildete Erosionsmuster auf (Tafel 2-1 D). Je nach Niedrigwasserniveau und Lokation wurden zwei bis vier freierodierte Schlickhorizonte mit *M. arenaria* Doppelklappen frei gelegt.

Wie bereits Anfangs beschrieben führten die zum Liegenden, tiefer anstehenden Horizonte oftmals größere, d. h. ältere *M. arenaria* Generationen. Die noch bis zur Hälfte ihrer Gesamtlänge im Sediment steckenden Doppelklappen hatten eine durchschnittliche Klappenlänge von 8 bis 12 cm (Tafel 2-6 B bis D, Abb. 2-4a Fw2, Abb. 2-5a Sb1). Vereinzelt konnten in den entsprechenden Reliefgüssen auch Flucht- und Wühlspuren von älteren *Myas* nachgewiesen werden (Tafel 2-6 C & D). Die Anzahl der Doppelklappen variierte je nach Lokation. Beim Dorumer Vorkommen wurden 40 bis 100 Ind./m<sup>2</sup> gezählt.



**Abb. 2-6.** Schematische Darstellung eines idealisierten Schill-Vorkommens mit den definierten Zonenbereichen. Für eine ausführliche Beschreibung der Zonenbereiche siehe Text.

An der Fedderwarder Lokation wurden 40 bis 110 Ind./m<sup>2</sup> Doppelklappen und in Sahlenburg wurden 2 bis 3 Ind./m<sup>2</sup> gezählt. In den hangenden d. h. obersten Schlickhorizonten wurden oftmals kleinere, d. h. jüngere *M. arenaria* Generationen freigelegt. Besonders gut dokumentiert wurden diese Erosionsereignisse der unterschiedlich alten Siedlungshorizonte am Fedderwarder Vorkommen (Tafel 2-7 A-C). Insgesamt konnten dabei zwischen 73 bis 110 Ind./m<sup>2</sup> innerhalb eines Horizontes nachgewiesen werden. Die Klappenlängen der jungen Generationen betragen 2 bis 4 cm. Des Öfteren wurden auch nur noch einzelne Abdrücke der Doppelklappen auf den Schlickoberflächen vorgefunden (Tafel 2-5 F). Die Flächenausdehnung der Zone 1 schwankte je nach entsprechendem Niedrigwasserpegel innerhalb der Lokationen zwischen 0,5 bis 5 m (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN1, Abb. 2-6).

### Zonenbereich 2a bis 2c

Zone 2a: *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensposition mit Streupflaster  
(Abb. 2-6, Abb. 2-3 bis 2-5)

Der Zonenbereich 2a wurde beim Fedderwarder- und Sahlenburger Vorkommen während des Untersuchungszeitraumes nicht ausgebildet.

Im Anschluss an die Schlickhorizonte wurden auf der ebenen Wattfläche im Vergleich zu Zone 1 deutlich weniger *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung vorgefunden. Die Anzahl der nur wenige Zentimeter herausragende Doppelklappen nahm aufgrund der fehlenden Erosionsereignisse beispielsweise am Dorumer Vorkommen auf 2 bis 5 Ind./m<sup>2</sup> ab. Im entsprechenden Reliefguss kann eine deutliche Wühl- bzw. Fluchtspur einer nahezu ausgewachsenen *M. arenaria* entdeckt werden (Tafel 2-6 C). Dies ist besonders interessant, da Aufwärtsbewegungen ausgewachsener *M. arenaria* Muscheln von einigen Autoren bislang zwar vermutet wurden, jedoch noch nicht dokumentiert werden konnte.

Zwischen den verteilten, teilweise immer noch bis zur Hälfte im Wattsediment eingebetteten Doppelklappen lagerten sporadisch verstreute *M. arenaria* Einzelklappen in konvexer Position auf der Sedimentoberfläche als „offenes“ Streupflaster. Eine richtungsorientierte Einregelung der konvex lagernden Einzelklappen wurde nicht festgestellt. Teilweise konnte eine Größensortierung innerhalb des Pflasters visuell wahr genommen werden, so dass man es nicht nur als „offenes“ sondern auch als „sortiertes“ Streupflaster bezeichnen konnte. Die im Gelände gemessenen Klappenlängen betragen im Durchschnitt 8 bis 12 cm. Kleinere Klappenlängen wurden aufgrund der eben erwähnten Sortierung nur relativ selten vorgefunden.

Zwischengelagert fanden sich auch Einzelklappen von *Cerstoderma edule* und seltener auch Einzelklappen von *Macoma balthica* (Abb. 2-3a Do3). Vereinzelt wurden auch Klappen von *Mytilus edulis*, *Scrobicularia plana*, *Petricola pholadiformis* vorgefunden. Die Flächenausdehnung der Zone 2 variierte beim Dorumer Vorkommen zwischen 10 bis 30 m (Abb. 2-3b ZN2a, Abb. 2-7).

Zone 2b: *M. arenaria* Einzelklappen als geschlossenen Streu-Vollpflaster  
(Abb. 2-6, Abb. 2-3)

Der Zonenbereich 2b wurde beim Fedderwarder- und Sahlenburger Vorkommen während des Untersuchungszeitraumes nicht ausgebildet.

Ein Übergang der Zone 2a in den Zonenbereich 2b erfolgte fließend, konnte jedoch visuell deutlich bemerkt werden. In dieser Zone seltener angetroffen wurden *M. arenaria* Doppelklappen. Waren Doppelklappen existent, so ragten die Klappen nur noch 2 bis 4 cm aus der Sedimentoberfläche heraus (Abb. 2-3a Do5).

Durch die erhöhte Klappenkonzentration bilden die Einzelklappen der *M. arenaria* den Hauptbestandteil dieses Zonen-Bereiches. Die Klappen lagerten überwiegend in konvexer Position als geschlossenes Streu- bis Vollpflaster auf der Wattoberfläche (Tafel 2-1 F). Zwischen den Pflastern konnten auch vereinzelt Muschelgattungen wie *C. edule*, *M. balthica*, *M. edulis* wahrgenommen werden. Die Flächenausdehnung der Zone 2b konnte am Dorumer Vorkommen zwischen 5 bis 10 m variieren (Abb. 2-3b ZN 2b, Abb. 2-6).

Zone 2c: *M. arenaria* Einzelklappen als geschlossenes Vollpflaster in  
Dachziegellagerung (Abb. 2-6, Abb. 3-5)

Ab Zonenbereich 2c wurde ein deutlicher Anstieg der Klappenkonzentration wahrgenommen. Für diesen Zonen-Bereich charakteristisch sind *M. arenaria* Einzelklappen die als geschlossenes Vollpflaster die gesamte Oberfläche bedecken (Tafel 2-7 D, Abb. 2-3b bis 2-5b ZN 2c). Die Schalenkonzentration in diesem Abschnitt stieg teilweise derartig an, dass am Ende des Zonenabschnittes ein fließender Übergang in eine Dachziegellagerung (auch Imbrikation) dokumentiert wurde (Tafel 2-2 A). Häufig konnte am Abschnittsende des Zonenbereiches eine Richtungs-Einsteuerung einiger Klappen auf den obersten Lagen dokumentiert werden. Die konvex lagernden Klappen regelten sich mit ihrer horizontalen Längsachse senkrecht zur jeweiligen lokal auflaufenden Wellenrichtung ein. Die Gesamtbreite der Pflasterbedeckung variierte je nach Lokation und Untersuchungszeitraum zwischen 5 bis 30 m (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN 2c, Abb. 2-6).

Zonenbereich 3: Hochkantschill-Rippen/Schill-Streifen mit geschlossenem Pflaster und  
Imbrikation (Abb. 2-6, Abb. 2-3 & 2-4)

Am Sahlenburger Vorkommen wurde die Zone 3 während der Untersuchungszeit nicht ausgebildet.

Für diesen Zonenabschnitt charakteristisch sind markant auffällige, auf der Bankoberfläche nahezu parallel zur Wellenfront verlaufende rippen- und streifenartig ausgebildete Strukturen (Abb. 2-6). Besonders gut dokumentiert wurden die Strukturen am Dorumer Vorkommen (Tafel 2-2 B). Aufgebaut wurden die Rippen von hochkantgestellte, ineinander verschachtelten *M. arenaria* Einzelklappen (Tafel 2-2 C, Tafel 2-8 A). Die Strukturen konnten

mehrere Meter weit längsartig über weite Bereiche der Bankoberfläche verfolgt werden. Die Breite der einzelnen Rippen variierte dabei zwischen 10 bis 30 cm. Stellenweise traten oftmals Unterbrechungen sowie schlängelnde Anordnungen entlang der Rippen auf. Die Hochkantstellung der Klappen innerhalb der Rippen erschien willkürlich und chaotisch vorzuliegen. Die Hochkantstellung wechselte scheinbar unregelmäßig von vertikal zu horizontal gestellten Klappen. Eine relativ häufige Erscheinungsform innerhalb der Rippen waren rosettenartige Strukturen in denen teilweise kleinere Schalenfragmente aufgefunden wurden. Größere Schalenfragmente wurden in räumigeren Zwischenräumen angetroffen (Tafel 2-8 A). Umgeben wurden die Ripp-Strukturen von *M. arenaria* Vollpflaster in Dachziegellagerung (Abb. 2-6).

Häufig traten die Rippen auch parallelverlaufend hintereinander auf. Die so entstandenen Zwischenräume wurden mit *M. arenaria* Vollpflaster völlig überdeckt. Die Flächenbreite der Zone 3 variierte je nach Lokation zwischen 2 bis 10 m (Abb. 2-3b & 2-4b ZN3).

Zonenbereich 4: Rosettenstrukturen und Chips-Flächen mit geschlossenem Pflaster und Imbrikation (Abb. 2-6, Abb. 2-3 bis 2-5)

Die typischen Strukturen dieses Zonenbereiches sind oval bis rund ausgebildete Rosettenstrukturen und Areale mit Schalenbruchstücken (Chips-Flächen). Die freistehenden, rosettenartigen Strukturen bestanden aus wirr angeordneten vertikal und horizontal gestellten *M. arenaria* Einzelklappen. Einzelne Strukturen erreichten je nach Lokationsort einen Durchmesser von 20 bis 60 cm. Die Rosettenform wurde durch 5 bis 20 Einzelklappen gebildet die jeweils zu Paketen ineinander geschachtelt wurden (Tafel 2-2 D). Die einzelnen Schalenpakete lagerten dabei chaotisch, so dass die einzelnen Klappen mit ihrer konvexen Wölbung in alle Himmelsrichtungen zeigen konnten (Tafel 2-8 B, Abb. 2-3a Do9, Abb. 2-4a Fw7). Zwischengelagert waren oftmals *M. arenaria* Bruchstücke sowie Einzelklappen von *C. edule*, *M. balthica* und vereinzelt auch Klappen von *M. edulis*. Die ebenfalls überwiegend rund bis oval ausgebildeten Chips-Flächen setzten sich aus kleinen, dünnen zum Teil sehr dicht gepackten unterschiedlichen Schalenbruchstücken zusammen (Tafel 2-2 E, Tafel 2-3 B). Die Durchmesser einzelner Flächen schwankten zwischen 20 bis 80 cm, konnten bei der Dorumer Lokation in den Herbst- und Wintermonaten auch 2 bis 5 m betragen (Tafel 2-3 A). Die enthaltenen Schalenbruchstücke lagerten derartig fest und dicht aneinander, dass ein herausnehmen des Schalenmaterials oftmals nur schwer möglich war. Die Kompaktion innerhalb einiger Chips-Fläche war teilweise derartig dicht, dass sich auf einigen Flächen das Wasser zu Ebbzeiten sammelte und nicht abfließen konnte. Innerhalb der Chips-Flächen waren die Schalenbruchstücke häufig als Rosettenmuster angeordnet (Tafel 2-2 E). Oftmals umrahmt wurden die Chips-Flächen von hochkantgestellten *M. arenaria* Klappen. Scharfe Abgrenzungen zwischen Chips-Strukturen und HKS-Anordnungen waren häufig ausgebildet (Tafel 2-2 F). Zudem konnte eine häufige Überdeckungen einzelner Flächen mit Schalenpflaster dokumentiert werden (Tafel 2-3 A). Auf den relativ flach abfallenden Chips-Oberflächen lagerten sich oft *M. arenaria* Streu- bis Vollpflaster ab. Umgeben wurden die Rosetten- und Chips-Areale von geschlossenem Streu- bis Vollpflaster, häufig traten auch

Dachziegellagerungen auf (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN4, Abb. 2-6). Die Ausbreitung der Zone 4 variierte je nach Lokation zwischen 2 bis 30 m, wobei die größten Flächenausdehnungen auf dem Dorumer Vorkommen dokumentiert wurden (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN4).

Zonenbereich 5: Hochkantschill-Flächen der Bank-Hinterkante  
(Abb. 2-6, Abb. 2-3 bis 2-5)

Die charakteristischen und auffälligsten Strukturen innerhalb der gesamten Schill-Vorkommen waren vertikal eingeregelt Einzelklappen, der sogenannten Hochkantschill (Tafel 2-3 C bis F).

Im Gegensatz zu der „normalen“ horizontalen Lagerung (Richter 1922, 1942) wurden die Hochkantschille (HKS) aus Paketen von aneinander und ineinander geschachtelten *M. arenaria* Einzelklappen aufgebaut (Tafel 2-3 C bis F, Abb. 2-3a Do11 & Do12, Abb. 2-4a Fw8, Abb. 2-5a Sb7 & Sb8). Die hohe Anzahl des Klappenmaterials bildete dabei oft ausgedehnte und geschlossene Schalenstrukturen auf den Oberflächen der Vorkommen. Die größten Flächenausdehnungen wurden an der Dorumer-Lokation dokumentiert. Die Hochkant-Anordnungen wurden bei allen drei Lokationen oftmals unmittelbar am hinteren Saum des jeweiligen Vorkommens vorgefunden (Abb. 2-6).

Je nach Lokationsort betrug der abfallende Winkel an den Hinterkanten  $70^\circ$  bis  $80^\circ$ . Die steilsten Neigungswinkel wurden dabei am Dorumer- und Fedderwarder Vorkommen gemessen. An einigen Stellen der steil abfallenden Kanten konnte oftmals auch eine beginnende aufeinander Stapelung einzelner Klappen dokumentiert werden. Hierbei lagerten sich ca. vier bis zehn etwa gleich große Einzelklappen mit ihrer Wölbung nach unten zeigend aufeinander. Die schüsselförmigen *M. arenaria* Klappen wurden dabei derartig dicht aneinander geschachtelt, so dass dieser Prozess zu einem gegenseitigen abstützen der einzelnen Klappen führte. An anderen Stellen konnte eine endgültige fächerartige, vertikale Position der Einzelklappen beobachtet werden (Tafel 2-8 C). Die nahezu aufrecht stehenden Klappen wichen mit ihrer Längsachse ca.  $90^\circ$  aus der horizontalen Lage ab. Die Schalenpakete bestanden meist aus 5 bis 20 Einzelklappen und bildeten ausgedehnte, deckenartige Flächen auf den Schill-Vorkommen aus.

Die allgemeine Orientierungsrichtung der Hochkantschille zeigte überwiegend in leewertiger Bank-Richtung, d. h. die konkaven (hohlen) Klappenseiten zeigten fast ausnahmslos senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Wind- und Wellenhaupttrichtung (Tafel 2-3 D). Ausnahmen in der Orientierung wurden nur unmittelbar um Hindernisse bei denen sich die Klappen herum einregelten vorgefunden. Während der Untersuchungen konnten alle Grade der Hochkantstellung beobachtet werden. Selten vorgefunden wurden Klappen die sich mit ihrer Querachse hochkant ein regelten. Das Schalenmaterial bestand fast ausnahmslos aus weiß bis beige farbigen gut erhaltenen und nahezu gleich großen Klappen. Außer einer leichten Abrasionerscheinung der Klappenoberflächen konnten visuell keine größeren Beschädigungen festgestellt werden. Teilweise konnte jedoch ein leichter Befall durch Balaniden bzw. deren reliktsch erhaltenen Panzerplatten festgestellt werden. Selten waren andere Bivalvengattungen zwischen den Hochkant-Anordnungen eingeschaltet.



Waren welche vorhanden, so handelte es sich überwiegend um kleinere Klappen von *C. edule*, *M. balthica* sowie kleine Schneckengehäuse von *L. littorea*, die sich häufig zwischen den Hohlräumen der *M. arenaria* Schalen befanden. Größere Schalen der erwähnten Bivalven wurden meist nur als lockeres Pflaster auf den HKS-Flächen vorgefunden. Die Mächtigkeit der Hinterkante konnte besonders in den Sommermonaten einen wallartigen Charakter erhalten. Hierbei wurden je nach Lokation Mächtigkeiten zwischen 0,2 bis 1,2 m gemessen. Die mächtigsten Hochkantschill-Anordnungen wurden am Dorumer Vorkommen vorgefunden. Die Flächenausbreitung variierte je nach Lokation zwischen 30 cm und konnte an der Dorumer Lokation bis zu 3 m betragen (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN5).

Zonenbereich 6: Terrassenartig ausgebildete Hochkant-Schill Ebenen  
(Abb. 2-6, Abb. 2-3)

Für den Zonenbereich 6 charakteristisch waren terrassenartig angelegte Ebenen die sich unmittelbar an der Hinterkante bildeten (Tafel 2-4 D, Abb. 2-6). Dokumentiert wurden die Terrassenstrukturen nur am Dorumer Vorkommen. Die einzelnen Ebenen waren teilweise halbmondartig ausgebildet. Auf deren relativ kleinen, flachen Oberflächen lagerten oftmals *M. arenaria* Klappen als Pflaster. Selten wurden rosettenartige Hochkantstrukturen vorgefunden. Häufig verbreitet waren dagegen Chips-Flächen die von vereinzelt *M. arenaria* Pflaster überdeckt wurden (Tafel 2-4 E).

An den jeweiligen Rückkanten der Terrassenstrukturen lagerten sich oftmals auffällig braune bis graue *M. arenaria* Klappen an und bildeten neue Hochkantstrukturen. Die Hochkantschille dieses Bereiches ähnelten denen der Zone 5, wiesen mit 30° bis 40° jedoch einen geringeren Neigungswinkel auf. Einen starken Bewuchs dieser Bereiche durch Balaniden sowie einer Vielzahl von weidenden Schnecken der Gattung *Littorina littorea* wurde ebenfalls dokumentiert. Die Terrassen-Ebenen konnten eine Mächtigkeit zwischen 10 bis 30 cm erreichen. Die Flächendurchmesser einzelner Terrassen-Strukturen variierten zwischen 1 bis 2 m.

Zonenbereich 7: Rückwärtiger Bereich mit Schill-Feldern  
(Abb. 2-6, Abb. 2-3 bis 2-5)

Unmittelbar hinter dem Zonenbereich 7 erfolgte beim Dorumer Vorkommen oftmals abrupt der Übergang zur ebenen Wattoberfläche. Auf der flachen Gezeitenfläche wurden überwiegend *M. arenaria* Einzelklappen sporadisch als Streupflaster abgelagert (Abb. 2-3a Do15). Vereinzelt konnten an allen drei Lokationen in diesem Zonenbereich aus dem Sediment herausragende *M. arenaria* Doppelklappen entdeckt werden (Abb. 3 Do14). Viele der Klappen wurden mit Schlick überlagert und ragten nur noch einige Zentimeter aus der Wattoberfläche hervor. In 200 bis 300 m Entfernung lagerten flache, oftmals sichelartig geformte Schill-Felder (Tafel 2-4 F). Die durchschnittlich gemessene Mächtigkeit einzelner

Schill-Felder (Patch-Felder) betrug 10 bis 15 cm. Ihre flächige Ausdehnung schwankte zwischen 2 bis 10 m.

Bei den Vorkommen in Fedderwarden und Sahlenburg erfolgte ein abrupter Übergang der Zone 5 in ein ausgedehntes Schill-Feld des Zonenebereichs 7 (Abb. 2-4b & 2-5b ZN7). An beiden Lokationen konnte der rückwärtige Bereich eine Flächenausdehnung von 25 bis 100 m erreichen.

Aufgebaut wurden die Patch-Ansammlungen an allen drei Lokationen überwiegend aus dunkel beige verfärbten *M. arenaria* Einzelklappen. Oftmals zwischengeschaltet waren Einzelklappen von *C. edule*, *M. balthica* und vereinzelt auch von *M. edulis* (Tafel 2-8 D, Abb. 2-4a Fw9 bis Fw12, Abb. 2-5a Sb9). Die *M. arenaria* Klappen waren auffällig stark mechanisch beansprucht und teilweise komplett mit Balaniden überwuchert. Auf weiten Flächenbereichen wurden chaotische Lagerungszustände vorgefunden (Abb. 2-3a Do17). An anderen Stellen lagerten die Klappen dicht aneinander und bildeten senkrechte als auch waagerechte Hochkantstrukturen. Häufig zwischengelagert waren diverse Schalenbruchstücke. Oftmals waren die Schill-Flächen mit einem dünnen, bräunlichen Diatomeen-Rasen überzogen. Auf den betroffenen Schill-Flächen wurden daher häufiger weidende *Littorina littorea* Schnecken vorgefunden. An den Rändern einzelner Felder lagerten sich des Öfteren senkrecht und waagrecht eingeregelt *M. arenaria* Hochkantstrukturen an (Abb. 2-3a Do16 bis Do18). Rosettenartige Klappen-Anordnungen wurden ausschließlich in mittleren Bereichen einzelner Flächen dokumentiert.

### **Jahreszeitliche Veränderungen**

Während des Untersuchungszeitraumes wurde das Dorumer Schill-Vorkommen am häufigsten zu verschiedenen Jahreszeiten aufgesucht. Hierbei wurde eine jahreszeitliche Variabilität der Bankmorphologie sowie der Oberflächenstruktur dokumentiert.

Die Zonenbereiche 1, 2a und 2b sowie die Zone 6 des Dorumer Vorkommens wurden in den Sommermonaten häufig durch Schlickablagerungen überdeckt (Tafel 2-4 A & B).

Zu Sommerzeiten wurden im Vergleich zu den Herbst- und Wintermonaten deutlich weniger Hochkantschill-Flächen auf der Bankoberfläche gebildet. Die in den Sommermonaten vorgefundenen Hochkantstrukturen wurden überwiegend von taphonomisch stärker beanspruchtem Klappenmaterial aufgebaut. Anstelle der Hochkantschill-Areale entstanden an der Bank-Hinterkante des Zonenbereiches 5 vermehrte Chips-Flächen. Diese ausgedehnten Chips-Flächen dieser Bereiche wirkten sich auf die Morphologie der Bank-Hinterkante aus. Es konnte an der Hinterkante ein deutlich geringerer Neigungswinkel von ca. 30° bis 50° festgestellt werden als zu den Herbst- und Winterzeiten (Tafel 2-4 C).

In den Herbst- und Wintermonaten wurden im Vergleich deutlich mehr Hochkantschill-Flächen innerhalb des Zonenebereichs 5 aufgebaut. Die dort angelagerten Klappen bildeten innerhalb des hinteren Bankbereiches die bereits beschriebene auffällige steil abfallende HKS-Kante (Tafel 2-3 C bis F). Zudem wurden keine Schlicküberdeckungen innerhalb der o. a. Zonenbereiche dokumentiert.

## Profilaufnahme im Zonenbereich 5

Durch die Aufnahme des Profils an der Hinterkante des Dorumer-Vorkommens (Zonenbereich 5) konnte zusätzlich zu den entnommenen Reliefgüssen eine 53 cm mächtige Abfolge aufgenommen werden (Abb. 2-7a & b). Innerhalb dieser Abfolge wurden 10 Schichtfolgen von einander differenziert (Abb. 2-7b, Layer L1 bis L10).

### Layer 1

Basis des Gesamtprofils bildete eine Sauerstoff reduzierter Schichtfolge. Die schlickige und stark riechende Sedimentschicht war > 4 cm mächtig und enthielt vorwiegend dunkelgraue *M. arenaria* Einzelklappen sowie einige *Mya* Bruchstücke. Des Weiteren enthalten waren Klappenbruchstücke von *C. edule* und vereinzelt auch von *M. balthica*.

### Layer 2

Im Übergang von Layer 1 zu Layer 2 nahm der Schlickanteil im Sediment leicht ab. Die Mächtigkeit betrug ca. 5 cm. Überwiegend wurden graue *M. arenaria* Einzelklappen sowie diverse Schalenbruchstücke in chaotischer, ungeordneter Lagerung vorgefunden. Immer wieder zwischengeschaltet waren einige Klappen von *C. edule* und *M. balthica*.

### Layer 3

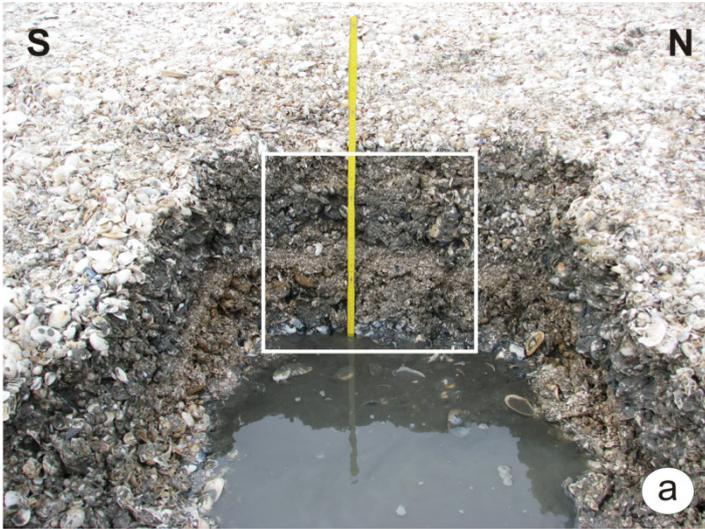
Die Schicht erreichte eine Mächtigkeit von 5 cm und wurde vorwiegend von gelb bis beige gefärbten *M. arenaria* Klappen dominiert. Die durchschnittliche Klappenlänge betrug dabei 6 bis 8 cm. Die Einzelklappen waren überwiegend senkrecht angeordnet, so dass ein gegenseitiges abstützen der Klappen erfolgte. Seltener vorgefunden wurden *C. edule* Klappen sowie Bruchstücke anderer Bivalvengattungen.

### Layer 4

Bei dem Horizont handelt es sich um eine ca. 5 cm mächtige Lage aus feinen, eckigen sowie dünnen Schalengrus bestehend aus diversen Molluskenbruchstücken. Der Durchmesser der Schalenbruchstücke betrug zwischen 0,5 bis 1 cm. Die Lagerung innerhalb des Horizontes war dicht und kompakt.

### Layer 5

Die Matrix dieser Schicht bestand aus einem Schlicksand-Gemisch in der *M. arenaria* Einzelklappen sowie diverse Bruchstücke enthalten waren. Die Mächtigkeit betrug ca. 6 cm. Die Orientierung des Klappenmaterials innerhalb der Matrix erschien ungeordnet und chaotisch.



**Abb. 2-7.** Aufgenommene Abfolge an der Hinterkante des Dorumer Schill-Vorkommens. a) Grabungsstelle mit Zollstock. b) Profiabfolge mit der Kurzbeschreibung der 10 Schichten (Layers). Ausführlichere Beschreibung siehe Text.

cm	Layer	Profil Kurzbeschreibung	(b)
53	L10	Hochkant eingeregelt, verschachtelte <i>M. arenaria</i> Einzelklappen, <i>M. arenaria</i> Pflasterlagerung	
47	L9	Chips aus <i>M. arenaria</i> und <i>C. edule</i> Bruchstücken Ø 2-4 cm	
43	L8	HKS und Rosetten-Cluster mit <i>M. arenaria</i> Einzelklappen, Schalenbruchstücke ungeordnete und chaotisch orientiert	
38	L7	Schlicksand mit <i>M. arenaria</i> , <i>C. edule</i> Einzelklappen, diverse Bruchstücke, ungeordnete und chaotische Orientierung	
31	L6	Schalengrus Ø 0,5-1,5 cm und Schalen-Chips Ø 1,5-2 cm, ungeordnete Orientierung	
27	L5	Schlicksand mit <i>M. arenaria</i> , <i>C. edule</i> Einzelklappen sowie Bruchstücke, ungeordnete und chaotische Orientierung	
21	L4	Schalengrus Ø 0,5-1 cm	
16	L3	Senkrechte Orientierung der <i>M. arenaria</i> Klappen, wenig <i>C. edule</i> , wenig Bruchstücke	
8	L2	Leicht schlickig, Einzelklappen von <i>M. arenaria</i> , <i>C. edule</i> , vereinzelt <i>M. balthica</i> , diverse Bruchstücke	
4	L1	Schlickig, O <sub>2</sub> arm, graue <i>M. arenaria</i> Einzelklappen, diverse Schalenbruchstücke	
0 ?			

### Layer 6

Bei der Schichtabfolge handelt es sich um eine ca. 4 cm mächtige Lage aus feinen, eckigen sowie dünnen Schalengrus bestehend aus diversen Molluskenbruchstücken. Der Durchmesser der Bruchstücke reichte von 0,5 bis 1,5 cm. Die Schalen-Chips hatten einen Durchmesser von 1,5 bis 2 cm. Die Lagerung innerhalb des Horizontes war dicht, kompakt und ungeordnet.

### Layer 7

Die Matrix dieser Schichtabfolge bestand aus einem Schlicksand-Gemisch in der *M. arenaria* und *C. edule* Einzelklappen sowie diverse Bruchstücke enthalten waren. Die Mächtigkeit betrug ca. 7 cm. Die Orientierung des Klappenmaterials innerhalb der Matrix war ungeordnet und chaotisch.

### Layer 8

Bei diesem Horizont konnte visuell ein Rückgang des Sedimentanteils innerhalb der Matrix wahrgenommen werden. Die ca. 5 cm mächtige Schicht wurde überwiegend aus *M. arenaria* und vereinzelt *C. edule* Einzelklappen aufgebaut. Zwischengelagert waren diverse ungeordnete Schalenbruchstücke anderer Muschelgattungen. In verschiedenen Bereichen dieses Layers konnten HKS-Strukturen sowie Cluster-Bildungen von gut erhaltenen *M. arenaria* Einzelklappen dokumentiert werden.

### Layer 9

Bei der vorletzten Abfolge handelt es sich um eine ca. 4 cm mächtige Lage aus eckigen, dünnen Chips-Stücken von *M. arenaria* und *C. edule* Einzelklappen. Der Durchmesser der Chips betrug 2 bis 4 cm. Die Lagerung war sehr dicht, kompakt und ungeordnet.

### Layer 10

Den Top des Profils bildeten die an der Oberfläche abgelagerten Schalen. Die ca. 6 cm mächtige Schicht wurde hauptsächlich aus hochkant eingeregelteten *M. arenaria* Einzelklappen aufgebaut. Zwischen den HKS-Anordnungen konnten auch Einzelklappen in Pflasterlagerung vorgefunden werden.

## Diskussion

Die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Lagerungsverhältnisse von *M. arenaria* Einzelklappen zeigten auf den Oberflächen der Schill-Vorkommen verschiedene Zustandsformen. Diese unterschiedlichen Lagerungsvariationen wurden immer nur auf bestimmten Abschnitten innerhalb der untersuchten Schill-Vorkommen ausgebildet. Die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen der drei Vorkommen zeigen ein einheitliches Ablagerungsmuster, so dass eine Einteilung in sieben verschiedene Zonenbereiche vorgenommen werden konnte. Bei der folgenden Diskussion wird als erstes auf die Entstehung der verschiedenen Lagerungsverhältnisse innerhalb der einzelnen Zonenbereiche eingegangen werden. Dabei werden die Zonen getrennt voneinander und unter der Bezugnahme älterer Arbeiten betrachtet, diskutiert und verglichen.

Auf Basis dieser Hintergrundinformationen wird im weiteren Diskussionsverlauf auf die festgestellten Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den drei Schill-Lokationen eingegangen. Als eigenen Abschnitt wird dagegen die zeitliche, d. h. die vertikale Entwicklung im Bezug auf die vorgestellte Profilabfolge des Dorumer-Vorkommens diskutiert. Abschließend soll ein Vergleich mit ähnlichen, modernen Massenvorkommen erfolgen sowie eine Diskussion der hier erbrachten Ergebnisse auf eventuelle fossile Schalen-Akkumulationen mit vertikalen Hochkantstrukturen.

### Lagerungsvariationen innerhalb der einzelnen Zonenbereiche

Durch die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen konnte eine schematische Standardzonierung eines idealisierten Hochkantschill-Vorkommens erstellt werden (Abb. 2-6). Es wurden dabei unterschiedliche Ausprägungen, Variationen sowie fließende Übergänge aber auch gemeinsame Ablagerungszustände und wiederkehrende charakteristische Erscheinungsformen innerhalb der Vorkommen dokumentiert. Im folgenden Abschnitt wird auf die Entstehung der verschiedenen Lagerungsverhältnisse innerhalb der dieser Zonenbereiche eingegangen.

### Zonenbereich 1: Ehemalige, freierodierte *M. arenaria* Siedlungshorizonte

Wie in den Ergebnissen vorgestellt führten die ehemaligen Siedlungshorizonte oftmals noch freierodierte *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung (s. auch Tafel 2-1 E, Tafel 2-6 B bis C). Nach der Definition von Quenstedt (1927) handelt es sich um klassische autochthone *M. arenaria* Taphozöosen (Totgemeinschaft). Zu ihren Lebzeiten repräsentierten diese endobenthischen Muschel-Siedlungen innerhalb des Untersuchungsgebietes eine intakte Biocoenose im Wattsediment (Wilson 1988). Die jeweilige Wohntiefe einer *M. arenaria* entsprach dabei der Länge ihres Siphon (Kühl 1951, Schäfer 1962). Jedes Lebensalter einer Muschel hatte dabei ein ganz bestimmtes Siedlungsniveau im Sediment (auch Tafel 2-7 B & C). Nach Kühl (1950, 1951) sind nur die

kleinsten d. h. jüngsten Individuen in der Lage sich in der Sedimentsäule frei zu bewegen. Ausgewachsene Muscheln konnten dagegen ihren einmal gewählten Standort im Sediment nicht mehr aktiv verlassen (Kühl 1951; Schäfer 1962). Einen Nachweis für ein aktives Graben in obere Sedimentschichten konnte Kühl (1950) bei seinen Untersuchungen nicht klären. Wurden z. B. heranwachsende juvenile *M. arenaria* von Schlickern überschüttet, so waren sie in besonderer Weise fähig sich zur Oberfläche empor zu wühlen. Hierbei wandten sich die Muscheln Fußvoran nach oben und wühlten sich durch Klimmbewegungen ihres Fußes zur Oberfläche (Kühl 1950). Laut Schäfer (1962) hörte die Fähigkeit, sich Fuß-voran im Sediment nach oben zu bewegen recht bald mit beginnendem Längenwachstum des Siphos auf. Mit zunehmendem Alter wuchs also der Siphos proportional mit der Schalenlänge, so dass die Muscheln sesshaft wurden und in einer Sedimenttiefe von 15 bis 30 cm anzutreffen waren. Je länger der Siphos bzw. die Schalenklappen, desto tiefer lag das jeweilige Wohnniveau einer lebenden *M. arenaria*.

In einigen Reliefgüssen des Zonenbereiches 1 wurden derartige Doppelklappen in Lebensstellung vorgefunden (Tafel 2-6 A bis D, Tafel 2-7 A bis C). Unterschiedliche Besiedlungsstufen wurden besonders gut in einigen Stechkästen des Fedderwarder Vorkommens dokumentiert (Abb. 2-4a Fw1 bis Fw4). Dabei finden sich jeweils in den tieferen Siedlungsschichten größere, d. h. adulte Doppelklappen (Tafel 2-7 A & B). Die kleineren, juvenilen Generationen finden sich dagegen in den Horizonten zum Hangenden (s. auch Tafel 2-7 A & B). In den Reliefgüssen des Dorumer- und Sahlenburger Vorkommens wurden relativ ausgewachsene Doppelklappen vorgefunden (Abb. 2-3a Do2, Abb. 2-5a Sb1). Von juvenilen Doppelklappen zeugten nur noch die Schalenabdrücke auf den Schlickoberflächen der fast völlig erodierten Siedlungshorizonte (Tafel 2-5 F). Die Abdrücke deuten den bereits erfolgten, vollständigen Abtransport der jüngeren Doppelklappen die sich folglich in den oberen Sedimentschichten ansiedelten. Da auch kleinere Klappenlängen auf den Oberflächen der angrenzenden Zonenbereiche beider Lokationen aufgefunden wurden, kann davon ausgegangen werden, dass an allen drei Standorten auch mehrere unterschiedlich alte Siedlungshorizonte freierodiert wurden. Sowohl bei den Geländeuntersuchungen also auch in den entsprechenden Reliefgüssen konnten in den oberen, d. h. jüngeren Siedlungshorizonten eine höhere Besiedlungsdichte der *M. arenaria* festgestellt werden. Dies entspricht auch den Beobachtungen von Kühl (1950) der ebenfalls bei seinen Untersuchungen eine Abnahme der Besiedlungsdichte mit zunehmendem Alter der Tiere beschrieb.

Durch ihre tiefe endobenthische Lebensweise waren die Muscheln zu Lebzeiten relativ gut durch äußere Einflüsse wie Wind, Wellen und Nahrungsräuber geschützt. Dieser Lebensraum konnte jedoch durch eine relativ rasche Überdeckung mit Schlick oder Sand dermaßen gestört werden, dass die Muscheln oftmals nicht mehr fähig waren mittels ihres einziehbaren Siphons, den Verbindungsweg zu dem Sauerstoff und Nährstoffreichen Meereswasser freizuhalten. Erreichte die Überschüttung zudem höhere Ausmaße, so konnten die Muscheln nicht mehr schnell genug folgen und wurden durch die Sedimentmassen derartig stark belastet, dass sie jeder Ortsbewegung beraubt wurden und durch Sauerstoffmangel in Lebensstellung abstarben (Schäfer 1962).

Dass es sich bei der Überdeckung der vor Ort untersuchten Siedlungshorizonte teilweise um relativ plötzlich einsetzende Sedimentationsereignisse gehandelt haben muss, zeigten die Geländeuntersuchungen vor Ort. Oftmals wurde in den Sommermonaten besonders auf den Oberflächen der vorderen Zonenbereiche (Zonen 1-2c) ein sogenannter Schlickteppich abgelagert. Laut Van Straaten & Kuenen (1958) entstehen derartige Schlickablagerungen überwiegend zu Sommerzeiten durch Sedimentverzögerung (setting lag) sowie durch Erosionsverzögerung (scour lag). Der Zonenbereich 1 lag bei allen drei Vorkommen im Mischwattbereich auf relativ hochgelegenen Wattflächen im Bereich der Wattwasserscheide. Diese Bereiche sind laut Reineck & Siefert (1980) für Schlickablagerungen geradezu prädestiniert. Auch die in den Reliefgüssen vorgefundenen Schalen der Muschel Gattungen *C. edule* und *M. balthica* zählen zu den typischen Charakterarten dieses Mischwattbereiches. In den Reliefgüssen der vorderen Zonenbereiche konnten zudem häufig laminierte Wechschichtungen von Schlick und Mittelsand nachgewiesen werden (Abb. 2-3b bis 2-5b ZN1 & ZN2, Tafel 2-6 A bis D). Nach Reineck (1975) ist dies oftmals ein Anzeichen für eine häufige Umlagerung der Sedimentpakete durch hydrodynamische Bedingungen. Laut Wunderlich (1979) verhindern diese Umlagerungsprozesse weitgehende Bioturbations-Ereignisse, welche in den Reliefgüssen des Zonenbereiches 1 daher nur selten vorgefunden wurden.

Ein prämortaler Bewuchs der *M. arenaria* Doppelklappen ist durch die endobenthische Lebensweise der Muschel laut Hertweck (1979) unwahrscheinlich bzw. unmöglich. Ein postmortaler Bewuchs der in Lebensstellung befindlichen Doppelklappen (z. B. durch Balaniden) wurde in anderen Arbeiten bereits häufig beschrieben (z. B. Schäfer 1962, Hertweck 1979). Ein Bewuchs der freierodierten Doppelklappen innerhalb des Zonenbereiches 1 wurde dagegen nur vereinzelt dokumentiert (z. B. Tafel 2-6 B). Das Fehlen eines derartigen Bewuchses ist ein ausgezeichneter Indikator für die hohen hydrodynamischen Aktivitäten, welche ständig auf die ehemaligen Siedlungshorizonte einwirken.

War die Sedimentüberdeckung über den Horizonten nicht allzu mächtig, konnte entgegen bisheriger Ergebnisse auch von ausgewachsenen *M. arenaria* noch eine aktive Korrektur in hangende Bereiche erfolgen (Tafel 2-6 C & D). Besonders im Reliefguss Do4 kann ein solcher Prozess hervorragend nachvollzogen werden (Tafel 2-6 C). Gut zu erkennen ist hierbei eine in drei Etappen erfolgte Niveaus-Anpassung der nahezu ausgewachsenen Muschel (Tafel 2-6 C). Erfolgte eine zu mächtige Sedimentüberdeckung, so war ein abruptes, lokales und gleichzeitiges Massenabsterben unzähliger Individuen eines ganzen Besiedlungshorizontes die Folge (Tafel 2-1 E). Durch ihre Siedlungsweise im Sediment behielten die Muscheln auch nach ihrem Ableben ihre Lebensstellung bei (Hecht 1930; Schäfer 1962).

Wie in den Reliefgüssen zu erkennen, erfolgte oftmals eine Neuansiedlung der jungen *M. arenaria* an der gleichen Position, jedoch in einem höheren Siedlungsniveau (Tafel 2-7 A & B). Die meisten *M. arenaria* innerhalb des Zonenbereiches 1 verstarben vermutlich aufgrund einer drastischen Sedimentüberdeckung. Wären die Muscheln durch einen erosionsbedingten Prozess verstorben, so würden sie hier nicht in Lebensstellung erhalten sein. Das postmortale Freilegen der ehemaligen Siedlungshorizonte wurde hauptsächlich



durch natürliche Priel-Randerosionen bzw. Prielverlagerungen unmittelbar vor den Schill-Vorkommen verursacht. Besonders zu Niedrigwasserzeiten wurde die Erosion durch gelegentliche Sturmereignisse beschleunigt, was eine stärkere Welleneinwirkung auf die Horizonte bewirkte. Nach dem Freilegen der *M. arenaria* Siedlungen erfolgte ein baldiger Transport der teilweise subfossilen Doppelklappen auf die angrenzenden Wattflächen. Nach dem Absterben des Individuums waren die noch klaffenden Doppelklappen nur noch durch das Ligament sowie aufgrund einer Sedimentverfüllung (Verkittung) miteinander verbunden. Durch die reibenden Kräfte der Wasserbewegung und des aufwirbelnden Bodenmaterials bedurfte es nach Krause (1950) oft keines langen Transportweges, bis das Ligament sich löste und die Klappen von einander getrennt wurden (sog. Disartikulation). Nach Brett (1990) genügen für eine vollständige Disartikulation geringste Strömungsstärken. Des Weiteren wurde die rasche Klappentrennung durch eine bereits im Sediment vollzogene Verwesung des Muschelweichkörpers begünstigt. Bei diesem Prozess wurde das Gewebe, welches die beiden Klappenhälften verbindet zersetzt. Schäfer (1962) gibt als Zeitspanne für derartige Verwesungsprozesse mehrere Monate an. Aufgrund der sehr hohen Massen der freierodierten Doppelklappen kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil des auf den Schill-Vorkommen lagernden Klappenmaterials überwiegend aus den vorgelagerten Siedlungshorizonten entstammt.

Wie in den Ergebnissen beschrieben wiesen die Horizonte aller drei Vorkommen zudem eine typische sägezahnartige Abbruchkante auf (Tafel 2-1 D). Derartige Erosionsmuster wurden in einem größeren Maßstab in den Arbeiten von Reineck (1963) und Dörjes (1976) erwähnt. Bei Untersuchungen vor Norderney und Spiekerook führte Dörjes (1976) die Entstehung der Sägezähne auf starke, küstenparallele Längsströmungen zurück. Antia (1996) gab als Ursache stehende küstenparallele Wellenoszillationen an. Die hier in einer kleineren Dimension beschriebenen Erosionsmuster der Abbruchkanten entstanden aufgrund von Längsströmungen der Wassermassen in den jeweiligen Prielen sowie durch die bei Niedrigwasser auflaufende, parallel zur Bankmorphologie einwirkende Wellenfront (Abb. 2-6).

### **Die Lagerungsverhältnisse innerhalb der Zonenbereiche 2a bis 2c (Pflaster-Variationen)**

Laut Reineck (1984) markieren die in den Ergebnissen beschriebenen Schillpflaster klassische Erosionsflächen ehemaliger *M. arenaria* Besiedlungshorizonte. Bei zunehmender oder rascher Erosion können abgestorbene *Mya*-Siedlungen ausgespült und auf den Wattflächen in normaler „gewölbt oben“ Lagerung abgelagert werden (Richter 1922, 1924). Kommt es zu einer schnellen Einbettung des Klappenmaterials so ist eine spätere Überlieferung möglich (Häntzschel 1939). Erfolgt jedoch bedingt durch den Seegang ein küstenwertiger Transport des Schalenmaterials, so kann es zu einer ersten stationären Ablagerung führen, wie es hier die vorgefundenen Pflaster-Variationen der Zonenbereiche 2a bis 2c dokumentieren (Tafel 2-1 F, Tafel 2-2 A). Der Prozess einer Pflasterbildung kann nach Schäfer (1941) durch Unebenheiten des Terrains begünstigt werden. Bei allen drei

Schill-Vorkommen wurde im Anschluss an die jeweiligen Siedlungshorizonte ein rampenartiger Anstieg der Oberflächenmorphologie beschrieben. Diese Steigung verhinderte den sofortigen Abtransport der freierodierten Klappen in küstenwertiger Richtung. Die morphologische Erhöhung fungierte dabei als natürliche Transporthürde die eine Konzentration mit eingehender Pflasterbildung innerhalb dieser Zonen-Bereiche ermöglichte. Die in Zone 2a innerhalb des Schillpflasters beschriebene Aussortierung kleinerer Klappenlängen wurde bereits bei vergleichenden Untersuchungen von Jessen (1932) an rezenten und subfossilen Organismenpflaster Amrums festgestellt (auch Dodd & Stanton 1990). Diese Größensortierung, wobei kleinere d. h. leichtere Klappen weiter verfrachtet werden als große bzw. schwerere Klappen, ist die häufigste Sortierungsform (Etter 1994). Der in den Ergebnissen beschriebene Übergang von einem Streu- zu einem geschlossenen Vollpflaster (Zonenbereiche 2b und 2c) ist laut Schäfer (1962) als Wanderform des Schalenmaterials anzusehen. Allerdings muss dabei jedes stationäre Vollpflaster zunächst als Streupflaster beginnen (Schäfer 1962). Auch Häntzschel (1939) stellte ergänzend fest, dass ein derartiger Übergang zudem mit einer Erhöhung der Schalenkonzentration zusammenhängt. Bedingt durch den ansteigenden Neigungswinkel der Schill-Vorkommen und einer ständigen Nachlieferung des Klappenmaterials aus den Siedlungshorizonten kam es zwangsläufig zu einer Konzentrationserhöhung innerhalb des Zonenbereiches 2c. Dieser Prozess führte im weiteren Verlauf zu einer aufeinander Schiebung (Futterer 1975) des Klappenmaterials und somit letztendlich zu einer Dachziegellagerung (s. auch Jessen 1932, 1933). Nach Futterer (1977) kann der Untergrund einen Transport von Objekten maßgeblich beeinflussen. Die in dieser Arbeit festgestellte Einsteuerung der obersten Dachziegellagen (horizontale Längsachse senkrecht zur Wellenrichtung) am Abschnittsende des Zonenbereiches 2c wurde wahrscheinlich durch die darunter befindlichen Pflasterlagen begünstigt. Im Vergleich zu den Pflastern der vorderen Zonenbereiche 2a und 2b, die jeweils auf reinen Sandwattflächen abgelagerten wurden, lagerten die Pflaster der Zone 2c relativ locker auf einem dichten Vollpflaster als Dachziegellagen. Diese Einsteuerung der obersten Lagen konnte also in diesem Bereich leichter von statten gehen (Vgl. Richter 1931). Auch Grinnell (1974) stellte bei Geländeuntersuchungen an Austern Riffen in Florida fest, dass dieses Einsteuerungsverhalten oftmals nur bei lockeren, flachabgelagerten Klappen vor kam. Jedoch waren die von Grinnell (1974) beschriebenen Einsteuerungen eine durch Strömung hervorgerufene Orientierung. Diese Tendenz einer Klappeneinstreuung beobachteten auch Lüders (1929) und Trusheim (1931a) bei ihren gemeinsamen Versuchen im Strömungskanal mit *M. arenaria* Klappen. Die hier beschriebene Einsteuerung der obersten Dachziegellagen wurde dagegen nicht durch Strömung, sondern aufgrund einer senkrechten Einstreuung der Längsachse zur Wellenrichtung vorwiegend durch Wellenbewegungen hervorgerufen (s. auch Allen 1990). Auch Reineck (1982) erläuterte eine derartige horizontale Einsteuerung und nannte als Ursache die rücklaufende Welle, die Klappen wieder ein Stück zum Wasser hin mitnehmen können. Begünstigt wurde diese Orientierung durch die stromlinienförmige Skulptur der *M. arenaria* Klappe (Brenchley & Newall 1970; Nagle 1967; Futterer 1981). Das Fehlen der Zonenbereiche 2a und 2b innerhalb des Sahlenburger- und Fedderwarder Vorkommens hängt mit der Nähe zu den jeweiligen Erosionshorizonten der *M. arenaria* zusammen. Beim Dorumer Vorkommen konnten sich die Klappen aufgrund der

weiterläufigeren Bankmorphologie und zu der bestehenden Entfernung der ehemaligen Siedlungshorizonte somit eine derartige Pflastervariation ausbilden. Eventuell könnte dies als Anzeichen für eine fortgeschrittene Erosion der vorderen Bereiche des Sahlenburger- und Fedderwarder Vorkommens gedeutet werden.

### **Die Rippenstrukturen (Schill-Streifen) innerhalb des Zonenbereiches 3**

Die auffälligen Schill-Streifen (oder auch Säume) dieses Zonenbereiches konnten sich jeweils mehrere Meter über die gesamte Bankstruktur längsziehen (Tafel 2-2 B). Die Längsachsen der Streifen verliefen dabei parallel zur auflaufenden Wellenfront. Ähnliche lineare Schalen-Akkumulationen wurden beispielweise auch fossil von Hauff (1921), Klähn (1929), Moors (1970) und Brenner (1976) erwähnt.

Den hier beschriebenen rezenten linearen Akkumulationen am ähnlichsten sind jedoch Ansammlungen an Spülsäumen die z. B. von Banzhaf (1931), Trusheim (1931b), Schäfer (1941), Reineck (1976) sowie Müller (1992) überwiegend an Strandbereichen beschrieben wurden. Unter einem Spülsaum wird demnach das in langen Streifen angespülte Material (z. B. Muschel- und Schneckenschalen, aber auch Holz, Bernstein oder Wohnröhren) verstanden, das am Ufer eines Gewässers angehäuft wurde. Laut Reineck (1973) sind Spülsäume abhängig vom jeweiligen Wasserstand sowie von der Wind- bzw. Seegangsrichtung und entstehen nur an Strandabschnitten, die ausreichend dem Seegang ausgesetzt werden. Nach Lüders (1958) markieren Spülsäume die jeweils erreichte Hochwassergrenze. Futterer (1981) führte diesbezüglich Experimente im Strömungskanal durch. Demnach können Schill-Streifen als eindeutige Indikatoren für gelegentliche einwirkende Wasserbewegungen in Form von Wellen oder Strömungen angesehen werden. Die auf dem Dorumer Vorkommen beschriebene Parallelität einiger Rippenstreifen bezeichnete auch Futterer (1981) als Indiz für einen durch Wellengang verursachten Prozess (Tafel 2-2 B & C). Das der Wellengang, die Strömungen sowie indirekt die Windrichtung eine entscheidende Rolle bei der Genese der Rippenstrukturen innerhalb dieses Zonenbereiches spielt, steht hierbei außer Frage. Doch ist noch ein weiterer wichtiger Aspekt bei dessen Entstehung innerhalb der Schill-Vorkommen zu beachten: Der zweimal am Tag einwirkende Flut- und Ebbstrom der auf die rampenartig ansteigenden Schill-Vorkommen einwirkt. Bereits Richter (1942) diskutierte die Wirkung des Seegangs auf den Untergrund in Abhängigkeit von der Wassertiefe und der Windstärke. Diesbezüglich verändert sich der Einfluss des Seeganges auf den Untergrund mit dem täglichen Rhythmus der Gezeiten. Die Anlandung von schwerem Material wie Muschelklappen richtet sich dabei nach der Hauptwindrichtung bzw. nach der Seegangsrichtung und kann laut Schäfer (1941) auch kurzzeitige anhaltende Windrichtungen markieren.

Die hier dokumentierten parallel verlaufenden Schill-Streifen können als Indiz für die Richtung der Wellenfront zu unterschiedlichen Wasserständen zwischen den Tidenzeiten angesehen werden. Die Schill-Akkumulationen fungieren auf den rampenartigen Bankstrukturen ähnlich wie Spülsäume an Strandbereichen, als natürliche Wasserstands- und Tidenmarker. Die Entstehung dieser Strukturen wurde dabei maßgeblich durch den

Wellengang beeinflusst, welche bei ab- und auflaufenden Wasserständen zudem Turbulenzen innerhalb der Wellenbrandung bewirkten. Wenn besonders viele Muschelklappen auf engen Raum gefördert werden, so kann die beschriebene vertikale oder horizontale Hochkantstellung der Klappen innerhalb dieser Strukturen erzeugt werden (Schäfer 1941; Reineck 1973). Durch die Brandung wurden die Klappen auf der Bankoberfläche jedesmal kurzzeitig bewegt, so dass diese sich zu den beschriebenen willkürlichen und teilweise chaotisch wirkenden Gebilden ineinander verschachteln konnten. Schritt der Tidenzyklus weiter voran wanderte die Wellenbrandung mit dem jeweiligen Wasserstand mit, so dass die Klappen in der zuletzt generierten Position verbleiben konnten. Dieser Prozess konnte sich logischerweise also nur während des ab- und auflaufenden Wassers über der jeweiligen Bankstruktur ereignen und hängt immer von der Wirkungsgrenze des Bewegt-Wassers über der Rampenmorphologie des Schill-Vorkommens sowie von der Seegangrichtung ab.

#### **Die Rosettenstrukturen und Chips-Flächen der Zone 4**

Freistehende Rosettenstrukturen sowie dichtgepackte oder hochkant eingeregelter Schalenfragmenten wurden beispielsweise von Mii (1957), Mathieu (1966), Sanderson & Donovan (1974), Ball (1976) und Hanamgond (2001) beschrieben. Überwiegend handelte es sich bei den meisten bisherigen Beschreibungen oft um Anordnungen von Gesteinsbruchstücken (z. B. Hitchcock et al. 1861; Gregory 1930; Schmitthenner 1930; Dionne & Laverdiere 1967; Dionne 1971; Sanderson & Donovan 1974; Mount & Kidder 1993; Wilson 2002; Wilson & Edwards 2004). Unter kalten klimatischen Bedingungen können Rosettenanordnungen von Gesteinsbruchstücken laut Dege (1941) auch durch Spaltenfrostung verursacht werden. Rosettenartige Anordnungen an Flüssen und Seen wurden von Cailleux & Taylor (1954), Tricart & Cailleux (1967) und Kostyaev (1973) erwähnt.

Eine zu dieser Arbeit vergleichende Beobachtung lieferte unter anderem Mii (1957) an der Küste Japans. Mii beschrieb bei seinen Untersuchungen ebenfalls Rosettenstrukturen die aus einzelnen Muschelklappen sowie aus hochkant eingeregelter und dicht gepackten Fragmenten gebildet wurden. Die Einlagerung erfolgte jeweils in den Zwischenräumen zylinderartig ausgebildeter Andesite und wurde durch die lokal vorherrschende hohe Schalenkonzentration begünstigt. Auch bei den hier beschriebenen Strukturen spielt die Verfügbarkeit der Klappenmasse eine entscheidende Rolle. Je mehr Klappen angeliefert werden, desto mehr Klappen können entweder zu Rosetten- oder in reiner Hochkantschill-Stellung eingeregelt werden (s. dazu auch Kap. 4). Hanamgond (2001) berichtete über konzentrisch angeordnete Austern Schalen die sich zwischen Kalksteinen an der Küste Indiens anreicherten. Im Gegensatz zu den beiden angeführten Beispielen handelt es sich bei den hier beschriebenen Rosettenanordnungen jeweils um freistehende Klappenansammlungen die weder durch Gesteinsblöcke noch durch sonstige Objekte abgestützt wurden (Tafel 2-2 D). Die Genese der hier dokumentierten Rosettenstrukturen ist wie bei den bereits angeführten Rippenanordnungen ebenfalls ein Resultat des

Wechselspiels zwischen den täglichen Rhythmus der Gezeitenwellen sowie der Wellenperiode in Abhängigkeit von der sich stetig veränderten Wassertiefe. Um jedoch die hier beschriebenen oval bis rund geformten, rosettenartigen angeordnete Hochkantschill-Variationen erhalten zu können, sind nach den Geländebeobachtungen weitere hydrodynamische Kräfte erforderlich. Hierbei spielen durch Tidenhub und Strömung verursachte gegensätzlich verlaufende Wassermassen die Turbulenzen sowie Wasserstrudel bei geringer Wassertiefe verursachen können eine übergeordnete Rolle. Dies wäre auch eine Erklärung dafür warum keine richtungsgeregelten, sondern willkürliche und teilweise chaotisch wirkenden Anordnungen der ineinander verschachteln Klappen vorzufinden sind.

Bei diesem Prozess werden die Klappen jedesmal kurzzeitig derartig bewegt, dass diese sich zu kleinen Rosetten formieren können und bei ablaufendem Wasser an entsprechende Oberflächen verhaken. Da die Genese der Rosettenausbildungen ebenfalls von der Wirkungsgrenze des Bewegt-Wassers abhängig ist (Schäfer 1941), wird deren Bildung nur während des aktiven Tidenvorganges für wenige Minuten über der Bankstruktur möglich sein.

Bei den in der Vergangenheit bereits beschriebenen Rosettenanordnungen aus Gesteinsbruchstücken, sammelten sich die jeweiligen Fragmente fast ausnahmslos um natürliche Hindernisse wie Gesteinsblöcke und Baumstämme herum oder wurden in Bodenvertiefungen dichtgepackt eingelagert. Als Ursache wurde oftmals die Wellenenergie, Wasserturbulenzen, Sog oder starke Strömungen angegeben (z. B. Dionne & Laverdiere 1967; Dionne 1971; Kostyaev 1973; Sanderson & Donovan 1974; Mount & Kidder 1993; Wilson 2002). Schon Mii (1957) vermutete, dass derartige Lagerungsformen nicht alleine durch Brandungswellen, sondern nur durch Einwirkung periodischer Wellen verursacht werden können. Dieser Entstehungsprozess ist auch für die hier beschriebenen Chips-Flächen entscheidend.

Die dichtgepackten Klappenfragmente waren oft in der Bankoberflächenstruktur eingelassen und wurden ringherum durch reinen Hochkantschill oder Pflasterlagerungsvariationen begrenzt (Tafel 2-2 F & Tafel 2-3 A). Durch diese räumliche Einengung der Chips-Bruchstücke entstand der äußerst hohe Grad an Dichte innerhalb dieser Flächen und wurde letztendlich durch den Wellengang in Vibrationen versetzt, so dass die Bruchstücke immer dichter und enger zusammen gedrückt wurden (auch Mii 1957, Tafel 2-2 E & Tafel 2-3 B). Ähnliche Bildungsbedingungen beschrieb auch Mathieu (1966) in seiner Arbeit bei der sich vertikal eingeregelt Schalenfragmente durch schnelle, oszillierende und mitreißende Energie eine rosettenartige Erscheinung bildeten. Auch Ball (1976) beschrieb dichtgepackten Schalenfragmente, sogenannte „fitting shells“ an der Nordküste Schottlands. Bei Hochwasser wurden diese Fragmente durch den dortigen Seegang hin und her transportiert bis diese sich bei Niedrigwasser in Vertiefungen des Küstengesteins ablagerten.

Im Vergleich zu diesen Vorkommen überdauern die hier beschriebenen Chips-Flächen den Tidenzyklus und verbleiben stationär auf der Bankoberfläche. Ihre Entstehung und Häufigkeit ist abhängig von der Umarbeitung des vorhandenen Schalenmaterials welche in den Hochkantschill-Bereichen der oberflächennahen Bankstruktur vorzufinden sind.

Dabei wurden die Einzelklappen z. B. durch kurzzeitige Sturmereignisse mechanisch derartig stark beansprucht, dass diese zu kleinen Fragmenten zerbrachen und sich in die ehemaligen Hochkantschill-Flächen-Bereiche als Schalenbruchstücke ablagerten. Die hier beschriebenen Rosettenstrukturen und Chips-Flächen könnten, wenn sie fossil überliefert werden, als paläontologische Indikatoren für hydrodynamische Vorgänge (z. B. Ermittlung der Wirkungsgrenze des Wassers) herangezogen werden.

### **Die Hochkantschill-Strukturen der Zonenbereiche 5**

Im Gegensatz zu den bereits diskutierten Lagerungszuständen sind die *M. arenaria* Einzelklappen dieses Zonenbereiches vertikal orientiert bzw. mit ihrer Längsachse hochkant eingeregelt (folglich Hochkantschill). Im Vergleich zu den beschriebenen Schill-Streifen und Rosettenanordnungen sind die konkaven Klappenhälften fast ausnahmslos in Richtung der allgemein auftreffenden Seegangsrichtung am hinteren Saum des Schill-Vorkommens orientiert (Tafel 2-3 C bis F). Vergleichbare bzw. ähnliche Anordnungen von derartigen Schill-Einregelungen wurden von Schäfer (1941), Mii (1957), Greensmith & Tucker (1968), Grinnell (1974) sowie Sanderson & Donovan (1974) beschrieben.

Schäfer (1941) führte erstmals den Begriff der „Hochkant-Stellung“ bei der Beschreibung eines Massenvorkommens von *M. arenaria* Einzelklappen innerhalb der östlichen Jadebucht ein. Die zusammengespülten Klappen wurden durch andauernde West-Windperioden an eine östlich gelegene Uferböschung verfrachtet. Obwohl die juvenilen Klappen nur eine Länge von max. 1,5 cm besaßen erreichte der Schill-Saum eine Mächtigkeit von 40 cm (Schäfer 1941). Auch Sanderson & Donovan (1974) beschrieben durch Sturmereignisse verursachte vertikale Klappenanordnungen innerhalb eines supratidalen Küstenbereiches. Begünstigt wurden die vertikalen Anlagerungen dort jedoch durch Felsbrocken und Klüfte in denen sich die Klappen ansammeln konnten.

Im Vergleich zu den von Schäfer (1941) und Sanderson & Donovan (1974) dokumentierten sturmbedingten Ereignisse („event-accumulation“ Kidwell 1991) stellten die hier beschriebenen Vorkommen relativ beständige Strukturen innerhalb des Untersuchungsgebietes dar. Die Entstehung der HKS-Strukturen durch Einzelereignisse wie beispielsweise durch Sturmfluten oder Springtiden kann hierbei mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Von der Dorumer Lokation ist bekannt, dass dieses Schill-Vorkommen seit mindestens 90 Jahren existiert (mündl. Mitt. Schmied 2005, ehemaliger Fischer). Für die beiden anderen Schill-Vorkommen mit HKS-Arealen ist durch Luftbildkartierungen ein Bestehen von mindestens 11 Jahren gesichert (s. auch Kap. 5 „Luftbildkartierung“).

Greensmith & Tucker (1968) sowie Grinnell (1974) beschrieben, dass Bivalven-Klappen bei starken bis mäßigen Strömungsgeschwindigkeiten in eine stabile, d. h. vertikale Position gebracht werden können. Greensmith wies des Weiteren daraufhin, dass Turbulenzen innerhalb der Wassersäule einen großen Einfluss auf die Bildung von vertikalen Strukturen verursachen können (mündl. Mitt. von Greensmith in Ensom 1984). Für die Genese der Hochkantstellung im Uferbereich der Jadebucht erläuterte Schäfer (1941) hingegen zwei

unterschiedliche Bildungsursachen. Muschelklappen die sich vor natürlichen Hindernissen ansammeln (z. B. an Abbruchkanten) werden durch den seitlichen Schub des einwirkenden Seeganges in eine hochkant Position gedrückt. Bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Geländebeobachtungen zeigte sich jedoch, dass dieser Prozess des Drückens überwiegend dazu führt dass die Klappen mit ihrer konkaven Seite entgegen der Wellenfrontrichtung zeigen. Muschelklappen die sich unmittelbar hinter Objekten anlagern (z. B. an Blöcken von Uferbefestigung) werden laut Schäfer (1941) durch die einwirkende Brandungswelle in Hochkantstellung versetzt. Es zeigte sich jedoch, dass derartige Einregelungen oftmals chaotisch vertikal als auch horizontal lagern können.

Schäfers Bildungsprozesse bezogen sich zwar auf Hochkantschill-Strukturen die sich in supratidalen Uferbereichen (oberhalb der Hochwasserlinie) bildeten und somit nur einer relativ kurzzeitigen Wellenbrandungen ausgesetzt waren, lassen sich aber auf die in dieser Arbeit beschriebenen eulitoral (zwischen Niedrig- und Hochwasserlinie) Hochkantschille durchaus bedingt anwenden. Da die hier dokumentierten HKS-Anordnungen zusätzlich noch durch einen makrotidalen Gezeitenhub beeinflusst werden, hat bei der Entstehung der Hochkantschille die bereits erwähnte Wirkungsgrenze der Wassersäule über der Schill-Oberfläche einen großen Einfluss (Vgl. Schäfer 1941).

Nach Schäfer (1941) sind zwei weitere Voraussetzungen für eine vertikale Einregelung von Muschelschalen nötig:

1. Die Muschelklappe muss demnach eine flach-gewölbte, schüsselförmige Form besitzen wie beispielsweise die Klappen von *Mya*, *Scrobicularia*, *Macoma*, *Cerastoderma* sowie *Donax* und einige *Pecten*. Bei begleitenden Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurde bei Geländeuntersuchungen an der Ems Mündung (Rysumer Nacken) hochkant eingeregelter *M. balthica* Klappen an der Hinterkante eines Strandspülsaums entdeckt (Tafel 2-5 E). Obwohl Schäfer (1941) eine senkrechte Einregelung von *M. edulis* Klappen aufgrund ihrer überlangen und einseitig gewölbten Schalenform ausschloss, wurde in der vorliegenden Untersuchung Hochkantschille von *M. edulis* in den Rückseitenwatten der Insel Baltrum (Tafel 2-5 C) und im Dorumer Wattgebiet (Tafel 2-5 D) dokumentiert.
2. Es muss ein massenhaftes Auftreten einer *M. arenaria* Generation (oder anderer Muschelarten) mit ähnlich langen Klappenlängen (weil gleich alt) vor Ort gewährleistet sein. Diese Voraussetzungen wurden zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen an allen drei Lokationen erfüllt.

Nach den Geländebeobachtungen sowie Experimenten in einem Wellenkanal (s. Kap. 4) wurden weitere Voraussetzungen gefunden, die für eine Entstehung der hier untersuchten vertikalen Anordnungen erforderlich sind. Es zeigte sich, dass einer der wichtigsten Voraussetzungen bei der Genese von Hochkantschillen entsprechende Wellenparameter sind. Nur mit Hilfe eines bestimmten Wellenspektrums bei einer gemäßen Wassertiefe ist eine Entstehung der hier beschriebenen Hochkantstrukturen erst möglich. Damit zudem wallartige Hochkantschill-Anordnungen überhaupt entstehen können, sind zudem morphologisch bedingte Erhöhungen mit relativ steilabfallenden Rückkanten erforderlich, an denen das Klappenmaterial sich allmählich ansammeln kann.

Im Vorfeld der HKS-Entstehung erfolgt zunächst eine Selektion des herbei transportierten Klappenmaterials aus den vorderen Zonenbereichen. Dabei können die *M. arenaria* Horizonte als Hauptlieferquelle des Klappenmaterials innerhalb der HKS-Bereiche angesehen werden. Nach der entsprechenden Erosion der Doppelklappen aus den Horizonten erfolgt eine „Durchwanderung“ der Klappen durch die vorderen Zonenbereiche. Der Transportmechanismus wird ab dem Zonenbereich 2c aufgrund der vorhandenen Dachziegellagerung dabei deutlich erleichtert. Die dichten Pflaster fungieren als eine Art Transportband auf denen die Einzelklappen in küstenwertiger Richtung regelrecht gleiten können (Vgl. Futterer 1975). Unmittelbar an der Wind- und Wellen abgewandten Lee-Seite werden die Klappen durch Strömung und Wellengang über die Kante hinweg geworfen, so dass ein Absinken aufgrund des Formwiderstandes und der Schwerkraft erfolgen kann. Diesen Prozess bezeichnet man allgemein als eine „freie“ Einkippung der Schalen (auch Lüders 1929; Trusheim 1931a; Richter 1931, 1942). Die Klappen werden dabei in der Sinklage d. h. „gewölbt-unten“ auf dem Untergrund abgelagert (Tafel 2-5 A). Teilweise erfolgte eine Stabilisierung bzw. eine Standortfixierung der konkaven Klappenhälften durch eingespülten Sand (Tafel 2-5 B). Im weiteren Entwicklungsverlauf kommt es zu einer Aufeinander-Stapelung des konkaven Klappenmaterials an der steil abfallenden leewertigen Hinter-Kante. Aufgrund der geschützten Lage können sich dort einzelnen Gruppen von 10 bis 20 Klappen aufeinanderlegen. Durch diesen Prozess werden die obersten Klappenlagen in eine anfängliche senkrechte Position gebracht. Durch die hohe Klappenkonzentration erfolgt ein gegenseitiges abstützen einzelner Schalen.

Die endgültige, fächerartige und vertikale Position der Klappen werden dann letztendlich durch periodische Wellenbewegungen verursacht (s. dazu auch Kap. 4). Die aufrecht stehenden Klappen weichen dadurch mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage ab. Durch den rhythmischen Wellengang werden die noch relativ locker gepackten Klappen zusätzlich noch in Vibration versetzt, so dass es zu einer allmählichen Verfestigung kommt. Der täglich einwirkende Ebbstrom erzeugt durch die zurückfließenden Wassermassen einen Gegendruck auf die Bank-Hinterkante, was eine weitere Kompaktion der gesamten HKS-Struktur bewirkt. Auf diese Weise können im weiteren Verlauf die dokumentierten bis zu 1,2 m mächtige HKS-Wälle entstehen. Die Hochkantstellungen beschränken sich nicht nur auf die obersten Klappenlagen, sondern können sich bis in die unteren Reihen hinziehen.

### **Die Terrassenmorphologie der Zone 6 (nur Dorumer Vorkommen)**

Zu Wellen und Wind gemäßigten Sommerzeiten wurde am Dorumer Schill-Vorkommen eine vermehrte Schlickbildung festgestellt. Infolge dessen kam es besonders auf den Oberflächen der vorderen Zonenbereiche (Zonen 1 bis 2c) zu Schlickablagerungen (Tafel 2-4 A & B). Diese Schlicküberdeckung der Pflasterbereiche führte zwar mangels Klappenmaterials indirekt zu einer Unterbrechung der HKS-Genese, begünstigte aber aufgrund der fortschreitenden Umarbeitungsprozesse die Bildung von Chips-Arealen innerhalb der Zonen 4 und 5. Im weiteren Entwicklungsstadium führte dieser Umarbeitungsprozess zu einer



flacheren Bankmorphologie an der Hinterkante des Schill-Vorkommens (Tafel 2-4 C, s. dazu auch Abschnitt jahreszeitliche Variabilität in diesem Kapitel).

Zur selben Zeit wurden im rückwertigen Bereich der Zone 5 keine ganzen Schlickflächen, sondern nur relativ kleine Schlicktafel in halbmondartiger Anordnung unmittelbar hinter der HKS-Kante abgelagert (Tafel 2-4 D & E). Auf den noch weichen Oberflächen dieser Schlicktafeln wurden recht schnell unzählige Chips-Fragmente eingearbeitet, so dass es zu einer ersten Verfestigung dieser Bereiche kam. An den relativ senkrecht verlaufenden Tafelrändern sammelten sich vorwiegend *M. arenaria* Einzelklappen an. Ähnlich wie bei der bereits beschriebenen Entstehung der HKS-Anordnungen in Zone 5, kam es auch in diesem Bereich zu einer anfänglichen Aufeinander-Stapelung der *Mya* Klappen mit anschließender Hochkant-Einregelung. Durch die Ablagerung der Schlicktafeln wurde am Ende des Anlagerungsprozesses terrassenartige HKS-Anordnung an der Hinterkante des Vorkommens gebildet.

### Die Schill-Fleckenfelder der Zone 7

Im rückwärtigen Bereich der HKS-Vorkommen wurde Schalenmaterial in Form von fleckenartig angeordneten Schill-Flächen beschrieben (Tafel 2-4 F). Nach Strauch (1990) entstehen Schillansammlungen im Wattenmeer durch landwärtigen Transport bei längerfristigen oder plötzlichen, gerichteten Wasserbewegungen. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass der überwiegende Anteil des Klappenmaterials innerhalb dieser Fleckenfelder aus den vorderen Zonenbereichen herantransportiert wurde. Ähnliche Schalen-Strukturen wurden von Greensmith & Tucker (1969) bei vergleichenden Untersuchungen in Essex (England) sowie von Van Straaten (1952) an der niederländischen Küste beschrieben. Greensmith & Tucker (1969) bezeichneten die holozänen Schalen-Akkumulationen in Essex als sogenannte „modern shell pockets“.

Die in den Ergebnissen festgestellte stärkere mechanische Beanspruchung des vorgefundenen Schalenmaterials wurde nicht an Ort und Stelle verursacht, sondern durch den längeren Transportprozess aus den vorderen Zonenbereichen hervorgerufen. Das auf den Fleckenfeldern dokumentierte massenhafte Auftreten der Wattschnecke *Littorina littorea* wurde auch von den o. a. Autoren auf den „shell pockets“ festgestellt. Grund für das vermehrte Auftreten dieser Schneckengattung waren Algenmatten-Ablagerungen auf den Schalenansammlungen, die durch *L. littorea* abgeweidet wurden. Der beschriebene vermehrte und äußerst auffällige Aufwuchs des Klappenmaterials durch Balaniden und Algen deutet auf eine bereits längere Verweildauer des Schalenmaterials innerhalb dieses Zonenbereiches hin. Die beschriebenen Fleckenfelder können also aufgrund ihrer stationären Verweildauer auf der Wattfläche als Besiedlungsgrundlage für diverse Watt-Organismen dienen. Diese Besiedlung deutet auf ein relativ niedriges hydrodynamisches Energieniveau innerhalb dieses Zonenbereiches hin.

Laut Greensmith & Tucker (1969) können derartige Klappenkonzentrationen als wichtige Materialquellen für das Wachstum von „inshore“ Schalenansammlungen an Küstenstränden

sowie an Salzwiesen dienen. An den entsprechenden Küstenstränden der hier untersuchten Vorkommen wurden keine vermehrten Schalenansammlungen angetroffen, wobei von einem weiteren küstenwertigen Transport oder einer kompletten Überdeckung des Klappenmaterials ausgegangen werden muss. Häufig können die Patch-Areale mit Sediment oder kurzzeitig durch Schlicktafeln überlagert werden. Van Straaten (1952) stellte bei seinen Untersuchungen im niederländischen Gezeitenbereich fest, dass derartige Schalenkonzentrationen im küstennahen Bereich oft mehrere bis sogar einige Jahre durch Sediment bedeckt sein können, bevor die Klappen durch Erosionsprozesse wieder „reaktiviert“ werden.

Im Arbeitsgebiet dienen die Patch-Flächen als Hartsubstrat und können eine Ansiedelung diverse Hartgrundbewohner (z. B. *Crassostrea gigas*, *Mytilus edulis*) begünstigen. Werden diese Hartsubstrate von einer Sedimentüberlagerung verschont, so könnten daraus im weiteren Besiedlungsverlauf auch Austern-Riffe entstehen (Reineck 1984).

### **Jahreszeitliche Variabilität des Dorumer Schill-Vorkommens**

Wie bereits zu Beginn dieser Diskussion erwähnt entstehen Schlickablagerungen im Arbeitsgebiet durch Sediment- bzw. durch Erosionsverzögerung die überwiegend zu Sommerzeiten vorherrschen (Van Straaten & Kuenen 1958).

Während der Sommermonate kam es im Zonenbereich 5 zu einem deutlichen Rückgang der Hochkantschill-Anordnungen. Anstelle der HKS-Areale wurden an gleicher Position ausgedehnte Chips-Flächen vorgefunden. Ursache dieser jahreszeitlich bedingten Variabilität zwischen Hochkantschill- und Chips-Flächen war die Überdeckung der vorderen und hinteren Zonenbereiche durch Schlicksedimentation die vorwiegend in den Sommermonaten stattfand. Die Schlickablagerungen überdecken die vorgelagerten ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte sowie die unmittelbar angrenzenden Pflasterzonenbereiche 2a bis 2c. Die in diesem Bereich auf der Wattoberfläche noch verbleibenden Einzelklappen erfuhren durch diese Überlagerung mit Schlicktafeln eine zeitlich begrenzte „Konservierung“, so dass ein Transportprozess in küstenwertiger bzw. in küstenwertiger Richtung nicht erfolgen konnte. Durch die Überlagerung der erodierten Doppelklappen sowie des übrigen Klappenmaterials der Pflasterzonen wurde eine Neuanlagerung von Klappen in den noch bestehenden HKS-Anordnungen unterbunden. Die bereits bestehenden Hochkantstrukturen wurden zeitgleich durch den ständig einwirkenden Seegang schließlich zu Schalenfragmenten umgearbeitet. Im weiteren Verlauf führte dies letztendlich zu einer vermehrten Chips-Bildung, die sich anstelle der HKS-Flächen auf der Bankoberfläche ablagerten. Genau dieser Prozess führte auch zu dem beschriebenen flacheren Neigungswinkel der leewertigen Bank-Hinter-Kante (Tafel 2-4 C).

In den Herbst- und Wintermonaten stiegen im Arbeitsgebiet die Wind- und Seegangs-Intensitäten stark an, so dass eine Schlicksedimentation äußerst erschwert wurde (Vgl. Wunderlich 1979). Durch die in den Herbst- und Wintermonaten verstärkten hydrodynamischen Bedingungen erfolgte eine intensive Erosion des im Sommer abgelagerten Schlickmaterials, so dass die überdeckten Pflasterzonenbereiche mit dem

konservierten Schalenmaterial wieder zum Vorschein gelangten. Vereinzelt Sturmereignisse begünstigten zudem die fortlaufende Erosion der ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte. Durch die freigespülten Doppelklappen kam es im weiteren Verlauf zu einer Zunahme des verfügbaren Klappenmaterials wodurch eine Hochkantschill-Genese begünstigt wurde. Aus diesem Grund sind besonders in den Herbst- und Wintermonaten vermehrt Hochkantschill-Anordnungen im rückwärtigen Bereich des Schill-Vorkommens dokumentiert worden (Tafel 2-3 C bis F).

Während die entnommenen Reliefgüsse jeweils nur den oberflächennahen, aktuellen Lagerungszustand des Klappenmaterials auf den Schill-Vorkommen widerspiegeln, konnte die jahreszeitlich bedingte Variabilität der Dorumer Lokation an der aufgenommenen Profilabfolge aufgezeigt werden. Innerhalb dieser Abfolge konnten zehn unterschiedliche Abschnitte von einander differenziert werden. Wie bei den Reliefgüssen auch, zeigt dabei die oberste d. h. jüngste Abfolge die Ablagerungssituation an der leewertigen Oberfläche zur Zeit der Profilaufnahme (Abb. 2-7b, L10). Während diese Klappen noch hochkant ein geregelt waren folgten zum Hangenden Schichtabfolgen mit Wechsellagerungen zwischen Chips-Bruchstücken und Schlicksand dominierende Lagen. Das aber auch Rosettenanordnungen nicht nur an der Oberfläche vorzufinden sind, sondern durchaus, wenn auch selten stabil, in einer zeitliche Abfolge rezent konserviert werden verdeutlicht Layer L8 in Abbildung 2-7b. Dagegen konnten hochkant orientierte Klappen erst wieder am unteren Ende der Profilabfolge vorgefunden werden (Abb. 2-7b L3). Am Beispiel der beiden Schichtabfolgen L3 und L8 wurde der beschriebene jahreszeitliche Wechsel konserviert. Beide Schichtlagen wurden durch eine 4 bis 5 cm mächtige Chips-Sequenz überlagert (Abb. 2-7b L4 & L9). In der Profilabfolge konnte zudem eine Erhöhung des Fragmentationsgrades der Chips-Lagen in Abhängigkeit mit der zunehmenden Profiltiefe dokumentiert werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Lüders (1929) bei der Untersuchung von Großrücken die mit Schill bedeckt waren. Lüders beschrieb ebenfalls einen Anstieg der Schalen-Fragmentation mit zunehmender Sedimenttiefe aufgrund des steigenden Auflastdruckes. Da sich die von Lüders (1929) untersuchten Schill-Rücken jedoch in relativ tiefen Ebbtrichtern befanden, waren sie keinem oberflächennahen Seegang ausgesetzt. In der vorliegenden Arbeit wird daher davon ausgegangen, dass der erhöhte Fragmentationsgrad der Chips-Horizonte nicht durch den Auflastdruck, sondern hauptsächlich auf eine unterschiedlich lange Umarbeitungsdauer durch den Wellengang zurückzuführen ist.

### **Morphologische und topographische Unterschiede zwischen den Vorkommen**

Bei dem vorangegangenen Diskussionsabschnitt wurde auf die einzelnen Lagerungsvariationen und deren Bildungsprozesse innerhalb der verschiedenen Zonenbereiche eingegangen. Auf den Oberflächen der Schill-Vorkommen konnten dabei gemeinsame Ablagerungszustände und charakteristische Erscheinungsformen die gleichen Bildungsprozessen entstammen dokumentiert werden. Insgesamt konnten während des Untersuchungszeitraumes nur geringe Abweichungen bzw. Unterschiede auf der oberflächennahen Topographie aller drei Vorkommen festgestellt werden. Die

unterschiedlichen Ausprägungen der Zonenbereiche können dabei den jeweiligen Seitenprofilen entnommen werden (Abb. 2-3 bis 2-5).

Die unterschiedlichen Lagerungszustände- und Variationen (Einkippung, Einsteuerung und Einbettung) innerhalb der Zonenbereiche werden auch durch die Bankmorphologie beeinflusst. Ausschlaggebender Faktor ist dabei der jeweilige Neigungswinkel (Steigungswinkel) sowie der sich daraus resultierende Einfluss des hydrodynamischen Wirkungsgrades des Wassers auf das Schalenmaterial. Der an allen drei Vorkommen dokumentierte morphologische Anstieg mit einer relativ steilabfallenden Hinterkante resultiert aus der prograden Transportrichtung (küstenwertig) des Schalen- und Sedimentmaterials (Vgl. Bonnot-Courtois et al. 2004). Ursache dieser Bankmorphologie ist nach Bonnot-Courtois et al. (2004) die einwirkende Wellenenergie.

Die am Dorumer Vorkommen beschriebenen Pflastervariationen mit Streu- und Vollpflaster (Zonenbereiche 2a bis 2b) wurden an den beiden anderen Lokationen aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zu den jeweiligen *M. arenaria* Erosionshorizonten nicht ausgebildet. An diesen Vorkommen erfolgte dagegen eine sofortige Ablagerung des Klappenmaterials in Dachziegellagerung. Für einen Übergang von einem Streu- zu einem geschlossenen Vollpflaster, wie am Dorumer Vorkommen beschrieben, konnte aufgrund der kurzen Distanz zu den Erosionshorizonten nicht ausgebildet werden (Vgl. Schäfer 1962). Die beschriebene jeweilige Erosion wird überwiegend durch die laterale Priel-Migration hervorgerufen (z. B. auch Meldahl 1987).

Der am Sahlenburger Vorkommen nicht entwickelte Zonenbereich 3 (Schill-Streifen) wurde aufgrund der geringeren Anstiegsneigung sowie durch die deutlich niedrigere Schalenkonzentration beeinflusst (Tafel 2-1 C, Abb. 2-5b). Die Bildung derartiger Schill-Streifen wird maßgeblich durch den Neigungswinkel (Einfallswinkel) der Bankmorphologie sowie durch die Schalenkonzentration gesteuert (auch Schäfer 1941; Reineck 1973).

Einen morphologischen Unterschied zwischen den drei Lokationen konnte bei der Umriss-Struktur festgestellt werden. Besonders gut zu erkennen ist dies in den entsprechenden Luftbildausschnitten (Abb. 2-2 a bis c). Das morphologische Erscheinungsbild wird dabei maßgeblich durch den jeweiligen Priel-Verlauf bzw. von dessen jeweiligen lateralen Migration beeinflusst (auch Greensmith & Tucker 1969; Van Straaten 1952; Neal et al. 2002). Die Schill-Ansammlungen spiegeln aus diesem Grund oftmals die Verlaufsmorphologie der Priele wieder.

Die beschriebenen morphologischen und topographischen Unterschiede zwischen den Vorkommen wurden nur innerhalb des Untersuchungszeitraumes dokumentiert und geben nur diesen relativ kleinen zeitlichen Abschnitt wieder. Natürlich kann es jederzeit zu neuen Veränderungen innerhalb der morphologischen und topographischen Erscheinungsform der Schill-Lokationen kommen.

### **Einordnung der Vorkommen innerhalb des Ablagerungsraumes**

Nachdem bei der bisherigen Diskussion auf die biostratinomischen Prozesse innerhalb der einzelnen Zonenbereiche sowie auf die zeitliche Veränderung der untersuchten Schill-

Vorkommen eingegangen wurde, soll als nächstes eine Zuordnung der rezent gebildeten Schill-Ansammlungen in den entsprechenden marinen Ablagerungsbereich erfolgen.

Nach Seilacher (1970) ist Fazies das Produkt ökologischer Bedingungen und sedimentologischer und diagenetischer Prozesse. Der Begriff „Fazies“ soll hierbei nur verwendet werden, um den Ablagerungsbereich zu definieren in dem sich die untersuchten Schill-Vorkommen befinden (s. auch Reineck 1984).

Das Gezeitenwatt unterteilt sich entlang des *shore-normal energy gradient* nach Nyandwi & Flemming (1995) von der Küstenlinie aus in Richtung Meer in die Faziesbereiche Schlickwatt, Mischwatt sowie Sandwatt, die durch unterschiedliche Energieniveaus und Wasserbedeckungszeiten charakterisiert sind (s. auch Kap. 1 Abb. 1-3). Auch die Sedimentstrukturen innerhalb dieser Faziesbereiche weisen auf unterschiedliche Energieniveaus hin. Ein verstärktes Auftreten von Feinsandlagen weist eher auf Sandwatt hin, während wellige Wechsellagerungen typisch für Mischwattbereiche sind und Feinsandlinsen auf das niedrigste Energieniveau im Watt und damit auf Schlickwatt hindeuten.

Eine graphische Verteilungs-Zonierung gibt Dörjes (1978) für die typischen Makrobenthonten innerhalb dieser drei Faziesbereiche (s. auch Kap. 1 Abb. 1-4) Die typischen Vertreter des Mischwattbereiches sind demnach die *Mya arenaria*, *Macoma balthica* und *Cerastoderma edule*. Die Wattschnecke *Littorina littorea* ist dagegen eher im Schlickwattbereich vorzufinden. Im Allgemeinen sind jedoch Schill-Anreicherungen aus Molluskenresten im Watt ein Anzeiger für einen prielnahen Faziesraum (Schäfer 1962). Der Faziesraum Watt ist jedoch auch durch sehr kleinräumige Fazieswechsel geprägt, die das übergeordnete Muster einer entsprechenden Zonierung in Schlick-, Misch- und Sandwatt-Bereiche durchbrechen bzw. teilweise auch ineinander übergehen können.

Schäfer (1962, 1963) unterschied fünf marine Haupt-Biofaziesbereiche erster Ordnung die weltweit, d. h. an keine geographische Region gebunden, auftreten können. Nach Schäfer (1963) wird die Biofazies erster Ordnung durch die Tatsache der Belebtheit oder Nichtbelebtheit und durch kontinuierlichen oder unterbrochenen Schichtenaufbau eines Ablagerungsgebietes charakterisiert (aus Reineck et. al 1968). Sie unterscheiden sich aufgrund ihrer Struktur, Form und Lagebeziehung ihrer biotischen und abiotischen Einzelkomponenten (Schäfer 1962). Die Zuordnung erfolgt also aufgrund der Besiedlung durch Benthos, die Erhaltung primärer Sedimentschichtung sowie den Grad der Durchwühlung durch Endobenthos.

Nach Schäfer (1962) wird die gesamte südliche Nordsee von der „Vital-lipostrate Biofazies“ beherrscht. Sie reicht vom supralitoral über das eulitorale bis hin zum supralitoral Gezeitenbereich. All diese Gezeitenzonen stehen mehr oder weniger unter der anhaltenden Wirkung der Gezeitenströme sowie des grundberührenden Seeganges. Dieses liefert überwiegend Ablagerungsverbindungen die mit unterschiedlichen starken Schichtverlusten einhergehen. Das Sediment ist oftmals umgelagert und teilweise stark bioturbiert. Die Gebiete sind gut durchlüftet und daher auch als lebensfreundlich zu bezeichnen. Schäfer (1962, 1963) unterteilte diesen Haupt-Biofaziesbereich für die südliche Nordsee in weitere 13 Biofaziestypen zweiter Ordnung ein (regional geogr. Gebunden). Für dessen

Charakterisierung kommen nach Schäfer (1962) nur Organismen in Frage, die in vagiler oder sessiler Lebensweise dem Benthos angehören und in ihrem Biotop Beweise ihres Daseins hinterlassen haben. Diese Beweise können dabei organogene Hartteile sein, die postmortal in Lebensstellung verblieben oder umgelagert und nach geringem Transportweg in das Sediment des Biotops eingelagert worden sind oder es kann sich dabei auch nur um entsprechende Sedimenttexturen handeln.

Nach Betrachtung der vorgestellten Ergebnisse kann der Ablagerungsraum der untersuchten Schill-Vorkommen dem Biofaziestyp 3 zweiter Ordnung zugeordnet werden. Dabei handelt es sich nach Schäfer (1962) um den unteren Gezeitenbereich der bis hin zum MTNW (mittleres Tidenniedrigwasser) reichen kann (s. auch Kap. 1, Abb. 1-3). Dieser Intertidal-Bereich ist dem Seegang überall ausgesetzt und wird durch starke Gezeitenströme beeinflusst. Vorwiegend finden sich in den Feinsanden und Schlicklagen oftmals Verwühlungen diverser Graborganismen sowie senkrechte Fluchtbahnen von Muscheln. Häufige Organismen sind: *C. edule*, *L. littorea*, *M. balthica* und *M. arenaria* (s. auch Kap. 1, Abb. 1-4). Des Weiteren ist nach Schäfer (1962) das Vorhandensein von Schillen sowie Bruchschill vor allem an Prielrändern ein weiteres Charakteristikum dieses Biofaziestyps. Die hier im rezenten beschriebenen Faziesbereiche treten zeitgleich nebeneinander auf, im Fossilen können diese als vertikale Sequenzen auftreten (aus Reineck 1984).

Die Zuordnung der Schill-Vorkommen in ihrem entsprechenden Ablagerungsraum bzw. in die Bio-lithofazielle Umgebung kann natürlich nicht 1:1 an fossilen Schalenansammlungen angewandt werden. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass ein ähnlicher Ansatz für fossile Ablagerungsbereiche von Speyer & Brett (1991) erarbeitet wurden. Die Autoren entwickelten zwar ein detailliertes Taphozies-Modell für mitteldevonische Schelfablagerungen, jedoch sind gewisse Generalisierungen besonders für taphonomische und biostratinomische Prozesse durchaus erlaubt und sicherlich auch nötig, da sich diese Prozesse seit dem Paläozoikums nicht sonderlich verändert haben (Etter 1994).

### **Allgemeine Stellung der untersuchten Schill-Vorkommen**

Nachdem die Zuordnung der Schill-Vorkommen in den entsprechenden bio- bzw. lithofaziellen Ablagerungsraum erfolgte, soll im folgenden die allgemeine Stellung innerhalb der Ablagerungsvorkommen diskutiert werden. Aufgrund des Mangels von klaren Definitionen für rezente Schalenkonzentrationen muss zu diesem Zweck auf einige fossilen Begriffe hierfür eingegangen und zurückgriffen werden.

Grundlegende Klassifikationen und Definitionen von Fossilagerstätten geben Seilacher (1970) und Seilacher et al. (1985) an. Demnach werden Schalenkonzentrationen innerhalb der Fossilagerstätten zu den Konzentratlagerstätten zugeordnet. Innerhalb dieser Konzentrate können biogene Bestandteile wie Muschelschalen durch eine Vielfalt von Prozessen konzentriert worden sein (Brett & Baird 1986; Fürsich 1990; Brett & Seilacher 1991; Brett et al. 1997). Ausführliche biostratinomische Beschreibungen und Klassifikationen innerhalb der Schalenkonzentrationen geben unter anderem Kidwell et al. (1986) und Fürsich (1995). Nach Kidwell et al. (1986) werden Schalenansammlungen in drei

Hauptkategorien eingeteilt. Sie können aus biostratinomischer Sicht entsprechend aus einen biologischen, sedimentologischen oder einen diagenetischen Prozess entstammen. Oftmals können sie sogar aus einer Kombination dieser genannten Prozesse entstehen. Die Untersuchung derartiger Schalenkonzentrationen umfasst daher oftmals eine große Variation von biologischen, sedimentologischen und taphonomischen Ereignissen (z. B. Kidwell & Bosence 1991; Kidwell & Jablonski 1983; Flessa & Kowalewski 1994; Mehldahl et al. 1997; Carrol et al. 2003). Auf die taphonomischen Aspekte wird im Kapitel 3 der vorliegenden Arbeit näher eingegangen.

Die hier untersuchten Schill-Vorkommen werden nach Seilacher (1970) als Konzentrationslagerstätten und können nach Reineck (1984) als „rezente“ Konzentrationslagerstätten bezeichnet werden. Im fossilen werden derartige Schill-Anreicherungen innerhalb der Konzentrate zu den sogenannten Seifen gestellt. Da die *M. arenaria* Einzelklappen nicht außerhalb ihres Lebenshabitats abgelagert bzw. akkumuliert wurden, aber dennoch eine Unterscheidung von den sich in Lebensstellung befindlichen Klappen erfolgen soll, können die Schalenansammlung als parautochthone Vorkommen bezeichnet werden. Damit soll aufgezeigt werden, dass die Klappen nach ihrer Exhumierung durch physikalische Prozesse reorientiert, disartikuliert und auf den Vorkommen konzentriert worden sind.

Nach Kidwell et al. (1986) können Schalen-Konzentrationen innerhalb eines Zeitenbereiches entweder durch biologische oder sedimentologische Prozesse angesammelt werden. Seltener sind dagegen Schill-Konzentrationen die aus einer Kombination beider Prozesse entstanden sind.

Im Gegensatz zu den endobenthisch lebenden Weichkörper-Organismen wie z. B. Polychaeten haben Mollusken aufgrund ihres Hartschalenanteils ein hohes Potenzial nach ihrem Tod fossil überliefert zu werden (Cadeé 1984).

Obwohl die Schill-Vorkommen augenscheinlich überwiegend aus Schalenmaterial der *M. arenaria* aufgebaut werden, konnten andere sowohl autochthone als auch parautochthone Muschelarten wie z. B. *C. edule*, *M. balthica*, *M. edulis* u. a. Organismen auf und innerhalb der Akkumulationen vorgefunden werden (auch Schneider-Storz et al. 2008). Die taxonomische Zusammensetzung der Vorkommen entspricht somit einer polytypischen Konzentration (Kidwell et al. 1986).

Die innerhalb der Zonenbereiche diskutierten Ablagerungs- und Einregelungsmuster der Klappen resultieren auf allgemein bekannte biostratinomische Vorgänge die überwiegend durch hydrodynamische Aktivitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes hervorgerufen werden. Die beschriebenen biostratinomischen Prozesse die dabei auf das Schalenmaterial einwirkten, waren überwiegend physikalischer Natur (Vgl. Seilacher 1973). Die Muschelklappen unterlagen während des Akkumulationsprozesses den bioökologischen also taphonomischen Prozessen und spiegeln damit die tägliche Dynamic innerhalb eines siliklastischen Ablagerungsraumes wieder. Da die hier untersuchten Schill-Vorkommen hauptsächlich durch physikalische, hydrodynamische Prozesse akkumuliert wurden und somit also auf sedimentäre Transportsonderungen zurückzuführen sind, können sie nach Kidwell et al. (1986) zu den sedimentologischen Konzentrationen gestellt werden. Überprägt

werden sie natürlich von biologischen und ökologischen Prozessen. Aus diesem Grund können Teilbereiche der Schill-Vorkommen, in denen ein Aufwuchs oder Bewuchs durch entsprechende Organismen vorgefunden wurde, auch zwischen eine biologische-sedimentologische Kategorie gestellt werden (Vgl. Kidwell et al. 1986).

Die hier beschriebenen Schill-Vorkommen können nach Kidwell et al. (1986) aufgrund ihrer Geometrie bzw. morphologischen Ausdehnung auch als Schill-Lager (shell beds) bezeichnet werden. Greensmith & Tucker (1969) hingegen bezeichneten moderne Schalenansammlungen im intertidalen Gezeitenbereich vor der Küste Englands als „modern shell banks“ (moderne Schalenbänke) oder als „sheets of shells“ (Decke aus Schalen). In der vorliegenden Arbeit wird die Bezeichnung der Schalenansammlungen als moderne Schill-Vorkommen (modern shell deposits) bevorzugt, um eine Distanzierung zu fossilen Schalenansammlungen gewährleisten zu können. In einigen Textpassagen in denen ein Bezug der Vorkommen auf ihre morphologische Struktur erfolgte, erwies es sich als sinnvoll den Begriff „Bank“ zu verwenden (z. B. Bankstruktur, Bankmorphologie, Bank-Hinterkante).

Eine Bezeichnung der Schill-Vorkommen als „Chenier“ (Strandwälle) kommt aufgrund ihres intertidalen Standortes (also zwischen Hochwasser- und Niedrigwasserlinie) nicht in Betracht. Nach Otvos (2000) lagern „Cheniers“ immer oberhalb der normalen Hochwasserlinie. Des Weiteren repräsentieren Cheniers nach Otvos & Price (1979) transgressive, hügelartige Ablagerungen aus groben Material die prograd über Watt- und Marschland (Schwemmland) abgelagert werden. Gegensätzlich dazu sind die „beach ridges“, welche sich durch regressive Ereignisse in hügelartige Form auf Strandvorschüttungen ablagern (Otvos & Price 1979).

Zu der vorliegenden Arbeit vergleichende Untersuchungen über moderne, subfossile und fossile Schalenansammlungen (Cheniers, beach ridges, modern shell banks) wurden unter anderem am Golf von Kalifornien (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa et al. 1993; Kidwell 1988; Kowalewski et al. 1994; Meldahl & Cutler 1992; Meldahl 1993, 1995; Cutler 1995; Hallman et al. 1996; Springer & Flessa 1996), an der Ostküste der USA in Georgia (Wiedemann 1972; Dörjes et al. 1986; Frey & Dörjes 1988; Salazar-Jimenez et al. 1982) und an der Küste Englands (Essex) durchgeführt (Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Neal et al. 2002, 2003). Bei diesen Untersuchungen wurden bio-ökologische, taxonomische, taphonomische und geologische-sedimentologische Aspekte mit starkem Bezug auf paläoökologische Fragestellungen bearbeitet.

Eine ausführliche Bearbeitung rezenter Schalenansammlungen im Golf von Kalifornien und dessen Vergleich mit pleistozänen Vorkommen gaben Fürsich & Flessa (1987). Im rezenten Untersuchungsabschnitt erfolgte eine Zonierung vom subtidalen zum unteren intertidalen Bereich. Die Autoren verglichen die rezenten Ergebnisse mit fossilem Schalenmaterial und gaben unter anderem auch detaillierte Informationen über Artenzusammensetzung, Korngrößenverteilungen, Oberflächentexturen und führten taphonomische Vergleiche durch.

Biostratigraphische Experimente diesbezüglich wurden von McKittrick (1987) durchgeführt. Vertikale Klappeneinregelungen bzw. Hochkantstrukturen wurden dabei nicht beschrieben.



Eine detaillierte biostratigraphische Unterteilung (Zonierung) wie sie in der vorliegenden Arbeit dargestellt wurde, erfolgte bei den erwähnten Untersuchungen jedoch nicht. In einigen Arbeiten wurden moderne, fossile und subfossile Schalenansammlungen des supratidalen Strandbereiches untersucht (z. B. Kowalewski et al. 1994; Meldahl 1993, 1995). Diese Cheniers wurden aufgrund ihrer Ablagerungsposition dem täglichen Gezeitengang entzogen, so dass keine unterschiedlichen Lagerungsvariationen aufgrund von hydrodynamischen Prozessen bedingt durch einen täglichen Gezeiteneinfluss, wie in der vorliegenden Untersuchung beschrieben, erfolgen konnte.

Zu den oben dargestellten Arbeiten gab es vergleichbare Untersuchungen an holozänen (subfossil) und rezenten Schalenansammlungen an der Küste Englands von Greensmith & Tucker (1966, 1968, 1969). Die morphologischen Ausmaße dieser schillhaltigen Strandwälle entsprechen in etwa den hier beschriebenen Vorkommen, doch werden sie überwiegend durch Klappen von *M. edulis* und *C. edule* dominiert (Greensmith & Tucker 1969). Auf der Oberfläche der Schalenansammlungen beschrieben die Autoren vorwiegend eine Imbrikationslagerung der Klappen. Eine entsprechende biostratigraphische Zoneneinteilung erfolgte nicht.

Bei neueren Arbeiten von Neal et al. (2002, 2003) wurden die internen Strukturen und Ausbreitungsprozesse von den erwähnten Cheniers und beach-ridges in Essex mittels Radarmessungen untersucht.

Morphodynamische Prozesse sowie Migrationsereignisse von rezenten Schalenansammlungen an der Westküste Frankreichs untersuchten Bonnot-Courtois et al. (2004). Mittels Luftbildinterpretation konnten aufgrund des makrotidalen Gezeitenhubes (14,5 m!) Wanderungsereignisse von bis zu 20 m/a in küstenwertiger Richtung nachgewiesen werden (Bonnot-Courtois et al. 2004). Derartige Migrationsvorgänge der hier untersuchten Schill-Vorkommen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht festgestellt.

### **Diskussion der Ablagerungssituation sowie des Erhaltungspotentials der Hochkantschille**

Die bereits diskutierten biostratigraphischen Prozesse auf den Schill-Vorkommen wie z. B. Reorientierung, Transport und Sortierung sind weitgehend abhängig von der Intensität der Wasserbewegung (Speyer & Brett 1988). Eine relativ geringe Abhängigkeit besteht im Untersuchungsgebiet von der Sedimentationsrate. Nach Speyer & Brett (1988) nimmt der Grad der Reorientation und der Sortierung mit zunehmender Wassertiefe und zunehmende Sedimentationsrate ab. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen kann man im Arbeitsgebiet davon ausgehen, dass die dokumentierten Erosionsprozesse, die an den ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten einwirken, sich vorwiegend auch unter relativ normalen Seegangs-Bedingungen ereignen (alltäglicher Vorgang). Natürlich können die normalen, alltäglichen Erosionsprozesse durch gelegentliche Sturmereignisse intensiviert und beschleunigt werden. Nach Kidwell (1986) generiert der beschriebene Ablagerungsraum mit den eingehenden Erosionsprozessen oftmals Schalenkonzentrationen wie sie in der vorliegenden Arbeit beschrieben werden. Normale Seegangsbedingungen können im

Arbeitsgebiet sowohl zu Sommer- als auch in den Wintermonaten vorherrschen, wobei Erosionsprozesse vermehrt in den Winterzeiten und Sedimentationsprozesse (hier Schlicküberdeckung) vorzugweise in den Sommermonaten beobachtet wurden. Zwar konnte ein Trend dokumentiert werden, jedoch ist eine Gesetzmäßigkeit im Arbeitsgebiet keinesfalls gegeben. Obwohl die beschriebenen Schill-Vorkommen dynamischen Prozessen und täglichen Veränderungen unterworfen sind, soll kurz auf die theoretischen Modelle die zur Bildung von Schalenkonzentrationen führen eingegangen werden. Entsprechende Sedimentations- und Entstehungsgesetze innerhalb der Schill-Vorkommen können jedoch nur bedingt angewandt bzw. vorausgesagt werden, da dies immer eine Gesetzmäßigkeit voraussetzen würde die im Arbeitsgebiet einfach nicht gegeben ist (mündl. Mitt. G. Hertweck 2008).

Grundlegende theoretische Modelle für die Bewertung und Entstehung von Schalenkonzentrationen entwickelte Kidwell (1985, 1986). Bei diesen hypothetischen Ablagerungsmodellen unterschied Kidwell (1985, 1986) zwischen vier Einbettungsszenarien die auf zwei Parametern basieren (1. Sedimentationsrate und 2. Zufuhr der Schalenmenge). Jeweils zwei dieser Einbettungsmodelle beinhalten die Sedimentationsrate (R-Sediment-Modell), die beiden anderen Szenarien hängen von der Zufuhr der Schalenmenge ab (R-Hardpart-Modell). Bei dem R-Sediment-Modell verändert sich die Sedimentationsrate bei einer konstanten Schalenzufuhr. Das R-Hardpart-Modell hingegen geht von einer umgekehrten Situation aus, so dass die Sedimentationsrate konstant bleibt und die Schalenzufuhr variieren kann. Ergänzt werden beide Ablagerungsmodelle von zwei Szenarien bei denen die Sedimentationsrate und die Schalenzufuhr sowohl negativ als auch positiv miteinander Korrelieren (voneinander abhängen) können.

Im unmittelbaren Umfeld der Schill-Vorkommen herrschen aufgrund der beschriebenen sedimentologischen und hydrodynamischen Bedingungen weder konstante Sedimentationsverhältnisse, noch können einheitliche und vorhersagbare Sedimentationsraten angegeben werden (mündl. Mitt. G. Hertweck 2008). Durch den beschriebenen Erosionsprozess erfolgt eine Freilegung (Abtrag) der Doppelklappen aus den ehemaligen Siedlungshorizonten. Aufgrund des Fehlens einer entsprechenden Sedimentation bzw. einer Einbettung kommt es zu einem Schalen-Transport mit eingehender Disartikulation in küstenwertiger Richtung. Nach Speyer & Brett (1988) ist die Disartikulationsrate am höchsten in Milieus, wo keine Nettosedimentation erfolgt und akkumuliertes Schalenmaterial konstant durch Strömung und Welleneinwirkung aufgearbeitet werden kann. Der Transportprozess führt zu einer allmählichen Konzentrationserhöhung sowie zu einer ständigen Änderung der Klappenzusammensetzung innerhalb als auch auf den Oberflächen der Vorkommen. Der Genese-Prozess der Hochkantschille am hinteren Saum bleibt infolge dessen beim normalen Seegang konstant bzw. schreitet weiter voran. Eine Zerstörung des Klappenmaterials erfolgt zu diesen Seegangsbedingungen äußerst selten, so dass eine taphonomische Beanspruchung (Prägung) der Schalen je nach Zonenabschnitt ermöglicht wird. Der HKS-Genese-Prozess kann auch als ein Indiz für ein Schön- bzw. Normalwetter Ereignis angesehen werden (Vgl.

Fürsich 1995). Nach Strauch (1990) spiegeln Schille die Normalsituation, also den „Alltag“ in einem rezenten Sedimentationsraum wider.

Die Mengenzusammensetzung bzw. Lagerungsvariationen und der Zerstörungsgrad des Schalenmaterials wird von den hydrodynamischen Prozessen sowie von der Populations-Fluktuation innerhalb der Siedlungshorizonte beeinflusst (Vgl. Greensmith & Tucker 1969; Kidwell 1985, 1986; postmortale Schalenproduktionsrate).

Nach Speyer & Brett (1988) ist die Fragmentation ebenso wie die Reorientation und der Transport im Wesentlichen eine Funktion der Turbulenz und der Sedimentationsrate, wobei in der vorliegenden Arbeit eine Sedimentation nur episodisch dokumentiert wurde.

Auch beim oben angesprochenen R-Hardpart-Modell von Kidwell (1985, 1986) kann die Bildung und Erhaltung von Schalenkonzentrationen durch Veränderungen in der Schalenzufuhr (Tod-Schalenproduktion) sowie von der Zerstörung des Schalenmaterials kontrolliert werden. Demnach ähnelt der hier beschriebene Akkumulations- bzw. Genese-Prozess der Schill-Vorkommen einem rezenten R-Hardpart-Modell.

Oftmals werden die Schill-Vorkommen von Sturmereignisse überprägt, die eine Zerstörung, Umarbeitung und Umlagerung des Schalenmaterials herbei führen können. Dieser Prozess führt häufig zu einer Verwischung der primären taphonomischen Signatur (Speyer & Brett 1988). Die Schill-Vorkommen werden also durch episodische, kurzfristige Sedimentations- und Wetter bedingten Prozessen beeinflusst. Diese Ereignisse spiegeln sich in der dynamischen Aufarbeitung sowie Vermischung des Klappenmaterials innerhalb des aufgenommen Profils wieder (auch Speyer & Brett 1988, 1991). Besonders im hier untersuchten intertidalen Bereich sind die Vorkommen häufig von derartigen Ereignissen betroffen. Bei diesen Prozessen werden die zurückliegenden episodischen Situationen durch nachfolgende Ereignisse oftmals verwischt, können aber, wenn auch nur noch reliktsch in eine Abfolge eingehen.

Im vorgestellten Profil sind relativ kurzfristige Prozesse übereinander dokumentiert (s. auch Abb. 2-7b). In den oberflächennahen Reliefgüssen sind auch die langfristigen Prozesse, der Hochkantschill-Genese konserviert. Seltener sind dagegen die langfristigen Einregelungsprozesse der Hochkantschill-Genese innerhalb des Profils, da diese oftmals zu Chips-Fragmenten umgearbeitet wurden. Die wiederkehrenden Ablagerungsmuster innerhalb der Profilabfolge, aber auch in den Reliefgüssen zeigen, dass die Erhaltungsmuster auf nicht zufälliger Weise variieren. Die hauptsächlich auf biostratinomischen, sedimentologischen aber auch auf bioökologischen Prozesse zurückgehende Muster zeigen vielmehr eine litho- bzw. biofazielle Abhängigkeit, welche auf Variationen in den hydrodynamischen Bedingungen zurückzuführen sind (Vgl. Speyer & Brett 1988). Gleiches gilt auch für die beschriebenen, an allen drei Standorten dokumentierten, wiederkehrenden Ablagerungsmuster.

Nach Davies et al. (1989a) ist in den meisten marinen Milieus die Korrosionsrate, der Lösung und der Zerstörung des Schalenmaterials in der oberflächennahen taphonomisch aktiven Zone (TAZ) zu schnell, als das bei normaler Hintergrundsedimentation Schalen überhaupt akkumulieren können. Eine Erhaltung ist nur möglich, wenn das Skelettmaterial durch

episodische Schüttungen oder durch Hintergrundsedimentation schnell aus der TAZ in tiefere Sedimentschichten entfernt wird (Davies et al. 1989a, b).

Auf den Schill-Vorkommen sowie im unmittelbaren Umfeld sind diese Voraussetzungen einer schnellen Entfernung aus der aktiven Zone nicht gegeben. In einer nur relativ kurzen Zeitspanne werden die Klappen gleichzeitig durch verschiedene taphonomische Prozesse beeinflusst. Bedingt durch die starken hydrodynamischen Bedingungen vor Ort werden diese Informationen derartig schnell verwischt und schließlich zerstört, dass diese nur reliktsch, im ungünstigsten Falle überhaupt nicht überliefert werden können.

Eine ähnliche Problematik der Überarbeitung von Schalenmaterial beschrieben auch Cummins et al. (1986a, b) für Schalenansammlungen der Muschelgattung *Mulinia lateralis* vor der Küste Texas. Demnach dauerte es dort nur ein Jahr bis eine ganze Population aus der Taphozönose durch derartige Prozesse verschwand, so dass unter derartigen Umständen dort keine vollständige fossile Überlieferung erfolgen konnte.

Der erwähnte Prozess der Verwischung bzw. Überprägung ist wahrscheinlich einer der Aspekte, weshalb vertikale Einregelungen (Hochkantschille) zwar schon für plattige oder flache Gesteinsobjekte (z. B. Schieferplatten, Konglomeraten) beschrieben wurden (z. B. Gregory 1930; Schmitthenner 1930; Dege 1941; Dionne 1971; Kostyaev 1973; Ball 1976; Mount & Kidder 1993; Wilson 2002; Wilson & Edwards 2004), aber jedoch erst selten für organische Komponenten wie Muschelschalen dokumentiert wurde. Da Gesteine im Vergleich zu Schalenmaterial eine höhere Festigkeit und Stabilität besitzen, können sie länger hydrodynamischen Prozessen standhalten, so dass diese vertikalen Strukturen in ihrer Ablagerungsposition oftmals in eine zeitliche Abfolge eingehen können.

Zu der vorliegenden Arbeit vergleichbare rezente bzw. subfossile Schalen-Einregelungen wurden bisher nur an wenigen Küsten, meist im supratidalen Ablagerungsraum oder in unmittelbarer Ufernähe als Einzelfälle oder durch Sturmereignisse verursachte Einregelungen beschrieben (rezent im Supratidal: Schäfer 1941; Mii 1957; Sanderson & Donovan 1974; Boyajian & Thayer 1995; Salazar-Jimenez et al. 1982; intertidal: Grinnell 1974; Ball 1976; Ensom 1984; Hanamgond 2001; subfossil: Greensmith & Tucker 1968).

Vertikale Einregelungen an fossilem Schalenmaterial (Ordovizium) wurde bislang nur von Seilacher & Meinschner (1965) beschrieben. Die Autoren interpretierten die hochkant eingeregelter *Rafinesquina* Klappen als ein Brandungsereignissen und wiesen auf die Wichtigkeit der Hochkantstellung als eventuellen wichtigen Faziesindikator hin. Oftmals haben fossile Ablagerungen bzw. Ablagerungsumgebungen keine vergleichbaren rezenten Vorkommen, da geologische- und diagenetische Prozesse für den menschlichen Beobachtungszeitraum zu lang anhaltend oder zu langsam geschehen (Reineck 1984). Für die hier beschriebenen Hochkantschille ergibt sich genau der umgekehrt Fall, da es so gut wie keine fossilen Überlieferungen derartiger Schalen-Einregelungen gibt. Da jedoch auch vertikale Hochkantstrukturen an Spülsäumen dokumentiert wurden (s. z. B. Richter 1941) könnten derartige Strukturen, natürlich nur unter der Voraussetzung dass sie schnell genug den hydrodynamischen Prozessen entzogen werden und eine entsprechende Einbettung erfahren, durchaus auch in fossilen-subfossilen Strandablagerungen enthalten sein.

In der vorliegenden Arbeit wurden erstmals rezente Schill-Vorkommen mit Hochkantstrukturen innerhalb eines intertidalen Gezeitenbereiches untersucht und beschrieben. Werden vergleichbare fossile Schalenakkumulationen vorgefunden, so sind diese nicht immer nur ein Indiz für Strand- oder Ufersaumablagerungen, sondern können durchaus auch anderen Ablagerungsräumen zugeordnet werden.

Zwar sind in bereits vielen Arbeiten auch Massen-Vorkommen von Molluskenschalen beschrieben worden, doch handelte es sich dabei oftmals um Ablagerungen die entweder an supratidalen Bereichen abgelagert wurden oder aber es handelte sich um sturmbedingte Ablagerungserscheinungen (z. B. auch Boyajian & Thayer 1995; Mehdahl 1993; Aigner 1985). Oftmals wurden bei den zitierten Arbeiten vorwiegend taxonomische und taphonomische Untersuchungen durchgeführt, ohne detaillierte Informationen über Einregelungsvariationen bzw. wiederkehrende Erscheinungsformen innerhalb der Schalenansammlungen zu geben.

## Schlussfolgerung

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Dissertation wurden erstmals drei rezente Schill-Vorkommen im zentralen Bereich der südöstlichen Deutschen Bucht detailliert beschrieben und miteinander verglichen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Schill-Akkumulationen hauptsächlich durch natürliche laterale Priel-Wanderungen verursacht werden. Die verschiedenen Lagerungsvariationen und Einregelungsmuster innerhalb der definierten Zonenbereiche sind ein Resultat von biostratinomischen Prozessen die durch hydrodynamische Ereignisse gesteuert werden. Einen großen Einfluss auf die Klappenanordnungen und deren Position auf der Oberfläche hat die rampenartige Morphologie der Vorkommen. Die dokumentierte Hangneigung verursacht eine Veränderung der hydrodynamischen Wirkungsgrenze des Wassers im Verlauf der Tidenzyklen. Während sich Pflastervariationen, Schill-Streifen und Rosettenmuster hauptsächlich in den vorderen bzw. in den mittleren Zonenbereichen bilden, finden sich richtungsorientierte Hochkantstrukturen oftmals an den hinteren Säumen der Schill-Vorkommen. Es konnte ferner nachgewiesen werden, dass für eine richtungsgerichtete Hochkantschill-Genese im intertidalen Gezeitenbereich zwei bisher unbekannte Faktoren nötig sind: 1. steilabfallende Hinterkanten und 2. periodische Wellenbewegungen bei normalen Seegangsbedingungen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde erstmals eine jahreszeitliche Variabilität der Oberflächenstruktur sowie der Bankmorphologie von derartigen Schill-Vorkommen festgestellt. Durch kurzzeitige Sedimentationsereignisse auf den vorderen Zonenbereichen wurden Umarbeitungsprozesse innerhalb der Hochkantschill-Strukturen intensiviert. Es konnte nachgewiesen werden, dass Chips-Flächen durch Umarbeitung der Hochkantstrukturen entstehen. Ferner konnte festgestellt werden, dass dieser Prozess sich auf die hintere Bankmorphologie der Schill-Vorkommen derartig auswirkt, so dass es zu einer flacheren Bankmorphologie führt. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Genese der Schill-Vorkommen hauptsächlich vom Schaleneintrag sowie von einer geringen Sedimentationsrate gesteuert wird. Da die Schill-Konzentrationen aufgrund des eulitoralen Standortes den täglichen Gezeitenzyklus sowie den hydrodynamischen Prozessen frei ausgesetzt sind, konnte gezeigt werden, dass derartige Hochkantschill-Anordnungen nur eine relativ kurzzeitige Beständigkeit haben. Diese Erkenntnis könnte auch eine mögliche Ursache für das Fehlen ähnlicher Hochkant-Orientierungen in fossilen Sedimenten sein. Sollten fossile Hochkantschille dennoch in Zukunft vorgefunden werden, könnten diese aufgrund der gewonnen Ergebnisse höchst wahrscheinlich einem Ablagerungsraum mit gemäßigten hydrodynamischen Seegangsbedingungen zugeordnet werden.

## Literaturverzeichnis

- Abbott, S. T. (1997) Mid-cycle condensed shell bed from mid-Pleistocene cyclotherms, New Zealand: Implications for sequence architecture. *Sedimentology*, 44, 805-824.
- Aigner, T. (1977) Schalenpflaster im Unteren Hauptmuschelkalk bei Crailsheim (Württ., Trias, mo1) - Stratinomie, Ökologie, Sedimentologie. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 153, 193-217.
- Aigner, T. (1985) Storm depositional systems. *Dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow-marine sequences. Lecture notes in earth sciences*, 3, Springer, New York, Heidelberg, Berlin, 174 pp.
- Alexandrowicz, S. W. (1977) A Quantitative study of the origin of *Dreissena polymorpha* shell accumulations in Szczecin Bay, Baltic Sea. *Serie des Sciences de la Terre*, XXV, 75-82.
- Alexandrowicz, S. W. (2001) Mollusc shell accumulations in north-eastern alpine rivers and lakes. *Earth Sciences*, 49, 165-175.
- Alexandrowicz, S. W. & Florek, W. (1999) Shell accumulations in the recent and ancient littoral zone of the Gardno Lake (Northern Poland). *Earth Sciences*, 47, 227-237.
- Allen, J. R. L. (1990) Transport - Hydrodynamics. Shells. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 227-230, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Anderson, L. C. & McBride, R. A. (1996) Taphonomic and paleoenvironmental evidence of Holocene shell-bed genesis and history on the northeastern Gulf of Mexico Shelf. *Palaios*, 11, 532-549.
- Antia, E. E. (1996) On the significance of ebb-tidal deltas to the development of the subtidal longshore-rhythmic morphology (Sägezahnriffe) along the German North Sea coast. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 40, 477-486.
- Ball, D. F. (1976) Close-packed patterned arrangement of stones and shells on shore-line platforms. *Biuletyn Peryglacjalny*, 25, 5-7.
- Banzhaf, W. (1931) Über einen Conchylien-Spülsaum vom Madü-See (Pommern). *Senckenbergiana*, 13, 231-234.
- Bonnot-Courtois, C., Fournier, J. & Dreau, A. (2004) Recent morphodynamics of shell banks in the western part of Mont-Saint-Michel Bay (France). *Geomorphologie*, 1, 65-80.
- Boyajian, G. E. & Thayer, C. W. (1995) Clam calamity: A recent supratidal storm deposit as an analog for fossil shell beds. *Palaios*, 10, 484-489.
- Boyer, D. & Droser, M. L. (2003) Shell beds of the Kanosh and Lehman Formations of western Utah: Paleocological and paleoenvironmental interpretations. *Birgham Young University Geology Studies In Geology*, 47, 1-15.
- Brenchley, P. J. & Newall, G. (1970) Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 7, 185-220.
- Brenner, K. (1976) Ammoniten-Gehäuse als Anzeiger von Palaeo-Strömung. *Neues Jahrbuch der Geologischen Paläontologischen Abhandlungen*, 151, 101-118.
- Brett, C. E. (1990) Destructive taphonomic processes and skeletal durability. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 223-226, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Brett, C. E. (1995) Sequence stratigraphy, biostratigraphy, and taphonomy in shallow marine environments. *Palaios*, 10, 597-616.

- Brett, C. E. (1998) Sequence stratigraphy, paleoecology, and evolution; biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaios*, 13, 241-262.
- Brett, C. E. & Baird, G. C. (1986) Comparative taphonomy; a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, 1, 207-227.
- Brett, C. E. & Bordeaux, Y. L. (1990) Taphonomy of brachiopods from a middle Devonian shell bed: Implications for the genesis of skeletal accumulations. In: MacKinnon, D. I., Lee, D. E. & Campbell, J. D. (Eds.), *Brachiopods through time*, 219-226, Balkema, Rotterdam.
- Brett, C. E. & Seilacher, A. (1991) Fossil-Lagerstätten: A taphonomic consequence of event sedimentation. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. 283-297, Springer, New York, Berlin, Heidelberg.
- Brett, C. E., Baird, G. C. & Speyer, S. E. (1997) Fossil Lagerstätten: Stratigraphic record of paleontological and taphonomic events. In: Brett, C. E. & Baird, G. C. (Eds.), *Paleontological events: Stratigraphic, ecological, and evolutionary implications*, 3-40, Columbia University Press, New York.
- Cadée, G. C. (1984) Macrobenthos and macrobenthic remains on the Oyster Ground, North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 18, 160-178.
- Cadée, G. C. (1992) Eolian transport and left/right sorting of *Mya* shells (Mollusca, Bivalvia). *Palaios*, 7, 198-202.
- Cadée, G. C. (1994a) *Mya* shell manipulating by turnstones (*Aves*) results in concave-up position and left/right sorting. *Palaios*, 9, 307-309.
- Cadée, G. C. (1994b) Floating shells, Dutch Wadden Sea. *Journal of Paleontology*, 68, 903-904.
- Cadée, G. C. (1994c) Eider, shelduck, and other predators, the main producers of shell fragments in the Wadden Sea, palaeoecological implications. *Palaeontology*, 37, 181-202.
- Cadée, G. C. (2002) Floating articulated bivalves, Texel, North Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183, 355-359.
- Cadée, G. C. & Wesselingh, F. (2005) Van levend schelpdier naar fossiele schelp: Taphonomie van Nederlandse strandschelpen. *Spirula*, 343, 36-52.
- Cailleux, A. & Taylor, G. (1954) Cryopedologie, etude des sols geles. *Actualites Scientifiques Et Industrielles*, 1203, 219.
- Carroll, M., Kowalewski, M., Simões, M. G. & Goodfriend, G. A. (2003) Quantitative estimates of time-averaging in terebratulid brachiopod shell accumulations from a modern tropical shelf. *Palaeobiology*, 29, 381-402.
- Cuffe, C. K., Gibbs, A. E. & Allmon, W. D. (1991) Taphonomic signature of shell accumulations in cores: Indicator of depositional environments in Holocene nearshore sediments, west central Florida. *Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies*, XLI, 123-131.
- Cummins, H., Powell, E. N., Stanton, R. J. & Staff, G. (1986a) The rate of taphonomic loss in modern benthic habitats: How much of the potentially preservable community is preserved? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 52, 291-320.
- Cummins, R. H., Powell, E. N., Stanton, R. J. & Staff, G. (1986b) The size frequency distribution in palaeoecology: Effects of taphonomic processes during formation of molluscan death assemblages in Texas bays. *Palaeontology*, 29, 495-518.
- Cummins, R. H. (1994) Taphonomic processes in modern freshwater molluscan death assemblages: Implications for the freshwater fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 55-73.



- Cutler, A. H. (1995) Taphonomic implications of shell surface textures in Bahia la Choya, northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 114, 219-240.
- Davies, D. J., Powell, E. N. & Stanton, R. J. (1989a) Relative rates of shell dissolution and net sediment accumulation - A commentary: Can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea floor? *Lethaia*, 22, 207-212.
- Davies, D. J., Powell, E. N. & Stanton, R. J. (1989b) Taphonomic signatures as a function of environmental process: Shells and shell beds in a hurricane-influenced inlet on the Texas coast. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, 317-356.
- Dege, W. (1941) Landformende Vorgänge im eisnahen Gebiet Spitzbergens. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, Heft 3, 11-122.
- Di Celma, C., Ragaini, L., Cantalamessa, G. & Curzio, P. (2002) Shell concentrations as tools in characterizing sedimentary dynamics at sequence-bounding unconformities: Examples from the lower unit of the Canoa Formation (Late Pliocene, Ecuador). *Geobios*, 25, 72-85.
- Dionne, J. C. (1971) Vertical packing of flat stones. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 1585-1591.
- Dionne, J. C. & Laverdiere, C. (1967) Sur la mise en place en milieu littoral de cailloux plats poses sur la tranche. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 11, 262-285.
- Dodd, J. R. & Stanton, R. J. (1990) *Paleocology, concepts and applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, 502 pp.
- Dominici, S. (2004) Quantitative taphonomy in sandstones from an ancient fan delta system (Lower Pleistocene, Western Emilia, Italy). *Palaios*, 19, 193-205.
- Donato, S. V., Reinhardt, E. G., Boyce, J. I., Rothaus, R. & Vosmer, T. (2008) Identifying tsunami deposits using bivalve shell taphonomy. *Geology*, 36, 199-202.
- Dörjes, J. (1976) Primärgefüge, Bioturbation und Makrofauna als Indikator des Sandversatzes im Seegebiet vor Norderney (Nordsee). II. Zonierung und Verteilung der Makrofauna. *Senckenbergiana Maritima*, 8, 171-188.
- Dörjes, J. (1978) Das Watt als Lebensraum. In: Reineck, H.-E. (Ed.), *Das Watt - Ablagerungs- und Lebensraum*, Dritte Auflage, 107-143, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M.
- Dörjes, J. (1987) Postglaziale Schillablagerungen südlich der Doggerbank (Nordsee). *Natur und Museum*, 117, 190-196.
- Dörjes, J., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1986) Origins of, and mechanisms for mollusk shell accumulations on Georgia Beaches. *Senckenbergiana Maritima*, 18, 1-43.
- Ensom, P. C. (1984) Vertical packing of oyster shells in the Cinder Bed of Worbarrow Tout. *Proceedings of the Dorset Natural History And Archaeological Society - Natural History Reports*, 105, 167-168.
- Etter, W. (1994) *Palökologie. Eine methodische Einführung*. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 294 pp.
- Faupl, P. (2003) *Historische Geologie. Eine Einführung*. 2. verbesserte Auflage, Facultas, Wien, 271 pp.
- Flemming, B. W., Schubert, H., Hertweck, G. & Müller, K. (1992) Bioclastic tidal-channel lag deposits: A genetic model. *Senckenbergiana Maritima*, 22, 109-129.
- Flessa, K. W. (2002) Conservation paleobiology. *American Paleontologists*, 10, 2-5.

- Flessa, K. W., Cutler, A. H. & Meldahl, K. H. (1993) Time and taphonomy: Quantitative estimates of time-averaging and stratigraphic disorder in a shallow marine habitat. *Paleobiology*, 19, 266-286.
- Flessa, K. W. & Kowalewski, M. (1994) Shell survival and time-averaging in nearshore and shelf environments: Estimates from the radiocarbon literature. *Lethaia*, 27, 1-13.
- Frey, R. W. & Dörjes, J. (1988) Fair- and foul-weather shell accumulations on a Georgia Beach. *Palaios*, 3, 561-576.
- Fürsich, F. T. (1984) Distribution patterns of benthic associations in offshore shelf deposits (Upper Jurassic, Central East Greenland). *Geobios*, 8, 75-84.
- Fürsich, F. T. (1990) Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D. E. G. & Crowther, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 235-239. Blackwell Scientific, Oxford.
- Fürsich, F. T. (1995) Shell concentrations. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 88, 643-655.
- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: Paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. *Palaios*, 2, 543-559.
- Fürsich, F. T., Oschmann, W., Jaitly, A. K. & Singh, I. B. (1991) Faunal response to transgressive-regressive cycles: Example from the Jurassic of western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 85, 149-159.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (1999) Genesis and environmental significance of upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145, 119-139.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (2003) Sequence stratigraphic significance of sedimentary cycles and shell concentrations in the upper Jurassic lower Cretaceous of Kachchh, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 285-309.
- Futterer, E. (1974) Untersuchungen zum Einsteuerungsverhalten der Einzelklappen von *Cardium echinatum* L. und *Cardium edule* L. im Strömungskanal. *Neues Jahrbuch Geologische Paläontologische Monatshefte*, 8, 449-455.
- Futterer, E. (1975) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. *Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975*, 83-89.
- Futterer, E. (1976) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil II, Paläontologie*, 5/6, 261-271.
- Futterer, E. (1977) Einreglung, Transport und Ablagerung biogener Hartteile im Strömungskanal. *Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tübingen*, 133 pp.
- Futterer, E. (1981) Untersuchungen zur Unterscheidung wellen- und strömungsbedingter Schille. *Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975*, 131-137.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1966) Morphology and evolution of inshore shell ridges and mud-mounds on modern intertidal flats near Bradwell, Essex. *Proceedings of the Geologists Association Geological Society Publishing House*, 77, 329-346.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1968) Imbricate structure in Essex offshore shell banks. *Nature*, 220, 1115-1116.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1969) The origin of Holocene shell deposits in the chenier plain facies of Essex (Great Britain). *Marine Geology*, 7, 403-425.
- Gregory, J. W. (1930) Stone polygones beside Loch Lomond. *The Geographical Journal*, 76, 415-418.

- Grinnell, R., Jr. (1974) Vertical orientation of shells on some Florida oyster reefs. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 116-122.
- Hallman, D. P., Flessa, K. W., Kowalewski, M., Hertweck, G., Aggen, J. A. & Carlton, J. (1996) Ternary taphograms and the comparative taphonomy of recent mollusks from the North Sea and the Gulf of California. *Senckenbergiana Maritima*, 27, 67-75.
- Hanamgond, P. T. (2001) Coastal photo by P.T. Hanamgond. *Journal of Coastal Research*, 17, 140-142.
- Häntzschel, W. (1939) Schlick-Gerölle und Muschel-Klappen als Strömungs-Marken im Wattenmeer. *Natur und Volk*, 119, 412-417.
- Hauff, B. (1921) Untersuchungen der Fossilfundstätten von Holzmaden im Posidonienschiefer des oberen Lias Württembergs. *Paleontographica*, 64, 1-42.
- Hecht, F. (1930) Ausgeworfene Muscheln (*Mya arenaria* L.) in Lebensstellung, zur Beurteilung eines Beweismittels in der Küstensenkungs-Frage. *Senckenbergiana*, 12, 261.
- Hertweck, G. (1979) Aufwuchs von Seepocken auf Hartteilen anderer Tiere, Teil I. *Natur und Museum*, 109, 305-311.
- Hitchcock, E., Hager, A. D. & Hitchcock, C. H. (1861) Report on the geology of Vermont. Claremont Manufacturing Co., Claremont (New Hampshire), 558 pp.
- Jessen, W. (1932) Über rezente und fossile Organismenpflaster. *Paläontologische Zeitung*, 14, 67.
- Jessen, W. (1933) Die postdiluviale Entwicklung Amrums und seine subfossilen und rezenten Muschelpflaster. *Jahrbuch preußische-geologische Landesanstalt*, 53, 1-69.
- Kidwell, S. M. (1985) Palaeobiological and sedimentological implications of fossil concentrations. *Nature*, 318, 457-460.
- Kidwell, S. M. (1986) Models for fossil concentrations: Paleobiologic implications. *Palaeobiology*, 12, 6-24.
- Kidwell, S. M. (1988) Taphonomic comparison of passive and active continental margins: Neogene shell beds of the Atlantic coastal plain and northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 201-223.
- Kidwell, S. M. (1989) Stratigraphic condensation of marine transgressive records: Origin of major shell deposits in the Miocene of Maryland. *The Journal of Geology*, 97, 1-23.
- Kidwell, S. M. (1991) The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record*. Topics in Geobiology, 9, 211-290, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M. (2002a) Mesh-size effects on the ecological fidelity of death assemblages: A meta-analysis of molluscan live–dead studies. *Geobios*, 24, 107-119.
- Kidwell, S. M. (2002b) Time-averaged molluscan death assemblages: Palimpsests of richness, snapshots of abundance. *Geology*, 30, 803-806.
- Kidwell, S. M. & Jablonski, D. (1983) Taphonomic feedback: Ecological consequences of shell accumulation. In: Tevesz, M. J. S. & McCall, P. L. (Eds.), *Biotic interaction in recent and fossil benthic communities*. 195–248, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M., Fürsich, F. T. & Aigner, T. (1986) Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, 1, 228-238.

- Kidwell, S. M. & Bosence, D. W. J. (1991) Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record*. Topics in Geobiology, 9, 115-209, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M. & Brenchley, P. J. (1994) Patterns in bioclastic accumulation through the Phanerozoic; changes in input or in destruction? *Geology*, 22, 1139-1143.
- Klähn, H. (1929) Die Bedeutung der Seelilien und Seesterne für die Erkenntnis von Wasserbewegung nach Richtung und Stärke. *Palaeobiologica*, 2, 287-302.
- Kostyaev, A. G. (1973) Some rare varieties of stone circles. *Biuletyn Peryglacjalny*, 22, 347-352.
- Kowalewski, M., Flessa, K. W. & Aggen, J. A. (1994) Taphofacies analysis of recent shelly cheniers (Beach Ridges), northeastern Baja California, Mexico. *Facies*, 31, 209-242.
- Kowalewski, M., Goodfriend, G. A. & Flessa, K. W. (1998) High-resolution estimates of temporal mixing within shell beds: The evils and virtues of time-averaging. *Paleobiology*, 24, 287-304.
- Kowalewski, M., Lasso, D. G. & Carroll, M. (2003) Quantitative fidelity of brachiopod-mollusk assemblages from modern subtidal environments of San Juan Islands, USA. *Journal of Taphonomy*, 1, 43-65.
- Kowalewski, M., Serrano, G. E. A., Flessa, K. W. & Goodfriend, G. A. (2000) Dead delta's former productivity: Two trillion shells at the mouth of the Colorado River. *Geology*, 28, 1059-1062.
- Krause, H. R. (1950) Quantitative Schilluntersuchung im See- und Wattgebiet von Norderney und Juist und ihre Verwendung zur Klärung hydrogeographischer Fragen. *Archiv für Molluskenkunde* 79, 91-116.
- Kühl, H. (1950) Studien über die Sandklaffmuschel *Mya arenaria*: Die Gewinnung der Klaffmuschel an der deutschen Nordseeküste in den Jahren 1945-1949. Aus dem Institut für Küsten- und Binnenfischerei der Bundesforschungsanstalt für Fischerei, 25-39.
- Kühl, H. (1951) Über die Siedlungsweise von *Mya arenaria*. Sonderdruck aus "Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Wilhelmshaven 1951", 385-391.
- Lüders, K. (1929) Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebbtrichtern der Außenjade. *Senckenbergiana*, 11, 123-142.
- Lüders, K. (1958) Kleines Küstenlexikon. Dorn Verlag, Bremen, 149 pp.
- Mandic, O. & Piller, W. E. (2001) Pectinid coquinas and their palaeoenvironmental implications - Examples from the early Miocene of northeastern Egypt. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 172, 171-191.
- Mathieu, R. (1966) Structures sedimentaires des depots de la zone intertidale dans la partie occidentale de la baie du Mont-Saint-Michel. *Revue de Geographie Physique et de Geologie Dynamique*, 8, 113-122.
- McKittrick, M. A. (1987) Experiments on the settling of gastropods and bivalve shells: Biostratigraphic implications. In: Flessa, K. W. (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene inter-tidal deposits Gulf of California*, 150-163, The Palaeontological Society, Tucson, Arizona.
- Meldahl, K. (1987) Origin of shell beds and evolution of a shelly sand spit, Bahia La Choya, Northern Gulf of California. In: Flessa, K. W., (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene inter-tidal deposits Gulf of California*, 189-199, The Palaeontological Society, Tucson, Arizona.
- Meldahl, K. (1993) Geographic gradients in the formation of shell concentrations: Plio-Pleistocene marine deposits, Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 101, 1-25.

- Meldahl, K. (1995) Pleistocene shoreline ridges from tide-dominated and wave-dominated coast: Northern Gulf of California and western Baja California, Mexico. *Marine Geology*, 123, 61-72.
- Meldahl, K. H. & Flessa, K. W. (1990) Taphonomic pathways and comparative biofacies and taphofacies in a recent intertidal/shallow shelf environment. *Lethaia*, 23, 43-60.
- Meldahl, K. H. & Cutler, A. H. (1992) Neotectonics and taphonomy: Pleistocene molluscan shell accumulations in the northern Gulf of California. *Palaios*, 7, 187-197.
- Meldahl, K. H., Flessa, K. W. & Cutler, A. H. (1997) Time-averaging and postmortem skeletal survival in benthic fossil assemblages: Quantitative comparisons among Holocene environments. *Paleobiology*, 23, 207-229.
- Mii, H. (1957) Peculiar accumulation of drifted shells. *Saito Ho-on Kai Museum Research Bulletin*, 26, 17-24.
- Moffat, H. & Bottjer, D. (1999) Echinoid concentration beds: Two examples from the stratigraphic spectrum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 149, 329-348.
- Moors, H. T. (1970) Current orient significance and interpretation. *Sedimentary Geology*, 4, 117-134.
- Mount, J. F. & Kidder, D. (1993) Combined flow origin of edgewise intraclast conglomerates: Sellick Hill Formation (Lower Cambrian), south Australia. *Sedimentology*, 40, 315-329.
- Müller, A. H. (1992) *Lehrbuch der Paläozoologie. Band I: Allgemeine Grundlagen. 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage*, Fischer Verlag, Jena, 514 pp.
- Nagle, J. S. (1967) Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Research*, 37, 1124-1138.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2002) Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Marine Geology*, 185, 435-469.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2003) Sedimentology of coarse-clastic beach-ridge deposits, Essex, southeast England. *Sedimentary Geology*, 162, 167-198.
- Nebelsick, J. H. & Kroh, A. (2002) The stormy path from life to death assemblages: The formation and preservation of mass accumulations of fossil Sand Dollars. *Palaios*, 17, 378-393.
- Nyandwi, N. & Flemming, B. W. (1995) A hydraulic model for the shore-normal energy gradient in the East Frisian Wadden Sea (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima*, 25, 163-171.
- Otvos, E. G. (2000) Beach ridges - Definitions and significance. *Geomorphology*, 32, 83-108.
- Otvos, E. G. & Price, W. A. (1979) Problems of chenier genesis and terminology - An overview. *Marine Geology*, 31, 252-263.
- Quaresma, V. d. S., Bastos, A. C. & Amos, C. L. (2007) Sedimentary processes over an intertidal flat: A field investigation at Hythe flats, Southampton Water (UK). *Marine Geology*, 241, 117-136.
- Quenstedt, W. (1927) Beiträge zum Kapitel Fossil und Sediment vor und bei der Einbettung. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 58, 353 pp.
- Reineck, H.-E. (1961) Die Herstellung von Meeresboden-Präparaten im Senckenberg-Institut Wilhelmshaven. *Museumskunde*, 87-98.
- Reineck, H.-E. (1963) Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. *Abhandlung der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 505, 1-138.
- Reineck, H.-E. (1970) Reliefluß und projizierbarer Dickschliff. *Senckenbergiana Maritima*, 2, 61-66.

- Reineck, H.-E. (1973) Spülsäume. *Natur und Museum*, 103, 130-133.
- Reineck, H.-E. (1975) Die Grösse der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. *Hamburger Küstenforschung*, Heft 33, 1-28.
- Reineck, H.-E. (1976) Natural indicators of energy level in recent sediments: The application of ichnology to a coastal engineering problem. In: Crimes, T. P. & Harper, J. C. (Eds.), *Trace fossils 2*, *Geological Journal Special Issue*, 9, 265-272, Department of Geology - University of Liverpool, Liverpool.
- Reineck, H.-E. (1982) *Das Watt - Ablagerungs- und Lebensraum*. Dritte Auflage, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M., 185 pp.
- Reineck, H.-E. (1984) *Aktuo-Geologie, klastische Sedimente*, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M., 348 pp.
- Reineck, H.-E., Dörjes, J., Gadow, S. & Hertweck, G. (1968) Sedimentologie, Faunen zonierung und Faziesabfolge vor der Ostküste der inneren Deutschen Bucht. *Senckenbergiana Lethaea*, 49, 261-309.
- Reineck, H.-E. & Siefert, W. (1980) Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. *Die Küste*, 35, 26-51.
- Richter, R. (1922) Die Lage schüsselförmiger Körper bei der Einbettung. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. III-VI. *Senckenbergiana*, 4, 105-137.
- Richter, R. (1924) Weiteres zur Verschieden-Häufigkeit der beiden Klappen einer Spezies bei Muscheln und Brachiopoden. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. VII-XI. *Senckenbergiana*, 6, 119-163.
- Richter, R. (1931) Tierwelt und Umwelt im Hunsrückschiefer; zur Entstehung eines schwarzen Schlammgesteins. *Senckenbergiana*, 13, 299-342.
- Richter, R. (1942) Die Einkippungsregel. *Senckenbergiana*, 25, 181-206.
- Salazar-Jimenez, A., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1982) Concavity orientations of bivalve shells in estuarine and nearshore shelf sediments, Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, 566-586.
- Sanderson, D. J. & Donovan, R. N. (1974) The vertical packing of shells and stones on some recent beaches. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 680-688.
- Schäfer, W. (1941) Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres – 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens – 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 457, 1-54.
- Schäfer, W. (1962) *Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee*. *Senckenberg-Buch*, 41, Frankfurt a. M., 666 pp.
- Schäfer, W. (1963) Biozönose und Biofazies im marinen Bereich. *Aufsätze und Reden der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, Nr. 11, Frankfurt a. M., 37 pp.
- Schmitthenner, H. (1930) Der Wutaischan. Eine Reise auf den heiligen Berg des Windes in Nordchina. *Mitteilung der Gesellschaft für Erdkunde zu Leipzig*, 50, 5-23.
- Schneider-Storz, B., Nebelsick, J. H., Wehrmann, A. & Federolf, C. M. J. (2008) Comparative taphonomy of three bivalve species from a mass shell accumulation in the intertidal regime of North Sea tidal flats. *Facies*, 54, 461-478.
- Schubert, H. (1990) Entstehung, Vorkommen und Nutzung sublitoraler Schillanreicherungen im Gebiet um Spiekeroog. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Clausthal-Zellerfeld, 190 pp.

- Seilacher, A. (1970) Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten (Fossil-Lagerstätten No 1). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatsheft 1970, 34-39.
- Seilacher, A. (1973) Biostratinomy: The sedimentology of biologically standardized particles. In: Ginsburg, R. N. (Ed.), *Evolving concepts in sedimentology*, 21, 159-177, John Hopkins University Press, Baltimore.
- Seilacher, A. & Meischner, D. (1965) Fazies-Analyse im Paläozoikum des Oslo-Gebiets. *Geologische Rundschau*, 54, 596-619.
- Seilacher, A., Reif, W. E. & Westphal, F. (1985) Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil Lagerstätten. In: Whittington, H. B. & Conway, M. S. (Eds.), *Extraordinary fossil biotas; their ecological and evolutionary significance*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Science*, 311, 5-24.
- Shou-Wan, K., Tian-Fang, C., Aguirre, J., Braga, J. C., Jimenez, A. P. & Rivas, P. (1996) Substrate-related changes in pectinid fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 291-308.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1988) Taphofacies models for epeiric sea environments: Middle Paleozoic examples. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 225-262.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1991) Taphofacies controls: Background and episodic processes in fossil assemblage preservation. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record*. *Topics in Geobiology*, 9, 115-209, Plenum Press, New York.
- Springer, D. A. & Flessa, K. W. (1996) Faunal gradients in surface and subsurface shelly accumulations from a recent clastic tidal flat, Bahia la Choya, northern Gulf of California, Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 261-279.
- Strauch, F. (1990) Zur Gliederung einiger känozoischer Schill-Typen. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 181, 417-430.
- Tomašových, A. & Rothfus, T. A. (2005) Differential taphonomy of modern brachiopods (San Juan Islands, Washington State): Effect of intrinsic factors on damage and community-level abundance. *Lethaia*, 38, 271-292.
- Tricart, J. & Cailleux, A. (1967) *Traite´ de Geomorphologie II, Le modele´ des re´gions pe´riglaciaires*. SEDES, Paris, 515 pp.
- Trusheim, F. (1931a) Versuche über Transport und Ablagerung von Mollusken. *Senckenbergiana*, 13, 124.
- Trusheim, F. (1931b) Spülsaum am Meeresstrand. *Natur und Museum*, 61, 112-119.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1950) Environment of formation and facies of the Wadden Sea sediments. *Tijdschrift (K.) Nederlands Aardrijkskund*, 67, 94-108.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea. *Process (K.) Nederlands Akademik Wetenschappen*, (B) 55, 500-516.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1956) Composition of shell beds formed in tidal flat environments in the Netherlands and in the Bay of Arachon (France). *Geologie en Mijnbouw*, 18, 209-226.
- Van Straaten, L. M. J. U. & Kuenen, P. H. (1958) Tidal action as a cause of clay accumulation. *Journal of Sedimentary Research*, 28, 406-413.
- Weigelt, J. (1927) Über Biostratonomie. *Der Geologe*, 42, 1069-1082.

- Wendt, J. (1995) Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, 161-186.
- Wiedemann, H. U. (1972) Shell deposits and shell preservation in Quaternary and Tertiary estuarine sediments in Georgia. *Sedimentary Geology*, 7, 103-125.
- Wilson, J. B. (1963) The Relation of shell beds to living molluscan faunas. *Transactions of the Dumfriesshire and Galloway Natural History and Antiquarian*, 40, 98-101.
- Wilson, J. B. (1988) A model for temporal changes in the faunal composition of shell gravels during a transgression on the continental shelf around the British Isles. *Sedimentary Geology*, 60, 95-105.
- Wilson, P. (2002) Coastal photographs by Peter Wilson. *Journal of Coastal Research*, 18, 409-411.
- Wilson, P. & Edwards, E. J. (2004) Further examples of ventifacts and unusual patterned ground from the Falkland Islands. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 86, 107-115.
- Woodroffe, C. D. & Grime, D. (1999) Storm impact and evolution of a mangrove-fringed chenier plain, Shoal Bay, Darwin, Australia. *Marine Geology*, 159, 303–321.
- Wunderlich, F. (1979) Die Insel Mellum (Südliche Nordsee): Dynamische Prozesse und Sedimentgefüge – I. Südwatt, Übergangszone und Hochfläche. *Senckenbergiana Maritima*, 11, 59-113.



**Tafeln**  
**Kapitel 2**

## Tafel 2-1

**Bild A:** Blick auf das Dorumer Schill-Vorkommen bei Niedrigwasser (Dorumer Watt). Blickrichtung in nördlicher Richtung. Auf der Westseite befindet sich in luvwertiger Richtung der Hauptpriel Robinsbalje.

**Bild B:** Blick auf das Schill-Vorkommen im Fedderwarder Wattgebiet. Niedrigwasser ist noch nicht erreicht. Rechts befindet sich der Fedderwarder Hauptpriel. Blickrichtung ist Südost.

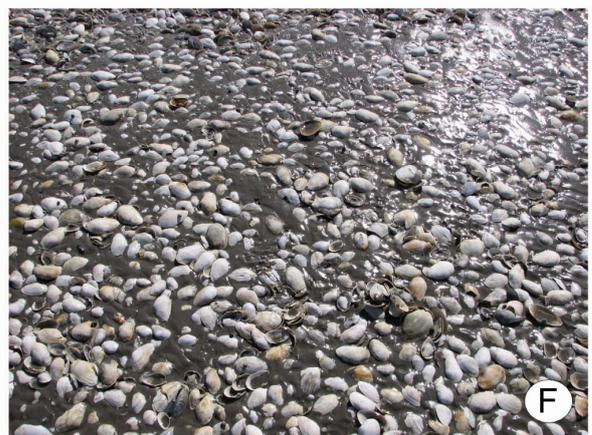
**Bild C:** Blick auf das Sahlenburger Schill-Vorkommen bei mittlerem Niedrigwasserstand. Blick in südöstlicher Richtung auf das Altoxstedter Tief.

**Bild D:** Trockengefallene Schlickhorizonte mit *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Zonenbereich 1 der Fedderwarder Lokation. Stufenartige Erosion der Schichtoberflächen sowie sägezahnartige Erosion der Ausbiss-Kanten.

**Bild E:** Nahaufnahme der fast freierodierten postmortalen *M. arenaria* Doppelklappen innerhalb des Zonenbereiches 1. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild F:** Pflasterlagerung von *M. arenaria* Einzelklappen auf der Dorumer Wattfläche. Zonenbereich 2b.

Tafel 2-1



## Tafel 2-2

**Bild A:** *M. arenaria* Einzelklappen in Dachziegellagerung im Zonenbereich 2c. Lokation Dorumer Watt.

**Bild B:** Ripp-Strukturen bzw. vertikale Schill-Streifen des Zonenbereiches 3. Umgeben werden die Streifen von Pflastervariationen. Lokation Dorumer Watt.

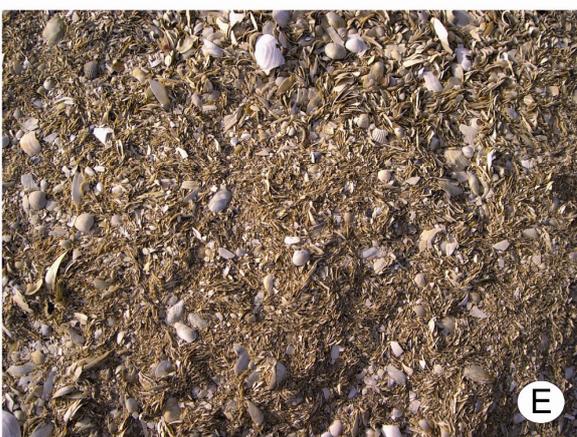
**Bild C:** Nahaufnahme zweier parallel verlaufenden Rippen innerhalb des Zonenbereiches 3. Zwischen den Schill-Streifen lagern Einzelklappen in Imbrikationsanordnung. Lokation Dorumer Watt.

**Bild D:** Rosettenstruktur des Zonenbereiches 4 aus *M. arenaria* Einzelklappen. Umgeben wird die Anordnung von Pflastervariationen. Lokation Dorumer Watt.

**Bild E:** Chips-Fläche innerhalb der Zone 4. Lokation Dorumer Watt.

**Bild F:** Grenze zwischen Chips-Fläche und Hochkantschill-Anordnung. Zonenbereich 4/5. Lokation Dorumer Watt.

Tafel 2-2



### Tafel 2-3

**Bild A:** Chips-Fläche auf der *M. arenaria* Einzelklappen als Pflaster im Bereich der Zone 4 lagern. Niedrigwasserzeit. Lokation Dorumer Watt.

**Bild B:** Detailansicht einer dichtgepackten und vertikal angeordneten Chips-Fläche mit Rosettenmuster bei Niedrigwasser. Lokation Dorumer Watt.

**Bild C:** Hochkantschill-Anordnungen am hintern Saum des Dorumer Vorkommens bei Niedrigwasser. Zonenbereich 5.

**Bild D:** Seitenansicht der Hochkantschill-Anordnungen an der Hinter-Kante des Dorumer Vorkommens bei Niedrigwasser. Höhe der Kante ca. 30 cm. Zonenbereich 5.

**Bild E:** Aufsicht auf die Hochkantschill-Anordnungen am hinteren Saum des Dorumer Vorkommens bei Niedrigwasser. Zonenbereich 5.

**Bild F:** Hochkantschill-Anordnungen des Dorumer Vorkommens bei Niedrigwasser. Zonenbereich 5.

Tafel 2-3



## Tafel 2-4

**Bild A:** Schlickablagerungen im vorderen Zonenbereich des Dorumer Schill-Vorkommens. Die Pflastervariationen der Zonenbereiche 2a bis 2c sind völlig mit Schlick überdeckt. Niedrigwasserzeit. Sommer 2006.

**Bild B:** Schlickablagerungen im hinteren Zonenbereich des Dorumer Schill-Vorkommens bei Niedrigwasser. Die Ablagerungen grenzen unmittelbar an die Hochkantschill-Kante des Zonenbereiches 5. Sommer 2006.

**Bild C:** Eine flach abfallende Hinterkante (Saum) des Dorumer Schill-Vorkommens aufgrund der vermehrten Chips-Einlagerung im hinteren Zonenbereich 5. Niedrigwasserzeit. Sommer 2006. Lokation Dorumer Watt.

**Bild D:** Stufige Terrassen-Ebenen (dunkle Schalen) des Zonenbereiches 6 am Dorumer Schill-Vorkommen bei ablaufendem Wasser.

**Bild E:** Terrassen-Ebene des Zonenbereiches 6 am Dorumer Schill-Vorkommen bei Niedrigwasser.

**Bild F:** Patch-Felder (Schill-Felder) des rückwärtigen Zonenbereiches 7. Lokation Dorumer Watt.



Tafel 2-4



## Tafel 2-5

**Bild A:** *M. arenaria* Einzelklappen als „gewölbt-unten“ Einkippung an der Hinterkante des Zonenbereiches 5 mit Wasserüberdeckung. Vorstufe bzw. Voraussetzung für eine spätere vertikale Einregelung. Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild B:** *M. arenaria* Einzelklappen als „gewölbt-unten“ Einkippung an der Hinterkante des Zonenbereiches 5 nach abgelaufenem Wasser. Klappen sind durch eingespülten Sand stabilisiert. Vorstufe bzw. Voraussetzung für eine spätere vertikale Einregelung. Lokation Fedderwarder Watt.

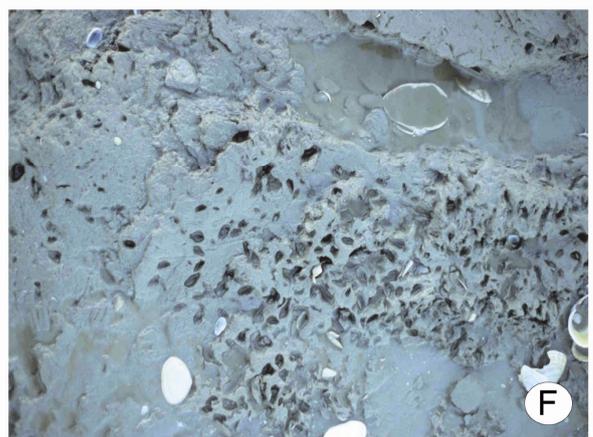
**Bild C:** Seltenes Bilddokument von vertikal eingeregelter *M. edulis* (Miesmuschel) Einzelklappen im Wattenmeer. Lokation ist das Wattgebiet südöstlich der Nordsee Insel Baltrum.

**Bild D:** Ineinander verschachtelte *M. edulis* (Miesmuschel) Einzelklappen. Lokation Dorumer Watt.

**Bild E:** Hintereinander angeordnete Einzelklappen von *Macoma balthica* und *Cerastoderma edule* im supratidalen Strandbereich einer Schill-Akkumulation am Rysumer Nacken (Nordwestlich der Stadt Emden, Ems-Mündung).

**Bild F:** Abdrücke von *M. arenaria* Doppelklappen im Schlicksand bzw. auf den freierodierten ehemaligen Siedlungshorizonten des Zonenbereiches 1 bei Niedrigwasser. Lokation Fedderwarder Watt.

Tafel 2-5



## Tafel 2-6

**Bild A:** Reliefguss Do1: Auf der Oberfläche lagern orientierungslos einige *M. arenaria* Einzelklappen. Knapp unter der Oberfläche lagern einige Hydrobien Schalen. Im oberen Drittel grobe Wechselschichtung Schlicksand/Sand. Mittlerer Bereich mit Umgelagerten Material sowie zwei Doppelklappen von *C. edule*. Unteres Drittel mit eingespültem Schlicksand bevor es in eine relativ feinblättrige Wechselschichtung aus Schlick/Sand übergeht (s. auch Abb. 2-3a). Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

**Bild B:** Reliefguss Do2: Aus der Oberfläche herausragend eine *M. arenaria* Doppelklappe in postmortaler Lebensstellung. Doppelklappe ist mit Balaniden bewachsen. Im oberen Drittel einige *C. edule* Doppelklappen sowie eine adulte und mehrere juvenile *M. edulis* Doppelklappen in einer umgelagerten Schlicksand Matrix. Im mittleren Drittel leichte Wechselschichtung aus Schlick/Schlicksand. Im unteren Drittel kaum Wechselschichtung erkennbar. Schlickanteil innerhalb des Reliefgusses ist hoch (s. auch Abb. 2-3a). Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

**Bild C:** Reliefguss Do4: Aus der Oberfläche herausragend eine *M. arenaria* Doppelklappe in postmortaler Lebensstellung. Im oberen Drittel einige *M. arenaria* Einzelklappen. Schichtverband aus Schlick/Sand-Wechselschichtung. Die Schichtverband wurde durch einen *M. arenaria* Grabgang vom Liegenden zum Hangenden gestört. Innerhalb des durchwühlten Grabganges Schalenbruchstücke (s. auch Abb. 2-3a). Deutliche Wechsellagerung von Schlick/Sand. Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt

**Bild D:** Reliefguss Fw2: Aus der Oberfläche zu einem Drittel herausragend eine *M. arenaria* Doppelklappe in postmortaler Lebensstellung. Wechselschichtung aus Schlick/Sand durch den Grabfuss der Muschel gestört (s. auch Abb. 2-3a). Wattstechkasten ca. 17 x 6 x 25 cm (L x B x H). Lokation Fedderwarder Watt.

Tafel 2-6



## Tafel 2-7

**Bild A:** Reliefguss Fw3: Aus der Oberfläche herausragend sechs junge *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Unten links eine adulte *M. arenaria* Doppelklappe. Kaum Schichtung im Schlicksand erkennbar, aufgrund starker Verwühlung der Muscheln (s. auch Abb. 2-4a). Wattstechkasten ca. 17 x 6 x 25 cm (L x B x H). Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild B:** Reliefguss Fw4: Oberes Drittel mit jungen *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Starke Verwühlung durch die Muscheln. Im mittleren Drittel feine Wechselschichtung aus Schlick/Schlicksand. Im unteren Drittel adulte *M. arenaria* Doppelklappe. Bereich mit Verwühlung. Unten links eventueller Gang (?) von *Arenicola marina* (s. auch Abb. 2-4a). Wattstechkasten ca. 17 x 6 x 25 cm (L x B x H). Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild C:** Reliefguss Fw5: Im oberen Drittel *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung umgeben mit Pflasterlagerung von *Mya* Einzelklappen. Mittlerer Bereich sehr stark durchwühlt. Im unteren Drittel juvenile *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung (s. auch Abb. 2-4a). Wattstechkasten ca. 17 x 6 x 25 cm (L x B x H). Lokation Fedderwarder Watt.

**Bild D:** Reliefguss Do6: Auf der Oberfläche *M. arenaria* und *C. edule* Einzelklappen in Dachziegellagerung. Mittlerer Bereich starke Verwühlung. Unten reliktsche Wechselschichtung aus Schlick/Sand (s. auch Abb. 2-3a). Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

Tafel 2-7



## Tafel 2-8

**Bild A:** Reliefguss Do8: Im oberen Drittel *M. arenaria* Einzelklappen in vertikaler Anordnung. Klappen sind chaotisch orientiert und stammen aus einem Schill-Streifen des Zonenbereiches 3 (s. auch Abb. 2-3). Darunter eine feine Lage von *M. arenaria* in Pflasterlagerung. Mittlerer Bereich mit Einzelklappen von *M. arenaria*, *C. edule* und vereinzelt *M. edulis* in vertikaler, chaotischer Orientierung. Unteres Drittel beginnt mit einer erneuten Pflasterlagerung und geht in eine Wechselschichtung zwischen Sediment und Schalenpflaster über. Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

**Bild B:** Reliefguss Do10: Im oberen Drittel *M. arenaria* Einzelklappen in vertikaler Anordnung. Klappen sind chaotisch orientiert und stammen aus einer Rosettenanordnung des Zonenbereiches 4 (s. auch Abb. 2-3). Darunter folgt eine feine Lage von *M. arenaria* und *C. edule* Klappen in Pflasterlagerung. Zum Liegenden erfolgt eine scharfe Grenze zu einer ca. 5 cm mächtigen feinen Chips-Lage. Darunter folgen größere Bruchstücke von *M. arenaria* und *C. edule* Klappen. Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

**Bild C:** Reliefguss Do12: Eine Hochkantschill-Anordnung des Zonenbereiches 5 (s. auch Abb. 2-3a & b). Vorwiegende Orientierung der konkaven Klappenhälften (hohle Klappenseite) in Richtung der auflaufenden Wellenfront. Einzelklappen sind hintereinander vertikal eingeregelt. Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.

**Bild D:** Reliefguss Do18: Im oberen Drittel *M. arenaria* und *C. edule* Einzelklappen, teilweise in vertikaler Anordnung. Klappen weisen eine chaotische Orientierung mit einer starken mechanischen Beanspruchung auf. Teilweiser Bewuchs der Klappen durch Balaniden. Im mittleren Bereich eine ca. 10 cm mächtige Lage aus gut erhaltenem Schalenmaterial. Die Klappen lagern chaotisch und teilweise in Pflasterlagerung. Untere Schlicksand-Bereich ohne Schalenmaterial. Reliefguss stammt aus den rückwertigen Schill-Feldern des Zonenbereiches 7 (s. auch Abb. 2-3). Taucherstechkasten ca. 18,5 x 10 x 35 cm (L x B x H). Lokation Dorumer Watt.



Tafel 2-8







## **KAPITEL 3**

### **Taphonomie von *Mya arenaria* dominierenden Schill- Akkumulationen im Gezeitenbereich des Wattenmeeres**

**Vergleichende Untersuchung mittels uni- und multivariaten Analysemethoden**

## Kurzfassung

Im folgenden Kapitel werden *M. arenaria* dominierende Schill-Vorkommen des eulitoralischen Gezeitenbereiches innerhalb der Deutschen Wattenmeer-Region zwischen Jade und Außenelbe taphonomisch untersucht.

Ziel der Untersuchung ist es Beanspruchungsunterschiede zwischen verschiedenen Lagerungs- und Orientierungszuständen von *M. arenaria* Einzelklappen taphonomisch nachzuweisen. Zudem soll das Schalenmaterial zweier Schill-Vorkommen miteinander verglichen werden um nachzuweisen, dass ähnliche Lagerungszustände an unterschiedlichen Lokationen mit Hilfe taphonomischer Analyse zu identifizieren sind.

Zu diesem Zweck wurde das Schalenmaterial zweier Transekte einer semi-quantitativen taphonomischen Analyse unterzogen bei der folgende Beanspruchungsmerkmale erfasst wurden: Abrasion, Inkrustation, Bioerosion, Randerhaltung und Fragmentation. Neben bivariaten-taphonomischen Korrelationsanalysen wurden Größenhäufigkeitsverteilungen, Regressions- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Des Weiteren wurde das rechts/links Seitenverhältnis der *M. arenaria* Einzelklappen bestimmt. Ähnlichkeiten in der taphonomischen Beanspruchung zwischen Lagerungszuständen und Ablagerungsbereichen wurden mittels multivariater Datenanalyse erfasst.

Die Ergebnisse der Größenhäufigkeitsverteilungen zeigen signifikante Unterschiede zwischen zwei ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten sowie der Klappenverteilung innerhalb der Schill-Akkumulationen. Frachtsonderungsprozesse konnten nur an einem Transekt signifikant belegt werden. Die semi-quantitativen taphonomischen Analysen belegen, dass der Beanspruchungsgrad des Schalenmaterials mit zunehmender Transportentfernung ansteigt.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Klappen während anhaltender Transportbewegungen entlang der Transekte überwiegend physikalischen Beanspruchungsprozessen ausgesetzt sind, welche sich besonders auf die Randerhaltung, Abrasion sowie Fragmentation auswirken. Erst nachdem die Klappen im rückwertigen Transektbereich aufgrund geringerer hydrodynamischer Aktivitäten abgelagert werden, setzen bioökologische Prozesse infolge von Inkrustationsbeanspruchungen durch Balaniden und Bryozoen ein. Die Analysen ergeben, dass mit zunehmender Schalengröße auch der taphonomische Beanspruchungsgrad der Abrasion, Inkrustation und Randerhaltung signifikant ansteigt. Es kann nachgewiesen werden, dass der taphonomische Erhaltungszustand maßgeblich durch hydrodynamische und die daraus resultierenden biostratigraphischen Prozesse beeinflusst wird.

Die multivariaten Analyse belegen, dass mit der Lagerungsvariation der Klappen auf dem Untergrund (horizontal, vertikale) sich auch der taphonomische Beanspruchungsschwerpunkt verändert. Infolge dessen kann eine taphonomische Differenzierung aufgrund von Lagerungsanordnungen zwischen postmortalen *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensposition, Pflaster- und Dachziegellagerung, vertikal eingeregelt Klappen (Hochkantschillen) sowie einigen Schalenfeldern des rückwertigen Transektbereiches vorgenommen werden. Die Untersuchungen belegen, dass der taphonomische Erhaltungszustand der untersuchten *M. arenaria* Klappen 1. von der jeweiligen Exponierungsposition auf der Oberfläche und 2. von der Lagerungsorientierung innerhalb der Schill-Vorkommen abhängt.

## Einleitung

Das Wattenmeer ist ein klassisches Untersuchungsgebiet für aktuopaläontologische und taphonomische Forschung. Besonders die Untersuchung heimischer Muschelarten wie *Cerastoderma edule*, *Mytilus edulis*, *Macoma balthica* und *Mya arenaria* haben dazu beigetragen biologischen und ökologische Parameter innerhalb des Gezeitenbereiches der Nordsee besser zu verstehen.

Einige grundlegende historische Arbeiten zu Transportmechanismen von Schalenmaterial, dessen Einbettung und Verteilung im Wattenmeer sollen an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden (z. B. Richter 1922, 1942; Lüders 1929; Hecht 1930; Trusheim 1931; Jessen 1932, 1933; Häntzschel 1939; Schäfer 1941).

Massenansammlungen von Muschelklappen im Gezeitenbereich der Nordsee wurden in der Vergangenheit bereits von einigen Autoren beschrieben (z. B. Schäfer 1962; Van Straaten 1950, 1952, 1956; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Reineck 1984; Dörjes 1987; Schubert 1990). Oftmals spielen beim Akkumulationsprozess von Schalenmaterial biostratinomische Vorgänge eine große Rolle. Ausführliche Untersuchungen zu biostratinomische Abläufen in denen Einstreuungen, Einregelungen sowie Orientierungen von Muschelklappen beschrieben wurden geben beispielweise Weigelt (1927), Richter (1922, 1942), Schäfer (1962), Nagle (1967), Brenchley & Newall (1970), Seilacher (1973), Futterer (1974, 1975, 1977), McKittrick (1987), Allen (1990), Müller (1992) und Wendt (1995). Untersuchungen von Schalenansammlungen umfassen neben einer große Variation von biologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Prozessen sehr häufig auch taphonomische Ereignisse (z. B. Kidwell & Jablonski 1983; Kidwell & Bosence 1991; Flessa & Kowalewski 1994; Meldahl et al. 1997; Carrol et al. 2003).

Grundlegende taphonomische Untersuchungen im Wattenmeer wurden dabei beispielweise u. a. von Richter (1922, 1924, 1942), Pratje (1929), Schäfer (1941, 1962), Tauber (1942) und Hollmann (1968a, b) durchgeführt. Ausführliche taphonomische Untersuchungen unter Einbezug der jeweiligen Ablagerungsbedingungen im Gezeitenbereich der Nordsee führten z. B. Hertweck (1971, 1979a, b), Eisma et al. (1981), Cadée (1984, 1992, 1994a, b, c, 1995), Cadée & Wesselingh (2005), Cutler (1995), Hallman et al. (1996), Flessa (1998) und Schneider-Storz et al. (2008) durch. Untersuchungen an Schalenansammlungen wurden auch in anderen Regionen durchgeführt wie beispielweise am Golf von Kalifornien (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa et al. 1993; Kidwell 1988; Kowalewski et al. 1994; Meldahl & Cutler 1992; Meldahl 1993, 1995; Cutler 1995; Hallman et al. 1996; Springer & Flessa 1996), an der Ostküste der USA in Georgia (Wiedemann 1972; Dörjes et al. 1986; Frey & Dörjes 1988; Salazar-Jimenez et al. 1982) sowie an der Küste Englands beispielweise von Greensmith & Tucker (1966, 1968, 1969) und Neal et al. (2002, 2003).

Bei einigen dieser Untersuchungen wurden bio-ökologische, taxonomische, geologisch-sedimentologische und natürlich auch taphonomische Aspekte mit starkem Bezug auf paläoökologische Fragestellungen bearbeitet. In anderen Arbeiten dienten taphonomische

Fazies-Modelle als nützliches Werkzeug sowohl bei fossilen als auch bei modernen Umweltanalysen (Speyer & Brett 1986, 1988). Die Bestimmung des sogenannten „taphonomischen Fingerabdrucks“ spielte eine wichtige Rolle bei der Aufstellung von derartigen Taphofazies-Modellen (z. B. Davies et al. 1989b; Fürsich & Flessa 1987; Powell et al. 1987). Schon in einigen Arbeiten haben sich taphofazielle Untersuchungen besonders von marinen Invertebraten als nützliches Konzept erwiesen (z. B. Brandt 1989; Jiménez & Braga 1993; Cantalamessa et al. 2005; Lockwood & Work 2006 u. a.).

Auch in aktualistischen Untersuchungen wurden Taphofazies-Analysen bereits erfolgreich angewandt (z. B. Fürsich et al. 1991; Parson 1989; Davies et al. 1989a; Meldahl & Flessa 1990; Powell et al. 1989; Nebelsick 1992; Kowalewski et al. 1994; Best & Kidwell 2000a, b). Diese fazies-basierten aktualistischen Untersuchungen konnten in der Vergangenheit dazu beitragen fossile Taphofazies-Modelle zu kalibrieren, quantifizieren und damit weiter zu entwickeln. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Untersuchung von Schalenakkumulationen ist zudem der Vergleich von lebenden Populationen mit postmortalem bzw. subfossilem Schalenmaterial, die von äußeren Prozessen wie z. B. Strömungen, Wellengang und die dadurch bedingte Umlagerungen beeinflusst wurden (z. B. Wilson 1963; Alexandrowicz 1977, 2001; Alexandrowicz & Florek 1999; Fürsich 1990; Kidwell & Bosence 1991; Cummins 1994; Kidwell 2002a, b). Einen allgemeinen und zusammenfassenden Überblick über die Datenerhebung sowie verschiedene Analysemethoden geben beispielsweise Kidwell et al. (2001).

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit wurden drei Schill-Vorkommen innerhalb des Gezeitenbereiches zwischen Jadebucht und Außenelbe untersucht. Auf den Oberflächen der Vorkommen wurden verschiedene Lagerungsvariationen von rezenten *M. arenaria* Einzelklappen beschrieben und miteinander verglichen. Mittels detaillierter Oberflächenuntersuchungen gelang es wiederkehrende und einheitliche Ablagerungsmuster innerhalb der Schalenakkumulationen nachzuweisen. Die Ergebnisse zeigten, dass die unterschiedlichen Lagerungs- und Einregelungsvariationen der Klappen sich nur auf bestimmten Oberflächenbereichen beschränkten. Aufgrund dessen erfolgte eine Einteilung der oberflächennahen Lagerungsstrukturen in insgesamt sieben unterschiedliche Zonenbereiche. Während in den vorgelagerten ehemaligen Siedlungshorizonten freierodierte, postmortale *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung vorgefunden wurden (Zone 1), akkumulierten sich die bereits disartikulierten und transportierten Klappen zu verschiedenen Lagerungs- und Einregelungsvariationen. Neben verschiedenen Pflasteranordnungen (Zone 2a bis c), Schill-Streifen (Zone 3) und Rosettenstrukturen (Zone 4) wurden richtungsorientierte und vertikal eingeregelterte *M. arenaria* Einzelklappen (Hochkanschille der Zone 5) an den hinteren Säumen der Vorkommen vorgefunden. In den jeweiligen Rückbereichen der Schill-Vorkommen bildeten sich nach einem terrassenartigen Übergang (Zone 6) ausgedehnte Fleckenfelder (Zone 7).

Die Untersuchungen zeigten, dass die Ablagerungs- und Einregelungsmuster überwiegend auf biostratinomische Vorgänge resultieren, die durch hydrodynamische Aktivitäten innerhalb

des Untersuchungsgebietes hervorgerufen wurden. Darüber hinaus wurde der Nachweis erbracht, dass neben den biostratinomischen Prozessen auch die ansteigende Morphologie der Schill-Vorkommen einen bedeutenden Einfluss auf die Klappenanordnungen und deren Position auf der Oberfläche hat. Durch die leichte Hangneigung wurde die hydrodynamische Wirkungsgrenze des Wassers während der Tidenzyklen beeinflusst, was sich wiederum auf die hydrodynamischen- und biostratinomischen Prozesse auswirkte.

Während im zweiten Kapitel auf die Lagerungszustände sowie auf die Genese-Prozesse innerhalb der Schill-Vorkommen eingegangen wurde, soll im folgenden Abschnitt die Taphonomie der *M. arenaria* Schalen untersucht werden. Für die taphonomischen Analysen wurde das Fedderwarder und das Sahlenburger Vorkommen innerhalb des Arbeitsgebietes ausgewählt.

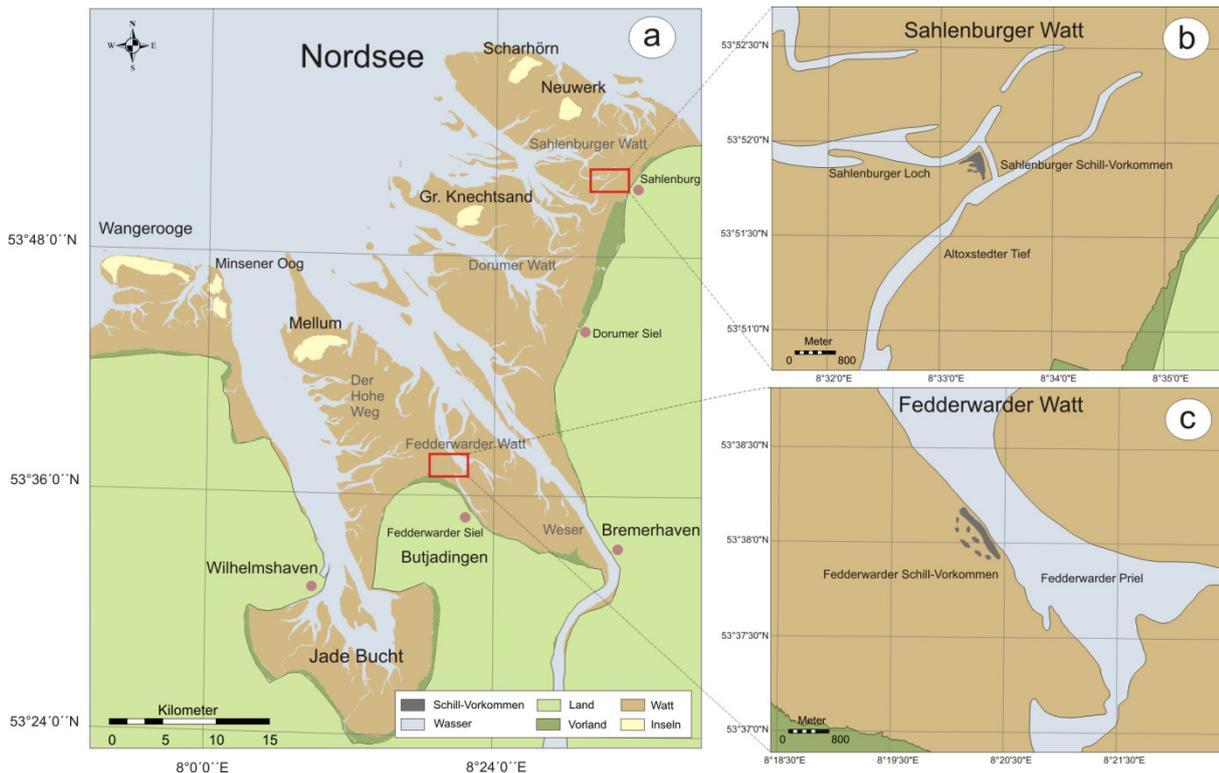
Ziel der Untersuchung ist es detaillierte Informationen über die taphonomische Beanspruchung der *M. arenaria* Schalen zu erhalten. Folgende Fragen sollten beantwortet werden: (1) Gibt es Unterschiede innerhalb der Größenhäufigkeitsverteilung zwischen den ehemaligen Siedlungshorizonten und den eigentlichen Schill-Akkumulationen? (2) Kommt es zu Frachtsonderungen zwischen linken und rechten Klappenhälften? (3) In wie weit spielt die Schalengröße eine Rolle bei der taphonomischen Erhaltung?

Des Weiteren soll geprüft werden, ob es neben den bereits erwähnten strukturellen Oberflächenaufbau auch zu taphonomischen Unterschieden zwischen den unterschiedlichen Zonenbereichen kommt. Hierzu ergeben sich folgende Fragen: (4) Wie wirken sich die unterschiedlichen Lagerungsvariationen auf die taphonomische Erhaltung der Klappen aus? (5) Lassen sich Lagerungsvariationen mit Hilfe der taphonomischen Erhaltung voneinander differenzieren und (6) sind Unterschiede in der taphonomischen Beanspruchung zwischen beiden Lokationen festzustellen?

Als Auswertemethode wurde unter anderem eine semi-quantitative taphonomische Analyse angewandt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden graphisch sowohl in Balkendiagrammen als auch in ternären Abbildungen dargestellt. Es wurden Regressions- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Neben deskriptiven Häufigkeitsverteilungen wurden auch analytische, statistische Verfahren angewandt. Als quantitative, statistische Testmethoden wurden nichtparametrische Binomial-Tests und bivariate Korrelationen durchgeführt. Für eine Einbeziehung der taphonomischen Merkmale in eine multivariate Datenanalyse wurden ein hierarchisch agglomeratives Klassifikationsverfahren sowie eine multidimensionale Skalierung angewandt.

## Arbeitsgebiet

Die untersuchten Schill-Vorkommen liegen im zentralen Bereich der östlichen Deutschen Bucht innerhalb der niedersächsischen Wattenmeer-Region zwischen Jadebucht und Außenelbe (Abb. 3-1a). Für das Gebiet charakteristisch ist die tiefe Weser-Schiffahrtsstraße, großräumige von Prielen durchzogene Wattgebiete sowie die vorgelagerten großen Sandbank-Inseln Mellum, Knechtsand, Scharhörn und Neuwerk (für ausführliche Erläuterung s. Kap. 1).



**Abb. 3-1.** a) Arbeitsgebiet im eulitoralischen Gezeitenbereich der südöstlichen Deutschen Bucht. Rote Rechtecke markieren die Schill-Vorkommen. b) Sahlenburger Schill-Vorkommen. c) Fedderwarter Schill-Vorkommen.

## Schill-Vorkommen

Das im Arbeitsgebiet südlich gelegene Schill-Vorkommen (Fedderwarter Vorkommen) liegt innerhalb des Wattbereiches „Hohe Weg“ (Abb. 3-1a). Das Vorkommen ist 500 m lang, 30 m breit und verläuft bei Niedrigwasser in einer Nordwest-Südost Orientierung parallel zur Priel-Abbruchkante (auch Fedderwarter Prielkante genannt, Abb. 3-1c, Tafel 3-1 A & B). Die Fedderwarter Küstenlinie (Butjadingen) befindet sich in einer Entfernung von 2 km in südwestlicher Richtung.

Das nördlich gelegene Schill-Vorkommen befindet sich im Sahlenburger Wattgebiet (Sahlenburger Vorkommen, Abb. 3-1a). Die Schill-Bank ist 50 m lang, 30 m breit und erstreckt sich in einer Nordwest-Südost Orientierung zwischen den beiden Nebenprielen Sahlenburger Loch und Altoxstedter Tief (Abb. 3-1b, Tafel 3-1 C & D). Die Küstenlinie (mit dem Ort Sahlenburg) befindet sich in 2,7 km Entfernung. Die Sandbankinsel Neuwerk liegt in

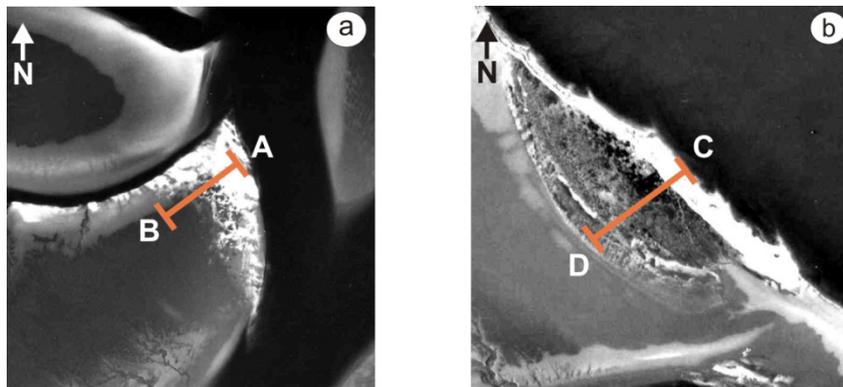


nordwestlicher Richtung ca. 6,6 km entfernt. Bedingt durch den täglichen Tidenzyklus fallen die untersuchten Schill-Vorkommen bei entsprechendem Niedrigwasser zweimal am Tag frei und ermöglicht eine relativ kurzzeitige Untersuchungsmöglichkeit. Bei Hochwasserstand werden die Bänke, je nach Abweichungen, von einer 2 bis 3 m hohen Wassersäule überdeckt. Der mittlere Tidenhub ist 3 bis 3,5 m und entspricht einem makrotidalen Gezeitenregime (nach Lassen & Siefert 1991).

## Material und Methoden

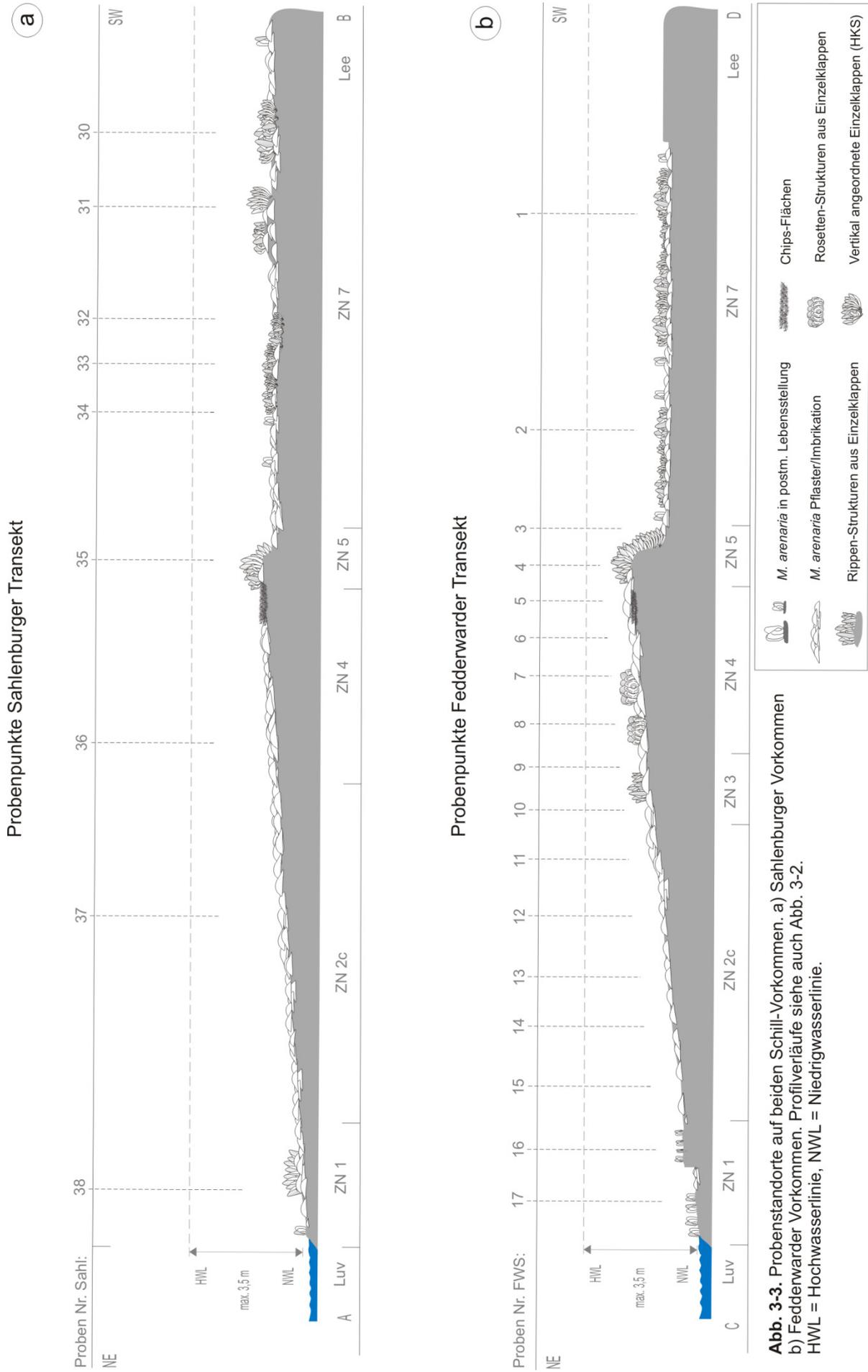
### Standorte und Probenentnahme

Die Probenentnahme am Sahlenburger Transekt erfolgte im März 2006 sowie am Fedderwarder Transekt im Mai 2006 jeweils zu extremen Niedrigwasserzeiten im intertidalen Gezeitenbereich des Sahlenburger- und Fedderwarder Wattgebietes. Insgesamt wurden 26 Einzelproben entlang zweier Oberflächenprofile (Fedderwarder Transekt mit 17 Proben und Sahlenburger Transsekt mit 9 Proben) genommen (Abb. 3-2a & b & Abb. 3-3a & b, Tafel 3-1 E & F). Beide Probenstranssekte wurden senkrecht zur jeweiligen morphologischen Länge der Schill-Vorkommen gelegt und hatten jeweils eine Nordost-Südwest Orientierung (Abb. 3-2a & b). Die Bezeichnungen der Probenpunkte erfolgt der Lokation entsprechend, so dass die Proben des Fedderwarder Vorkommen mit „FWS“ und die Sahlenburger Proben mit „Sahl“ bezeichnet werden (Abb. 3-3a & b).



**Abb. 3-2.** Luftbildvergrößerung mit Profilverlauf der beiden Transekte. Orientierung ist jeweils von Nordost nach Südwest. (a) Sahlenburger Transekt A-B. (b) Fedderwarder Transekt C-D.

Beprobt wurde die jeweilige Oberfläche auf den Schill-Vorkommen bis zu einer Tiefe von maximal 10 cm. Auf jedem Probenpunkt wurde mittig ein Zählrahmen (1 m<sup>2</sup>) platziert und je nach vorliegender Schalenkonzentration entweder  $\frac{1}{4}$  oder  $\frac{1}{2}$  m<sup>2</sup> des Schalenmaterials gesammelt. Der Abstand zwischen den einzelnen Probenpunkten variierte zwischen zwei und drei Meter und nahm im rückwärtigen Bereich der Schill-Vorkommen (Patch-Areale) zu (Abb. 3-3a & b). Die räumliche Verteilung der einzelnen Probenpunkte wurde durch eine GPS-Positionierung unterstützt. Die im vorderen Bereich des Fedderwarder Vorkommens anstehenden ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte (Schlickhorizonte) mit postmortalen Doppelklappen in Lebensstellung (s. auch Kap. 2) wurden ebenfalls mit einem Zählrahmen beprobt. Die Doppelklappen wurden dabei einzeln aus den Horizonten aufgesammelt. Vermessen und taphonomisch analysiert wurde hierbei jeweils nur die repräsentative linke Klappenhälfte (Proben FWS 16 & 17).



**Abb. 3-3.** Probenstandorte auf beiden Schilf-Vorkommen. a) Sahlburger Vorkommen  
 b) Federwarder Vorkommen. Profilverläufe siehe auch Abb. 3-2.  
 HWL = Hochwasserlinie, NWL = Niedrigwasserlinie.

### Probenbehandlung

Das gesamte Probenmaterial wurde mit Wasser gewaschen und von Sedimentresten befreit. Nach der Lufttrocknung wurden *M. arenaria* Einzelklappen die eine Schalenzerstörung von mehr als 50 % aufwiesen heraus sortiert. Der übriggebliebene Schalenbruch sowie die Klappen anderer Muschelarten wie z. B. *C. edule*, *M. balthica*, *M. edulis* wurden zusammen als Bruch- und Restanteil bezeichnet. Der Restanteil wurde gewogen und archiviert. Das Verhältnis zwischen ganzen *M. arenaria* Klappen und dem Bruch/Restanteil wurde in der vorliegenden Arbeit prozentual graphisch dargestellt (s. dazu auch Richter 1922, 1924; Lever 1958; Cadée 1992).

Um mit einer statistisch repräsentativen und handhabbare Probenmenge der *M. arenaria* Schalen zu arbeiten, erwies sich als vorteilhaft das Klappenmaterial aufzuteilen (splitten). Die Aufteilung der Proben erfolgte mittels eines selbstkonstruierten Probenteilers. Hierzu erfolgte eine vorsichtige Schüttung des Schalenmaterials in zwei Kartons auf dem ein breiter Habtrichter montierte wurde, welcher in der Mitte eine Trennwand besaß. Beim hineinschütten wurde das Schalenmaterial infolge der Trichterhalbierung in zwei annähernd gleich große Probenteile gesplittet. Anschließend erfolgte eine getrennte Gewichtüberprüfung beider Teile, so dass ggf. eine Korrektur durch Ab- und Zugabe von Schalen erfolgte. War die Probenmenge zu hoch, so wurde die Probe ggf. geviertelt.

Von jeder Probe standen nach der Probenteilung noch bis zu ca. 100 Einzelklappen für die taphonomischen Untersuchung zur Verfügung. In jeder Probe wurden die *M. arenaria* Klappen gezählt, mit einer Nummer versehen sowie die maximale Länge, Höhe und Breite mittels digitaler Schieblehre auf den Millimeter genau gemessen. Die aufgenommenen Klappenlängen wurden in einem Abstand von 0,5 cm in Größenklassen zusammengefasst, so dass eine Längenhäufigkeitsverteilung für jeden Transsekt erstellt werden konnte. Für die Proben aus den ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten (Probe FWS 16 & 17) wurde ebenfalls eine Längenhäufigkeitsverteilung, jedoch mit einem Abstand von 0,2 cm erstellt. Des Weiteren bestimmt wurde das Seitenverhältnis zwischen rechter und linker Klappenhälfte. Die hierbei angewandten statistischen Analysemethoden werden in einem weiter unten stehenden Abschnitt beschrieben.

### Taphonomische Analysemethoden

Bei der vorliegenden Arbeit wurden an den *M. arenaria* Klappen insgesamt fünf taphonomische Merkmale erfasst. Die taphonomischen Eigenschaften umfassen dabei die Abrasion, Fragmentation, Randerhaltung, Inkrustation sowie die Bioerosion. Jedes dieser taphonomischen Merkmale wurde in drei semi-quantitative, ordinal skalierte Erhaltungsgrade eingeteilt (z. B. nach Meldahl & Flessa 1990; Hallman et al. 1996; Kowalewski et al. 1994, 1995, 2003; Dominici 2004; Farinati et al. 2008).

Der taphonomische Grad (0) beschreibt hierbei den besten Erhaltungszustand einer Klappe (gut = keine taphonomische Beanspruchung) und weist keine mechanische oder biologische Beanspruchung auf. Der taphonomische Grad (1) beschreibt den mittleren

Erhaltungszustand (mittelmäßig) bei dem die Schalenoberfläche bzw. Schaleninnenseite mit weniger als 10 % betroffen ist. Der taphonomische Grad (2) umfasst den schlechtesten Erhaltungszustand einer Klappe (schlecht). Bei diesem Grad sind mehr als 10 % der Schalenoberfläche bzw. der Klappeninnenseite taphonomisch beansprucht worden. Es wurden insgesamt 3.996 *M. arenaria* Einzelklappen an 26 Proben untersucht. Eine differenzierte Betrachtung der Schalenaußen- und Innenseiten wurde nicht vorgenommen.

#### Klassifikation der taphonomischen Beschaffenheit

##### Abrasion:

Die Abrasion beschreibt den oberflächennahen Abrieb oder Abschleiß der Schalenaußen- und Innenseite durch im Wasser oder Wind enthaltene Feststoffe. Neben Sand kann auch feiner Muschelschill abschleifend wirkend. Bei der *M. arenaria* Klappe zeigt sich ein Abrieb dadurch aus, dass die vorhandenen Zuwachslinien der Schalenoberfläche angegriffen (abgeschliffen) sind oder gänzlich fehlen. An der Innenseite zeigen sich Abrasionserscheinungen besonders durch das Verblässen der Muskelabdrücke sowie der Sinus-Linie. Konnte an der Schale keine Beanspruchung durch Abschleiß festgestellt werden, so wurde der Grad (0) vergeben. Waren die Zuwachslinien der Schalenoberfläche oder die Muskelabdrücke noch erkennbar aber eindeutig beansprucht, so wurde der mittlere Grad (1) vergeben. Waren entweder die Zuwachslinien oder die Muskelabdrücke nicht mehr zu erkennen wurde der schlechteste Grad (2) vergeben.

##### Fragmentation:

Die Fragmentation beschreibt hier den Abbruch an einer Klappe bzw. die mechanische Zertrümmerung die eindeutig über eine Beschädigung des Schalenrandes hinaus geht. Eine qualitative Unterscheidung von einzelnen Bruchstücken wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt.

Konnte an der Schale keine Beanspruchung festgestellt werden, wurde der Grad (0) vergeben. War die Beschädigung unter 10 % so wurde der mittlere Grad (1) vergeben. Waren mehr als 10 % der Einzelklappe durch Fragmentation beansprucht wurde der schlechteste Grad (2) vergeben.

##### Randerhaltung:

Die Randerhaltung beschreibt den Erhaltungszustand des äußeren Schalenrandbereiches und verdeutlicht hochauflösender die minimale mechanische Beanspruchung gegenüber der größeren Fragmentation. Es erfolgte eine qualitative Unterscheidung der Randerhaltung. Wurde keine Beanspruchung festgestellt, wurde der taphonomische Grad (0) vergeben. War

der Schalenrand glatt und wies nur vereinzelte Zacken (Abbruchkanten) auf, so wurde der mittlere Grad (1) vergeben. Konnten die Abbruchkanten deutlich mit den Fingern gespürt und visuell wahrgenommen werden, wurde der schlechteste Grad (2) vergeben.

Inkrustation:

Mit der Inkrustation wurde der Bewuchs/Befall der Schalenoberfläche (innen und außen) mit inkrustierenden Organismen erfasst. Hierzu zählen Organismen mit harter Haftung auf der Schale z. B. Balaniden, Bryozoen und mit weicher Haftung beispielsweise kleinere Austern und Reste von Byssusfäden der *M. edulis*. Ferner wurden auch Algen (z. B. Diatomeen) dokumentiert. Auch wurden noch vorhandene Besiedlungsabdrücke (z. B. Panzerplatten von Balaniden) als Inkrustationserscheinungen bezeichnet. Wurde kein Aufwuchs/Bewuchs festgestellt, so wurde der taphonomische Grad (0) vergeben. War die Inkrustation unter 10 % so wurde der mittlere Grad vergeben (1). Waren mehr als 10 % der Schalenoberfläche bewachsen oder befallen wurde der taphonomische Grad (2) vergeben.

Bioerosion:

Als Bioerosion werden Beschädigungen bezeichnet, die durch Polycheten, Gastropoden, Bohrmuscheln oder anderen makroskopischen Organismen verursacht wurden. Konnte keine Bioerosion festgestellt werden, wurde der Beanspruchungsgrad (0) vergeben. Waren leichte Beschädigungen durch Organismen vorhanden wurde der mittlere Grad (1) vergeben. War die Bioerosion auffällig vorhanden wurde der Erhaltungsgrad schlecht (2) vergeben.

### **Taphonomische Analyse**

Die Ergebnisse der taphonomischen Untersuchung wurde in ternären Diagrammen (auch Dreiecksdiagramme, Taphogramme) graphisch aufgetragen (z. B. nach Kowalewski et al. 1995; Kidwell et al. 2001; Dominici 2004; Farinati et al. 2008). Die jeweiligen Grade jedes taphonomischen Merkmales wurden für die Darstellungen in Prozentanteilen umgerechnet. Alle taphonomischen Merkmale wurden jeweils als arithmetisches Mittel in einem ternären Diagramm aufgetragen. Zusätzlich wurden alle Merkmale zu einem gesamten taphonomischen Grad zusammengefasst und ebenfalls in einem entsprechenden Taphogramm dargestellt.

Ergänzend zu den ternären Diagrammen wurden die Ergebnisse der taphonomischen Untersuchungen Profilgetreu (Transsektgetreu) dargestellt. Hierzu wurden alle fünf aufgenommenen Merkmale nach Probennummern sowie gegen die jeweiligen Längenklassen innerhalb des jeweiligen Transekts in zweiachsigen Balkendiagrammen dargestellt.

## Statistische Auswerteverfahren

Wie bereits eingangs erwähnt wurde eine Probenaufteilung durchgeführt, um mit einer statistisch repräsentativen und handhabbaren Probenmenge arbeiten zu können. Von jeder Probe standen nach dem Splitten noch ca. 100 Einzelklappen für die taphonomischen Untersuchung zur Verfügung.

## Deskriptive & analytische Statistik

Die aufgenommenen Klappenlängen wurden in einem Abstand von 0,5 cm in Größenklassen zusammengefasst, so dass eine Längenhäufigkeitsverteilung für jeden Transekt erstellt werden konnte. Für die Proben aus den ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten (FWS 16 & 17) wurden ebenfalls Längenhäufigkeitsverteilungen erstellt. Aufgrund ihrer nahezu gleichen Klappenlänge wurde ein geringerer Abstand von 0,2 cm gewählt.

Die Auswertung der metrischen Parameter wie Länge, Breite und Höhe der Klappen erfolgte durch Anwendung quantitativer statistischer Testmethoden. An beiden Transekten wurden die jeweiligen Proben mit dem Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung getestet. Der Test auf Normalverteilung entschied über die Auswahl des entsprechenden Korrelationskoeffizienten ( $r$ ). Bei einer Normalverteilung wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson, bei nicht normalverteilten der Koeffizient nach Spearman verwendet. Die Korrelationen zwischen den metrisch skalierten Längenklassen und den entsprechenden ordinal skalierten taphonomischen Mittelwerten wurden nach Pearson durchgeführt. Konnte die Vermutung einer Normalverteilung der Klappenlängen innerhalb eines Transektes nicht aufrechterhalten werden, wurde zur Bestimmung signifikanter Unterschiede zwischen den einzelnen Probenpunkten der H-Test nach Kruskal und Wallis angewandt.

Im Falle einer bestehenden Normalverteilung der Klappenlängen wurde ein Mittelwertvergleich (One-Way ANOVA) mit anschließenden Post-Hoc-Tests durchgeführt (hier nach Scheffé), um signifikante Unterschiede innerhalb der Probenpunkte feststellen zu können.

Um eventuelle Beziehungen zwischen Schalengröße (Längensklasse) und taphonomischen Merkmalen nachzuweisen wurden graphische Korrelations- bzw. Regressionsanalysen durchgeführt. Mit Anwendung der bivariaten Korrelation wurde die jeweilige Stärke dieser Beziehung (Abhängigkeit) zwischen den einzelnen taphonomischen Merkmalen (Abrasion, Inkrustation etc.) und der Längensklassen herausgearbeitet.

Das Klappenverhältnis beider Transekte zwischen rechter und linker Klappe wurde mit Binomial-Tests analysiert. Hierbei wurde die Nullhypothese angenommen, dass die Klappenverhältnisse in jeder Probe gleich ausgeglichen (also 50:50) sind (s. dazu auch Cadée 1992, 1994a; Kowalewski et al. 1994). Das Verhältnis zwischen ganzen *M. arenaria* Klappen und Bruch/Restanteil wurde wie bereits oben erwähnt hierbei nur prozentual graphisch dargestellt. Folgende Programme wurden für die statistischen Auswertungen eingesetzt: PRIMER 5 (Plymouth Marine Laboratory), SPSS 11 (SPSS Inc., Chicago, USA) und SigmaPlot 9 (SysStat Software Inc.).

## **Multivariate Methoden**

Für die multivariate Datenanalyse wurden zwei verschiedene Methoden angewandt. Als erste Methode wurde ein hierarchisch agglomeratives Klassifikationsverfahren (auch Clusteranalyse (CA) genannt) angewendet. Bei der zweiten Methode handelte es sich um ein nicht-metrische, multidimensionale Skalierung (nMDS, üblicherweise auch nur MDS genannt, Kruskal & Wish 1978). Bei beiden Methoden fungieren Klassifikations- und Ordinationsverfahren als „Struktur-entdeckende Verfahren“. Beide Verfahren erfolgten jeweils von derselben Datenmatrix aus. Für detaillierte Ausführungen siehe auch Shi (1993). Als Variablen dienten hierbei vier der fünf aufgenommenen taphonomischen Merkmale (Abrasion, Fragmentation, Inkrustation, Randerhaltung). Die Bioerosion wurde nicht miteinbezogen (s. dazu Ergebnisse im diesem Kapitel). Die signifikanten Unterschiede zwischen den Probenpunkten wurden mit den PRIMER Prozeduren ANOSIM (Analysis of Similarity) und SIMPER (Similarity percentage) durchgeführt.

Bei den angewendeten multivariaten Analyseverfahren kann die gesamte Komplexität innerhalb eines Transektes untersucht werden, ohne eine starke Reduktion der Ausgangsdaten anwenden zu müssen.

### **Gruppenanalyse (Clusteranalyse CA)**

Die Gruppenanalyse ist ein Klassifikationsverfahren mit dem Ziel aus einer heterogenen Grundgesamtheit (hier die Probenpunkte) Klassen zu bilden, die auf der Ähnlichkeit bzw. Distanzmaß der Proben in Bezug auf deren Merkmale basieren. Die Grundlage der hier durchgeführten Gruppierung (Gruppenbildung) war eine Distanzmatrix. Da auch eine Distanz letztendlich zur Beurteilung einer Ähnlichkeit genutzt werden kann, ist der Unterschied zwischen den Matrixarten (Ähnlichkeit- oder Distanz) hierbei nicht relevant.

Ausgangsdaten für die gebildeten Gruppendarstellungen der einzelnen Punkte bzw. Transekte war ein Überführen der Rohdatenmatrix in eine Distanzmatrix. Hierzu wurden von den Variablen (taphonomische Merkmale) Abrasion, Inkrustation, Fragmentation und Randerhaltung (Bioerosion wurde hierbei nicht berücksichtigt) die Prozentanteile der Grade (0, 1, 2) ermittelt. Zu Verdeutlichung soll an dieser Stelle ein kurzes Beispiel anhand der Probe FWS 1 (für Abrasion) gegeben werden.

Beispiel der Abrasion an Probe FWS1:

Der Anteil an Klappen die einen taphonomischen Grad (0) erhielten betrug 11,69 %. Der Anteil an Klappen mit einem Grad (1) betrug 53,21 % und 35,1 % der Klappen erhielten den Grad (2). Diese prozentuale Aufteilung ermöglichte einen detaillierteren Vergleich der einzelnen Probenpunkte innerhalb eines Transekts.

Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungsfaktoren wurde für den multivariaten Vergleich zwischen den beiden Transekten der arithmetische Mittelwert der Gesamttaphonomie als Ausgangsdatensatz verwendet. Als Abstandsmaß diente hierbei die



Euklidische Distanz, die sich besonders bei taphonomischen und paläontologischen Fragestellungen in der Vergangenheit bereits bewährt hat (z. B. Kowalewski et al 1994; Caracuel et al. 2005). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Klassen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Mittels einer hierarchischen agglomerativen Gruppenmethode wurden die berechneten Distanzen in ein Dendrogramm überführt. Als Abstandsmaß zwischen den einzelnen Gruppen wurde nach mehreren Tests in PRIMER das Verfahren „complete linkage“ (entferntester Nachbar) gewählt, bei dem der Abstand zweier Gruppen gleich dem maximalen Abstand zweier Probenpunkte aus je einer Gruppe ist.

Die Ordinate des Dendrogramms bezeichnet die einzelnen Probenpunkte innerhalb des jeweiligen Transektes, die Abszisse das Distanz- bzw. Ähnlichkeitsniveau.

Ziel der Analyse ist es also die Probenpunkte des jeweiligen Transektes bzgl. ihrer ermittelten Taphonomie zu ähnlichen Gruppen zusammenzufassen. Ein Nachteil dieser Gruppenbildung in diskrete Cluster ist, dass Informationen über die Beziehung zwischen einzelnen Gruppen oftmals nicht deutlich herausgearbeitet werden können (Clarke & Warwick 2001). Aus diesem Grund wurden neben der Clusteranalyse noch die multidimensionale Skalierung als multivariates Verfahren angewandt.

### **Multidimensionale Skalierung (MDS)**

Das Ordinationsverfahren der multidimensionalen Skalierung (Kruskal & Wish 1978) basiert ebenso wie die Clusteranalyse auf der ermittelten Ausgangsmatrix. Den einzelnen Distanzmaßen werden Ränge zugewiesen, anhand derer alle Probenpunkte innerhalb eines multidimensionalen Raums zueinander in Beziehung gesetzt werden. Diese Matrix ermöglicht es die Proben in einem mehrdimensionalen Raum so anzuordnen, dass ihre relative Distanz zueinander die Ähnlichkeit der Proben widerspiegelt. Mit Hilfe der MDS wird also eine zweidimensionale Abbildung dieser Distanzmatrix erstellt. Folglich liegen bei dieser Darstellung ähnliche Proben nahe beieinander und weniger ähnliche weiter voneinander entfernt. Als Maß für die Genauigkeit bzw. Anpassungsgüte mit der die vieldimensionale Matrix in eine zweidimensionale Darstellung überführt wird, dient der Stress-Faktor. Dieser Faktor errechnet sich aus dem sogenannten Shepard-Diagramm, in dem die Abstände aus der Ordinationsgrafik über den Distanzen der zugrundeliegenden Matrix aufgetragen werden. An diesen Scatter Plot wird eine nicht-metrische Regressionslinie gelegt. Der Stress-Wert gibt den Grad der Übereinstimmung dieser Regressionslinie mit den Punkten im Plot wieder. Gesucht wird diejenige Konfiguration, bei dem der Stress-Faktor einen möglichst niedrigen Wert annimmt. Je kleiner dieser Wert ist, umso besser gibt die zweidimensionale Darstellung des MDS-Plots die taphonomischen Ähnlichkeiten wieder (Clarke 1993).

## **ANOSIM und SIMPER Prozeduren**

### ANOSIM

Für einen Test auf signifikante Unterschiede innerhalb der Probenpunkte und zwischen den beiden Transekten wurde das im PRIMER enthaltene ANOSIM-Verfahren verwendet. ANOSIM ist ein multivariater Permutationstest, der sozusagen ein verteilungsfreies Analogon der multiplen Varianzanalyse (ANOVA) ist. Dieser Test wurde speziell zur Analyse von Ähnlichkeitsmatrizen entwickelt (Clarke & Green 1988) und erlaubt einen Vergleich von zwei oder mehreren Gruppen. Der Test basiert auf den Rängen der zugrundeliegenden Distanzmatrix. Die Definition dieser Gruppen muss jedoch *a priori* erfolgen. Die zu testende Null-Hypothese ist, ob die vorab bestimmten Gruppen einer Grundgesamtheit angehören (Nullhypothese = es existieren keine Unterscheide zwischen den gewählten Gruppen). Hierzu wird die mittlere Rangähnlichkeit der Probenpunkte innerhalb einer Gruppe errechnet und ins Verhältnis zur mittleren Rangähnlichkeit der Proben zwischen den Gruppen gesetzt. Die von PRIMER durchgeführte Berechnung erfolgt dabei nach Clarke & Warwick (2001).

Für die Beurteilung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die höchste Ähnlichkeit mit  $R = 1$  bewertet wird. Der R-Wert liegt dabei immer zwischen  $[-1; 1]$  und  $R$  wäre dann 1, wenn nur Ähnlichkeiten innerhalb, aber nicht zwischen den Gruppen existieren, d. h. sich die Gruppen vollkommen unterscheiden würden. Wenn  $R$  annähernd 0 ist, wird die Nullhypothese angenommen. In der Praxis nimmt  $R$  einen Wert zwischen 0 und 1 an, da sich Werte kleiner 0 nur dann ergeben, wenn eine nicht sinnvolle Gruppierung gewählt wurde.

PRIMER führt paarweise Permutationstests zwischen den bestimmten Gruppen aus, so dass alle möglichen Kombinationen der Gruppen miteinander verglichen werden. PRIMER berechnet das Signifikanzniveau für  $R$ , indem es die Verteilung der  $R$ -Werte betrachtet. Wenn  $R$  genau so groß oder größer ist als der beobachtete Wert, entspricht das dem Signifikanzniveau auf dem die Nullhypothese abgelehnt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde die ANOSIM als Testmethode zur Überprüfung der Cluster- und MDS- Ergebnisse verwendet, da diese Methode laut Lozán & Kausch (2004) zuverlässiger und effizienter als beispielweise ein univariater U-Median Test ist.

### SIMPER

Mit der SIMPER Prozedur kann PRIMER die mit Cluster- und MDS- Analysen gefundenen Klassen noch daraufhin untersuchen, mit welchem Anteil bestimmte in den Klassen enthaltene Variablen zu einer Ähnlichkeit innerhalb der Klassen und zu einer Unähnlichkeit zwischen den Klassen beigetragen haben.

Die Angabe des Anteils erfolgt jeweils in Prozent (SIMPER = similarity percentage-Ähnlichkeitsprozentanteil). Diese Programm-Option wurde genutzt, um zu untersuchen, welches taphonomische Merkmal innerhalb der einzelnen Klassen typische Charakter-Merkmale waren und welche zu einer Unterscheidung der Klassen in besonderem Maße beitrugen.

## Ergebnisse

### Beschreibung der Schill-Vorkommen

#### Fedderwarder Vorkommen

Das Fedderwarder Schill-Vorkommen befindet sich im südlichen Arbeitsgebiet südwestlich der Wesermündung auf den Wattflächen des „Hohe Weg“. Die Butjadinger Küstenlinie erstreckt sich in einer Entfernung von ca. 2 km in südwestlicher Richtung. Der kleine Hafentort Fedderwarder Siel liegt ca. 3,5 km südöstlich der Schill-Lokation (Abb. 3-1a). Das Fedderwarder Vorkommen war während des Untersuchungszeitraumes ca. 500 m lang und ca. 30 m breit. Zu Niedrigwasserzeiten verlief die Bankmorphologie in einer Nordwest-Südost Orientierung parallel zum Fedderwarder Hauptpriel und grenzte unmittelbar an dessen Priel-Abbruchkante an (Abb. 3-1c & Abb. 3-2b). Das Vorkommen ragte bei Niedrigwasser ausgehend von der Prielkante leicht ansteigend zur Küstenseite hin hervor (Tafel 3-1 A & Tafel 3-1 B). Unmittelbar hinter der Prielkante erfolgte ein ansteigen der Bankmorphologie in einem Neigungswinkel von anfangs 15° und erreichte auf der Hälfte der Bankoberfläche eine Steigung von 20° bis 30°. Die Priel-Abbruchkante wurde durch drei bis vier übereinander liegende, teilweise in der Fläche freierodierte *M. arenaria* Siedlungshorizonte gebildet (Tafel 3-2 A). In den parallel ausstreichenden Horizonten steckten *M. arenaria* Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Durch die Erosionsprozesse wurden verschieden alte *M. arenaria* Siedlungen freigelegt, so dass in jedem Horizont jeweils unterschiedliche Altersklassen der abgestorbenen Muscheln aufgefunden wurden. Die jungen *Mya*-Doppelklappen befanden sich in den hangenden, die deutlich größeren Doppelklappen wurden in den liegenden Siedlungshorizonten vorgefunden. Der hintere Saum des Schill-Vorkommens wurde durch eine ca. 0,6 m Hohe Abbruchkante gebildet. Der steil abfallende Steigungswinkel der Kante betrug zwischen 70° und 80°. Nach der Steilkante erfolgte abrupt ein Übergang in eine relativ ebene Wattoberfläche auf der sich eine flachausgebildete Schill-Fläche (Patch-Fläche) erstreckte. Die in küstenwertiger Richtung verlaufende Patch-Fläche erstreckte sich ca. 50 bis 100 m bevor bis sie an einer kleinen ca. 20 cm hohen Sandkante endete (s. dazu auch Abb. 3-3b).

#### Sahlenburger Vorkommen

Das im nördlichen Arbeitsgebiet gelegene kleinere Sahlenburger-Vorkommen befindet sich auf der Gezeitenfläche des Sahlenburger Wattgebietes. Die niedersächsische Küstenlinie mit dem kleinen Ort Sahlenburg liegt in einer Entfernung von ca. 2,5 km in nordöstlicher Richtung (Abb. 3-1a). Ebenfalls in Sichtweite befindet sich die nordwestlich der Lokation gelegene, etwa 2,5 km entfernte Insel Neuwerk. Zu Niedrigwasserzeiten erstreckte sich das Sahlenburger-Vorkommen in einer Nordwest-Südost Orientierung zwischen den beiden Randprieln Sahlenburger Loch und Altoxstedter Tief (Abb. 3-1b & Abb. 3-2a). Das Vorkommen konnte eine Länge von ca. 50 m und eine Breite von ca. 30 m erreichen (Tafel

3-1 C & D). Im Vergleich zur Fedderwarder Lokation erfolgte der morphologische Anstieg, ausgehend von der Prielkante, in einem deutlich flacheren Neigungswinkel von ca. 10° bis 15°. An der Prielkante befand sich im Vorfeld des Vorkommens nur noch ein reliktdisch erhaltener *M. arenaria* Siedlungshorizont der keine Doppelklappen führte. Der etwa 30 m von der Prielkante entfernte Saum mit der Abbruchkante war im Vergleich zu dem Fedderwarder-Vorkommen deutlich niedriger ausgebildet und erreichte während der Untersuchungszeit nur eine Höhe von ca. 0,2 m. Im Anschluss an dieser Kante erfolgte in südwestlicher Richtung ein Übergang in eine flachausgebildete Schill-Fläche (Patch-Flächen). Nach ca. 20 bis 30 m fanden sich innerhalb dieser Schill-Fläche zwei bis drei relativ neu entstandene, inselartig ausgebildete Schill-Flecken (Patch-Felder). Im Anschluss dieser Patch-Felder erstreckte sich ca. 60 m weit die flachausgebildete Schill-Fläche bis diese von in einer rein aus Sand bestehende Wattfläche überging (s. dazu auch Abb. 3-3a).

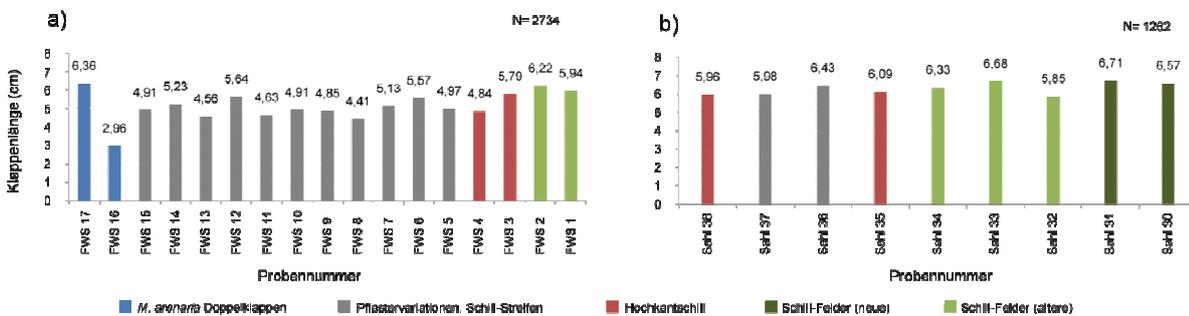
**Quantitative Auswertung der *M. arenaria* Einzelklappen (Klappendimensionen)**

Insgesamt wurden 3.996 *M. arenaria* Klappen im Zuge der Auswertungen vermessen und taphonomisch untersucht. Die jeweiligen Ergebnisse wurden mit quantitativen und qualitativen statistischen Testmethoden sowie mit multivariaten Analyseverfahren überprüft. (s. dazu Abschnitt Material & Methoden).

**Längenhäufigkeitsverteilungen**

Ehemalige *M. arenaria* Siedlungshorizonte (Probe FWS 16 & 17)

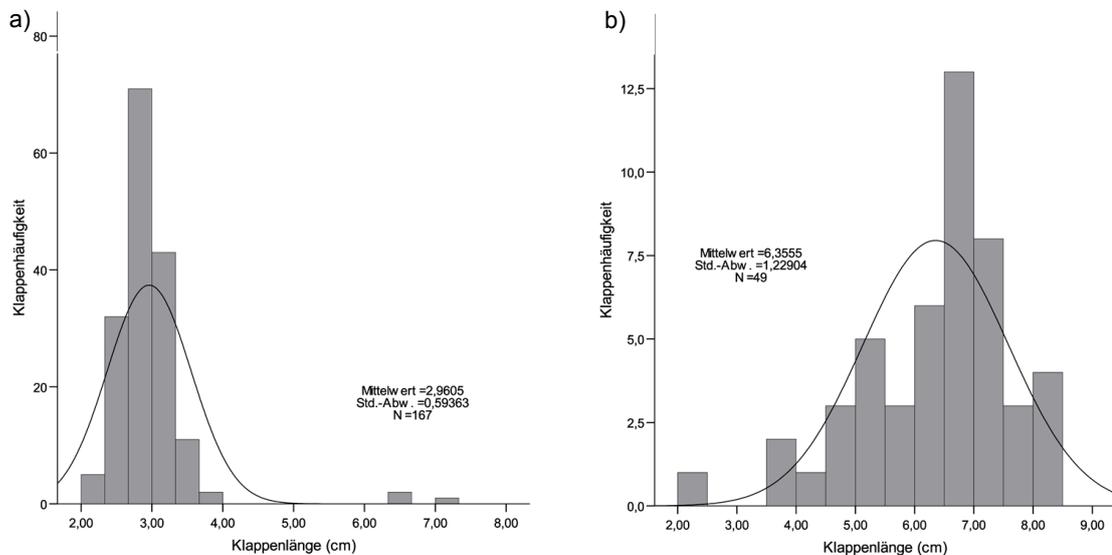
Die durchschnittliche Klappenlänge innerhalb der Probe FWS 16 beträgt 2,96 cm und reicht von 2,19 cm bis maximal 7,05 cm (s. auch Tab. 3-1a im Anhang). Insgesamt wurde an Probe FWS 16 im Mittel die kleinsten Klappenlängen gemessen (Abb. 3-4a). Eine Normalverteilung innerhalb dieser Probe liegt nicht vor (Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest;  $p < 0,05$ ; Tab. 3-1a).



**Abb. 3-4.** Mittelwerte der Klappenlängen jeder Probe. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlener Transekt.

Das Histogramm der Längenhäufigkeitsverteilung zeigt einen nichtnormalverteilten Kurvenverlauf an (Abb. 3-5a). Zudem besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der Größenhäufigkeitsverteilung der Probe FWS 16 und den übrigen Proben des Fedderwarder

Transektivs (Kolmogorov-Smirnov-2-Stichproben Z-Test und Mann-Whitney-Test, beide  $p < 0,001$ , s. auch Tab. 3-2a & b im Anhang).



**Abb. 3-5.** Histogramme der Längenhäufigkeitsverteilung innerhalb der *M. arenaria* Horizonte des Fedderwarder Transekts. (a) Probe FWS 16 mit einer nicht normalverteilten Längenhäufigkeit. (b) Probe FWS 17 mit einer normalverteilten Längenhäufigkeit.

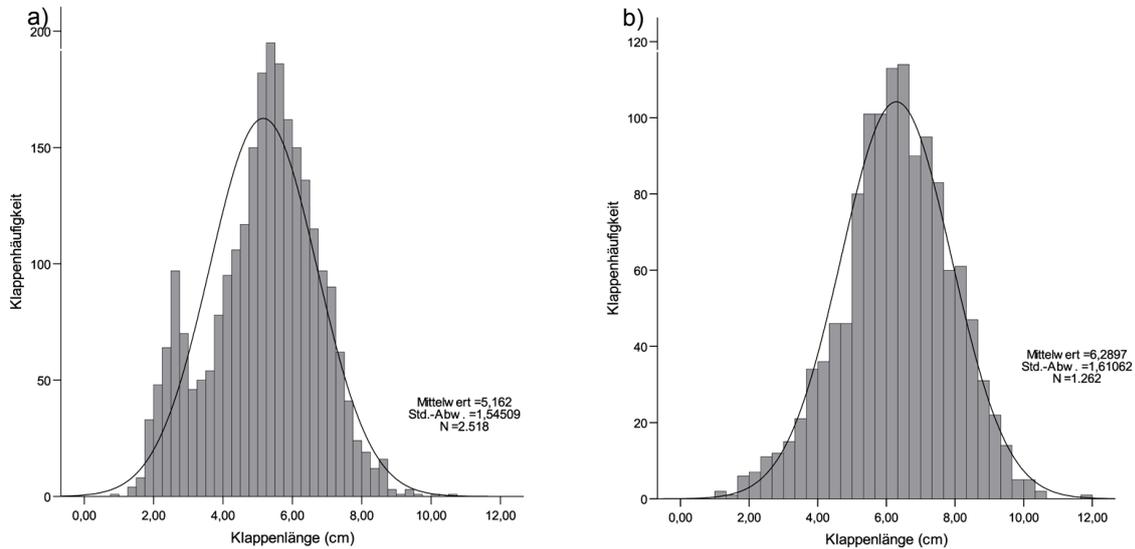
Die durchschnittliche Klappenlänge innerhalb der Probe FWS 17 beträgt 6,36 cm und reicht von 2,37 cm bis maximal 8,36 cm (Tab. 3-1b im Anhang). Insgesamt wurde an Probe FWS 17 im Mittel die längsten Klappen gemessen (Abb. 3-4a). Die Längenverteilung innerhalb dieser Probe ist mit  $p > 0,05$  hinreichend normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest; Tab. 3-1b im Anhang). Auch anhand des entsprechenden Histogramms kann ein normalverteilter Kurvenverlauf festgestellt werden (Abb. 3-5b). Zudem kann ein signifikanter Unterschied zwischen der Größenhäufigkeitsverteilung der Probe FWS 17 und dem Fedderwarder Transekt festgestellt werden (Kolmogorov-Smirnov-2-Stichproben Z-Test und Mann-Whitney-Test, beide  $p < 0,001$ , s. Tab 3-3a & b im Anhang).

Des Weiteren ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Größenhäufigkeitsverteilungen der Probe FWS 16 und Probe FWS 17 festzustellen (Kolmogorov-Smirnov-2-Stichproben Z-Test und Mann-Whitney-Test, beide  $p < 0,001$ , s. Tab. 3-4a & b im Anhang).

### Fedderwarder Transekt

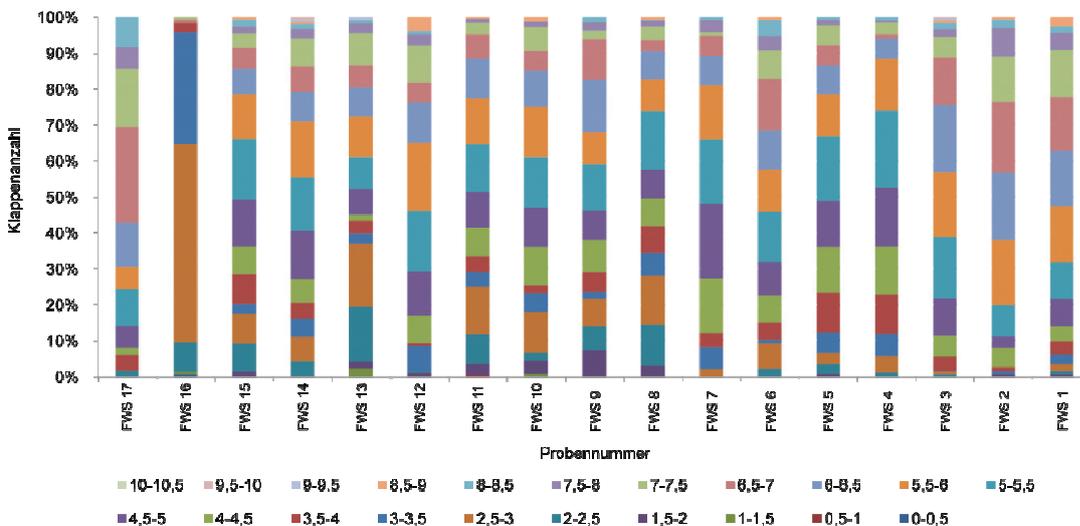
Innerhalb des Fedderwarder Transekts werden die *M. arenaria* Klappen in insgesamt 21 Längensklassen eingeteilt. Die durchschnittliche Klappenlänge beträgt dabei 5,16 cm und reicht von 0,85 cm bis maximal 10,51 cm (Abb. 3-4a, Tab. 3-5a im Anhang). Das entsprechende Histogramm der Längenhäufigkeitsverteilung in Abbildung 3-6a zeigt einen nicht normalverteilten, bimodalen Kurvenverlauf an (Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest,  $p < 0,05$ , s. auch Tab. 3-5a im Anhang). Außer der Probe FWS 16 (*Mya*-Horizont) ist die Längenverteilung drei weiterer Proben innerhalb des Transektes nichtnormalverteilt (Proben FWS 8, 11, 13). Bei den übrigen Probenpunkten kann dagegen eine Normalverteilung

festgestellt werden (Tab. 3-6b im Anhang). Da die Vermutung einer Normalverteilung der Klappenlängen innerhalb des Fedderwarder Transekts also nicht aufrechterhalten werden kann, wurde zur Bestimmung signifikanter Unterschiede zwischen den einzelnen Probenpunkten der H-Test nach Kruskal und Wallis angewandt. Der H-Test zeigt, dass sich lediglich die Probe FWS 16 signifikant ( $p < 0,001$ ) von allen anderen Proben des Transekts unterscheidet (Kruskal-Wallis-H-Test, Tab. 3-7 im Anhang).



**Abb. 3-6.** Histogramme der Längenhäufigkeitsverteilung innerhalb der Transekte. (a) Fedderwarder Transekt weist einen nicht normalverteilten, bimodalen Kurvenverlauf auf. (b) Sahlburger Transekt weist einen normalverteilten, unimodalen Kurvenverlauf auf.

Graphisch veranschaulicht ist dies auch bei der Darstellung der vorkommenden Längensklassen innerhalb der einzelnen Probenpunkte (Abb. 3-7). Wie aus der Abbildung 3-7 ersichtlich sind die Klappen der Längensklasse 2,5 bis 3 cm hauptsächlich in der Probe FWS 16 enthalten. Das entspricht genau der Größenklasse die vermehrt in den bereits o. a.



**Abb. 3-7.** Verteilung der 21 Längensklassen entlang des Fedderwarder Transekts.

nicht normalverteilten Proben FWS 8, 11 und 13 vorzufinden sind (s. auch Tab. 3-6b im Anhang). Auf Grund der nicht bestehenden Normalverteilung der Klappenlängen wurde eine

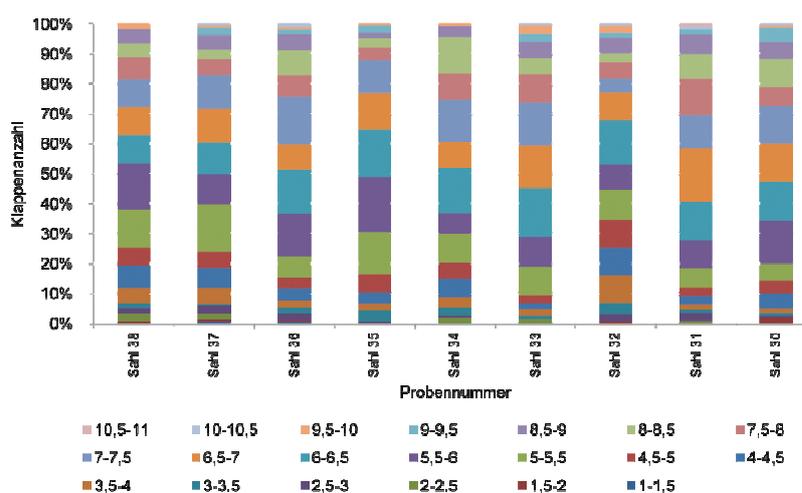
Korrelationsanalyse der Klappendimensionen nach Spearman durchgeführt. Die Ergebnisse können im Abschnitt „Regressions- und Korrelationsanalysen der Klappendimensionen“ entnommen werden (s. auch Tab. 3-8a).

### Sahlenburger Transekt

Innerhalb des Sahlenburger Transekts werden die *M. arenaria* Einzelklappen Klappen in insgesamt 20 Längenklassen eingeteilt. Die durchschnittliche Klappenlänge beträgt 6,29 cm und umfasst Klappenlängen von 1,04 cm bis maximal 11,97 cm Länge (Tab. 3-5b im Anhang, Abb. 3-4b). Das erstellte Histogramm der Längenhäufigkeitsverteilung in Abbildung 3-6b zeigt einen hinreichend normalverteilten, unimodalen Kurvenverlauf an (Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest,  $p > 0,05$ , s. auch Tab. 3-6a im Anhang). Aufgrund der festgestellten Normalverteilung wurde eine ANOVA durchgeführt (s. Tab. 3-9b & c im Anhang).

Der Levene-Test zur Prüfung auf Gleichheit der Varianzen ergibt einen signifikanten Wert von  $P = 0,005$  (Tab. 3-9a im Anhang). Neben der bestehenden Normalverteilung liegt innerhalb des Sahlenburger Transekts also eine Varianzhomogenität vor. Aus diesem Grund wurden für die statistischen Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Post-Hoc-Tests nach Scheffé angewandt (s. Tab 3-10 im Anhang).

Die ANOVA zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen der Probe Sahl 32 und den jeweils angrenzenden Probenpunkten Sahl 31 und Sahl 33 ( $P < 0,05$ , s. auch Tab. 3-10 im Anhang). Graphisch veranschaulicht wird dieses Ergebnis ebenfalls bei der Darstellung der vorkommenden Längenklassen innerhalb der einzelnen Probenpunkte (Abb. 3-8). In Probe Sahl 32 kann im Vergleich zu den anderen Proben ein erhöhter Anteil der Größenklasse 3,5 bis 4 cm festgestellt werden.



**Abb. 3-8.** Verteilung der 20 Längenklassen entlang des Sahlenburger Transekts.

Aufgrund der Normalverteilung innerhalb des Transekts wurde eine Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt (s. auch Tab. 3-8b). Die Ergebnisse können dem

Abschnitt „Regressions- und Korrelationsanalysen der Klappendimensionen“ entnommen werden.

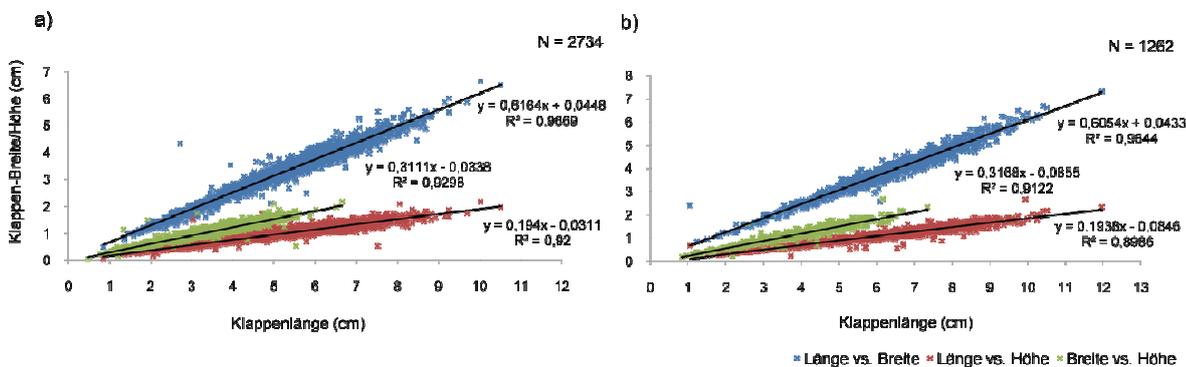
Fedderwarder Transekt vs. Sahlenburger Transekt

Beim direkten Vergleich der Längenhäufigkeitsverteilung beider Transekte kann ein signifikanter Unterschied zwischen der Längenzusammensetzung der Klappen festgestellt werden (Kolmogorov-Smirnov-2-Stichproben und Mann-Whitney-Test, beide  $P < 0,001$ , s. Tab. 3-11a & b im Anhang).

**Die Klappendimensionen**

Graphische Regressions- und Korrelationsanalyse

Die an beiden Transekten durchgeführten graphischen Korrelationsanalysen ergeben einen sehr hohen linearen Zusammenhang zwischen der Schalenlänge und der Schalenhöhe bzw. Schalenbreite der Einzelklappen. Die Regressionskoeffizienten liegen bei allen Vergleichen deutlich über einen Wert von  $R^2 = 0,9$  (Abb. 3-9a & b).



**Abb. 3-9.** Graphische Korrelationen der Klappendimensionen. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.  $R^2$  gibt den Regressionskoeffizienten an.

Bivariate Korrelationen

Die Ergebnisse der Bivariaten Korrelation zeigen für beide Transekte eine sehr starke Beziehung zwischen den einzelnen Klappendimensionen. Die jeweiligen Korrelationskoeffizienten liegen nicht unter  $r = 0,9$  und sind mit einem  $p < 0,001$  zweiseitig signifikant (s. auch Tab. 3-8a & b).



**Tab. 3-8a.** Korrelation der Klappendimensionen nach Spearman für das Fedderwarder Transekt.

Spearman	Länge	Breite	Höhe	N = 2734
<b>Länge</b>	1	0,980**	0,951**	<b>r</b>
	.	0,000	0,000	<b>p</b>
<b>Breite</b>	0,980**	1	0,959**	<b>r</b>
	0,000	.	0,000	<b>p</b>
<b>Höhe</b>	0,951**	0,959**	1	<b>r</b>
	0,000	0,000	.	<b>p</b>

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).  
r = Korrelationskoeffizient

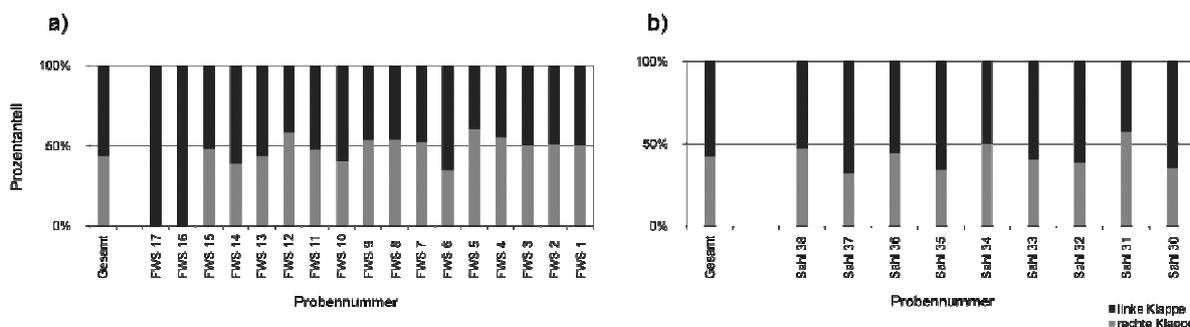
**Tab. 3-8b.** Korrelation der Klappendimensionen nach Pearson für das Sahlenburger Transekt.

Pearson	Länge	Breite	Höhe	N = 1262
<b>Länge</b>	1	0,982**	0,948**	<b>r</b>
	.	0,000	0,000	<b>p</b>
<b>Breite</b>	0,982**	1	0,955**	<b>r</b>
	0,000	.	0,000	<b>p</b>
<b>Höhe</b>	0,948**	0,955**	1	<b>r</b>
	0,000	0,000	.	<b>p</b>

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).  
r = Korrelationskoeffizient

### Verhältnisse zwischen rechter und linker Klappenhälfte

Die Klappenverhältnisse zwischen rechter und linker Schale innerhalb der einzelnen Probenpunkte sind in Abbildung 3-10a & b graphisch dargestellt. Es wird die Nullhypothese aufgestellt, dass die Klappenverhältnisse entlang beider Transekte sowie in jeder Probe zu gleichen Teilen ausgeglichen ist (also 50:50). Die Ergebnisse der Binomial-Tests können jeweils der Tabelle 3-12 & 3-13 entnommen werden.



**Abb. 3-10.** Verhältnisse zwischen rechter und linker *M. arenaria* Klappenhälfte entlang der Transekte. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.

Fedderwarder Transekt

Das Gesamt-Klappenverhältnis zwischen rechten und linken Klappen ist beim Fedderwarder Transekt mit einem Anteil von 49,2 % zu 50,8 % insgesamt ausgeglichen, so dass die aufgestellte Hypothese des gleichwertigen Verhältnisses für das gesamte Transekt nicht verworfen werden kann und kein Unterschied diesbezüglich festzustellen ist ( $p > 0,05$ , ohne Proben FWS 16 & 17, da nur linke Klappen).

**Tab. 3-12.** Test auf Binomialverteilung Fedderwarder Transekt (\*).

Proben Nr.	Klappenseite	Anzahl N	Beobachteter Anteil	Testanteil	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
<b>FWS 1</b>	Linke	81	0,500	0,5	1,0000
	Rechte	81	0,500		
<b>FWS 2</b>	Linke	87	0,509	0,5	0,8785
	Rechte	84	0,491		
<b>FWS 3</b>	Linke	150	0,498	0,5	1,0000
	Rechte	151	0,502		
<b>FWS 4</b>	Linke	105	0,553	0,5	0,1679
	Rechte	85	0,447		
<b>FWS 5</b>	Linke	82	0,607	0,5	0,0156
	Rechte	53	0,393		
<b>FWS 6</b>	Linke	41	0,347	0,5	0,0012
	Rechte	77	0,653		
<b>FWS 7</b>	Linke	63	0,521	0,5	0,7163
	Rechte	58	0,479		
<b>FWS 8</b>	Linke	148	0,540	0,5	0,2045
	Rechte	126	0,460		
<b>FWS 9</b>	Linke	72	0,537	0,5	0,4370
	Rechte	62	0,463		
<b>FWS 10</b>	Linke	60	0,403	0,5	0,0215
	Rechte	89	0,597		
<b>FWS 11</b>	Linke	111	0,474	0,5	0,4722
	Rechte	123	0,526		
<b>FWS 12</b>	Linke	62	0,585	0,5	0,0982
	Rechte	44	0,415		
<b>FWS 13</b>	Linke	49	0,434	0,5	0,1876
	Rechte	64	0,566		
<b>FWS 14</b>	Linke	60	0,387	0,5	0,0061
	Rechte	95	0,613		
<b>FWS 15</b>	Linke	75	0,484	0,5	0,7481
	Rechte	80	0,516		
<b>FWS 16</b>	Linke	167	1,000	0,5	0,0000
	Rechte	0	0,000		
<b>FWS 17</b>	Linke	49	1,000	0,5	0,0000
	Rechte	0	0,000		
<b>Transekt</b>	Linke	1246	0,495	0,5	0,6183
<b>Gesamt</b>	Rechte	1272	0,505		

\* Hypothese (50:50) wird verworfen wenn  $p \leq 0,05$

Bei Betrachtung der einzelnen Proben kann jedoch an vier Probenpunkten aufgrund der nachgewiesenen Signifikanz ( $p < 0,05$ ) die Hypothese der Gleichverteilung verworfen werden (FWS 5, 6, 10 und 14). In der Proben FWS 5 überwiegen mit einem signifikanten Anteil von 60,7 % die linken Klappenhälften ( $p < 0,05$ ). In der unmittelbar angrenzenden Probe FWS 6 überwiegen demgegenüber sehr signifikant die rechten Klappenhälften mit 65,3 % ( $p < 0,01$ ). Mit einem prozentualen Anteil von 59,7 % in Probe FWS 10 und mit 61,3 % in Probe FWS 14 überwiegen signifikant auch in diesen beiden Probenpunkten die rechten Klappenhälften gegenüber den linken Schalenseiten ( $p < 0,05$ , s. auch Tab. 3-12).

### Sahlenburger Transekt

Beim Sahlenburger Transekt überwiegen mit einem Anteil von 57,8 % zu 41,3 % die rechten Klappenhälften, so dass die Hypothese der Gesamtklappenverteilung höchst signifikant verworfen werden kann und ein Unterschied festzustellen ist ( $p < 0,001$ ). Nur bei vier Probenpunkten trifft die vermutete Hypothese einer ausgeglichenen Schalenverteilung zu (Proben Sahl 31, 34, 36, 38). In den Proben Sahl 30, 32, 33, 35 und 37 überwiegen signifikant die linken Klappen gegenüber den rechten Schalenhälften (s. Tab. 3-13).

**Tab. 3-13.** Test auf Binomialverteilung Sahlenburger Transekt (\*).

Proben Nr.	Klappenseite	Anzahl N	Beobachteter Anteil	Testanteil	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
<b>Sahl 30</b>	Linke	103	0,644	0,5	0,0003
	Rechte	57	0,356		
<b>Sahl 31</b>	Linke	46	0,426	0,5	0,1486
	Rechte	62	0,574		
<b>Sahl 32</b>	Linke	80	0,615	0,5	0,0107
	Rechte	50	0,385		
<b>Sahl 33</b>	Linke	88	0,595	0,5	0,0261
	Rechte	60	0,405		
<b>Sahl 34</b>	Linke	57	0,500	0,5	1,0000
	Rechte	57	0,500		
<b>Sahl 35</b>	Linke	108	0,659	0,5	0,0001
	Rechte	56	0,341		
<b>Sahl 36</b>	Linke	94	0,556	0,5	0,1660
	Rechte	75	0,444		
<b>Sahl 37</b>	Linke	103	0,682	0,5	0,0000
	Rechte	48	0,318		
<b>Sahl 38</b>	Linke	62	0,525	0,5	0,6455
	Rechte	56	0,475		
<b>Transekt Gesamt</b>	Linke	741	0,587	0,5	0,0000
	Rechte	521	0,413		

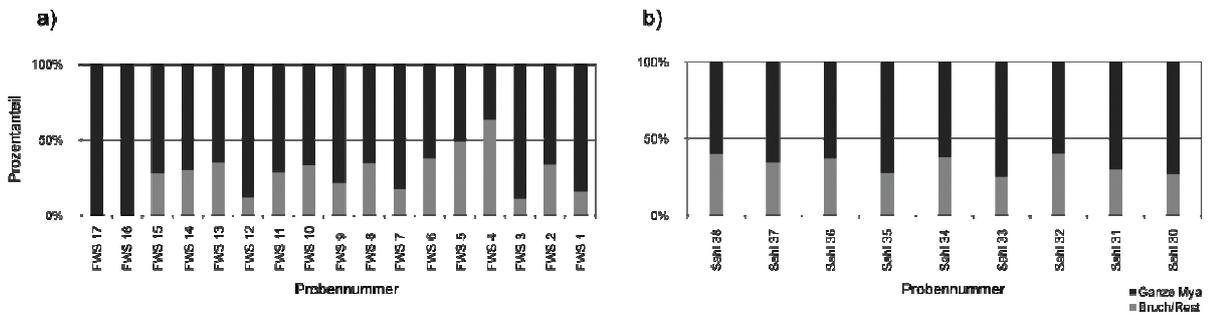
\* Hypothese (50:50) wird verworfen wenn  $p \leq 0,05$

**Gewichtsverhältnis ganze *M. arenaria* Klappen vs. Bruch/Restanteil**

In den Abbildungen 3-11a & b sind die jeweiligen Gewichtsverhältnisse zwischen ganzen *M. arenaria* Klappen und dem Bruch/Restanteil jeder Probe für jeweils beide Transekte graphisch dargestellt.

Die im Labor aussortierten Schalenbruchstücke (Chips) haben einen Durchmesser von 2 bis 4 cm und sind überwiegend kantig ausgebildet. Die Chips werden von Bruchstücken der *M. arenaria* dominiert, setzen sich aber auch aus Bruchstücken von *Cerastoderma edule*, *Macoma balthica* und vereinzelt auch aus Klappen von *Mytilus edulis* zusammen. Oftmals finden sich zwischengelagert auch vollständige Einzelklappen von *C. edule* und *M. balthica*, dagegen selten sind Einzelklappen von *M. edulis*.

Am Sahlenburger Transekt beträgt der Anteil an Bruch- und Restmaterial zwischen 26 bis 39 % (Abb. 3-11b). Im Vergleich dazu zeigt das Fedderwarder Transekt (Abb. 3-11a) eine davon abweichende Verteilung, so dass hierbei stärkere Schwankungen zwischen den Proben festzustellen sind.



**Abb. 3-11.** Verhältnisse zwischen ganze *M. arenaria* Klappen und dem Bruch/Restanteil in jeder Probe. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.

Der Bruch- und Restanteil schwankt zwischen den Probenpunkten um 15 bis 48 %. So beträgt der Bruch- und Restanteil beispielsweise in Probe FWS 3 nur 10 % und erreicht damit den niedrigsten Wert innerhalb des Fedderwarder Transektes. In den Proben FWS 4, 5 und 6 erreicht der Bruchanteil einen Wert zwischen 50 bis 60 %.

An beiden Transekten ist festzustellen, dass die Proben aus den Hochkantschill und Rosettenbereichen, einen deutlich geringeren Anteil an Bruch- und Restmaterial enthalten. Im Vergleich dazu enthalten Proben aus Bereichen mit Pflastervariationen einen deutlich höheren Anteil.

**Ergebnisse der semi-quantitativen taphonomischen Analyse**

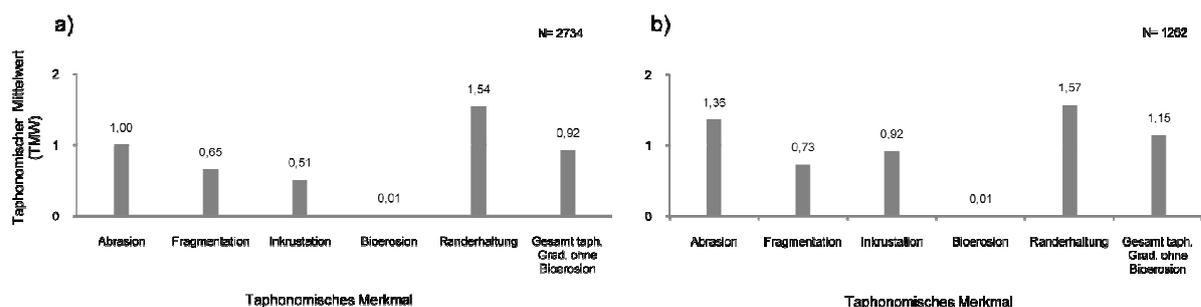
Bis auf die noch artikulierten Doppelklappen aus den vorgelagerten *M. arenaria* Horizonten des Fedderwarder Transektes wurden alle untersuchten Klappen bereits disartikuliert vorgefunden. Die Ergebnisse der semi-quantitativen taphonomischen Untersuchungen

werden sowohl in Balkendiagrammen (Abb. 3-12, Abb. 3-13, Abb. 3-15 und Abb. 3-18) als auch in ternären Diagrammen (Abb. 3-14, Abb. 3-16 und 3-17) dargestellt.

### Gesamt-Taphonomischer-Mittelwert (TMW) der einzelnen Merkmale

Der taphonomische Gesamt-Mittelwert (TMW) erreicht am Fedderwarder Transekt einen Wert von 0,92 und erlangt am Sahlenburger Transekt mit 1,15 einen nur leicht höheren Wert (Abb. 3-12a & b). An dem Klappenmaterial beider Transekte konnten kaum Bioerosionsbeanspruchungen vorgefunden werden. Bei den wenigen Einzelfällen handelte es sich um sehr kleine Bohrlöcher die vermutlich von Bohrmuscheln oder Gastropoden verursacht worden sind. An beiden Transekten beträgt der TMW der Bioerosion 0,01. Da die Beanspruchung der Schalen durch eine Bioerosion nahezu gegen Null läuft, wird auf eine graphische Darstellung in den weiteren Balkendiagrammen fortan verzichtet.

Das auffälligste taphonomische Merkmal mit dem stärksten Einfluss auf das Klappenmaterial an beiden Transekten ist jeweils die Randerhaltung. Der TMW beträgt an beiden Profilen ca. 1,5 (Abb. 3-12a & b). Die Beanspruchung durch Abrasion ist beim Sahlenburger Transekt mit 1,36 etwas höher als beim Fedderwarder Vorkommen, an dem der Abrasionsgrad 1 beträgt. Auch der TMW von Fragmentation und Inkrustation zeigen beim Sahlenburger Transekt mit 0,73 und 0,92 eine etwas höhere taphonomische Beanspruchung als beim Fedderwarder Vorkommen (Abb. 3-12a & b). Insgesamt ist festzustellen, dass die Proben des Sahlenburger Transekts eine stärkere Beanspruchung durch Inkrustation aufweisen, als die Proben des Fedderwarder Transekts.



**Abb. 3-12.** Gesamt-Taphonomischer-Mittelwert (TMW) der einzelnen aufgenommenen Merkmale. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.

### Taphonomischer Mittelwert (TMW) entlang der Transekte

In Abbildung 3-13a & b ist der taphonomische Gesamt-Mittelwert (TMW) für die jeweiligen Probennummern entlang beider Transekte aufgetragen.

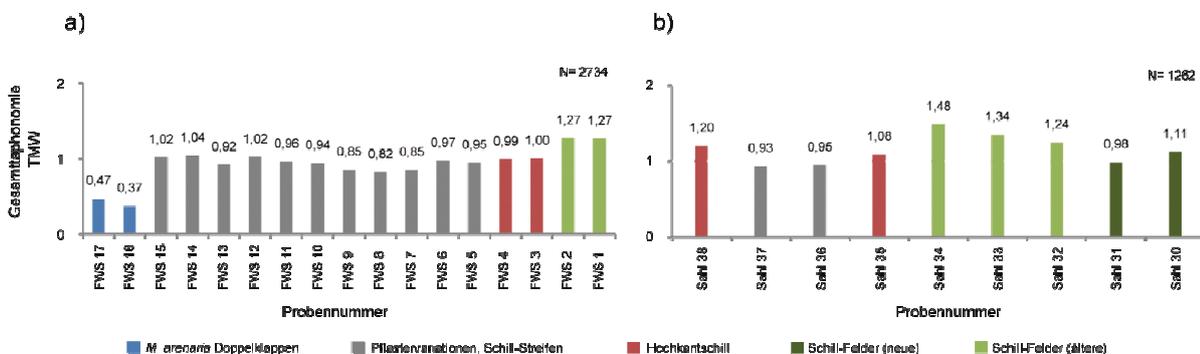
Fedderwarder Transekt

Am Fedderwarder Vorkommen (Abb. 3-13a) weisen die Proben des vorderen Bankbereiches (FWS 16 & 17) den niedrigsten TMW auf. Diese Proben stammen aus den vorderen *M. arenaria* Siedlungshorizonten und beinhalten ausschließlich Doppelklappen in postmortaler Lebensstellung. Der Beanspruchungsgrad beider Proben ist mit 0,37 (FWS 16) und 0,47 (FWS 17) mit großem Abstand deutlich niedriger als bei den übrigen Probenpunkten des Fedderwarder Transekts (Abb. 3-13a). Mit einem TMW zwischen 0,82 und 1,04 zeigen die Proben aus dem mittleren Bankbereich des Transekts (FWS 3 bis FWS 15) einen Beanspruchungsgrad zwischen 0,82 und 1,04. Den höchsten TMW innerhalb des Fedderwarder Transekts weisen mit einem Wert von jeweils 1,27 die Proben FWS 1 & 2 aus dem Rückbereich (ältere Schill-Felder) des Vorkommens auf.

Bei Darstellung der taphonomischen Gesamt-Mittelwerte in einem ternären Diagramm können die taphonomischen Unterschiede innerhalb der Bankbereiche ebenfalls graphisch verdeutlicht werden (Abb. 3-14a). Auch hierbei ist eine deutliche Differenz der taphonomischen Beanspruchung bestimmter Positionierungsbereiche zu erkennen. Die Proben aus den ehemaligen Siedlungshorizonten sammeln sich im unteren linken Bereich des Dreiecks. Die beiden Proben der Patch-Areale befinden sich zwischen den taphonomischen Graden 1 und 2. Die Punkteverteilung der übrigen Probenpunkte befindet sich im oberen Dreiecksbereich.

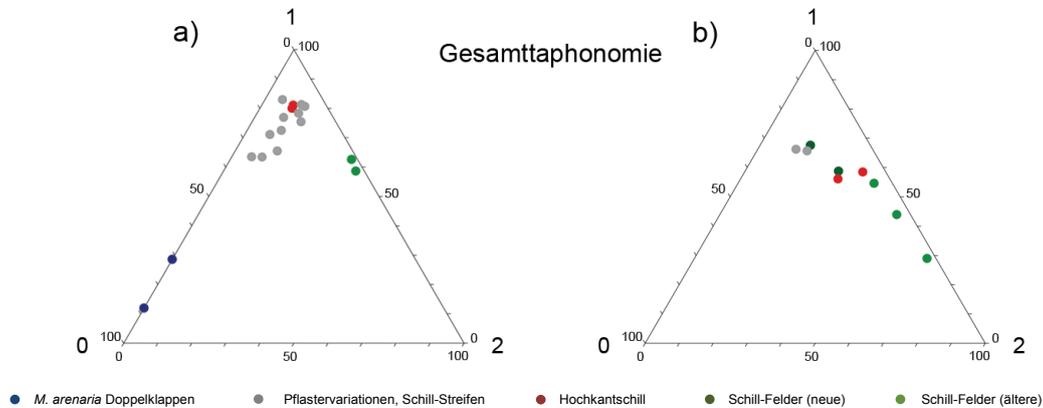
Sahlenburger Transekt

Am Sahlenburger Vorkommen weisen die Proben des Hauptbankbereiches (Sahl 35 bis Sahl 38) sowie des hinteren Bankbereiches (Sahl 30 & Sahl 31) die geringsten TMW auf (Abb. 3-13b). Der TMW erreicht dabei einen Wert zwischen 0,93 bis 1,2. Den höchsten Beanspruchungsgrad von 1,24 bis 1,48 zeigen die Proben der älteren Schill-Felder des Rückbereiches (Sahl 32 bis 34) auf.



**Abb. 3-13.** Gesamt-Taphonomischer-Mittelwert (TMW) jeder Probe entlang des jeweiligen Transekts. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.

Nach Darstellung der taphonomischen Gesamt-Mittelwerte in einem ternären Diagramm können die taphonomischen Unterschiede der einzelnen Bankbereiche zwar ebenfalls graphisch aufgezeigt werden, jedoch ist eine Differenzierung zwischen den Bankbereichen nicht so deutlich ausgeprägt wie es beim Fedderwarder Vorkommen der Fall ist (Abb. 3-14b).



**Abb. 3-14.** Ternäre Diagramme der Gesamttaphonomie. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlenburger Transekt.

### Taphonomischer Mittelwert (TMW) der einzelnen Merkmale entlang der Transekte

#### Fedderwarder Transekt

Werden die taphonomischen Merkmale jeweils einzeln entlang des jeweiligen Profilverlaufes dargestellt, so zeigt sich hauptsächlich am Fedderwarder Transekt ein taphonomischer Unterschied einzelner Transekt-Bereiche (Abb. 3-15a bis d). Besonders deutlich wird dies für die Abrasion, Inkrustation und Randerhaltung. So wurden die geringsten Beanspruchungsgrade aller taphonomischen Merkmale in den vorderen *M. arenaria* Siedlungshorizonten ermittelt (FWS 16 & 17). Eine mittlere Beanspruchung wies der mittlere Bereich des Vorkommens auf (FWS 3 bis FWS 15). Die höchste Beanspruchung zeigen die Proben FWS 1 & 2 aus dem Rückbereich der älteren Schill-Felder auf. Die unterschiedliche taphonomische Beanspruchung innerhalb einzelner Transekt-Bereiche lässt sich auch in den ternären Diagrammen erkennen (Abb. 3-16a und Abb. 3-17 a bis d).

#### Sahlenburger Transekt

Beim Sahlenburger Vorkommen kann im direkten Vergleich nur bei der Abrasion sowie der Inkrustation ein visuell deutlicher taphonomischer Unterschied innerhalb einzelner Transekt-Bereiche nachgewiesen werden (Abb. 3-15e bis h). Diese Beanspruchungsunterschiede zeigen sich auch in den entsprechenden ternären Diagrammen (Abb. 3-16b und Abb. 3-17 e bis h).

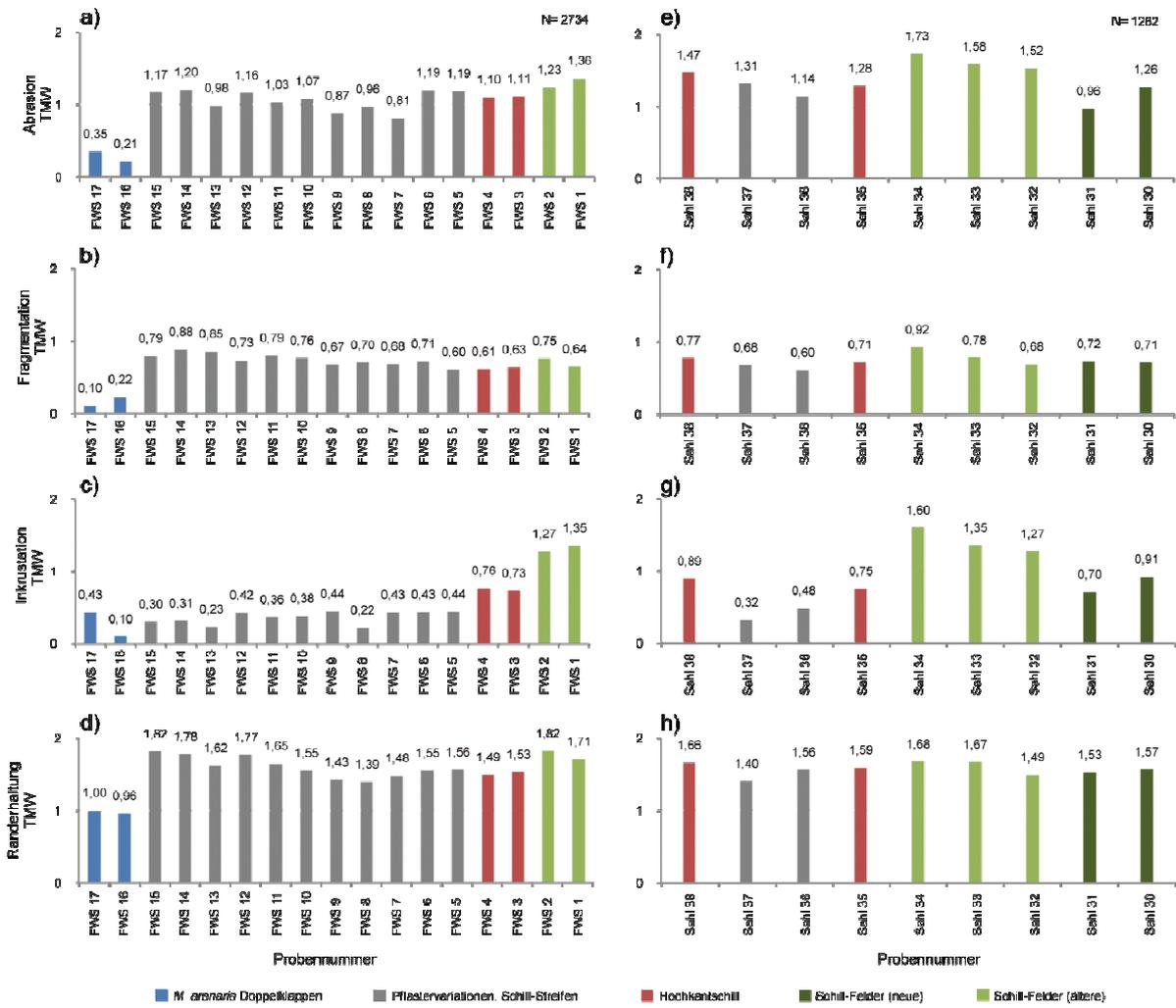


Abb. 3-15. Balken Diagramme der einzelnen taphonomischen Merkmale. (a bis d) Fedderwarder Transekt. (e bis h) Sahlener Transekt.

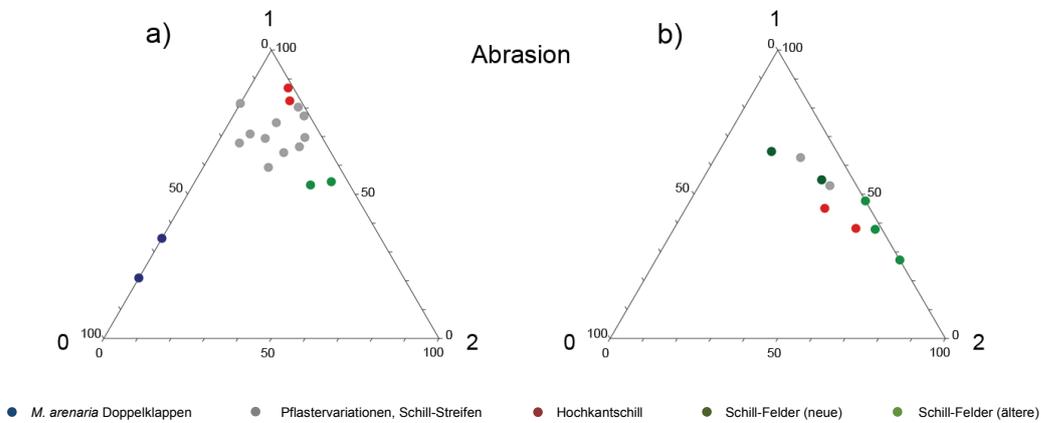
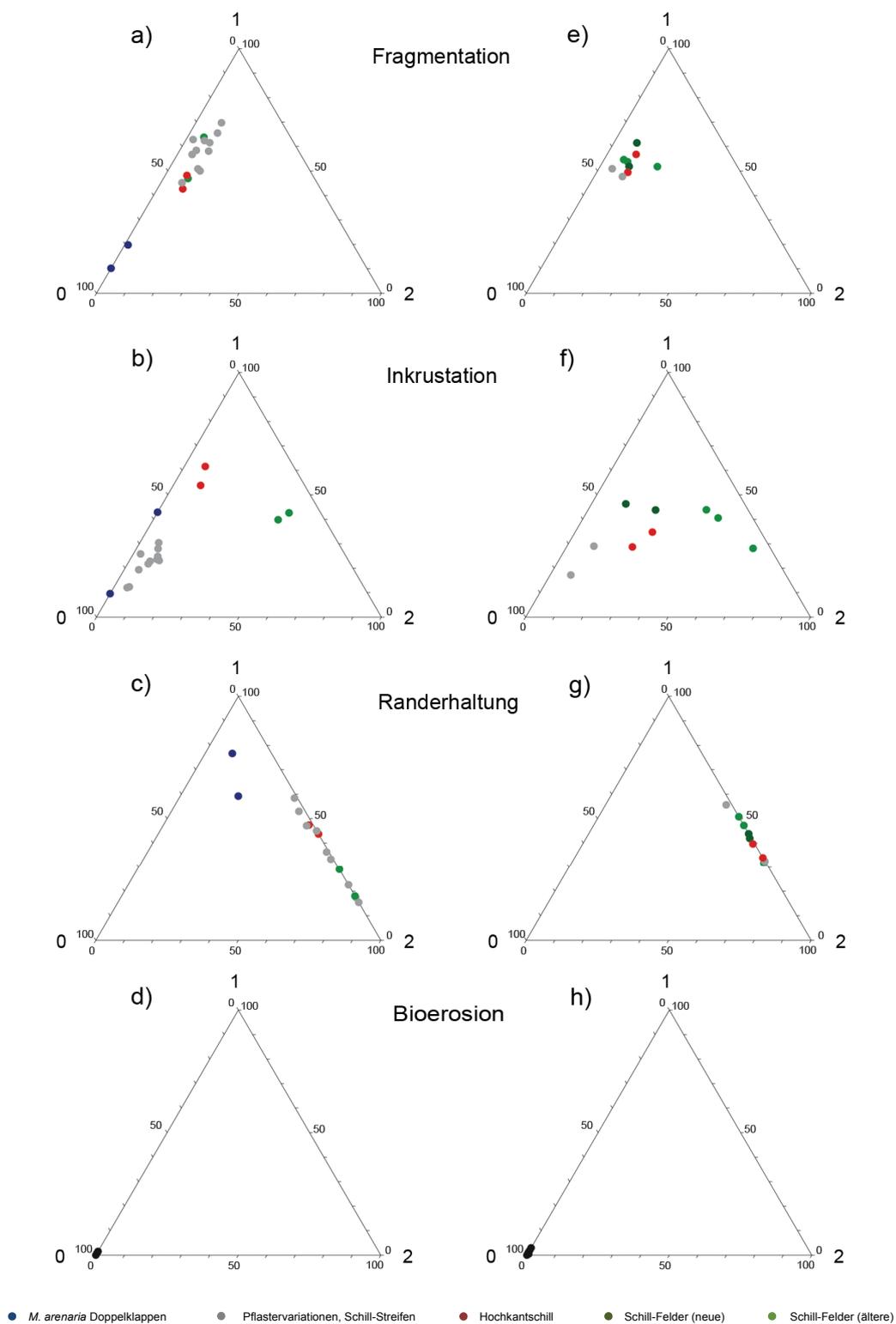


Abb. 3-16. Ternäre Diagramme der Abrasion. (a) Fedderwarder Transekt. (b) Sahlener Transekt.

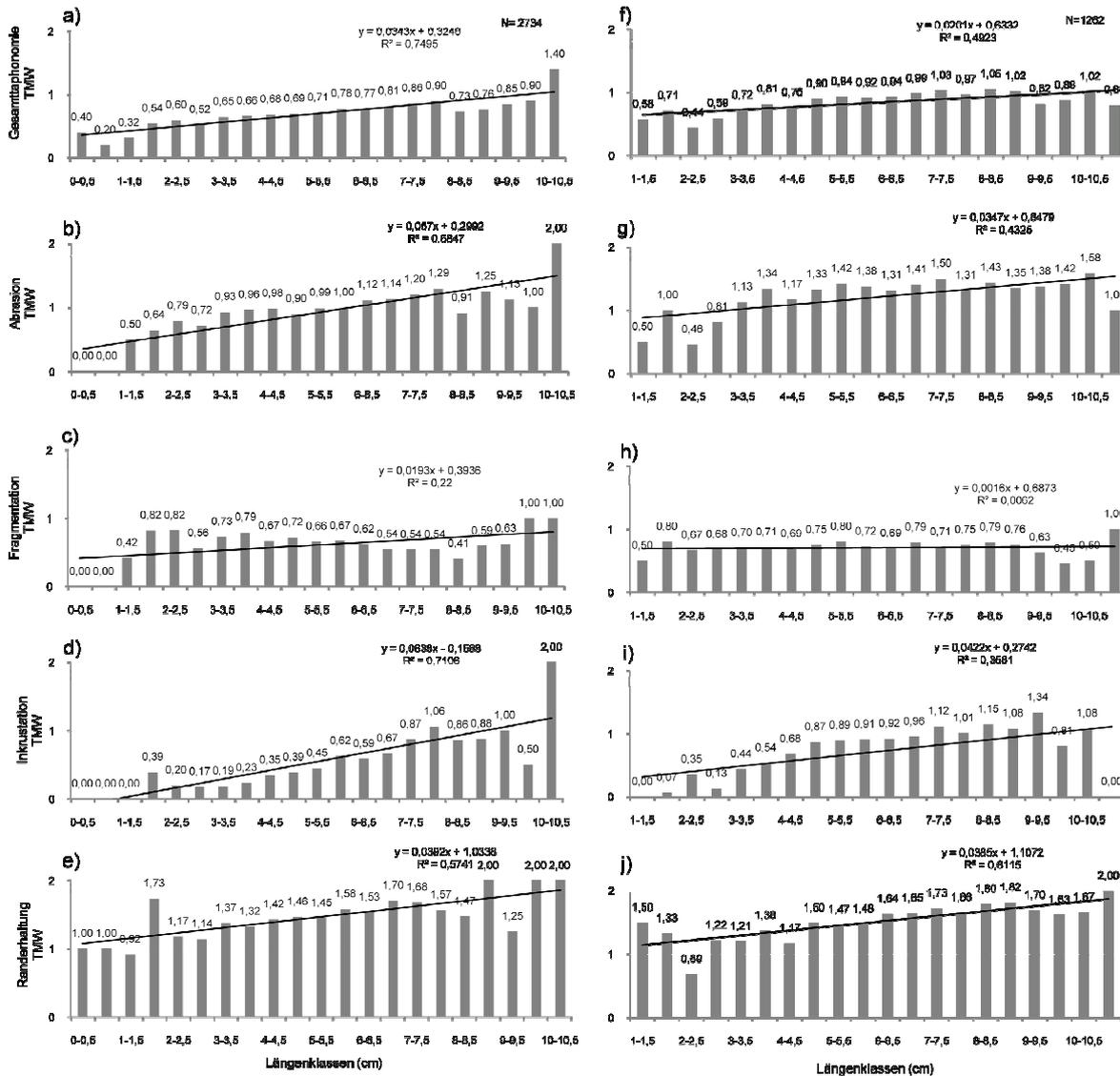




**Abb. 3-17.** Ternäre Diagramme der einzelnen taphonomischen Merkmale. (a bis d) Fedderwarder Transekt. (e bis h) Sahlenburger Transekt. Für die Bioerosion ist aufgrund des niedrigen Wertes keine Gliederung in verschiedene Lagerungsbereiche möglich.

Korrelationen zwischen Taphonomie und Längenklassen

Bei Betrachtung des taphonomischen Gesamt-Mittelwertes innerhalb der einzelnen Längenklassen zeigen die Werte einen linearen Zusammenhang zwischen der Klappenlänge und des gesamt-taphonomischen Beanspruchungsgrades. In Abbildung 3-18 sind die jeweiligen Längenklassen beider Transekte gegen die Mittelwerte der Gesamttaphonomie aufgetragen.



**Abb. 3-18.** Zusammenhang zwischen der Taphonomie und den Längenklassen der Klappen. (a bis e) Fedderwarder Transekt. (f bis j) Sahlenburger Transekt. R<sup>2</sup> gibt den Regressionskoeffizienten an.

Die jeweiligen Korrelationskoeffizienten sind in den Tabellen 3-14a & b angegeben. Die entsprechenden Bivariaten-Korrelationen zeigen für beide Transekte einen sehr hohen sowie zum Teil höchst signifikanten Korrelationskoeffizienten. Bei der Korrelation der einzelnen taphonomischen Merkmale mit den jeweiligen Längenklassen kann für beide Transekte ein ähnlicher Zusammenhang festgestellt werden. An beiden Transekten ist ein Zusammenhang der Längenklasse zwischen Abrasion (Abb. 3-18b & g), Inkrustation (Abb. 3-18d & i) sowie

der Randerhaltung (Abb. 3-18e & j) festzustellen (s. auch Tab. 3-14a & b). Am Fedderwarder Transekt kann zudem ein geringer Zusammenhang mit der Fragmentation bestimmt werden, der mit einem  $p > 0,05$  jedoch nicht signifikant ist.

**Tab. 3-14a.** Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson zwischen den einzelnen taphonomischen Merkmalen sowie der Längenklasse für das Fedderwarder Transekt.

Pearson	Abrasion	Fragmentation	Inkrustation	Randerhaltung	Gesamt-taphonomie	N = 17
Abrasion	1	0,803**	0,486*	0,913**	.	r
	.	0,000	0,048	0,000	.	p
Fragmentation	0,803**	1	0,072	0,879**	.	r
	0,000	.	0,784	0,000	.	p
Inkrustation	0,486*	0,072	1	0,373	.	r
	0,048	0,784	.	0,141	.	p
Randerhaltung	0,913**	0,879**	0,373	1	.	r
	0,000	0,000	0,141	.	.	p
Längenklassen N = 21	0,828**	0,470*	0,843**	0,758**	0,865**	r
	0,000	0,347	0,000	0,000	0,000	p

\* Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

r = Korrelationskoeffizient

**Tab. 3-14b.** Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson zwischen den einzelnen taphonomischen Merkmalen sowie der Längenklasse für das Sahlenburger Transekt.

Pearson	Abrasion	Fragmentation	Inkrustation	Randerhaltung	Gesamt-taphonomie	N = 9
Abrasion	1	0,691*	0,791*	0,487	.	r
	.	0,039	0,011	0,184	.	p
Fragmentation	0,691*	1	0,757*	0,664	.	r
	0,039	.	0,018	0,051	.	p
Inkrustation	0,791*	0,757*	1	0,646	.	r
	0,011	0,018	.	0,060	.	p
Randerhaltung	0,487	0,664	0,646	1	.	r
	0,184	0,051	0,060	.	.	p
Längenklassen N = 20	0,658**	0,072	0,597**	0,783**	0,703*	r
	0,002	0,762	0,005	0,000	0,001	p

\* Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

r = Korrelationskoeffizient

Die Korrelationskoeffizienten fallen am Fedderwarder Transekt (außer bei der Randerhaltung) höher aus als beim Sahlenburger Vorkommen. Ein geringer Zusammenhang der Fragmentation zwischen den Längenklassen ist ebenfalls an beiden Transekten festzustellen (Abb. 3-18c & h).

Die Korrelationsanalyse der einzelnen taphonomischen Merkmale untereinander zeigt für beide Transekte, dass die Abrasion jeweils mit der Fragmentation und Inkrustation korreliert. Am Fedderwarder Transekt korrelieren zudem die Abrasion und Fragmentation jeweils mit

der Randerhaltung. Am Sahlenburger Transekt korreliert die Fragmentation mit der Inkrustation (Tab. 3-14a & b).

## **Die taphonomischen Merkmale im Detail**

### Randerhaltung

Mittels der Randerhaltung wird der Erhaltungszustand des äußeren Schalenrandbereiches dokumentiert. Diese detaillierte Betrachtung ermöglicht eine Distanzierung von minimalen mechanischen Beanspruchungsspuren gegenüber den gröberen Fragmentations-Erscheinungen.

Die Randerhaltung ist an beiden Transekten das taphonomische Merkmal mit dem stärksten Einfluss. Einzelklappen ohne Kantenabschlagungen sind äußerst selten und können nur an relativ kleinen *M. arenaria* Exemplaren dokumentiert werden (Tafel 3-3 A & B). Die Abschlagungen sind meistens rund bis eckig, zickzackartig angeordnet und teilweise von scherbigem Charakter und können unregelmäßig auftreten (Tafel 3-2 B & C, Tafel 3-3 E & F). Häufiger von der Kantenabschlagung betroffen ist der posteriore Schalenrand, an dem oftmals nur die obersten Oberflächenschichten in Randnähe abgesplittert sind (Tafel 3-6 A & B). Besonders gut erhalten sind die Klappenränder von jungen *M. arenaria* in den Proben FWS 16 & 17. Dadurch ergibt sich auch der ermittelte sehr hohe signifikante Zusammenhang zwischen Randerhaltung und Klappenlänge. Die stärksten Kantenbeanspruchungen an beiden Transekten zeigen die Proben des mittleren sowie des rückwertigen Bankbereiches (Patches) auf (Abb. 3-15d & h).

### Abrasion

Die Abrasion ist an beiden Transekten nach der Randerhaltung das auffälligste taphonomische Merkmal mit der zweitstärksten Gewichtung. Die entsprechenden ternären Diagramme zeigen beim Fedderwarder Transekt einem Beanspruchungsgrad um ca. 1 und am Sahlenburger Vorkommen einen Grad zwischen 1 und 2 an.

Die Abrasionsprozesse können überwiegend an der obersten Schalenlage (Skulptur) festgestellt werden, so dass aufgrund dessen feine Erhabenheiten an der Schaleskulptur verloren gehen (Tafel 3-2 D bis F). An der Klappenaußenseite vom Abrasionsprozess daher unmittelbar beansprucht sind die typischen Anwachsflächen der *M. arenaria* Schale. Von der Abrasion gleichermaßen beansprucht sind die linken als auch die rechten Klappenseiten. An der linken Klappenseite zusätzlich betroffen ist der Ligamentlöffel (Chondrophor). Eine geringere Beanspruchung kann am Wirbel (Umbro) festgestellt werden. Der Abschleiß kann vorwiegend an den Bereichen um die Klappenwölbung sowie an den Randbereichen dokumentiert werden. Eine durch den Abschleiß hervorgerufene Facettierung (Ringbildung) wurde jedoch nicht festgestellt. An der Schaleninnenseite von der Abrasion betroffen waren die Pallial-Linie, der Pallial-Sinus (Mantelbucht-Linie) und die Adduktoren (Muskelansätze).

Ist der Abrasionsprozess in diesem Bereich weit fortgeschritten, so sind nur noch reliktsche Ansätze zu erkennen.

Bei der graphischen Darstellung der Abrasionsbeanspruchung gegen die Schalenlänge zeigt sich an beiden Transekten eine signifikante Zunahme des Beanspruchungsgrades mit der Schalengröße (Abb. 3-18b & g, s. auch Tab. 3-14a & b). Des Weiteren korreliert die Abrasion an beiden Transekten signifikant mit der Fragmentation sowie mit der Inkrustation (Tab. 3-14a & b). Eine hohe signifikante Korrelation mit der Randerhaltung kann dagegen nur am Fedderwarder Transekt festgestellt werden (Tab. 3-14a). Beim Fedderwarder Transekt ist die Beanspruchung durch Abrasionsprozesse im vorderen Bankbereich sehr gering (Abb. 3-15a). Die *M. arenaria* Klappen aus den Schlickhorizonten weisen durch ihre postmortale Lebensstellung zwar einen relativ geringen Beanspruchungsgrad auf, doch kann teilweise eine „geopetale Abrasion“ (obere Abrasion) der Klappenaußenseite festgestellt werden. An beiden Transekten ist der Abrasion-Grad jeweils im hinteren Bankbereich (FWS 1, 2 & Sahl 32 bis 34) deutlich höher als im mittleren Bankbereich. Proben die direkt aus Hochkantschill-Anordnungen stammen (FWS 3, 4 und Sahl 35 & 38) zeigen eine mittlere bis starke taphonomische Beanspruchung zwischen 1,10 und 1,47. Die Schalen welche aus Zonenbereichen mit überwiegend Pflastervariationen entnommen wurden, weisen einen etwas stärkeren Abschleiß der Schalenoberfläche auf (FWS 5 bis 15 und Sahl 35 & 37).

### Fragmentation

Die Entstehung der Bruchflächen der *M. arenaria* Klappen ist häufig unregelmäßig (Tafel 3-4 A & B sowie E & F). Des Öfteren kann ein Brechen der Schalen in Länge der Anwachsstreifen dokumentiert werden, was teilweise zu eckigen Bruchkanten führt (Tafel 3-4 C & D). Bei sehr dicken und harten *M. arenaria* Exemplaren folgen anfängliche Fragmentationsrisse nicht den linearen Anwachsstreifen, sondern brechen oft splittrig bis gezackt und teilweise auch wellig ab (Tafel 3-5 A & B). Im Vergleich ist die schmalere Hinterseite (posterior Seite) der Klappe häufiger durch eine Fragmentation beansprucht als die etwas dickere und dadurch stabilere Vorderseite. Sehr selten zu verzeichnen ist dagegen ein Abbruch des Ligamentlöffels der linken Klappenhälfte. Das Schloss der rechten Klappenhälfte bricht dagegen häufiger quer ab.

Die Beanspruchung der Klappen durch Fragmentation ist entlang beider Transekten in etwa gleich hoch (Abb. 3-15b & f). Bis auf die Doppelklappen aus den Siedlungshorizonten des Fedderwarder Transektes kann eine Gewichtung innerhalb einzelner Transekt-Bereiche nicht festgestellt werden.

Die *M. arenaria* Doppelklappen weisen einen deutlich geringeren Fragmentationsgrad auf (Abb. 3-15b). Auch in dem entsprechenden ternären Diagramm kann diese Separierung dieser beiden Proben dokumentiert werden (Abb. 3-17a).

### Bioerosion

An beiden Transekten kann so gut wie keine taphonomische Beanspruchung durch Bioerosion festgestellt werden (s. dazu auch ternäre Diagramme in Abb. 3-17d & h). Die äußerst nur selten vorgefundenen kleinen Bohrlöcher sind nur an der Schalenaußenseite von juvenilen Exemplaren dokumentiert worden. Bei den immer scharf begrenzten und meist kreisrunden, stets konischen Löchern handelt es sich um Anbohrungen von Polychaeten (*Polydora ciliata?*).

### Inkrustation

Das Artenspektrum durch inkrustierende Organsimen auf dem untersuchten Schalenmaterial ist an beiden Transekten durch das relativ wiederholte Vorkommen recht überschaubar. Vorwiegend sind die *M. arenaria* Einzelklappen durch die festhaftende und eingewanderten seepockenartigen Balaniden (Balanomorpha) der Art *Elminius modestus* bewachsen (Tafel 3-5 C bis E, Tafel 3-6 C bis F). Dagegen sehr selten vorgefunden wurde die turmwüchsige Art *B. crenatus*. Des Weiteren findet sich die harthaftende Bryozoe *Conopeum reticulatum* (*Cellaria fistulosa?* und *C. sinuosa?*). Ebenfalls vorgefunden wurden durch Bysussfäden weichhaftende juvenile *M. edulis* und festzementierte junge Austern der Art *Crassostrea giga* (Tafel 3-7 F). Die Bryozoen finden sich oftmals auf der Innenseite der Schalen (Tafel 3-7 E). Relativ oft wurden auch nur noch die Enden der Bysussfäden (s. auch Tafel 3-5 F) auf der Klappenoberfläche vorgefunden (Tafel 3-3 C & D). Besonders im rückwertigen Bereich der Vorkommen konnten zwischen den Schalenanhäufungen diverse Schnurwürmer, Pantoffelschnecken, Meeresborstenwürmer sowie Einsiedlerkrebse und Strandkrabben entdeckt werden.

Als einen besonders günstigen Ansatzpunkt für einen Bewuchs durch Seepocken erwiesen sich die älteren *M. arenaria* Einzelklappen, die den Rückbereichen der Schill-Vorkommen entnommen wurden (Tafel 3-6 C bis F, Tafel 3-7 A bis D). Die Seepocken sitzen besonders in den vertieften Wachstumsrillen der Schale fest, so dass häufig in diesem Bereich die ganze Schalenaußenseite einheitlich durch Seepocken überzogen ist. Die Balaniden erreichen dabei einen Grunddurchmesser (bezogen auf die Basisplatte) von 0,1 bis maximal 2 cm und bilden dabei kleine bis größere Grüppchen von 5 bis 40 Tieren aus. An einigen sich in Lebensstellung befindlichen *M. arenaria* Doppelklappen sowie an einigen Einzelklappen kann ein geopetaler Pockenbewuchs durch Panzerplatten sowie Deckplatten dokumentiert werden. Häufig konnten auf dem Klappenmaterial auch nur noch die Basisplatten der Seepocken oder reliktsche Abdrücke die noch nicht durch Abrasionsprozesse entfernt wurden angetroffen werden (Tafel 3-7 A bis D). Auf den Proben der vorderen und mittleren Bankbereiche auf denen überwiegend Pflastervariationen vorgefunden wurden, ist ein Aufwuchs oft an der Schalenaußenseite zu dokumentieren.

Besonders in diesem Bereich sind die Seepocken des Öfteren durch Abrasionsprozesse nur noch reliktiert erhalten.

Große Unterschiede des durchschnittlichen Inkrustationsgrades kann an beiden Transekten zwischen den jeweiligen Bereichen festgestellt werden (Abb. 3-15c & g). Die geringste Beanspruchung durch Inkrustation zeigt mit einem Wert von 0,51 das Fedderwarder Transekt (Abb. 3-14a).

Mit einem TMW von 0,92 ist die Inkrustationsbeanspruchung der Sahlenburger Proben im direkten Vergleich zum Fedderwarder Transekt fast doppelt so hoch (Abb. 3-12a & b). Einen geringen Befall durch inkrustierende Lebewesen zeigen die Proben mit *M. arenaria* Doppelklappen des Fedderwarder Transektes (FWS 16 & 17). Die Bankbereiche in denen vorwiegend Pflastervariationen und Rosettenanordnungen gesammelt wurden (FWS 5 bis 15 und Sahl 36 & 37) zeigen einen deutlich geringeren Inkrustationsgrad als die Proben aus den Hochkantschill- und Rückbereichen beider Transekte auf (Abb. 3-15c & g).

An beiden Transekten beträgt der Inkrustationsgrad der Proben aus den HKS-Bereichen zwischen 0,7 und 0,9 (FWS 3, 4 & Sahl 35 & 38). Deutlich höhere Inkrustationsgrade zwischen 1,2 und 1,6 zeigen die jeweiligen Rückbereiche beider Transekte (FWS 1, 2 & Sahl 32 bis 34, Abb. 3-15c & g).

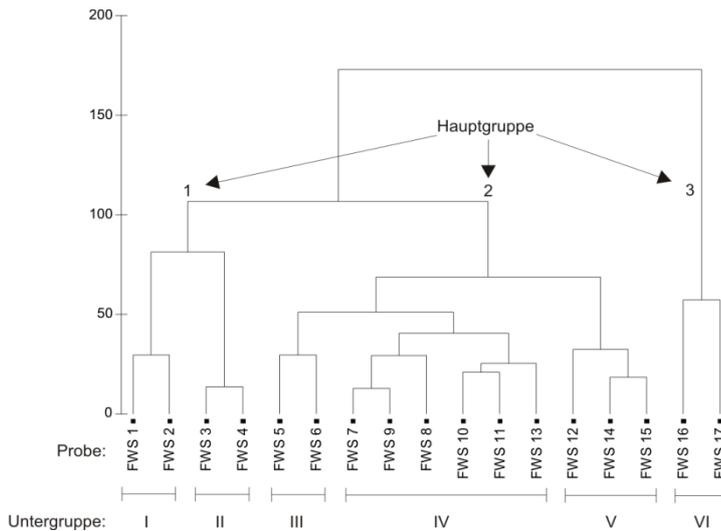
## Multivariate Methoden

### Clusteranalysen (CA) und multidimensionalen Skalierung (MDS)

Die Ergebnisse der Gruppenanalyse sowie der multidimensionalen Skalierung sind in den Abbildungen 3-19 und 3-20 sowie in den Abbildungen 3-21 und 3-22 dargestellt. Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander. Beispielsweise entspricht ein Distanzmaß von 90 in etwa einer Ähnlichkeit von 10 % und ein Distanzabstand von 25 entspricht einer Ähnlichkeit von ca. 75 %.

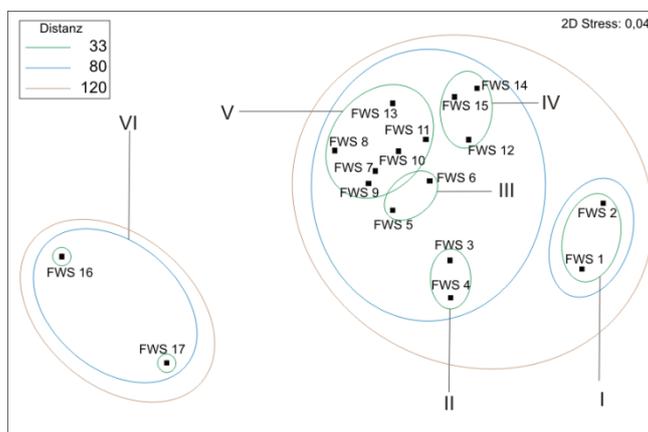
### Fedderwarder Transekt

Sowohl das Cluster-Dendrogramm (Abb. 3-19) als auch die MDS-Grafik (Abb. 3-20) des Fedderwarder Transektes klassifiziert die 17 Proben in drei Hauptgruppen die *a priori* in insgesamt sechs kleinere Untergruppen (I-VI) eingeteilt werden. Die erste Hauptgruppe bilden dabei die Proben FWS 1 bis FWS 4. Die zweite Hauptgruppe bilden die Proben FWS 5 bis FWS 15. Die dritte Hauptgruppe (bzw. auch Untergruppe VI) bilden die beiden Proben aus den *Mya* Horizonten FWS 16 und FWS 17 (Abb. 3-19 und Abb. 3-20).



**Abb. 3-19.** Cluster-Dendrogramm des Fedderwarder Transekts mit den drei Hauptgruppen (1 bis 3) und sechs Untergruppen (I bis VI). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Als erste Untergruppe (I) definiert sind die Proben FWS 1 & 2 aus dem Rückbereich des Schill-Vorkommens (s. auch Tab. 3-15a). Beide Proben haben ein Distanzmaß von 30 und ähneln sich in ihrer taphonomischen Zusammensetzung etwa zu 70 %. Die Proben FWS 3 & 4 bilden mit einer Ähnlichkeit von 85 % (Distanz ca. 15) die Untergruppe II. Obwohl die Probenpunkte zum Hauptbank-Bereich gezählt werden, unterscheiden sie sich deutlich von den übrigen Probenpunkten des Vorkommens. Nach mehreren Probetests auf signifikante Unterschiede werden die Proben des mittleren Bankbereiches (FWS 5 bis 15) in drei weitere Untergruppen eingeteilt um detaillierte Lagerungsstrukturen unterscheiden zu können. Mit einem Distanzmaß von 30 werden die Proben FWS 5 & 6 aufgrund ihrer hauptsächlichen Imbrikationslagerung zu Untergruppe III zusammengefasst. Die Proben FWS 7 bis 11 sowie FWS 13 werden zur Untergruppe IV zusammengefügt und beinhalten Klappenmaterial aus Bankbereichen in denen größere Rosettenanordnungen mit kleineren Pflastervariationen lagerten (s. Abb. 3-3b). Die Proben FWS 12, 14 & 15 repräsentieren ebenfalls Pflastervariationen jedoch beinhalten sie auch kleinere Rosettenstrukturen, so dass diese Probenpunkte in die eigenständige Untergruppe V eingeteilt werden kann. Die Proben aus den *M. arenaria* Siedlungshorizonten FWS 16 & 17 unterscheiden sich mit einem Distanzmaß mit weit über 100 deutlich von allen anderen Gruppen und bilden mit einer Ähnlichkeit von 45 % zueinander die sechste Untergruppe.



**Abb. 3-20.** MDS Grafik des Fedderwarder Transekts mit den drei Hauptgruppen (blaue Ellipsen) und sechs Untergruppen (I bis VI, grüne Ellipsen). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.



Der ANOSIM-Test für das gesamte Vorkommen ergibt einen globalen R-Wert von 0,888 (Tab. 3-15b im Anhang). Keiner der 999 Permutationen zeigt einen Wert der gleich oder höher ist als der R-Wert, so dass die Nullhypothese, die Proben gehören einer Gesamteinheit an, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,1 \%$  verworfen werden kann (Tab. 3-15 im Anhang). Die paarweise durchgeführten ANOSIM Vergleiche (Untergruppe vs. Untergruppe) zeigen statistisch signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1,2 bis 33,3 % (Tab. 3-15c im Anhang). Die zum Teil ermittelte höhere Irrtumswahrscheinlichkeit von 33,3 % wird aufgrund der geringen durchgeführten Permutation verursacht und ist daher nicht repräsentativ. Deutliche Unterschiede in der taphonomischen Beanspruchung gibt es zwischen fast allen Gruppen  $R = 1$ . Der Vergleich der Gruppe IV und V ergab zwar mit einem  $R = 0,81$  einen etwas geringeren R-Wert, was aber noch einem statistisch abgesicherten Unterschied bestätigt. Beim Vergleich zwischen Gruppe III und IV ergibt sich jedoch ein geringerer  $R = 0,46$  ( $p = 3,6 \%$ ), so dass die Nullhypothese bei diesem Vergleich angenommen werden muss und somit kein signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen bestätigt werden kann (Tab. 3-15c im Anhang).

Mit welchem Prozentanteil jedes taphonomische Merkmal zu den jeweiligen Ähnlichkeiten innerhalb einzelner Gruppen beigetragen hat wurde mit der SIMPER-Prozedur in PRIMER ermittelt (Tab. 3-17 im Anhang). In allen sechs Untergruppen fungiert jeweils die Randerhaltung mit mindestens 35 % als das dominanteste taphonomische Merkmal. Im rückwertigen Bankbereich (Untergruppe I) trägt die Inkrustation und die Abrasion den nächstgrößeren Anteil. Einen deutlich geringeren Einfluss bewirkt dagegen die Fragmentation (13,2 %). Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Zusammensetzung beträgt 95,7 %.

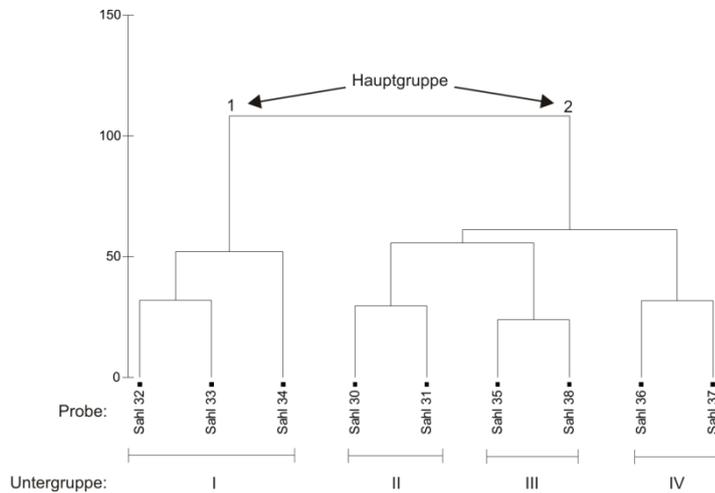
In der zweiten Untergruppe bringt hinter der Randerhaltung (38 %) die Beanspruchung durch Abrasion (28 %) einen hohen Einfluss auf die Gruppenbildung ein. Weniger Einfluss auf die Hochkantstrukturen hat im Vergleich die Inkrustation (18,5 %) und die Fragmentation (15,5 %).

Die Proben innerhalb der Untergruppen III bis V werden im Wesentlichen von der Randerhaltung (mind. 41 %) sowie durch Abrasionsprozesse (mind. 26 %) beansprucht. Bei Untergruppe III (Dachziegellagerung) kann eine geringere Beanspruchung des Klappenmaterials durch Fragmentation (16 %) festgestellt werden. Mit nur max. 11,5 % hat die Inkrustation einen deutlich geringen Anteil am Beanspruchungsgrad der Proben aus dem mittleren Hauptbereich des Transekts. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Zusammensetzung betragen in der Untergruppe III 98,3 %, in Untergruppe IV 93,7 % und in Untergruppe V ca. 97 % (s. Tab. 3-17 im Anhang).

Die Untergruppe VI wird im wesentlichen von der Randerhaltung (70 %) beansprucht. Den zweitgrößten Einfluss auf die Doppelklappen in Lebensstellung hat hierbei die Abrasion (15,3 %). Deutlich weniger beansprucht werden die Proben aus den *M. arenaria* Horizonten durch Fragmentation und Inkrustation mit jeweils 7,3 %. Die durchschnittliche Untergruppen-Ähnlichkeit beträgt 81,3 %.

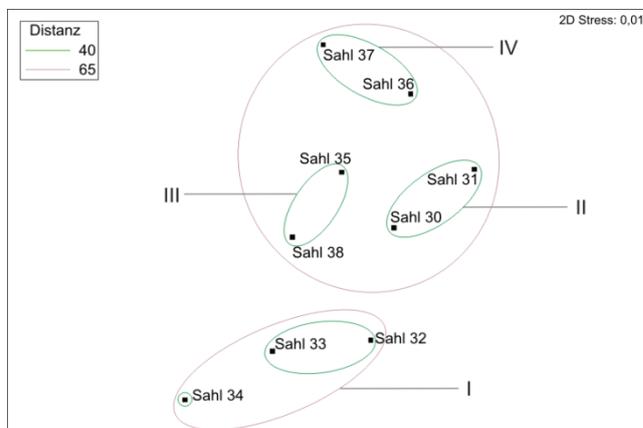
Sahlenburger Transekt

Das Cluster-Dendrogramm (Abb. 3-21) sowie der MDS-Plot (Abb. 3-22) des Sahlenburger Transekt klassifiziert die neun Proben in insgesamt zwei Hauptgruppen, wobei auch eine *a priori* Einteilung die Probepunkte in insgesamt vier Untergruppen (I bis IV) erfolgt.



**Abb. 3-21.** Cluster-Dendrogramm des Sahlenburger Transekt mit den beiden Hauptgruppen (1 und 2) und den vier Untergruppen (I bis IV). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Als erste Untergruppe (I) definiert werden die Proben Sahl 32, 33 und 34 aus dem Rückbereich des Vorkommens (s. auch Tab. 3-16a, ältere Schill-Felder s. auch Abb. 3-3a). Mit einem Distanzmaß von etwa 50 haben sie eine Ähnlichkeit von ca. 50 %. Die Proben Sahl 30 und 31 bilden mit einer Ähnlichkeit von ca. 70 % (Distanz ca. 30) die Untergruppe II. Diese Gruppe repräsentiert Klappen aus frischen Patch-Bereichen (neuere Schill-Felder) und beinhalten Rosettenanordnungen sowie Hochkantstrukturen. Die Proben Sahl 35 & 38 werden mit einer Ähnlichkeit von 75 % zur Untergruppe III zusammengefasst und beinhalten Klappenmaterial aus Hochkantstrukturen. Die Untergruppe IV wird aus den Proben Sahl 36 & 37 gebildet. Mit einem Distanzmaß von etwa 35 ähneln sich die Probenpunkte aus den Pflasterbereichen (auch Imbrikationsbereich) mit 65 %.



**Abb. 3-22.** MDS Grafik des Sahlenburger Transekt mit den beiden Hauptgruppen (lila Ellipsen) und den vier Untergruppen (I bis IV, grüne Ellipsen). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Der ANOSIM-Test für das Sahlenburger Vorkommen ergibt einen globalen R-Wert von 0,74 ( $p = 0,1 \%$ ). Auch bei diesem Transekt ergab keiner der 999 Permutationen einen Wert der gleich oder höher ist als der R-Wert, so dass die Nullhypothese, die Proben gehören einer Gesamteinheit an, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,1 \%$  verworfen werden kann (Tab. 3-16b im Anhang). Die paarweise durchgeführten ANOSIM Vergleiche (Gruppe vs. Gruppe) zeigen statistisch signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen 10 % und 33,3 % zueinander (Tab. 3-16c im Anhang). Die zum Teil ermittelte höhere Irrtumswahrscheinlichkeit von 33,3 % wird aufgrund der geringen durchgeführten Permutation verursacht. Unterschiede in der taphonomischen Beanspruchung gibt es zwischen allen Gruppen, da der R-Wert zwischen 0,7 und 1 liegt.

Die SIMPER-Prozedur in PRIMER zeigt auch beim Sahlenburger Transekt, dass in allen vier Untergruppen die Randerhaltung mit mindestens 30 % das dominanteste taphonomische Merkmal ist (Tab. 3-18 im Anhang). In Untergruppe I wird das Klappenmaterial aus dem Rückbereich durch Abrasion (30 %) und Inkrustation (25,4 %) am stärksten beansprucht. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenszusammensetzung beträgt ca. 94 %.

Die Rosettenanordnungen der Untergruppe II sind durch die Abrasion (25 %) am zweitstärksten beeinflusst worden. Die Fragmentation und Inkrustation wirken mit etwa 18 % gleichstark auf das Klappenmaterial dieser Untergruppe. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenszusammensetzung beträgt 93,3 %.

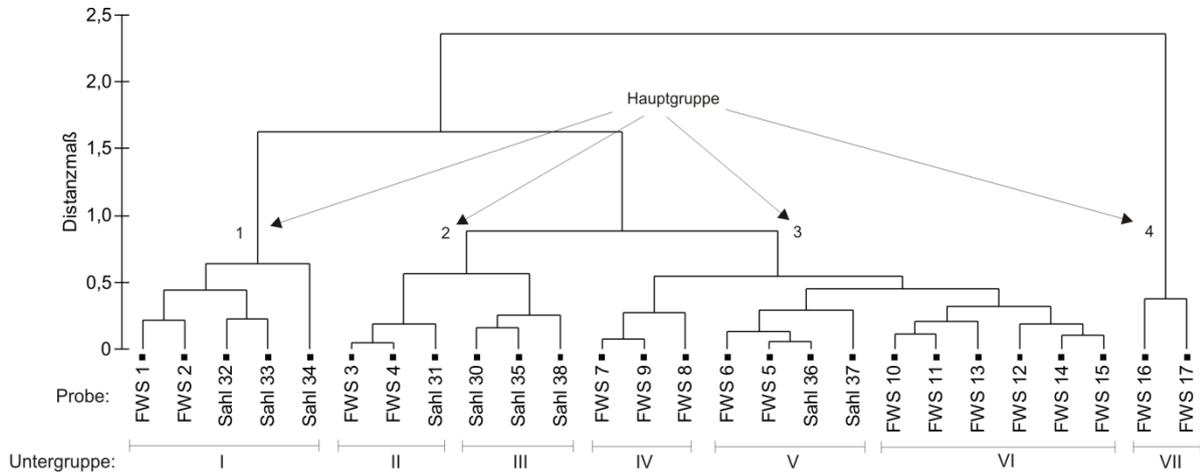
Die HKS-Anordnungen der Untergruppe III werden neben der Randerhaltung stark durch Abasionsprozesse beansprucht. Einen relativ geringeren und gleichwertigen Einfluss hat hier die Inkrustation (17 %) und die Fragmentation (16 %). Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenszusammensetzung beträgt ca. 95 %.

Die Pflasteranordnungen der Untergruppe IV fallen überwiegend durch eine schlechte Randerhaltung (40 %) sowie durch eine erhöhte Abrasionsbeanspruchung (33 %) auf. Weniger beansprucht wird das Klappenmaterial dagegen durch Fragmentation und Inkrustation. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenszusammensetzung beträgt 92,3 %.

#### Fedderwarder vs. Sahlenburger Transekt

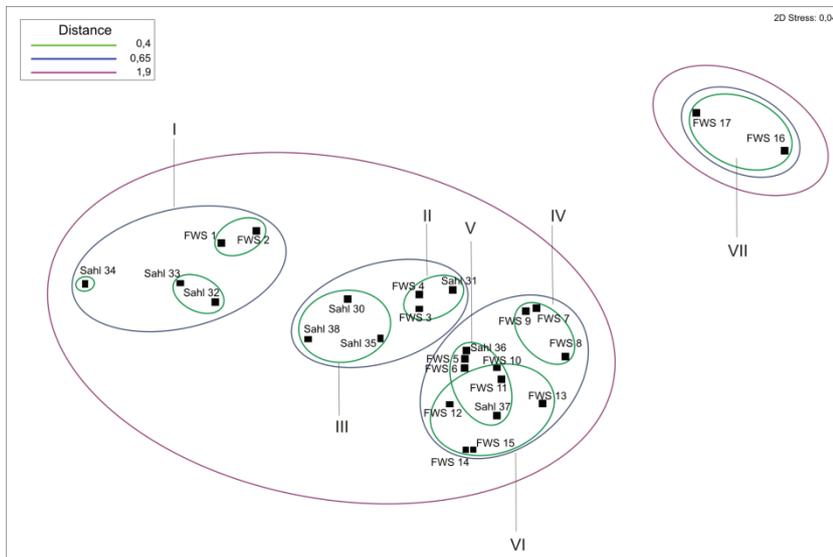
Das Dendrogramm der Clusteranalyse und die MDS-Grafik für die Proben beide Transekt ist in den Abbildungen 3-23 und 3-24 dargestellt. Die Ergebnisse der Cluster-Analyse und der multidimensionalen Skalierung ergeben eine deutliche Gruppierung der einzelnen Probenpunkte. Insgesamt werden vier Hauptgruppen aufgrund ihrer geringen Distanzen bzw. ihrer Ähnlichkeiten zueinander definiert, die sich *a priori* in sieben Untergruppen gliedern lassen. Die Hauptgruppen repräsentieren die Bereiche des Rückbereiches, Hochkantschill-Rosetten-Bereich, Pflaster-Imbrikationsbereich sowie den Bereich der *M. arenaria* Horizonte.

Die erste Untergruppe bilden die Proben aus den jeweiligen Rückbereichen beider Transekte (Tab. 3-19a im Anhang). Die Untergruppe II wird aus den Proben FWS 3, 4 und Sahl 31 gebildet, die aus reinen Hochkantschill-Bereichen stammen. Die dritte Untergruppe beinhaltet Probenpunkte bei denen es sich hauptsächlich um Klappenmaterial aus Rosettenanordnungen mit HKS-Charakter handelt.



**Abb. 3-23.** Gemeinsames Cluster-Dendrogramm des Sahlenburger und Fedderwarder Transekts mit den vier Hauptgruppen (1 bis 4) und den sieben Untergruppen (I bis VII). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Proben welche Klappenmaterial aus Rosettenstrukturen sowie Pflastervariationen umfassen werden in Untergruppe IV zusammengefügt (FWS 7 bis 9). Die Untergruppe V (FWS 5 & 6, Sahl 36 & 37) wird aus Proben gebildet die ausschließlich aus Bereichen mit Dachziegellagerung entstammen. Verschiedene Pflastervariationen werden in der Untergruppe VI zusammengefügt. Zu Untergruppe VII zusammengefasst werden die beiden Probenpunkte aus den *M. arenaria* Horizonten (Probe FWS 16 & 17).



**Abb. 3-24.** Gemeinsame MDS-Grafik des Sahlenburger und Fedderwarder Transekts mit den vier Hauptgruppen (1 bis 4, lila Ellipse) und den sieben Untergruppen (I bis VII, blaue Ellipsen). Je geringer der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen, desto höher ist dabei ihre Ähnlichkeit zueinander.

Der durchgeführte ANOSIM-Test für beide Vorkommen ergibt einen globalen R-Wert von 0,86 ( $p = 0,1 \%$ ). Da auch hierbei keiner der 999 Permutationen einen Wert der gleich oder höher ist als der R-Wert, kann die Nullhypothese, die Proben gehören einer Gesamteinheit an mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,1 \%$  verworfen werden (Tab. 3-19b im Anhang). Die paarweise durchgeführten ANOSIM Vergleiche (Gruppe vs. Gruppe) zeigen statistisch signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen 0,2 % und 10 % (Tab. 3-19c im Anhang). Unterschiede in der taphonomischen Beanspruchung gibt es zwischen allen Untergruppen, da der R-Wert zwischen 0,6 und 1 liegt.

Die SIMPER-Prozedur in PRIMER zeigt erwartungsgemäß, dass die Randerhaltung mit mindestens 32 % in allen Untergruppen als das dominanteste Merkmal auftritt (Tab. 3-20 im Anhang). Das Klappenmaterial der Untergruppe I wird am stärksten durch Abrasion (27,5 %) und Inkrustation (26,1 %) beansprucht. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenzusammensetzung beträgt 93,7 %.

Die Hochkantanordnungen in Untergruppe II werden neben einer erhöhten Randerhaltung besonders durch Abrasionsprozesse (26,5 %) belastet. Einen geringeren Anteil haben dagegen die Inkrustation (18,5 %) und die Fragmentation (16 %). Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenzusammensetzung beträgt 96,9 %.

Eine ähnliche taphonomische Beanspruchung zeigen die Proben der dritten Gruppe, die hauptsächlich HKS-ähnliche Rosettenstrukturen beinhalten. Aufgrund des ANOSIM-Tests kann aber noch eine Distanzierung zur Untergruppe II bestätigt werden. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Gruppenzusammensetzung beträgt 96,1 %.

Im Vergleich zu Untergruppe III wird das Klappenmaterial der Gruppe IV weniger durch Inkrustation (9 %) als durch Abrasion (24,7 %) und Fragmentation (21 %) beansprucht. Auch hierbei ist ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Untergruppen festzustellen. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppe IV beträgt 95,1 %.

Die Proben mit Dachziegellagen werden als Untergruppe V zusammengefasst. Neben einer relativ schlechten Randerhaltung (40,6 %) zeichnen sich die Klappen hauptsächlich durch eine relativ hohe Abrasion (32 %) aus. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenzusammensetzung beträgt 95,8 %.

Eine ähnlich Beanspruchung wie die Imbriktionen der Untergruppe V zeigen die Pflastervariationen der Untergruppe VI auf. Im Vergleich kann eine etwas schlechtere Randerhaltung (43,6 %) und nur eine geringfügige Abweichung der Abrasionbeanspruchung (25 %) festgestellt werden. Deutlich geringer in Untergruppe VI ist dagegen der Einfluss der Inkrustation (7,8 %). Aufgrund der geringen Distanz beiden Untergruppen zueinander ist auch nur eine relativ geringe Signifikanz von  $R = 0,64$  ( $p = 0,5 \%$ ) festzustellen. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenzusammensetzung beträgt 95 %.

Aufgrund der bereits eigenständigen Gruppierung der Proben FWS 16 & 17 am Fedderwarder Transekt (Untergruppe VII) werden erwartungsgemäß dieselben Werte ermittelt. Einen statistisch signifikanten Unterschied der Untergruppe VII kann zu allen anderen Gruppierungen festgestellt werden. Die durchschnittliche Ähnlichkeit in der Untergruppenzusammensetzung beträgt 81,3 %.

## Diskussion

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit wurden drei Schill-Vorkommen innerhalb des Gezeitenbereiches zwischen Jadebucht und Außenelbe untersucht. Auf den Oberflächen der Vorkommen wurden verschiedene Lagerungsvariationen von rezenten *M. arenaria* Einzelklappen beschrieben und miteinander verglichen. Mittels detaillierter Oberflächenuntersuchungen gelang es wiederkehrende und einheitliche Ablagerungsmuster innerhalb der Schalenakkumulationen nachzuweisen.

Die Ergebnisse zeigten, dass die unterschiedlichen Lagerungs- und Einregelungsvariationen der Klappen sich nur auf bestimmten Oberflächenbereichen beschränkten. Aufgrund dessen erfolgte eine Einteilung der oberflächennahen Lagerungsstrukturen in insgesamt sieben unterschiedliche Zonenbereiche. Während in den vorgelagerten ehemaligen Siedlungshorizonten freierodierte, postmortale *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung vorgefunden wurden (Zone 1), akkumulierten sich die bereits disartikulierten und transportierten Klappen zu verschiedenen Lagerungs- und Einregelungsvariationen. Neben verschiedenen Pflasteranordnungen (Zone 2a bis c), Schill-Streifen (Zone 3) und Rosettenstrukturen (Zone 4) wurden richtungsorientierte und vertikal eingeregelterte *M. arenaria* Einzelklappen (Hochkanschille) an den hinteren Säumen der Vorkommen vorgefunden (Zone 5 & 6). In den jeweiligen Rückbereichen der Schill-Vorkommen bildeten sich ausgedehnte Fleckenfelder aus dem weiter verfrachteten Schalenmaterial (Patch-Areale, Zone 7).

Die Untersuchungen zeigten, dass die Ablagerungs- und Einregelungsmuster überwiegend auf biostratinomische Vorgänge resultieren, die durch hydrodynamische Aktivitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes hervorgerufen wurden. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass neben den biostratinomischen Prozessen auch die ansteigende Morphologie der Schill-Vorkommen einen bedeutenden Einfluss auf die Klappenanordnungen und deren Position auf der Oberfläche hat. Durch die Hangneigung wurde die hydrodynamische Wirkungsgrenze des Wassers während der Tidenzyklen beeinflusst, was sich wiederum auf die hydrodynamischen- und biostratinomischen Prozesse auswirkte.

Während im zweiten Kapitel auf die Lagerungszustände sowie auf die Genese-Prozesse innerhalb der Schill-Vorkommen eingegangen wurde, soll im folgenden Abschnitt die Taphonomie und die Häufigkeitsverteilungen der *M. arenaria* Schalen diskutiert werden. Im weiteren Verlauf werden die festgestellten taphonomischen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen beiden Transekten erörtert. Abschließend erfolgt ein Vergleich mit vergleichbaren taphonomischen Arbeiten.

Im folgenden Diskussionsabschnitt wird zunächst auf die Größenhäufigkeitsverteilungen der beiden Transekte sowie der beiden Proben aus den ehemaligen Siedlungshorizonte (FWS 16 & 17) eingegangen. Dabei werden die Doppelklappen der ehemaligen Siedlungshorizonte auch getrennt voneinander betrachtet.

## Größenhäufigkeitsverteilungen

Größenhäufigkeitsuntersuchungen an *M. arenaria* Klappen wurden z. B. von Brousseau (1978a, b), Brousseau & Baglivo (1987), Jones et al. (1989), Cadeé (1989, 1992) und Strasser et al. (1999b) durchgeführt. Eine wichtige Anwendung von Häufigkeitsverteilungen ist es Alters- bzw. Größenstrukturen einer Population zu erhalten. Verläuft eine Reproduktion kontinuierlich, so wird die Größen-Häufigkeitsverteilung eine glatte Kurve mit nur einem Peak ergeben, welcher je nach altersspezifischer Sterberate unterschiedlich liegen kann. Wenn die Fortpflanzung aber saisonal erfolgt, wird ein bi- oder polymodales Häufigkeitsmuster resultieren (Dodd & Stanton 1990).

Wie die Ergebnisse zeigen, besteht im Bezug auf die Größenhäufigkeitsverteilungen ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Transekten. Demnach führt die festgestellte Normalverteilung des Sahlenburger Transektes zu einem unimodalen Kurvenverlauf. Diese Größenhäufigkeitsverteilung zeigt im Vergleich zum Fedderwarder Transekt eine deutliche Unterzahl an juvenile Einzelklappen < 3 cm. Eine vergleichende Größenzusammensetzung wie hier am Sahlenburger Transekt festgestellt, wurde auch von Cadeé (1992) an disartikulierten *M. arenaria* Akkumulationen im niederländischen Wattenmeer nachgewiesen. Cadeé (1992) bemerkte, dass in den Häufigkeitsverteilungen ebenfalls juvenile Muschel Generationen fehlten. Derartige Verteilungsformen sind nach Bouscot (1953) und Tanabe & Arimura (1987) ein typisches Indiz dafür, dass die Schalenakkumulationen über einen längeren Zeitraum durch Transportprozesse angehäuft wurden (auch Cadeé 1989).

Einen möglichen Hintergrund für das Fehlen bzw. für die Unterzahl von juvenilen Generationen in akkumulierten Schalenansammlungen erörterten beispielweise Strasser et al. (1999a). Die Autoren untersuchten die juvenil-adult Verteilungen von *M. arenaria* im Intertidal-Bereich der nordöstlichen Nordsee. Strasser et al. (1999a) diskutierten die stärkere mechanische Beanspruchung der juvenilen *M. arenaria* Klappengenerationen durch Transportprozesse die oftmals zu einer schnelleren, vorzeitigen Zerstörung führen können und somit einem Akkumulationsprozess möglicherweise entgehen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch Tanabe & Arimura (1987) bei ihren ökologischen Untersuchungen an vier Muschelarten eines intertidalen Bereiches in West-Japan. Als Grund für das Fehlen von kleinen Generationen gaben die Autoren eine Kombination von ökologischen und physikalischen Faktoren (Transportprozesse) an die auf das Schalenmaterial nach dem Ableben des Individuums einwirken.

Laut Tanabe & Arimura (1987) werden kleine Klappengrößen leichter von mechanischen Prozessen beansprucht als ausgewachsene Generationen und werden demnach als Bruchschill nicht in die Häufigkeitsverteilung mit einbezogen. Ein weiterer Aspekt ist zudem, dass kleinere *M. arenaria* Größenklassen weitaus stärker von Nahrungsräubern (z. B. Vögel oder Krebse) bedroht werden können (Strasser 1999a, b; Cadeé 1989). Zwar haben die *M. arenaria* Populationen ein hohes Reproduktionsvermögen, jedoch ist dies durch eine hohe Sterblichkeitsrate im juvenilen Alter charakterisiert (s. auch Brousseau 1978a, b; Brousseau & Baglivo 1988). Laut Zwarts & Wanink (1984) endet der Predationsdruck durch Raubvögel gewöhnlich erst nach dem Erreichen einer Klappenlänge von durchschnittlich 5 cm. Erst ab

dieser Schalengröße gelangen die Muscheln in eine relativ sichere Bodentiefe und sind somit schwerer für Räuber erreichbar.

Laut Zwarts & Wanink (1989) bevorzugen Raubvögel überwiegend *M. arenaria* Individuen die eine Schalenlänge < 4,5 cm besitzen. Dies könnte auch ein Grund dafür sein, warum es zu hohen Sterblichkeitsraten innerhalb juveniler *M. arenaria* Individuen kommt (Vgl. Brousseau 1978a; Brousseau & Baglivo 1988). Nach Dodd & Stanton (1990) zeigt eine Population mit hoher juveniler Sterblichkeit in einem Größen-Häufigkeitsdiagramm eine unimodale Verteilung und eine rapide abfallende Überlebenskurve (s. z. B. Munch-Petersen 1973; Brousseau 1978a; Brousseau & Baglivo 1988). Bei einer lebenden *M. arenaria* Population sinkt die Sterblichkeitsrate der Individuen mit zunehmendem Lebensalter ab und entspricht einer Standardüberlebenskurve vom Typ III (Hallam 1972; Pianka 1978; Jones et al. 1989). Die Kurve III kommt in der Natur am häufigsten vor und tritt bei Populationen auf die sehr viele Nachkommen wie sie beispielweise auch planktonische Larven produzieren. Die Verteilungsform des Sahlenburger Transektes entspricht mit der normalverteilten Häufigkeitsform demnach einer typischen Schalenakkumulation, die über einen längeren Zeitraum angehäuft wurde (z. B. Bouscot 1953; Cadeé 1989; Tanabe & Arimura 1987).

Da auch die Schalen des Fedderwarder Vorkommens erfahrungsgemäß über einen längeren Zeitraum akkumuliert wurden, ergibt sich die Frage, warum die Größenhäufigkeit innerhalb dieses Transektes eine bimodale und damit eine abweichende Verteilungsform gegenüber dem Sahlenburger Transekt aufweist. Auffällig ist das vermehrte Auftreten kleinerer *M. arenaria* Schalen < 3 cm, obwohl die Proben aus den beiden vorgelagerten Siedlungshorizonten (FWS 16 & 17), aufgrund ihrer postmortalen und artikulierten Lebensposition, bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden. Der offensichtlichste Grund für diese Abweichung ist der Schaleneintrag von kleinen Klappengrößen aus dem juvenil führenden Siedlungshorizont, der hier durch Probe FWS 16 repräsentiert wird. Zwar fanden sich in beiden Siedlungshorizonten *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensposition, jedoch führte nur der hangende Horizont unzählige juvenile Größenklassen (Probe FWS 16). Durch die anhaltenden Erosions- und Transportprozesse wurden diese juvenilen Klappen entlang des Transektes abgelagert und können daher vermehrt in drei Proben nachgewiesen werden. Graphisch verdeutlicht wird dies auch bei der Darstellung der unterteilten Längensklassen innerhalb der einzelnen Probenpunkte entlang des Fedderwarder Transektes (s. dazu auch Abb. 3-7).

Wie der Grafik in Abbildung 3-7 zu entnehmen sind die Klappen der Längensklasse 2,5 bis 3 cm hauptsächlich in Probe FWS 16 enthalten. Das entspricht genau dem Größenspektrum das in erhöhter Häufigkeit in den nicht normalverteilten Proben FWS 8, 11 und 13 im mittleren Bereich des Schill-Vorkommens nachgewiesen wurde.

Das Vorhandensein der juvenilen Klappengrößen innerhalb des Fedderwarder Transektes ist demnach ein klassisches Beispiel für eine mechanische Frachtsortierung der kleineren bzw. leichteren Klappengrößen entlang des Transektes (z. B. auch Jessen 1932; Dodd & Stanton 1990). Diese Größensortierung, wobei kleinere d. h. hier auch leichtere Klappen weiter verfrachtet werden als schwere ist die häufigste Sortierungsform (Etter 1994). Ein



vergleichender Sortierungsprozess wurde bereits im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit innerhalb des Zonenbereiches 2a beschrieben. Die Anwesenheit der kleineren Klappenklassen innerhalb der o. a. Proben zeigt, dass die fortschreitende Größenselektion innerhalb des Fedderwarder Transektes zur Zeit der Probenentnahme noch nicht vollständig abgeschlossen war (Hollmann 1968a).

Obwohl am Fedderwarder Transekt der Einfluss der juvenilen Schalengrößen aus der Probe FWS 16 die Häufigkeitsverteilung signifikant beeinflusst, handelt es sich wie beim Sahlenburger Transekt, ebenfalls um eine Schalenansammlung die durch anhaltende Transportprozesse generiert wurde (Bouscot 1953; Cadeé 1989; Tanabe & Arimura 1987).

Werden die Kohorten der Längenhäufigkeitsverteilungen beider Siedlungshorizonte betrachtet (FWS 16 und FWS 17), so kann eine unterschiedliche Verteilungsform innerhalb einer *M. arenaria* Population festgestellt werden. Die Verteilungsform innerhalb der jüngeren Generation (FWS 16) zeigt eine nicht normalverteilte Zusammensetzung, wogegen die adulten Klappen der Probe FWS 17 eine normale Verteilungshäufigkeit aufzeigen.

In Anlehnung an Cadeé (1992) resultieren diese Ergebnisse aus dem räumlichen Separationsprozess zwischen juvenilen und adulten *M. arenaria* Generationen zu Lebzeiten (z. B. auch Dodd & Stanton 1990; Kidwell & Bosence 1991). Der Ursprung hierfür findet sich im Fortpflanzungsmechanismus und in der endobenthischen Lebensweise der *M. arenaria*. Da die Reproduktion der *M. arenaria* nicht kontinuierlich verläuft, sondern es sich um eine saisonal abhängige Fortpflanzung handelt, kommt es zu den unterschiedlichen Verteilungsformen zwischen den beiden *M. arenaria* Horizonten (s. auch Beukema 1982, 1992). Abhängig von ihrer geographischen Verbreitung laicht *M. arenaria* im Wattenmeer einmal (Günther 1992) und in anderen Regionen zweimal jährlich ab dem Frühling (Brousseau 1987).

Wie bereits im ersten Kapitel dieser Arbeit erläutert, hat jedes *M. arenaria* Alter, abhängig von ihrer Schalengröße ein ganz bestimmtes Siedlungsniveau im Sediment (Kühl 1950, 1951; Schäfer 1962). Je größer bzw. älter ein Individuum ist, desto tiefer können sich die Muscheln eingraben. Demnach kommt es also zu einer räumlichen Separation verschiedener *Mya*-Generationen. Aus diesem Grund finden sich unterschiedliche Generationen nur in bestimmten Höhenniveaus, stockwerkartig innerhalb der untersuchten Siedlungshorizonte (s. auch Kap. 2). Laut Kühl (1950) sind *M. arenaria* Siedlungen zwar nach Altersklassen getrennt, doch können an einigen wenigen Plätzen wie es auch in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, auch mehrere Altersklassen d. h. vom Junggut (bis 20 mm Schalenlänge) bis zur adulten Muschel in den entsprechenden Bodenschichten angetroffen werden.

Beide ehemaligen Siedlungshorizonte sind daher ein anschauliches Beispiel für die räumliche Separation der juvenilen Muschel-Individuen von den adulten Generationen (Cadeé 1992). In Anlehnung an Tanabe & Arimura (1987) sowie Strasser et al. (1999a, b) entsprechen die Längenhäufigkeitszusammensetzung beider Siedlungshorizonte, aufgrund ihrer erhaltenen Lebensposition eher einer lebenden *M. arenaria* Generation als einer disartikulierten Schalenakkumulation von *M. arenaria* Einzelklappen. Die Größenhäufigkeitsverteilungen beider Transekte zeigen dagegen einen grundlegenden

Unterschied zu den in Lebensposition befindlichen Doppelklappen. Juvenile Exemplare sind demnach in *M. arenaria* Akkumulationen stark unterrepräsentiert. Die Häufigkeitszusammensetzung auf den beiden Schill-Vorkommen sind das Resultat eines durch Transportprozesse zusammengeführte autochthone bzw. paraautochthone Schalenakkumulation (s. auch Schneider-Storz et al. 2008).

### **Frachtsonderung zwischen linker und rechter Schalenhälfte**

Bis auf die Doppelklappen der Proben FWS 16 und FWS 17, welche aus den beiden ehemaligen *M. arenaria* Horizonten stammen, handelt es sich beim übrigen Schalenmaterial um disartikulierte *M. arenaria* Einzelklappen.

Bereits in der Vergangenheit wurden besonders eingehend Frachtsonderungsprozesse von Muschelklappen untersucht (z. B. Klähn 1932; Lever 1958). Arbeiten zur Frachtsortierungen von disartikulierten *M. arenaria* Schalenhälften wurden beispielweise von Richter (1922, 1924), Schäfer (1962), Cadeé (1992) und Schneider-Storz et al. (2008) durchgeführt. Bei ungleichklappigen Muscheln ist ein derartiger Frachtvorgang leicht verständlich, wenn die Gestalt und Gewicht beider Klappen stark voneinander abweichen. Aber auch bei nahezu gleichklappigen Muscheln, wie hier der *M. arenaria* kann sich der Unterschied hinsichtlich Form und Gewicht beider Klappen in ähnlicher Weise auswirken. Durch starke Strömungen können verschiedene Skelettelemente eine Sortierung erfahren. Relativ häufig ist dabei eine Sortierung nach der Größe, wobei kleinere Skelettelemente oftmals weiter verfrachtet werden als größere.

Unterschiedliche Verfrachtungsformen von Muschelklappenhälften können dort vorkommen, wo sich linke und rechte Klappe deutlich in ihrer Form unterscheiden (Dodd & Stanton 1990). Die Bedeutung dieser Frachtsonderung wird durch die Ankerwirkung des Ligamentlöffels (Chondrophor) der linken Klappenhälfte der *M. arenaria* erhöht. Aufgrund dieses in einem rechten Winkel zur Schale abstehenden Ligamentlöffels kann es zu einer Frachtsonderung zwischen beider *M. arenaria* Schalenhälften kommen. Das der Ligamentlöffel einen wichtiger Einfluss während des Transportprozesses bei disartikulierten *M. arenaria* Klappen hat, wurde bereits von Richter (1922, 1924) und später von Schäfer (1962) beschrieben. Hierbei fungiert der Ligamentlöffel an konkav liegenden Klappen (Wölbung oben) wie eine Art Anker im Sediment, so dass ein mechanischer Transport dadurch erschwert wird (Richter 1922, 1924). Aufgrund des Fehlens eines Ligamentlöffels an der rechten Klappe wird diese über den Wattflächen weiter in küstenwertiger Richtung verfrachtet und schließlich an der Hochwasserlinie als supratidale Schalenakkumulationen konzentriert (Richter 1924; Lever 1958; Cadeé 1992). In Folge dessen finden sich durch diesen Sortierungsprozess mehr linke Klappenhälften auf den Gezeitenflächen wieder (auch Cadeé 1994a, b).

Die Ergebnisse der durchgeführten Binomial-Tests zeigen nur am Sahlenburger Transekt eine signifikante Differenzierung von linken und rechten Klappenhälften, so dass man hier von einer eindeutigen Frachtsonderung sprechen kann. Am Fedderwarder Transekt konnte dagegen nur an drei Probenpunkten ein signifikanter höherer Anteil an linken Klappenhälften

festgestellt werden, so dass hier nur von einer tendenziellen Frachtsonderung ausgegangen werden muss. Vermutlich ist hier die Distanz zu den ehemaligen Siedlungshorizonten mit den noch artikulierte Doppelklappen zu gering, so dass eine hydrodynamisch gesteuerte Frachtsonderung erst nach einer längeren Distanz statistisch nachzuweisen ist. Aufgrund des intertidalen Standortes beider Transekte bewirken hydrodynamischen Prozesse den starken Einfluss auf die festgestellte Frachtsonderung. Zu vergleichbaren Ergebnisse kamen auch Schneider-Storz et al. (2008) am Dorumer Schill-Vorkommen (s. dazu Kap. 2). Neben der hier beschriebenen hydrodynamischen Differenzierung von Schalenresten können auch andere Ursachen zu einer Frachtsonderung führen. Beispielsweise können äolische Prozesse (Cadée 1992), biologische Faktoren z. B. durch Vögel verursachte Sortierung zu einer Frachtsonderung von Schalenmaterial führen (s. z. B. auch Cadée 1994a).

### **Verhältnisse *M. arenaria* Einzelklappen vs. Bruchschill/Restanteil**

Die Ergebnisse der Gewichtsverhältnisse zwischen ganzen *M. arenaria* Einzelklappen sowie dem Bruch- und Restanteil zeigen entlang beider Transekte starke Schwankungen. Innerhalb einzelner Probenpunkte ist jedoch ein deutlicher Trend zu erkennen. An beiden Transekten ist festzustellen, dass die Proben aus den Hochkantschill- und Rosettenbereichen im Vergleich zu den Pflaster-Bereichen einen deutlich geringeren Anteil an Bruch- und Restmaterial enthalten.

Besonders am Fedderwarder Schill-Vorkommen ist zu erkennen, dass der Bruchanteil entlang der morphologischen Steigung tendenziell zunimmt, bevor er am HKS-Saum (ab FWS 3) des Transekts deutlich abnimmt (s. auch Abb. 3-11a). Dies verdeutlicht wie eng die Hochkantschill-Strukturen aneinander geschachtelt sind, so dass Schalenfragmente oder auch kleinere Schalen anderer Muschelarten nur schwer zwischen den vertikalen *M. arenaria* Klappen eindringen können. Dies ist auch die Hauptursache dafür, weshalb an den Hochkantstrukturen die geringsten Bruchanteile vorzufinden sind. Eine andere Situation zeigen die Hohlräume bei Rosettenanordnungen auf, da größere Freiräume durch die wirren Lagerungsverhältnisse der Klappen entstehen, können diese Hohlräume oftmals als Fallenstrukturen für diverse Bruchstücke und kleinere Muschelschalen fungieren.

Nach Dodd & Stanton (1990) können Schalenbruchstücke allgemein als guter Indikator für Wasserenergien und Transportprozesse herangezogen werden. Demnach kann das Verhältnis zwischen den ganzen Klappen und dem Bruchschill eventuell als Indiz für die hydrodynamischen Intensitäten entlang der Transekte genutzt werden. Zertrümmerungsprozesse von Schalenmaterial sind sowohl aus hochenergetischen Bereichen (für Überblick s. auch Kidwell & Bosence 1991) als auch für niedrige Energie-Regime bekannt. Ein hoher Anteil an fragmentierten Hartteilen deutet auf häufige, starke Wasserbewegungen und Aufarbeitung oberhalb der normalen Wellenbasis hin.

## **Diskussion der univariaten, semi-quantitativen taphonomischen Analyse**

Nach den Ergebnissen der taphonomischen Untersuchung zeigen die *M. arenaria* Einzelklappen in unterschiedlichen Zonenbereichen verschiedene Beanspruchungsgrade. Die Ergebnisse zeigen des Weiteren für beide Transekte ein ähnliches taphonomisches Beanspruchungsmuster, so dass eine Einteilung in verschiedene Gruppen erfolgte.

### Abrasion

Um eine Differenzierungen zwischen mechanisch bedingten Abrasionsprozessen von chemischen Auflösungserscheinungen sowie mikrobohrende Algen erhalten zu können sind laut Parson & Brett (1991) oftmals quantitative Analysen mittels eines Elektronenmikroskops erforderlich (s. z. B. auch Best & Kidwell 2000a; Cutler 1995).

Mit der hier angewandten relativ einfachen makroskopischen Untersuchungsmethode lassen sich die Abrasionsprozesse, die hauptsächlich eine Abglättung der Skulptur auf der Schalenoberfläche verursacht, dennoch von chemischen Auflösungs- und Bioerosionserscheinungen differenzieren (auch Parson & Brett 1991).

Die in der vorliegenden Arbeit festgestellten Abschleiß-Erscheinungen an den *M. arenaria* Klappen sind häufige Abnutzungserscheinungen die für hochenergetische küstennahe Strand- und Gezeitenbereiche charakteristisch sind (z. B. Brett 1990; Parson & Brett 1991). Einige Autoren wie beispielsweise Pratje (1929), Schäfer (1962), Seilacher (1973) und Cadée (1999) beschrieben bereits derartige Abrasionserscheinungen die durch Sand- oder Rollprozesse entstanden sind. Jüngere Untersuchungen von Abschleißprozessen an Molluskenschalen wurden ebenfalls von Meldahl & Flessa (1990) durchgeführt. Vergleichende Untersuchungen mit der Anwendung einer skalierten Einteilung führten beispielsweise auch Davis et al. (1989a) und Parson (1989) durch.

Im Untersuchungsgebiet werden Abrasionsprozesse hauptsächlich durch kräftige Bewegungen der Sand- und Schalenpartikel welche durch hydrodynamische Kräfte aufgewirbelt und entlang der Schalenoberfläche hin und her bewegt werden hervorgerufen. Der Sandschliff dominiert dabei gewöhnlich zu Zeiten, in denen die Sedimente nur oberflächlich aufgewirbelt werden. Nach Hollmann (1968a) treten derartige Erscheinungen in Tide-Gebieten sowohl bei Ebbe als auch bei Flut auf. Jede Wasserbewegung (Schwall und Sog der Wellen oder Strömungen) wird unmittelbar über dem Wattboden von treibend-schleifenden Sandfahnen begleitet, so dass mit der Stromstärke die Schleppfracht und die Schliffwirkung ansteigen. Der Einfluss auf die am Boden liegenden Schalen nimmt daher bei wachsender Stromstärke anfänglich zu bis auch die Schalen in Bewegung geraten, sinkt dann aber umso mehr ab, je größer die Transportgeschwindigkeit in der gleichen Strömung wird (Hollmann 1968a).

Driscoll & Weltin (1973) stellten bei Experimenten fest, dass derartige Abrasionserscheinungen nur für brandungsbeeinflusste Küstenbereiche wichtig sind und es in Folge dessen zu Reduktionsprozessen an den Molluskenschalen kommen kann, was

wiederum letztendlich oftmals auch zu einer endgültigen Zerstörung führt (s. auch Powell & Davis 1990). Dieser enge Zusammenhang zwischen Abschleiß- und Bruchprozessen zeigt sich auch signifikant in den Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aufgrund des hohen Korrelationskoeffizienten zwischen Abrasion und Fragmentation. Zu vergleichenden Korrelationen zwischen Abrasions- und Fragmentationsbeanspruchung kamen im Arbeitsgebiet ebenfalls Schneider-Storz et al. (2008) bei ihren Untersuchungen am Dorumer Schill-Vorkommen (s. auch Kap. 2).

Neuere Untersuchungen von Newell et al. (2007) zeigen zudem, dass Schalen auch ohne weite Transportwege eine Zerstörung allein nur durch anhaltende *in situ* einwirkende Abrasionsprozesse erfahren können.

Nach Hallam (1967) ist die mechanische Aufbereitung von kleinen Molluskenschalen im allgemeinem prozentual geringer als bei größeren. Die Verhältnisse liegen also bei der Abrasion gerade umgekehrt wie es normalerweise bei einer chemisch beschränkten Auflösung der Fall ist, die dagegen mit abnehmender Schalengröße ansteigt (aus Müller 1992). Die Ursache besteht im wesentlichen darin, dass bei kleineren Schalen die Schwebefähigkeit größer, die Sinkgeschwindigkeit jedoch geringer ist. Je umfangreicher die Schale, umso stärker ist in der Regel auch die Tendenz, am Boden und im Bereich des Abschleifs zu bleiben (Tauber 1942). Der ermittelte hohe, positive Korrelationskoeffizient zwischen Abrasion und Schalengröße ist damit zu erklären, dass bei *M. arenaria* die Schalendimensionen proportional zueinander wachsen. Würde dies nicht der Fall sein so würden negative Korrelationen resultieren. Somit steigt der Beanspruchungsgrad durch Abrasionsprozesse mit dem Anstieg der verfügbaren Angriffsfläche einer Schale (auch Parson & Brett 1991; Boyajian & Thayer 1995).

Wie effektiv Abrasionsprozesse auf das entsprechende Schalenmaterial wirkt, hängt des Weiteren von der Korngröße des schleifenden Sediments ab (Parson & Brett 1991). Nach Driscoll & Weltin (1973) werden die stärksten Beanspruchungen durch feine bis mittlere Korngrößen verursacht, da diese im Wasser stärker bewegt werden. Bei groben Korngrößen nimmt dagegen die Beweglichkeit der Sedimentpartikel deutlich ab (Klähn 1932; Driscoll & Weltin 1973). Mit dem zuletzt erwähnten Aspekt lassen sich auch die relativ starken Abrasionsbeanspruchungen der Schalen im Arbeitsgebiet erklären, da im Untersuchungsgebiet vorwiegend Fein- bis Mittelsande auf den Wattflächen vorherrschen (s. auch Kap. 1).

Das Fehlen einer Facettenbildung an den *M. arenaria* Schalen könnte ebenfalls auf die relativ feinen und weichen Sedimentanteile im Wasser deuten und kann laut Schäfer (1962) im Einzugsgebiet als Indiz für Schlick- bis Mischwattbereiche genutzt werden. Nach Müller (1992) muss für einen einseitigen Abschleiß, der dann im weiteren Verlauf zu einer Facettenbildung führen kann, eine horizontale Einkippung d. h. eine stabile Lage der Schale erfolgen. Diese Lagerungspositionen sind auf den Schill-Vorkommen nur in Bereichen möglich, in denen die Klappen vorwiegend als Pflaster vorliegen. Ein weiterer Gesichtspunkt ergibt sich durch die relativ flache Schalenform der *M. arenaria*, da Facettenbildung im

Gezeitenbereich häufiger nur an hoch geformten Schalen wie beispielsweise *C. edule* beschrieben wurden (z. B. Klähn 1932; Pratje 1929; Tauber 1942).

Laut Parson & Brett (1991) kann der Verlust feiner Schalenskulptur wie sie die *M. arenaria* besitzt bereits in den ersten Stunden erfolgen. Aufgrund des vorherrschenden makrotidalen Regimes im Untersuchungsgebiet könnten die Abrasionserscheinungen daher in einer nur kurzen Zeitspanne, unmittelbar nach dem Erosionsprozess der Doppelklappen aus ihren Siedlungshorizonten erfolgt sein (Parson & Brett 1991). Dass die Klappen nach dem Freilegen recht schnell durch Abrasionsprozessen erfasst werden, verdeutlichen die beschriebenen geopetalen Abrasionen an den Hinterenden der *M. arenaria* Doppelklappen.

Die Abrasionserscheinungen im vorliegenden Fall sind hauptsächlich eine Ursache der hydro-physikalischen Kräfte im Untersuchungsareal. Das Ausmaß der Abrasion ist dabei von der Zeitspanne in der eine *M. arenaria* Klappe an der Sedimentoberfläche verbleibt sowie von der umgebenden hydrodynamischen Energie bzw. von der Korngröße des Sedimentes abhängig (Parson & Brett 1991). Ein weiterer Faktor ist die jeweilige Beschaffenheit bzw. die Mikrostruktur der hier untersuchten Muschelschale sowie ihre Größe, die damit die entsprechende Angriffsfläche liefert (Carter 1980; Gabriel 1981; Currey 1990).

### Fragmentation

Schalen-Fragmente gelten allgemein als guter Indikator für Wasserenergien und Transportprozesse (Dodd & Stanton 1990). Die Stärke einer Schale kann als Funktion einer Vielzahl von morphologischen Variablen wie Größe, Dicke, Form, Masse, Mikrostruktur, Skulptur und organische Zusammensetzung abhängen (aus Zuschin & Stanton 2001). Zertrümmerungsprozesse von Schalenmaterial sind sowohl aus hochenergetischen Bereichen (für Überblick s. Kidwell & Bosence 1991) als auch für niedrige Energie-Regime bekannt. Ein hoher Anteil an fragmentierten Hartteilen deutet auf häufige, starke Wasserbewegungen und Aufarbeitung oberhalb der normalen Wellenbasis (Etter 1994). Die hier untersuchte Fragmentierungen an den Klappen beschränkt sich jedoch nur auf den jeweiligen Schalenabbruch an ganzen Klappen und beinhaltet nicht die komplette Zerstörung der gesamten Schale (auch Boyajian & Thayer 1995; Schneider-Storz et al. 2008).

Eine Fragmentierung kann sowohl das Resultat von physikalischen Vorgängen als auch ein Effekt biologischer Aktivitäten sein (Vermeij 1983a; Powell et al. 1989). Nach Zuschin et al. (2003) können Bruchprozesse aber auch oftmals aus einer ganzen Reihe von physikalischen und biologischen Prozessen verursacht werden. Nach Raffaelli (1978) können auch durch Wellen hervorgerufene Steinschläge dazu beitragen Schalen zu beschädigen bzw. zu zerstören. Bei Molluskenschalen wird eine Zertrümmerung meist durch harte Stöße verursacht oder sind ein Resultat der Transportprozesse sowie der Kollision der Schalen untereinander bzw. mit anderen Objekten (Dodd & Stanton 1990; Parson & Brett 1991; Kidwell & Bosence 1991).

Zu den wichtigsten biologischen Faktoren die eine Fragmentierung von Schalenmaterial verursachen können zählt vor allem der Prädatismus (Räuber-Beute) welcher im Untersuchungsgebiet zu Niedrigwasserzeiten durch Vögel oder auch durch Krebse verursacht werden können (z. B. Trewin & Welsh 1976; LaBarbera 1981; Walker & Yamada 1983; Vermeij 1983b; Meldahl & Flessa 1990; Checa 1993; Cadée 1994a, b, c, 1995; Cadée et al. 1997; Cadée & Wesselingh 2005). Ebenfalls entscheidend können aber auch Bioturbationsprozesse sein (s. z. B. Cadée 1976, 1979).

Aufgrund der geschützten Einbettungslage im Sediment sind *M. arenaria* zu Lebzeiten hervorragend vor Nahrungsräubern geschützt, so dass eine Fragmentierung der Schale vorwiegend erst postmortal erfolgt. Disartikulierte und somit fleischleere *M. arenaria* Klappen sind für Crustaceen als potentielle Nahrungsgeber unattraktiv und kommen als Verursacher der Bruchprozesse im Arbeitsgebiet wahrscheinlich weniger in Frage. Dagegen kommen Seevögel als mögliche Verursacher eher in Betracht, da diese oftmals Klappen im Zuge ihrer Nahrungssuche z. B. durch Picken mit ihrem Schnabel (s. auch Vermeij 1983a) umdrehen und die Klappen beschädigen könnten (auch Cadée 1994a, b, 1995, 1999; Cadée & Wesselingh 2005). Im vorliegenden Fall werden biogene Verursacher der Fragmentierung aufgrund der postmortalen artikulierten Klappen sowie der zeitlich begrenzten Exponierung auf den Schill-Vorkommen als gering eingeschätzt.

Starke physikalische Fragmentierungsprozesse finden sich laut Parson & Brett (1991) an Ständen sowie in aktiven Gezeitenbereichen in denen starke hydrodynamische Prozesse wirken und große Kornfraktionen vorzufinden sind. Geringe Fragmentationsprozesse wirken dagegen in subtidalen Bereichen und geschützten Lagunen (Parson & Brett 1991). Die in den Ergebnissen beschriebenen Fragmentationserscheinungen an den Klappen setzen im Arbeitsgebiet in der Regel erst nach dem Ableben der *M. arenaria* Muschel ein (Vgl. Zuschin & Stanton 2001). Bestätigt wird dieser Aspekt durch den festgestellten geringen Beanspruchungsgrad der noch artikulierten *M. arenaria* Doppelklappen innerhalb der ehemaligen Siedlungshorizonte (s. auch Abb. 3-13a). Aufgrund ihrer relativ geschützten Einbettungslage im Sediment sind die Muscheln zu Lebzeiten bzw. bis zur Erosion hervorragend durch großflächiges Zerbrechen geschützt.

Häufig können auch Kompaktionsprozesse in Folge von Auflastdruck zu Fragmentationserscheinungen führen (Hoffmann 1976; Kowalewski 1990), jedoch ist dies abhängig von der Korngröße sowie dessen Relation zur jeweiligen Schalenmaterial (z. B. Dodd & Stanton 1990). Die resultierenden Bruchmuster hängen dann in erster Linie von der Geometrie und der Dicke der kompaktierten Schalen ab (Briggs 1990). Aufgrund der oberflächennahen Beprobung wird dieser Prozess höchstwahrscheinlich erst in tieferen Schichten der Schill-Vorkommen zu weiteren Bruchprozessen führen und ist für die hier bearbeiteten Proben als Ursache nicht primär relevant.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Schalengröße für die Stärke einer Fragmentation an *M. arenaria* Klappen nicht relevant ist. Der Fragmentierungsgrad ist an beiden Transekten

nahezu unabhängig von der jeweiligen Schalengröße. Laut Ginsburg (1956) hängt die Schalenstärke von der jeweiligen mikrokristallinen Struktur sowie von der organischen Matrix ab in welche Größe und Form die Partikel bzw. Objekte zerfallen. Auch Brenner & Einsele (1976) zeigten, dass die Stärke einer Schale mit morphologischen Parametern wie Festigkeit, Krümmung und Mikrostruktur korreliert. Die Autoren Taylor & Layman (1972) haben zudem gezeigt, dass die Schalenstärke im allgemeinen mit der mikrostrukturellen Einheit der Schale zusammenhängt.

Der in den Ergebnissen beschriebene Fragmentationsprozess wirkt sich auf alle Längensklassen nahezu gleichstark aus. Die Fragmentation kann als Folge des Kontaktes zwischen den Klappen während des Transportweges über die gesamte Transektlänge interpretiert werden (auch Kowalewski et al. 1995; Hallam et al. 1996). Erst wenn der Transportprozess beendet ist bzw. die Klappen den hydrodynamischen Einflüssen entzogen werden nimmt der Einfluss der Fragmentation ab (Vgl. Boyajian & Thayer 1995).

Obwohl keine qualitative Unterscheidung der *M. arenaria* Bruchstücke und Klappenfragmente in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde, kann im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass vorwiegend mechanisch-physikalische Prozesse als Hauptursache für die dokumentierten Bruchprozesse an dem Schalenmaterial verantwortlich sind (auch Schneider-Storz et al. 2008). Einen weiteren wichtigen Aspekt im Arbeitsgebiet spielen die saisonalen Sturmperioden, da infolge dessen Fragmentations-Ereignisse deutlich intensiviert werden können (s. dazu auch Hollmann 1968a).

### Inkrustation

Inkrustationsereignisse sind in marinen Milieus ein verbreitetes Phänomen. Ein Bewuchs mit inkrustierenden Organismen kann oftmals als Indikator herangezogen werden, um die Grenzfläche zwischen Sediment- und Wasseroberfläche zu bestimmen (Parson & Brett 1991). Einige Hartkomponenten in mariner Umgebung wie im vorliegenden Fall die Muschelschalen der *M. arenaria* werden häufig erst nach dem Tode des Individuums durch inkrustierende Organismen besiedelt. Aufgrund der endobenthischen Lebensweise der *M. arenaria* erfolgt der Bewuchs ihrer Klappen z. B. durch Balaniden erst postmortal entweder noch in Lebensposition oder bereits umgelagert (Hertweck 1979a, b). Befinden sich die Doppelklappen noch in der *in situ* Lebensposition, also halb aus dem Sediment herausragend, so beschränkt sich ein Bewuchs nach Hertweck (1979b) oftmals nur auf das hintere Ende der Doppelklappen. Diese zwar postmortale, aber noch in Lebensstellung erfolgte Inkrustation durch Balaniden zeigt die Probe FWS 17 aus dem ehemaligen Siedlungshorizont des Fedderwarder Transekts.

Untersuchungen über das Vorhandensein von inkrustierenden Organismen auf Schalenmaterial wurden z. B. von Meldahl & Flessa (1990) durchgeführt. Schätzungen von Inkrustationen mit anschließender Einteilung in Häufigkeitsskalen wurden von Fürsich &



Flessa (1987) durchgeführt. Vergleichende Methoden mittels ternären Diagrammen führten u. a. Kowalewski et al. (1994, 1995), Hallman et al. (1996) und Kidwell et al. (2001) durch.

Meldahl & Flessa (1990) stellten fest, dass in Niedrig-Energie Bereichen häufiger Inkrustationserscheinungen vorzufinden sind als in hochenergetischer Umgebung. Ähnliche Beobachtungen sind auch in der vorliegenden Untersuchung festzustellen. An beiden Transekten weisen die Klappen aus Pflaster-Bereichen aufgrund der dort stärker einwirkenden Wasserdynamik einen deutlich niedrigeren Inkrustationsgrad auf als Klappen aus wellengeschützten Bereichen (s. auch Abb. 3-15 c & g). In diesen Transektbereichen herrschen durch den Tidenzyklus oftmals so starke Umlagerungs- und Abschleißprozesse, dass es schnell zum Abrieb von festsitzenden Organismen kommen kann (auch Parson & Brett 1991). Infolge dessen konnten häufig auch nur noch Basisplatten oder reliktsche Abdrücke von Balaniden auf den Klappenoberflächen nachgewiesen werden.

Werden die Klappen in den rückwertigen Bereich der Schill-Vorkommen transportiert und abgelagert, so sind sie dort geringeren hydrodynamischen Bedingungen ausgesetzt. Dies kann zu einem längeren stationären Aufenthalt der Klappen in diesen Bereich führen, so dass das angehäuften Schalenmaterial als Hartsubstrate für diverse inkrustierende Organismen (z. B. Balaniden, Bryozoen) fungieren kann. Dieser Zustand dauert so lange an, bis Transport-, Abrasions- und/oder Fragmentationsprozesse erneut auf das Schalenmaterial (z. B. Sturmereignisse) einwirken.

An beiden Transekten kann eine Zunahme der Inkrustationsrate mit steigender Schalengröße festgestellt werden. Dieser Effekt lässt sich, ähnlich wie bei der Abrasion auch, durch die verfügbare Schalenoberfläche erklären (Vgl. Parson & Brett 1991).

Neben der stärkeren Inkrustationsrate innerhalb der Patch-Areale zeigen auch Hochkantschill-Bereiche erhöhte Inkrustationsgrade auf. Dies ist mit den Lagerungsverhältnissen innerhalb dieser Bereiche zu erklären, da Klappen die senkrecht hintereinander angeordnet sind oder sich in Rosettenstrukturen befinden sich gegenseitig vor Abrasionsprozesse schützen. Dieser Aspekt wird durch die signifikante Korrelation zwischen Abrasion und Inkrustation bestätigt. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Transekt-Bereichen zeigen ebenfalls die ternären Diagramme.

Eine Inkrustation kann jedoch auch eher mit der Exponierungslage des Schalenmaterials zusammenhängen als mit der hydrodynamischen Energie welche auf das Material einwirkt (s. Parson & Brett 1991). Dies ist damit zu erklären, dass inkrustierende Organismen oftmals Schwierigkeiten damit haben sich auf Schalenmaterial festzusetzen, dass abwechselnd mit Sediment überdeckt und im nächsten Moment wieder freigelegt wird (Parson & Brett 1991). Der Grad der Inkrustation wird also durch die Interaktion zwischen dem bestehenden Energielevel sowie der Exponierungsdauer gesteuert (Parson & Brett 1991).

Kowalewski et al. (1995) haben beispielweise für Schalenansammlungen des supratidale Bereiches (Cheniers, Baja California, Mexico) geringe Inkrustationsraten festgestellt, da

durch die Strandlage der Schalen eine Bedeckung mit Wasser jeweils nur für kurze Zeitintervalle zu Springtidenzeiten erfolgte.

Im vorliegenden Fall jedoch befinden sich beide untersuchten Schill-Vorkommen innerhalb des intertidalen Gezeitenbereiches der zweimal am Tag für jeweils ca. 6 Stunden komplett mit Wasser überdeckt ist. Vergleichend zu den vorliegenden Ergebnissen dokumentierten Meldahl & Flessa (1990) bei ihrer bio- und taphofaziellen Untersuchung, dass im niedrigeren intertidalen Bereich aufgrund höherer hydrodynamischer Energie geringere Bioerosions- und Inkrustationsraten vorherrschen. Eine Erklärung für die hier vorliegenden Ergebnisse begründet sich in der Umgebungsenergien welche auf die jeweiligen Schill-Vorkommen einwirken und so die Stabilität und Umarbeitungsprozesse der Schalen auf den Vorkommen regulieren (Vgl. Meldahl & Flessa 1990). Als geeignetes Hartsubstrat für inkrustierende und bioerodierende Organismen müssen die Schalen eine gewisse Zeit stabil auf der Sedimentoberfläche verbleiben (Meldahl & Flessa 1990). Innerhalb der beiden untersuchten Transekte sind diese Bedingungen nur in den rückwertigen Patch-Arealen vorzufinden.

### Randerhaltung

Mittels der Randerhaltung wird der Zustand des äußeren Schalenrandbereiches dokumentiert. Diese detaillierte Betrachtung von kleineren Beschädigungen ermöglicht eine Distanzierung von minimalen mechanischen Beanspruchungsspuren gegenüber der bereits diskutierten größeren Fragmentation. Bislang wurden Randerhaltungszustände seltener in taphonomischen Analysen mit einbezogen (z. B. Kowalewski et al. 1995; Best & Kidwell 2000b; Kidwell et al. 2001; Powell et al. 2002; Dominici 2004; Lazo 2004; Cintra-Buenrostro et al. 2005). Da der Schalenrand einer *M. arenaria* Klappe den dünnsten Schalenbereich repräsentiert, ist es nicht sonderlich verwunderlich, dass in der vorliegenden Arbeit die Randerhaltung die stärkste Gewichtung aller aufgenommen taphonomischen Merkmale in der Analyse aufweist.

Wie bei der Fragmentation können auch Kantenabschlagungen an Molluskschalen oftmals durch eine ganze Reihe von physikalischen aber auch biologischen Prozessen verursacht werden (Best & Kidwell 2000b; Zuschin et al. 2003; Cintra-Buenrostro et al. 2005). Beispiele für biologisch verursachte Randbeschädigungen geben z. B. Cintra-Buenrostro et al. (2005) für Crustaceen und Kowalewski et al. (1997), Kowalewski & Flessa (2000) für durch Seevögel verursachte Schäden. Einige dieser erwähnten Räuber können bei ihrer Nahrungssuche bzw. Aufnahme die Schalen entweder vollständig zerstören oder auch nur dessen Ränder beschädigen (für Überblick s. Alexander & Dietl 2003; Zuschin et al. 2003). Nach einigen Autoren kann aber auch eine Kombination von physikalischen Abrieb und chemischen Lösung für Randbeschädigungen verantwortlich sein (z. B. Cutler 1987; Davies et al. 1989). Anthropogene Randbeschädigungen z. B. während der Probenentnahme oder der Reinigung sind zudem ebenfalls möglich (Kidwell et al. 2001).

Aufgrund der endobenthischen Lebensweise der *M. arenaria* können die festgestellten Rand-Beschädigungen aber auch schon zu Lebzeiten der Muschel durch sogenannte prämortale Grabprozesse verursacht worden sein (Checa 1993; Alexander & Dietl 2001). Um derartige Beschädigungen nachweisen zu können wären jedoch Untersuchungen an Doppelklappen erforderlich gewesen, die noch vollständig im Sediment eingebettet waren. Da die artikulierte Doppelklappen des Fedderwarder Transektes bei der Probenentnahme bereits zu Hälfte freierodiert waren, kann zwar davon ausgegangen werden, dass die Randbeschädigungen vermutlich erst nach dem Erosionsprozess erfolgte, dennoch können Beschädigungen durch Grabungsprozesse generell hierbei nicht völlig ausgeschlossen werden. Diesbezügliche genaue Untersuchungen an *M. arenaria* sind in der zugänglichen Literatur bislang nicht erwähnt worden.

Experimentelle Untersuchungen zur Unterscheidung zwischen postmortalen physikalischen Beschädigungen und prämortalen Ablättern von Schalenrandstrukturen wurden dagegen bereits von Cintra-Buenrostro et al. (2005) durchgeführt. Diese Experimente verdeutlichen, dass es Unterschiede zwischen physikalisch verursachte und biologisch bedingte Beschädigungen gibt. Ferner zeigt sich, dass typische mechanische Schäden nicht auf bestimmte Randbereiche begrenzt sind, sondern eher zu unregelmäßigen, oftmals senkrecht verlaufenden Beschädigungen führen (Cintra-Buenrostro et al. 2005).

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung decken sich gut mit diesen Beschreibungen und zeigen zudem auf, dass an *M. arenaria* Klappen oftmals der posteriore Schalenrand häufiger von Kantenabschlagungen betroffen ist als der übrige Schalenbereich. Grund hierfür ist der mehr schichtige Schalenbau der *M. arenaria*, so dass nur die obersten, oberflächennahen Prismenlagen (Ostrakum) in Randnähe abgesplittert werden. Bereits in anderen Studien wurde festgestellt, dass generelle Beschädigungen oftmals an der äußeren Schalenoberfläche höher ausfallen als in den inneren Schalenoberflächen (z. B. Davies et al. 1989a; Staff & Powell 1990; Kowalewski et al. 1995; Kidwell et al. 2001).

Die Ergebnisse zeigen, dass besonders in Bereichen in denen die Schalen in Pflasterlagerung liegen oftmals starke Kantenabschlagungen nachgewiesen werden können, da hier die Schalen vermehrt über den Untergrund in rückwertigere Bankbereiche gleiten und es dadurch zu Absplittierungen am Kantenbereich kommen kann. Die stärksten Kantenbeanspruchungen zeigen Proben des mittleren Pflaster- sowie des rückwertigen Bankbereiches (Patches) auf. Die starke Beanspruchung der Kanten in Bereichen in denen die Schalen oftmals in senkrechter Position lagern (Rosettenstrukturen, Hochkantenordnungen) lassen sich durch die Anpress- und Reibungsprozesse zurückführen die sich besonders an den dünnen Kanten bemerkbar machen. Einen besseren Erhaltungszustand zeigen dagegen die Klappenränder von jungen *M. arenaria* Schalen. An dieser Stelle lässt sich auch der nachgewiesene sehr hohe signifikante Zusammenhang zwischen Randerhaltung und Klappenlänge erklären, da mit der Klappengröße auch die verfügbare Randfläche zunimmt (Parson & Brett 1991). Bei Molluskenschalen wird eine Zertrümmerung meist durch harte Stöße verursacht oder sind ein Resultat des

Transportprozesses sowie der Kollision der Schalen untereinander bzw. miteinander (Dodd & Stanton 1990; Parson & Brett 1991; Kidwell & Bosence 1991). Aufgrund des bekannten Transportweges, beginnend mit der Erosion aus den Siedlungshorizonten wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass hauptsächlich mechanische-physikalische Prozesse als Ursache der Kantenabschlagung verantwortlich sind (auch Schneider-Storz et al. 2008). Der festgestellte hohe Beanspruchungsgrad der Schalenränder ist eine Folge des Transportprozesses und der sich ständig veränderten biostratinomischen Prozesse die beim Kontakt der Klappen untereinander entstehen können (auch Kowalewski et al. 1995).

### Bioerosion

Biologisch bedingte Veränderungen an Schalenmaterial in Folge von Bioerosion ist in marinen Milieus eine weitverbreitete Erscheinung (z. B. Kidwell & Bosence 1991; Parson & Brett 1991). Bioerosionsschäden können durch eine Nahrungssuche verursacht werden oder sind eine Folge von Organismen die durch eine Bioerosion Schutz suchen (Parson & Brett 1991). Neben Algen und Pilzen können diverse Schwämme, Anneliden, Polychaeten sowie einige bohrende Mollusken eine Vielzahl an Beschädigungen verursachen (z. B. Parson & Brett 1991; Kowalewski et al. 1994, 1995; Hallman et al. 1996). Vergleichende Methode über die Präsenz oder das Fehlen von Bioerosionserscheinungen wurden beispielsweise von Frey & Howard (1986), Meldahl & Flessa (1990) durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen mit einem taphonomischen Grad von 0,01 an beiden Transekten eine äußerst geringe bzw. nahezu fehlende Bioerosionserscheinung. Wie bereits mehrmals erwähnt ist die *M. arenaria* aufgrund ihrer endobenthischen Lebensweise zu Lebzeiten nicht nur vor inkrustierenden, sondern auch von bioerodierenden Organismen wie z. B. der *Polydora ciliata* Larve geschützt (z. B. Hallman et al. 1996; Hertweck 1971, 1979a, b). Auch können räuberische, bohrende Gastropoden den Muschel nichts anhaben. Des Weiteren werden die *M. arenaria* Klappen nach ihrem Ableben relativ frühzeitig disartikuliert, so dass die leeren Einzelklappen für bohrende Raubtiere als Nahrungsquelle nicht mehr interessant sind. Ein weiterer Grund wäre, dass die intertidale Position der Schill-Vorkommen aufgrund der relativ hohen hydrodynamischen Aktivitäten für bioerodierende Organismen unattraktiv ist. Bereits Schneider-Storz et al. (2008) kamen bei ihren Untersuchungen am Dorumer Schill-Vorkommen zu vergleichenden Ergebnissen. Es zeigte sich, dass vor allem *Cerastoderma edule* aufgrund ihrer oberflächennahen Lebensposition häufiger von Bioerosionserscheinungen betroffen ist.

Bereits Best & Kidwell (2000a, b) stellten fest, dass Muschel die an der Oberfläche leben oftmals stärker beansprucht werden als endobenthisch lebende Bivalven.

Laut Lazo (2004) können auch mikrostrukturelle Unterschiede innerhalb des Schalenaufbaus zu derartigen Differenzen führen. Anscheinend scheint auch in der vorliegenden Arbeit die Struktur sowie Zusammensetzung der *M. arenaria* Schale für bohrende Organismen unattraktiv zu sein (Vgl. Schneider-Storz et al. 2008). Es könnte jedoch aber auch sein, dass oberflächennahe Bioerosionserscheinungen z. B. durch Algen infolge der Abrasionsprozesse

überlagert worden sind und somit nicht mehr in die Analyse einfließen können. Folglich würden nur noch Bohrlocher als Bioerosionserscheinungen augenscheinlich übrigbleiben. Schon Cutler (1987, 1995) zeigte, dass für eine flächendeckende Untersuchung von Bioerosionen und Inkrustationen oftmals Analysen mittels Elektronenmikroskops nötig sind. Kowalewski et al. (1994) gaben als Grund für ihre niedrigen Bioerosionsbeanspruchungen eine feinkörnige, küstennahe Gezeiten dominierende und vorwiegend im sedimentlebende Fauna mit extensive Bioturbation an.

Vergleichend zu den vorliegenden Ergebnissen dokumentierten Meldahl & Flessa (1990) bei ihrer bio- und taphofaziellen Untersuchung, dass im niedrigeren intertidalen Bereich aufgrund höherer hydrodynamischer Energie geringere Bioerosions- und Inkrustationsraten vorherrschen. Eine Erklärung für die hier vorliegenden Ergebnisse begründet sich in der Umgebungsenergie die auf den jeweiligen Schill-Vorkommen einwirken und so die Stabilität und Umarbeitungsprozesse der Schalen auf den Vorkommen regulieren (auch Meldahl & Flessa 1990). Als geeignetes Hartsubstrat für inkrustierende und bioerodierende Organismen müssen die Schalen eine gewisse Zeit stabil auf der Sedimentoberfläche verbleiben (Meldahl & Flessa 1990). Innerhalb der beiden untersuchten Transekte sind diese Bedingungen nur in den rückwertigen Patch-Arealen vorzufinden, welche jedoch keine Bioerosionserscheinungen aufwiesen.

### **Diskussion der multivariaten Analysen**

Im vorangegangenen Abschnitt wurde auf die einzelnen Ergebnisse der univariaten taphonomischen Analyse eingegangen. Im folgenden Abschnitt sollen die multivariaten Ergebnisse erörtert werden.

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Dissertation wurde mit einer detaillierten Oberflächenuntersuchung eine schematische Standardzonierung eines idealisierten Hochkantschill-Vorkommens erstellt (s. auch Kap. 2, Abb. 2-6). Es gelang unterschiedliche Ausprägungen, Variationen sowie gemeinsame Ablagerungszustände mit wiederkehrenden charakteristischen Erscheinungsformen zu dokumentieren. Die Lagerungsvariationen wurden jeweils auf bestimmten Oberflächenabschnitten der Schill-Vorkommen ausgebildet. Die Ergebnisse dieser Oberflächenuntersuchungen zeigten ein einheitliches Ablagerungsmuster, so dass eine Einteilung in sieben verschiedene Zonenbereiche erfolgte. Die innerhalb der Zonenbereiche diskutierten Ablagerungs- und Einregelungsmuster der Klappen resultierten auf biostratinomische Vorgänge die überwiegend durch hydrodynamische Aktivitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes hervorgerufen wurden.

Mittels der multivariaten Analyse sollte nun geprüft werden, ob verschiedene Lagerungsverhältnisse sich auch auf die taphonomische Beanspruchung der Schalen auswirken kann. Ziel dieser Auswertemethode ist es, Lagerungszustände der Schalen aufgrund ihrer taphonomischen Beanspruchung zu identifizieren. Des Weiteren sollen die

Ergebnisse beider Transekte miteinander verglichen werden um eventuelle auch hierbei wiederkehrende taphonomische Ähnlichkeiten zwischen den Schill-Vorkommen zu ermitteln.

Für die Einbeziehung der taphonomischen Merkmale in die Datenanalyse wurden ein hierarchisch-agglomeratives Klassifikationsverfahren (Clusteranalyse) sowie eine multidimensionale Skalierung (MDS) angewandt. Für eine Identifikation von einzelnen Gruppierungen innerhalb multivariater Datensätzen hat sich sowohl in der Ökologie als auch in der Paläontologie die multivariate Clusteranalysen als erfolgreiche Methode bewährt (z. B. Meldahl & Flessa 1990; Springer & Flessa 1996). Multidimensionale Skalierungen sind wiederum für Datensätze geeignet, die Überschneidungen umfassen können, da graphische Beziehungen zwischen Variablen (hier taphonomische Merkmale) und Fälle (hier Probenpunkte) dargestellt werden können (z. B. Meldahl & Flessa 1990). Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich bei Cluster- und MDS-Analysen um explorative Techniken innerhalb der statistischen Analyse handelt. Obwohl beide Techniken keine anerkannten Methoden darstellen um Gruppierungen signifikant einzuordnen, sind sie dennoch ein nützliches Werkzeug zur Identifizierung von Trends bzw. Ähnlichkeiten innerhalb multivariater Datensätze geeignet (Meldahl & Flessa 1990).

Mittels der Cluster- und MDS-Analysen können an beiden Transekten verschiedene Gruppierungen festgestellt werden.

Am Fedderwarder Vorkommen können sechs taphofazielle Untergruppen (UGruppen) aufgrund unterschiedlicher Beanspruchungsschwerpunkte von einander differenziert werden. Die Cluster- und MDS-Analysen des Sahlenburger Transekt zeigen vier Untergruppen die graphisch von einander gegliedert werden. Die Aufteilung in die entsprechenden Untergruppen beruht auf einer Reihe von Versuchsrechnungen in denen an beiden Transekten auch mit anderen Gruppenvarianten experimentiert wurde. Der bestmögliche globale R-Wert in der ANOSIM-Rechen-Prozedur in Auswerteprogramm PRIMER ergibt sich jedoch mit den hier gewählten Gruppeneinteilungen. Auch statistisch können die *a priori* bestimmten Untergruppen mittels ANOSIM Test-Prozedur mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,1 \%$  bestätigt werden. Laut Lozán & Kausch (2004) ist eine derartige Überprüfung der Cluster- und MDS-Analyse mittels ANOSIM-Prozedur oftmals zuverlässiger und effizienter als z. B. ein univariater U-Median Test-Vergleich.

#### Postmortale, artikulierte *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensposition

Die ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte wurden zur Zeit der Probenentnahme nur im vorderen Bereich des Fedderwarder Transekts vorgefunden. Es wurden zwei Horizonte mit freierodierte, postmortale *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensstellung beprobt.

Erwartungsgemäß zeigt die multivariate Analyse dieser Proben eine deutliche eigenständige Gruppierung. Sowohl bei der einzelnen Analyse des Fedderwarder Transekts als auch bei der gemeinsamen Cluster- und MDS-Darstellung beider Vorkommen können die Proben

aufgrund ihrer geringen taphonomischen Beanspruchung deutlich von allen anderen Lagerungszuständen differenziert werden. Wie die SIMPER-Prozedur zeigt, weisen die *M. arenaria* Doppelklappen sich besonders durch eine sehr schlechte Randerhaltung und nur eine leichte Abrasionsbeanspruchung aus. Die Inkrustations- und Fragmentationsschäden an den Klappen tragen demnach nur eine geringe Gewichtung zur Gruppenbildung bei. Durch die endobenthische Lebensweise waren die Muscheln zu Lebzeiten relativ gut durch äußere Einflüsse wie Wind, Wellen und Nahrungsräuber geschützt, so dass die dokumentierte taphonomische Beanspruchung daher nur postmortal erfolgen konnte. Nach Davies et al. (1989b) sind derartig eingegrabene Schalen vor einer Zerstörung bzw. vor taphonomischen „Attacken“ geschützt, so dass eine Exhumierung die taphonomische Beanspruchung beschleunigt. Auch nach Hertweck (1979a, b) ist ein prämortaler Bewuchs der *M. arenaria* Doppelklappen nahezu unmöglich. Demnach werden Doppelklappen erst nach ihrer Disartikulation und einem Transportprozess den vollen taphonomischen Prozessen ausgesetzt.

#### Imbrikationslagerung und Pflastervariationen

Als Pflastervariationen werden in der vorliegenden Arbeit Streu- und geschlossene Vollpflaster aus *M. arenaria* Einzelklappen bezeichnet. Die Muschelklappen lagerten zur Zeit der Probenentnahme überwiegend in konvexer, horizontaler Position auf der Oberfläche beider Schill-Vorkommen. Durch einen Anstieg der Schalenkonzentration erfolgte oftmals ein fließender Übergang in eine Dachziegellagerung (Imbrikation). Diese Lagerungszustände wurden im zweiten Kapitel der vorliegenden Dissertation als Zonenbereiche 2a bis c definiert (s. auch Kap. 2).

Nach den multivariaten Ergebnissen lassen sich an beiden Transekten horizontal gelagerte Klappen signifikant von vertikalen Schalenanordnungen unterscheiden. Es kann ein deutlicher Unterschied innerhalb der taphonomischen Beanspruchung zwischen den Lagerungszuständen festgestellt werden. Durch die horizontale Lagerungsposition der Imbrikations- und Pflasterlager steht eine größere Angriffsfläche auf den Klappenoberflächen für taphonomische Überarbeitungen zur Verfügung. Wie die SIMPER-Prozeduren beider Transekte verdeutlichen zeichnen sich Dachziegellagen und Pflastervariationen besonders durch schlechte Randerhaltung und starken Abrasionserscheinungen aus. Des Weiteren weisen die Schalen hohe Fragmentationsspuren auf, so dass an beiden Transekten eine deutliche Gruppierung dieser Lagerungszustände aufgrund ihrer taphonomischen Gewichtungen erfolgen kann.

Wie die Ergebnisse verdeutlichen, können Pflastervariationen deutlich von Dachziegellagen differenziert werden. Besonders am Fedderwarder Transekt kann mittels der multivariaten Analyse eine signifikante Differenzierung zwischen Imbrikations- und Pflastervariationsbereiche nachgewiesen werden. Demnach weisen Klappen die aus Dachziegellagen stammen noch Inkrustationsbeanspruchungen auf. Eine ähnliche

Gewichtung innerhalb der taphonomischen Zusammensetzung zeigen auch die Dachziellagen des Sahlenburger Transekts.

Auch bei der gemeinsamen Analyse beider Transekte kann ein signifikanter Unterschied zwischen Dachziellagerungen und Pflasterbereiche festgestellt werden. Nach den Ergebnissen der SIMPER-Prozedur weisen auch hierbei Dachziegellagen eine leicht erhöhte Inkrustation auf. Ein Grund für diese höhere Inkrustation der Dachziegellagen erklärt sich durch die Überlagerung der einzelnen Klappen. Hierdurch werden die untersten Schalenlagen durch die darüber liegenden Klappen geschützt, so dass mögliche Abschleißprozesse von Organismen deutlich vermindert werden.

### Hochkantschill- und Rosettenanordnungen

Hochkantschille (HKS) bestehen aus Paketen von aneinander und ineinander geschachtelten *M. arenaria* Einzelklappen (s. auch Kap. 2). Derartig angeordnete Klappen lagern sich oftmals unmittelbar an den jeweiligen steilen Hinterkanten der Schill-Vorkommen an und entsprechen dem Lagerungszustand der Zonenbereiche 5 und 6. Im Gegensatz zu den freistehenden, rosettenartig angeordneten Strukturen bestehen HKS-Anordnungen aus fächerartigen, vertikal positionierten Einzelklappen. Die nahezu aufrecht stehenden Klappen weichen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage ab. Ihre allgemeine Orientierungsrichtung zeigt überwiegend in leewertiger Bank-Richtung, d. h. die konkaven (hohlen) Klappenseiten zeigen nahezu senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Wind- und Wellenrichtung. Im Gegensatz dazu sind Rosettenstrukturen freistehende, oval bis rund ausgebildete Anordnungen, die aus chaotisch gelagerte *M. arenaria* Einzelklappen bestehen. Die Strukturen bestehen aus einzelnen Schalenpaketen dessen Klappen mit ihrer konvexen Wölbung in alle Himmelsrichtungen zeigen, was zu der typischen rosettenartigen Anordnung führt. Umgeben wurden die Rosetten-Areale von Klappen in Pflastervariationen und Dachziegellagen. Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit wurden diese Schalenanordnungen als Zonenbereich 4 definiert (s. auch Kap. 2).

Wie die Ergebnisse der Cluster- und MDS-Analyse verdeutlichen, lassen sich besonders am Fedderwarder Transekt die Proben aus den Hochkantschill-Anordnungen aufgrund ihrer taphonomischen Beanspruchung deutlich von anderen Lagerungsverhältnissen unterscheiden. Auch die Hochkantschill-Strukturen am Sahlenburger Transekt zeigen eine vergleichende Beanspruchung auf und können mittels der Cluster- und MDS-Analyse deutlich vom übrigen Probenmaterial differenziert werden. Die taphonomische Beanspruchung der HKS-Strukturen ist insgesamt als mittelmäßig zu bewerten. Nach den Ergebnissen der SIMPER-Prozeduren zeichnen sich die Klappen aus den Hochkantschill-Anordnungen neben einer schlechten Randerhaltung besonders durch eine hohe Abrasion und mittelstarken Inkrustation aus. Weniger beansprucht werden die Hochkantschill-Strukturen dagegen durch Fragmentationsprozesse. Aufgrund dieser ähnlichen Zusammensetzung der taphonomischen Beanspruchungen können die einzelnen Proben der HKS-Bereiche an beiden Transekten gruppiert werden. Am Sahlenburger Transekt ist es



zudem möglich mittels der multivariaten Analyse HKS-Anordnungen von Rosettenstrukturen zu unterscheiden, doch ist ein signifikanter Unterschied mittels der ANOSIM-Prozedur hierbei nicht nachzuweisen. Beim multivariaten Vergleich beider Transekte zeigt sich jedoch, dass eine Differenzierung aufgrund kleiner Beanspruchungsunterschiede durchaus möglich ist. Demnach zeigen Hochkantschille gegenüber Rosettenanordnungen eine etwas veränderte taphonomischen Beanspruchungszusammensetzung auf. Zwar sind die Unterschiede nur sehr gering, dennoch wirken sich diese Unterschiede auf die Gruppenbildung aus. Auch die ANOSIM-Test-Prozedur bestätigt eine signifikante Distanzierung beider Lagerungszustände aufgrund der veränderten taphonomischen Gewichtung. Hochkantschill-Anordnungen werden demnach durch etwas geringere Abrasions- und Fragmentationsprozesse beansprucht. Des Weiteren weisen Hochkantschille gegenüber Rosettenstrukturen eine leicht höhere Inkrustation auf. Ein Grund könnte hierfür die Exponierungslage der jeweiligen Anordnungen sein, da Rosettenanordnungen in hydrodynamisch aktiveren Zonenbereichen gebildet werden als Hochkantschille (s. dazu auch Kap. 2).

An beiden Transekten kann unabhängig voneinander festgestellt werden, dass Hochkantschille aufgrund ihrer kompakten, vertikalen Positionierung einer anderen taphonomischen Beanspruchung ausgesetzt werden, als beispielsweise Klappen in horizontaler Lagerung. Bereits Klähn (1932, 1936) bemerkte bei seinen Untersuchungen, dass einzelne Muschelklappen oftmals schneller aufgearbeitet werden können als zu Schillen gepackte oder sich gegenseitig abstützende Schalen (auch Schäfer 1962). Bedingt durch die vertikale ineinander Schachtelung der Hochkantschille sind dessen Schalenoberflächen demnach nur teilweise allen hier aufgenommenen taphonomischen Prozessen ausgesetzt. Beispielsweise können die recht hohen Abrasionserscheinungen bereits vor der eigentlichen vertikalen Einregelung, durch zeitlich frühere Transportprozesse innerhalb der vorderen Pflaster-Zonenbereichen, verursacht worden sein. Auch laut Parson & Brett (1991) können sich Abrasionserscheinungen in nur relativ kurzer Zeitspanne ergeben und setzen hier bereits unmittelbar nach der Erosion der Doppelklappen aus den Siedlungshorizonten ein. Der unerwartete hohe Inkrustationsgrad innerhalb der Hochkantschille ist vermutlich ein Resultat ihrer stationären und vertikalen Lagerungssituation und höchst wahrscheinlich erst vor Ort erfolgt. Grund für diese Vermutung ist die Tatsache, dass in den Pflaster-Bereichen nur relativ geringe Inkrustationsgrade festgestellt worden sind. Vermutlich erweisen sich hierfür die Lückenbereiche zwischen den einzelnen Klappen als geschützte Siedlungsorte in denen z. B. Balaniden relativ geschützt heranwachsen können. Aufgrund dieser geschützten Lage können Abrasionsprozesse in diesen Bereichen nicht greifen. Dennoch kann eine taphonomische Überprägung der Hochkantschille nach Lawrence (1968) (engl. „taphonomic overprint“) durch frühere biostratinomische Prozesse hier nicht ausgeschlossen werden.

### Schalenfelder der Rückbereiche

Die Schalenfelder (Patch-Areale) befinden sich an beiden Lokationen jeweils im rückwärtigen Lee-Bereich der Schill-Vorkommen. Zur Zeit der Probenentnahme lagerten die Klappen chaotisch an beiden Lokationen entweder senkrecht oder teilweise auch waagrecht auf dem relativ flachen Wattboden. Nach Strauch (1990) entstehen Schillansammlungen im Wattenmeer durch landwärtigen Transport bei längerfristigen oder plötzlichen, gerichteten Wasserbewegungen. Aus diesem Grund kann auch in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass der überwiegende Anteil des Klappenmaterials innerhalb der Schalenfelder aus den vorderen Zonenbereichen herantransportiert wurde.

Wie die Ergebnisse der Cluster- und MDS-Analyse verdeutlichen, können die Probenpunkte aus den Rückbereichen aufgrund ihrer hohen taphonomischen Beanspruchung deutlich von den anderen Ablagerungsbereichen (Zonenbereichen) differenziert werden. Auch bei der gemeinsamen multivariaten Analyse kann eine deutliche Gruppierung der Proben aufgrund der Gewichtung ihrer Beanspruchungsähnlichkeiten festgestellt werden. Nach den Ergebnissen der SIMPER-Prozedur zeichnen sich die Klappen aus den Rückbereichen besonders durch eine schlechte Randerhaltung und Abrasionsbeanspruchung aus. Besonders hervorzuheben ist aber der starke Einfluss der Inkrustation, welcher auch für die deutliche Gruppenbildung ausschlaggebend ist. Der beschriebene vermehrte und äußerst auffällige Bewuchs des Klappenmaterials durch verschiedene Organismen (z. B. Balaniden, Bryozoen) deutet auf eine längere Aufenthaltsdauer des Schalenmaterials innerhalb dieses Zonenbereiches hin. Die beschriebenen Schalenfelder können also aufgrund ihrer stationären Verweildauer auf der Wattfläche als Besiedlungsgrundlage für diverse Watt-Organismen dienen. Diese Besiedlung deutet zudem auf ein relativ niedrigeres hydrodynamisches Energieniveau im Vergleich zu den übrigen Zonenbereichen entlang des Transekt-Verlaufes hin.

Als geeignetes Hartsubstrat für inkrustierende und bioerodierende Organismen müssen die Schalen laut Meldahl & Flessa (1990) eine gewisse Zeit stabil auf der Sedimentoberfläche verweilen. Diese Bedingungen sind innerhalb der Transekte nur in den rückwertigen Patch-Arealen vorzufinden. Werden die Klappen in den rückwertigen Bereich der Schill-Vorkommen transportiert, so sind sie geringeren hydrodynamischen Bedingungen ausgesetzt. Dadurch kann es zu einem längeren stationären Aufenthalt der Klappen in diesen Bereich führen, so dass das angehäuften Schalenmaterial als Hartsubstrate für diverse inkrustierende Organismen (z. B. Balaniden, Bryozoen) fungiert.

### Vergleich der taphonomischen Ergebnisse mit anderen Arbeiten

Wie die Ergebnisse der multivariaten Analysen zeigen, ist eine Differenzierung von verschiedenen Lagerungszuständen an *M. arenaria* Einzelklappen aufgrund ihrer taphonomischen Beanspruchung möglich. Verschiedene Lagerungsvariationen wirken sich

demnach unterschiedlich auf die jeweilige taphonomische Beanspruchung aus. Eine deutliche taphofazielle Gliederung aufgrund dieser Beanspruchungsmerkmale ist an beiden Transekten unabhängig von einander mit der multivariaten Cluster- und MDS-Analyse gelungen. Auch bei der gemeinsamen Gegenüberstellung aller Probepunkte kann eine Gruppierung aufgrund ähnlicher taphonomischer Beanspruchungen festgestellt werden.

Bereits in einigen Arbeiten dienten taphonomische Fazies Modelle (auch Taphofazies Modelle genannt) als nützliches Werkzeug sowohl bei fossilen- als auch bei modernen Umweltanalysen (Speyer & Brett 1986, 1988). Die Bestimmung des sogenannten „taphonomischen Fingerabdrucks“ spielen eine wichtige Rolle bei der Aufstellung von derartigen Taphofazies-Modellen (z. B. Davies et al. 1989b; Fürsich & Flessa 1987; Powell et al. 1987). Fazies basierte aktualistische Untersuchungen, wie auch in der vorliegenden Arbeit angewandt, konnten in der Vergangenheit des Weiteren dazu beitragen fossile Taphofazies-Modelle weiter zu entwickeln, kalibrieren und zu quantifizieren. Auch in aktualistischen Untersuchungen wurden bereits Taphofazies-Analysen erfolgreich angewandt (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Parson 1989; Davies et al. 1989a; Meldahl & Flessa 1990; Powell et al. 1989; Nebelsick 1992; Kowalewski et al. 1994; Best & Kidwell 2000a, b u. a.).

Eine vergleichende, aber weitaus großräumigere taphonomische Zonierung wurde beispielweise von Fürsich & Flessa (1987) am nördlichen Golf von Kalifornien durchgeführt. In ihrem rezenten Untersuchungsabschnitt erfolgte eine taphofazielle Einteilung entlang eines Profils welches sich vom subtidalen Strandbereich bis zum unteren intertidalen Gezeitenbereich erstreckte. Fürsich & Flessa (1987) kamen zu dem Ergebnis, dass Bioerosions- und Inkrustationsraten mit der Einbettungszeit von Molluskenschalen korrelieren. Des Weiteren wiesen sie einen engen Zusammenhang zwischen der Erhaltungsqualität und der Verweildauer sowie Überarbeitungshäufigkeit auf den Gezeitenflächen nach. Fürsich & Flessa (1987) folgerten außerdem, dass in Niedrig-Energie-Bereichen reduzierte Umlagerungsprozesse stattfinden und daraus ein besseres taphonomisches Erhaltungspotential resultiert.

Weitere vergleichende multivariate Analysen an Molluskenschalen führten auch Meldahl & Flessa (1990) innerhalb eines intertidalen Gezeitenbereiches in Cape Cod, Massachusetts (USA) durch. Für die taphonomischen Analysen beschränkten sich die Autoren, wie in der vorliegenden Arbeit auch, auf nur eine Muschelart wodurch eine unterschiedliche Anfälligkeit von Schalen verschiedener Bivalvenarten an einer Lokation hierdurch reduziert wird.

Das es zu unterschiedlichen taphonomischen Beanspruchungen innerhalb nur eines Standortes aufgrund des unterschiedlichen Schalenaufbaues zwischen Muschelarten kommen kann zeigen beispielweise Schneider-Storz et al. (2008). Bei ihren Untersuchungen zeigten besonders *C. edule* Klappen eine deutlich höhere Bioerosionsbeanspruchung gegenüber *M. arenaria* Schalen, welche wie in der vorliegenden Untersuchung auch nahezu keine Beanspruchung durch Bioerosion aufwiesen. Die Ergebnisse der taphonomischen semi-quantitativen Analyse der vorliegenden Arbeit ergänzen und bestätigen die Ergebnisse

von Schneider-Storz et al. (2008). Im Gegensatz zu Schneider-Storz et al. (2008) wurden zudem nichtparametrische Binomial-Tests, ein hierarchisch agglomeratives Klassifikationsverfahren sowie eine multidimensionale Skalierung durchgeführt. Dadurch kann nachgewiesen werden, dass der taphonomische Erhaltungszustand maßgeblich durch hydrodynamische- und die daraus resultierenden biostratinomischen Prozesse beeinflusst wird. Die multivariaten Analysen belegen zudem, dass mit der Lagerungsvariation der Klappen (horizontal, vertikal) sich auch der taphonomische Beanspruchungsschwerpunkt ändert. Ergänzend zu den Ergebnissen von Schneider-Storz et al. (2008) kann also eine taphonomische Differenzierung aufgrund von Lagerungsanordnungen zwischen *M. arenaria* Doppelklappen, Pflaster- und Dachziegellagerung, vertikal ein geregelten Hochkantschillen sowie Schalenfeldern des rückwertigen Transektbereiches vorgenommen werden.

Meldahl & Flessa (1990) konnten mittels Clusteranalysen sechs unterschiedliche Biofazies-Typen voneinander differenzieren und führten ebenfalls eine taphofazielle Zonierung durch. Meldahl & Flessa (1990) kamen zu ähnlichen Ergebnissen wie zuvor schon Fürsich & Flessa (1987). Demnach hing ihre Biofazies primär von der Tiden bedingte Exponierungszeit der Schalen ab. Dieser sogenannte „Exponierungs-Effekt“ nach Johnson (1960) ist eine Funktion des intensiven Überarbeitungsprozesses sowie die Summe der Zeit dem das Material einer Überarbeitung ausgesetzt ist. Dieser „Exponierungs-Effekt“ scheint auch in der vorliegenden Arbeit einer der wichtigsten Einflüsse zu sein, der das Klappenmaterial taphonomisch beeinflusst.

Darüber hinaus stellten Meldahl & Flessa (1990) fest, dass in Niedrig-Energie Bereichen häufiger Inkrustationserscheinungen vorzufinden sind als in hochenergetischen Umgebung. Ähnliche Beobachtungen sind auch in den vorliegenden Ergebnissen festzustellen. Demnach werden Schalen aus den wellen- und windgeschützten Rückbereichen (Patch-Areale) stärker durch Inkrustationen beansprucht als Schalen aus den aktiveren Bereichen. Eine Erklärung für die hier vorliegenden Ergebnisse begründet sich in der Umgebungsenergie die auf den jeweiligen Schill-Vorkommen einwirken und so die Stabilität und Umarbeitungsprozesse der Schalen auf den Vorkommen regulieren (Vgl. Meldahl & Flessa 1990). Als geeignetes Hartsubstrat für inkrustierende und bioerodierende Organismen müssen die Schalen eine gewisse Zeit stabil auf der Sedimentoberfläche verbleiben (Meldahl & Flessa 1990). Innerhalb der Transekte herrschen diese Bedingungen überwiegend in den rückwertigen Arealen der Vorkommen. Die Schalen dieser Bereiche zeichnen sich an beiden Transekten durch starke Inkrustationsbeanspruchung aus. Des Weiteren dokumentierten Meldahl & Flessa (1990), dass aufgrund höherer hydrodynamischer Energie oftmals geringere Bioerosions- und Inkrustationsraten an Klappen vorherrschen.

Dieser Trend lässt sich auch in den vorliegenden Ergebnissen beobachten, da an beiden Transekten die Klappen aus Pflaster- und Imbrikationsbereichen vermutlich aufgrund der dort stärker einwirkenden Wasserdynamik einen deutlich niedrigeren Inkrustationsgrad aufweisen. In diesen Transektbereichen herrschen während des Tidenzyklus durch die ab- und auf laufenden Wassermassen oftmals starke Umlagerungs- und Abschleifprozesse, so

dass es relativ schnell zu Abriebsprozessen von festsitzenden Organismen kommen kann (auch Parson & Brett 1991).

Kowalewski et al. (1995) haben beispielweise für Schalenansammlungen im supratidalen Bereiche (Cheniers, Baja California, Mexico) geringe Inkrustationsraten festgestellt, da durch die Strandlage der Schalen eine Bedeckung mit Wasser jeweils nur für kurze Zeitintervalle zu Springtidenzeiten erfolgte. Im vorliegenden Fall jedoch befinden sich beide untersuchten Schill-Vorkommen innerhalb des intertidalen Gezeitenbereiches der zweimal täglich komplett mit Wasser überdeckt wird, so dass die Schalen durch inkrustierende Organismen relativ leicht erreicht werden können.

Hallman et al. (1996) untersuchten taphonomische Beanspruchungsunterschiede zwischen drei Muschelarten aus drei verschiedenen Standorten. Die Autoren verglichen hierzu Klappen von *C. edule* aus dem mesotidalen Geszeitenbereich der Nordsee mit *Chione sp.* (Bahia la Choya) und *Mulinia coloradoensis* (Colorado Delta) Muschelschalen des makrotidalen Gezeitenbereiches des Golfs von Kalifornien. Hallman et al. (1996) stellten fest, dass verschiedene Umweltbedingungen der untersuchten Standorte zu unterschiedlichen taphonomischen Erhaltungszuständen führen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit verdeutlichen die taphonomische Beanspruchungsähnlichkeit zweier Standorte innerhalb eines gleichwertigen Regimes aufgrund ihrer Lagerungszustände. Diese Ähnlichkeit ist dadurch zu erklären, dass beide Lokationen aufgrund ihrer exponierten Lage innerhalb des eulitoralischen Gezeitenbereiches den gleichartigen hydrodynamischen und biologischen Bedingungen, also den gleichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind (auch Kowalewski et al. 1995).

Nach Brandt (1989) haben taphonomische Daten, wie sie in der vorliegenden Arbeit erfasst wurden, weitaus mehr Potential als nur etwas über die relative Transportdistanz und Umgebungsenergie auszusagen. Die taphonomischen Merkmale können neben der hydrophysikalischen und bioökologischen Umgebung zudem Informationen über die entsprechenden Lagerungszustände der Klappen geben. Viele Parameter wie beispielsweise Wellen- und Strömungsenergien, Sedimentationsraten, episodische Vorgänge sowie Bioturbationereignisse können dazu beitragen, diagnostische Signaturen an den Schalenakkumulationen zu verwischen (s. Überblick von Brett & Baird 1986; Speyer & Brett 1988). Die wiederkehrenden Ablagerungsmuster und die daraus resultierenden taphonomischen Merkmale innerhalb der Transekte zeigen zudem, dass die Erhaltungsmuster nicht auf zufälliger Weise variieren. Die hauptsächlich auf biostratinomischen, sedimentologischen aber auch auf bioökologischen Prozesse zurückgehende taphofaziellen Muster zeigen vielmehr eine litho- bzw. biofazielle Abhängigkeit, welche auf Variationen in der hydrodynamischen Beanspruchung zurückzuführen sind (Speyer & Brett 1988).

Die hier vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass mit Hilfe der durchgeführten taphonomischen Untersuchungen auch kleinräumige taphofazielle Unterschiede innerhalb eines gleichen bio- und lithofaziellen Bereiches differenziert werden können.

## Schlussfolgerung

Innerhalb der ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte konnte ein signifikanter Unterschied innerhalb der Größenhäufigkeitszusammensetzung zwischen juvenilen und adulten *M. arenaria* Doppelklappen festgestellt werden. Die Unterschiede resultieren aus dem räumlichen Separationsprozess zwischen juvenilen und adulten *M. arenaria* Generationen welcher bereits schon zu Lebzeiten der Muscheln erfolgte. Aus den postmortalen Größenhäufigkeitsverteilungen der Doppelklappen lassen sich also Rückschlüsse auf die zu Lebzeiten herrschende Generationszusammensetzung der Muscheln schließen.

Die Größenhäufigkeitszusammensetzung innerhalb der beiden Schill-Vorkommen unterscheidet sich signifikant von den Siedlungshorizonten und ist das Resultat der einwirkenden, küstenwertigen Transportprozesse. Die Schalenzusammensetzung innerhalb beider Schill-Vorkommen entsprechen einer klassischen Schalenakkumulation die also über einen längeren Zeitraum angehäuft wurden.

Eine Frachtsonderung zwischen linker und rechter *M. arenaria* Klappe konnte nur am Sahlenburger Transekt signifikant festgestellt werden. Es wurden aufgrund der Ankerwirkung des Ligamentlöffels mehr linke als rechte Klappenhälften vorgefunden. Demnach kann eine Frachtsonderung von disartikulierten *M. arenaria* Einzelklappen relativ kurz nach ihrer Erosion aus den ehemaligen Siedlungshorizonten erfolgen und bedarf keines längeren Transportweges.

Die taphonomische Beanspruchung der endobenthisch lebenden *M. arenaria* Muschel beginnt erst nach ihrem Ableben sowie nach einem Freilegen der Doppelklappen aus ihren ehemaligen Siedlungshorizonten. Neben physikalisch induzierten Beanspruchungen werden die freierodierten Klappen im Untersuchungsgebiet also relativ schnell durch taphonomische Prozesse beeinflusst.

Der taphonomische Erhaltungszustand der *M. arenaria* Klappen wird durch hydrodynamische und die daraus resultierenden biostratinomischen Prozesse gesteuert. Beide Parameter stehen hierbei im engen Wechselspiel miteinander, da mit unterschiedlichen Lagerungszuständen der Schalen sich auch die hydrodynamische Wirkung auf das Klappenmaterial verändert. Eine weitere Abhängigkeit besteht zu der verfügbaren Angriffsfläche der Schalen, da große Klappen stärker durch Abrasions- und Inkrustationsprozesse betroffen werden als kleine Klappengrößen. Die unterschiedlichen taphonomischen Erhaltungszustände der *M. arenaria* Klappen hängen zudem von der jeweiligen Exponierungszeit auf den Oberflächen der Vorkommen ab. Sind die Schalen stärkeren hydrodynamischen Bedingungen ausgesetzt, wie sie beispielweise auf den mittleren Transekt-Bereichen vorherrschen, so weisen die Schalen dort höhere physikalische Beanspruchungsmerkmale auf. Werden die Schalen dagegen geringeren hydrodynamischen Aktivitäten ausgesetzt, so überwiegen die bioökologischen Beanspruchungen, dass

Inkrustationsprozesse wie sie in den rückwertigen Bereichen beider Transekte vorgefunden wurden, einsetzen.

Je nach Lagerungssituation der Klappen können sich taphonomische Prozesse verschiedenartig auf das Schalenmaterial einwirken. So lassen sich im Sediment steckende, artikulierte Doppelklappen von disartikulierten zu Pflaster angesammelten Klappen taphonomisch unterscheiden. Auch können horizontal beanspruchte Schalen taphonomisch deutlich von vertikal angeordneten Klappen differenziert werden.

Da die Schalen noch nicht endgültig den hydrodynamischen Prozessen entzogen wurden, geben die dokumentierten taphonomischen Beanspruchungen jedoch nur eine Momentaufnahme zu dem Zeitpunkt ihrer Lagerungssituation auf den Oberflächen der Schill-Vorkommen wieder. Aus diesem Grund kann das Problem einer eventuellen mehrmaligen taphonomischen Überprägung auch am rezenten Schalenmaterial nicht eindeutig erfasst werden.



**Literaturverzeichnis**

- Alexander, R. R. & Dietl, G. P. (2001) Shell repair frequencies in New Jersey bivalves: A recent baseline for tests of escalation with Tertiary, Mid-Atlantic congeners. *Palaios*, 16, 354-371.
- Alexander, R. R. & Dietl, G. P. (2003) The fossil record of shell-breaking predation on marine bivalves and gastropods: In Kelley, P. H., Kowalewski, M. & Hansen, T. (Eds.), *Predatory-prey interactions in the fossil record*, 141-176, Kluwer Academic Plenum Publishers, New York.
- Alexandrowicz, S. W. (1977) A Quantitative study of the origin of *Dreissena polymorpha* shell accumulations in Szczecin Bay, Baltic Sea. *Serie des Sciences de la Terre*, XXV, 75-82.
- Alexandrowicz, S. W. (2001) Mollusc shell accumulations in north-eastern alpine rivers and lakes. *Earth Sciences*, 49, 165-175.
- Alexandrowicz, S. W. & Florek, W. (1999) Shell accumulations in the recent and ancient littoral zone of the Gardno Lake (Northern Poland). *Earth Sciences*, 47, 227-237.
- Allen, J. R. L. (1990) Transport - Hydrodynamics. Shells. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 227-230, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Best, M. M. R. & Kidwell, S. M. (2000a) Bivalve taphonomy in tropical mixed siliciclastic-carbonate settings. I. Environmental variation in shell condition. *Paleobiology*, 26, 80-102.
- Best, M. M. R. & Kidwell, S. M. (2000b) Bivalve taphonomy in tropical mixed siliciclastic-carbonate settings. II. Effect of bivalve life habits and shell types. *Paleobiology*, 26, 103-115.
- Beukema, J. J. (1982) Calcimass and carbonate production by molluscs on the tidal flats in the Dutch Wadden Sea: II. The edible cockle, *Cerastoderma edule*. *Netherlands Journal of Sea Research* 15, 391-405.
- Beukema, J. J. (1992) Expected changes in the Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 16, 37-45.
- Boucot, A. J. (1953) Life and death assemblage among fossils. *American Journal of Science*, 251, 25-40.
- Boyajian, G. E. & Thayer, C. W. (1995) Clam calamity: A recent supratidal storm deposit as an analog for fossil shell beds. *Palaios*, 10, 484-489.
- Brandt, D. S. (1989) Taphonomic grades as a classification for fossiliferous assemblages and implications for paleoecology. *Palaios*, 4, 303-309.
- Brenchley, P. J. & Newall, G. (1970) Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 7, 185-220.
- Brenner, K. & Einsele, G. (1976) Schalenbruch im Experiment. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil 2, 349-354.
- Brett, C. E. (1990) Destructive taphonomic processes and skeletal durability. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 223-226, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Brett, C. E. & Baird, G. C. (1986) Comparative taphonomy; a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, 1, 207-227.
- Briggs, D. E. G. (1990) Flattening. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 244-247, Blackwell Scientific Publications, Oxford.

- Brousseau, D. J. (1978a) Spawning cycle, fecundity, and recruitment in a population of soft-shell clam, *Mya arenaria*, from Cape Ann, Massachusetts. *Fishery Bulletin*, 76, 155-166.
- Brousseau, D. J. (1978b) Population dynamics of the soft-shell clam *Mya arenaria*. *Marine Biology*, 50, 63-71.
- Brousseau, D. J. (1987) A comparative study of the reproductive cycle of the soft-shell clam, *Mya arenaria* in Long Island Sound. *Journal of Shellfish Research*, 6, 7-15.
- Brousseau, D. J. & Baglivo, J. (1987) A comparative study of age and growth in *Mya arenaria* (soft-shell clam) from three populations in Long Island Sound. *Journal of Shellfish Research*, 6, 17-24.
- Brousseau, D. J. & Baglivo, J. (1988) Life tables for two field populations of soft-shell clam, *Mya arenaria*, (Mollusca: Pelecypoda) from Long Island Sound. *Fishery Bulletin*, 86, 567-579.
- Cadée, G. C. (1976) Sediment reworking by *Arenicola marina* on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 10, 440-460.
- Cadée, G. C. (1979) Sediment reworking by the polychaete *Heteromastus filiformis* on a tidal flat in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 13, 441-456.
- Cadée, G. C. (1984) Macrobenthos and macrobenthic remains on the Oyster Ground, North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 18, 160-178.
- Cadée, G. C. (1989) Size-selective transport of shells by birds and its palaeoecological implications. *Palaeontology*, 32, 429-437.
- Cadée, G. C. (1992) Eolian transport and left/right sorting of *Mya* shells (Mollusca, Bivalvia). *Palaios*, 7, 198-202.
- Cadée, G. C. (1994a) *Mya* shell manipulating by turnstones (Aves) results in concave-up position and left/right sorting. *Palaios*, 9, 307-309.
- Cadée, G. C. (1994b) Floating shells, Dutch Wadden Sea. *Journal of Paleontology*, 68, 903-904.
- Cadée, G. C. (1994c) Eider, shelduck, and other predators, the main producers of shell fragments in the Wadden Sea, palaeoecological implications. *Palaeontology*, 37, 181-202.
- Cadée, G. C. (1995) Birds as producers of shell fragments in the Wadden Sea, in particular the role of the Herring Gull. *Geobios*, 18, 77-85.
- Cadée, G. C. (1999) Shell damage and shell repair in the Antarctic limpet *Nacella concinna* from King George Island. *Journal of Sea Research*, 41, 149-161.
- Cadée, G. C., Walker, S. E. & Flessa, K. W. (1997) Gastropod shell repair in the intertidal of Bahia la Choya (N. Gulf of California). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136, 67-78.
- Cadée, G. C. & Wesselingh, F. (2005) Van levend schelpdier naar fossiele schelp: Taphonomie van Nederlandse strandschelpen. *Spirula*, 343, 36-52.
- Cantalamesa, G., Di Celma, C. & Ragaini, L. (2005) Sequence stratigraphy of the Punta Ballena member of the Jama Formation (Early Pleistocene, Ecuador): Insights from integrated sedimentologic, taphonomic and paleoecologic analysis of molluscan shell concentrations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 216, 1-25.
- Caracuel, J. E., Giannetti, A. & Monaco, P. (2005) Multivariate analysis of taphonomic data in lower Jurassic carbonate platform (Northern Italy). *Comptes Rendus Palevol*, 4, 653-662.

- Carroll, M., Kowalewski, M., Simões, M. G. & Goodfriend, G. A. (2003) Quantitative estimates of time-averaging in terebratulid brachiopod shell accumulations from a modern tropical shelf. *Palaeobiology*, 29, 381-402.
- Carter, J. G. (1980) Environmental and biological controls of bivalve shell mineralogy and microstructure. In: Rhoads, D. C. & Lutz, R. A. (Eds.), *Skeletal growth of aquatic organisms*. 69-113, Plenum Press, New York.
- Checa, A. (1993) Non-predatory shell damage in recent deep-endobenthic bivalves from Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 100, 309-331.
- Cintra-Buenrostro, C. E., Flessa, K. W. & Avila-Serrano, G. (2005) Who cares about a vanishing clam? Trophic importance of *Mulina coloradoensis* inferred from predatory damage. *Palaaios*, 20, 296-302.
- Clarke, K. R. (1993) An index showing breakdown of seriation, related to disturbance, in a coral reef assemblage. *Marine Ecology Process Series*, 102, 153-160.
- Clarke, K. R. & Green, H. R. (1988) Statistical design and analysis for a „biological effects" study. *Marine Ecology Process Series*, 46, 213-226.
- Clarke, K. R. & Warwick, R. M. (2001) Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation, 2nd edition. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, 172 pp.
- Cummins, R. H. (1994) Taphonomic processes in modern freshwater molluscan death assemblages: Implications for the freshwater fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 55-73.
- Currey, J. D. (1990) Biomechanics of mineralized skeletons. In: Carter, J. G. (Ed.), *Skeletal biomineralization: Patterns, processes and evolutionary trends*, 1, 11-25, Van Nostrand-Reinhold, New York.
- Cutler, A. H. (1987) Surface textures of shells as taphonomic indicators. In: K. W. Flessa (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene intertidal deposits, Gulf of California*. 164-176, Paleontological Society Special Publication, Tucson.
- Cutler, A. H. (1995) Taphonomic implications of shell surface textures in Bahia la Choya, northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 114, 219-240.
- Davies, D. J., Powell, E. N. & Stanton, R. J. (1989a) Relative rates of shell dissolution and net sediment accumulation - A commentary: Can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea floor? *Lethaia*, 22, 207-212.
- Davies, D. J., Powell, E. N. & Stanton, R. J. (1989b) Taphonomic signatures as a function of environmental process: Shells and shell beds in a hurricane-influenced inlet on the Texas coast. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, 317-356.
- Dodd, J. R. & Stanton, R. J. (1990) *Paleocology, concepts and applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, 502 pp.
- Dominici, S. (2004) Quantitative taphonomy in sandstones from an ancient fan delta system (Lower Pleistocene, Western Emilia, Italy). *Palaaios*, 19, 193-205.
- Dörjes, J. (1987) Postglaziale Schillablagerungen südlich der Doggerbank (Nordsee). *Natur und Museum*, 117, 190-196.
- Dörjes, J., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1986) Origins of, and mechanisms for mollusk shell accumulations on Georgia Beaches. *Senckenbergiana Maritima*, 18, 1-43.
- Driscoll, E. G. & Weltin, T. P. (1973) Sedimentary parameters as factors in abrasive shell reduction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 13, 275-288.

- Eisma, D., Mook, W. G. & Laban, C. (1981) An early Holocene tidal flat in the Southern Bight. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 5, 229-237.
- Etter, W. (1994) Palökologie. Eine methodische Einführung. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 294 pp.
- Farinati, E. A., Spagnuolo, J. & Aliotta, S. (2008) Taphonomy of Holocene bivalves in the coast of the Bahía Blanca estuary, Argentina. Geobios, 41, 61–67.
- Flessa, K. W. (1998) Well-travelled cockles: Shell transport during Holocene transgression of the southern North Sea. Geology, 26, 187-190.
- Flessa, K. W., Cutler, A. H. & Meldahl, K. H. (1993) Time and taphonomy: Quantitative estimates of time-averaging and stratigraphic disorder in a shallow marine habitat. Paleobiology, 19, 266-286.
- Flessa, K. W. & Kowalewski, M. (1994) Shell survival and time-averaging in nearshore and shelf environments: Estimates from the radiocarbon literature. Lethaia, 27, 1-13.
- Frey, R. W. & Dörjes, J. (1988) Fair- and foul-weather shell accumulations on a Georgia Beach. Palaios, 3, 561-576.
- Frey, R. W. & Howard, J. D. (1986) Taphonomic characteristics of offshore mollusk shells, Sapelo Island, Georgia. Tulane Studies in Geology and Paleontology, 19, 51-61.
- Fürsich, F. T. (1990) Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D. E. G. & Crowther, P. R. (Eds.), Palaeobiology. A synthesis, 235-239. Blackwell Scientific, Oxford.
- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: Paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. Palaios, 2, 543-559.
- Fürsich, F. T., Oschmann, W., Jaitly, A. K. & Singh, I. B. (1991) Faunal response to transgressive-regressive cycles: Example from the Jurassic of western India. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 85, 149-159.
- Futterer, E. (1974) Untersuchungen zum Einsteuerungsverhalten der Einzelklappen von *Cardium echinatum* L. und *Cardium edule* L. im Strömungskanal. Neues Jahrbuch Geologische Paläontologische Monatshefte, 8, 449-455.
- Futterer, E. (1975) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975, 83-89.
- Futterer, E. (1977) Einreglung, Transport und Ablagerung biogener Hartteile im Strömungskanal. Unpublished Ph. D. Thesis, University of Tübingen, 133 pp.
- Gabriel, J. M. (1981) Differing resistance of various mollusc shell materials to simulated whelk attack. Journal of Zoology, 194, 363-369.
- Ginsburg, R. N. (1956) Environmental relationships of grain size and constituent particles in some south Florida carbonate sediments. The American Association of Petroleum Geologists, 40, 2384-2427.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1966) Morphology and evolution of inshore shell ridges and mud-mounds on modern intertidal flats near Bradwell, Essex. Proceedings of the Geologists Association Geological Society Publishing House, 77, 329-346.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1968) Imbricate structure in Essex offshore shell banks. Nature, 220, 1115-1116.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1969) The origin of Holocene shell deposits in the chenier plain facies of Essex (Great Britain). Marine Geology, 7, 403-425.

- Günther, C.-P. (1992) Settlement and recruitment of *Mya arenaria* L. in the Wadden Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 159, 203-215.
- Hallam, A. (1967) The interpretation of size-frequency distributions in molluscan death assemblages. *Paleontology*, 10, 25-42.
- Hallam, A. (1972) Models involving population dynamics. In: Schopf, T. J. M. (Ed.), *Models in paleobiology*, 62-80, Freeman Cooper and Company, San Francisco.
- Hallman, D. P., Flessa, K. W., Kowalewski, M., Hertweck, G., Aggen, J. A. & Carlton, J. (1996) Ternary taphograms and the comparative taphonomy of recent mollusks from the North Sea and the Gulf of California. *Senckenbergiana Maritima*, 27, 67-75.
- Häntzschel, W. (1939) Schlick-Gerölle und Muschel-Klappen als Strömungs-Marken im Wattenmeer. *Natur und Volk*, 119, 412-417.
- Hecht, F. (1930) Ausgeworfene Muscheln (*Mya arenaria* L.) in Lebensstellung, zur Beurteilung eines Beweismittels in der Küstensenkungs-Frage. *Senckenbergiana*, 12, 261.
- Hertweck, G. (1971) Aktuopaläontologische Urkunden, 1. *Polydora ciliata* auf lebenden Herzmuscheln. *Natur und Museum*, 101, 458-466.
- Hertweck, G. (1979a) Aufwuchs von Seepocken auf Hartteilen anderer Tiere, Teil I. *Natur und Museum*, 109, 305-311.
- Hertweck, G. (1979b) Aufwuchs von Seepocken auf Hartteilen anderer Tiere, Teil II. *Natur und Museum*, 109, 361-367.
- Hoffmann, A. (1976) Mortality patterns of some bivalves from the Badenian (Miocene) Korytnica Clays, Poland. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte* 1976, 337-349.
- Hollmann, R. (1968a) Zur Morphologie rezenter Molluskenbruchschiele. *Paläontologische Zeitschrift*, 42, 217-235.
- Hollmann, R. (1968b) Über Schalenabschliff bei *Cardium edule* aus der Königsbucht bei List auf Sylt. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 18, 169-193.
- Jessen, W. (1932) Über rezente und fossile Organismenpflaster. *Paläontologische Zeitung*, 14, 67.
- Jessen, W. (1933) Die postdiluviale Entwicklung Amrums und seine subfossilen und rezenten Muschelpflaster. *Jahrbuch preußische-geologische Landesanstalt*, 53, 1-69.
- Jiménez, A. P. & Braga, J. C. (1993) Occurrence and taphonomy of bivalves from the Níjar reef (Messinian, Late Miocene, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 102, 239-251.
- Johnson, R. G. (1960) Models and methods for analysis of the mode of formation of fossil assemblages. *Bulletin of the Geological Society of America*, 71, 1075-1086.
- Jones, J. R., Cameron, B. & Rollins, H. B. (1989) Paleoecological implications for cohort survivorship for *Mya arenaria* in Massachusetts estuarine waters. *Palaos*, 4, 468-474.
- Kidwell, S. M. (1988) Taphonomic comparison of passive and active continental margins: Neogene shell beds of the Atlantic coastal plain and northern Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 201-223.
- Kidwell, S. M. (2002a) Mesh-size effects on the ecological fidelity of death assemblages: A meta-analysis of molluscan live–dead studies. *Geobios*, 24, 107-119.
- Kidwell, S. M. (2002b) Time-averaged molluscan death assemblages: Palimpsests of richness, snapshots of abundance. *Geology*, 30, 803-806.

- Kidwell, S. M. & Jablonski, D. (1983) Taphonomic feedback: Ecological consequences of shell accumulation. In: Tevesz, M. J. S. & McCall, P. L. (Eds.), *Biotic interaction in recent and fossil benthic communities*. 195–248, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M. & Bosence, D. W. J. (1991) Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record*. Topics in Geobiology, 9, 115-209, Plenum Press, New York.
- Kidwell, S. M., Rothfus, T. A. & Best., M. M. R. (2001) Sensitivity of taphonomic signatures to sample size, damage scoring system, and target taxa. *Palaios*, 16, 26-52.
- Klähn, H. (1932) Der quantitative Verlauf der Aufarbeitung von Sanden, Geröllen und Schalen in wässrigem Medium. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 67 (B), 313-412.
- Klähn, H. (1936) Die Anlösungsgeschwindigkeit kalkiger anorganischer und organischer Körper innerhalb eines wässrigen Mediums. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 8, 239-243.
- Kowalewski, M. (1990) A hermeneutic analysis of the shell-drilling gastropod predation on mollusks in the Korytnica Clays (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Central Poland). *Acta Geologica Polonica*, 40, 183-213.
- Kowalewski, M., Flessa, K. W. & Aggen, J. A. (1994) Taphofacies analysis of recent shelly cheniers (Beach Ridges), northeastern Baja California, Mexico. *Facies*, 31, 209-242.
- Kowalewski, M., Flessa, K. W. & Hallman, D. P. (1995) Ternary taphograms: Triangular diagrams applied to taphonomic analysis. *Palaios*, 10, 478-483.
- Kowalewski, M., Flessa, K. W. & Marcot, J. D. (1997) Predatory scars in the shells of a recent lingulid brachiopod: Paleontological and ecological implications. *Acta Palaeontologica Polonica*, 42, 497-532.
- Kowalewski, M. & Flessa, K. W. (2000) Seasonal predation by migratory shorebirds recorded in shells of lingulid brachiopods from Baja California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 66, 405-416.
- Kowalewski, M., Lasso, D. G. & Carroll, M. (2003) Quantitative fidelity of brachiopod-mollusk assemblages from modern subtidal environments of San Juan Islands, USA. *Journal of Taphonomy*, 1, 43-65.
- Kruskal, J. B. & Wish, M. (1978) *Multidimensional scaling. Series: Quantitative applications in the social sciences*. Sage Publications, Inc., London, 96 pp.
- Kühl, H. (1950) Studien über die Sandklaffmuschel *Mya arenaria*: Die Gewinnung der Klaffmuschel an der deutschen Nordseeküste in den Jahren 1945-1949. Aus dem Institut für Küsten- und Binnenfischerei der Bundesforschungsanstalt für Fischerei, 25-39.
- Kühl, H. (1951) Über die Siedlungsweise von *Mya arenaria*. Sonderdruck aus "Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Wilhelmshaven 1951", 385-391.
- LaBarbera, M. (1981) The ecology of Mesozoic *Gryphaea*, *Exogyra*, and *Hymatogyra* (Bivalvia: Mollusca) in a modern ocean. *Palaeobiology*, 7, 510-526.
- Lassen, H. & Siefert, W. (1991) Mittlere Tidenwasserstände in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 52, 85-137.
- Lawrence, D. L. (1968) Taphonomy and information losses in fossil communities. *Bulletin of the Geological Society of America*, 79, 1315-1350.
- Lazo, D. G. (2004) Bivalve taphonomy: Testing the effect of life habits on the shell condition of the littleneck clam *Protothaca (Protothaca) staminea* (Mollusca: Bivalvia). *Palaios*, 19, 451-459.

- Lever, J. (1958) Quantitative beach research I, the "left-right-phenomenon": Sorting of lamellibranch valves on sandy beaches. *Basteria*, 22, 21-51.
- Lockwood, R. & Work, L. A. (2006) Quantifying taphonomic bias in molluscan death assemblages from the upper Chesapeake Bay: Patterns of shell damage. *Palaios*, 21, 442-450.
- Lozán, J. L. & Kausch, H. (2004) *Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler*. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 300 pp.
- Lüders, K. (1929) Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebbiträchern der Außenjade. *Senckenbergiana*, 11, 123-142.
- McKittrick, M. A. (1987) Experiments on the settling of gastropods and bivalve shells: Biostratigraphic implications. In: Flessa, K. W. (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene inter-tidal deposits Gulf of California*, 150-163, The Palaeontological Society, Tucson, Arizona.
- Meldahl, K. (1993) Geographic gradients in the formation of shell concentrations: Plio-Pleistocene marine deposits, Gulf of California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 101, 1-25.
- Meldahl, K. (1995) Pleistocene shoreline ridges from tide-dominated and wave-dominated coast: Northern Gulf of California and western Baja California, Mexico. *Marine Geology*, 123, 61-72.
- Meldahl, K. H. & Flessa, K. W. (1990) Taphonomic pathways and comparative biofacies and taphofacies in a recent intertidal/shallow shelf environment. *Lethaia*, 23, 43-60.
- Meldahl, K. H. & Cutler, A. H. (1992) Neotectonics and taphonomy: Pleistocene molluscan shell accumulations in the northern Gulf of California. *Palaios*, 7, 187-197.
- Meldahl, K. H., Flessa, K. W. & Cutler, A. H. (1997) Time-averaging and postmortem skeletal survival in benthic fossil assemblages: Quantitative comparisons among Holocene environments. *Paleobiology*, 23, 207-229.
- Müller, A. H. (1992) *Lehrbuch der Paläozoologie*. Band I: Allgemeine Grundlagen. 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Fischer Verlag, Jena, 514 pp.
- Munch-Petersen, S. (1973) An investigation of a population of the soft clam (*Mya arenaria* L.) in a Danish estuary. *Meddelelser fra Danmarks Fiskeri-og Havundersøgelser*, 7, 47-73.
- Nagle, J. S. (1967) Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Research*, 37, 1124-1138.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2002) Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Marine Geology*, 185, 435-469.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2003) Sedimentology of coarse-clastic beach-ridge deposits, Essex, southeast England. *Sedimentary Geology*, 162, 167-198.
- Nebelsick, J. H. (1992) Echinoid distribution by fragment identification in the northern bay of Safaga, Red Sea, Egypt. *Palaios*, 7, 316-328.
- Newell, A. J., Gower, D. J., Benton, M. J. & Tverdokhlebov, V. P. (2007) Bedload abrasion and the in situ fragmentation of bivalve shells. *Sedimentology*, 54, 835-845.
- Parsons, K. M. (1989) Taphonomy as indicator of environment: Smuggler's Cove, St. Croix, U.S. V.I. In: Hubbard, D. K. (Ed.), *Terrestrial and marine ecology of St. Croix, U.S. Virgin Islands*, 135-143, West Indies Laboratory Special Publication, St. Croix.

- Parsons, K. M. & Brett, C. E. (1991) Taphonomic processes and biases in modern marine environments: An actualistic perspective on fossil assemblage preservation. In: Dovovan, S. K. (Ed.), *The processes of fossilization*. 22-65, Bellhaven Press, London.
- Pianka, E. R. (1978) *Evolutionary ecology*. Harper & Row Publishers, New York, 397 pp.
- Powell, E. N., Davies, D. J. & Stanton, R. J. (1987) Taphonomic signature as a function of environmental process: A quantitative approach to biostratigraphy. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 19, 809.
- Powell, E. N., Staff, G. M., Davies, D. J. & Callender, W. R. (1989) Macrobenthic death assemblages in modern marine environments: Formation, interpretation, and application. *CRC Critical Reviews in Aquatic Sciences*, 1, 555-589.
- Powell, E. N. & Davies, D. J. (1990) When is an "old" shell really "old"? *Journal of Geology*, 98, 823-844.
- Powell, E. N., Parsons-Hubbard, K. M., Callender, W. R., Staff, G. M., Rowe, G. T., Brett, C. E., Walker, S. E., Raymond, A., Carlson, D. D., White, S. & Heise, E. A. (2002) Taphonomy on the continental shelf and slope: Two-year trends - Gulf of Mexico and Bahamas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 184, 1-35.
- Pratje, O. (1929) Fazettieren von Molluskenschalen. *Paläontologische Zeitung*, 11, 151.
- Raffaelli, D. G. (1978) The relationship between shell injuries, shell thickness and habitat characteristics of the intertidal snail *Littorina rudis* Maton. *Journal of Molluscan Studies*, 44, 166-170.
- Reineck, H.-E. (1984) *Aktuo-Geologie, klastische Sedimente*, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M., 348 pp.
- Richter, R. (1922) Die Lage schüsselförmiger Körper bei der Einbettung. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. III-VI. *Senckenbergiana*, 4, 105-137.
- Richter, R. (1924) Weiteres zur Verschieden-Häufigkeit der beiden Klappen einer Spezies bei Muscheln und Brachiopoden. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. VII-XI. *Senckenbergiana*, 6, 119-163.
- Richter, R. (1942) Die Einkippungsregel. *Senckenbergiana*, 25, 181-206.
- Salazar-Jimenez, A., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1982) Concavity orientations of bivalve shells in estuarine and nearshore shelf sediments, Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, 566-586.
- Schäfer, W. (1941) Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres – 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens – 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 457, 1-54.
- Schäfer, W. (1962) *Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee*. Senckenberg-Buch, 41, Frankfurt a. M., 666 pp.
- Schneider-Storz, B., Nebelsick, J. H., Wehrmann, A. & Federolf, C. M. J. (2008) Comparative taphonomy of three bivalve species from a mass shell accumulation in the intertidal regime of North Sea tidal flats. *Facies*, 54, 461-478.
- Schubert, H. (1990) Entstehung, Vorkommen und Nutzung sublitoraler Schillanreicherungen im Gebiet um Spiekeroog. Unpublished Ph. D. Thesis, University of Clausthal-Zellerfeld, 190 pp.
- Seilacher, A. (1973) Biostratigraphy: The sedimentology of biologically standardized particles. In: Ginsburg, R. N. (Ed.), *Evolving concepts in sedimentology*, 21, 159-177, John Hopkins University Press, Baltimore.



- Shi, G. R. (1993) Multivariate data analysis in palaeoecology and palaeobiogeography - A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 199-234.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1986) Trilobite taphonomy and middle Devonian taphofacies. *Palaios*, 1, 312-327.
- Speyer, S. E. & Brett, C. E. (1988) Taphofacies models for epeiric sea environments: Middle Paleozoic examples. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 225-262.
- Springer, D. A. & Flessa, K. W. (1996) Faunal gradients in surface and subsurface shelly accumulations from a recent clastic tidal flat, Bahia la Choya, northern Gulf of California, Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126, 261-279.
- Staff, G. & Powell, E. N. (1990) Trilobite taphonomy and middle Devonian taphofacies. *Palaios*, 1, 312-327.
- Strasser, M. (1999a) *Mya arenaria* – an ancient invader of the North Sea coast. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 52, 309-324.
- Strasser, M., Walensky, M. & Reise, K. (1999b) Juvenile-adult distribution of the bivalve *Mya arenaria* on intertidal flats in the Wadden Sea: Why are there so few year classes. *Helgoland Marine Research*, 53, 45-55.
- Strauch, F. (1990) Zur Gliederung einiger känozoischer Schill-Typen. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 181, 417-430.
- Tanabe, K. & Arimura, E. (1987) Ecology of four infaunal bivalve species in the recent intertidal zone, Shikoku, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 60, 219-230.
- Tauber, A. F. (1942) Postmortale Veränderungen an Molluskenschalen und ihre Auswertbarkeit für die Erforschung vorzeitlicher Lebensräume. *Palaeobiologica*, 7, 448-495.
- Taylor, J. D. & Layman, M. (1972) The mechanical properties of bivalve (Mollusca) shell structures. *Palaeontology*, 15, 73-87.
- Trewin, N. H. & Welsh, W. (1976) Formation and composition of a graded estuarine shell bed. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 19, 219-230.
- Trusheim, F. (1931) Versuche über Transport und Ablagerung von Mollusken. *Senckenbergiana*, 13, 124.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1950) Environment of formation and facies of the Wadden Sea sediments. *Tijdschrift (K.) Nederlands Aardrijkskund*, 67, 94-108.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea. *Process (K.) Nederlands Akademik Wetenschappen*, (B) 55, 500-516.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1956) Composition of shell beds formed in tidal flat environments in the Netherlands and in the Bay of Arachon (France). *Geologie en Mijnbouw*, 18, 209-226.
- Vermeij, G. J. (1983a) Shell-breaking predation through time. In: Tevesz, M. J. S. & McCall, P. L. (Eds.), *Biotic interaction in recent and fossil benthic communities*. 649-669, Plenum Press, New York.
- Vermeij, G. J. (1983b) Traces and trends of predation, with special reference to bivalved animals. *Palaeontology*, 26, 455-465.
- Walker, S. E. & Yamada, S. B. (1993) Implications for the gastropod fossil record of mistaken crab predation on empty mollusc shells. *Palaeontology*, 36, 735-741.
- Weigelt, J. (1927) Über Biostratonomie. *Der Geologe*, 42, 1069-1082.

- Wendt, J. (1995) Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, 161-186.
- Wiedemann, H. U. (1972) Shell deposits and shell preservation in Quaternary and Tertiary estuarine sediments in Georgia. *Sedimentary Geology*, 7, 103-125.
- Wilson, J. B. (1963) The Relation of shell beds to living molluscan faunas. *Transactions of the Dumfriesshire and Galloway Natural History and Antiquarian*, 40, 98-101.
- Zuschin, M. & Stanton, R. J. (2001) Experimental measurement of shell strength and its taphonomic interpretation. *Palaios*, 16, 161-170.
- Zuschin, M., Stachowitsch, M. & Stanton, R. J. (2003) Patterns and processes of shell fragmentation in modern and ancient marine environments. *Earth-Science Reviews*, 63, 33–82.
- Zwarts, L. & Wanink, J. (1984) How oystercatchers and curlews successively deplete clams. In: Evans, P. R., Goss-Custard, J. D. & Hale, W. G. (Eds.), *Coastal waders and wildfowl in winter*. 69-83, Cambridge University Press, Cambridge.
- Zwarts, L. & Wanink, J. (1989) Siphon size and burying depth in deposit- and suspension-feeding benthic bivalves. *Marine Biology*, 100, 227-240.

**Tafeln**  
**Kapitel 3**

### Tafel 3-1

**Bild A:** Blick auf das Schill-Vorkommen im Fedderwarder Wattgebiet. Niedrigwasser ist noch nicht erreicht. Links befindet sich der Fedderwarder Hauptpriel. Blickrichtung ist Südost.

**Bild B:** Blick auf das Schill-Vorkommen im Fedderwarder Wattgebiet. Niedrigwasser ist noch nicht erreicht. Rechts befindet sich der Fedderwarder Hauptpriel. Blickrichtung ist Nordwest.

**Bild C:** Blick auf das Sahlenburger Schill-Vorkommen bei mittlerem Niedrigwasserstand. Blick in nordwestlicher Richtung auf das Sahlenburger Loch.

**Bild D:** Frontalblick auf das Sahlenburger Schill-Vorkommen bei mittlerem Niedrigwasserstand. Blick in südwestlicher Richtung auf die rückwertigen Schill-Felder.

**Bild E:** Probenentnahme entlang des Fedderwarder Transekts. Blickrichtung nordöstlich zum Fedderwarder Hauptpriel. Lokation: Fedderwarder Watt.

**Bild F:** Probenentnahme entlang des Sahlenburger Transekts. Blickrichtung ist nordwestlich. Lokation: Sahlenburger Watt.

Tafel 3-1



### Tafel 3-2

**Bild A:** Freierodierte adulte *M. arenaria* Siedlung mit postmortalen Doppelklappen in Lebensstellung zur Niedrigwasserzeit. Lokation: Fedderwarder Watt.

**Bild B:** Detailaufnahme einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Innenseite. Taphonomischer Grad der Randerhaltung ist (1). Probe FWS 3, Schalen Nr. 147.

**Bild C:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 3, Schalen Nr. 147. Lokation: Fedderwarder Watt.

**Bild D:** Außenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 3, Schalen Nr. 147.

**Bild E:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (1), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 37, Schalen Nr. 8.

**Bild F:** Außenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (1), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 37, Schalen Nr. 8.

Tafel 3-2



### Tafel 3-3

**Bild A:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 16, Schalen Nr. 37.

**Bild B:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 16, Schalen Nr. 37.

**Bild C:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (0), Fragmentation (0), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 17, Schalen Nr. 19.

**Bild D:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (0), Fragmentation (0), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 17, Schalen Nr. 19.

**Bild E:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (1), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 30, Schalen Nr. 25.

**Bild F:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (1), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 30, Schalen Nr. 25.



Tafel 3-3



### Tafel 3-4

**Bild A:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (2), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 1, Schalen Nr. 72.

**Bild B:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (2), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 1, Schalen Nr. 72.

**Bild C:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (2), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 9, Schalen Nr. 71.

**Bild D:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (0), Fragmentation (0), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 9, Schalen Nr. 71.

**Bild E:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (2), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 9, Schalen Nr. 6.

**Bild F:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (2), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 9, Schalen Nr. 6.

Tafel 3-4



### Tafel 3-5

**Bild A:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit reliktschen Balaniden Abdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (2), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 3, Schalen Nr. 18.

**Bild B:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit reliktschen Balaniden Abdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (2), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 3, Schalen Nr. 18.

**Bild C:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balaniden und reliktschen Abdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 3, Schalen Nr. 14.

**Bild D:** Außenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit reliktschen Balanidenabdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 3, Schalen Nr. 14.

**Bild E:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balaniden und deren Basalplatten. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (1), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 3, Schalen Nr. 54.

**Bild F:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Resten von Byssusfäden. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (1), Inkrustation (1), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 3, Schalen Nr. 54.

Tafel 3-5



### Tafel 3-6

**Bild A:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (0), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 30, Schalen Nr. 1.

**Bild B:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (0), Fragmentation (0), Inkrustation (0), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe Sahl 30, Schalen Nr. 1.

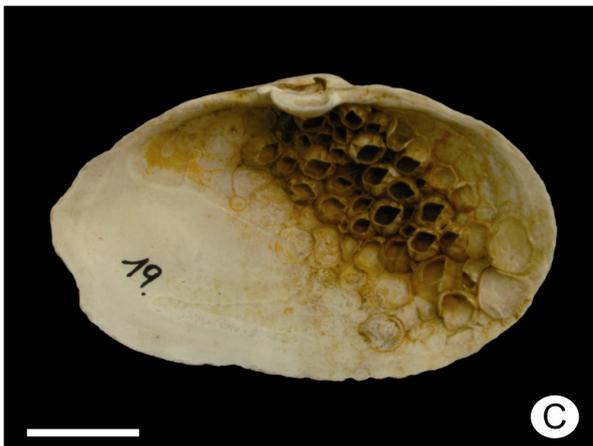
**Bild C:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balaniden und reliktschen Abdrücke sowie Reste ihrer Basalplatten. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 9, Schalen Nr. 19.

**Bild D:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenbewuchs sowie Abdrücke und Reste von ihren Basalplatten. Taphonomische Grade: Abrasion (1), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 9, Schalen Nr. 19.

**Bild E:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenabdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 32, Schalen Nr. 1.

**Bild F:** Außenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenabdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 32, Schalen Nr. 1.

Tafel 3-6



### Tafel 3-7

**Bild A:** Innenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe Sahl 32, Schalen Nr. 33.

**Bild B:** Außenseite einer rechten *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenabdrücken und Algenresten. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe Sahl 32, Schalen Nr. 33.

**Bild C:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenabdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (1), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 35, Schalen Nr. 49.

**Bild D:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanidenabdrücken. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (1), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe Sahl 35, Schalen Nr. 49.

**Bild E:** Innenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balaniden- und Bryozoenaufwuchs. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (0), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (2). Probe FWS 1, Schalen Nr. 67.

**Bild F:** Außenseite einer linken *M. arenaria* Klappenhälfte mit Balanide und einer festgehafteten Austernklappe. Taphonomische Grade: Abrasion (2), Fragmentation (1), Inkrustation (2), Bioerosion (0) und Randerhaltung (1). Probe FWS 1, Schalen Nr. 50.



Tafel 3-7





# **Tabellenanhang**

## **Kapitel 3**

**Tab. 3-1a.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Längenhäufigkeit für die Doppelklappen aus dem ehemaligen Siedlungshorizont (Fedderwarder Transekt) Probe FWS 16

Deskriptive Statistiken	
N	167
Mittelwert	2,961
Standardabweichung	0,594
Minimum	2,19
Maximum	7,05
Extremste Differenzen	
	Klappenlänge
Absolut	0,187
Positiv	0,187
Negativ	-0,139
Kolmogorov-Smirnov-Z	2,422
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* es liegt ein signifikanter p-Wert vor, die Werte sind also nicht normalverteilt

**Tab. 3-1b.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Längenhäufigkeit für die Doppelklappen aus dem ehemaligen Siedlungshorizont (Fedderwarder Transekt) Probe FWS 17

Deskriptive Statistiken	
N	49
Mittelwert	6,356
Standardabweichung	1,229
Minimum	2,37
Maximum	8,36
Extremste Differenzen	
	Klappenlänge
Absolut	0,147
Positiv	0,083
Negativ	-0,147
Kolmogorov-Smirnov-Z	1,030
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,240*

\* es liegt ein nicht signifikanter p-Wert vor, die Werte sind also hinreichend normalverteilt

**Tab. 3-5a.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Längenhäufigkeit für das Fedderwarder Transekt (ohne FWS 16 & 17)

Deskriptive Statistiken	
N	2518
Mittelwert	5,162
Standardabweichung	1,545
Minimum	0,85
Maximum	10,51
Extremste Differenzen	
	Klappenlänge
Absolut	0,053
Positiv	0,050
Negativ	-0,053
Kolmogorov-Smirnov-Z	2,666
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* es liegt ein signifikanter p-Wert vor, die Werte sind also nicht normalverteilt

**Tab. 3-5b.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Längenhäufigkeit für das Sahlenburger Transekt

Deskriptive Statistiken	
N	1262
Mittelwert	6,290
Standardabweichung	1,611
Minimum	1,04
Maximum	11,97
Extremste Differenzen	
	Klappenlänge
Absolut	0,031
Positiv	0,015
Negativ	-0,031
Kolmogorov-Smirnov-Z	1,100
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,177

\* es liegt ein nicht signifikanter p-Wert vor, die Werte sind also hinreichend normalverteilt

**Tab. 3-2a.** Kolmogorov-Smirnov-Z-Test Klappenverteilung zwischen FWS 16 und Feddenwarder Transekt

Transekt	Klappenanzahl N
Feddenwarder Transekt	2518
FWS 16	167
Gesamt	2685
Extremste Differenzen	
Absolut	0,793
Positiv	0,111
Negativ	-0,793
Kolmogorov-Smirnov-Z	9,922
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* da  $p < 0,001$  liegt ein höchst signifikanter Unterschied zwischen Probe FWS 16 und dem Feddenwarder Transekt vor.

**Tab. 3-2b.** Mann-Whitney-Test Klappenverteilung zwischen FWS 16 und Feddenwarder Transekt

Transekt	Klappenanzahl N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Feddenwarder Transekt	2518	1403,01	3532781
FWS 16	167	438,17	73174
Gesamt	2685		
Test			
Klappenlänge			
Mann-Whitney-U	59146,000		
Wilcoxon-W	73174,000		
Z	-15,575		
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*		

**Tab. 3-3a.** Kolmogorov-Smirnov-Z-Test Klappenverteilung zwischen FWS 17 und Feddenwarder Transekt

Transekt	Klappenanzahl N
Feddenwarder Transekt	2518
FWS 17	49
Gesamt	2567
Extremste Differenzen	
Klappenlänge	
Absolut	0,404
Positiv	0,404
Negativ	-0,012
Kolmogorov-Smirnov-Z	2,799
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* da  $p < 0,001$  liegt ein höchst signifikanter Unterschied zwischen Probe FWS 17 und dem Feddenwarder Transekt vor.

**Tab. 3-3b.** Mann-Whitney-Test Klappenverteilung zwischen FWS 17 und Feddenwarder Transekt

Transekt	Klappenanzahl N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Feddenwarder Transekt	2518	1272,51	3204174,5
FWS 17	49	1874,56	91853,5
Gesamt	2567		
Test			
Klappenlänge			
Mann-Whitney-U	32753,500		
Wilcoxon-W	3204174,500		
Z	-5,632		
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*		

**Tab. 3-4a.** Kolmogorov-Smirnov-Z-Test Klappenverteilung zwischen FWS 16 und FWS 17

Transekt	Klappenanzahl N
FWS 17	49
FWS 16	167
Gesamt	216
Extremste Differenzen	
Absolut	0,956
Positiv	0,956
Negativ	0,000
Kolmogorov-Smirnov-Z	5,882
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* da  $p < 0,001$  liegt ein höchst signifikanter Unterschied zwischen FWS 16 und FWS 17 vor.

**Tab. 3-11a.** Kolmogorov-Smirnov-Z-Test Klappenverteilung zwischen Feddenwader und Sahlenburger Transekt

Transekt	Klappenanzahl N
Feddenwader	2518
Sahlenburger	1262
Gesamt	3780
Extremste Differenzen	
Absolut	0,277
Positiv	0,277
Negativ	0,000
Kolmogorov-Smirnov-Z	8,020
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*

\* da  $p < 0,001$  liegt ein höchst signifikanter Unterschied zwischen beiden Transekten vor.

**Tab. 3-4b.** Mann-Whitney-Test Klappenverteilung zwischen FWS 16 und FWS 17

Transekt	Klappenanzahl N	Mittlerer Rang	Rangsumme
FWS 17	49	187,07	9166,5
FWS 16	167	85,45	14269,5
Gesamt	216		
Test			
Mann-Whitney-U	241,500		
Wilcoxon-W	14269,500		
Z	-10,009		
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*		

**Tab. 3-11b.** Mann-Whitney-Test Klappenverteilung zwischen Feddenwader und Sahlenburger Transekt

Transekt	Klappenanzahl N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Feddenwader	2518	1651,73	4159063
Sahlenburger	1262	2366,90	2987027
Gesamt	3780		
Test			
Mann-Whitney-U	987642,000		
Wilcoxon-W	4159063,000		
Z	-19,000		
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000*		

**Tab. 3-6a.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest (Normalverteilung) für die Klappenlängen der einzelnen Proben des Sahlenburger Transekts

Probennummer	30	31	32	33	34	35	36	37	38
N	160	108	130	148	114	164	169	151	118
Mittelwert (cm)	6,57	6,71	5,85	6,68	6,33	6,09	6,43	5,98	5,96
Standardabweichung	1,59	1,57	1,79	1,44	1,59	1,31	1,62	1,73	1,63
Extremste Differenzen									
Absolut	0,07	0,09	0,07	0,05	0,07	0,06	0,07	0,05	0,05
Positiv	0,03	0,04	0,07	0,04	0,04	0,06	0,03	0,03	0,04
Negativ	-0,07	-0,09	-0,03	-0,05	-0,07	-0,05	-0,07	-0,05	-0,05
Kolmogorov-Smirnov-Z	0,90	0,95	0,84	0,66	0,72	0,71	0,87	0,64	0,56
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,39	0,33	0,48	0,78	0,67	0,70	0,43	0,81	0,91

**Tab. 3-6b.** Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest (Normalverteilung) für die Klappenlängen der einzelnen Proben des Fedderwader Transekts

Probennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	162	171	301	190	135	118	121	274	134	149	234	106
Mittelwert	5,9436	6,2218	5,7905	4,8371	4,9745	5,5664	5,1307	4,4111	4,8501	4,9114	4,6350	5,6379
Standardabweichung	1,3661	1,0771	1,1273	1,1382	1,3192	1,5128	1,0968	1,6053	1,7181	1,5860	1,6018	1,3449
Extremste Differenzen												
Absolut	0,0727	0,0620	0,0419	0,0590	0,0471	0,0703	0,0514	0,0972	0,0989	0,0778	0,1055	0,0646
Positiv	0,0399	0,0432	0,0419	0,0481	0,0471	0,0543	0,0485	0,0972	0,0989	0,0778	0,1055	0,0646
Negativ	-0,0727	-0,0620	-0,0373	-0,0590	-0,0333	-0,0703	-0,0514	-0,0749	-0,0841	-0,0739	-0,0910	-0,0438
Kolmogorov-Smirnov-Z	0,9254	0,8109	0,7270	0,8127	0,5473	0,7632	0,5651	1,6085	1,1448	0,9502	1,6140	0,6647
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,3587	0,5266	0,6659	0,5237	0,9255	0,6051	0,9068	<b>0,0113*</b>	0,1454	0,3272	<b>0,0109*</b>	0,7688

Probennummer	13	14	15	16	17
N	113	155	155	167	49
Mittelwert	4,5649	5,2306	4,9088	2,9605	6,3555
Standardabweichung	1,9537	1,5649	1,6279	0,5936	1,2290
Extremste Differenzen					
Absolut	0,1674	0,0562	0,0676	0,1875	0,1471
Positiv	0,1674	0,0497	0,0598	0,1875	0,0831
Negativ	-0,0953	-0,0562	-0,0676	-0,1393	-0,1471
Kolmogorov-Smirnov-Z	1,7800	0,6998	0,8415	2,4224	1,0296
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	<b>0,0035*</b>	0,7116	0,4784	<b>0,0000*</b>	0,2396

\* Abweichung von Normalverteilung da  $p < 0,05$

**Tab. 3-7.** Kruskal-Wallis Test (H-Test) für die Klappenlänge Fedderwarder Transekt

Variable	Ränge/ Probennummer	N	Mittlerer Rang
Klappenlänge	1	162	1823,11
	2	171	1984,33
	3	301	1729,38
	4	190	1208,01
	5	135	1297,59
	6	118	1615,02
	7	121	1353,90
	8	274	1055,75
	9	134	1289,85
	10	149	1302,90
	11	234	1180,35
	12	106	1633,86
	13	113	1170,85
	14	155	1435,08
	15	155	1269,82
	16	167	403,51
	17	49	2037,90
Gesamt		2734	

Test für die Klappenlänge	
Chi-Quadrat	607,259
df	16
Asymptotische Signifikanz; p-Wert	0,000*

\* da  $p < 0,001$  ist die Hypothese, alle Proben seien bezüglich ihrer Längenklassen gleich, zu verwerfen.

**Tab. 3-9a.** Test der Homogenität der Varianzen für die Klappenlängen des Sahlenburger Transekts

Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
2,79	8,00	1253	0,005

**Tab. 3-9b.** Oneway ANOVA für die Klappenlängen des Sahlenburger Transekts

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	116,999	8	14,625	5,810	0,000
Innerhalb der Gruppen	3154,177	1253	2,517		
Gesamt	3271,176	1261			

**Tab. 3-9c.** Robuste Testverfahren zur Prüfung auf Gleichheit der Mittelwerte des Sahlenburger Transekts

	Statistik (*)	df1	df2	Sig.
Welch-Test	5,711	8	503,729	0,000

(\*)=Asymptotisch F-verteilt



**Tab. 3-10.** Mehrfachvergleiche der Klappenlängen innerhalb der Proben des Sahlenburger Transekts unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Proben Nr.	Vergleich Proben Nr.	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
30	31	-0,143199	0,19759	1,000	-0,9228	0,6364
	32	0,718298	0,18734	0,066	-0,0208	1,4574
	33	-0,113179	0,18095	1,000	-0,8271	0,6007
	34	0,238638	0,19446	0,993	-0,5286	1,0059
	35	0,474595	0,17630	0,511	-0,2210	1,1702
	36	0,141807	0,17501	1,000	-0,5487	0,8323
	37	0,592017	0,18001	0,214	-0,1182	1,3022
	38	0,611002	0,19253	0,261	-0,1486	1,3706
31	30	0,143199	0,19759	1,000	-0,6364	0,9228
	<b>32</b>	<b>0,86150*</b>	0,20657	<b>0,027</b>	0,0465	1,6765
	33	0,030020	0,20079	1,000	-0,7622	0,8222
	34	0,381837	0,21305	0,920	-0,4587	1,2224
	35	0,617794	0,19662	0,275	-0,1579	1,3935
	36	0,285006	0,19546	0,977	-0,4862	1,0562
	37	0,735216	0,19995	0,096	-0,0537	1,5241
	38	0,754201	0,21129	0,122	-0,0794	1,5878
32	30	-0,718298	0,18734	0,066	-1,4574	0,0208
	<b>31</b>	<b>-0,86150*</b>	0,20657	<b>0,027</b>	-1,6765	-0,0465
	<b>33</b>	<b>-0,83148*</b>	0,19072	<b>0,015</b>	-1,5839	-0,0790
	34	-0,479660	0,20358	0,697	-1,2829	0,3236
	35	-0,243704	0,18631	0,989	-0,9788	0,4914
	36	-0,576491	0,18509	0,288	-1,3068	0,1538
	37	-0,126281	0,18983	1,000	-0,8752	0,6227
	38	-0,107296	0,20173	1,000	-0,9032	0,6886
	33	30	0,113179	0,18095	1,000	-0,6007
31		-0,030020	0,20079	1,000	-0,8222	0,7622
<b>32</b>		<b>0,83148*</b>	0,19072	<b>0,015</b>	0,0790	1,5839
34		0,351817	0,19771	0,923	-0,4282	1,1319
35		0,587774	0,17988	0,222	-0,1219	1,2975
36		0,254986	0,17862	0,980	-0,4497	0,9597
37		0,705196	0,18352	0,065	-0,0189	1,4293
38		0,724181	0,19581	0,092	-0,0484	1,4967
34	30	-0,238638	0,19446	0,993	-1,0059	0,5286
	31	-0,381837	0,21305	0,920	-1,2224	0,4587
	32	0,479660	0,20358	0,697	-0,3236	1,2829
	33	-0,351817	0,19771	0,923	-1,1319	0,4282
	35	0,235956	0,19347	0,993	-0,5274	0,9993
	36	-0,096831	0,19229	1,000	-0,8555	0,6618
	37	0,353379	0,19686	0,919	-0,4233	1,1301
	38	0,372364	0,20836	0,921	-0,4497	1,1944

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung der Tabelle 3-10.** Mehrfachvergleiche der Klappenlängen innerhalb der Proben des Sahlburger Transekts unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Proben Nr.	Vergleich Proben Nr.	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
35	30	-0,474595	0,17630	0,511	-1,1702	0,2210
	31	-0,617794	0,19662	0,275	-1,3935	0,1579
	32	0,243704	0,18631	0,989	-0,4914	0,9788
	33	-0,587774	0,17988	0,222	-1,2975	0,1219
	34	-0,235956	0,19347	0,993	-0,9993	0,5274
	36	-0,332788	0,17391	0,886	-1,0189	0,3534
	37	0,117423	0,17894	1,000	-0,5886	0,8234
	38	0,136408	0,19153	1,000	-0,6192	0,8921
36	30	-0,141807	0,17501	1,000	-0,8323	0,5487
	31	-0,285006	0,19546	0,977	-1,0562	0,4862
	32	0,576491	0,18509	0,288	-0,1538	1,3068
	33	-0,254986	0,17862	0,980	-0,9597	0,4497
	34	0,096831	0,19229	1,000	-0,6618	0,8555
	35	0,332788	0,17391	0,886	-0,3534	1,0189
	37	0,450210	0,17767	0,600	-0,2508	1,1512
	38	0,469195	0,19034	0,639	-0,2818	1,2202
37	30	-0,592017	0,18001	0,214	-1,3022	0,1182
	31	-0,735216	0,19995	0,096	-1,5241	0,0537
	32	0,126281	0,18983	1,000	-0,6227	0,8752
	33	-0,705196	0,18352	0,065	-1,4293	0,0189
	34	-0,353379	0,19686	0,919	-1,1301	0,4233
	35	-0,117423	0,17894	1,000	-0,8234	0,5886
	36	-0,450210	0,17767	0,600	-1,1512	0,2508
	38	0,018985	0,19495	1,000	-0,7502	0,7881
38	30	-0,611002	0,19253	0,261	-1,3706	0,1486
	31	-0,754201	0,21129	0,122	-1,5878	0,0794
	32	0,107296	0,20173	1,000	-0,6886	0,9032
	33	-0,724181	0,19581	0,092	-1,4967	0,0484
	34	-0,372364	0,20836	0,921	-1,1944	0,4497
	35	-0,136408	0,19153	1,000	-0,8921	0,6192
	36	-0,469195	0,19034	0,639	-1,2202	0,2818
	37	-0,018985	0,19495	1,000	-0,7881	0,7502

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 3-15.** ANOSIM-Prozedur für das Fedderwarder Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse (One-Way-Analyse)

**a) Gruppenzugehörigkeit**

Probe	Untergruppe
FWS 1	I
FWS 2	I
FWS 3	II
FWS 4	II
FWS 5	III
FWS 6	III
FWS 7	IV
FWS 8	IV
FWS 9	IV
FWS 10	IV
FWS 11	IV
FWS 13	IV
FWS 12	V
FWS 14	V
FWS 15	V
FWS 16	VI
FWS 17	VI

**b) Global Test**

Sample statistic (Global R):	0,888
Significance level of sample statistic:	0,1%
Number of permutations:	999(*)
Number of permuted statistics greater than or equal to Global R:	0

(\*) Random sample from 214414200

**c) Tests der Untergruppen**

Untergruppen	R Statistic	Significance Level %	Possible Permutations	Actual Permutations	Number >= Observed
I vs. II	1	33,3	3	3	1
I vs. III	1	33,3	3	3	1
I vs. IV	1	3,6	28	28	1
I vs. V	1	10	10	10	1
I vs. VI	1	33,3	3	3	1
II vs. III	1	33,3	3	3	1
II vs. IV	1	3,6	28	28	1
II vs. V	1	10	10	10	1
II vs. VI	1	33,3	3	3	1
III vs. IV	0,469	3,6	28	28	1
III vs. V	0,917	10	10	10	1
III vs. VI	1	33,3	3	3	1
IV vs. V	0,815	1,2	84	84	1
IV vs. VI	1	3,6	28	28	1
V vs. VI	1	10	10	10	1

**Tab. 3-16.** ANOSIM-Prozedur für das Sahleburger Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse (One-Way-Analyse)

**a) Gruppenzugehörigkeit**

Probe	Untergruppe
Sahl 30	II
Sahl 31	II
Sahl 32	II
Sahl 33	II
Sahl 34	II
Sahl 35	III
Sahl 38	III
Sahl 36	IV
Sahl 37	IV

**b) Global Test**

Sample statistic (Global R):	0,744
Significance level of sample statistic:	0,1%
Number of permutations:	999(*)
Number of permuted statistics greater than or equal to Global R:	0

(\*) Random sample from 1260

**c) Tests der Untergruppen**

Untergruppen	R Statistic	Significance Level %	Possible Permutations	Actual Permutations	Number >= Observed
II vs. I	0,833	10	10	10	1
II vs. III	0,75	33,3	3	3	1
II vs. IV	0,75	33,3	3	3	1
I vs. III	0,75	10	10	10	1
I vs. IV	1	10	10	10	1
III vs. IV	1	33,3	3	3	1

**Tab. 3-17.** SIMPER Prozedur für das Fedderwarder Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse innerhalb der Untergruppen I bis VI (One-Way Analyse)

<b>Untergruppe I</b>		Rückbereich		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		95,76%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	1,77	35,26	35,26	
Inkrustation	1,31	26,19	61,44	
Abrasion	1,3	25,36	86,8	
Fragmentation	0,7	13,2	100	
<b>Untergruppe II</b>		Hochkantschill		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		98,74%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	1,51	37,91	37,91	
Abrasion	1,11	27,99	65,9	
Inkrustation	0,75	18,58	84,48	
Fragmentation	0,62	15,52	100	
<b>Untergruppe III</b>		Dachziegellagerung		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		98,31%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	1,56	41,11	41,11	
Abrasion	1,19	31,56	72,68	
Fragmentation	0,66	15,92	88,59	
Inkrustation	0,44	11,41	100	
<b>Untergruppe IV</b>		Rosetten & Pflaster		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		93,66%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	1,52	43,67	43,67	
Abrasion	0,95	26,79	70,46	
Fragmentation	0,74	20,96	91,42	
<b>Untergruppe V</b>		Pflaster		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		97,08%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	1,79	44,45	44,45	
Abrasion	1,18	29,16	73,6	
Fragmentation	0,8	18,8	92,4	
<b>Untergruppe VI</b>		Mya Horizonte		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		81,31%		
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %	
Randerhaltung	0,98	70,07	70,07	
Abrasion	0,28	15,33	85,4	
Fragmentation	0,16	7,3	92,7	

**Tab. 3-18.** SIMPER Prozedur für das Sahlenburger Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse innerhalb der Untergruppen I bis IV (One-Way Analyse)

<b>Untergruppe I</b>		Rückbereich	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		94,06%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,61	30,38	30,38
Abrasion	1,61	30,21	60,59
Inkrustation	1,41	25,43	86,02
Fragmentation	0,79	13,98	100
<b>Untergruppe II</b>		neuere Patches mit Rosetten	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		93,30%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,55	39,23	39,23
Abrasion	1,11	24,62	63,85
Fragmentation	0,72	18,21	82,05
Inkrustation	0,81	17,95	100
<b>Untergruppe III</b>		Hochkantschill	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		94,96%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,63	36,72	36,72
Abrasion	1,38	29,56	66,28
Inkrustation	0,82	17,32	83,6
Fragmentation	0,74	16,4	100
<b>Untergruppe IV</b>		Rosetten & Pflaster	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		92,39%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,48	40,46	40,46
Abrasion	1,23	32,95	73,41
Fragmentation	0,64	17,34	90,75
Inkrustation	0,4	9,25	100

**Tab. 3-19.** ANOSIM-Prozedur für das Fedderwarder und Sahlenburger Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse (One-Way-Analyse)

**a) Gruppenzugehörigkeit**

Probe	Untergruppe	Probe	Untergruppe
FWS 1	I	Sahl 36	IV
FWS 2	I	Sahl 37	IV
Sahl 32	I	FWS 10	V
Sahl 33	I	FWS 11	V
Sahl 34	I	FWS 13	V
FWS 3	II	FWS 12	V
FWS 4	II	FWS 14	V
Sahl 31	II	FWS 15	V
Sahl 30	III	FWS 7	VI
Sahl 35	III	FWS 8	VI
Sahl 38	III	FWS 9	VI
FWS 5	IV	FWS 16	VII
FWS 6	IV	FWS 17	VII

**b) Global Test**

Sample statistic (Global R):	0,86
Significance level of sample statistic:	0,1%
Number of permutations:	999(*)
Number of permuted statistics greater than or equal to Global R:	0

(\*) Random sample from a large number

**c) Tests der Untergruppen**

Untergruppen	R Statistic	Significance Level %	Possible Permutations	Actual Permutations	Number >= Observed
III vs. II	0,815	10	10	10	1
III vs. I	0,723	1,8	56	56	1
III vs. IV	1	2,9	35	35	1
III vs. VI	1	10	10	10	1
III vs. V	1	1,2	84	84	1
III vs. VII	1	10	10	10	1
II vs. I	0,979	1,8	56	56	1
II vs. IV	0,963	2,9	35	35	1
II vs. VI	1	10	10	10	1
II vs. V	1	1,2	84	84	1
II vs. VII	1	10	10	10	1
I vs. IV	1	0,8	126	126	1
I vs. VI	1	1,8	56	56	1
I vs. V	1	0,2	462	462	1
I vs. VII	1	4,8	21	21	1
IV vs. VI	1	2,9	35	35	1
IV vs. V	0,647	0,5	210	210	1
IV vs. VII	1	6,7	15	15	1
VI vs. V	0,852	1,2	84	84	1
VI vs. VII	1	10	10	10	1
V vs. VII	1	3,6	28	28	1

**Tab. 3-20.** SIMPER Prozedur für Fedderwarder und Sahlenburger Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse innerhalb der Untergruppen I bis VI (One-Way Analyse)

<b>Untergruppe I</b>		Rückbereich	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		93,76%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,67	32,42	32,42
Abrasion	1,48	27,51	59,93
Inkrustation	1,37	26,17	86,1
Fragmentation	0,75	13,9	100

<b>Untergruppe II</b>		Hochkantschill	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		96,96%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,52	39,19	39,19
Abrasion	1,06	26,23	65,42
Inkrustation	0,73	18,51	83,93
Fragmentation	0,65	16,07	100

<b>Untergruppe III</b>		Rosetten	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		96,19%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,61	36,25	36,25
Abrasion	1,34	29,12	65,38
Inkrustation	0,85	18,3	83,67
Fragmentation	0,73	16,33	100

<b>Untergruppe IV</b>		Rosetten & Pflaster	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		95,12%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,52	43,91	43,91
Abrasion	1,21	25,98	69,88
Fragmentation	0,65	21,07	90,95
Inkrustation	0,42	9,05	100

<b>Untergruppe V</b>		Dachziegellagerung	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		95,81%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,52	40,66	40,66
Abrasion	1,21	32,09	72,74
Fragmentation	0,65	16,89	89,64
Inkrustation	0,42	10,36	100

<b>Untergruppe VI</b>		Pflastervariationen	
Durchschnittliche Ähnlichkeit:		95,05%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum. %
Randerhaltung	1,7	43,68	43,68
Abrasion	1,1	28,01	71,69
Fragmentation	0,8	20,51	92,2
Inkrustation	0,33	7,8	100



**Fortsetzung Tab. 3-20.** SIMPER Prozedur für Fedderwarder und Sahlenburger Transekt  
Ähnlichkeitsanalyse innerhalb der Untergruppen I bis VII (One-Way Analyse)

<b>Untergruppe VII</b>		Mya Horizonte		
Durchschnittliche Ähnlichkeit:			81,31%	
Tapho. Merkmal	Beanspruchung	Contrib%	Cum.%	
Randerhaltung	0,98	70,07	70,07	
Abrasion	0,28	15,33	85,4	
Fragmentation	0,16	7,3	92,7	
Inkrustation	0,27	7,3	100	





## **KAPITEL 4**

### **Genese von Hochkantschill-Strukturen am Beispiel von *Mya arenaria***

**Experimentelle Untersuchungen im Wellenkanal**

## Kurzfassung

Im folgenden Kapitel werden durch Experimentreihen in einem Wellenkanal der Geneseprozess sowie die hydrodynamischen Randparameter bestimmt, die zu einer vertikalen Hochkantstellung von *M. arenaria* Einzelklappen führen.

Ziel der Untersuchung ist es detaillierte Informationen über die Genese von Hochkantschill-Strukturen zu erhalten. Es soll geprüft werden, ob die Geländeuntersuchungen sich mit den Laborexperimenten am Wellenkanal decken. Ergänzend zu den Naturbeobachtungen im Arbeitsgebiet sollen die Experimentreihen dazu dienen, die Bildungsprozesse sowie die hydrodynamischen Randparameter zu entschlüsseln, die zu den verschiedenen Lagerungsstrukturen auf den Schill-Vorkommen führen.

Um diese Fragen zu klären, wurden systematische Versuchsreihen zu jeweils unterschiedlichen Wassertiefen am Wellenkanal durchgeführt. Folgende Parameter wurden hierbei aufgenommen und berechnet: die Wellenhöhe und -Länge sowie die Periode und die Laufgeschwindigkeit einer Welle. Des Weiteren rechnerisch bestimmt wurde die vertikale und horizontale Partikelgeschwindigkeit. Es sollte geprüft werden, ob ein Zusammenhang der vertikalen Einregelung und der Schalenkonzentration besteht. Hierzu wurden Konzentrationsversuche mit *M. arenaria* Einzelklappen unter Laborbedingungen durchgeführt.

Mit Hilfe der Experimentreihen gelang es die hydrodynamischen Randparameter in einem engen Entstehungsfeld einzugrenzen, welche zu einer vertikalen Einregelung der Klappen führen. Die Experimente verdeutlichen, dass für eine Hochkantschill-Genese mehrere Randbedingungen erfüllt sein müssen als bislang vermutet. Neben der morphologischen und konzentrationsbedingten Abhängigkeit sind die wichtigsten Randparameter neben der Wassertiefe eine entsprechende Wellenlänge- und Periode sowie eine bestimmte horizontale Teilchengeschwindigkeit die von der jeweiligen Welle erzeugt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass Hochkantschille im Wellenkanal in nur einem relativ kleinen Genesefenster entstehen. Die Erforderlichen Parameter wurden wie folgt bestimmt: Wellenperiode  $T$  2 bis 4 s, Wellenlänge  $L$  4 bis 6 m, Wellenhöhe  $H$  0,14 bis 0,25 m, Phasengeschwindigkeit  $c$  1,75 bis 2 m/s, horizontale Partikelgeschwindigkeit  $u$  0,3 bis 0,6 m/s, vertikale Partikelgeschwindigkeit  $v$  0,02 bis 0,05 m/s.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass die Klappen ihre endgültige und vertikale Position letztendlich durch einen periodischen Wellengang erhalten. Neben Hochkantschill gelang es zudem künstliche Pflaster- und Dachziegellagerungen sowie Rosettenanordnungen zu generieren. Die Versuchsreihen zeigen des Weiteren, dass neben den vertikalen auch die horizontalen Schalenanordnungen unter Laborbedingungen ebenfalls nur in einem engen Entstehungsfenster entstehen. Durch die Wellenkanalexperimente konnten die einzelnen Schritte des Entstehungsprozesses der Hochkantschille entschlüsselt werden. Des Weiteren wurde ein enger Zusammenhang zwischen der Hochkantschill-Genese und der dazu nötigen Schalenkonzentration nachgewiesen.

## Einleitung

Muschelschill-Anreicherungen waren in der Vergangenheit bereits häufig Gegenstand von Forschungsarbeiten. Sowohl in karbonatischen als auch in silikatischen Gesteinsabfolgen können Schalenansammlungen detaillierte Auskunft über ökologische Zustände, sedimentäre Um- und Ablagerungsprozesse sowie über physikalische-hydrodynamische Parameter geben (Kidwell 1986, 1991; Brett 1995, 1998; Fürsich & Pandey 1999, 2003).

Reineck & Singh (1980) geben beispielweise einen Überblick über eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit den unterschiedlichsten Formen der Schillanreicherung beschäftigen.

Um fossile Lagerstätten besser interpretieren zu können sind Kenntnisse über rezente Ablagerungsprozesse sowie Entstehungsbedingungen von modernen Schalenkonzentrationen unabdingbar. Sind die Rahmenbedingungen wie beispielsweise Wassertiefe, Tidenhöhe, Strömungsrichtungen sowie allgemeine Wellenparameter bekannt, können diese Erkenntnisse teilweise auch auf fossile Ablagerungen projiziert werden. Einige Forschungsbeispiele zeigen, dass rezente Schalenansammlungen sehr gut als aktualistischer Vergleich in der Interpretation von fossilen Schalenkonzentrationen genutzt werden können (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa 2002; Hallman et al. 1996; Neal et al. 2002; Kowalewski et al. 2000, 2003).

Muschelansammlungen können durch eine Vielfalt von Prozessen konzentriert werden (Brett & Baird 1986; Fürsich 1990; Brett & Seilacher 1991). Vielmals spielen dabei hydrodynamische und die daraus oftmals resultierenden biostratinomischen Prozesse eine große Rolle. Feldstudien über das Transportverhalten von Muschelschalen im wässrigen Milieu wurden beispielweise von Lever et al. (1961, 1964), Lever & Thijssen (1968), Wiedemann (1972), Trewin & Welsh (1972, 1976), Frey & Dörjes (1988), Frey et al. (1988), sowie von Dent & Uhen (1993) durchgeführt. Untersuchungen über das Verhalten von einzelnen Bivalvenklappen im Strömungskanal wurden z. B. von Menard & Boucot (1951), Kelling & Williams (1967), Brenchley & Newall (1970), Futterer (1974-1978, 1981) und Allen (1984, 1990) durchgeführt. Einige Wissenschaftler haben bei ihren Untersuchungen auch Geländebeobachtungen mit Laborexperimenten kombiniert (z. B. Johnson 1957; Schwarzacher 1963; Nagle 1967; Emery 1968). Ausführliche Arbeiten in denen Einstreuungen, Einregelungen sowie Orientierungen von Muschelklappen beschrieben werden geben beispielweise Weigelt (1927), Richter (1922), Schäfer (1962), Seilacher (1959, 1970, 1973), McKittrick (1987), Müller (1951, 1992), Wendt (1995). Einige grundlegende historische Arbeiten zu Transportmechanismen von Schalenmaterial, dessen Einbettung und Verteilung im Wattenmeer sollen an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden (z. B. Richter 1922, 1942; Lüders 1929; Trusheim 1931a, b; Hecht 1930; Jessen 1932, 1933; Häntzschel 1939).

Im vierten Kapitel der vorliegenden Arbeit soll mit Experimentreihen in einem Wellenkanal der Geneseprozesse sowie die hydrodynamischen Randparameter bestimmt werden, die zu einer vertikalen Hochkantstellung von *M. arenaria* Einzelklappen führen. Im Gegensatz zur relativ häufigen „normalen“ d. h. horizontalen Lagerung von Einzelklappen (Richter 1942), ist

die Einregelung der *M. arenaria* Schalen besonders interessant, da die Klappen mit ihrer Längsachse ca. 90° aus der horizontalen Lage abweichen und somit senkrecht, folglich hochkant stehen. Vergleichbare rezente Hochkantstrukturen wurden in der Natur bisher nur an wenigen Küsten lediglich als Einzelfälle beobachtet (z. B. Schäfer 1941; Mii 1957; Greensmith & Tucker 1966, 1968, 1969; Grinnell 1974; Ball 1976; Sanderson & Donovan 1974; Salazar-Jimenez et al. 1982; Ensom 1984; Hanamgond 2001).

Bislang wurde davon ausgegangen, dass die Bildung von Hochkantstrukturen ob aus Schalen- oder Gesteinsmaterial bestehend, mit hochenergetischen Prozessen einhergehen und auf erhöhte Wellenenergie zurückzuführen sind (z. B. Dionne 1971; Sanderson & Donovan 1974; Wilson 2002, 2004; Hanamgond 2001). Nahezu alle Beschreibungen von Hochkantanordnungen beziehen sich auf Vorkommen an Stränden bzw. Brandungs- und Spülsäumen. Bisher wurden jedoch keine länger andauernde Naturuntersuchungen oder experimentelle Messungen diesbezüglich durchgeführt, die zu einer schlüssigen Klärung ihrer Entstehung führen. Sowohl Seilacher & Meischner (1965) als auch Greensmith & Tucker (1969) wiesen in ihren Arbeiten bereits darauf hin, dass derartige vertikal eingeregelter Klappenanordnungen eventuell zur Rekonstruktion fossiler Bedingungen oder sogar als Indikatoren für Wellenparameter herangezogen werden könnten.

Durch die besondere vertikale Einregelung heben sich die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Hochkantschille deutlich von anderen Schalenakkumulationen ab. Die ungewöhnliche Einregelung der Klappen im eulitoralischen Gezeitenbereich entsteht anscheinend unter ganz besonderen Randbedingungen sowie unter bestimmten Wellenparametern. Im Gegensatz zu früheren experimentellen Arbeiten, in denen vorwiegend nur das Verhalten einzelner Klappen dokumentiert wurde, werden die Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit mit einer hohen Anzahl von Schalen durchgeführt.

Ziel der Untersuchung ist es detaillierte Informationen über die Genese von Hochkantschill-Strukturen zu erhalten. Hierbei soll geprüft werden, ob die Geländeuntersuchungen sich mit den Laborexperimenten am Wellenkanal decken. Ergänzend zu den Naturbeobachtungen im Arbeitsgebiet sollen die Experimentreihen dazu dienen Kriterien zu finden, die es ermöglichen, die Bildungsgeschichte sowie die hydrodynamischen Wellen- und Randparameter zu entschlüsseln, die zu den verschiedenen Lagerungsstrukturen auf den Schill-Vorkommen führen. Einen besonderen Stellenwert soll hierbei die Genese der Hochkantstrukturen einnehmen.

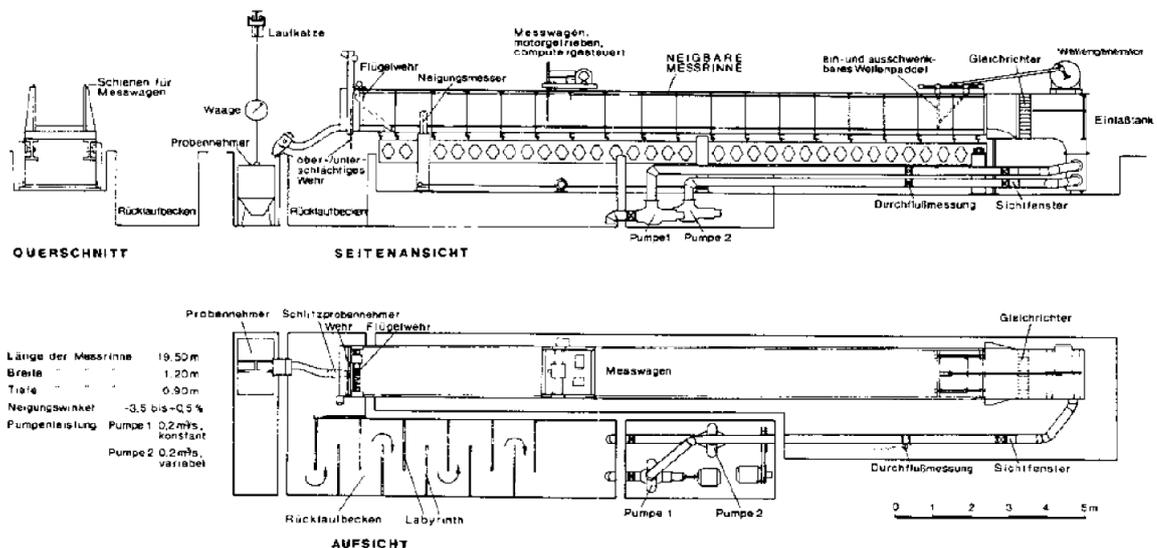
## Material und Methoden

Die Experimentreihen im Labor wurden im Wellenkanal des Fachbereiches Geowissenschaften der Philipps-Universität Marburg durchgeführt.

### Der Wellenkanal

Der Wellenkanal misst eine Länge von 20 m, eine Breite von 1,2 m und hat eine Höhe von 0,9 m (Abb. 4-1). Spezielle Wandscheiben aus Glas an den Rändern des Kanals ermöglichen eine seitliche Beobachtung der generierten Wellen sowie der Sediment- und Schalenbewegungen (Tafel 4-1 A bis F). Der Kanal ist als Strömungskanal mit offenem Wasser- und Sedimentkreislauf konzipiert. Er kann jedoch auch als geschlossener Wellentank mit Wellengenerator für monochromatische Wellen eingesetzt werden.

Um im Wellenkanal nahezu gleichmäßige monochromatische Wellen erzeugen zu können, wird ein Wellengenerator mit einem Elektromotor mechanisch angetrieben. Durch Veränderung der Wellen-Frequenz-Regelung (mind. 3 Hz und max. 40 Hz) wird die Drehgeschwindigkeit (Drehfrequenz) des Generators verändert.



**Abb. 4-1.** Großer Strömungs- und Wellenkanal mit Glasseitenwänden. Der Kanal ist als Strömungskanal mit offenem Wasser- und Sediment-Kreislauf konzipiert. Er kann jedoch auch als geschlossener Wellentank mit Wellengenerator für monochromatische Wellen und mit künstlichem Strand eingesetzt werden (Grafik: Prof. Dr. Tietze, Universität Marburg). **Leistungsmerkmale:** Länge 20 m, Breite 1,2 m, Tiefe 0,9 m. Regelung und Messung von Durchfluss (0 bis 0,4 m<sup>3</sup>/s), Wassertiefe (Schlitzwehr, ober- und unterschlächtiges Wehr) und Gefälle (-0,5 bis +3,5 %). Strömungsgeschwindigkeiten je nach Wassertiefe von 0 bis 3 m/s. Wellen mit Perioden von 0 bis 10 s, Wellenhöhen bis 0,4 m.

Das Wellenpaddel (auch Wellenhub) welches durch eine Metallstange mit dem Generator verbunden ist, setzt die Kreisbewegung des Generators in gleichmäßige Vor- und Rückwärtsbewegungen um, so dass das Wasser im Kanal durch das Paddel in Schwingungen versetzt wird (Abb. 4-1, Tafel 4-1 A). Das Wellenpaddel besitzt ungefähr die

Breite des Wellenkanals und schließt somit fast direkt an den Glaswänden ab. Durch Veränderung des Abstandes der Metallstange vom Wellenhub zum Generator (in 5 cm Abständen) kann zudem die Wellenamplitude (Wellenhöhe) variiert werden. Die Wasserhöhe im Kanal wird durch einen Zu- und Abfluss geregelt. Am distalen Ende der Anlage sorgt ein Metallgestell aus Aluminiumwaben und Latexhaarmatten für eine weitgehende Absorption der Wellenenergie.

### Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurden gut erhaltene d. h. komplette *M. arenaria* Einzelklappen verwendet. Das Schalenmaterial wurde im Arbeitsgebiet dem Dorumer Schill-Vorkommen entnommen (s. dazu auch Kap. 2) und stammt aus dem Hochkantschill-Saum an dem die Klappen vertikal hintereinander eingeregelt waren. Neben den *M. arenaria* Klappen wurden vereinzelt Einzelklappen von *C. edule* und *M. balthica* mit aufgenommen. Nach der Entnahme im Gelände wurden die Schalen im Labor mit Wasser gereinigt und luftgetrocknet.

Nach den Geländebeobachtungen und einigen Vorversuchen im Wellenkanal war bekannt, dass Hochkantschille sich überwiegend an leewertigen Hinterkanten bilden können. Aus diesem Grund wurde der Versuchsaufbau den natürlichen Bedingungen nachempfunden. Hierzu wurde in der Mitte auf der Sohle des Wellenkanals ein leicht ansteigender Sandwall mit einer rückwertigen, abschüssigen Kante angelegt. Das Schalenmaterial wurde vor Beginn jedes Versuches ca. 1 m vor diesem Sandwall platziert. Es handelte sich dabei um ca. 8 kg Klappenmaterial was zu einer 1 m langen und 1,2 m breiten Schalenfläche angehäuft wurde.

Die Sohle des Wellenkanals wurde gleichmäßig mit einem quarzreichen und sehr gut sortierten mittelsandiger Strandsand bedeckt, so dass auf dem Kanalboden eine ca. 5 bis 10 cm mächtige Sandschicht lag.

Nach Beendigung jedes Versuchsdurchlaufes wurde die Ursprungslagerung und Position der Schalen im Kanal wieder hergestellt, beschädigte Klappen wurden falls nötig durch neues Schalenmaterial ersetzt. Die Versuchsdokumentation erfolgte mit einer Digitalkamera.

Insgesamt wurden 261 Einzelversuche (inkl. 33 Konzentrationsmessungen) durchgeführt, wobei jede Messung einen zeitlichen Aufwand von 45 bis 60 Minuten in Anspruch nahm.

Die Experimentreihen wurden zu fünf verschiedenen Wassertiefen durchgeführt (0,15; 0,20; 0,30 und 0,40 m Wassertiefe über Sandsohle).

Bei jeder Wasserhöhe wurde bei einem gleichbleibenden Wellenhub jeweils die Wellenfrequenz des Wellengenerators schrittweise erhöht. Ein Versuch wurde beendet sobald keine Schalenbewegung bzw. Transport bei diesen Einstellungen mehr statt fand.

Waren alle Frequenzen am Wellengenerator durchgeführt, so erfolgte eine mechanische Veränderung des Paddelhubes in 5 bis 10 cm Schritten. Die Schalenbewegungen und Anordnungen die aus den Wellenparametern resultierten wurden während der



Versuchsdurchführung dokumentiert. Bei den Experimenten wurden Schritt für Schritt systematisch die jeweiligen Wellenparameter verändert.

### Berechnung der Wellenparameter

Bei jeder Versuchsdurchführung wurden die Parameter Wellenhöhe  $H$  (m), Wellenperiode  $T$  (s) und die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit (auch Phasengeschwindigkeit)  $c$  (m/s) erfasst.

Alle Parameter wurden dreimal ( $N = 3$ ) gemessen. Für die weiteren Berechnungen wurden jeweils die resultierenden Mittelwerte verwendet.

Aus der Beziehung  $c = \frac{L}{T}$  wurde die Wellenlänge  $L$  (m) bestimmt (Tietze 1978):

$$L = cT$$

mit

$c$  = Wellenfortschrittsgeschwindigkeit in (m/s)

$T$  = Wellenperiode in (s)

Wurde der Gültigkeitsbereich für Flachwasserwellen mit  $\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$  erreicht, konnte folgende Formel angewandt werden (aus Short 2000):

$$L = T\sqrt{gd}$$

mit

$T$  = Wellenperiode in (s)

$g$  = Erdbeschleunigung 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

$d$  = Wasserhöhe in (m)

Ebenfalls berechnet wurden die Teilchen bzw. Partikelgeschwindigkeiten für Flachwasserbereiche. Für die horizontale Partikelgeschwindigkeit  $u$  (m/s) wurde folgende Formel verwendet (aus Short 2000):

$$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$$

mit

$H$  = Wellenhöhe (m)

$g$  = Erdbeschleunigung 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

$d$  = Wasserhöhe in (m)

$\theta$  = Shields Parameter (= 0,05) (auf 0,05 nominiert<sup>(\*)</sup> nach Nielsen 1992)

Für die vertikale Partikelgeschwindigkeit  $v$  (m/s) wurde folgende Formel verwendet (aus Short 2000):

$$v = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin \theta$$

mit

$H$  = Wellenhöhe (m)

$d$  = Wasserhöhe in (m)

$T$  = Wellenperiode in (s)

$\theta$  = Shields Parameter (auf 0,05 nominiert <sup>(\*)</sup> nach Nielsen 1992)

$z$  = Ruhewasserspiegel (auf 1 nominiert <sup>(\*\*)</sup>)

\* Mündliche Mitteilung Prof. Dr. B. W. Flemming

\*\* Mündliche Mitteilung Prof. Dr. K.-W. Tietze

### Konzentrationsmessungen

Um festzustellen bei welcher Menge Schalenmaterial sich Hochkantschille (HKS) im Wellenkanal generieren lassen wurden Konzentrationsversuche durchgeführt. Da das Entstehungsfeld der HKS-Genese nach den Experimentreihen eingegrenzt wurde, konnten die Einstellungen am Wellenkanal übernommen werden bei denen bekannt war, dass HKS entsteht. Der Versuchsverlauf begann mit einer Klappenkonzentration von 2 kg und endete mit 8 kg Schalenmaterial. Bei der Versuchsdurchführung wurden mehrere Durchgänge mit derselben Schalenmenge durchgeführt. Vor Beginn einer neuen Versuchsreihe wurde die Schalenmenge aufgestockt.

Um eine Vorstellung über die Schalenstückzahlen zu erhalten wurde jeweils drei mal 1 kg Schalenmaterial ausgewogen und die Einzelklappen gezählt. Die Gewichtsangaben die in etwa der Schalenmenge entsprechen können der Tabelle 4-1 entnommen werden.

**Tab. 4-1.** Gewichtsangaben der *Mya arenaria* Einzelklappen bei den Konzentrationsversuchen.

Klappenanzahl <i>Mya arenaria</i>	Gewicht (kg)
70-90	0,5
140-180	1
280-360	2
420-540	3
560-720	4
700-900	5
840-1080	6
980-1260	7
1120-1440	8

## Ergebnisse

Während der 228 Einzelmessungen am Wellenkanal konnten unter Laborbedingungen künstliche Lagerungsstrukturen erzeugt werden. Es gelang folgende Lagerungszustände zu generieren (s. auch Tafel 4-2 bis Tafel 4-5):

- Pflaster- und Dachziegellagerung
- anfängliche Rosettenstrukturen
- Rosettenstrukturen
- anfängliche Hochkant-Anordnungen
- Hochkantschill

### Klassifizierung der Strukturen

Als Pflaster werden sowohl einzelne verstreute als auch Vollpflaster aus *M. arenaria* Einzelklappen in konvexer Position auf der Sandoberfläche bezeichnet (Tafel 4-2 A & B). Lagern die Klappen konvex übereinander so wird dieser Zustand als Dachziegellagerung deklariert (Tafel 4-2 C & D).

Als Rosettenstrukturen werden oval bis rund ausgebildete nahe zu freistehenden bzw. sich deutlich zur Umgebung abgrenzende Strukturen mit wirr angeordneten vertikal und horizontal gestellten *M. arenaria* Einzelklappen bezeichnet (Tafel 4-3 A bis F). Von anfänglichen Rosettenstrukturen wird in der vorliegenden Arbeit gesprochen, wenn die aneinander und wirr angeordneten Klappengrüppchen noch kein konkretes rosettenartiges Erscheinungsbild aufweisen (Tafel 4-2 E & F). In beiden Fällen können die einzelnen Schalenpakete chaotisch lagern, so dass die einzelnen Klappen mit ihrer konvexen Wölbung in alle Himmelsrichtungen zeigen.

Unter Hochkantschill werden Anordnungen von Einzelklappen bezeichnet die am hinteren Kantensaum des abschüssigen Sedimentwalls sich richtungsgerichtet mit ihrer langen Achse vertikale hintereinander einregeln (folglich auch fächerartige, vertikale Position). Die nahezu aufrecht stehenden Klappen weichen mit ihrer Längsachse zwischen 60° und 90° aus der horizontalen Lage ab. Die Schalenanordnungen bestehen meist aus 5 bis 10 Einzelklappen. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven (hohlen) Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Wellenfront (Tafel 4-5 A bis F).

An einigen Stellen der abfallenden Saumkante konnte oftmals auch beginnende aufeinander Stapelung einzelnen Klappen dokumentiert werden. Hierbei lagerten sich etwa vier bis acht ca. gleich große Einzelklappen mit ihrer Wölbung nach unten zeigend aufeinander. Die schüsselförmigen *M. arenaria* Klappen wurden dabei derartig dicht aneinander geschachtelt, dass ein beginnender Prozess einer gegenseitigen Abstützung einzelner Klappen beobachtet wurde. Dieser Anordnungen werden in der vorliegenden Arbeit als anfänglicher Hochkantschill bezeichnet (Tafel 4-4 A bis F).

Im folgendem werden die Ergebnisse der Versuchsreihen für jede Wasserstandshöhe einzeln vorgestellt.

Wasserstandshöhe 0,15 m

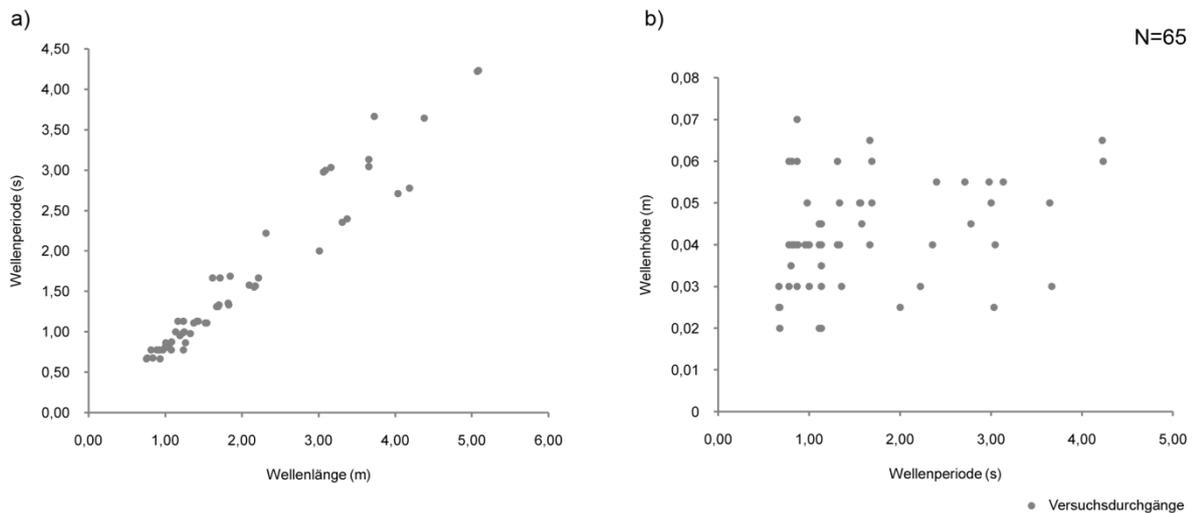
Es wurden insgesamt 65 Einzelversuche bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,15 m durchgeführt. Die erreichten Wellenparameter können der Tabelle 4-2a und der Tabelle 4-2b (s. Anhang) sowie der Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 entnommen werden.

**Tab. 4-2a.** Erreichte Wellenparameter bei 0,15 m Wassertiefe.

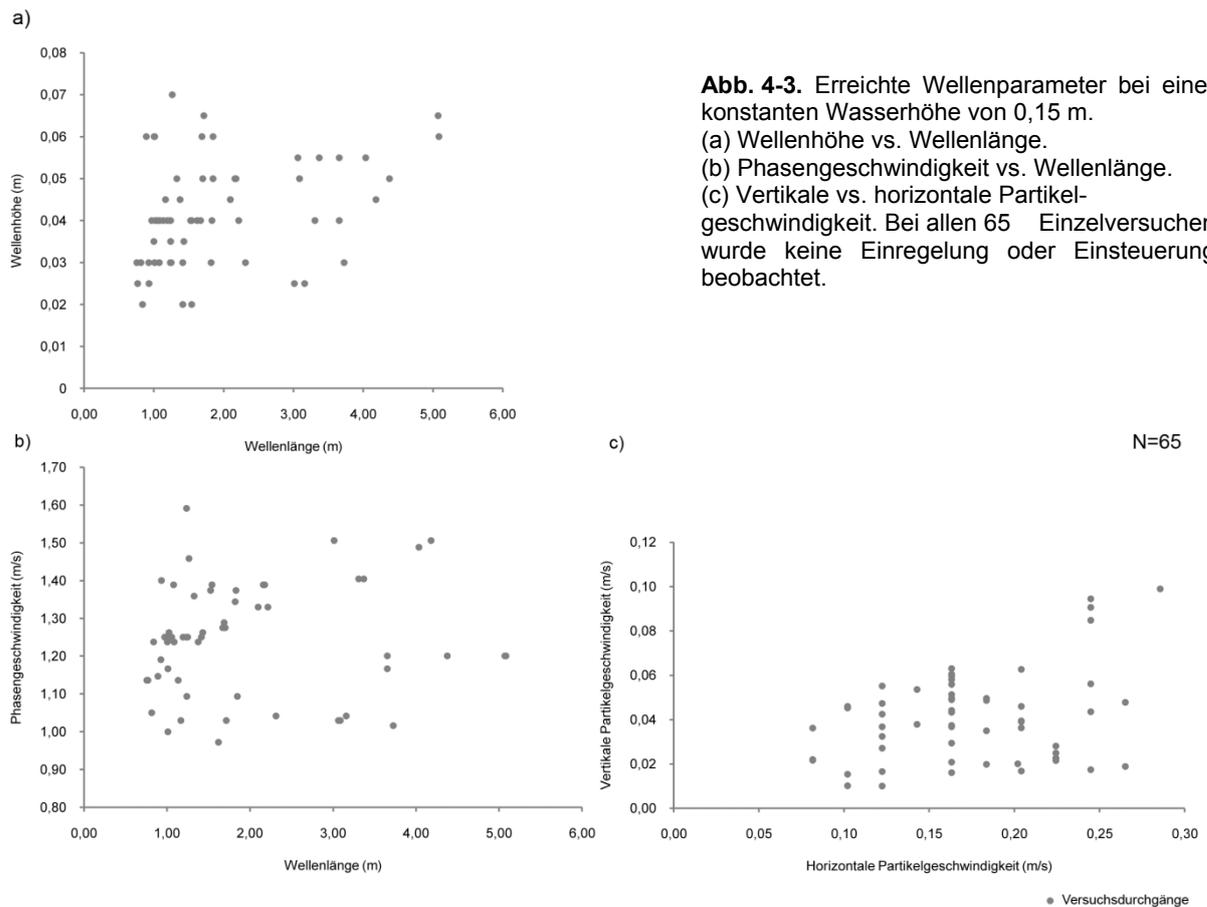
N = 65	Wellenhöhe <i>H</i> (m)	Wellenperiode <i>T</i> (s)	Wellenlänge <i>L</i> (m)	Phasen- geschwindigkeit <i>c</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>u</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>v</i> (m/s)
Durchschnitt	0,04	1,53	1,88	1,24	0,04	0,04
Minimal	0,02	0,67	0,76	0,97	0,08	0,01
Maximal	0,07	4,23	5,08	1,59	0,29	0,10

Beobachtungen:

Das Schalenmaterial bewegte sich mit dem Wellengang ruckartig und oftmals stationär verbleibend hin und her. Ein Transport von Schalenmaterial bzw. einzelnen Schalen wurde selten und nur vereinzelt dokumentiert. Eine visuelle Veränderung der Schalenstrukturen wurde nicht beobachtet.



**Abb. 4-2.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,15 m. (a) Wellenperiode vs. Wellenlänge. (b) Wellenhöhe vs. Wellenperiode. Bei allen 65 Einzelversuchen wurde keine Einregelung oder Einsteuerung beobachtet.



### Wasserstandhöhe 0,20 m

Es wurden insgesamt 36 Einzelversuche bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,20 m durchgeführt. Die erreichten Wellenparameter können der Tabelle 4-3a und der Tabelle 4-3b (s. Anhang) sowie der Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 entnommen werden.

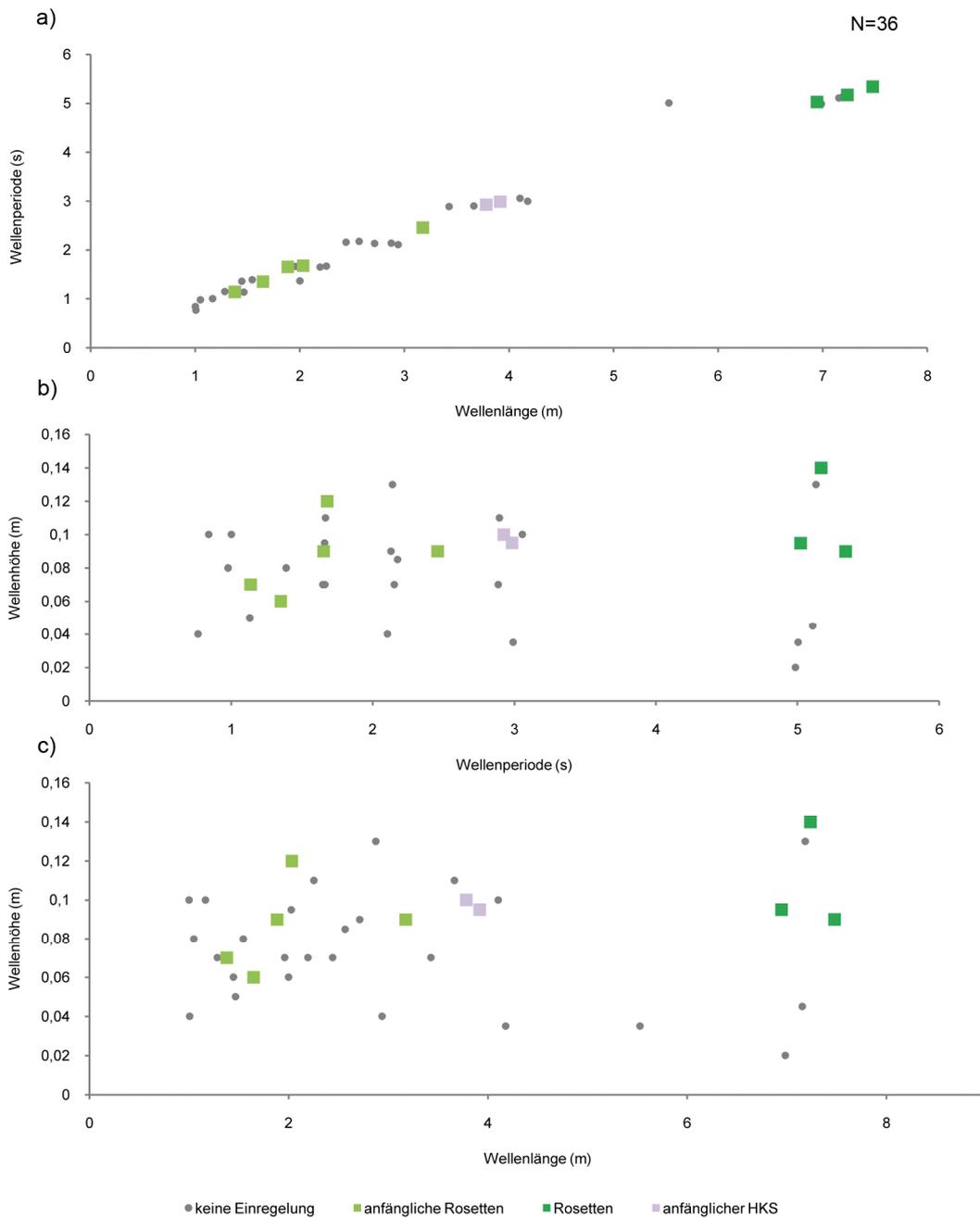
**Tab. 4-3a.** Erreichte Wellenparameter bei 0,20 m Wassertiefe.

N = 36	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (m)	Phasen- geschwindigkeit $c$ (m/s)	Partikel- geschwindigkeit $u$ (m/s)	Partikel- geschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,08	2,48	3,21	1,27	0,28	0,04
Minimal	0,02	0,77	1,00	1,06	0,07	0,00
Maximal	0,14	5,34	7,48	1,47	0,49	0,11

### Beobachtungen:

Die Bildungen von anfänglichen Rosettenstrukturen, bei denen sich vier bis acht Einzelklappen zur kleinen Grüppchen in rosettenartiger Anordnung sammelten wurden bei insgesamt fünf Versuchsdurchgängen dokumentiert. Die dabei generierten Wellen erreichten Längen von 1,38 bis 3,18 m. Die Wellenperiode betrug zwischen 1,14 und 2,46 s. Die generierten Wellen erreichten Höhen zwischen 0,06 und 0,12 m bei einer

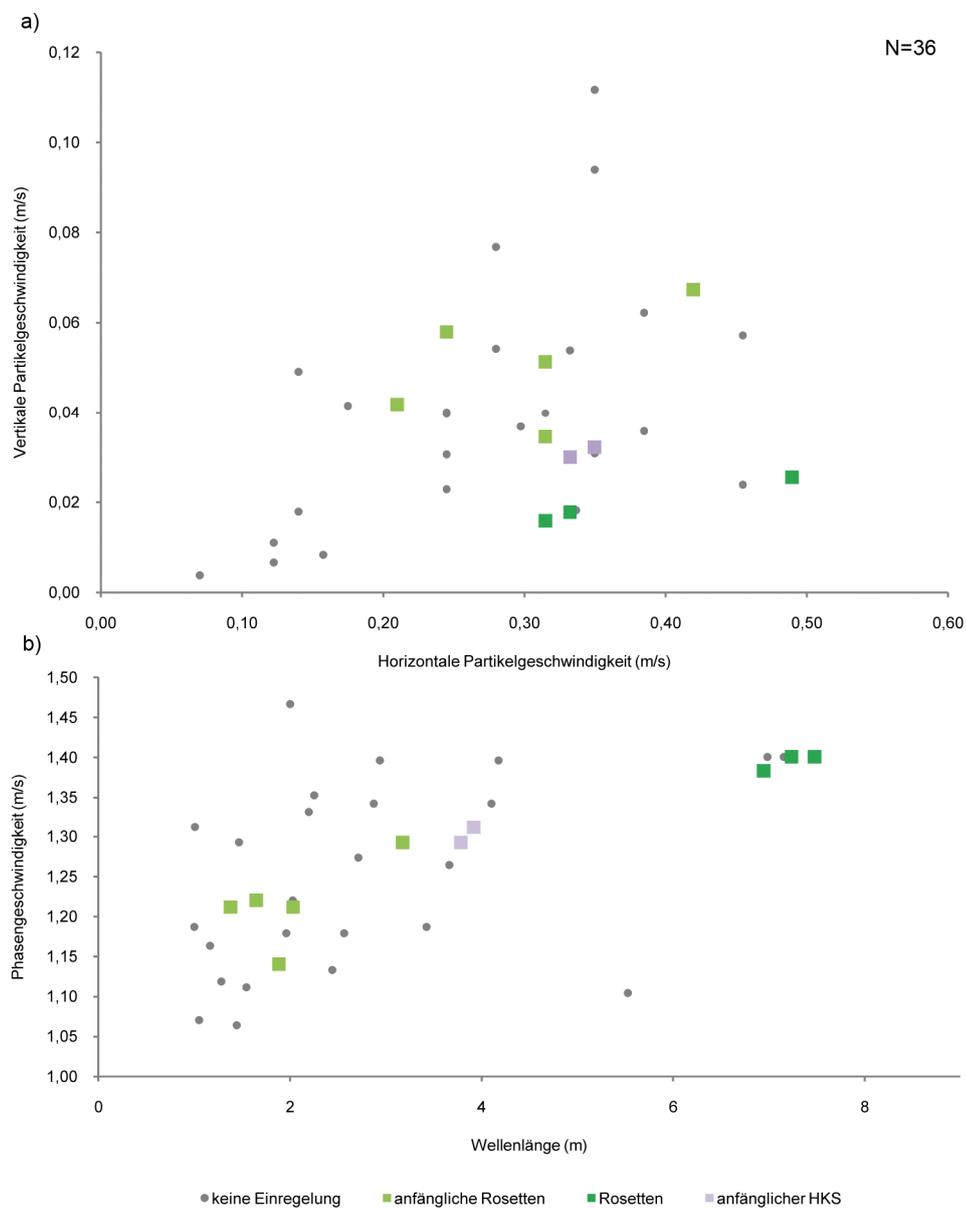
Phasengeschwindigkeit (auch Fortschrittsgeschwindigkeit) von 1,14 bis 1,29 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit erreichte im Durchschnitt 0,3 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,05 m/s.



**Abb. 4-4.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,20 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten und anfänglichen Hochkantschill (HKS). (a) Wellenperiode vs. Wellenlänge. (b) Wellenhöhe vs. Wellenperiode. (c) Wellenhöhe vs. Wellenlänge.

Gut ausgebildete Rosettenstrukturen aus Einzelklappen wurden dagegen bei deutlich längeren Wellenlängen und langsameren Wellenperioden bei drei Versuchsdurchgängen gebildet. Erst ab einer durchschnittlichen Wellenlänge von 7,22 m und einer mittleren Wellenperiode von 5,02 s ordneten sich die Einzelklappen des Schalenhaufens zu

rundlichen bis ovalen Rosettengebilden. Die dabei erreichte mittlere Wellenhöhe betrug 0,1 m. Die Wellen erreichten eine Phasengeschwindigkeit von 1,39 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,31 und 0,49 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,02 m/s.



**Abb. 4-5.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,20 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten und anfänglichen Hochkantschill (HKS). (a) Vertikale vs. horizontale Partikelgeschwindigkeit. (b) Phasen-geschwindigkeit vs. Wellenlänge.

Die Wellenparameter die zu anfänglichen Hochkant-Anordnungen führten zeigen eine abweichende Form mit deutlich kürzeren Wellenlängen- und schnelleren Wellenperioden. Bereits bei einer durchschnittlichen Wellenlänge von 3,85 m und einer mittleren Wellenperiode von 2,96 s wurden Einzelklappen aus den vorderen Bereichen der Schalenanhäufung in dessen rückwertigen Bereich transportiert. Am Ende des Sandwalls

lagerten sich die Klappen mit der Wölbung nach unten zeigend auf der Sedimentoberfläche ab. Nach nur einigen Wellendurchgängen lagerten sich daraufhin mehrere Klappen in diesem Bereich konkav aufeinander, so dass am hinteren Saum des Walls erste anfängliche Hochkantschill-Strukturen generiert wurden. Die dabei erreichte horizontale Partikelgeschwindigkeit betrug durchschnittlich 0,34 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit erreichte 0,03 m/s.

Wasserstandhöhe 0,30 m

Es wurden insgesamt 33 Einzelversuche bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,30 m durchgeführt. Die erreichten Wellenparameter können der Tabelle 4-4a und der Tabelle 4-4b (s. Anhang) sowie der Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 entnommen werden.

**Tab. 4-4a.** Erreichte Wellenparameter bei 0,30 m Wassertiefe.

N = 33	Wellenhöhe <i>H</i> (m)	Wellenperiode <i>T</i> (s)	Wellenlänge <i>L</i> (m)	Phasen- geschwindigkeit <i>c</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>u</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>v</i> (m/s)
Durchschnitt	0,13	2,77	4,65	1,65	0,36	0,04
Minimal	0,05	0,67	0,78	1,17	0,14	0,01
Maximal	0,2	5,91	10,14	1,94	0,57	0,08

Beobachtungen:

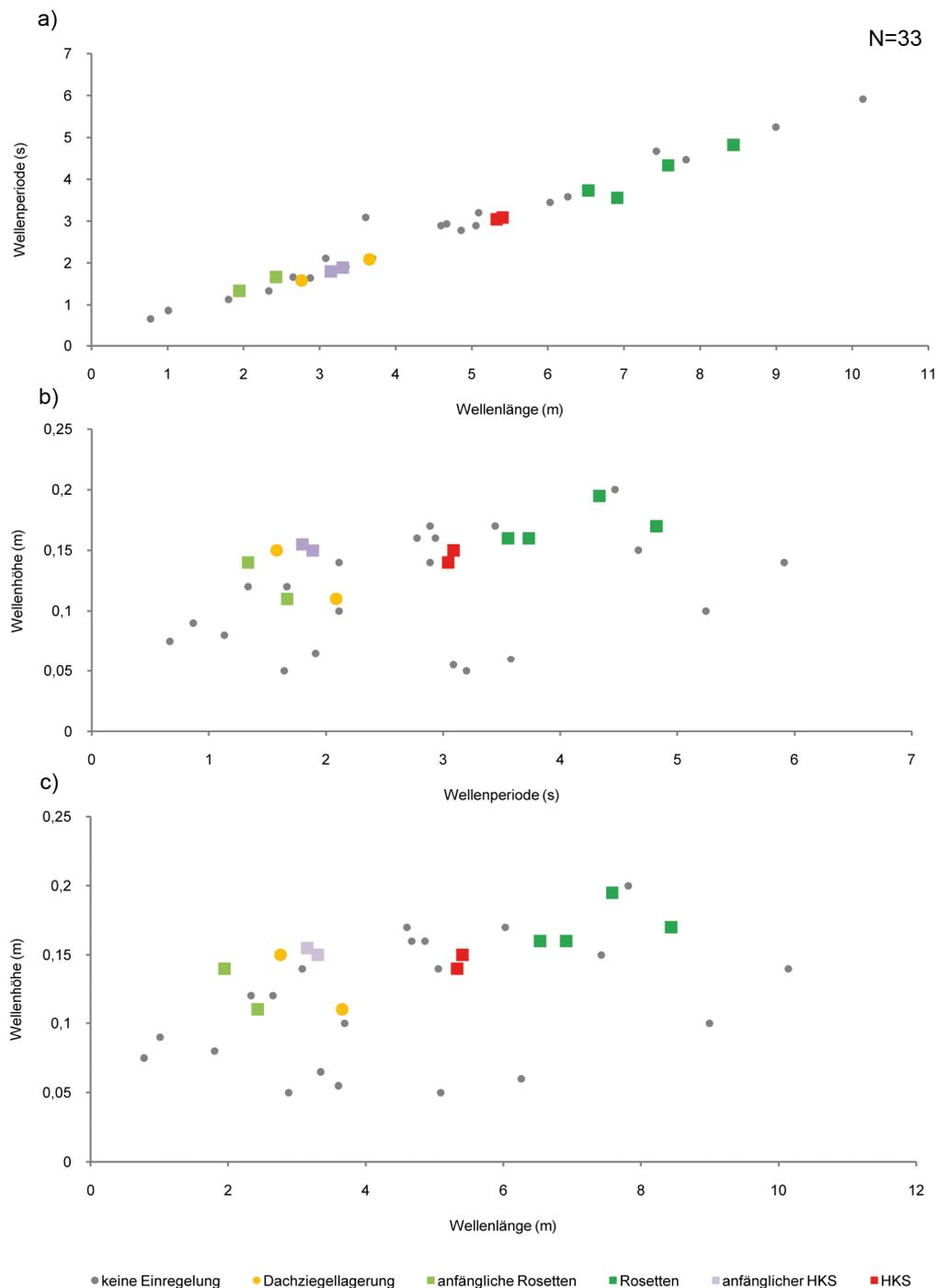
Erstmalig wurden bei der Wasserhöhe auch Dachziegellagen auf der Oberfläche des Schalenhaufens generiert. Die Klappen schoben sich bei einer durchschnittlichen Wellenlänge von 3,21 m und einer Wellenperiode von 1,83 s horizontal übereinander, so dass sie sich dachziegelartig auf der Oberfläche horizontal einregelten. Die Wellen erreichten hierbei eine mittlere Höhe von 0,13 m und eine Laufgeschwindigkeit von 1,75 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,31 und 0,43 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,05 m/s.

Die Bildungen von anfänglichen Rosettenstrukturen wurden bei zwei Versuchsdurchgängen dokumentiert. Die dabei generierten Wellen erreichten Längen zwischen 1,94 bis 2,43 m. Die Wellenperiode betrug zwischen 1,33 und 1,67 s. Die generierten Wellen erreichten Höhen zwischen 0,11 und 0,14 m bei einer Phasengeschwindigkeit von jeweils 1,46 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit variierte zwischen 0,31 und 0,40 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,06 m/s.

Rosettenstrukturen wurden bei deutlich längeren Wellenlängen und langsameren Wellenperioden bei vier Versuchsdurchgängen gebildet. Erst ab einer durchschnittlichen Wellenlänge von 7,37 m und einer mittleren Wellenperiode von 4,11 s ordneten sich die Einzelklappen des Schalenhaufens zu rundlichen bis ovalen Rosettengebilden. Die dabei erreichte mittlere Wellenhöhe betrug 0,17 m. Die Wellen erreichten eine durchschnittliche



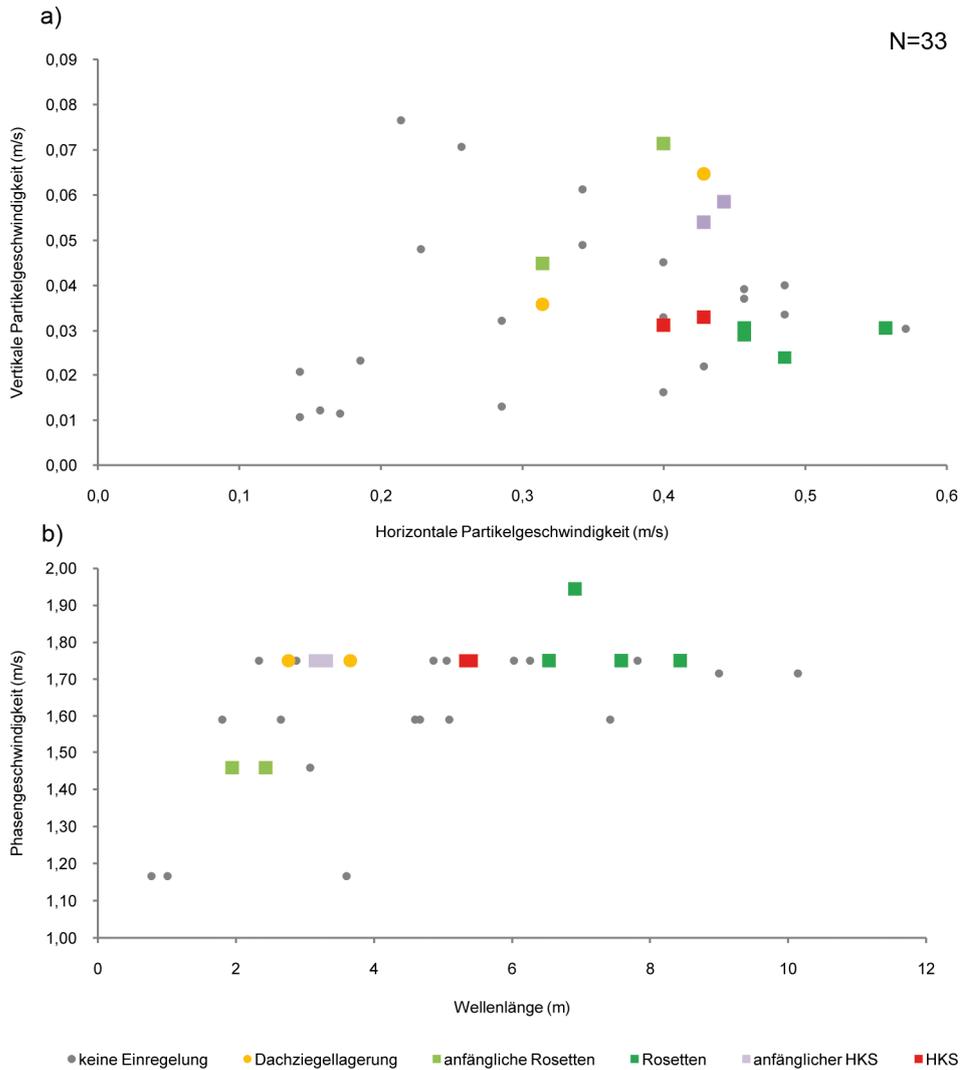
Phasengeschwindigkeit von 1,80 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,46 und 0,56 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,03 m/s.



**Abb. 4-6.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,30 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten, anfänglichen Hochkantschill sowie Hochkantschill (HKS). (a) Wellenperiode vs. Wellenlänge. (b) Wellenhöhe vs. Wellenperiode. (c) Wellenhöhe vs. Wellenlänge.

Anfänglicher Hochkantschill wurde wiederum bei deutlich kürzeren Wellenlängen- und schnelleren Wellenperioden generiert. Bereits bei einer durchschnittlichen Wellenlänge von 3,23 m und einer mittleren Wellenperiode von 1,84 s wurden Einzelklappen aus den vorderen Bereichen der Schalenanhäufung in dessen rückwertigen Bereich transportiert.

Am Ende des Sandwalls lagerten sich die Klappen mit der Wölbung nach unten zeigend auf der Sedimentoberfläche ab. Nach nur einigen Wellendurchgängen lagerten sich daraufhin mehrere Klappen in diesem Bereich konkav aufeinander, so dass am hinteren Saum des künstlichen Schalenhaufens erste anfängliche Hochkantschill-Strukturen generiert wurden. Die dabei erreichte Phasengeschwindigkeit betrug 1,75 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit betrug im Durchschnitt 0,44 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit schwankte zwischen 0,05 und 0,06 m/s.



**Abb. 4-7.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,30 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten, anfänglichen Hochkantschill sowie Hochkantschill (HKS). (a) Vertikale vs. horizontale Partikelgeschwindigkeit. (b) Phasengeschwindigkeit vs. Wellenlänge.

Bei den Versuchen mit einer Wasserhöhe von 0,3 m wurden auch erstmals vertikal eingeregelt Hochkantschill-Anordnungen generiert. Bei insgesamt zwei Versuchsdurchgängen wurden die Hochkantschille bei einer durchschnittlichen Wellenlänge von 5,37 m und einer mittleren Wellenperiode von 3,07 s künstlich erzeugt. Die Wellenhöhe betrug dabei zwischen 0,14 und 0,15 m. Die Welle erreichte eine Laufgeschwindigkeit von

1,75 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,40 und 0,43 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,03 m/s.

Ähnlich wie bei den anfänglichen HKS-Strukturen auch, transportierten die Wellen die Einzelklappen des Schalenhaufens in den rückwertigen Wallbereich. Diesmal wanderten die Schalen regelrecht fließbandartig über die Dachziegellagen hinüber bis sie schließlich an der kleinen Walkante mit der Wölbung nach unten zeigend auf der Sedimentoberfläche zur Ablage kamen. Mit dem einhergehenden Wellengang lagerten sich immer mehr herantransportierte Klappen übereinander, so dass sie sich aufgrund ihrer natürlichen schüsselförmigen Klappenform immer mehr hochkant aneinander und ineinander einregelten.

#### Wasserstandhöhe 0,40 m

Es wurden insgesamt 93 Einzelversuche bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,40 m durchgeführt. Die erreichten Wellenparameter können der Tabelle 4-5a und der Tabelle 4-5b (s. Anhang) sowie der Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 entnommen werden.

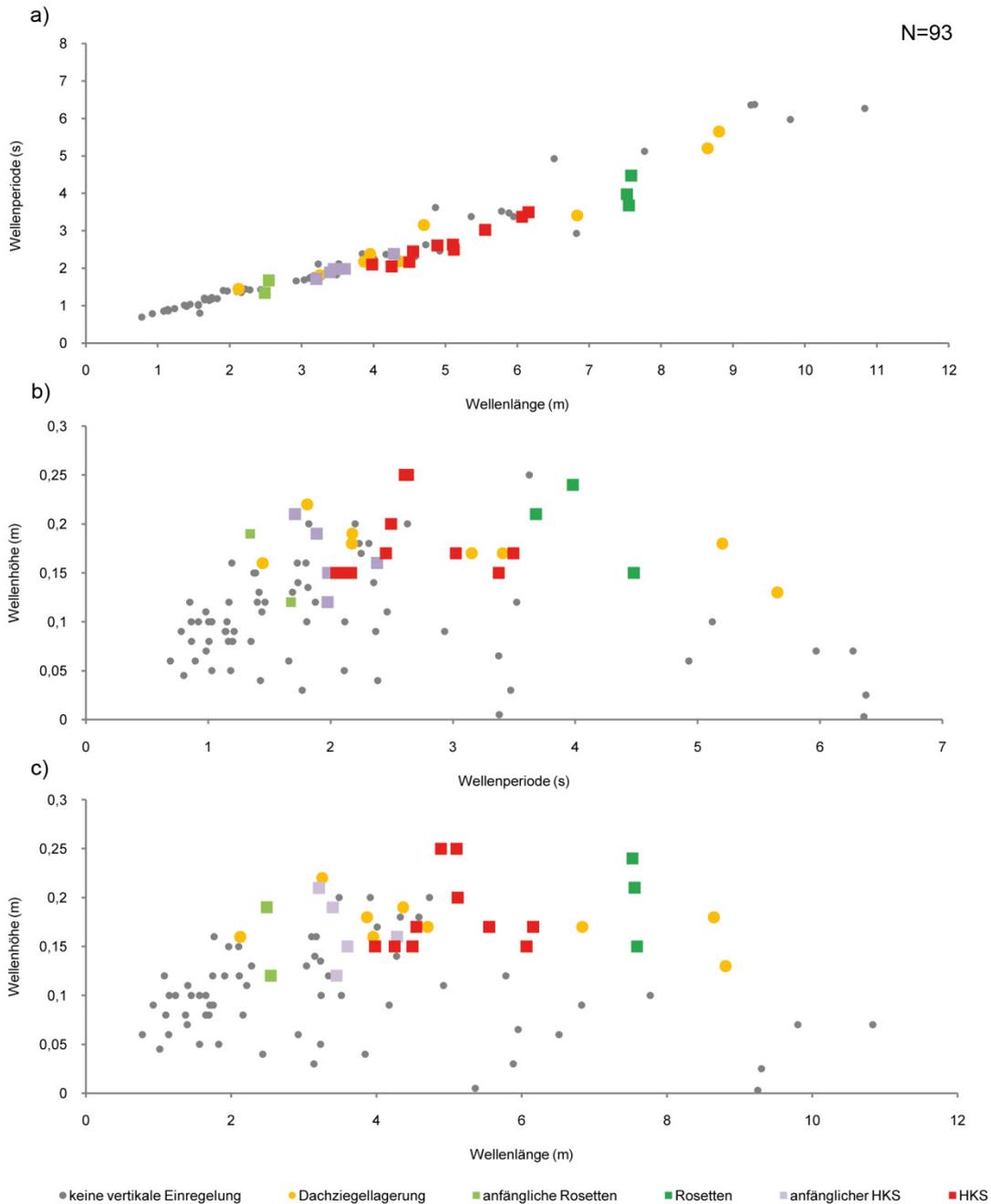
**Tab. 4-5a.** Erreichte Wellenparameter bei 0,40 m Wassertiefe.

N = 93	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (m)	Phasen- geschwindigkeit $c$ (m/s)	Partikel- geschwindigkeit $u$ (m/s)	Partikel- geschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,12	2,28	3,85	1,66	0,31	0,04
Minimal	0,003	0,69	0,78	1,13	0,01	0,00
Maximal	0,25	6,38	10,83	2,33	0,62	0,08

#### Beobachtungen:

Wie bereits bei 0,30 m Wasserhöhe wurden auch bei 0,40 m Dachziegellagen auf der Oberfläche des Schalenhaufens erzeugt. Die Einzelklappen schoben sich bei einer durchschnittlichen Wellenlänge von 5,17 m und einer Wellenperiode von 3,04 s horizontal übereinander, so dass sie sich dachziegelartig auf der Oberfläche horizontal einregelten. Die Wellen erreichten hierbei eine mittlere Höhe von 0,17 m und eine Laufgeschwindigkeit zwischen 1,56 und 2,01 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,32 und 0,54 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,04 m/s.

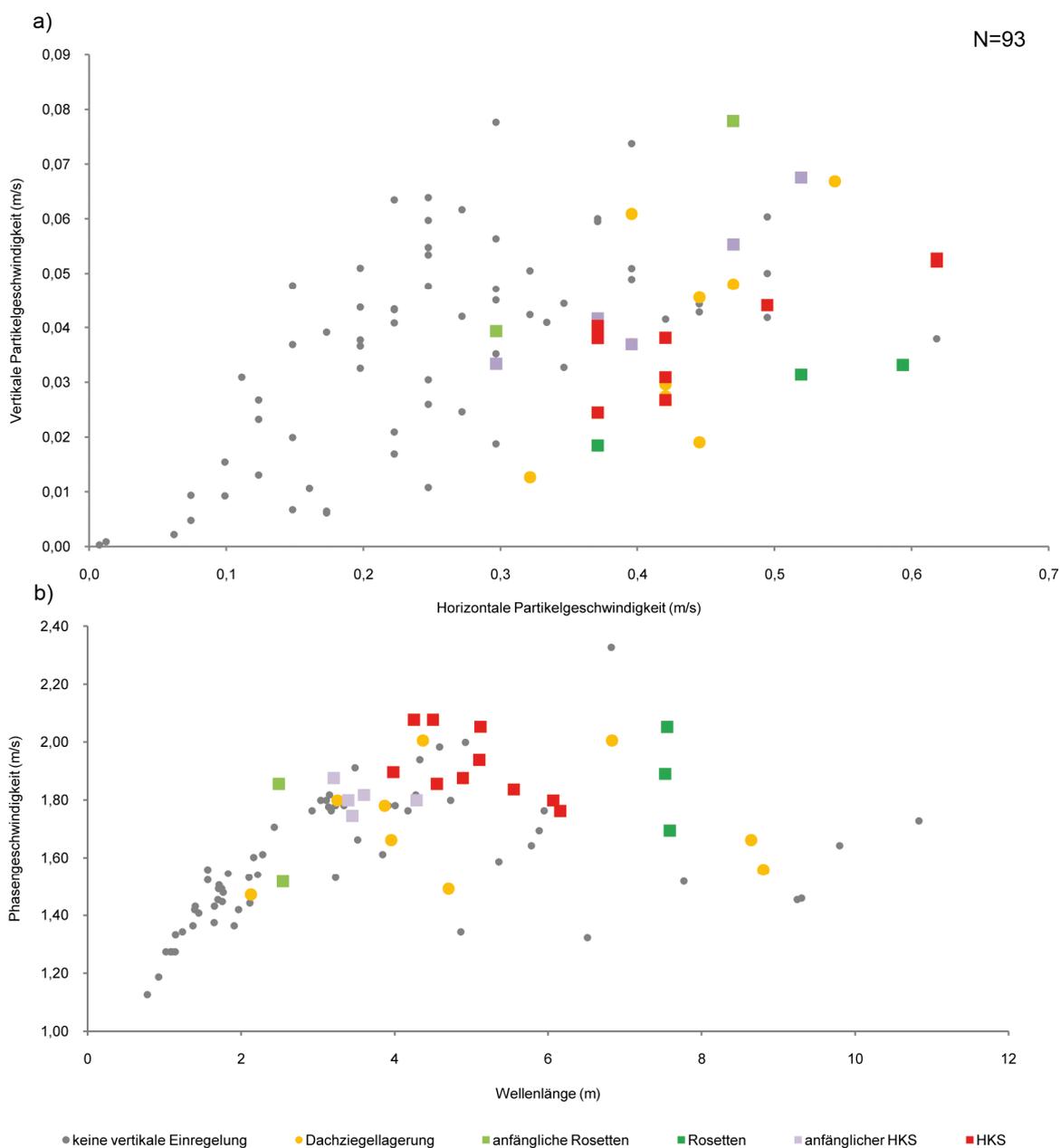
Die Bildungen von anfänglichen Rosettenstrukturen wurden bei zwei Versuchsdurchgängen dokumentiert. Die dabei generierten Wellen erreichten Längen zwischen 2,49 bis 2,54 m. Die Wellenperiode betrug zwischen 1,34 und 1,68 s. Die generierten Wellen erreichten Höhen zwischen 0,12 und 0,19 m bei einer mittleren Phasengeschwindigkeit von 1,96 m/s. Die durchschnittliche horizontale Partikelgeschwindigkeit betrug 0,38 m/s und die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,06 m/s.



**Abb. 4-8.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,40 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten, anfänglichen Hochkantschill sowie Hochkantschill (HKS). (a) Wellenperiode vs. Wellenlänge. (b) Wellenhöhe vs. Wellenperiode. (c) Wellenhöhe vs. Wellenlänge.

Rosettenstrukturen wurden bei etwas längeren Wellenlängen und langsameren Wellenperioden bei drei Versuchsdurchgängen generiert. Ab einer durchschnittlichen Wellenlänge von 7,55 m und einer mittleren Wellenperiode von 4,05 s ordneten sich die Einzelklappen des Schalenhaufens zu rundlichen bis ovalen Rosettengebilden. Die dabei erreichte mittlere Wellenhöhe betrug 0,2 m. Die Wellen erreichten eine Phasengeschwindigkeit zwischen 1,69 und 2,05 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit

schwankte zwischen 0,37 und 0,59 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,03 m/s.



**Abb. 4-9.** Erreichte Wellenparameter bei einer konstanten Wasserhöhe von 0,40 m. Bildung von anfänglichen Rosetten, Rosetten, anfänglichen Hochkantschill sowie Hochkantschill (HKS). (a) Vertikale vs. horizontale Partikelgeschwindigkeit. (b) Phasengeschwindigkeit vs. Wellenlänge.

Anfänglicher Hochkantschill wurde bei fünf Versuchsdurchgängen generiert. Die erzeugten Wellen erreichten eine durchschnittliche Länge von 3,59 m und eine Wellenperiode von 1,99 s. Die erzeugten Wellenhöhen schwankten dabei zwischen 0,12 und 0,21 m und erreichten eine durchschnittliche Fortschrittsgeschwindigkeit von 1,81 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit variierte zwischen 0,3 und 0,52 m/s, die mittlere vertikale Geschwindigkeit betrug 0,05 m/s.

Hochkantschill-Anordnungen wurden bei insgesamt zehn Versuchen erzeugt. Die Wellenlängen schwankten insgesamt zwischen 3,98 und 6,16 m. Die Wellenperioden erreichten eine zeitliche Variation von 2,05 bis 3,49 s. Die Wellen erreichten eine Wellenhöhe zwischen 0,15 und 0,25 m. Die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit der Wellen beträgt 1,92 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,37 und 0,62 m/s, die vertikale Geschwindigkeit variierte zwischen 0,02 bis 0,05 m/s.

### Die Lagerungszustände

Werden alle Versuchsdurchgänge unabhängig von ihren Wasserhöhen graphisch dargestellt, so zeigen sich deutlich Bereiche in denen die Lagerungsvariationen unter Laborbedingungen im Wellenkanal generiert werden können (s. Abb. 4-10 bis Abb. 4-12 sowie Tab. 4-6a & b im Anhang). Die Ergebnisse zeigen, dass sich bis auf die Pflaster- und Dachziegellagerung alle im Wellenkanal erzeugten Strukturen nur unter bestimmten Wellenparameter jeweils in einem relativ engen Entstehungsfeld (Genese-Fenster) erzeugt werden.

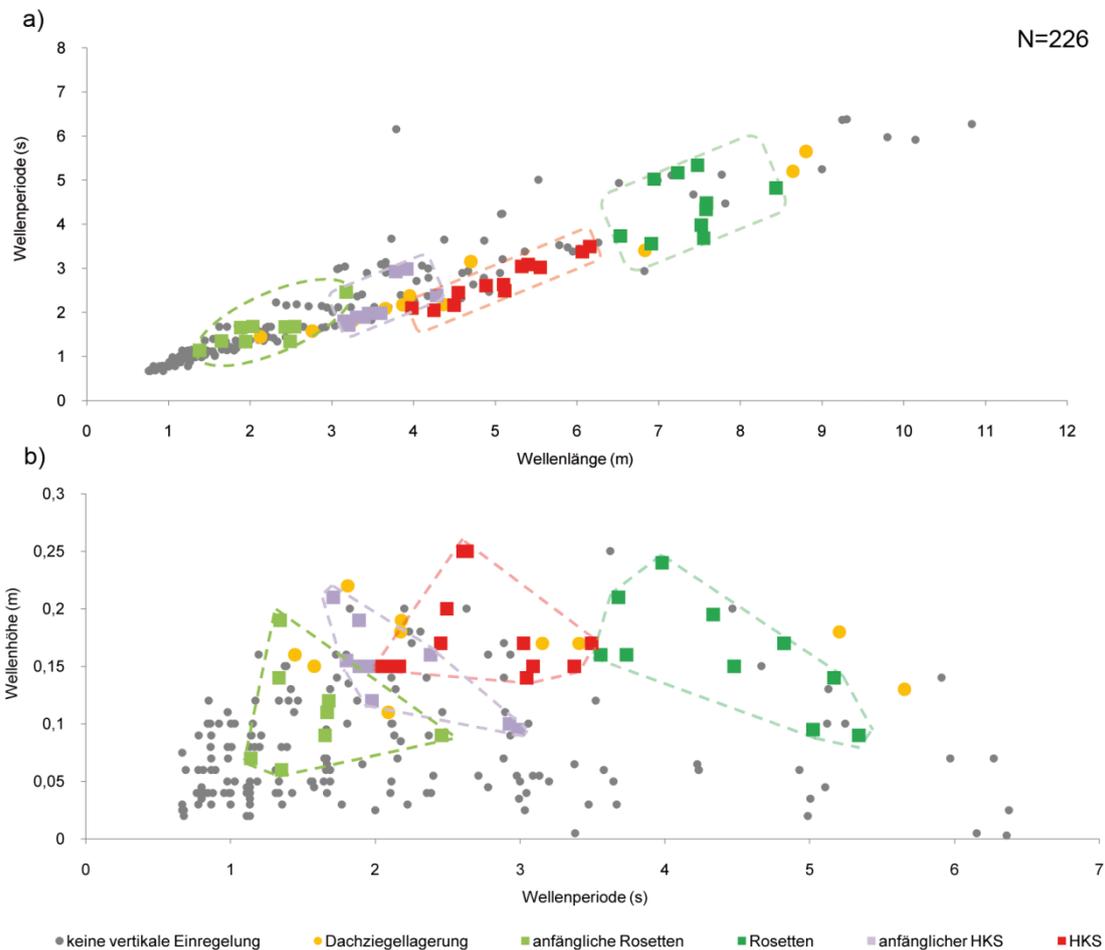
### Dachziegellagerung

Die Ergebnisse zeigen, dass Dachziegellagen unter Laborbedingungen sich bei den durchgeführten Versuchsreihen erst ab einer Wasserhöhe von 0,3 m generieren ließen. Die Entstehung von Pflasterlagerung setzte bei Wellenlängen zwischen 2,13 bis 8,81 m und Wellenperioden von 1,44 bis maximal 5,65 s ein. Die erzeugten Wellen erreichten dabei Höhen von 0,11 bis 0,22 m mit einer Laufgeschwindigkeit zwischen 1,47 und 2,01 m/s. Bei den 11 Versuchsdurchgängen wurde eine horizontale Partikelgeschwindigkeit zwischen 0,31 und 0,54 m/s erreicht, wobei die vertikale Geschwindigkeit zwischen 0,01 und 0,07 m/s lag. Für die Pflaster- und Dachziegellagerungen im Wellenkanal kann kein eindeutiges Entstehungsfenster festgestellt werden, da die Streuung ihrer Entstehung sich über das gesamte Spektrum der hier generierten Wellenparameter erstreckt.

### Anfängliche Rosetten

Die Wellenparameter die zu anfänglichen Rosettenstrukturen führen wurden bereits schon ab einer Wassertiefe von 0,2 m erreicht. Insgesamt konnten anfängliche Rosettenanordnungen bei insgesamt neun Versuchsdurchgängen generiert werden. Das Entstehungsfeld hierfür liegt bei Wellenlängen zwischen 1,38 und 3,18 m. Die nötige Wellenperiode schwankt zwischen 1,14 bis 2,46 s. Bei der Generierung von anfänglichen Rosetten schwankt die Wellenhöhe zwischen 0,06 und 0,19 m. Die Phasengeschwindigkeit beläuft sich auf minimale 1,14 m/s und reicht bis maximal 1,86 m/s. Bei den neun Versuchsdurchgängen wurde eine horizontale Partikelgeschwindigkeit zwischen 0,21 und 0,47 m/s erreicht, wobei die vertikale Teilchengeschwindigkeit zwischen 0,03 und 0,08 m/s

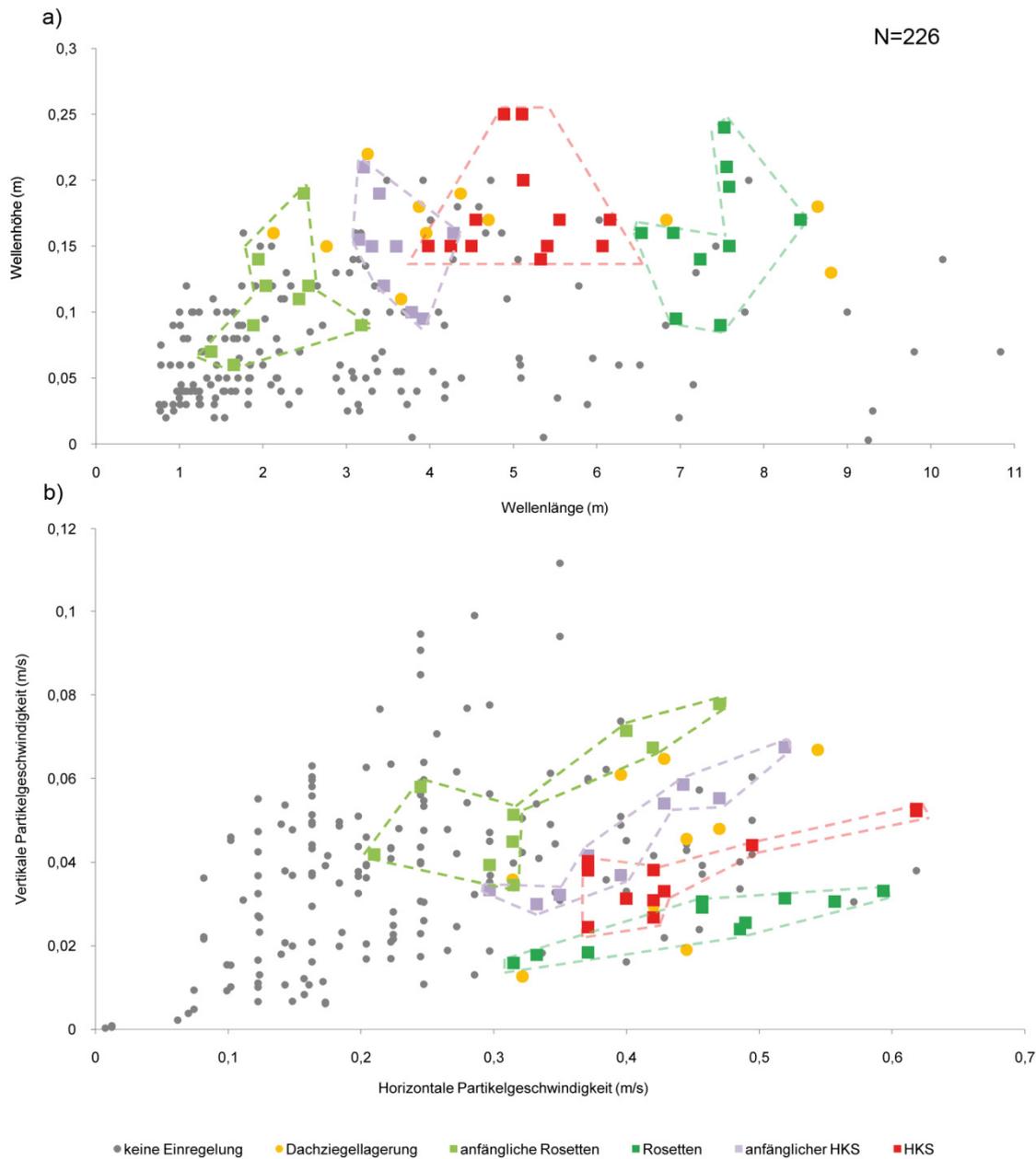
schwankt. Anfängliche Rosettenanordnungen entstehen bei deutlich niedrigeren Wellenhöhen, -längen und -perioden als alle anderen vertikalen Strukturen. Auch liegen die entsprechenden gerichteten Geschwindigkeiten in einem relativ niedrigen Bereich.



**Abb. 4-10.** Alle Versuchsdurchgänge unabhängig von der Wassertiefe. Gestrichelte Linie veranschaulicht die relativ kleinen Genesefenster der verschiedenen Klappenanordnungen und Orientierungen. (a) Wellenperiode vs. Wellenlänge. (b) Wellenhöhe vs. Wellenperiode.

## Rosetten

Die Ergebnisse zeigen, dass Rosettenanordnungen bei deutlich längeren Wellen und kürzeren Perioden entstehen. Bei zehn Versuchsdurchläufen wurden Rosettenstrukturen erzeugt. Die Wellenlängen lagen dabei zwischen 6,53 und 8,44 m. Die erreichten Wellenperioden reichen von 3,56 bis 5,34 s. Die 0,09 bis 0,24 m hohen Wellen erreichten eine Phasengeschwindigkeit zwischen 1,38 und 2,05 m/s. Dabei lag die horizontale Partikelgeschwindigkeit zwischen 0,31 bis 0,59 m/s und die vertikale Geschwindigkeit schwankte zwischen 0,02 und 0,03 m/s.



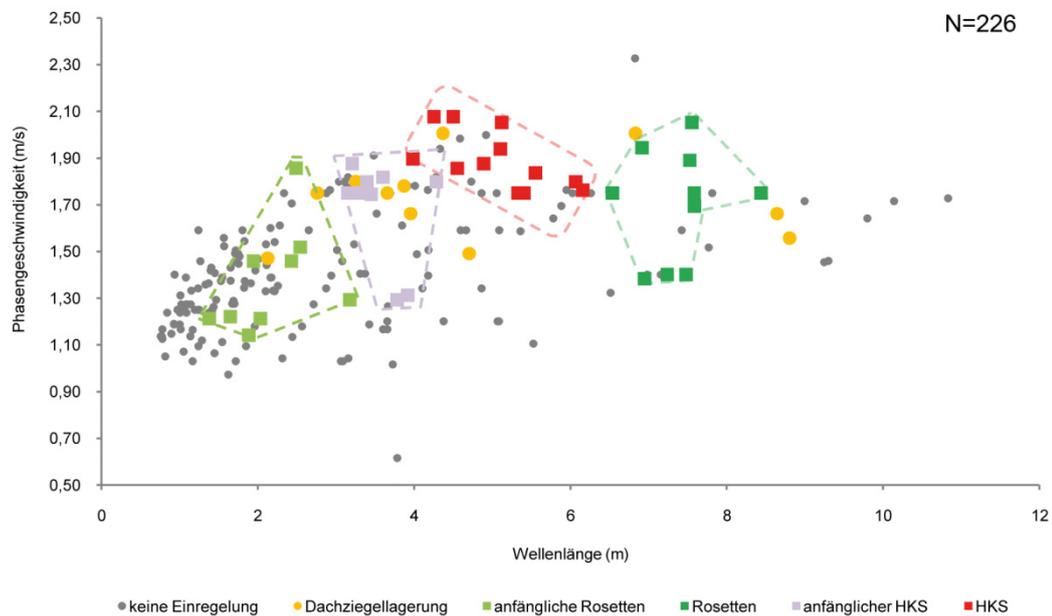
**Abb. 4-11.** Alle Versuchsdurchgänge unabhängig von der Wassertiefe. Gestrichelte Linien veranschaulicht die relativ kleinen Genesefenster der verschiedenen Klappenanordnungen und Orientierungen. (a) Wellenhöhe vs. Wellenlänge. (b) Vertikale vs. horizontale Partikelgeschwindigkeit.

### Anfängliche Hochkantschill-Anordnungen

Die ersten anfänglichen Hochkantstrukturen wurden bereits bei 0,2 und 0,3 m Wassertiefe erreicht, wobei mit einer Wasserhöhe von 0,4 m die meisten Versuche erfolgreich ausfielen. Insgesamt konnten bei neun Versuchsreihen eine anfängliche Hochkantstellung dokumentiert werden. Die vertikalen Anlagerungen stellten sich bei Wellenlängen zwischen 3,15 bis 4,82 m und Wellenperioden von 1,71 bis maximal 2,99 s. Die erzeugten Wellenhöhen schwankten dabei zwischen 0,09 bis 0,21 m und erreichten Laufgeschwindigkeiten von 1,29 bis 1,88 m/s. Bei den Versuchsdurchgängen wurde eine



horizontale Partikelgeschwindigkeit von 0,3 bis 0,52 m/s erreicht, wobei die vertikale Teilchengeschwindigkeit zwischen 0,03 und 0,07 m/s schwankte.



**Abb. 4-12.** Phasengeschwindigkeit vs. Wellenlänge. Alle Versuchsdurchgänge unabhängig von der Wassertiefe. Gestrichelte Linien veranschaulicht die relativ kleinen Genesefenster der verschiedenen Klappenanordnungen und Orientierungen.

### Hochkantschill-Anordnungen

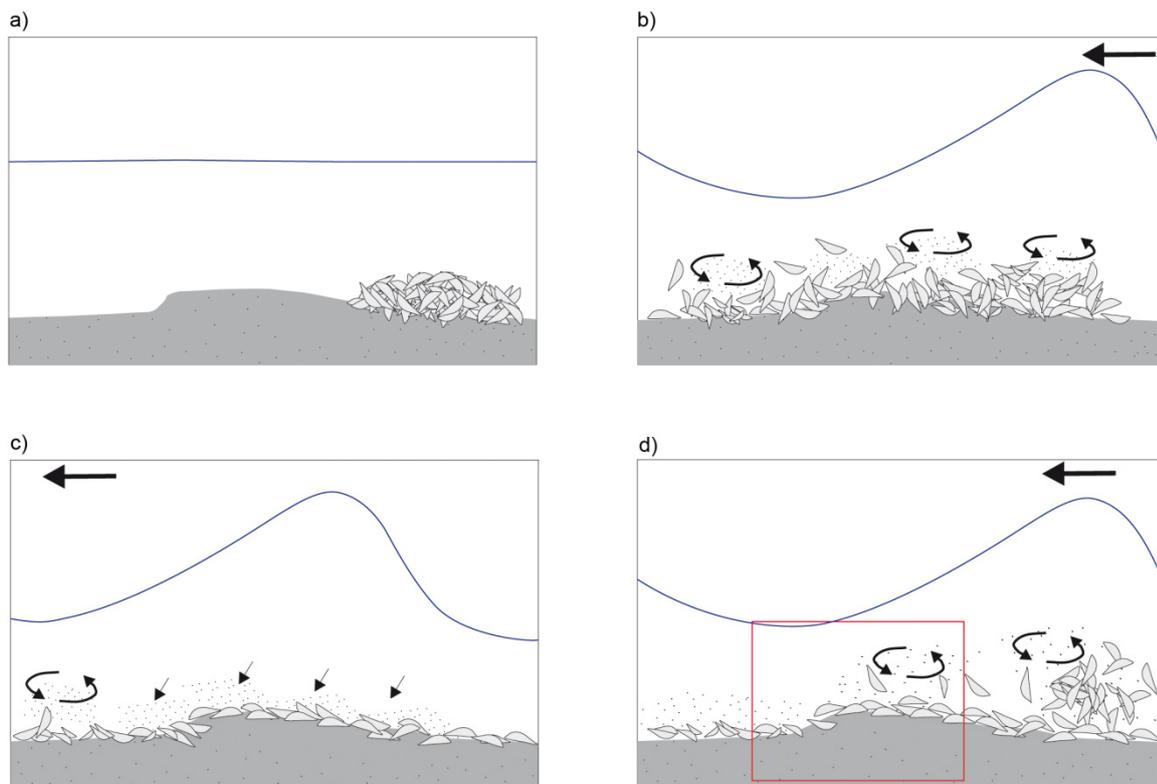
Die Wellenparameter die zu vertikal eingeregelt Hochkantstrukturen führen lassen sich in einem Entstehungsfeld eingrenzen. Hochkantanordnungen wurden erst ab einer Wassertiefe von 0,3 m generiert. Die meisten erfolgreichen Versuchsdurchgänge wurden jedoch bei einer Wassertiefe von 0,4 m erreicht. Die erzeugten Wellenlängen schwankten dabei zwischen 3,98 und 6,16 m und erreichten Wellenperioden von 2,05 bis 3,49 s. Die generierten Wellen erreichten Höhen zwischen 0,14 bis 0,25 m und erreichten eine Phasengeschwindigkeit von 1,75 bis 2,08 m/s. Die horizontale Partikelgeschwindigkeit schwankte zwischen 0,37 und 0,62 m/s, die vertikalen Teilchen erreichten Geschwindigkeiten zwischen 0,02 und 0,05 m/s.

### Detaillierte Beschreibung der Hochkantschill-Genese

Während der Versuchsdurchführungen im Wellenkanal konnten neben der Bestimmung der Entstehungsfelder, die zu den unterschiedlichen Lagerungsstrukturen führen, der eigentliche Entstehungsprozess der vertikalen Hochkantstrukturen detailliert dokumentiert werden.

Zur Darstellung des HKS-Entstehungsprozesses wurden schematische Abbildungen erstellt, an denen die Genese im folgenden Abschnitt beschrieben wird (s. dazu Abb. 4-13 und Abb. 4-14).

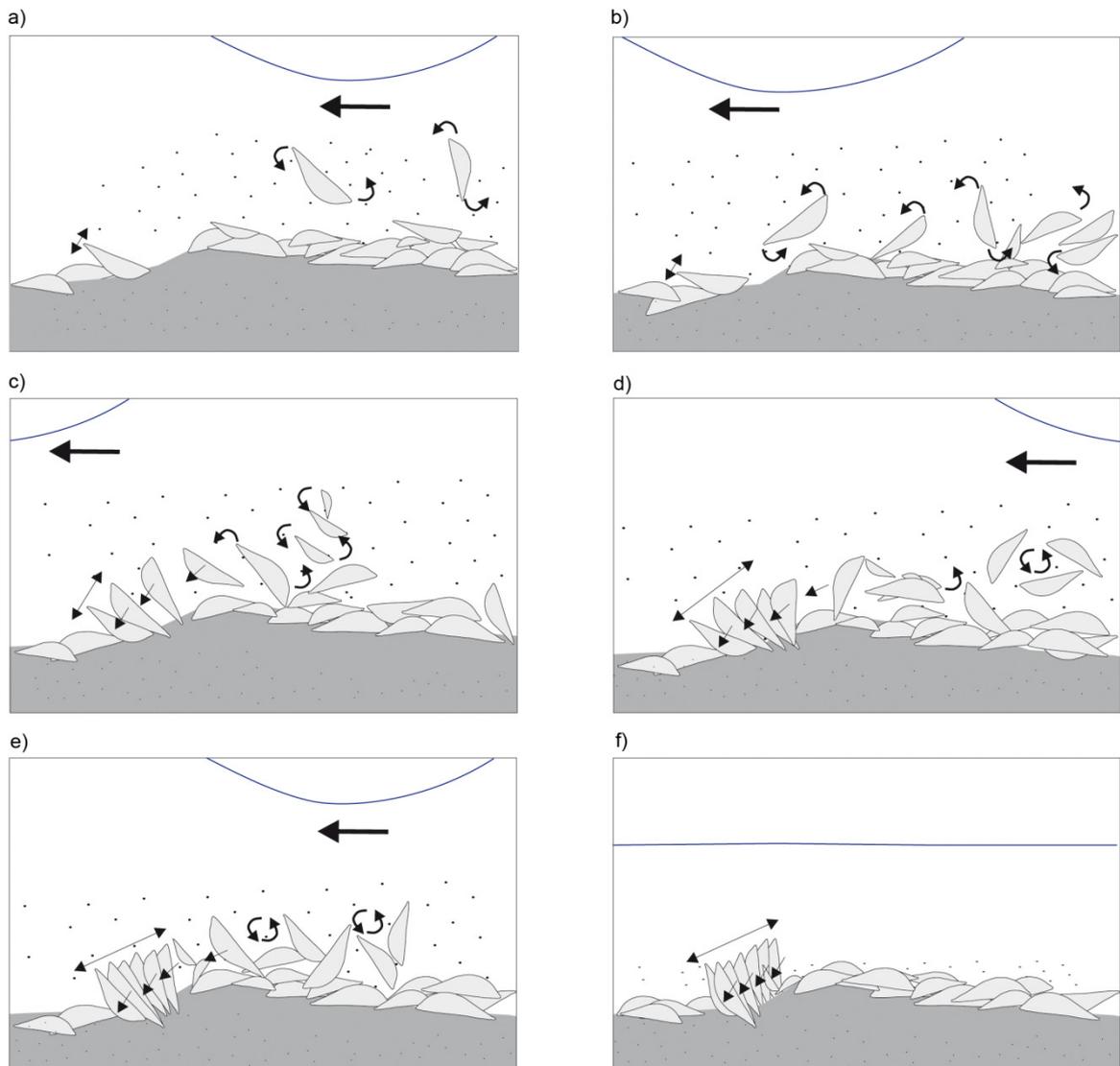
Bei jedem Versuchsdurchgang wurden die Schalen zu einem nahezu gleich großen Haufen vor dem Sandwall und der Kante auf dem Sedimentboden des Wellenkanals platziert. Nachdem der Versuchsaufbau abgeschlossen wurde und die Schalen an der Ausgangsposition lagerten wurde mit der eigentlichen Versuchsdurchführen begonnen (Abb. 4-13a). Nach den ersten zwei bis drei Wellendurchgängen wurden die Klappen durcheinander gewirbelt (Abb. 4-13b). Einige der Schalen kamen dabei relativ schnell als Pflaster und nach einigen Wellendurchgängen als Dachziegellagen auf dem Sedimentboden zur Ablagerung (Abb. 4-13c). Einige Klappen die nicht sofort mit dem Wellengang transportiert wurden verblieben als kleinere Anhäufungen noch im vorderen Bereich (Abb. 4-13d) und wurden allmählich auf den bereits vorhandenen Pflastern etappenweise in rückwertige Richtung transportiert (Abb. 4-14a).



**Abb. 4-13.** Hochkantschill Entstehungsprozess im Wellenkanal. (a) Ausgangsposition der Schalen vor Versuchsbeginn. (b) Nach den ersten zwei bis drei Wellendurchgängen werden die Klappen durcheinander gewirbelt. (c) Ablagerung der Schalen als Pflaster und nach einigen Wellendurchgängen als Dachziegellagen auf der Sandsohle. (d) Klappen die nicht sofort mit dem Wellengang transportiert werden, verbleiben als kleinere Anhäufungen im vorderen Bereich.

Aufgrund der vorhandenen Dachziegellagerung einiger Klappen wurde der Transportmechanismus dabei deutlich erleichtert. Die dichten Pflaster fungieren dabei als Transportband auf denen die Einzelklappen regelrecht hinüber gleiten können und schließlich über die Wallkante hinweg geworfen werden. Zwischen den einzelnen Wellenbergen kommt es zu einem schnellen Absinken der Klappen in Sinklage d. h. „gewölbt-unten“ auf dem Sedimentboden (Abb. 4-14b). Teilweise erfolgte eine Stabilisierung

bzw. eine Standortfixierung der konkaven Klappenhälften durch eingespültes Sediment (s. auch Tafel 4-2 F).



**Abb. 4-14.** Fortsetzung des Hochkantenschill Entstehungsprozesses im Wellenkanal. (a) Einige Klappen werden allmählich auf den bereits vorhandenen Pflastern etappenweise in rückwertige Richtung transportiert. (b) Klappen werden über die Walkante hinweg geworfen. Zwischen den einzelnen Wellenbergen kommt es zu einem schnellen Absinken der Klappen in Sinklage d. h. „gewölbt-unten“. (c) Beginnende Aufeinander-Stapelung von mehreren konkaven Klappen an der abschüssigen leewertigen Kante. (d) In Folge dessen sammeln sich einige Klappen zu kleineren Gruppen von 5 bis 10 Klappen. (e) Aufgrund der Klappenkonzentration erfolgt ein gegenseitiges abstützen der einzeln Schalen. (f) Die endgültige, fächerartige und vertikale Position der Klappen werden dann letztendlich durch die periodischen, relativ langen Wellenbewegungen verursacht.

Im weiteren Entwicklungsverlauf kommt es zu einer Aufeinander-Stapelung von mehreren konkaven Klappen an der leicht abschüssigen leewertigen Kante (Abb. 4-14c). In Folge dessen sammeln sich einige Klappen zu kleineren Gruppen von 5 bis 10 Klappen (Abb. 4-14d) Durch den Anlagerungsprozess und der natürlichen schüsselförmigen Form der Klappen werden die obersten Schalen in eine anfängliche senkrechte Position gebracht. Aufgrund der Klappenkonzentration erfolgt nun ein gegenseitiges abstützen der einzeln

Schalen (Abb. 4-14e). Die endgültige, fächerartige und vertikale Position der Klappen werden dann letztendlich durch die periodischen, relativ langen Wellenbewegungen verursacht (Abb. 4-14f). Durch den rhythmischen Wellengang werden die noch locker gepackten Klappen zusätzlich noch in leichte Vibration versetzt, was zu einer allmählichen Verfestigung führt.

### Konzentrationsmessungen

Um festzustellen bei welcher Schalenmenge sich Hochkantschill im Wellenkanal bildet, wurden insgesamt 33 Konzentrationsversuche durchgeführt. Da das Entstehungsfeld der Hochkantschill-Genese nach den Experimentreihen recht gut eingegrenzt werden konnte, wurden die Einstellungen am Wellenkanal übernommen, bei denen eine Hochkantschill-Entstehung sichergestellt werden konnte. Die erreichten Wellenparameter können der Abbildung 4-15 und der Tabelle 4-7a und Tabelle 4-7b (s. Anhang) entnommen werden.

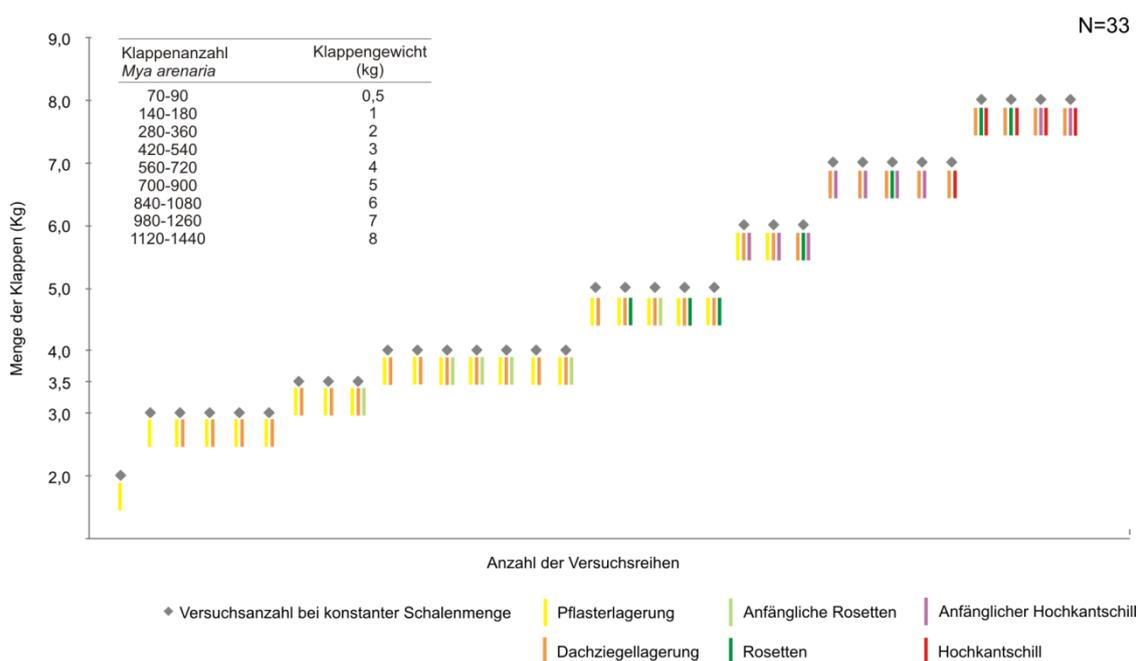
**Tab. 4-7a.** Erreichte Wellenparameter bei den Konzentrationsmessungen mit 0,4 m Wassertiefe.

N = 33	Wellenhöhe <i>H</i> (m)	Wellenperiode <i>T</i> (s)	Wellenlänge <i>L</i> (m)	Phasen- geschwindigkeit <i>c</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>u</i> (m/s)	Partikel- geschwindigkeit <i>v</i> (m/s)
Durchschnitt	0,23	2,55	5,16	2,02	0,56	0,05
Minimal	0,21	2,22	4,79	1,86	0,05	0,04
Maximal	0,24	2,58	5,62	2,21	0,59	0,05

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen zeigen, dass sich die Klappen bei 2 und 3 kg Schalenmaterial hauptsächlich als Pflaster bzw. als Dachziegellagen ablagern (Abb. 4-15). Das Schalengewicht entspricht in etwa 420 bis 540 Einzelklappen. Bei einer Schalenmenge von 3,5 kg (490 bis 630 Klappen, s. Abb. 4-15) wurden neben den Pflaster- und Dachziegellagen bei einem Versuchsdurchgang auch erste anfängliche Rosettenstrukturen gebildet.

Die Bildung von Rosetten-Strukturen wurde bei 4 kg Schalenmaterial bei insgesamt vier Versuchsdurchgängen nachgewiesen. Bereits ab einem Schalengewicht von 5 kg (700 bis 900 Einzelklappen) entstanden neben den Pflaster und Imbrikationen gut ausgebildete Rosettenanordnungen.

Bei den Versuchsreihen in denen 6 kg Material eingesetzt wurde, begangen die Schalen sich an der hinteren Kante anfänglich ineinander zu verschachteln, so dass hierbei von einem anfänglichen Hochkantschill gesprochen werden kann.



**Abb. 4-15.** Ergebnisse der Konzentrationsversuche im Wellenkanal bei einer konstanten Wassertiefe von 0,4 m. Bei den Versuchen mit bis zu 3 kg Schalenmaterial entstanden Pflaster- und Dachziegellagen. Ab einer Schalenmenge von 3,5 kg bildeten sich anfängliche Rosetten-Strukturen. Ab 5 kg Schalenmaterial entstanden erste Rosetten-Anordnungen. Anfänglicher Hochkantschill wurde ab 6 kg Schalenmaterial generiert. Vertikal eingeregelter Hochkantschill bildeten sich bereits bei einem Versuchsdurchgang mit 7 kg. Die Hochkantschill-Genese wurde bei 8 kg Schalenmaterial noch verstärkt.

Bei einer Schalenmenge von 980 bis 1260 Einzelklappen (7 kg, s. auch Abb. 4-15) konnten neben den Pflaster- und Dachziegelanordnungen sowie Rosettenstrukturen bei einem Versuch vertikal eingeregelter Hochkantschill nachgewiesen werden. Dieser Prozess der Hochkanteinregelung an der leewertigen Hinterkante konnte bei einer Schalenmenge von 8 kg (1120 bis 1440 Klappen) bei insgesamt vier Versuchsdurchgängen wiederholt werden.

## Diskussion

Die Ergebnisse der Wellenkanalexperimente zeigen, dass eine Reproduktion von vertikal eingeregeltten *M. arenaria* Schalen unter Laborbedingungen möglich ist. Mit Hilfe der Experimente gelang es die hydrodynamischen Randparameter in einem engen Entstehungsfeld einzugrenzen, die zu einer vertikalen Einregelung der Klappen führen. Neben dem Hochkantschill (HKS) gelang es zudem Rosettenanordnungen und Dachziegellagerungen unter Laborbedingungen zu generieren. Die Wellenkanalexperimente ermöglichten es zudem, den detaillierten Entstehungsprozess der Hochkantschill-Genese zu entschlüsseln und die im zweiten Kapitel beschriebene Bildungstheorie experimentell zu bestätigen. Ferner konnte ein Zusammenhang zwischen der Hochkantschill-Genese und der dazu nötigen Schalenkonzentration nachgewiesen werden.

Wie die Ergebnisse zeigen, bilden sich Hochkantschille sowie anfängliche vertikale Einregelungen und Einsteuerung im Wellenkanal nur unter bestimmten Wellenparameter jeweils in einem relativ engen Entstehungsfeld. Einen weiteren wichtigen Einfluss auf die HKS-Genese ergibt sich daher aus der entsprechenden Wasserhöhe was sich wiederum auf die generierten Wellenparameter wie z. B. auf die Wellenhöhe und vertikale und horizontale Partikel- und Phasengeschwindigkeit auswirkt. Nach den Ergebnissen der Experimentreihen bei unterschiedlichen Wassertiefen hat die Wellenhöhe einen maßgeblichen Einfluss auf den Schalentransport und im weiteren Verlauf auf die Schaleneinregelung und Einsteuerung. Dies zeigt sich besonders beim Vergleich der niedrigen Wasserhöhen mit den tieferen. Obwohl bei den Versuchen mit 0,15 m Wassertiefe die nötigen Wellenlängen und Perioden erreicht wurden, konnte aufgrund der zu geringen Wellenhöhe nicht die erforderlichen horizontalen Partikel- sowie Phasengeschwindigkeiten, die einen Schalentransport ermöglichen erreicht werden, so dass keine Klappeneinsteuerung oder Einregelungen dokumentiert werden konnte. Die Wellenhöhe ist besonders für die HKS-Genese entscheidend, da ein Transport der Schalen in der Wassersäule erfolgt. Bei rosettenartigen Formen reicht oftmals eine Änderung der Klappenorientierung vor Ort.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass erst ab einer Wassertiefe von 0,2 m die nötigen Wellenparameter erreicht werden die zu anfänglichen Rosetten und Rosettenanordnungen sowie anfänglichen Hochkantstrukturen führen. Die zur richtungsorientierten Hochkantschill Genese erforderlichen Wellenparameter wurden jedoch bei dieser Wassertiefe dennoch nicht erreicht. Dies lässt sich besonders bei der erzeugten Phasengeschwindigkeit verdeutlichen, da diese an Wassertiefe und Wellenlänge gekoppelt ist. Die erforderliche Geschwindigkeit wurde demnach bei den Versuchen mit 0,2 m Wassertiefe nicht erreicht, da sich Wellen nur bei größeren Wassertiefen und Wellenlängen deutlich schneller ausbreiten können.

Die Ergebnisse der Laborexperimente zeigen, dass also erst ab einer Wassertiefe von 0,3 m die erforderlichen Wellenparameter erreicht werden, die zu einer Hochkantanordnung am hinteren Saum des künstlich angelegten Sedimentwalls führen. Bei dieser Wassertiefe

konnte auch erstmalig ein gerichtetes, rückwertiges Transportverhalten der *M. arenaria* Einzelklappen im Wellenkanal beobachtet werden, da erst hierbei die nötigen horizontalen Geschwindigkeiten von mindestens 0,37 m/s erreicht wurden.

Die bei den Experimenten dokumentierten Dachziegel- und Pflasteranordnungen wurden ebenfalls zwar erst ab einer Wassertiefe 0,3 m erzeugt, doch lassen sich die Randparameter der Erzeugung nicht wie bei den anderen generierten Strukturen in einem engen Entstehungsfenster eingrenzen.

Die erfolgreichsten Versuchsergebnisse wurden bei einer Wassertiefe von 0,4 m erzielt. Hierbei wurden besonders oft anfängliche Hochkantschill-Anordnungen sowie Hochkant-Einregelungen am hinteren Kantensaum des Sedimentwalls generiert. Die Glaswände des Wellenkanals ermöglichten eine detaillierte Dokumentation der HKS-Genese, so dass der theoretisch vermutete Entstehungsprozess mit Hilfe der Laborexperimente nahezu vollständig nachvollzogen werden konnte. Auch decken sich die im Gelände dokumentierten Bildungsbedingungen mit den Ergebnissen der Laborexperimente.

Demnach fungieren dichte Pflasterlagerungen als eine Art Transportband (auch Futterer 1975) auf denen die Einzelklappen regelrecht hinüber gleiten können und schließlich über eine abschüssige Kante hinweg geworfen werden. Unmittelbar an leewertigen-Seite werden die Klappen im weiteren Verlauf durch den Wellengang über die Kante hinweg geworfen, so dass ein Absinken aufgrund des Formwiederstandes und der Schwerkraft erfolgt. Diesen Prozess bezeichnet man allgemein als eine „freie“ Einkippung der Schale (auch Lüders 1929; Richter 1942). Die Klappen werden dabei in der Sinklage d. h. „gewölbt-unten“ auf dem Untergrund abgelagert. Teilweise erfolgte eine Stabilisierung bzw. eine Standortfixierung der konkaven Klappenhälften durch eingespülten Sand. Dieser Prozess konnte sowohl im Gelände als auch bei den Experimentreihen beobachtet werden.

Im weiteren Entwicklungsverlauf kommt es zu einer Aufeinander-Stapelung des konkaven Klappenmaterials an der erwähnten abfallenden Kante. Aufgrund der geschützten Lage können sich dort die Klappen zu einzelnen Gruppen aufeinander legen. Durch den periodischen Wellengang werden die obersten Klappenlagen in eine anfängliche senkrechte Position gebracht. Durch die stetige Erhöhung der Klappenkonzentration bzw. einem Nachrücken der Klappen erfolgt ein gegenseitiges abstützen einzelner Schalen (auch Schäfer 1941). Ihre endgültige fächerartige und vertikale Position erhalten die Klappen dann letztendlich durch den periodischen Wellengang. Durch den rhythmischen Wellenprozess werden die noch relativ locker gepackten Klappen zusätzlich noch in Vibration versetzt, so dass es zu einer allmählichen Verfestigung kommt. Die Beobachtungen zeigten weiter, dass nur innerhalb des engen Entstehungsfensters die nötige Transportbewegung und Einregelung der Klappen erfolgen kann. Demnach bewirkt das Zusammenspiel der Wellenparameter keinen durchgängigen Schalentransport, sondern entspricht eher einer etappenähnlichen Klappenbewegung. Die HKS-Genese erfordert somit eher eine periodische Wellenbewegung als eine stetige Strömungsbewegung. Dadurch wird eine Balance zwischen dem Schalengewicht bzw. dem Sinkverhalten und dem vertikalen Transportverhalten der ankommenden Wellen verursacht.

Greensmith & Tucker (1968) sowie Grinnell (1974) beschrieben, dass Bivalven-Klappen bei starken bis mäßigen Strömungsgeschwindigkeiten in eine stabile, d. h. vertikale Position gebracht werden können. Ensom (1984) wies des Weiteren daraufhin, dass Turbulenzen innerhalb der Wassersäule einen großen Einfluss auf die Bildung von vertikalen Strukturen verursachen (Mündl. Mitt. von Greensmith in Ensom 1984). Die Experimente der vorliegenden Arbeit verdeutlichen, dass für eine Hochkantschill-Genese doch mehrere Randbedingungen erfüllt sein müssen als bislang vermutet. Neben der morphologischen und konzentrationsbedingten Abhängigkeit sind die wichtigsten Randparameter neben der Wassertiefe, die Wellenlänge und -Periode sowie die horizontale Teilchengeschwindigkeit die von den Wellen erzeugt wird.

Nach Abschluss der Experimente lässt sich feststellen, dass verschiedene Lagerungsanordnungen von *M. arenaria* Klappen sich jeweils nur in relativ engen Entstehungsfenstern bei entsprechenden generierten Wellenparametern entstehen (s. dazu auch Abb. 4-10 bis Abb. 4-12). Oftmals ist jedoch, wie in der Natur auch ein Übergang von Strukturen zu beobachten. So wird aus anfänglichen vertikal eingeregelt Klappen durch relativ geringe Erhöhung der Randparameter recht schnell eine Hochkantstellung erreicht. Anders verhält es sich bei den anfänglichen Rosettenanordnungen, die sich nicht am hinteren Saum bilden, sondern immer unmittelbar kurz davor oder sich deutlich in den vorderen Bereich anordnen. Aufgrund der nötigen Verschachtelungen und Verkeilungen der Klappen ist kein weiter Transportmechanismus für die Genese von Rosettenanordnung nötig. Die Versuche zeigen, dass es aus reicht, wenn sich mehrere Klappen aufgrund der erzeugten Wellenparameter mit ihrer Längsachse kurzzeitig horizontal und/oder vertikal emporheben und sich anschließend bedingt durch ihre gewölbte Schalenform vor Ort aneinander und ineinander gedrückt werden. Um aus anfänglichen Rosettenanordnungen nahezu oval geformte Rosetten-Strukturen erhalten zu können sind nach den Ergebnissen also deutlich höhere Wellenparameter nötig. Bei den Experimenten zeigte sich zudem, dass höhere Wellenparameter eher zu einer chaotischen bis wirr angeordneten Stellung der *M. arenaria* Einzelklappen führt, als zu einer vertikalen und richtungsorientierten Hochkantstellung.

Die Versuche im Wellenkanal widerlegen die teilweise bestehende Annahme, dass Hochkantschill-Anordnungen bei Sturmereignissen oder starkem Wellengang entstehen. Es kann zudem bestätigt werden, dass eine vertikale Anordnung unter Laborbedingungen im Kanal aber auch im natürlichen Gezeitenbereich überwiegend auf Welleneinwirkung zurückzuführen ist (auch Schäfer 1941; Mii 1957; Sanderson 1974; Futterer 1977, 1981). Zwar führte auch Futterer (1977, 1981) Experimente mit *M. arenaria* Einzelklappen am Strömungskanal (auch mit Wellengang) durch, jedoch beschränkten sich die Untersuchungen auf Strömungsindikatoren, Sinkgeschwindigkeiten und Sinkverhalten der Klappen. Futterer (1981) konnte zwar zwischen strömungsverursachten und durch Wellen erzeugte Hochkantschill-Strukturen unterscheiden, jedoch wurde nicht auf entsprechende Wellenparameter die zu einer Hochkantschill-Genese führen eingegangen. Mit den



vorliegenden Ergebnissen der Experimentreihen werden die bisherigen Erkenntnisse der Untersuchungen von Futterer (1977, 1981) noch weiter ergänzt und erweitert.

Im Vergleich zu den von Schäfer (1941) und Sanderson & Donovan (1974) dokumentierten sturmbedingten vertikalen Einregelungs-Ereignisse stellen die in dieser Arbeit beschriebenen HKS-Vorkommen relativ beständige Strukturen innerhalb des Untersuchungsgebietes dar. Die Entstehung der HKS-Strukturen durch Einzelereignisse wie beispielsweise durch Sturmfluten oder Springtiden kann nach den Laborexperimenten mit großer Wahrscheinlichkeit nun ausgeschlossen werden.

Hochkantschille werden demnach nur bei relativ normalem Seegang, also bei periodischen Wellen mit einer relativ konstanten Wellenlänge und -Periode erzeugt. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass zudem die Schalenkonzentration eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Hochkantschillen einnimmt. Ist die Schalenkonzentration zu gering, bleiben die Klappen auf dem Sediment liegen und werden relativ zügig als Pflaster- und Dachziegellagen abgelagert. Wird die Schalenkonzentration erhöht, so werden die Klappen über die schon bereits lagernden Schalen hinweg transportiert, so dass sich die Klappen im Rückbereich einer natürlichen morphologischen Erhebung (z. B. Wattfläche, Prielkante) aufeinander lagern und sich im Laufe der Zeit vertikal einregeln können.

### **Vergleich mit den Geländebeobachtungen**

Beim Vergleich der natürlichen Vorkommen mit den künstlich generierten Strukturen ist zwar eine große Ähnlichkeit zu erkennen, jedoch sind auch leichte Unterschiede festzustellen. Die im Gelände beobachtete Lagerungsdichte innerhalb der Hochkantschill-Anordnungen wurde bei den Experimentreihen nur annäherungsweise erreicht.

Am Wellenkanal nicht simuliert wurde der täglich einwirkende Ebbstrom der vermutlich durch die zurückfließenden Wassermassen einen Gegendruck auf die Klappenrückseiten an der Hinterkante erzeugt. Bei natürlichen HKS-Vorkommen bewirkt dieser Prozess gemeinsam mit dem Wellengang eine Ausspülung der Sedimentreste in den konkaven Klappenhälften, so dass dies zu einer Einengung der Klappen untereinander führt und die Schalen noch dichter aneinander geschachtelt werden können.

Des Weiteren erreichten die künstlich generierten Rosettenanordnungen bei weitem nicht die runden bis ovalen Entstehungsformen und Ausmaße wie sie im Gelände dokumentiert wurden. Dies lässt vermuten, dass die Genese der im Gelände dokumentierten Rosettenstrukturen weit komplexer ist als vermutet. Demnach ist dessen Entstehung ein Resultat des Wechselspiels zwischen den täglichen Rhythmus der Gezeitenwellen sowie der Wellenparameter in Abhängigkeit von der sich stetig veränderten Wassertiefe. Um die im zweiten Kapitel beschrieben oval bis rund geformten, rosettenartigen angeordnete Hochkantschill-Variationen erhalten zu können, sind nach den Ergebnissen der Experimentreihen weitere hydrodynamische Kräfte erforderlich. Hierbei spielen durch Tidenhub und Strömung verursachte gegensätzlich verlaufende Wassermassen, die

Turbulenzen sowie Wasserstrudel bei geringer Wassertiefe verursachen können, vermutlich eine übergeordnete Rolle. Bei dem natürlichen Entstehungsprozess werden die Klappen jedesmal kurzzeitig derartig bewegt, dass diese sich zu kleinen Rosetten formieren können und bei ablaufendem Wasser an entsprechende Oberflächen verhaken. Da die Genese der Rosettenausbildungen ebenfalls von der Wirkungsgrenze des Bewegt-Wassers abhängig ist (Schäfer 1941), wird eine naturgetreue Bildung wahrscheinlich nur während des aktiven Tidenvorganges für wenige Minuten über den Schill-Vorkommen möglich sein.

Bei den in der Literatur beschriebenen Rosettenanordnungen aus Gesteinsbruchstücken, sammelten sich die jeweiligen Fragmente fast ausnahmslos um natürliche Hindernisse wie Gesteinsblöcke und Baumstämme herum oder wurden in Bodenvertiefungen dichtgepackt eingelagert. Als Ursache wurde oftmals neben der Wellenenergie auch Wasserturbulenzen, Sog oder starke Strömungen angegeben (z. B. Dionne & Laverdiere 1967; Dionne 1971; Kostyaev 1973; Sanderson & Donovan 1974; Mount & Kidder 1993; Wilson 2002; Wilson & Edwards 2004).

Mii (1957) vermutete, dass vertikale Lagerungsformen nicht alleine durch Brandungswellen, sondern eher durch Einwirkung periodischer Wellen verursacht werden. Nach den Geländebeobachtungen und den Laborergebnissen der vorliegenden Arbeit wird die Entstehung maßgeblich eher durch Wellen verursacht und durch die Tidenströmung nachhaltig beeinflusst und intensiviert.

Auffällig ist, dass auf den Wattflächen innerhalb des Arbeitsgebietes (s. dazu Kap. 2) auf flacher Wattfläche überwiegend Schill-Vorkommen vorgefunden wurden in denen die Klappen überwiegend als Rosettenanordnungen vorlagen. Da die Phasengeschwindigkeit und somit auch die vertikale Partikelgeschwindigkeit mit immer kleiner werdender Wassertiefe sinken, dämpft die ansteigende morphologische Struktur der Schill-Vorkommen die anlaufende Welle ab (Vgl. Niemeyer & Kaiser 1998). Die Schalen die sich vor dem abfallenden Kantensaum befinden sind demnach vermutlich leicht stärkeren Wellenparametern ausgesetzt, als die Klappen welche sich unmittelbar hinter der Kante befinden. Nach den Experimentreihen entstehen Rosettenstrukturen und Hochkantschill-Anordnungen bei unterschiedlichen Wellenparametern. Demnach könnten richtungsgerichtet Hochkantschille als Wellenindikator auf den Wattflächen herangezogen werden, da diese nur in einem relativ kleinen Genese-Fenster gebildet werden.

Die bei den Geländeuntersuchungen dokumentierte Klappeneinstreuung der obersten Dachziegellagen (s. auch Kap. 2) konnte bei den Experimentreihen im Wellenkanal nicht eindeutig beobachtet werden. Diese Tendenz einer Klappeneinstreuung beobachtete Trusheim (1931a) bei seinen Versuchen im Strömungskanal mit *M. arenaria* Klappen. Wahrscheinlich bewirken die tidenabhängigen Strömungen über den Klappen im Gelände in Zusammenspiel mit der Wellenfront erst diese Einstreuungsverhalten. Da zu Flachwasserzeiten im Tidenzyklus des Gezeitenbereiches Strömungen und Wellen oftmals gemeinsam auftreten, wird laut Futterer (1981) die stärkere bzw. die länger einwirkende Kraft in der Regel die Ablagerungsform der Schalen auf den Schill-Vorkommen bestimmen.

Der bei den Konzentrationsversuchen beobachtete Übergang von einem Pflaster zu einer Dachziegellagerung ist laut Schäfer (1962) als Wanderform des Schalenmaterials anzusehen. Allerdings muss dabei jedes stationäre Vollpflaster zunächst als Streupflaster beginnen (Schäfer 1962) und jede Dachziegellagerung wird demnach als Vollpflaster beginnen. Auch Häntzschel (1939) stellte ergänzend fest, dass ein Übergang von Pflastervariationen zu Dachziegellagerung mit einer Erhöhung der Schalenkonzentration zusammenhängt. Futterer (1975) erklärte diesen Prozess ebenfalls mit einer konzentrationsbedingten aufeinander Schiebung des Klappenmaterials (auch Jessen 1932, 1933). Wie die Ergebnisse der Konzentrationsversuche weiter zeigen, spielt auch bei den hier erzeugten künstlichen Strukturen die Verfügbarkeit der Klappenmasse eine entscheidende Rolle. Je mehr Klappen angeliefert werden, desto mehr Schalen können entweder zu Rosetten- oder in reiner Hochkantschill-Stellung eingeregelt werden.

Wie bereits im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit beschrieben, beschränken sich die verschiedenen Lagerungsstrukturen nur auf bestimmte Bereiche eines Schill-Vorkommens. Bei den unter Laborbedingungen generierten Strukturen konnte eine ähnliche Tendenz beobachtet werden. Demnach werden Pflaster- und Dachziegelanordnungen vorwiegend im vorderen und mittleren Bereich sowie bis zur Kante des Sandwalls gebildet. Rosettenstrukturen werden dagegen im mittleren Bereich und richtungsorientierte Hochkantschill-Anordnungen überwiegend am hinteren Kantensaum des Sedimentwalls gebildet. Die Lagerungspositionen sind demnach eng mit den Bildungsprozessen und den nötigen Rahmenbedingungen der Wellenparameter gekoppelt. So ist für eine HKS-Entstehung neben den bereits erwähnten morphologischen abschüssigen Kanten zudem ein genügend hoher Wasserstand erforderlich, so dass es zu einem Transport über die entsprechende Kante kommen kann.

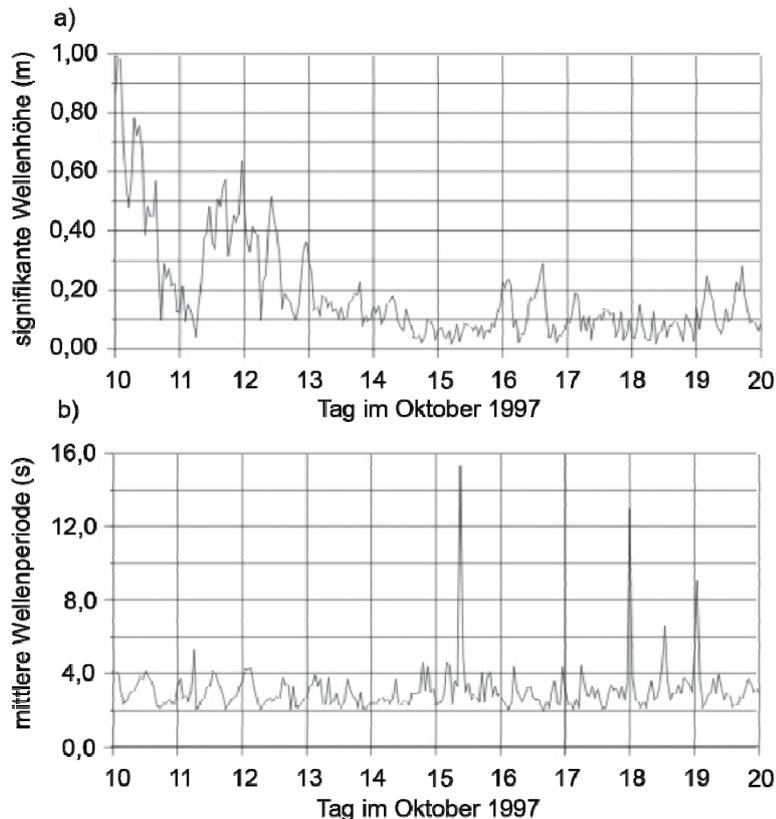
Nach Schäfer (1941) sind zudem zwei weitere wichtige Voraussetzungen für eine vertikale Einregelung von Muschelschalen nötig (s. auch Kap. 2):

1. Die Muschelklappe muss demnach eine flach-gewölbte, schüsselförmige Form besitzen wie beispielsweise die Klappen von *Mya*, *Scrobicularia*, *Macoma*, *Cerastoderma* und *Donax* sowie einige *Pecten*.
2. Es muss ein massenhaftes auftreten einer *M. arenaria* Generation (oder anderer Muschelarten) mit ähnlich langen Klappenlängen (weil gleich alten) vor Ort gewährleistet sein.

Der beschriebene Genese-Prozess für die hier untersuchten *M. arenaria* Hochkantschille lässt sich nach Schäfer (1941) auch auf Klappen anderer Muschelklappen anwenden, wenn diese eine ähnliche Schalenform besitzen. Dieser Rückschluss wird durch die Geländeuntersuchungen bei denen ebenfalls ähnliche Hochkantstrukturen anderer Muschelarten entdeckt wurden bestätigt. Beispiele für rezente Hochkantstrukturen aus anderen Muschelarten wurden bereits im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit erwähnt (z. B. *M. edulis* (Baltrum und Dorum), *M. balthica* und *C. edule* (Rysumer-Nacken, Ems-Mündung). Der eigentliche Entstehungsprozess wird zwar ähnlich dem Beschriebenen sein, doch werden sich die hier festgestellten Wellenparameter aufgrund der veränderten Beschaffenheit der Klappen je nach Schalenform und Gewicht verschieben.

Nach den Geländebeobachtungen (s. auch Kap. 2) sowie den Experimentreihen am Wellenkanal können weitere wichtige Voraussetzungen die zur Hochkantstellung von *M. arenaria* Einzelklappen führen ergänzt werden. Die Experimente zeigen, dass neben der Wellenhöhe, Wellenlänge und Wellenperiode eine entsprechende Phasengeschwindigkeit sowie eine hinreichende horizontale Partikelgeschwindigkeit notwendig sind. Nur mit Hilfe der erfassten Wellenparameter innerhalb des engen Genese-Fensters ist eine Entstehung von Hochkantstrukturen im Wellenkanal und wahrscheinlich auch unter natürlichen Bedingungen möglich.

Bei den Experimenten wurde wie bereits erwähnt ein relativ enges Entstehungsfeld der Wellenparameter festgestellt, welches für die Hochkantschill-Genese verantwortlich ist. Die Naturmessungen der Seegangsbedingungen vor Bremerhaven von Fittschen (1999) decken sich zudem weitgehend mit den hier durchgeführten Experimentreihen. So zeigen die Naturmessungen der Wellen vorherrschend Höhen zwischen 0,05 und 0,25 m an (Abb. 4-16). Besondere Ähnlichkeit mit den Labormessungen zeigen die natürlichen Wellenperioden die zwischen 2 und 4 s schwanken und genau dem HKS-Genese Spektrum entsprechen die in der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden (Abb. 4-16, Wellendaten vom 10 bis 20 Okt. 1997). Aufgrund der Übereinstimmung der Laborergebnisse mit den Naturmessungen von Fittschen (1999) können die Wellenparameter des HKS-Entstehungsfeldes höchstwahrscheinlich auch für die natürlich generierten Hochkantschille übertragen werden.



**Abb. 4-16.** Beispiel der Naturmessungen vor Bremerhaven im Zeitraum 10. bis 20. Oktober 1997. (a) signifikante Wellenhöhe. (b) mittlere Wellenperiode (verändert aus Fittschen 1999).

## Schlussfolgerung

Mit den Wellenkanalexperimenten konnten die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen die im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit vorgestellt wurden, bestätigt und weiter ergänzt werden. Durch die Experimentreihen konnten die hydrodynamischen Randparameter in einem relativ engen Entstehungsfeld eingegrenzt werden, die zu einer vertikalen Einregelung der *M. arenaria* Klappen führen. Neben dem Hochkantschill gelang es künstliche Pflaster- und Dachziegellagerungen sowie Rosettenanordnungen unter Laborbedingungen zu generieren. Ferner gelang es durch die Wellenkanalexperimente den detaillierten Entstehungsprozess der Hochkantschill-Genese zu entschlüsseln. Des Weiteren konnte ein enger Zusammenhang zwischen der Hochkantschill-Genese und der dazu nötigen Schalenkonzentration nachgewiesen werden.

Die Experimente verdeutlichen, dass für eine Hochkantschill-Genese mehrere Randbedingungen erfüllt sein müssen als bislang vermutet. Neben der morphologischen und konzentrationsbedingten Abhängigkeit sind die wichtigsten Randparameter neben der Wassertiefe, eine entsprechende Wellenhöhe, Wellenlänge und -Periode sowie eine hinreichende horizontale Teilchengeschwindigkeit die von den Wellen erzeugt wird. Die endgültige und vertikale Position erhalten die Klappen dann letztendlich durch den periodisch bedingten Wellengang.

Die Untersuchungen zeigen weiter, dass nur innerhalb des nachgewiesenen Entstehungsfeldes die nötigen Transportbewegung und Einregelungen der Klappen erfolgen können. Demnach bewirkt das Zusammenspiel der Wellenparameter keinen durchgängigen Schalentransport sondern eher eine etappenähnliche Klappenbewegung.

Dachziegellagerungen die im Vorfeld abgelagert wurden, begünstigen einen weiteren Klappentransport in rückwertige Bereiche.

Hochkantschille werden in der Natur demnach nur bei relativ normalem Seegang, also bei periodischen Wellen mit einer relativ konstanten Wellenlänge und -Periode erzeugt.

Nach Abschluss der Experimente lässt sich demnach feststellen, dass verschiedene Lagerungsanordnungen von *M. arenaria* Klappen sich jeweils nur in relativ engen Entstehungsfenstern bei entsprechenden generierten Wellenparametern entstehen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sich Hochkantschille aufgrund ihres engen Genesefensters hervorragend zur Rekonstruktion ähnlicher angeordneter fossiler oder auch rezenter Ablagerungsbedingungen eignen und sogar als Indikatoren für Wellenparameter herangezogen werden können.



## Literaturverzeichnis

- Allen, J. R. L. (1984) Experiments on the settling, overturning and entrainment of bivalve shells and related models. *Sedimentology*, 31, 227-250.
- Allen, J. R. L. (1990) Transport - Hydrodynamics. Shells. In: Briggs, D. E. G. & Crother, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 227-230, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Ball, D. F. (1976) Close-packed patterned arrangement of stones and shells on shore-line platforms. *Biuletyn Peryglacjalny*, 25, 5-7.
- Brenchley, P. J. & Newall, G. (1970) Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 7, 185-220.
- Brett, C. E. (1995) Sequence stratigraphy, biostratigraphy, and taphonomy in shallow marine environments. *Palaios*, 10, 597-616.
- Brett, C. E. (1998) Sequence stratigraphy, paleoecology, and evolution; biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaios*, 13, 241-262.
- Brett, C. E. & Baird, G. C. (1986) Comparative taphonomy; a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, 1, 207-227.
- Brett, C. E. & Seilacher, A. (1991) Fossil-Lagerstätten: A taphonomic consequence of event sedimentation. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. 283-297, Springer, New York, Berlin, Heidelberg.
- Dent, S. R. & Uhen, M. D. (1993) Tidal reorientation and transport of recent bivalves on a temperate tidal flat, northwestern U.S. *Palaios*, 8, 244-249.
- Dionne, J. C. (1971) Vertical packing of flat stones. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 1585-1591.
- Dionne, J. C. & Laverdiere, C. (1967) Sur la mise en place en milieu littoral de cailloux plats poses sur la tranche. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 11, 262-285.
- Emery, K. O. (1968) Positions of empty pelecypod valves on the continental shelf. *Sediment Petrology*, 38, 1264-1269.
- Ensom, P. C. (1984) Vertical packing of oyster shells in the Cinder Bed of Worbarrow Tout. *Proceedings of the Dorset Natural History And Archaeological Society – Natural History Reports*, 105, 167-168.
- Fittschen, T. (1999) Nördliche Erweiterung des Containerterminals Wilhelm Kaisen Bremerhaven (CT III) – Wellenmessungen in der Weser vor Bremerhaven. Unveröffentlichter Abschlussbericht, Hamburg, 124 pp.
- Flessa, K. W. (2002) Conservation paleobiology. *American Paleontologists*, 10, 2-5.
- Frey, R. W. & Dörjes, J. (1988) Fair- and foul-weather shell accumulations on a Georgia Beach. *Palaios*, 3, 561-576.
- Frey, R. W., Hong, J.-S. & Hayes, W. B. (1988) Physical and biological aspects of shell accumulation on a modern macrotidal flat, Inchon, Korea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 22, 267-278.
- Fürsich, F. T. (1990) Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D. E. G. & Crowther, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 235-239. Blackwell Scientific, Oxford.

- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: Paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. *Palaios*, 2, 543-559.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (1999) Genesis and environmental significance of upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145, 119-139.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (2003) Sequence stratigraphic significance of sedimentary cycles and shell concentrations in the upper Jurassic lower Cretaceous of Kachchh, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 285-309.
- Futterer, E. (1974) Untersuchungen zum Einsteuerungsverhalten der Einzelklappen von *Cardium echinatum* L. und *Cardium edule* L. im Strömungskanal. *Neues Jahrbuch Geologische Paläontologische Monatshefte*, 8, 449-455.
- Futterer, E. (1975) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. *Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975*, 83-89.
- Futterer, E. (1976) Rezente Schille: Transport und Einregelung tierischer Hartteile im Strömungskanal. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil II, Paläontologie*, 5/6, 261-271.
- Futterer, E. (1977) Einreglung, Transport und Ablagerung biogener Hartteile im Strömungskanal. Unpublished Ph. D. Thesis, University of Tübingen, 133 pp.
- Futterer, E. (1978) Hydrodynamisches Verhalten biogener Hartteile. *Sonderforschungsbereich 53, Paläontologie, Bericht 1976-1978*, 25-33.
- Futterer, E. (1981) Untersuchungen zur Unterscheidung wellen- und strömungsbedingter Schille. *Sonderforschungsbereich 53, Bericht 1970-1975*, 131-137.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1966) Morphology and evolution of inshore shell ridges and mud-mounds on modern intertidal flats near Bradwell, Essex. *Proceedings of the Geologists Association Geological Society Publishing House*, 77, 329-346.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1968) Imbricate structure in Essex offshore shell banks. *Nature*, 220, 1115-1116.
- Greensmith, J. T. & Tucker, E. V. (1969) The origin of Holocene shell deposits in the chenier plain facies of Essex (Great Britain). *Marine Geology*, 7, 403-425.
- Grinnell, R., Jr. (1974) Vertical orientation of shells on some Florida oyster reefs. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 116-122.
- Hallman, D. P., Flessa, K. W., Kowalewski, M., Hertweck, G., Aggen, J. A. & Carlton, J. (1996) Ternary taphograms and the comparative taphonomy of recent mollusks from the North Sea and the Gulf of California. *Senckenbergiana Maritima*, 27, 67-75.
- Hanamgond, P. T. (2001) Coastal photo by P.T. Hanamgond. *Journal of Coastal Research*, 17, 140-142.
- Häntzschel, W. (1939) Schlick-Gerölle und Muschel-Klappen als Strömungs-Marken im Wattenmeer. *Natur und Volk*, 119, 412-417.
- Hecht, F. (1930) Ausgeworfene Muscheln (*Mya arenaria* L.) in Lebensstellung, zur Beurteilung eines Beweismittels in der Küstensenkungs-Frage. *Senckenbergiana*, 12, 261.
- Jessen, W. (1932) Über rezente und fossile Organismenpflaster. *Paläontologische Zeitung*, 14, 67.
- Jessen, W. (1933) Die postdiluviale Entwicklung Amrums und seine subfossilen und rezenten Muschelpflaster. *Jahrbuch preußische-geologische Landesanstalt*, 53, 1-69.



- Johnson, R. G. (1957) Experiments on the burial of shells. *Journal of Geology*, 65, 527-535.
- Kelling, G. & Williams, P. F. (1967) Flume studies of the reorientation of pebbles and shells. *Journal of Geology*, 75, 243-267.
- Kidwell, S. M. (1986) Models for fossil concentrations: Paleobiologic implications. *Palaeobiology*, 12, 6-24.
- Kidwell, S. M. (1991) The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the data locked in the fossil record*. Topics in Geobiology, 9, 211-290, Plenum Press, New York.
- Kostyaev, A. G. (1973) Some rare varieties of stone circles. *Biuletyn Peryglacjalny*, 22, 347-352.
- Kowalewski, M., Serrano, G. E. A., Flessa, K. W. & Goodfriend, G. A. (2000) Dead delta's former productivity: Two trillion shells at the mouth of the Colorado River. *Geology*, 28, 1059-1062.
- Kowalewski, M., Lasso, D. G. & Carroll, M. (2003) Quantitative fidelity of brachiopod-mollusk assemblages from modern subtidal environments of San Juan Islands, USA. *Journal of Taphonomy*, 1, 43-65.
- Lever, J., Kessler, A., Overbeeke, v. A. P. & Thijssen, R. (1961) Quantitative Beach Research: II. The "Hole Effect": A second mode of sorting of lambellibranch valves on sandy beaches. *Journal of Sea Research*, 1, 339-358.
- Lever, J., Van den Bosch, M., Cook, H., Van Dijk, T., Thiadenens, A. J. H. & Thijssen, R. (1964) Quantitative Beach Research: III. An experiment with artificial valves of *Donax vittatus*. *Netherlands Journal of Sea Research*, 2, 458-492.
- Lever, J. & Thijssen, R. (1968) Sorting phenomena during the transport of shell valves on sandy beaches studied with the use of artificial valves. *Symposium of the Zoological Society of London*, 22, 259-271.
- Lüders, K. (1929) Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebbitrictern der Außenjade. *Senckenbergiana*, 11, 123-142.
- McKittrick, M. A. (1987) Experiments on the settling of gastropods and bivalve shells: Biostratigraphic implications. In: Flessa, K. W. (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of recent to Pleistocene inter-tidal deposits Gulf of California*, 150-163, The Palaeontological Society, Tucson, Arizona.
- Menard, H. W. & Boucot, A. J. (1951) Experiments on the movement of shells by water. *American Journal of Science*, 249, 131-151.
- Mii, H. (1957) Peculiar accumulation of drifted shells. *Saito Ho-on Kai Museum Research Bulletin*, 26, 17-24.
- Mount, J. F. & Kidder, D. (1993) Combined flow origin of edgewise intraclast conglomerates: Sellick Hill Formation (Lower Cambrian), south Australia. *Sedimentology*, 40, 315-329.
- Müller, A. H. (1951) Grundlagen der Biostratonomie. *Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Klasse für Mathematik und allgemeine Naturwissenschaften Jahrgang 1950 Nr. 3*, Akademie Verlag, Berlin, 147 pp.
- Müller, A. H. (1992) *Lehrbuch der Paläozoologie. Band I: Allgemeine Grundlagen*. 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Fischer Verlag, Jena, 514 pp.
- Nagle, J. S. (1967) Wave and current orientation of shells. *Journal of Sedimentary Research*, 37, 1124-1138.

- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2002) Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Marine Geology*, 185, 435-469.
- Nielsen, P. (1992) Coastal bottom boundary layers and sediment transport (Advanced series on ocean engineering, Vol. 4). World Scientific Publishing Company, Queensland, 324 pp.
- Niemeyer, H. D. & Kaiser, R. (1998) Hydrodynamik als ökosystemarer Gestaltungsfaktor im Wattenmeer. *Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaften*, 20, 45-62.
- Reineck, H.-E. & Singh, I. B. (1980) *Depositional sedimentary environments*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 551 pp.
- Richter, R. (1922) Die Lage schüsselförmiger Körper bei der Einbettung. In *Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie*. III-VI. *Senckenbergiana*, 4, 105-137.
- Richter, R. (1942) Die Einkippungsregel. *Senckenbergiana*, 25, 181-206.
- Salazar-Jimenez, A., Frey, R. W. & Howard, J. D. (1982) Concavity orientations of bivalve shells in estuarine and nearshore shelf sediments, Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, 566-586.
- Sanderson, D. J. & Donovan, R. N. (1974) The vertical packing of shells and stones on some recent beaches. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 680-688.
- Schäfer, W. (1941) Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres – 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens – 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 457, 1-54.
- Schäfer, W. (1962) *Aktuo-Paläontologie nach Studien in der Nordsee*. Senckenberg-Buch, 41, Frankfurt a. M., 666 pp.
- Schwarzacher, W. (1963) Orientation of crinoids by current action. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33, 580-586.
- Seilacher, A. (1959) Fossilien als Strömungsanzeiger. *Aus der Heimat*, 67, 170-177.
- Seilacher, A. (1970) Begriff und Bedeutung der Fossil-Lagerstätten (Fossil-Lagerstätten No 1). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatsheft 1970*, 34-39.
- Seilacher, A. (1973) Biostratinomy: The sedimentology of biologically standardized particles. In: Ginsburg, R. N. (Ed.), *Evolving concepts in sedimentology*, 21, 159-177, John Hopkins University Press, Baltimore.
- Seilacher, A. & Meischner, D. (1965) Fazies-Analyse im Paläozoikum des Oslo-Gebiets. *Geologische Rundschau*, 54, 596-619.
- Short, A. D. (2000) *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 392 pp.
- Tietze, K. W. (1978) Zur Geometrie von Wellenrippeln in Sanden unterschiedlicher Korngröße. *International Journal of Earth Sciences*, 67, 1016-1033.
- Trewin, N. H. & Welsh, W. (1972) Transport breakage and sorting off the bivalve *Maetra corallina* from Aberdeen beach, Scotland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 12, 193-204.
- Trewin, N. H. & Welsh, W. (1976) Formation and composition of a graded estuarine shell bed. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 19, 219-230.

- Trusheim, F. (1931a) Versuche über Transport und Ablagerung von Mollusken. *Senckenbergiana*, 13, 124.
- Trusheim, F. (1931b) Spülsaum am Meeresstrand. *Natur und Museum*, 61, 112-119.
- Weigelt, J. (1927) Über Biostratonomie. *Der Geologe*, 42, 1069-1082.
- Wendt, J. (1995) Shell directions as a tool in palaeocurrent analysis. *Sedimentary Geology*, 95, 161-186.
- Wiedemann, H. U. (1972) Shell deposits and shell preservation in Quaternary and Tertiary estuarine sediments in Georgia. *Sedimentary Geology*, 7, 103-125.
- Wilson, P. (2002) Coastal photographs by Peter Wilson. *Journal of Coastal Research*, 18, 409-411.
- Wilson, P. & Edwards, E. J. (2004) Further examples of ventifacts and unusual patterned ground from the Falkland Islands. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 86, 107-115.



**Tafeln**  
**Kapitel 4**

**Tafel 4-1**

**Bild A:** Wellenkanal der Universität Marburg. Seitenansicht des Kanals mit Blickrichtung auf den Wellengenerator mit Wellenpaddel.

**Bild B:** Seitenansicht des Wellenkanals mit Blickrichtung auf das Ende der 20 m langen Anlage.

**Bild C:** Am Ende der Anlage sorgt ein Metallgestell aus Aluminiumwaben und Latexhaarmatten für eine weitgehende Absorption der Wellenenergie. An dieser Stelle wird das Wasser in einen Tank entleert.

**Bild D:** Seitenansicht des Wellenkanals mit Blickrichtung auf den Wellengenerator während einer Versuchsdurchführung.

**Bild E:** Innenansicht des Kanals mit Blickrichtung auf den künstlichen Strand vor der Befüllung mit Wasser.

**Bild F:** Innenansicht des Kanals mit Blickrichtung auf den Wellengenerator nach Befüllung mit Wasser.

Tafel 4-1



## Tafel 4-2

**Bild A:** *M. arenaria* Pflasteranordnung nach Versuchsdurchgang. Die Schalen lagern in konvexer Position auf der Sandoberfläche.

**Bild B:** Vollpflaster aus *M. arenaria* Einzelklappen in konvexer Position auf der Sandoberfläche nach Versuchsdurchgang.

**Bild C:** *M. arenaria* Klappen in konvexer Position übereinander gelagert. Diese Lagerung wird als Dachziegellagerung bezeichnet.

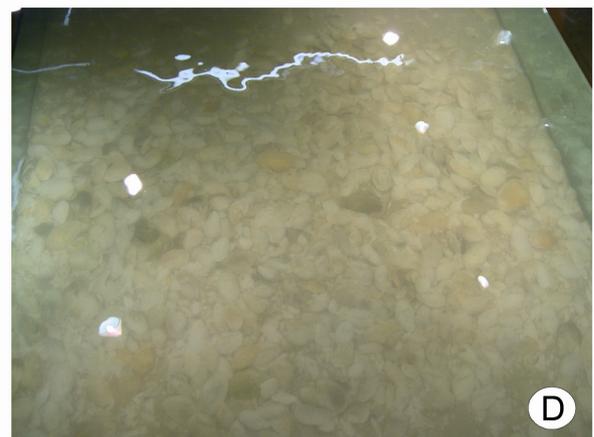
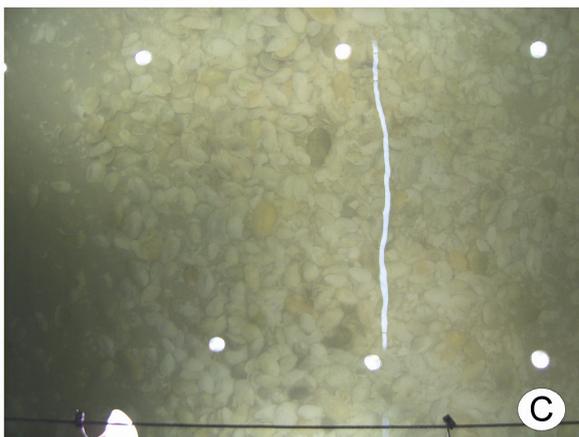
**Bild D:** *M. arenaria* Klappen in Dachziegellagerung nach Versuchsdurchgang.

**Bild E:** Anfängliche Rosettenstrukturen nach Versuchsdurchführung. Die Klappen lagern aneinander sind jedoch wirt angeordneten und bilden kleine Klappengröppchen. Es ist kein konkretes rosettenartiges Erscheinungsbild zu erkennen.

**Bild F:** Anfängliche Rosettenstrukturen nach Versuchsdurchführung. Kleine Klappengruppe ohne ein konkretes rosettenartiges Erscheinungsbild.



Tafel 4-2



### Tafel 4-3

**Bild A:** Rosettenstruktur mit oval bis rund ausgebildeten, nahe zu freistehenden *M. arenaria* Klappen. Die Klappen sind vertikal und horizontal, teilweise wirt angeordnet.

**Bild B:** Detailansicht der Rosettenstruktur. Die Klappen sind vertikal und horizontal, teilweise wirt angeordneten und ineinander geschachtelt.

**Bild C:** Rosettenstruktur nach Versuchsdurchführung.

**Bild D:** Rosettenstruktur nach Versuchsdurchführung.

**Bild E:** Rosettenstruktur mit oval bis rund ausgebildeten, nahe zu freistehenden *M. arenaria* Klappen. Die Klappen sind vertikal und horizontal sowie teilweise wirt angeordnet.

**Bild F:** Rosettenstruktur mit oval bis rund ausgebildeten, nahe zu freistehenden *M. arenaria* Klappen. Die Klappen sind vertikal und horizontal sowie teilweise wirt angeordnet.

Tafel 4-3



### Tafel 4-4

**Bild A:** Anfänglicher Hochkantschill während einer Versuchsdurchführung. Die Klappen beginnen sich hintereinander anzulagern. Der beginnende Prozess dieser gegenseitigen Abstützung einzelner Klappen wird in der vorliegenden Arbeit als anfänglicher Hochkantschill bezeichnet.

**Bild B:** Anfänglicher Hochkantschill nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen lagern überwiegend mit der Wölbung nach unten zeigend und sind mit Sediment verfüllt worden.

**Bild C:** Anfänglicher Hochkantschill nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen beginnen sich am hinteren Saum hintereinander bzw. aufeinander zu lagern.

**Bild D:** Anfänglicher Hochkantschill nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen beginnen sich am hinteren Saum hintereinander bzw. aufeinander zu lagern.

**Bild E:** Aufsicht auf anfängliche Hochkantschille nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen haben sich am hinteren Saum hintereinander bzw. aufeinander gelagert.

**Bild F:** Anfänglicher Hochkantschill nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen haben sich am hinteren Saum mittig hintereinander bzw. aufeinander gelagert.

Tafel 4-4



### Tafel 4-5

**Bild A:** Seitenansicht auf eine Hochkantschill-Anordnung nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen haben sich am hinteren Kantensaum des abschüssigen Sedimentwalls richtungsgerichtet mit ihrer langen Achse vertikale hintereinander eingeregelt (folglich auch fächerartige, vertikale Position). Die nahezu aufrecht stehenden Klappen weichen mit ihrer Längsachse zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  aus der horizontalen Lage ab. Die Schalenanordnungen bestehen aus ca. fünf bis zehn Einzelklappen. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven (hohlen) Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier aus rechter Richtung kommend).

**Bild B:** Aufsicht auf eine Hochkantschill-Anordnung nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen haben sich am hinteren Kantensaum des abschüssigen Sedimentwalls richtungsgerichtet mit ihrer langen Achse vertikale hintereinander eingeregelt und weichen mit ihrer Längsachse zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  aus der horizontalen Lage ab. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier aus linker Richtung kommend).

**Bild C:** Aufsicht auf eine Hochkantschill-Anordnung nach einer Versuchsdurchführung. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier von oben kommend).

**Bild D:** Aufsicht auf eine Hochkantschill-Anordnung nach einer Versuchsdurchführung. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier aus linker Richtung kommend).

**Bild E:** Hochkantschill-Anordnung nach einer Versuchsdurchführung. Die Klappen haben sich am hinteren Kantensaum des abschüssigen Sedimentwalls richtungsgerichtet mit ihrer langen Achse vertikale hintereinander eingeregelt und weichen mit ihrer Längsachse zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  aus der horizontalen Lage ab. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier aus rechter Richtung kommend).

**Bild F:** Detailansicht des Hochkantschills. Die Klappen haben sich am hinteren Kantensaum des abschüssigen Sedimentwalls richtungsgerichtet mit ihrer langen Achse vertikale hintereinander eingeregelt und weichen mit ihrer Längsachse zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  aus der horizontalen Lage ab. Die allgemeine Orientierungsrichtung der konkaven Klappenseiten zeigt dabei senkrecht in Richtung der allgemein auftreffenden Welle (hier aus rechter Richtung kommend).

Tafel 4-5







# **Tabellenanhang**

## **Kapitel 4**

Tab. 4-2b. Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,15 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
1	0,15	0,02	1,13	1,42	1,25	0,08	0,02
2	0,15	0,02	1,11	1,54	1,39	0,08	0,02
3	0,15	0,03	1,00	1,25	1,25	0,12	0,04
4	0,15	0,04	0,80	1,00	1,25	0,14	0,05
5	0,15	0,04	0,78	0,97	1,25	0,16	0,06
6	0,15	0,03	0,68	0,77	1,14	0,10	0,05
7	0,15	0,03	2,22	2,31	1,04	0,12	0,02
8	0,15	0,03	3,03	3,16	1,04	0,10	0,01
9	0,15	0,03	1,36	1,82	1,34	0,12	0,03
10	0,15	0,04	1,13	1,43	1,26	0,14	0,04
11	0,15	0,04	1,33	1,83	1,37	0,16	0,04
12	0,15	0,04	1,11	1,53	1,37	0,16	0,04
13	0,15	0,04	0,99	1,24	1,25	0,16	0,05
14	0,15	0,06	0,81	1,00	1,24	0,24	0,09
15	0,15	0,06	0,78	0,89	1,15	0,24	0,09
16	0,15	0,03	0,68	0,77	1,14	0,10	0,05
17	0,15	0,03	3,67	3,73	1,02	0,12	0,01
18	0,15	0,04	2,36	3,31	1,40	0,16	0,02
19	0,15	0,05	1,57	2,18	1,39	0,20	0,04
20	0,15	0,06	1,31	1,69	1,29	0,24	0,06
21	0,15	0,05	1,11	1,38	1,24	0,18	0,05
22	0,15	0,04	1,00	1,14	1,14	0,16	0,05
23	0,15	0,04	0,88	1,09	1,24	0,16	0,06
24	0,15	0,03	0,78	0,82	1,05	0,12	0,05
25	0,15	0,03	0,67	0,76	1,14	0,12	0,06
26	0,15	0,06	4,23	5,08	1,20	0,24	0,02
27	0,15	0,05	2,78	4,18	1,51	0,18	0,02
28	0,15	0,03	2,00	3,01	1,51	0,10	0,02
29	0,15	0,05	1,56	2,16	1,39	0,20	0,04
30	0,15	0,05	1,33	1,70	1,28	0,20	0,05
31	0,15	0,04	1,11	1,54	1,39	0,16	0,04
32	0,15	0,05	0,98	1,33	1,36	0,20	0,06
33	0,15	0,04	0,81	1,02	1,26	0,16	0,06
34	0,15	0,03	0,78	0,93	1,19	0,12	0,05
35	0,15	0,02	0,68	0,84	1,24	0,08	0,04
36	0,15	0,07	4,22	5,07	1,20	0,27	0,02
37	0,15	0,06	2,71	4,03	1,49	0,22	0,02
38	0,15	0,06	2,40	3,37	1,40	0,22	0,03
39	0,15	0,05	1,58	2,10	1,33	0,18	0,03
40	0,15	0,04	1,31	1,67	1,28	0,16	0,04
41	0,15	0,04	0,96	1,19	1,25	0,16	0,05
42	0,15	0,03	0,78	1,08	1,39	0,12	0,05
43	0,15	0,05	3,64	4,38	1,20	0,20	0,02
44	0,15	0,04	1,67	2,22	1,33	0,16	0,03
45	0,15	0,03	1,13	1,42	1,25	0,12	0,03
46	0,15	0,04	0,82	1,03	1,25	0,16	0,06
47	0,15	0,04	3,04	3,66	1,20	0,16	0,02
48	0,15	0,04	1,67	1,62	0,97	0,16	0,03
49	0,15	0,04	1,13	1,24	1,09	0,14	0,04
50	0,15	0,03	0,87	1,01	1,17	0,12	0,04
51	0,15	0,03	0,67	0,93	1,40	0,10	0,05
52	0,15	0,06	3,13	3,66	1,17	0,22	0,02
53	0,15	0,05	1,69	1,85	1,09	0,20	0,04
54	0,15	0,03	1,13	1,24	1,09	0,12	0,03
55	0,15	0,07	0,87	1,26	1,46	0,29	0,10
56	0,15	0,05	3,00	3,09	1,03	0,20	0,02
57	0,15	0,06	1,69	1,85	1,09	0,24	0,04
58	0,15	0,05	1,13	1,17	1,03	0,18	0,05
59	0,15	0,04	0,84	1,06	1,25	0,16	0,06
60	0,15	0,03	0,78	1,24	1,59	0,12	0,05
61	0,15	0,06	2,98	3,07	1,03	0,22	0,02
62	0,15	0,07	1,67	1,72	1,03	0,27	0,05

Fortsetzung Tab. 4-2b. Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,15 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
63	0,15	0,04	1,13	1,24	1,09	0,16	0,04
64	0,15	0,06	0,87	1,01	1,17	0,24	0,08
65	0,15	0,06	0,87	1,01	1,00	0,24	0,08

Tab. 4-3b. Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,20 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
100	0,20	0,10	5,02	6,95	1,38	0,34	0,02
103	0,20	0,02	4,99	6,98	1,40	0,07	0,00
104	0,20	0,04	2,99	4,18	1,40	0,12	0,01
105	0,20	0,04	2,11	2,94	1,40	0,14	0,02
106	0,20	0,07	1,65	2,19	1,33	0,24	0,04
107	0,20	0,06	1,36	2,00	1,47	0,21	0,04
108	0,20	0,07	1,14	1,38	1,21	0,24	0,06
109	0,20	0,10	1,00	1,17	1,16	0,35	0,09
110	0,20	0,10	0,84	1,00	1,19	0,35	0,11
111	0,20	0,04	0,77	1,01	1,31	0,14	0,05
112	0,20	0,04	5,00	5,53	1,10	0,12	0,01
113	0,20	0,07	2,89	3,43	1,19	0,24	0,02
114	0,20	0,09	2,13	2,71	1,27	0,31	0,04
115	0,20	0,11	1,67	2,25	1,35	0,38	0,06
116	0,20	0,06	1,35	1,65	1,22	0,21	0,04
117	0,20	0,05	1,13	1,47	1,29	0,17	0,04
118	0,20	0,08	0,98	1,05	1,07	0,28	0,08
119	0,20	0,05	5,11	7,15	1,40	0,16	0,01
120	0,20	0,10	2,99	3,92	1,31	0,33	0,03
121	0,20	0,13	2,14	2,87	1,34	0,45	0,06
122	0,20	0,09	1,65	1,88	1,14	0,31	0,05
123	0,20	0,09	5,34	7,48	1,40	0,31	0,02
124	0,20	0,10	3,06	4,10	1,34	0,35	0,03
125	0,20	0,07	2,15	2,44	1,13	0,24	0,03
126	0,20	0,07	1,66	1,96	1,18	0,24	0,04
127	0,20	0,13	5,13	7,19	1,40	0,45	0,02
128	0,20	0,11	2,90	3,66	1,26	0,38	0,04
129	0,20	0,09	2,46	3,18	1,29	0,31	0,03
130	0,20	0,10	1,66	2,03	1,22	0,33	0,05
131	0,20	0,06	1,36	1,45	1,06	0,21	0,04
132	0,20	0,07	1,15	1,28	1,12	0,24	0,06
133	0,20	0,14	5,17	7,24	1,40	0,49	0,03
134	0,20	0,10	2,93	3,78	1,29	0,35	0,03
135	0,20	0,09	2,18	2,57	1,18	0,30	0,04
136	0,20	0,12	1,68	2,03	1,21	0,42	0,07
137	0,20	0,08	1,39	1,54	1,11	0,28	0,05

## Tabellenanhang

**Tab. 4-4b.** Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,30 m

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
66	0,30	0,06	3,09	3,60	1,17	0,16	0,01
67	0,30	0,05	1,64	2,88	1,75	0,14	0,02
68	0,30	0,08	1,13	1,80	1,59	0,23	0,05
69	0,30	0,09	0,87	1,01	1,17	0,26	0,07
70	0,30	0,08	0,67	0,78	1,17	0,21	0,08
71	0,30	0,14	2,89	5,06	1,75	0,40	0,03
72	0,30	0,11	1,67	2,43	1,46	0,31	0,04
73	0,30	0,14	1,33	1,94	1,46	0,40	0,07
74	0,30	0,17	2,89	4,60	1,59	0,49	0,04
75	0,30	0,11	2,09	3,66	1,75	0,31	0,04
76	0,30	0,15	1,58	2,76	1,75	0,43	0,06
77	0,30	0,12	1,33	2,33	1,75	0,34	0,06
78	0,30	0,16	2,78	4,86	1,75	0,46	0,04
79	0,30	0,14	2,11	3,08	1,46	0,40	0,05
80	0,30	0,12	1,67	2,65	1,59	0,34	0,05
81	0,30	0,17	3,44	6,03	1,75	0,49	0,03
82	0,30	0,10	5,24	9,00	1,72	0,29	0,01
83	0,30	0,20	4,33	7,58	1,75	0,56	0,03
84	0,30	0,15	3,09	5,41	1,75	0,43	0,03
85	0,30	0,14	5,91	10,14	1,72	0,40	0,02
86	0,30	0,17	4,82	8,44	1,75	0,49	0,02
87	0,30	0,20	4,47	7,82	1,75	0,57	0,03
88	0,30	0,14	3,04	5,33	1,75	0,40	0,03
89	0,30	0,16	3,56	6,91	1,94	0,46	0,03
90	0,30	0,06	3,58	6,26	1,75	0,17	0,01
91	0,30	0,05	3,20	5,09	1,59	0,14	0,01
92	0,30	0,10	2,11	3,69	1,75	0,29	0,03
93	0,30	0,07	1,91	3,34	1,75	0,19	0,02
94	0,30	0,16	1,80	3,15	1,75	0,44	0,06
95	0,30	0,15	1,89	3,31	1,75	0,43	0,05
96	0,30	0,16	2,93	4,67	1,59	0,46	0,04
97	0,30	0,15	4,67	7,42	1,59	0,43	0,02
101	0,30	0,16	3,73	6,53	1,75	0,46	0,03

**Tab. 4-5b.** Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,40 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
140	0,40	0,05	2,11	3,23	1,53	0,12	0,01
141	0,40	0,06	1,66	2,92	1,76	0,15	0,02
142	0,40	0,08	1,35	2,16	1,60	0,20	0,03
143	0,40	0,09	1,14	1,71	1,50	0,22	0,04
144	0,40	0,11	0,98	1,40	1,43	0,27	0,06
145	0,40	0,08	0,86	1,10	1,27	0,20	0,05
146	0,40	0,09	0,78	0,93	1,19	0,22	0,06
147	0,40	0,06	0,69	0,78	1,13	0,15	0,05
148	0,40	0,06	4,93	6,51	1,32	0,15	0,01
149	0,40	0,09	2,93	6,82	2,33	0,22	0,02
150	0,40	0,10	2,12	3,52	1,66	0,25	0,03
151	0,40	0,12	1,68	2,54	1,52	0,30	0,04
152	0,40	0,19	1,34	2,49	1,86	0,47	0,08
153	0,40	0,09	1,14	1,71	1,49	0,22	0,04
154	0,40	0,07	0,98	1,40	1,42	0,17	0,04
155	0,40	0,12	0,85	1,08	1,27	0,30	0,08
156	0,40	0,10	5,12	7,77	1,52	0,25	0,01
157	0,40	0,17	3,02	5,55	1,84	0,42	0,03
158	0,40	0,18	2,17	3,87	1,78	0,45	0,05
159	0,40	0,21	1,71	3,21	1,88	0,52	0,07
160	0,40	0,15	1,37	2,10	1,53	0,37	0,06
161	0,40	0,10	1,15	1,65	1,43	0,25	0,05
162	0,40	0,08	1,01	1,37	1,36	0,20	0,04
163	0,40	0,10	0,86	1,15	1,33	0,25	0,06
164	0,40	0,15	4,48	7,59	1,69	0,37	0,02
165	0,40	0,17	3,15	4,70	1,49	0,42	0,03
166	0,40	0,15	2,17	4,50	2,08	0,37	0,04
167	0,40	0,16	1,73	3,11	1,80	0,40	0,05

Fortsetzung Tab. 4-5b. Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,40 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
168	0,40	0,15	1,39	1,97	1,42	0,37	0,06
169	0,40	0,12	1,17	1,75	1,49	0,30	0,06
170	0,40	0,10	1,00	1,56	1,56	0,25	0,05
171	0,40	0,18	5,20	8,65	1,66	0,45	0,02
172	0,40	0,17	3,41	6,83	2,01	0,42	0,03
173	0,40	0,20	2,20	3,92	1,78	0,49	0,05
174	0,40	0,14	1,73	3,15	1,82	0,35	0,04
175	0,40	0,12	1,40	1,91	1,36	0,30	0,05
176	0,40	0,08	1,17	1,70	1,45	0,20	0,04
177	0,40	0,13	5,65	8,81	1,56	0,32	0,01
178	0,40	0,25	3,62	4,86	1,34	0,62	0,04
179	0,40	0,00	6,36	9,25	1,45	0,01	0,00
180	0,40	0,01	3,38	5,36	1,59	0,01	0,00
181	0,40	0,04	2,39	3,84	1,61	0,10	0,01
182	0,40	0,03	1,77	3,14	1,78	0,07	0,01
183	0,40	0,04	1,43	2,43	1,71	0,10	0,02
184	0,40	0,05	1,18	1,83	1,54	0,12	0,02
185	0,40	0,05	1,03	1,57	1,52	0,12	0,03
186	0,40	0,06	0,90	1,14	1,27	0,15	0,04
187	0,40	0,05	0,80	1,02	1,27	0,11	0,03
189	0,40	0,03	3,47	5,88	1,69	0,07	0,00
190	0,40	0,09	2,37	4,18	1,76	0,22	0,02
191	0,40	0,10	1,81	3,24	1,79	0,25	0,03
192	0,40	0,13	1,42	2,28	1,61	0,32	0,05
193	0,40	0,16	1,19	1,76	1,48	0,40	0,07
194	0,40	0,10	1,03	1,45	1,41	0,25	0,05
195	0,40	0,10	0,92	1,24	1,34	0,25	0,06
196	0,40	0,03	6,38	9,30	1,46	0,06	0,00
197	0,40	0,07	3,38	5,95	1,76	0,16	0,01
198	0,40	0,14	2,35	4,28	1,82	0,35	0,03
199	0,40	0,22	1,81	3,25	1,80	0,54	0,07
200	0,40	0,16	1,44	2,13	1,47	0,40	0,06
201	0,40	0,08	1,20	1,65	1,37	0,20	0,04
202	0,40	0,07	5,97	9,80	1,64	0,17	0,01
203	0,40	0,12	3,52	5,78	1,64	0,30	0,02
204	0,40	0,16	2,38	3,96	1,66	0,40	0,04
205	0,40	0,20	1,82	3,48	1,91	0,49	0,06
206	0,40	0,11	1,44	2,22	1,54	0,27	0,04
207	0,40	0,09	1,21	1,75	1,45	0,22	0,04
208	0,40	0,07	6,27	10,83	1,73	0,17	0,01
209	0,40	0,21	3,68	7,55	2,05	0,52	0,03
210	0,40	0,16	2,38	4,28	1,80	0,40	0,04
211	0,40	0,14	1,81	3,23	1,78	0,33	0,04
212	0,40	0,12	1,47	2,11	1,44	0,30	0,04
214	0,40	0,24	3,98	7,52	1,89	0,59	0,03
215	0,40	0,11	2,46	4,92	2,00	0,27	0,02
216	0,40	0,12	1,88	3,34	1,78	0,30	0,04
217	0,40	0,25	2,63	5,10	1,94	0,62	0,05
218	0,40	0,17	2,45	4,55	1,86	0,42	0,04
219	0,40	0,18	2,31	4,59	1,98	0,45	0,04
220	0,40	0,19	2,18	4,37	2,01	0,47	0,05
221	0,40	0,15	2,05	4,25	2,08	0,37	0,04
222	0,40	0,12	1,98	3,45	1,75	0,30	0,03
223	0,40	0,19	1,89	3,40	1,80	0,47	0,06
224	0,40	0,16	1,80	3,17	1,76	0,40	0,05
225	0,40	0,13	1,69	3,04	1,80	0,32	0,04
226	0,40	0,17	3,49	6,16	1,76	0,42	0,03
227	0,40	0,15	3,37	6,07	1,80	0,37	0,02
228	0,40	0,25	2,61	4,89	1,88	0,62	0,05

# Tabellenanhang

**Fortsetzung Tab. 4-5b.** Versuchswerte bei einer Wassertiefe von 0,40 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
229	0,40	0,20	2,63	4,73	1,80	0,49	0,04
230	0,40	0,20	2,49	5,12	2,05	0,49	0,04
231	0,40	0,18	2,23	4,33	1,94	0,45	0,04
232	0,40	0,17	2,25	4,01	1,78	0,42	0,04
233	0,40	0,15	2,10	3,98	1,90	0,37	0,04
234	0,40	0,15	1,98	3,60	1,82	0,37	0,04

**Tab. 4-6a.** Versuchswerte mit Einregelungen/Einstellungen bei unterschiedlichen Wassertiefen.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)	Ergebnis des Versuches
75	0,30	0,11	2,09	3,66	1,75	0,31	0,04	Dachziegellagerung
76	0,30	0,15	1,58	2,76	1,75	0,43	0,06	Dachziegellagerung
158	0,40	0,18	2,17	3,87	1,78	0,45	0,05	Dachziegellagerung
165	0,40	0,17	3,15	4,70	1,49	0,42	0,03	Dachziegellagerung
171	0,40	0,18	5,20	8,65	1,66	0,45	0,02	Dachziegellagerung
172	0,40	0,17	3,41	6,83	2,01	0,42	0,03	Dachziegellagerung
177	0,40	0,13	5,65	8,81	1,56	0,32	0,01	Dachziegellagerung
199	0,40	0,22	1,81	3,25	1,80	0,54	0,07	Dachziegellagerung
200	0,40	0,16	1,44	2,13	1,47	0,40	0,06	Dachziegellagerung
204	0,40	0,16	2,38	3,96	1,66	0,40	0,04	Dachziegellagerung
220	0,40	0,19	2,18	4,37	2,01	0,47	0,05	Dachziegellagerung
72	0,30	0,11	1,67	2,43	1,46	0,31	0,04	anfängliche Rosetten
73	0,30	0,14	1,33	1,94	1,46	0,40	0,07	anfängliche Rosetten
108	0,20	0,07	1,14	1,38	1,21	0,24	0,06	anfängliche Rosetten
116	0,20	0,06	1,35	1,65	1,22	0,21	0,04	anfängliche Rosetten
122	0,20	0,09	1,65	1,88	1,14	0,31	0,05	anfängliche Rosetten
129	0,20	0,09	2,46	3,18	1,29	0,31	0,03	anfängliche Rosetten
136	0,20	0,12	1,68	2,03	1,21	0,42	0,07	anfängliche Rosetten
151	0,40	0,12	1,68	2,54	1,52	0,30	0,04	anfängliche Rosetten
152	0,40	0,19	1,34	2,49	1,86	0,47	0,08	anfängliche Rosetten
83	0,30	0,20	4,33	7,58	1,75	0,56	0,03	Rosetten
86	0,30	0,17	4,82	8,44	1,75	0,49	0,02	Rosetten
89	0,30	0,16	3,56	6,91	1,94	0,46	0,03	Rosetten
100	0,20	0,10	5,02	6,95	1,38	0,33	0,02	Rosetten
101	0,30	0,16	3,73	6,53	1,75	0,46	0,03	Rosetten
123	0,20	0,09	5,34	7,48	1,40	0,31	0,02	Rosetten
133	0,20	0,14	5,17	7,24	1,40	0,49	0,03	Rosetten
164	0,40	0,15	4,48	7,59	1,69	0,37	0,02	Rosetten
209	0,40	0,21	3,68	7,55	2,05	0,52	0,03	Rosetten
214	0,40	0,24	3,98	7,52	1,89	0,59	0,03	Rosetten
94	0,30	0,16	1,80	3,15	1,75	0,44	0,06	anfänglicher Hochkantschill
95	0,30	0,15	1,89	3,31	1,75	0,43	0,05	anfänglicher Hochkantschill
120	0,20	0,10	2,99	3,92	1,31	0,33	0,03	anfänglicher Hochkantschill
134	0,20	0,10	2,93	3,78	1,29	0,35	0,03	anfänglicher Hochkantschill
159	0,40	0,21	1,71	3,21	1,88	0,52	0,07	anfänglicher Hochkantschill
210	0,40	0,16	2,38	4,28	1,80	0,40	0,04	anfänglicher Hochkantschill
222	0,40	0,12	1,98	3,45	1,75	0,30	0,03	anfänglicher Hochkantschill
223	0,40	0,19	1,89	3,40	1,80	0,47	0,06	anfänglicher Hochkantschill
234	0,40	0,15	1,98	3,60	1,82	0,37	0,04	anfänglicher Hochkantschill
84	0,30	0,15	3,09	5,41	1,75	0,43	0,03	Hochkantschill
88	0,30	0,14	3,04	5,33	1,75	0,40	0,03	Hochkantschill
157	0,40	0,17	3,02	5,55	1,84	0,42	0,03	Hochkantschill
166	0,40	0,15	2,17	4,50	2,08	0,37	0,04	Hochkantschill
217	0,40	0,25	2,63	5,10	1,94	0,62	0,05	Hochkantschill
218	0,40	0,17	2,45	4,55	1,86	0,42	0,04	Hochkantschill
221	0,40	0,15	2,05	4,25	2,08	0,37	0,04	Hochkantschill
226	0,40	0,17	3,49	6,16	1,76	0,42	0,03	Hochkantschill
227	0,40	0,15	3,37	6,07	1,80	0,37	0,02	Hochkantschill
228	0,40	0,25	2,61	4,89	1,88	0,62	0,05	Hochkantschill
230	0,40	0,20	2,49	5,12	2,05	0,49	0,04	Hochkantschill
233	0,40	0,15	2,10	3,98	1,90	0,37	0,04	Hochkantschill

**Tab. 4-6b.** Durchschnittliche Versuchswerte der Strukturen bei unterschiedlichen Wassertiefen.

## Durchschnittswerte Dachziegellagerung

N = 11	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,17	2,82	4,82	1,72	0,42	0,04
Minimal	0,11	1,44	2,13	1,47	0,31	0,01
Maximal	0,22	5,65	8,81	2,01	0,54	0,07

## Durchschnittswerte anfängliche Rosetten

N = 9	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,11	1,59	2,17	1,37	0,33	0,05
Minimal	0,06	1,14	1,38	1,14	0,21	0,03
Maximal	0,19	2,46	3,18	1,86	0,47	0,08

## Durchschnittswerte Rosetten

N = 10	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,16	4,41	7,38	1,70	0,46	0,03
Minimal	0,09	3,56	6,53	1,38	0,31	0,02
Maximal	0,24	5,34	8,44	2,05	0,59	0,03

## Durchschnittswerte anfänglicher Hochkantschill

N = 9	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,15	2,17	3,57	1,68	0,40	0,05
Minimal	0,10	1,71	3,15	1,29	0,30	0,03
Maximal	0,21	2,99	4,28	1,88	0,52	0,07

## Durchschnittswerte Hochkantschill

N = 12	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
Durchschnitt	0,18	2,71	5,08	1,89	0,44	0,04
Minimal	0,14	2,05	3,98	1,75	0,37	0,02
Maximal	0,25	3,49	6,16	2,08	0,62	0,05

**Tab. 4-7b.** Versuchswerte bei Konzentrationsmessungen bei einer Wassertiefe von 0,40 m.

Versuch Nr.	Wasserhöhe $d$ (m)	Wellenhöhe $H$ (m)	Wellenperiode $T$ (s)	Wellenlänge $L$ (s)	Phasengeschwindigkeit $c$ (m/s)	Horizontale Partikelgeschwindigkeit $u$ (m/s)	Vertikale Partikelgeschwindigkeit $v$ (m/s)
1	0,40	0,23	2,56	4,86	1,90	0,57	0,05
2	0,40	0,24	2,56	4,91	1,92	0,59	0,05
3	0,40	0,22	2,57	5,09	1,98	0,54	0,05
4	0,40	0,21	2,57	4,98	1,94	0,52	0,04
5	0,40	0,22	2,56	5,14	2,01	0,54	0,05
6	0,40	0,23	2,58	5,35	2,08	0,57	0,05
7	0,40	0,21	2,56	4,81	1,88	0,52	0,05
8	0,40	0,23	2,56	4,80	1,88	0,57	0,05
9	0,40	0,22	2,56	5,20	2,03	0,54	0,05
10	0,40	0,24	2,58	4,79	1,86	0,59	0,05
11	0,40	0,22	2,56	5,02	1,96	0,54	0,05
12	0,40	0,24	2,56	5,39	2,10	0,59	0,05
13	0,40	0,23	2,56	5,31	2,08	0,57	0,05
14	0,40	0,23	2,55	5,30	2,08	0,57	0,05
15	0,40	0,22	2,22	4,91	2,21	0,54	0,05
16	0,40	0,23	2,56	5,51	2,15	0,57	0,05
17	0,40	0,23	2,57	5,39	2,10	0,57	0,05
18	0,40	0,23	2,57	5,53	2,15	0,57	0,05
19	0,40	0,23	2,56	5,32	2,08	0,57	0,05
20	0,40	0,23	2,56	5,38	2,10	0,57	0,05
21	0,40	0,23	2,56	5,19	2,03	0,57	0,05
22	0,40	0,22	2,58	4,95	1,92	0,54	0,05
23	0,40	0,22	2,55	5,23	2,05	0,54	0,05
24	0,40	0,22	2,56	5,26	2,05	0,54	0,05
25	0,40	0,24	2,56	4,86	1,90	0,59	0,05
26	0,40	0,22	2,57	5,28	2,05	0,54	0,05
27	0,40	0,23	2,57	5,62	2,18	0,57	0,05
28	0,40	0,24	2,57	4,99	1,94	0,59	0,05
29	0,40	0,23	2,56	5,19	2,03	0,57	0,05
30	0,40	0,23	2,56	4,96	1,94	0,57	0,05
31	0,40	0,24	2,55	5,24	2,05	0,59	0,05
32	0,40	0,23	2,55	4,89	1,92	0,57	0,05
33	0,40	0,23	2,57	5,53	2,15	0,57	0,05





## **KAPITEL 5**

**Zeitliche und räumliche Entwicklung von *Mya arenaria*  
dominierenden Schilf-Akkumulationen im Wattenmeer**

**Eine thematische Verknüpfung mittels Luftbildkartierung und  
Wellenparametern**

## Kurzfassung

Im 5. Kapitel der vorliegenden Dissertation wird die zeitliche Entwicklung und Veränderung von Schill-Flächen im eulitoralischen Gezeitenbereich zwischen Jadebucht und Außenelbe untersucht.

Ziel dieser Untersuchung ist es Informationen über die Entwicklung und Veränderung von *M. arenaria* dominierenden Schillakkumulationen in Raum und Zeit zu erhalten.

Des Weiteren soll geprüft werden, ob und in welchem Umfang die Schill-Bedeckung mit den hydrodynamischen Prozessen im Arbeitsgebiet einhergehen. Es soll die Frage geklärt werden, ob die Schill-Vorkommen im Arbeitsgebiet als eventueller Indikator zur Rekonstruktion von hydrodynamischen Aktivitäten genutzt werden können.

Um diese Fragen zu klären wurden systematische Kartierungen auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996 bis 2005 durch analoge Luftbilddauswertungen erfasst und begleitend durch Geländeuntersuchungen verifiziert.

Um einen Zusammenhang zwischen Schill-Bedeckung und den hydrodynamischen Aktivitäten im Arbeitsgebiet herzustellen, wurde eine thematische Verknüpfung von Luftbildkartierung und Wellenparametern durchgeführt. Es galt nachzuweisen, ob Schwankungen bezüglich der Schill-Bedeckung eine zufällige Erscheinung sind oder im Zusammenhang mit den hydrodynamischen Wellenaktivitäten stehen. Im Zuge dieser Auswertung standen Daten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung. Folgende Wellenparameter wurden hierbei ausgewertet und statistisch analysiert: Signifikante Wellenhöhe und -Länge, Wellenperiode sowie das Energiemaximum einer Welle.

Mit Hilfe der Luftbildkartierungen gelang es das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung im südöstlichen Gezeitenbereich der inneren Deutschen Bucht hochauflösend zu erfassen. Aufgrund von älteren Luftbildserien gelang es zudem auch frühere Zustände der Bedeckungsmuster der Schill-Flächen aufzuzeigen.

Es wurde festgestellt, dass in einem Zeitraum von zehn Jahren sich die Bedeckung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Flächen insgesamt um 71,6 % zugenommen hat. Innerhalb dieser relativ stetigen Bedeckungszunahme wurde im Jahr 2003 eine geringere Flächenbedeckung festgestellt. Sowohl die Gesamtzunahme als auch der Rückgang der Bedeckung wurden nicht nur für das gesamte Arbeitsgebiet, sondern auch für regionale und lokale Gebiete nachgewiesen. Die Untersuchungen zeigen weiter, dass *M. arenaria* Akkumulationen im Arbeitsgebiet nur in Gezeitenbereichen auftreten, in denen der Tidenhub höher als 3,2 m beträgt.

Eine gegenläufige Entwicklung zu der Bedeckungszunahme wurde im Bezug auf die Schill-Flächenanzahl festgestellt. Die Kartierungen zeigen, dass aufgrund der Schill-Expansion die Flächenanzahl durch Anlagerungsprozesse abnimmt.

Nach Auswertung der Kartierungen und der Wellendaten konnte nachgewiesen werden, dass das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung und dessen Veränderung in Raum und Zeit nicht als zufälliges Ereignis zu deuten ist, sondern im engen Zusammenhang mit den hydrodynamischen Aktivitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes steht.

Die Untersuchung zeigt auch, dass die Schill-Bedeckung innerhalb des Arbeitsgebietes ohne entsprechende Geländeüberprüfung jedoch nur bedingt als natürlicher Indikator, sowohl lokal als auch regional für die Rekonstruktion von ehemaligen hydrodynamischen Intensitäten herangezogen werden kann.

## Einleitung

Das Wattenmeer ist aufgrund seiner großen Ausdehnung, Unwegsamkeit und des Gezeitenwechsels ein relativ schwer zugängliches Untersuchungsgebiet. Um dynamische Gleichgewichtszustände und Veränderungen des Wattreliefs zu erfassen, reichen Gelände Untersuchungen mittels klassischer Kartierungen allein oftmals nicht aus, da bei dieser konventionellen Methode immer nur Teilgebiete erfasst werden können. Vor allem ältere Arbeiten stützen sich ausschließlich auf die Ergebnisse von *in situ* Geländeuntersuchungen. Für die niedersächsische Küste sind hier u. a. die Arbeiten von Linke (1939), Müller (1957, 1958, 1962-1964, 1966), Dörjes et al. (1969), Ragutzki (1983, 1984), Göhren (1975), Reineck et al. (1986), Flemming (1992), Flemming & Davis (1994), Flemming & Ziegler (1995) sowie Nyandwi & Flemming (1995) zu erwähnen. Besonders flächendeckende Geländeuntersuchungen sind dabei sehr aufwendig, da eine Bearbeitung nur im jährlichen Turnus partiell stattfinden kann und ein hoher personeller Einsatz hierzu erforderlich ist.

Für die Erfassung von Zustandsgrößen wie der Sedimentbeschaffenheit, der Lage von Prielen, Sandbänken und Lebensräumen wie beispielweise Miesmuschelflächen, Algenvorkommen und Biotypen werden seit langen Fernerkundungsverfahren vom Flugzeugen oder Satelliten eingesetzt. Vor allem das Luftbild ist hierbei ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Kartierung von Wattflächen und deren Veränderungen im Niedersächsischen Wattenmeer geworden (auch Wieczorek 1982; Millat 1996a).

Besonders für eine kontinuierliche Umweltbeobachtung speziell für den Naturraum Wattenmeer kommen Fernerkundungen mittels Luftbildinterpretation zum Einsatz (z. B. Millat 1996b). Gerade die naturräumlichen Rahmenbedingungen innerhalb des Wattenmeeres unterliegen einer sehr hohen Dynamik und Variabilität. Infolgedessen können sich die morphologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Zustände und dadurch die Bedingungen für die Lebensgemeinschaften in recht kurzen Zeiträumen drastisch verändern (Millat 1996a; Meyer & Ragutzki 1999). Flächendeckende Fernerkundungsdaten wie Luft- und Satellitenbilder stellen eine wertvolle Informationsquelle dar. Sie erlauben es, zeitintensive Feldarbeiten deutlich zu rationalisieren. Verschiedenste Daten und Informationen, die sonst im Gelände erhoben werden müssten, können mittels Luftaufnahmen effizient gewonnen werden.

Eine grundlegende Arbeit zur Fernerkundung mit einer Anleitung zur Luft- und Satellitenbild-Interpretation gibt beispielsweise Albertz (1991). Entsprechende physikalische Grundlagen erörtern Kraus & Schneider (1988). Die Methode der Bearbeitung dieser Daten wird von Markwitz & Winter (1989) ausführlich beschrieben. Arbeiten die sich mit der Fernerkundung im Küstenbereich beschäftigen reichen von der allgemeinen Einsetzbarkeit der verfügbaren Fernerkundungsdaten (z. B. Matteoda & Klemas 1989; Brockmann 1993) bis hin zu speziellen Kartierungen (z. B. Gross et al. 1987; Klemas et al. 1993). Diese Arbeiten beziehen sich jedoch ausschließlich auf terrestrische Bereiche oder Übergänge von marinen zu terrestrischen Gebieten. Untersuchungen hinsichtlich aquatischer Bereiche geben beispielweise Wen-Yao & Klemas (1988).

Methodische Untersuchungen zur Interpretation von Luftbildern aus dem Raum der deutschen Nordseeküste führten Gierloff-Emden (1961) und König (1972) durch. Die Autoren Abrahamse (1984) und Buchwald (1990) geben einen Überblick über die Gliederung und Belastung des Naturraums Wattenmeer. Arbeiten speziell über den Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer stammen u. a. von Helbing (1987, 1988, 1991).

Luftbildanalysen zur Bestimmung von Sedimenttransport im Wattgebiet zwischen Neuwerk und Cuxhaven wurden von Newton & Werner (1969) durchgeführt. Biologische- und sedimentologische Untersuchungen des Wurster Wattes (im Dorumer Wattgebiet) mittels Luftbildinterpretation erörtert Michaelis (1968). Seltener sind dagegen Auswertungen von morphologischen Einzelformen wie beispielweise die Ausrichtung von Großrippelfelder (z. B. Van Straaten 1953). Untersuchungen zur Verbreitung von Muschelschill-Flächen im Niedersächsischen Wattenmeer wurden in der zugänglichen Literatur bislang noch nicht erwähnt.

Eine Erfassung und Validierung von Luftbildinformationen und ihre Weiterverarbeitung mit dem geographischen Informationssystem gibt Millat (1996b). Einen Überblick über methodische Verfahren für den operationellen Einsatz von Fernerkundungsdaten im Wattenmeer gibt ebenfalls Millat (1998) an.

Muschelansammlungen können durch eine Vielfalt von Prozessen konzentriert werden (Brett & Baird 1986; Fürsich 1990; Brett & Seilacher 1991). Vielmals spielen dabei hydrodynamische und die daraus oftmals resultierenden biostratinomischen Prozesse eine große Rolle. Bereits Schäfer (1941) wies auf die Prägung des Wattenmeeres durch hydrodynamische Prozesse hin.

Eine Systematisierung zwischen hydro- und morphodynamischen Zusammenhängen insbesondere hinsichtlich der Wirkung von Seegang auf das Wattenmeer untersuchte Niemeyer (1983, 1984, 1987a, b) sowie Niemeyer & Kaiser (1998). In den letzten Jahrzehnten gelang es dabei, die Wechselwirkung von Seegang mit Wattmorphologie und Sedimenten auf der Grundlage von Naturmessungen (z. B. Niemeyer et al. 1996) und ergänzende mathematische Modellierungen (z. B. Niemeyer et al. 1995) für verschiedene Gebiete nachzuweisen. Demnach werden die Wattgebiete überwiegend durch seegangsbedingte Orbitalbewegungen morphologisch geprägt. Die aus der offenen See einschwingenden Wellen erfahren durch ihre Wechselwirkung mit den morphologischen Formationen eine zunehmende Dämpfung, die auch zu veränderten Orbitalstromfeldern führt (Niemeyer 1987a). Die Höhenlage der Wattflächen wird demnach im Wesentlichen durch den örtlichen Seegang bestimmt (Niemeyer et al. 1995, 1996). Auch Ragutzki (1983) und Michaelis (1987) weisen im Zusammenhang der von ihnen vorgenommenen Sediment- und Biotopkartierungen auf den kausalen Zusammenhang mit dem Seegangsgeschehen hin. Auch aus biologischer Sicht haben einige Autoren wie beispielweise Rhode (1986) und Dörjes et al. (1969) die hydrodynamische Wirkung auf die Wattfauna untersucht. Aufbauend auf diese Erkenntnisse sind Untersuchungen zur Hydrodynamik ein wesentlicher Bestandteil der Ökosystemforschung in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts geworden (z. B. Kaiser 1992; Niemeyer & Kaiser 1994, 1997). Ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen war es, deutlich zu machen mit welcher Intensität hydrodynamische Randbedingungen bei

ökologischen Untersuchungen zu berücksichtigen sind (Niemeyer & Kaiser 1998). Auch in neueren Arbeiten wurden morphodynamische Prozesse wie beispielweise Migrationseignisse von rezenten Schalenakkumulationen an der Westküste Frankreichs untersucht (z. B. Bonnot-Courtois et al. 2004).

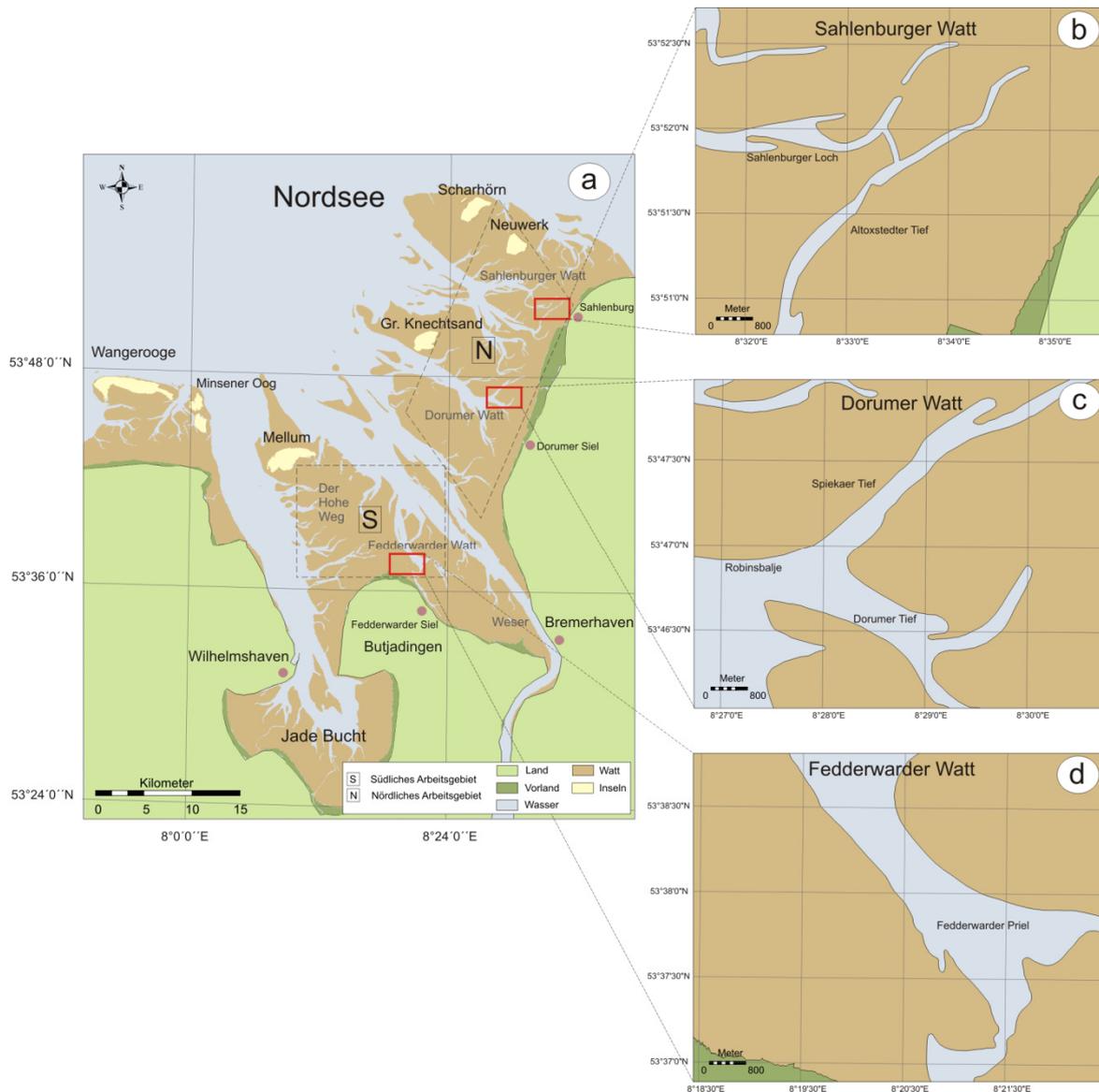
Muschelschill-Anreicherungen waren in der Vergangenheit bereits häufig Gegenstand von Forschungsarbeiten. Sowohl in karbonatischen als auch in silikatischen Gesteinsabfolgen können Schalenansammlungen detaillierte Auskunft über ökologische Zustände, sedimentäre Um- und Ablagerungsprozesse sowie über physikalische-hydrodynamische Parameter geben (Kidwell 1986, 1991; Brett 1995, 1998; Fürsich & Pandey 1999, 2003). Um fossile Lagerstätten besser interpretieren zu können sind Kenntnisse über rezente Ablagerungsprozesse sowie Entstehungsbedingungen von modernen Schalenkonzentrationen unabdingbar. Sind die Rahmenbedingungen wie beispielsweise Wassertiefe, Tidenhöhe, Strömungsrichtungen sowie allgemeine Wellenparameter bekannt, können diese Erkenntnisse teilweise auch auf fossile Ablagerungen projiziert werden. Einige Forschungsbeispiele zeigen, dass rezente Schalenansammlungen sehr gut als aktualistischer Vergleich in der Interpretation von fossilen Schalenkonzentrationen genutzt werden können (z. B. Fürsich & Flessa 1987; Flessa 1987, 2002; Hallman et al. 1996; Neal et al. 2002; Kowalewski et al. 2000, 2003).

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es Informationen über die Entwicklung und Veränderung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Vorkommen in Raum und Zeit zu erhalten. Des Weiteren soll geprüft werden, ob und in welchem Umfang die Schill-Bedeckung mit den hydrodynamischen Prozessen im Arbeitsgebiet einhergehen. Zudem soll die Frage beantwortet werden, ob Schill-Vorkommen im Arbeitsgebiet als eventueller Indikator zur Rekonstruktion von hydrodynamischen Aktivitäten genutzt werden können. Um diese Fragen zu klären werden systematische Kartierungen auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996 bis 2005 mit Hilfe einer analoge Luftbildauswertung erfasst und begleitend durch Geländeuntersuchungen verifiziert. Um einen Zusammenhang zwischen Schill-Bedeckung und den hydrodynamischen Prozessen herzustellen wird eine thematische Verknüpfung von Luftbildkartierung- und Wellenparametern durchgeführt. Im Zuge dieser Auswertung stehen Wellenmessdaten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung.

## Arbeitsgebiet

Die Gesamtfläche des Wattenmeeres in der südlichen Nordsee beträgt ca. 8.000 km<sup>2</sup>, wovon etwa die Hälfte dem Tidewechsel unterliegt. Der niedersächsische Teil des Wattenmeeres hat eine Flächenausdehnung von ca. 2.400 km<sup>2</sup> (Helbig 1991). Die gesamte eulitorale Wattfläche beträgt in etwa 1.350 km<sup>2</sup> (mündl. Mitt. Dr. Gerald Millat 2008).

Das Untersuchungsgebiet liegt in der südöstlichen Nordsee und entspricht der Ausdehnung der Wattflächen zwischen der Jadebucht im Südwesten und der Elbmündung im Nordosten. Seewärts folgt die Grenze in etwa dem Verlauf der mittleren Tideniedrigwasser-Linie, sofern nicht Sandbankinseln eine natürliche Begrenzung darstellen. Damit umfasst das Arbeitsgebiet mit etwa 590 km<sup>2</sup> den gesamten eulitoralen Bereich des niedersächsischen Wattenmeeres zwischen den Inseln Mellum (inkl. Hohe Weg) und Neuwerk (Abb. 5-1a). Ein ausführlicher Überblick über das Arbeitsgebiet wird in Kapitel 1 gegeben.



**Abb. 5-1.** a) Kartiergebiet im Gezeitenbereich der südöstlichen Deutschen Bucht. Gestrichelte Rechtecke markieren die regionalen Kartiergebiete Nord und Süd. Rote Rechtecke grenzen die lokalen Kartiergebiete ein. b) Sahlenburger Watt. c) Dorumer Watt. d) Fedderwarder Watt.

## Material und Methoden

### Fernerkundung

Unter Fernerkundung ist die Ermittlung von Informationen über entfernte Objekte zu verstehen, ohne mit ihnen in direkten Kontakt zu kommen (Konecny & Lehmann 1984). Um die zeitliche und räumliche Entwicklung von Schill-Flächen im Untersuchungsgebiet zu erfassen wurde in der vorliegenden Arbeit Luftbildkartierungen sowie Geländeerhebungen durchgeführt. Die Flächenerfassung mit Luftbildern ist nach Millat (1996a) derzeit die effizienteste Methode um Muschelbänke sowie Schill-Flächen zu erfassen. Eine Auswertung dieser Luftbilder ist nach bisherigen Erkenntnissen daher nur über das analoge stereoskopische Auswerteverfahren zu erreichen (mündl. Mitt. Dr. Gerald Millat 2005).

### Auswerteverfahren

Unter der analogen Bildauswertung ist die rein visuelle Interpretation der Luftbilder zu verstehen, bei der die Ergebnisse am Stereoskop per Hand vom Luftbild auf eine Folie übertragen werden. Ein Stereoskop ist eine Apparatur mit der es möglich ist, zwei stereoskopische Halbbilder so zu betrachten, dass eine räumliche Tiefenwirkung wahrnehmbar ist. Mittels Spiegeln oder Linsen werden die zwei ortsverschiedenen Halbbilder so ins Blickfeld gebracht, dass bei binokularer Betrachtung ein virtuelles Raumbild entsteht. Die Luftbild-Auswertungen erfolgten an einem Aviopreten APT-2 der Firma Leica (Tafel 5-1 A).

Schill-Flächen heben sich im Luftbild unter dem Stereoskop durch ihre Helligkeit, Form, Größe, Textur und Struktur von anderen Objekten im Watt ab (Tafel 5-1 D bis F). Ebene Schill-Pflaster, die im Gelände kein Relief zeigen, können ebenfalls periodisch auftreten. Sie erscheinen im Luftbild als helle Streifen und Flächen.

Durch Auflage von Kopierfolien auf das entsprechende Luftbild wurden die kartierten Flächen analog mittels Foliestift übertragen (Tafel 5-1 B). Die so erstellte Schill-Verteilungskarte wurde anschließend für die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) digitalisiert (Tafel 5-1 C). Zu diesem Zweck wurden die Folien eingescannt und anschließend konvertiert sowie in das GIS-Programm importiert und georeferenziert. Bei der Georeferenzierung wurden die Koordinaten ortsfester Punkte, die im Luftbild und auf der Folie zugeordnet wurden, am Bildschirm mit GIS orientiert und georeferenziert. Durch anschließendes Übertragen der Kartier-Ergebnisse am Bildschirm wurden die Schill-Flächen in das GIS-Programm integriert. Werden mittels dieser Methode mehrere Jahrgänge mit diesen Arbeitsschritten in das GIS-Programm übertragen, kann daraus die jährliche Verteilung sowie Veränderung der Schill-Flächen in Raum und Zeit erfasst werden.

Diese Methode ermöglicht eine große flächendeckende Bestandserfassung der einzelnen Schill-Vorkommen. Die Genauigkeit solcher Karten wird aber in erheblichen Maße durch die

persönliche Erfahrung und die Kenntnisse der örtlichen Gegebenheiten sowie Rückschlüsse aus Geländebeobachtungen bestimmt.

### Verifizierung im Gelände

Durch die Luftbildkartierung wurde zwar der Aufwand für Geländeuntersuchungen erheblich reduziert, sie kann diese aber keineswegs vollständig ersetzen, da bei der analogen Luftbildauswertung die Interpretation im Gelände bestätigt werden müssen, um die Genauigkeit der Kartierungen zu überprüfen. Eine Verifikation der Luftbildkartierung wurde durch *in situ* Untersuchungen im Jahr 2005 und 2006 begleitet. Die schiffs- und bootsgestützten Geländeeinsätze erfolgten insbesondere in den Sommermonaten.

Für die Orientierung im Gelände stand das Global Positioning System (GPS) „GPS 72“ der Firma GARMIN zur Verfügung, was das Auffinden der kartierten Schill-Flächen im Watt ermöglichte. Die Lagegenauigkeit des satellitengestützten Navigationsgerätes liegt nach Herstellerangaben je nach Witterung und Anzahl der empfangenen Satelliten zwischen 3 und 15 m. Die im Gelände genommenen Koordinaten wurden als Ergänzung mit den GIS-Kartierungen abgeglichen. Bedingt durch den täglichen Tidenzyklus fallen die untersuchten Schill-Vorkommen bei entsprechendem Niedrigwasser zweimal am Tag frei und ermöglicht eine relativ kurzzeitige Untersuchungsmöglichkeit. Bei Hochwasserstand werden die Schill-Vorkommen, je nach Abweichungen von einer ca. 2 bis 3 m hohen Wassersäule überdeckt.

### Datengrundlage

Voraussetzung für eine stereoskopische Auswertung sind Bildpaare, d. h. dass bei der Befliegung Luftbilder erstellt werden müssen, die eine Längsüberdeckung von 60 % und eine Querüberdeckung von ca. 30 % aufweisen (Millat 1996a).

Zu der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Datengrundlage zählen Luftbildserien im Maßstab 1:15.000. Die Befliegungen wurden von der Niedersächsischen Nationalparkverwaltung (NNVP) in Auftrag gegeben und wurden für die Bearbeitung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt. Durch die Zusammenarbeit mit der NNVP standen Luftbildserien des Untersuchungsgebietes aus einem Zeitraum von 1996 bis 2005 zur Verfügung. Im Jahr 1998 wurde keine Befliegung durchgeführt, so dass keine Luftbildserie aus diesem Jahrgang für Kartierungen zur Verfügung stand.

Die Luftbilder wurden von der Weser Bildmessflug GmbH, Bremerhaven durchgeführt. Die Befliegungen fanden gewöhnlich ab dem Frühjahr statt und reichten bis in den Spätsommer eines jeden Jahres.

Die Befliegungen fanden dazu bei MTNW (ca.  $\pm$  eine Stunde vor bis nach örtlichem MTNW) statt. Für die Durchführung eines Gesamtbildfluges mit einem Flugzeug werden ca. drei bis vier MTNW-Phasen benötigt (Millat 1996a). Um eine möglichst synchrone Bestandserfassung gewährleisten zu können, lagen die Bildflugtage meist dicht beieinander.



Bei dem Bildmaterial handelt es sich vorwiegend um panchromatische Schwarz-Weißbilder. Zwei der Luftbildserien standen als farbige Aufnahmen zur Verfügung (s. auch Tab. 5-1). Die Luftbilder werden zentralperspektivisch aufgenommen, so dass der Bildmittelpunkt weitgehend verzerrungsfrei ist. Aufgrund des flachen Geländes im Wattenmeer spielt die Verzerrung keine so ausschlaggebende Rolle wie beispielweise im Hochgebirge. Trotzdem können bei GIS-Bearbeitungen, die kleiner als im cm-Auflösungsbereich sind, Abweichungen bei Verschneidungen auftreten (Millat 1996a). Um diesen Fall auszuschließen, wurden die Bilddaten von der NNPV entzerrt. Weitere und detaillierte Ausführungen zum Verfahren der Entzerrung können bei Eastman (1992) nachgelesen werden.

**Tab. 5-1.** Verwendete Luftbildserien im Maßstab 1:15.000.

Befliegungsjahr	Schwarz-Weiß	Farbe
1996		x
1997		x
1998	keine Luftbilder	keine Luftbilder
1999	x	
2000	x	
2001	x	
2002	x	
2003	x	
2004	x	
2005	x	

Das Arbeitsgebiet wurde zur besseren Übersicht in zwei Untersuchungsregionen (Nord- und Südregion) unterteilt (Abb. 5-1a). In Abbildung 5-1b bis c sind zudem die drei lokal ausgewählten Wattgebiete dargestellt.

### Wellenmessdaten

Die Messdaten wurden in digitaler Form vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) im Rahmen der vorliegenden Dissertation zur Verfügung gestellt.

Der gelieferte Datensatz umfasst Messungen über einen Zeitraum von Januar 1996 bis Dezember 2005 und umfasst insgesamt 60.039 Messreihen. Die hier verwendeten Daten stammen von der Boje „UFS-Elbe“ (Abb. 5-2). Die vom BSH eingesetzten Messgeräte sind speziell verankerte, Wellen folgende Bojen. Die Seegangsboje misst etwa eine halbe Stunde die Wellenparameter, speichert die Auslenkung und ermittelt anschließend ein Seegangsspektrum. Dies ist notwendig um die Messdaten für die Funkübertragung zu reduzieren. Aus dem übermittelten Datenspektrum wurden vom BSH die Seegangsparameter errechnet. Die Datensätze umfassen folgende Parameter: Signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , Wellenlänge  $L$ , Wellenperiode  $T$  sowie die maximale Wellenenergie  $E_{max}$ . Die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  entspricht dem Mittelwert des Drittels der höchsten Wellen. Zu der mittleren bzw. signifikanten Wellenhöhe gehören demzufolge mittlere Wellenperiode, Wellenlänge und ein mittleres Energiemaximum. Es handelt sich also bei allen Daten um bereits gemittelte Messwerte (schriftl. Erläuterung Herr Berger 2007, BSH Hamburg).

Aufgrund von Übertragungsfehlern und Wartungsarbeiten weisen die Seegangsmessungen gelegentlich Datenlücken auf.



**Abb. 5-2.** Standort der Boje „UFS-Elbe“ in der Nordsee. Die Sonde ist in einer Wassertiefe von 25 m verankert. (Position: 54°00'00"N, 8°06'50"E).

### Statistische Auswerteverfahren

Aufgrund der Reduzierung der Messdaten vom BSH wird von einer Normalverteilung der Rohdaten ausgegangen.

Signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsjahren wurden mittels Mittelwertvergleiche (One-Way ANOVA) und anschließenden Post-Hoc-Tests durchgeführt (nach Scheffé).

Da die Befliegungen für die hier verwendeten Luftbilder immer zwischen Frühjahr und Spätsommer stattfanden, erfolgte an den Wellendaten neben einer jährlichen Auswertung auch eine halbjährliche Analyse. Hierzu wurden jeweils die Zeiträume März bis August sowie September bis Februar getrennt von einander für jedes Untersuchungsjahr statistisch betrachtet.

Die jeweilige Stärke der Beziehung (Abhängigkeit) zwischen den gekoppelten Wellenparameter wurde mittels bivariater Korrelation nach Pearson bestimmt. Hierbei erfolgte ebenfalls eine getrennte jahreszeitliche Analyse. Die Auswertungen erfolgte per Computer mit den Programmen Excel 2007 (Microsoft), PRIMER 5 (Plymouth Marine Laboratory), SPSS 11 (SPSS Inc., Chicago, USA) und SigmaPlot 9 (SysStat Software Inc.).

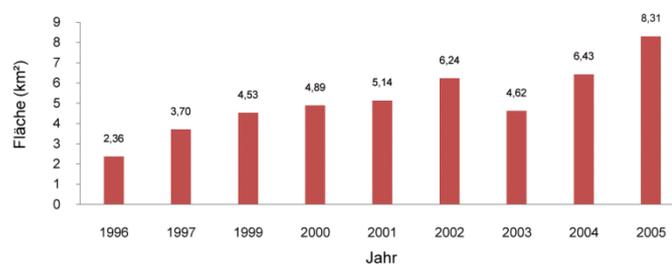
## Ergebnisse

Die Verifizierungen der Luftbildkartierungen im Gelände erfolgten im Jahr 2005 und 2006. Die Felduntersuchungen zeigten, dass es sich bei den kartierten Flächen bei ca. 95 % um *M. arenaria* dominierende Schill-Vorkommen handelte. Nur bei ca. 5 % der Flächen handelte es sich entweder um Miesmuschelbeete oder um Schill-Ansammlungen andere Muschelarten (z. B. *C. edule*). Hochkantschill-Anordnungen wurden vorwiegend an Vorkommen vorgefunden die sich unmittelbar an Prielkanten gebildet haben und eine ansteigende Morphologie aufwiesen. Durch die Kartierungen wurden neben dem bereits schon bekannten Schill-Vorkommen im Dorumer Wattgebiet (s. auch Tafel 5-1 D bis F) die zwei weiteren Hochkantschill führenden Vorkommen des Sahlenburger- und Fedderwarder Wattgebietes entdeckt.

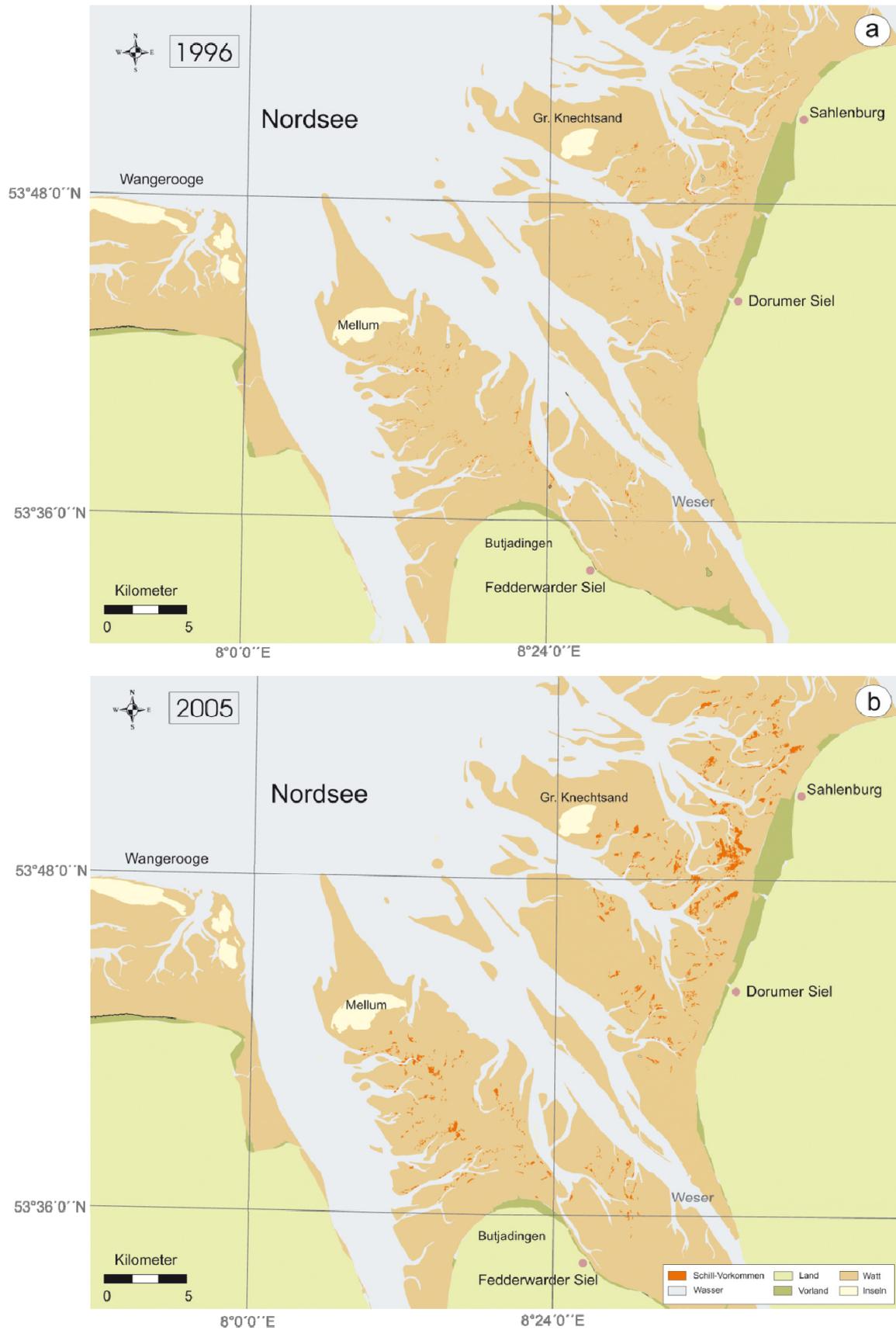
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Luftbildkartierungen sowie die jahreszeitliche Entwicklung der Schill-Flächen im Untersuchungsgebiet vorgestellt.

## Luftbildauswertung

Nach Auswertung der Luftbildserien ist seit 1996 eine Gesamtzunahme der Schill-Flächen innerhalb des Untersuchungsareals zu verzeichnen. In einem Zeitraum von neun Jahren (ohne 1998, s. Material & Methoden) nahm die Schill-Bedeckung von 2,36 km<sup>2</sup> (1996) um 71,6 % auf 8,31 km<sup>2</sup> (2005) zu. Ein Rückgang der Schill-Bedeckung auf 4,62 km<sup>2</sup> wurde dagegen für das Jahr 2003 festgestellt (Abb. 5-3, Tab. 5-2). Die Kartierungen zeigen weiter, dass entlang des gesamten eulitoralen Wattgebietes der südöstlichen Deutschen Bucht großflächige *M. arenaria* dominierende Schill-Vorkommen auftreten. In Abbildung 5-4 ist exemplarisch die kartierte Schill-Gesamtbedeckung der Jahre 1996 (Abb. 5-4a) und 2005 (Abb. 5-4b) in einer GIS-Karte dargestellt.

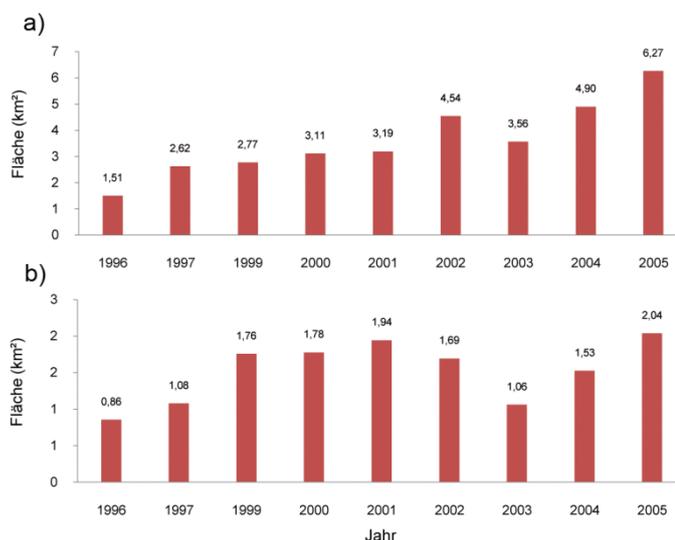


**Abb. 5-3.** Gesamt-Schillbedeckung auf der eulitoralen Gezeitenfläche von 1996 bis 2005 (1998 keine Luftbilder vorhanden).



**Abb. 5-4.** GIS-Karten der kartierten Schilf-Flächen (rot) auf der eulitoralen Gezeitenfläche innerhalb des Arbeitsgebietes. Die Karten verdeutlichen visuell die Zunahme der Schilf-bedeckung. (a) Kartierte Schilf-Flächen im Jahr 1996. (b) Kartierte Schilf-Flächen im Jahr 2005.

Werden die Ergebnisse der Luftbildkartierungen innerhalb des Arbeitsgebietes regional getrennt voneinander betrachtet, so ergibt sich sowohl für die Nordregion als auch für die südlich gelegene Region ein ähnliches Bedeckungsmuster der Schill-Flächen. Im nördlichen als auch im südlichen Arbeitsgebiet ist insgesamt ebenfalls ein Rückgang der Bedeckung im Jahr 2003 nachzuweisen (Abb. 5-5a & b, Tab. 5-2).



**Abb. 5-5.** Schillbedeckung auf der eulitoralen Gezeitenfläche des Arbeitsgebietes von 1996 bis 2005 (1998 keine Luftbilder vorhanden). (a) Nördliches Arbeitsgebiet. (b) Südliches Arbeitsgebiet (s. dazu auch Abb 5-1a).

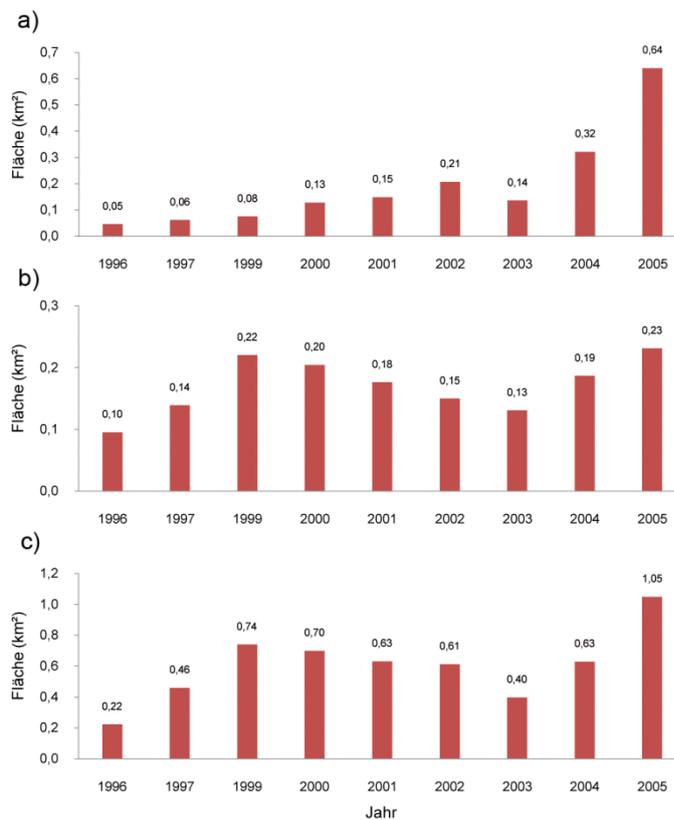
**Tab. 5-2.** Ergebnisse der Luftbildkartierungen.

Jahr	Schill-Bedeckung Gesamtgebiet (km <sup>2</sup> )	Schill-Bedeckung * (%)	Schill-Bedeckung Nordgebiet (km <sup>2</sup> )	Schill-Bedeckung Südgebiet (km <sup>2</sup> )	Schill-Bedeckung Dorumer Watt (km <sup>2</sup> )	Schill-Bedeckung Fedderwarder Watt (km <sup>2</sup> )	Schill-Bedeckung Sahlenburger Watt (km <sup>2</sup> )
1996	2,36	0,40	1,51	0,86	0,05	0,10	0,22
1997	3,70	0,63	2,62	1,08	0,06	0,14	0,46
1999	4,53	0,77	2,77	1,76	0,08	0,22	0,74
2000	4,89	0,83	3,11	1,78	0,13	0,20	0,70
2001	5,14	0,87	3,19	1,94	0,15	0,18	0,63
2002	6,24	1,06	4,54	1,69	0,21	0,15	0,61
2003	4,62	0,78	3,56	1,06	0,14	0,13	0,40
2004	6,43	1,09	4,90	1,53	0,32	0,19	0,63
2005	8,31	1,41	6,27	2,04	0,64	0,23	1,05

\* Bezogen auf die eulitorale Wattfläche innerhalb Arbeitsgebietes von ca. 590 km<sup>2</sup>.

Auch bei der kleinräumigen Entwicklung der Schill-Bedeckung ist ein ähnlicher Trend zu verzeichnen. In Tabelle 5-2 wird ebenfalls die Entwicklung der Schill-Bedeckung für die drei ausgewählten Areale innerhalb des Dorumer, Fedderwarder und Sahlenburger Wattgebietes dargestellt (s. Abb. 5-1b bis d).

Lokal ist in allen drei Gebieten ebenfalls eine Gesamtzunahme der Bedeckung seit 1996 nachzuweisen. Die Ergebnisse der Jahreskartierungen zeigen des Weiteren ein Rückgang der Schill-Bedeckung im Jahr 2003 in allen drei Wattgebieten (Abb. 5-6a bis c). Die Tafel 5-1 D bis F und Tafel 5-2 A bis F zeigen jeweils die Zunahme der Bedeckung innerhalb der drei lokalen Gebiete exemplarisch für drei ausgewählte Jahre (1996, 2000 und 2005). Im Jahr 1999 konnte für die lokalen Gebiete der Fedderwarder und Sahlenburger Watten eine Bedeckungszunahme festgestellt werden, die bei den Kartierungen im Dorumer Gebiet nicht nachgewiesen werden konnte (Abb. 5-6).

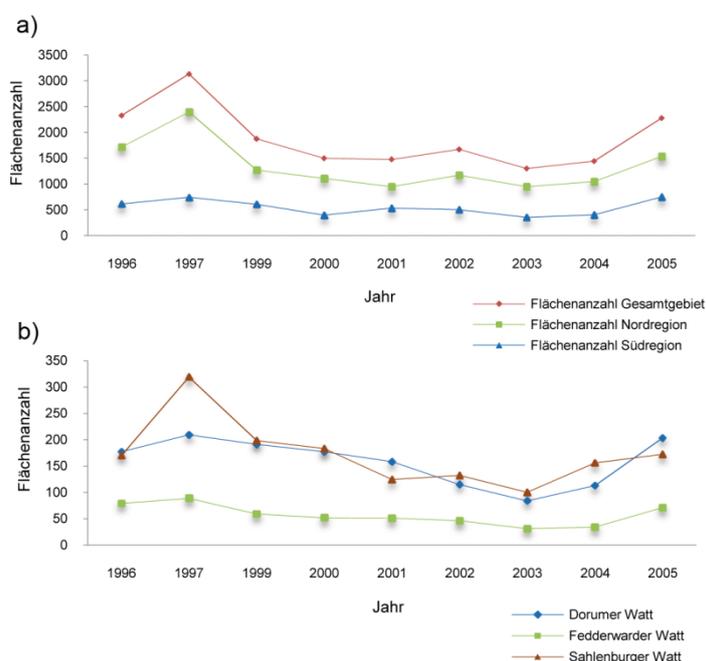


**Abb. 5-6.** Schillbedeckung auf der eulitoralen Gezeitenfläche des Arbeitsgebietes von 1996 bis 2005 (1998 keine Luftbilder vorhanden). (a) Dorumer Watt. (b) Fedderwarder Watt. (c) Sahlenburger Watt (s. dazu auch Abb. 5-1).

In Tabelle 5-3 sind die Anzahl und die zeitliche Entwicklung der Einzelflächen über die Kartierjahre (Gesamtanzahl aller Flächen) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich nach einem Anstieg 1997 die Anzahl der Einzelflächen im Gesamtgebiet bis 2003 deutlich verringert hat, bevor sie im Jahr 2004 wieder leicht ansteigt (Abb. 5-7a). Auch bei getrennter Betrachtung von Nord- und Südregion sowie innerhalb der drei lokalen Wattgebiete zeigt die Flächenabnahme eine vergleichbare Tendenz (Abb. 5-7b).

**Tab. 5-3.** Anzahl der kartierten Schill-Flächen (1998 keine Luftbilder vorhanden).

Jahr	gesamtes Arbeitsgebiet	Nördliches Arbeitsgebiet	Südliches Arbeitsgebiet	Dorumer Wattgebiet	Sahlenburger Wattgebiet	Fedderwarder Wattgebiet
1996	2325	1713	612	177	79	170
1997	3271	2391	880	209	89	319
1999	1875	1268	607	191	59	198
2000	1499	1104	395	177	52	183
2001	1476	946	530	158	51	124
2002	1669	1168	501	115	46	132
2003	1301	947	354	84	31	100
2004	1442	1042	400	113	34	156
2005	2277	1531	746	203	71	172

**Abb. 5-7.** Entwicklung der Schill-Einzelflächen auf der eulitoralen Gezeitenfläche des Arbeitsgebietes von 1996 bis 2005 (1998 keine Luftbilder vorhanden). (a) Flächenanzahl im Gesamtgebiet, in der Nord- und Südregion. (b) Lokale Wattgebiete (s. dazu auch Abb. 5-1)

## Wellendatenauswertung

Um einen eventuellen Zusammenhang zwischen Wellenaktivität und einer Schill-Bedeckung im Arbeitsgebiet feststellen zu können, wurden Wellendaten des BSH ausgewertet. Da die Befliegungen für die hier verwendeten Luftbilder immer zwischen Frühjahr und Herbst eines jeden Jahres durchgeführt wurden (s. auch Material & Methoden), erwies es sich als sinnvoll neben einer jährlichen Auswertung auch eine halbjährliche Betrachtung der Daten durchzuführen. Hierzu wurden jeweils die Zeiträume März bis August sowie September bis Februar getrennt von einander jährlich betrachtet. Die Wellendaten wurden zudem mittels

Korrelationen und ANOVA statistisch ausgewertet. Besondere Aufmerksamkeit soll hierbei auf die Sommermonate 2002 und die Wintermonate 2002/2003 gerichtet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Wellenauswertungen vorgestellt. Die bearbeiteten Wellenparameter beinhalten die signifikante Wellenhöhe (sw<sub>h</sub>), Wellenperiode, Wellenlänge und das signifikante Energiemaximum. Die Ergebnisse der Datenauswertungen werden dabei einmal für das ganze Jahr (Januar bis Dezember) und jeweils für die Frühlings- und Sommermonate (März bis August) sowie für die Herbst- und Winterzeit (September bis Februar) separat vorgestellt.

#### Ganzjährige Betrachtung (Januar bis Dezember)

Insgesamt standen 60.039 Messdaten für die ganzjährige Auswertung zur Verfügung. Die Ergebnisse der einzelnen Parameter können der Tabelle 5-4a entnommen werden. In Abbildung 5-8a ist die signifikante Wellenhöhe für den Zeitraum von 1996 bis 2005 im Jahresmittel dargestellt. Mit einer durchschnittlichen Höhe von 1,17 m wurden die höchsten Wellen im Jahr 1999 gemessen. Die niedrigsten Wellenhöhen wurden für das Jahr 2002 mit 0,86 m ermittelt (s. auch Tab. 5-4a).

**Tab. 5-4a.** Durchschnittliche Wellenparameter von 1996 bis 2005.

Jahr	N	signifikante Wellenhöhe (m)	Wellenperiode (s)	Wellenlänge (m)	Energiemaximum (m*m*s)
1996	1388	0,92	4,28	27,43	1,51
1997	1448	0,91	4,19	30,12	1,04
1998	1752	1,07	4,28	31,48	1,30
1999	2465	1,17	4,44	32,82	2,16
2000	2356	1,10	4,42	31,78	1,76
2001	2630	0,98	4,38	31,29	1,30
2002	2738	0,86	4,25	38,97	1,08
2003	13837	0,93	4,18	49,63	1,00
2004	16432	1,09	4,47	55,40	1,42
2005	14993	1,04	4,40	54,17	1,33

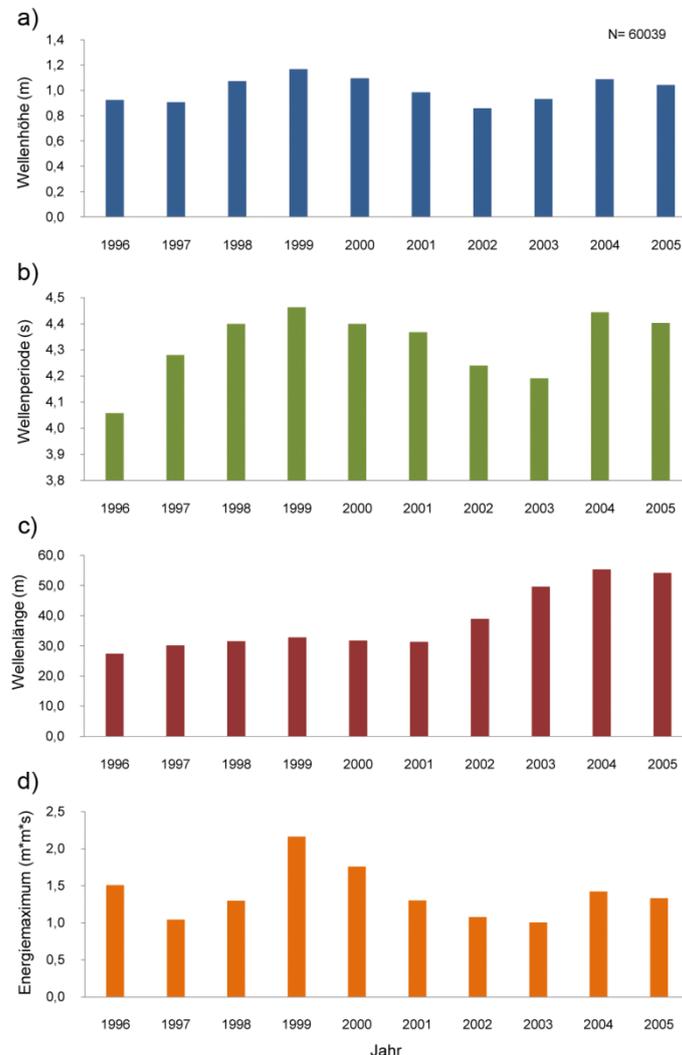
Mit 4,47 s wurden die langsamsten Wellenperioden im Jahr 2004 gemessen, die kürzesten für das Jahr 2003 mit durchschnittlichen 4,18 s (Abb. 5-8b).

Die Wellenlängen blieben in einem Zeitraum von 1996 bis 2001 relativ konstant bevor sie ab dem Jahr 2002 zunahm und ihr Maximum von 55,40 m im Jahr 2004 erreichten (Abb. 5-8 c). Mit einem Wert von 27,43 m wurden die kürzesten Wellenlängen für Jahr 1996 ermittelt. Für das Jahr 2003 wurde mit 1,00 (m\*m\*s) das geringste durchschnittliche Energiemaximum (E<sub>max</sub>) errechnet. Das Energiereichste war dagegen das Jahr 1999 mit einem E<sub>max</sub> von 2,16 (Abb. 5-8d).

Bei der Korrelationsanalyse der ganzjährigen Wellenparameter kann bis ins Jahr 2001 zwischen allen Wellenparameter eine gute bis sehr gute, höchst signifikante Beziehung



festgestellt werden ( $p < 0,001$ , s. dazu Tab. 5-4b im Anhang). Ab dem Jahr 2002 korreliert die Wellenlänge zwar immer noch höchst signifikant, jedoch nimmt die Stärke der Beziehung zwischen den drei anderen Wellenparametern deutlich ab, so dass nur eine geringe bis mittlere Korrelation nachgewiesen werden kann.



**Abb. 5-8.** Ganzjährige Betrachtung der Wellendaten (jeweils für den Zeitraum Januar bis Dezember). (a) Wellenhöhe. (b) Wellenperiode. (c) Wellenlänge. (d) Energiemaximum.

Auch statistisch unterscheiden sich die Wellenlängen zwischen den Jahren 2002 und 2005 signifikant von allen anderen Jahrgängen ( $p < 0,001$ , s. auch dazu Tab. 5-4c im Anhang). Die weiteren Ergebnisse der statistischen Auswertungen zeigen, dass sich alle vier Wellenparameter je nach Jahrgang mehrmals signifikant von allen anderen Jahrgängen unterscheiden. Besonders die Wellenhöhe (s. Tab. 5-4d im Anhang) sowie das Energiemaximum (Tab. 5-4f im Anhang) des Jahres 1999 unterscheiden sich signifikant ( $p < 0,001$ ) von nahezu allen anderen Jahrgängen. Auch die Wellenhöhen und Wellenperiode des Jahres 2002 zeigen Signifikanzen zwischen sieben von den insgesamt neun Jahrgängen ( $p < 0,001$ , Tab. 5-4d & e im Anhang). Die Wellenhöhen, Wellenperioden

und das Energiemaximum des Jahres 2003 zeigen insgesamt sechs variierende signifikante Unterschiede zwischen den Wellenparametern (alle mit  $p < 0,001$ ).

### Betrachtung der Frühlings- und Sommermonate (März bis August)

In Tabelle 5-5a sind die Wellenparameter für den Zeitraum März bis August jedes Jahrganges zusammengefasst. Die Auswertungen zeigen, dass die niedrigsten Wellenhöhen mit durchschnittlichen 0,6 m im Jahr 2002 erreicht wurden. Die höchsten Wellen wurden für das Jahr 1998 mit einer mittleren Höhe von 1,02 m ermittelt (s. auch Abb. 5-9a).

**Tab. 5-5a.** Durchschnittliche Wellenparameter von 1996 bis 2005 für März bis August.

Jahr	N	signifikante Wellenhöhe (m)	Wellenperiode (s)	Wellenlänge (m)	Energiemaximum (m*m*s)
1996	710	0,67	3,97	25,61	0,48
1997	1150	0,81	4,14	28,02	0,81
1998	1462	1,02	4,34	30,69	1,18
1999	1173	0,83	4,11	27,59	0,71
2000	1048	0,76	4,21	28,67	0,65
2001	1295	0,75	4,18	28,40	0,70
2002	1458	0,60	4,13	35,94	0,51
2003	6886	0,81	4,07	46,93	0,72
2004	8555	0,89	4,17	48,63	0,90
2005	8636	0,91	4,30	51,28	0,90

Die langsamsten Wellenperioden wurden im Jahr 1996 mit 3,97 s ermittelt, die schnellsten 1998 mit durchschnittlichen 4,34 s (Abb. 5-9b).

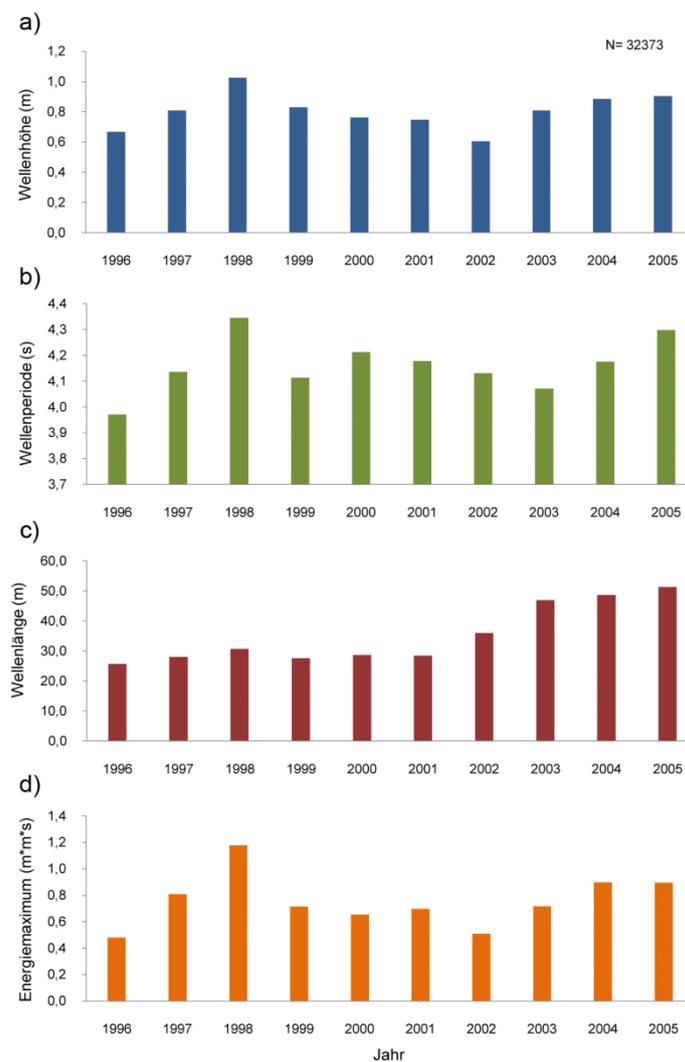
Auch bei der Betrachtung der Frühlings- und Sommermonate blieben die Wellenlängen in einem Zeitraum von 1996 bis 2001 relativ konstant bevor sie ab dem Jahr 2002 zunahmen und ihr durchschnittliches Maximum mit 51,28 m im Jahr 2005 erreichten (Abb. 5-9c). Mit einem Wert von 25,61 m wurden die kürzesten Wellenlängen im Jahr 1996 ermittelt.

Das niedrigste Energiemaximum (Emax) wurde für das Jahr 1996 und 2002 mit 0,48 bzw. 0,52 (m\*m\*s) berechnet. Das höchste durchschnittliche Energiemaximum wurde für das Jahr 1998 mit einem Emax von 1,18 ermittelt (Abb. 5-9d).

Die Korrelationsanalysen für die Frühlings- und Sommermonaten weisen ähnliche Zusammenhänge auf wie die Analyse der ganzjährigen Auswertung. Die Ergebnisse zeigen bis ins Jahr 2001 zwischen allen Wellenparameter eine gut bis sehr gut sowie einen höchst signifikanten Zusammenhang ( $p < 0,001$ , Tab. 5-5b im Anhang). Ab dem Jahr 2002 nimmt die Stärke der Beziehung zwischen den anderen Wellenparametern deutlich ab, so dass nur eine geringe bis mittlere Korrelation nachgewiesen werden kann. Auch statistisch unterscheiden sich die Wellenlängen zwischen den Jahren 2002 und 2005 signifikant von allen anderen Jahrgängen (Tab. 5-5c im Anhang).

Statistisch besonders auffällig im Bezug auf die Wellenhöhe, Wellenperiode und das Energiemaximum ist der Frühling bzw. der Sommer 1998 der sich signifikant von nahezu allen anderen Jahrgängen differenziert ( $p < 0,001$ , Tab. 5-5d bis f im Anhang).

Im Hinblick auf die anfangs erwähnte Fokussierung auf die Jahre 2002 und 2003 zeigen die statistischen Auswertungen, dass sich besonders zur Frühlings- und Sommerzeit des Jahres 2002 die Wellenhöhe signifikant von nahezu allen anderen Jahrgängen unterscheidet ( $p < 0,001$ , Tab. 5-5d im Anhang). Auch das Energiemaximum im Jahr 2002 zeigt Signifikanzen zu insgesamt fünf Jahrgängen auf ( $p < 0,001$ , Tab. 5-5f im Anhang). Die Wellenhöhen sowie das Energiemaximum des Jahres 2003 differenziert sich signifikant von den Jahren 1998, 2002, 2004 und 2005 ( $p < 0,001$ , Tab. 5-5d & f im Anhang).



**Abb. 5-9.** Betrachtung der Wellendaten zur Frühlings- und Sommerzeit (jeweils März bis August). (a) Wellenhöhe. (b) Wellenperiode. (c) Wellenlänge. (d) Energiemaximum.

Betrachtung der Herbst- und Wintermonate (September bis Februar)

In Tabelle 5-6a sind die Ergebnisse der Wellenauswertungen für den Zeitraum September bis Februar eines jeden Jahrganges zusammengefasst. Die Auswertungen zeigen, dass die niedrigsten Wellenhöhen mit durchschnittlich 1,05 m im Winter 2002/2003 erreicht wurden. Im Winter 1998/1999 wurden dagegen die höchsten signifikanten Wellen mit einer durchschnittlichen Höhe von 1,47 m erreicht (s. auch Abb. 5-10a).

**Tab. 5-6a.** Durchschnittliche Wellenparameter von 1996 bis 2005 für September bis Februar.

Jahr	N	signifikante Wellenhöhe (m)	Wellenperiode (s)	Wellenlänge (m)	Energiemaximum (m*m*s)
1996/97	619	1,47	4,90	39,58	3,39
1997/98	290	1,32	4,68	35,49	1,91
1998/99	1292	1,47	4,78	37,56	3,48
1999/00	1308	1,36	4,55	34,28	2,64
2000/01	1335	1,21	4,55	34,08	1,89
2001/02	1280	1,14	4,36	42,42	1,72
2002/03	6951	1,05	4,31	52,30	1,29
2003/04	7877	1,30	4,74	62,74	1,99
2004/05	6357	1,23	4,55	58,09	1,93

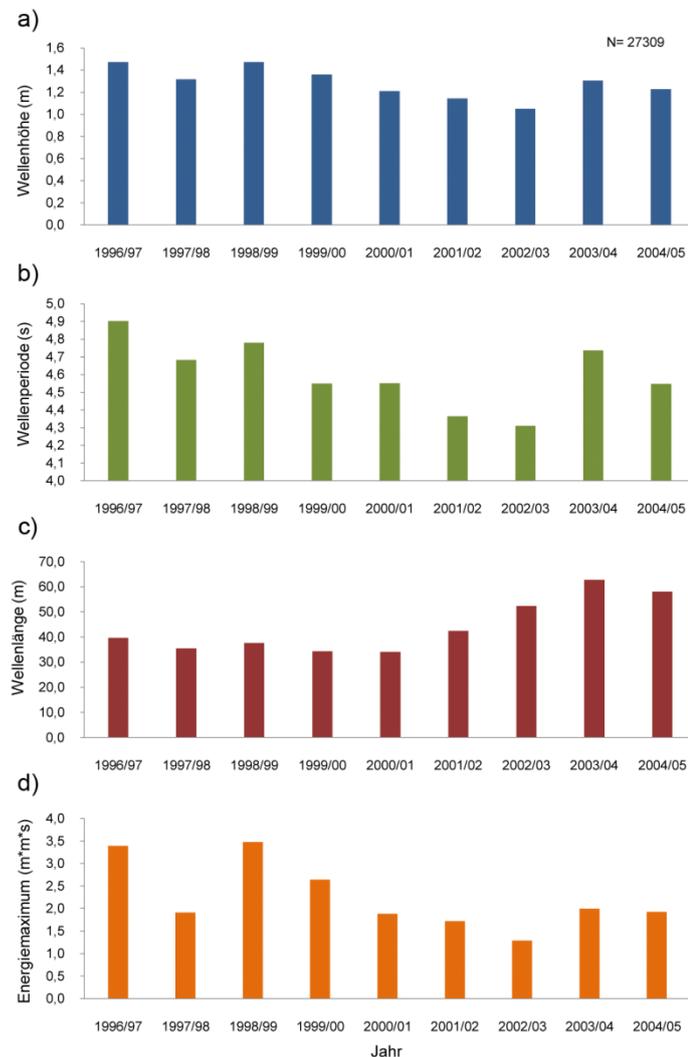
Zur Herbst- und Winterzeit wurden die langsamsten Wellenperioden ebenfalls zum Jahreswechsel 2002/2003 mit durchschnittlichen 4,31 s ermittelt. Die schnellsten Wellen wurden für die Jahresübergänge 1996/1997 sowie 1999/2000 mit durchschnittlichen 4,9 s bzw. 4,55 s errechnet (Abb. 5-10b).

Die kürzesten Wellenlängen zeigt der Jahresübergang 2000/2001 mit einem durchschnittlichen Wert von 34,08 m (Abb. 5-10c). Mit 62,74 m wurden die längsten Wellenlängen zu Winterzeit 2003/2004 ermittelt.

Das niedrigste Energiemaximum (Emax) zur Herbst- und Winterzeit wurde 2002/2003 mit 1,29 (m\*m\*s) rechnerisch ermittelt. Das höchste durchschnittliche Energiemaximum errechnet sich für 1998/1999 mit einem Emax von 3,48 (Abb. 5-10d).

Die Korrelationsanalyse der Herbst- und Wintermonate zeigen ähnliche Ergebnisse wie das der vorangegangenen Zeiträume. Bis zum Herbst- bzw. Winter 2000/2001 zeigen alle Wellenparameter einen guten bis sehr guten, höchst signifikanten Zusammenhang zueinander ( $p < 0,001$ , Tab. 5-6b im Anhang). Zum Jahresübergang 2001/2002 nimmt die Stärke der Beziehung zwischen Wellenlänge und den übrigen Wellenparametern deutlich ab, so dass nur eine mittlere Korrelation festgestellt werden kann. Statistisch unterscheiden sich die Wellenlängen ebenfalls zwischen den Jahren 2002/2003 bis 2004/2005 signifikant von allen anderen Jahrgängen ( $p < 0,001$ , Tab. 5-6c im Anhang).

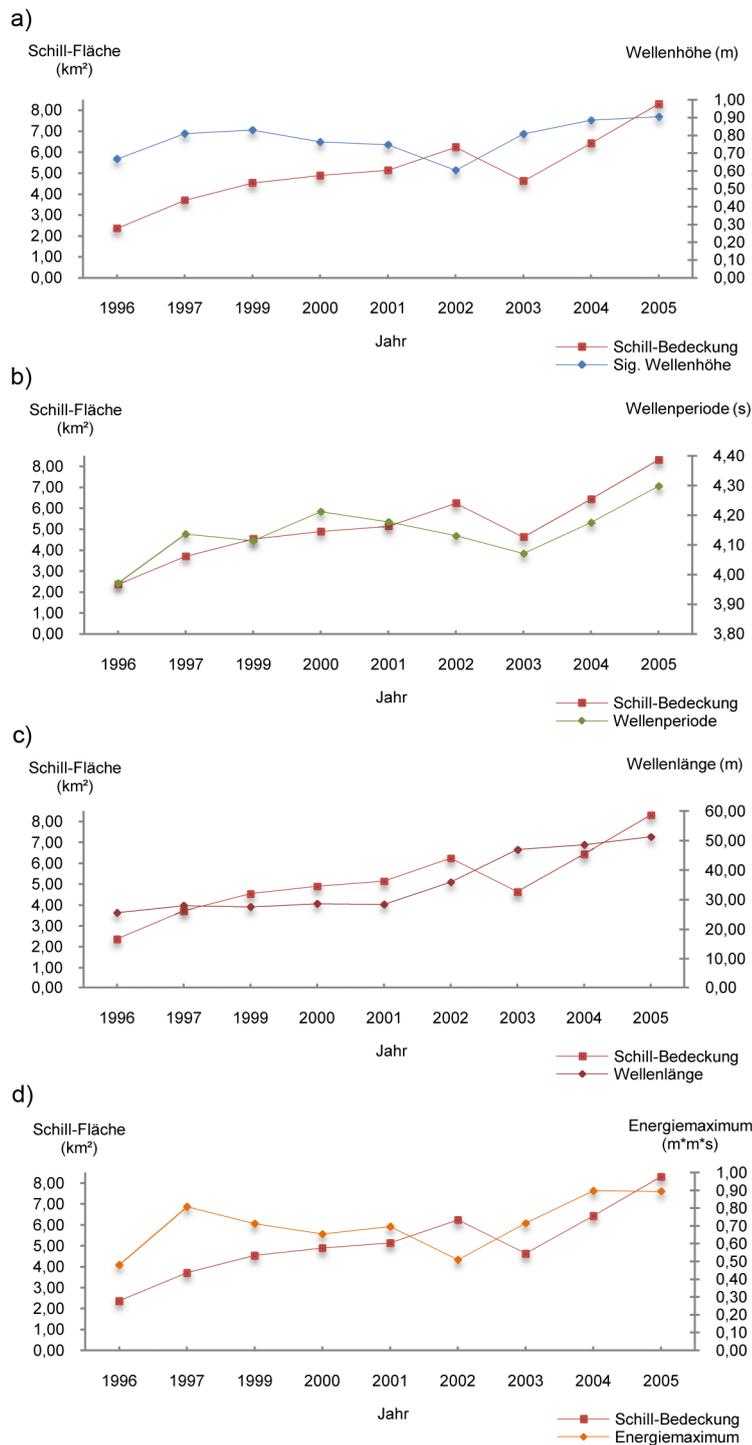
Ebenfalls statistisch besonders auffällig im Bezug auf alle Wellenparameter sind die niedrigen Messwerte der Herbst- und Wintermonate im Jahreswechsel 2002/2003. Hierbei kann ebenfalls ein höchst signifikanter Unterschied zu nahezu allen anderen Jahrgängen festgestellt werden ( $p < 0,001$ , Tab. 5-6d bis f im Anhang).



**Abb. 5-10.** Betrachtung der Wellendaten zur Herbst- und Winterzeit (jeweils September bis Februar). (a) Wellenhöhe. (b) Wellenperiode. (c) Wellenlänge. (d) Energiemaximum.

### Schill-Bedeckung vs. Wellenaktivität

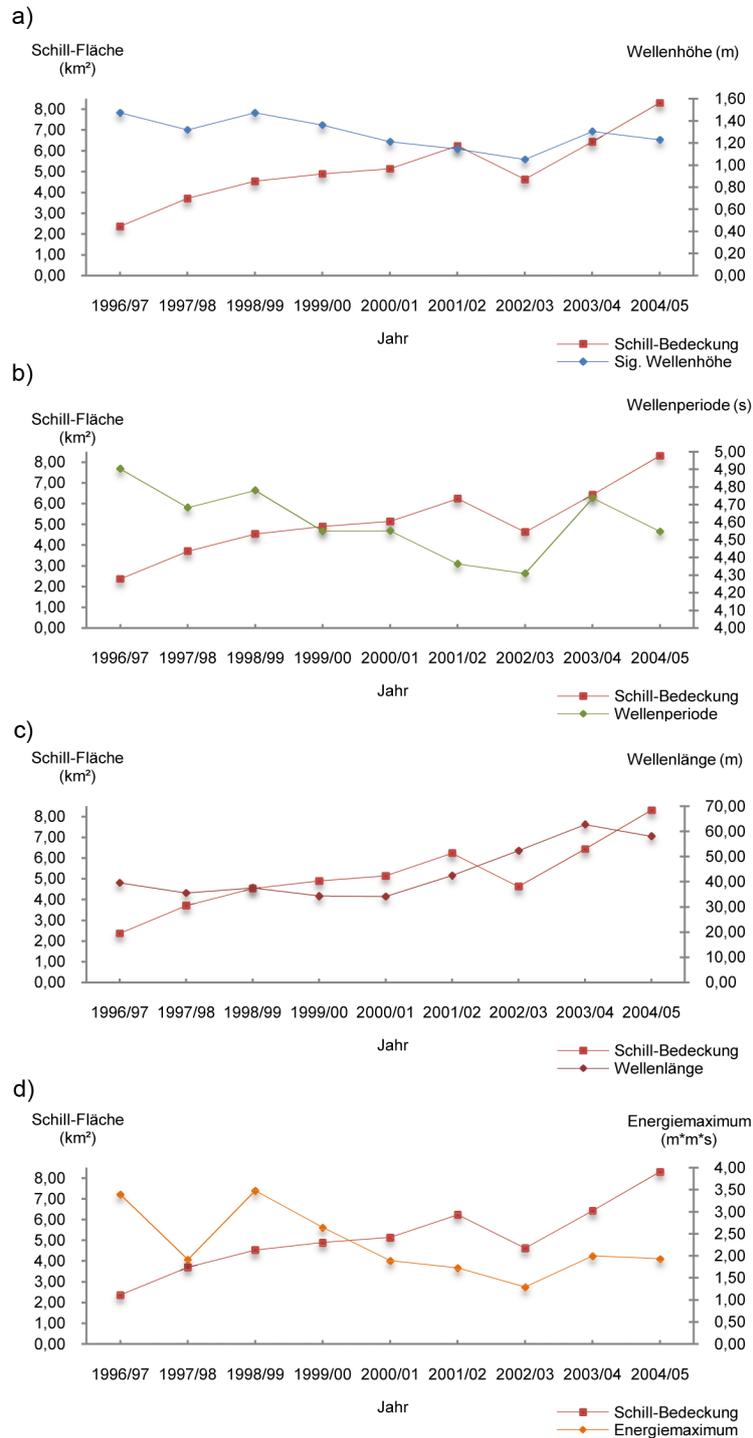
In Abbildung 5-11 ist die Schill-Bedeckung auf der Wattoberfläche gemeinsam mit den einzelnen Wellenparametern für die Frühlings- und Sommermonate (jeweils März bis August) graphisch dargestellt. Die Ergebnisse der Wellendatenauswertung zeigen, dass in den Frühlings- und Sommermonaten des Jahres 2002 die niedrigsten Wellenhöhen sowie das geringste Energiemaximum erreicht wurden, aber ein Rückgang der Schill-Bedeckung jedoch erst im Jahr 2003 erfolgte (Abb. 5-11a & d). Die Graphen der Wellenperiode sowie der Wellenlänge zeigen beim Vergleich mit der Schill-Bedeckung keinen eindeutigen Trend (Abb. 5-11b & c).



**Abb. 5-11.** Graphische Korrelation zwischen Wellendaten und Schill-Bedeckung zur Frühlings- und Sommerzeit (1998 keine Luftbilder vorhanden). (a) Wellenhöhe vs. Schill-Bedeckung. (b) Wellenperiode vs. Schill-Bedeckung. (c) Wellenlänge vs. Schill-Bedeckung. (d) Energiemaximum vs. Schill-Bedeckung.

Wird die Schill-Bedeckung gemeinsam mit den einzelnen Wellenparametern für die Herbst- und Wintermonate (jeweils September bis Februar) eines Jahrganges dargestellt, so ergibt sich eine bessere graphische Übereinstimmung mit der Schill-Bedeckungskurve für die Wellenhöhe, Wellenperiode sowie für das Energiemaximum (Abb. 5-12a, b & d). Der Graph

der Wellenlänge zeigt im Vergleich zur Schill-Bedeckung keinen gemeinsamen Trendverlauf über die Jahre, sondern steigt ab 2000/2001 deutlich an (Abb. 5-12c).



**Abb. 5-12.** Graphische Korrelation zwischen Wellendaten und Schill-Bedeckung zur Herbst- und Winterzeit (1998 keine Luftbilder vorhanden). (a) Wellenhöhe vs. Schill-Bedeckung. (b) Wellenperiode vs. Schill-Bedeckung. (c) Wellenlänge vs. Schill-Bedeckung. (d) Energiemaximum vs. Schill-Bedeckung.

Die Tendenz von niedrigen Wellenhöhen und kurzen Wellenperioden sowie eines geringen Energiemaximums in den Sommermonaten 2002 setzte sich in den Herbst- und Wintermonaten 2002/2003 fort, so dass bis für die Wellenlänge innerhalb dieses Zeitraumes die geringsten Wellenparameter ermittelt wurden.



## Diskussion

### Luftbildkartierung

Die Ergebnisse der Kartierungen und die anschließende Verifizierung im Gelände zeigen, dass die durchgeführte Luftbilddauswertung eine äußerst zuverlässige Methode ist, um *M. arenaria* dominierende Schill-Vorkommen innerhalb des eulitoralischen Gezeitenbereiches zu identifizieren. Laut Millat (1996a) kann eine großräumige strukturierte Gliederung des Wattenmeeres in naturräumliche Einheiten auf der Grundlage von Satellitenaufnahmen oftmals effizienter sein, als eine Klassifizierung mittels Luftbildinterpretation. Jedoch unterliegen gerade die naturräumlichen Rahmenbedingungen innerhalb des Wattenmeeres einer sehr hohen Dynamik und Variabilität. Infolgedessen können sich die morphologischen und hydrodynamischen Zustände und dadurch auch die Bedingungen für die Lebensgemeinschaften in recht kurzen Zeiträumen drastisch verändern (Millat 1996a).

Morphologische Veränderungen wie Schill-Akkumulationen aber auch Prielverlagerungen vollziehen sich in der Regel kleinräumig, so dass diese sich beispielweise durch jährliche Satellitendatenvergleiche aufgrund der limitierenden wirkenden geometrischen Auflösung oftmals nicht eindeutig quantifizieren lassen (Wieczorek 1982). Aus diesem Grund kann die hier angewandte Luftbildanalyse als ein hervorragendes Hilfsmittel zur Kartierung von Schill-Flächen angesehen werden. Flächendeckende Luftbilddaten stellen in der vorliegenden Untersuchung zwar eine sehr wertvolle Informationsquelle dar, die es erlauben die zeitintensiven Feldarbeiten deutlich zu rationalisieren, jedoch können sie diese aber nicht vollkommen ersetzen.

Die durchgeführten Geländeüberprüfungen der Jahre 2005 und 2006 vermitteln nicht nur eine hohe Kartiergenauigkeit sondern zeigen, dass die Schill-Flächen aus dem Luftbild mit Hilfe des Stereoskops einwandfrei von übrigen Objekten sowie den Wattersedimenten abgrenzbar sind.

Da die Trefferquote der Schill-Kartierungen laut Gelände-Überprüfung bei ca. 95% liegt, kann auch für die vorangegangenen Jahrgänge von einer ähnlichen Genauigkeitsquote ausgegangen werden, da die Kartierungen immer nach der gleichen systematischen Prozedur sowie vom selben Operateur durchgeführt worden sind (mündl. Mitt. Millat 2006). Auch Millat (1996a) stellt in seiner Arbeit zu operationellen Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung im niedersächsischen Wattenmeer fest, dass die Bearbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten sowohl bei der digitalen Verarbeitung als auch bei der analogen Auswertung, immer von der Erfahrung des interpretierenden Operateurs abhängig ist. Des Weiteren weist Millat (1996a) darauf hin, dass neben der Erfahrung zudem auch gute Kenntnisse des Anwenders über den Naturraum Wattenmeer bzw. über das Arbeitsgebiet erforderlich sind, welche analog nur bei entsprechenden Geländeüberprüfungen gemacht werden können.

Die Auswertungen der Luftbildserien entlang der südöstlichen Deutschen Bucht, bestätigen die bereits vorangehende Vermutung, dass großflächige *M. arenaria* Akkumulationen mit

Hochkantschill-Arealen nur in Gezeitenbereichen auftreten, in denen der Tidenhub höher als 3,2 m beträgt (ausgehend von den mittleren Tidenhuben nach Lassen & Siefert 1991). In Rückseitenwatten mit vor gelagerten Barriereinseln (wie beispielweise Wangerooge, Spiekeroog usw.) wurden derartig ausgedehnte Vorkommen bislang nicht nachgewiesen (mündl. Mitt. A. Schmidt 2006). Die in der vorliegenden Arbeit kartierten Schill-Vorkommen finden sich folglich auf eulitoralen Wattflächen, auf denen die maximalen Wind- und Wellenenergien relativ ungehindert auftreffen können.

Die Ergebnisse der Luftbildauswertungen zeigen eine Gesamtzunahme der Schill-Flächenbedeckung von 1996 bis 2005. Die Gesamtbedeckung nahm demzufolge um ca. 71 % zu. Die Gesamtzunahme wurde im Jahr 2003 durch eine geringere Flächenbedeckung unterbrochen. Sowohl die festgestellte Gesamtzunahme bis 2005 als auch der Rückgang der Bedeckung im Jahr 2003 wurde nicht nur getrennt in beiden Untersuchungsregionen Nord und Süd, sondern auch in den lokalen Wattgebieten von Dorum, Sahlenburg und Fedderwarden festgestellt. Ein zufälliges Ereignis kann demzufolge ausgeschlossen werden, so dass die Reduzierung der Schill-Flächen einen gemeinsamen Hintergrund haben muss. Bei der Entwicklung der Schill-Flächenanzahl zeigen die Ergebnisse gegenüber der Schill-Bedeckung einen gegenläufigen Trendverlauf. So sank die Schill-Flächenanzahl ab 1997 deutlich ab. Grund dafür ist höchst wahrscheinlich die stetige Zufuhr an neuem Schalenmaterial, wodurch Bedeckungslücken zwischen einzelnen bereits vorhandenen Schill-Vorkommen durch „frisch“ freigelegte Schille geschlossen wurden. Dieser Vorgang einer Neuanlagerung von Schalenmaterial an bereits bestehen Schill-Vorkommen kann als Resultat der stetigen „Flächen-Expansion“ gedeutet werden. Besonders für die ausgewählten lokalen Gebiete konnten diese Expansionen mittels der entsprechenden Luftbilddaufnahmen verdeutlicht werden (s. auch Tafel 5-1 D bis F & Tafel 5-2 A bis F). Für das Untersuchungsgebiet gilt somit folgende Aussage: Nimmt die Schill-Bedeckung auf den Wattflächen zu, so sinkt dadurch die Anzahl der einzelnen Schill-Flächen durch Neuanlagerung von Schalenmaterial gewöhnlich ab.

Morphodynamische Migrationsereignisse der größeren Schill-Vorkommen in eine küstenwertige Richtung wie sie beispielweise von Bonnot-Courtois et al. (2004) an der Küste Frankreichs dokumentiert wurden, konnten bei der vorliegenden Untersuchung während des Untersuchungszeitraumes nicht festgestellt werden.

### Wellendaten

Den exponierten d. h. offenen Wattflächen zwischen der Jademündung im südlichen und dem nördlichen Arbeitsgebiet vor Sahlenburg stehen die gut geschützten Wattflächen des Jadebusens (Buchtwatten) sowie die Rückseitenwatten der ostfriesischen Inseln aus hydrodynamischer Sicht gegenüber. Im Schutz der ostfriesischen Inseln haben sich die Rückseitenwatten gebildet, die über die Seegats entwässert werden. Die offenen Wattflächen des Untersuchungsgebietes sind jedoch aufgrund des Fehlens von Barriereinseln den hydrodynamischen Kräften relativ frei ausgesetzt. Neben dem täglichen

Tidenzyklus beeinflussen vor allem Extremereignisse wie Sturmfluten die Morphodynamik und somit auch die Schill-Strukturen im Wattgebiet.

Marine Sedimente spiegeln in ihrer Zusammensetzung und räumlichen Verteilung neben den morphologischen, vor allem die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt ihrer Ablagerung wider. Neben den gestaltenden Kräften aus Seegang und Strömungen sind in den Sedimenten aber auch biologische Effekte eingepreßt. Während temporär auftretende, lokale Variabilitäten der Schill-Bedeckung, der sich ständig ändernden Dynamik von Strömung und Seegang Ausdruck verleihen, werden großräumige und langfristige Veränderungen der Schill-Flächen durch strukturelle Änderungen der hydrodynamischen und morphologischen Einflüsse bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit galt es nachzuweisen, ob die Reduzierung der Schill-Bedeckung in 2003 auf den eulitoralen Wattflächen eher eine zufällige Erscheinung oder ein Zusammenhang mit den hydrodynamischen Wellenparametern festzustellen ist. Zu diesem Zweck wurden Wellendaten von 1996 bis 2005 ausgewertet und der kartierten Schill-Bedeckung gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Wellendatenauswertung zeigen, dass in den Frühlings- und Sommermonaten des Jahres 2002 im Vergleich zu den anderen analysierten Jahrgängen die niedrigsten Wellenhöhen sowie die geringsten Energiemaxima erreicht wurden. Diese Ergebnisse decken sich auch mit dem Zustandsbericht der Nordsee 2002 des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Demzufolge wich in 2002 die zeitliche Entwicklung von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe vom mittleren klimatologischen Jahrgang deutlich ab (Loewe et al. 2003).

Wie den Ergebnissen zu entnehmen setzt sich die Tendenz von niedrigen Wellenhöhen und kurzen Wellenperioden sowie eines geringen Energiemaximums der Sommermonate 2002 auch in den Herbst- und Wintermonaten 2002/2003 fort, so dass im Vergleich zu den anderen untersuchten Jahresübergängen ebenfalls die geringsten Wellenparameter im Untersuchungszeitraum festgestellt wurden. Diese Ergebnisse decken sich ebenfalls mit dem hydrodynamischen Zustandsbericht der Nordsee 2003, welcher ebenfalls im Herbst und Winter des Jahres 2003 geringere Wellenhöhen beschreibt als für das Vorjahr 2002. Die grundsätzlichen saisonalen Unterschiede mit maximalen Wellenhöhen im Winter und geringsten Wellenhöhen im Sommer erklären sich aus den entsprechenden Windverhältnissen, die im Sommer geringer ausfallen als in den Wintermonaten (Loewe et al. 2003). Demzufolge sind auch die anderen Parameter an die saisonalen jahreszeitlichen Unterschiede gekoppelt. Auch nach Loewe et al. (2005) blieben die mittleren signifikanten Wellenhöhen der Jahre 2002/2003 unterhalb der langjährigen Mittelwerte und decken sich sehr gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung.

Die Ergebnisse der Kartierungen zeigen einen Rückgang der Schill-Bedeckung im Jahr 2003. Um eine mögliche hydrodynamische Abhängigkeit der Schill-Bedeckung feststellen zu können, wurden die Kartierergebnisse gemeinsam mit den einzelnen Wellenparametern graphisch dargestellt. Die Grafiken verdeutlichen vor allem zur Herbst- und Winterzeit, dass

eine recht gute graphische Korrelation der Schill-Bedeckungskurve mit der Wellenhöhe, Wellenperiode sowie mit dem Energiemaximum erfolgt.

Die Wellendaten zeigen seit 1996 zwar schwankende Veränderungen zwischen den einzelnen Jahren, jedoch bestätigen auch die statistischen Überprüfungen für die Sommermonate 2002 sowie die Monate des Winterhalbjahres 2002/2003 die geringsten Wellenparameter. Die graphischen Korrelationen der Schill-Bedeckung mit den Wellenintensitäten zu unterschiedlichen Jahreszeiten belegen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Schill-Bedeckung und den hydrodynamischen Aktivitäten im Untersuchungsgebiet. In den Wintermonaten der Jahre 2003/2004 sowie 2004/2005 steigen die Wellenintensitäten erneut an und gehen mit einer erneuten Zunahme der Schill-Bedeckung einher.

Die Auswertungen der Wellendaten lassen folgende Vermutung zu: Stagnieren die Wellenparameter in den Sommermonaten wie es im Jahr 2002 der Fall war und kommt es zudem in dem darauf folgendem Winterhalbjahr ebenfalls zu signifikant geringeren hydrodynamischen Aktivitäten, so wirkt sich dies auf die Schill-Bedeckung im Untersuchungsgebiet aus.

Fallen die hydrodynamischen Aktivitäten im Winter niedriger aus als im normalen Mittel, so resultieren daraus geringere Wellenintensitäten die vermutlich nicht genug Energie besitzen die *M. arenaria* Doppelklappen aus ihren ehemaligen Siedlungshorizonten heraus zu erodieren (s. auch Kap. 2). Bleibt eine Erosion der Klappen aus, so kann keine Ablagerung auf den Wattflächen erfolgen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der sich aus der niedrigen hydrodynamischen Aktivität ergeben kann ist eine Schlickbildung im Untersuchungsgebiet.

Wie bereits im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit erwähnt, entstehen Schlickablagerungen im Arbeitsgebiet durch Sediment- bzw. durch Erosionsverzögerung die überwiegend zu Sommerzeiten vorherrschen (Reineck & Siefert 1980). Auch bei den durchgeführten Geländeuntersuchungen wurden besonders in den Sommermonaten vereinzelte Schlickteppiche über den Schill-Vorkommen dokumentiert (s. auch Kap. 2). Da in den Herbst- und Wintermonaten im Arbeitsgebiet normalerweise die Wind- und Seegangintensitäten ansteigen, werden Schlicksedimentationen normalerweise erschwert (Wunderlich 1979).

Durch die in den Herbst- und Wintermonaten verstärkten hydrodynamischen Bedingungen erfolgt normalerweise eine intensive Erosion des im Sommer abgelagerten Schlickmaterials. Vereinzelte Sturmereignisse begünstigten zudem die fortlaufende Erosion der ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonte.

In Folge der nachgewiesenen geringeren hydrodynamischen Aktivitäten im Sommer 2002 sowie im Winterhalbjahr 2002/2003 könnte die Schlickbildung im Arbeitsgebiet in diesem Zeitraum begünstigt worden sein. Die Luftbildserien wurden zwischen Frühjahr und Spätsommer 2003 angefertigt. Aus diesem Grund könnte eine Schlicküberdeckung auf den Schill-Flächen für die geringe Bedeckungsrate im Jahr 2003 verantwortlich sein, so dass bestehenden Schill-Vorkommen teilweise zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen durch Schlick überlagert wurden und dadurch kleiner auf den Luftbildern erscheinen. Van Straaten (1952) stellte bei seinen Untersuchungen im niederländischen Gezeitenbereich fest, dass Schill-Flächen im küstennahen Bereich oft mehrere Monate oder sogar einige Jahre durch

Schlicksedimente bedeckt sein können, bevor die Klappen durch Erosionsprozesse wieder „reaktiviert“ werden. Eine genauere Verweildauer für Schalenmaterial im Arbeitsgebiet wurde in der zugänglichen Literatur nicht entdeckt, jedoch ist beispielweise vom Dorumer Schill-Vorkommen bekannt, dass dessen Position seit mindestens 90 Jahre konstant anhält. Die Geländeuntersuchungen zeigten zudem, dass sich die Dorumer Schill-Fläche durch Ab- und Zunahme in ihrer Ausdehnung und in ihrem Höhengniveau zeitweise variieren kann.

Die Genese von Schill-Strukturen unterliegt dem Anschein nach im Arbeitsgebiet einem natürlichen hydrodynamischen Gleichgewichtsprozess. Hierbei spielt die Wechselbeziehung von wellenreichen und wellenschwachen Zeiträumen eine wichtige Rolle. Derzeit herrschen jahreszeitlich gesehen nur kurze Perioden mit Sturmereignissen bzw. höheren Wellenintensitäten. Diese ereignen sich bislang nur im Herbst und im Frühjahr. Werden diese jahreszeitlichen Perioden, bedingt durch klimatische Veränderung in der Region verschoben oder verstärkt bzw. bleiben sogar aus, so hat dies dem Anschein nach auch Auswirkung auf die Schill-Genese innerhalb der Wattflächen.

Bereits Schäfer (1941) wies auf die Prägung des Wattenmeeres durch hydrodynamische Prozesse hin und beschrieb dabei die Anwuchs- und Abbruchgebiete des Sandes und der Schlickgebiete in der Jadebucht und bezeichnete diesen Vorgang als „Schill-Lager Abbruch“. Schäfer (1941) stellte fest, dass hauptsächlich der Seegang als Verursacher für die Schill-Erosionen verantwortlich ist.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass im gesamten Arbeitsgebiet bei einem im Mittel abnehmender hydrodynamischer Intensität auch eine Bedeckungsabnahme von Schill-Akkumulationen auf den Wattflächen nachzuweisen ist. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann daraus gefolgert werden, dass das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung und dessen Veränderung in Raum und Zeit als möglicher Indikator, sowohl lokal als auch regional für die Rekonstruktion der ehemaligen Wellenintensitäten im eulitoralischen Gezeitenbereich des Untersuchungsgebietes herangezogen werden kann.

Innerhalb des Systems Wattenmeer befinden sich die morphodynamischen Faktoren im Gleichgewicht. Schwankungen in der Wellendynamik wirken sich auf die Oberflächenmorphologie und damit auf die Schill-Bedeckung aus. Die Schill-Flächen spiegeln im Verteilungsmuster vor allem die hydrodynamischen Bedingungen wieder und lassen daher auf ehemaligen Wellenintensitäten schließen.

## Schlussfolgerung

Die Untersuchungen bestätigen, dass die durchgeführte Luftbildauswertung eine äußerst zuverlässige Methode darstellt um *M. arenaria* dominierende Schill-Vorkommen innerhalb des eulitoralen Gezeitenbereiches zu identifizieren. Diese Methode bietet nicht nur den Vorteil der synoptischen und relativ schnellen Erfassung der Schill-Bedeckung von ausgedehnten Untersuchungsflächen, sondern ermöglicht durch Auswertung älterer Luftbilder frühere Zustände im Verteilungsmuster aufzuzeigen. Die Ergebnisse zeigen, dass *M. arenaria* dominierende Schill-Flächen im Untersuchungsgebiet nur in Gezeitenbereichen vorkommen, auf denen 1. ein makrotidales Tidenregime vorherrscht und 2. die maximalen Wind- und Wellenenergien ungehindert auftreffen können.

Auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996 bis 2005 wurde das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung im südöstlichen niedersächsischen Gezeitenbereich durch die analoge Luftbildauswertung erfasst und durch Geländeuntersuchungen verifiziert. Dabei wurde festgestellt, dass sich in dem Zeitraum 1996 und 2005 die Bedeckung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Flächen um 71,6 % zugenommen hat.

Nach der relativ stetigen Zunahme der Bedeckung wurde im Jahr 2003 jedoch eine geringere Flächenbedeckung festgestellt. Sowohl die Gesamtzunahme als auch der Rückgang der Bedeckung im Jahr 2003 konnte nicht nur für das gesamte Arbeitsgebiet, sondern sowohl regional als auch für lokale Wattgebiete nachgewiesen werden.

Eine gegenläufige Entwicklung zu der Schill-Bedeckung zeigte sich dagegen bei der Anzahl der Schill-Flächen im Untersuchungsgebiet, infolge von neuangelagerten Schalenmaterial, welches zwar zur allgemeinen Expansion führte, gleichzeitig die reine Flächenanzahl reduzierte.

Innerhalb des komplexen Systems Wattenmeer befinden sich die morphodynamischen Faktoren im Gleichgewicht, Schwankungen in der Wellendynamik bzw. in hydrodynamischen Aktivitäten wirken sich dementsprechend auf die Oberflächenmorphologie und damit auch auf die Schill-Bedeckung aus.

Nach der vorliegenden Untersuchung spiegeln die eulitoralen Schill-Vorkommen des Gezeitenbereiches mit ihrer Zusammensetzung und räumlichen Verteilung neben den morphologischen, vor allem die vorherrschenden hydrodynamischen Bedingungen des Arbeitsgebietes wider.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mittels einer Luftbildkartierung eine bestehende Schlicküberdeckung der Schill-Flächen eine mögliche Fehlerquelle darstellen kann, die ohne entsprechende Verifizierung im Gelände zu einer erheblichen Fehlinterpretation führen könnte.

Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung und dessen Veränderung in Raum und Zeit nicht als zufälliges Ereignis zu deuten ist, sondern im engen Zusammenhang mit den hydrodynamischen Aktivitäten gekoppelt ist. Aufgrund von möglichen Interpretationsfehlern kann die Schill-Bedeckung innerhalb des Arbeitsgebietes ohne Geländevalidierung jedoch nur bedingt als natürlicher Indikator, sowohl lokal als auch regional für die Rekonstruktion von ehemaligen hydrodynamischen Intensitäten herangezogen werden.





## Literaturverzeichnis

- Abrahamse, J. (1984) Wattenmeer. 4. Auflage, Wachholtz-Verlag, Neumünster, 372 pp.
- Albertz, J. (1991) Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern - Eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 204 pp.
- Bonnot-Courtois, C., Fournier, J. & Dreau, A. (2004) Recent morphodynamics of shell banks in the western part of Mont-Saint-Michel Bay (France). *Geomorphologie*, 1, 65-80.
- Brett, C. E. (1995) Sequence stratigraphy, biostratigraphy, and taphonomy in shallow marine environments. *Palaios*, 10, 597-616.
- Brett, C. E. (1998) Sequence stratigraphy, paleoecology, and evolution; biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaios*, 13, 241-262.
- Brett, C. E. & Baird, G. C. (1986) Comparative taphonomy; a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, 1, 207-227.
- Brett, C. E. & Seilacher, A. (1991) Fossil-Lagerstätten: A taphonomic consequence of event sedimentation. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. 283-297, Springer, New York, Berlin, Heidelberg.
- Brockmann, C. (1993) Zur Nutzung des Thematic Mapper für die Ozeanographie. Ph. D. Thesis, GKKS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/56, 131 pp. Dissertation.
- Buchwald, K. (1990) Nordsee. Ein Lebensraum ohne Zukunft? Verlag Die Werkstatt, Göttingen, 552 pp.
- Dörjes, J., Gadow, S., Reineck, H.-E. & Singh, I. B. (1969) Die Rinnen der Jade (Südliche Nordsee). *Sedimente und Makrobenthos*. *Senckenberg Maritima*, 50, 5-62.
- Eastman, J. R. (1992) IDRISI Technical Reference and User's Guide, Version 4.0 (rev. 1). Clark University Graduate School of Geography, Worcester, USA, 213 pp.
- Flemming, B. W. (1992) Zur holozänen Entwicklung, Morphologie und faziellen Gliederung der Ostfriesischen Insel Spiekeroog (südliche Nordsee), Bericht 91/3, Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven, 51 pp.
- Flemming, B. W. & Davis Jr., R. A. (1994) Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima*, 24, 117-155.
- Flemming, B. W. & Ziegler, K. (1995) High resolution grain size distribution patterns and textural trends in the backbarrier environment of Spiekeroog island (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima*, 26, 1-24.
- Flessa, K. W. (1987) Paleocology and taphonomy of recent to pleistocene intertidal deposits Gulf of California. In: K. W. Flessa (Ed.), *Paleocology and taphonomy of recent to Pleistocene intertidal deposits, Gulf of California*. 2-33, Paleontological Society Special Publication, Tucson.
- Flessa, K. W. (2002) Conservation paleobiology. *American Paleontologists*, 10, 2-5.
- Fürsich, F. T. (1990) Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D. E. G. & Crowther, P. R. (Eds.), *Palaeobiology. A synthesis*, 235-239. Blackwell Scientific, Oxford.
- Fürsich, F. T. & Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: Paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. *Palaios*, 2, 543-559.

- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (1999) Genesis and environmental significance of upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145, 119-139.
- Fürsich, F. T. & Pandey, D. K. (2003) Sequence stratigraphic significance of sedimentary cycles and shell concentrations in the upper Jurassic lower Cretaceous of Kachchh, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 285-309.
- Gierloff-Emden, H. G. (1961) *Luftbild und Küstengeographie am Beispiel der deutschen Nordseeküste*. Selbstverlag des Instituts für Landeskunde in der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bad Godesberg, 117 pp.
- Göhren, H. (1975) Zur Dynamik und Morphologie der hohen Sandbänke im Wattenmeer zwischen Jade und Eider. *Die Küste*, 27, 28-49.
- Gross, M. F., Hardinsky, M. A., Klemas, V. & Wolf, P. L. (1987) Quantification of biomass of the marsh grass *Spartina alterniflora* Loisel using Landsat thematic mapper imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 1577-1583.
- Hallman, D. P., Flessa, K. W., Kowalewski, M., Hertweck, G., Aggen, J. A. & Carlton, J. (1996) Ternary taphograms and the comparative taphonomy of recent mollusks from the North Sea and the Gulf of California. *Senckenbergiana Maritima*, 27, 67-75.
- Helbig, C. (1987) Nationalpark "Niedersächsisches Wattenmeer" - eine Chance für den Naturschutz. *Natur und Landschaft*, 63, 47-52.
- Helbig, C. (1988) Partnerschaftsprogramm "Twinning of Coastal Sites" der Europäischen Gemeinschaft. *Natur und Landschaft*, 63, 115-118.
- Helbig, C. (1991) Zwischen Land und See. Nationalpark, 2/91, 60-63.
- Kaiser, R. (1992) Hydrodynamik als ökosystemarer Faktor in Wattgebieten. *Berichte aus der Ökosystemforschung*, Heft Nr. 1. Geschäftsstelle Ökosystemforschung Wattenmeer, Berlin, 108 pp.
- Kidwell, S. M. (1986) Models for fossil concentrations: Paleobiologic implications. *Palaeobiology*, 12, 6-24.
- Kidwell, S. M. (1991) Taphonomic feedback (live/dead interactions) in the genesis of bioclastic beds: Keys to reconstructing sedimentary dynamics. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. 268-282, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- Klemas, V., Dobson, J. E., Ferguson, R. L. & Haddad, K. D. (1993) A coastal land classification system for the NOAA coastwatch change analysis project. *Journal of Coastal Research*, 9, 862-872.
- Konecny, G. & Lehmann, G. (1984) *Photogrammetrie*. 4. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 392 pp.
- König, D. (1972) Deutung von Luftbildern des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Beispiele und Probleme. *Die Küste*, 22, 29-74.
- Kowalewski, M., Serrano, G. E. A., Flessa, K. W. & Goodfriend, G. A. (2000) Dead delta's former productivity: Two trillion shells at the mouth of the Colorado River. *Geology*, 28, 1059-1062.
- Kowalewski, M., Lasso, D. G. & Carroll, M. (2003) Quantitative fidelity of brachiopod-mollusk assemblages from modern subtidal environments of San Juan Islands, USA. *Journal of Taphonomy*, 1, 43-65.

- Krause, K. & Schneider, W. (1988) Fernerkundung, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Bildungsverlag Eins, Band 1, Bonn, 291 pp.
- Lassen, H. & Siefert, W. (1991) Mittlere Tidenwasserstände in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, 52, 85-137.
- Linke, O. (1939) Die Biota des Jadebusenwattes. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1, 201-348.
- Loewe, P., Becker, G., Brockmann, U., Frohse, A., Herklotz, K., Klein, H. & Schulz, A. (2003) Nordsee und Deutsche Bucht 2002. Ozeanischer Zustandsbericht. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 33/2003, Hamburg, 89 pp.
- Loewe, P., Schmolke, S., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Engelke, C., Frohse, A., Horn, W., Klein, H., Müller-Navarra, S., Nies, H., Schmelzer, N., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N. & Weigelt, S. (2005) Nordseezustand 2003. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 38/2005, Hamburg, 217 pp.
- Markwitz, W. & Winter, R. (1989) Fernerkundung, Daten und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 97 pp.
- Matteoda, A. & Klemas, V. (1989) Remote sensing. Can satellite technology contribute to a better understanding of estuarine process? Delaware Estuary Situation Report, Delaware, 8 pp.
- Meyer, C. & Ragutzki, G. (1999) KFKI Forschungsvorhaben Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse. Dienstbericht Forschungsstelle Küste, Norderney, 21, 38 pp.
- Michaelis, H. (1968) Biologisch-sedimentologische Untersuchung des Wurster Wattes von Spieker bis Arensch. Jahrbuch 1966, Forschungsstelle Küste, Norderney, 18, 23-34.
- Michaelis, H. (1987) Strukturveränderung der Wattfauna am Beispiel des Jadebusens. In: Umweltvorsorge Nordsee - Belastungen, Gütesituation, Maßnahmen (Niedersächsisches Umweltministerium, Hrsg.), Hannover, 151-161.
- Millat, G. (1996a) Entwicklung eines methodisch-inhaltlichen Konzeptes zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring im niedersächsischen Wattenmeer. Schriftenreihe der Nationalparkverwaltung „Niedersächsisches Wattenmeer“, 1, Wilhelmshaven, 125 pp.
- Millat, G. (1996b) Erfassung und Validierung von Luftbildinformationen und ihre Weiterverarbeitung mit dem Geographischen Informationssystem. Abschlußbericht des Teilprojektes A 1.3 der Ökosystemforschung Niedersächsisches Wattenmeer. UBA-Texte, Wilhelmshaven, 137 pp.
- Millat, G. (1998) Methodisch-inhaltliches Verfahren für den operationellen Einsatz von Fernerkundungsdaten im Wattenmeer. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaften, 20, 35-44.
- Müller, C. D. (1957) Biologische und sedimentologische Untersuchung des Cappeler Wattes. Jahrbuch 1957, Forschungsstelle Küste, Norderney, 9, 117-130.
- Müller, C. D. (1958) Biologische und sedimentologische Wattuntersuchung zwischen Westeraccumersiel und Neuharlingersiel an der ostfriesischen Küste. Jahrbuch 1958, Forschungsstelle Küste, Norderney, 10, 119 pp.
- Müller, C. D. (1962) Biologisch-sedimentologische Untersuchung der Wattveränderung 1955-1961 bei Wremen. Jahrbuch 1961, Forschungsstelle Küste, Norderney, 13, 188 pp.
- Müller, C. D. (1963) Das Watt an der Butjadinger Küste von Langwarden bis Tossens. Untersuchung von Fauna und Sediment und Folgerungen für den Küstenschutz. Jahrbuch 1962, Forschungsstelle Küste, Norderney, 14, 174 pp.

- Müller, C. D. (1964) Das ostfriesische Watt von Dornumersiel bis Norddeich. Eine biologisch-sedimentologische Untersuchung mit Folgerungen für den Küstenschutz. Jahrbuch 1963, Forschungsstelle Küste, Norderney, 15, 125 pp.
- Müller, C. D. (1966) Das ostfriesische Watt von Neuharlingersiel bis Harlesiel. Jahrbuch 1965, Forschungsstelle Küste, Norderney, 17, 154 pp.
- Neal, A., Richards, J. & Pye, K. (2002) Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Marine Geology*, 185, 435-469.
- Newton, R. S. & Werner, F. (1969) Luftbildanalyse und Sedimentgefüge als Hilfsmittel für das Strandtransportproblem im Wattgebiet Cuxhaven. *Hamburg Küstenforschung*, 8, 1-46.
- Niemeyer, H. D. (1983) Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. *BMFT-Forschungsbericht MF 203*, 235 pp.
- Niemeyer, H. D. (1984) Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn. *Jahresbericht 1985, Forschungsstelle Küste, Norderney*, 35, 85-137.
- Niemeyer, H. D. (1987a) Seegang und Biotopzonierung in Wattgebieten. In: *Niedersächsischer Umweltminister (Hersg.), Umweltvorsorge Nordsee - Belastungen - Gütesituation - Maßnahmen -*, Hildesheim, 171-184.
- Niemeyer, H. D. (1987b) Seegang und Strömung als ökologische Randbedingungen in Wattgebieten. In: *Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Grundlagen zur Reinhaltung der Küstengewässer. Aus- und Fortbildung in der niedersächsischen Wasserwirtschaft.* Hildesheim, 18-26.
- Niemeyer, H. D. & Kaiser, R. (1994) Hydrodynamik im Ökosystem Wattenmeer. *Ökosystemforschung Wattenmeer, Teilvorhaben Niedersächsisches Wattenmeer, Vorphase: UBA-Texte 26/94*, Berlin, 214 pp.
- Niemeyer, H. D., Goldenbogen, R., Schroeder, E. & Kunz, H. (1995) Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. *Die Küste*, 57, 66-93.
- Niemeyer, H. D., Brandt, G., Gärtner, J., Glaser, D., Grüne, J., Jensen, J. & Kaiser, R. (1996) Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. *Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 464 B - Teil 1, Berichte der Forschungsstelle Küste, Band 40*, 8-14.
- Niemeyer, H. D. & Kaiser, R. (1997) Hydrodynamik im Ökosystem Wattenmeer - Untersuchungsergebnisse für das Einzugsgebiet der Otzumer Balje im ostfriesischen Wattmeer. *Forschungsbericht 1080285/21, Umweltforschungsplan, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (unveröffentlicht)*, Berlin, 208 pp.
- Niemeyer, H. D. & Kaiser, R. (1998) Hydrodynamik als ökosystemarer Gestaltungsfaktor im Wattenmeer. *Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaften*, 20, 45-62.
- Nyandwi, N. & Flemming, B. W. (1995) A hydraulic model for the shore-normal energy gradient in the East Frisian Wadden Sea (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima*, 25, 163-171.
- Ragutzki, G. (1983) Verteilung und Eigenschaften der Wattsedimente des Jadebusens. *Jahrbuch 1982, Forschungsstelle Küstenschutz, Norderney*, 34, 115-134.
- Ragutzki, G. (1984) Untersuchung zur Sedimentverteilung auf den Leybucht-Watten im Zusammenhang mit dem Bauvorhaben Leyhörn. *Jahrbuch 1983, Forschungsstelle Küste, Norderney*, 35, 34-38.
- Reineck, H.-E. & Siefert, W. (1980) Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. *Die Küste*, 35, 26-51.

- Reineck, H.-E., Chen, C. & Wang, S. (1986) Die Rückseitenwatten zwischen Wangerooge und Festland, Nordsee. *Senckenbergiana Maritima*, 17, 241-252.
- Rhode, B. (1986) Langfristige Bestandsänderung der makrobenthischen Fauna im Watt bei Norderney: nondominante Arten. *Jahresbericht 1985, Forschungsstelle Küste, Norderney*, 37, 147-174.
- Schäfer, W. (1941) Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres – 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens – 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 457, 1-54.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea. *Process (K.) Nederlands Akademik Wetenschappen, (B)* 55, 500-516.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1953) Megaripples in the Dutch Wadden Sea and in the Basin of Arcachon (France). *Geologie en Mijnbouw*, 15, 1-11.
- Wen-Yao, L. & Klemas, V. (1988) Quantitative analysis of distribution of suspended sediments in the Yellow River estuary from MSS Data. *Geocarto International*, 1, 51-62.
- Wieczorek, U. (1982) Methodische Untersuchungen zur Analyse der Wattmorphologie aus Luftbildern mit Hilfe eines Verfahrens der digitalen Bildstrukturanalyse. *Münchener Geographische Abhandlungen. Band 27. Habilitationsschrift, Institut für Geographie der Universität München, Geobuch Verlag, München*, 208 pp.
- Wunderlich, F. (1979) Die Insel Mellum (Südliche Nordsee): Dynamische Prozesse und Sedimentgefüge – I. Südwatt, Übergangszone und Hochfläche. *Senckenbergiana Maritima*, 11, 59-113.



**Tafeln**  
**Kapitel 5**

### Tafel 5-1

**Bild A:** Für die Luftbild-Auswertungen wurde ein Aviopret APT-2 der Firma Leica verwendet (Foto: Hansa Luftbild).

**Bild B:** Kopierfolie mit den analog kartierten Schill-Flächen. Die so erstellte Schill-Verteilungskarte wurde anschließend für die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) digitalisiert (s. Bild C).

**Bild C:** Endergebnis einer digitalisierten Folie mit den kartierten Schill-Flächen (rot).

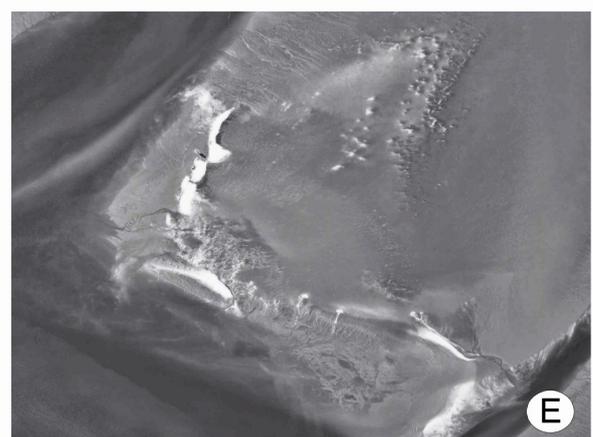
**Bild D:** Ausgewählter Ausschnitt mit Schill-Flächen auf dem Dorumer Wattgebiet im Jahr 1996. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

**Bild E:** Zunahme der Schill-Flächen auf dem Dorumer Wattgebiet im Jahr 2000. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

**Bild F:** Erneute Bedeckungszunahme der Schill-Fläche auf dem Dorumer Wattgebiet im Jahr 2005. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.



Tafel 5-1



## Tafel 5-2

**Bild A:** Ausgewählter Ausschnitt mit wenigen Schill-Flächen auf dem Sahlenburger Wattgebiet im Jahr 1996. Zwischen den beiden Prielen existiert noch kein Durchbruch. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

**Bild B:** Ausschnitt der Schill-Flächen auf dem Sahlenburger Wattgebiet im Jahr 2000. Zwischen den beiden Prielen hat sich ein Durchbruch gebildet. Vergrößert aus Luftbild 1:15000.

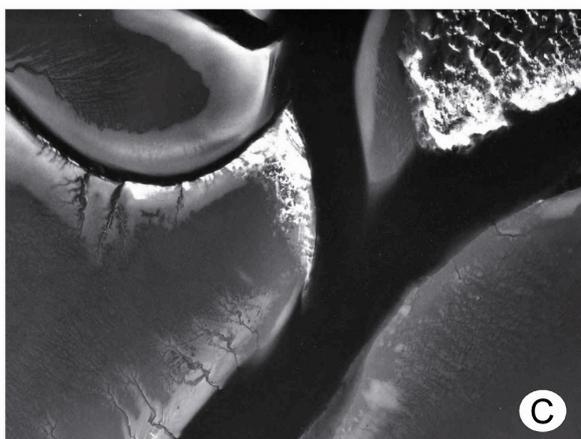
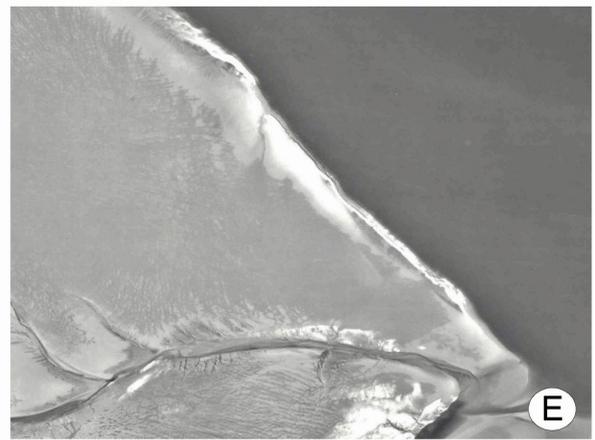
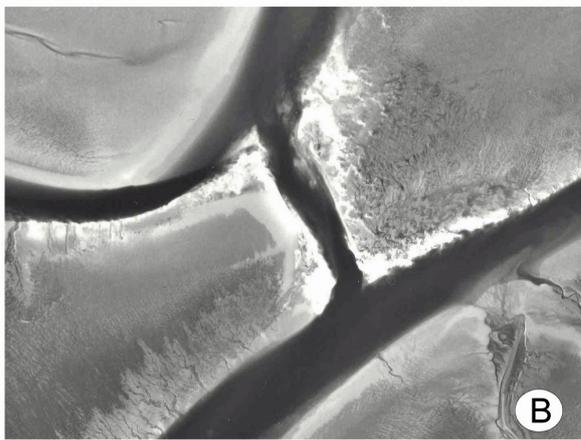
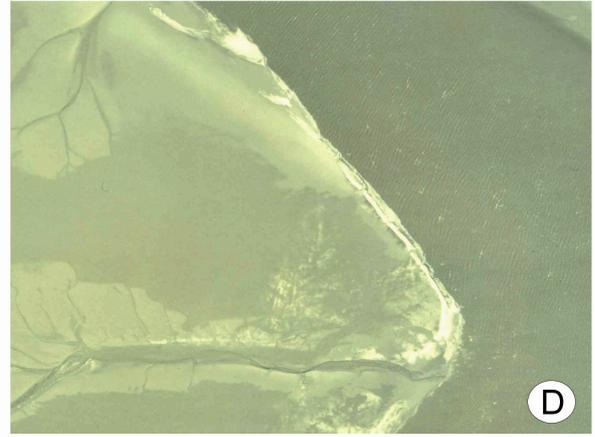
**Bild C:** Auf dem Sahlenburger Schill-Vorkommen hat die Schill-Bedeckung im Jahr 2005 deutlich zugenommen. Durchbruch zwischen beiden Prielen hat sich weiter vergrößert. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

**Bild D:** Ausgewählter Ausschnitt mit Schill-Flächen auf dem Fedderwarder Wattgebiet direkt am Prielrand des Fedderwarder Hauptpriels im Jahr 1996. Vergrößert aus Luftbild 1:15000.

**Bild E:** Zunahme der Schill-Bedeckung auf dem Fedderwarder Wattgebiet im Jahr 2000. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

**Bild F:** Weitere Zunahme der Schill-Bedeckung auf dem Fedderwarder Wattgebiet im Jahr 2005. Vergrößert aus Luftbild 1:15.000.

Tafel 5-2





# **Tabellenanhang**

## **Kapitel 5**

**Tab. 5-4b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum Januar bis Dezember.

Korrelation nach Pearson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 1996 N = 1388	sign. Wellenhöhe	1	,816(**)	,861(**)	,840(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,816(**)	1	,987(**)	,688(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,861(**)	,987(**)	1	,772(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,840(**)	,688(**)	,772(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1997 N = 1448	sign. Wellenhöhe	1	,772(**)	,794(**)	,887(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,772(**)	1	,992(**)	,669(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,794(**)	,992(**)	1	,717(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,887(**)	,669(**)	,717(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1998 N = 1752	sign. Wellenhöhe	1	,782(**)	,799(**)	,881(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,782(**)	1	,992(**)	,696(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,799(**)	,992(**)	1	,740(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,881(**)	,696(**)	,740(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1999 N = 2465	sign. Wellenhöhe	1	,854(**)	,885(**)	,819(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,854(**)	1	,990(**)	,680(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,885(**)	,990(**)	1	,757(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,819(**)	,680(**)	,757(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2000 N = 2356	sign. Wellenhöhe	1	,826(**)	,856(**)	,845(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,826(**)	1	,991(**)	,703(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,856(**)	,991(**)	1	,769(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,845(**)	,703(**)	,769(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2001 N = 2630	sign. Wellenhöhe	1	,766(**)	,793(**)	,861(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,766(**)	1	,992(**)	,666(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,793(**)	,992(**)	1	,722(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,861(**)	,666(**)	,722(**)	1
		0,000	0,000	0,000	

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Fortsetzung Tab. 5-4b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum Januar bis Dezember.

Korrelation nach Perarson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 2002 N = 2738	sign. Wellenhöhe	1	,744(**) 0,000	,494(**) 0,000	,827(**) 0,000
	Wellenperiode	,744(**) 0,000	1	,715(**) 0,000	,630(**) 0,000
	Wellenlänge	,494(**) 0,000	,715(**) 0,000	1	,448(**) 0,000
	Energiemaximum	,827(**) 0,000	,630(**) 0,000	,448(**) 0,000	1
Jahr 2003 N = 13837	sign. Wellenhöhe	1	,780(**) 0,000	,509(**) 0,000	,864(**) 0,000
	Wellenperiode	,780(**) 0,000	1	,744(**) 0,000	,668(**) 0,000
	Wellenlänge	,509(**) 0,000	,744(**) 0,000	1	,467(**) 0,000
	Energiemaximum	,864(**) 0,000	,668(**) 0,000	,467(**) 0,000	1
Jahr 2004 N = 16432	sign. Wellenhöhe	1	,795(**) 0,000	,601(**) 0,000	,839(**) 0,000
	Wellenperiode	,795(**) 0,000	1	,797(**) 0,000	,664(**) 0,000
	Wellenlänge	,601(**) 0,000	,797(**) 0,000	1	,517(**) 0,000
	Energiemaximum	,839(**) 0,000	,664(**) 0,000	,517(**) 0,000	1
Jahr 2005 N = 14993	sign. Wellenhöhe	1	,791(**) 0,000	,568(**) 0,000	,832(**) 0,000
	Wellenperiode	,791(**) 0,000	1	,763(**) 0,000	,648(**) 0,000
	Wellenlänge	,568(**) 0,000	,763(**) 0,000	1	,496(**) 0,000
	Energiemaximum	,832(**) 0,000	,648(**) 0,000	,496(**) 0,000	1

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Tab. 5-4c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	-2,69301	1,080	0,718	-7,135	1,749
	1998	-4,05547	1,033	0,080	-8,304	0,193
	1999	<b>-5,38928(*)</b>	0,965	0,000	-9,357	-1,421
	2000	<b>-4,35463(*)</b>	0,973	0,018	-8,356	-0,354
	2001	-3,85849	0,954	0,060	-7,781	0,064
	2002	<b>-11,53978(*)</b>	0,947	0,000	-15,436	-7,644
	2003	<b>-22,19972(*)</b>	0,809	0,000	-25,529	-18,871
	2004	<b>-27,96960(*)</b>	0,803	0,000	-31,275	-24,665
	2005	<b>-26,73995(*)</b>	0,806	0,000	-30,057	-23,423
1997	1996	2,69301	1,080	0,718	-1,749	7,135
	1998	-1,36246	1,021	0,994	-5,562	2,837
	1999	-2,69627	0,952	0,532	-6,611	1,219
	2000	-1,66162	0,960	0,964	-5,610	2,287
	2001	-1,16548	0,941	0,997	-5,035	2,704
	2002	<b>-8,84677(*)</b>	0,934	0,000	-12,689	-5,005
	2003	<b>-19,50670(*)</b>	0,794	0,000	-22,773	-16,241
	2004	<b>-25,27659(*)</b>	0,788	0,000	-28,518	-22,035
	2005	<b>-24,04694(*)</b>	0,791	0,000	-27,301	-20,793
1998	1996	4,05547	1,033	0,080	-0,193	8,304
	1997	1,36246	1,021	0,994	-2,837	5,562
	1999	-1,33381	0,898	0,988	-5,029	2,361
	2000	-0,29916	0,907	1,000	-4,029	3,431
	2001	0,19698	0,886	1,000	-3,449	3,843
	2002	<b>-7,48431(*)</b>	0,879	0,000	-11,102	-3,867
	2003	<b>-18,14424(*)</b>	0,729	0,000	-21,143	-15,146
	2004	<b>-23,91413(*)</b>	0,722	0,000	-26,886	-20,943
	2005	<b>-22,68448(*)</b>	0,726	0,000	-25,670	-19,699
1999	1996	<b>5,38928(*)</b>	0,965	0,000	1,421	9,357
	1997	2,69627	0,952	0,532	-1,219	6,611
	1998	1,33381	0,898	0,988	-2,361	5,029
	2000	1,03465	0,828	0,997	-2,372	4,441
	2001	1,53079	0,806	0,935	-1,784	4,846
	2002	<b>-6,15050(*)</b>	0,798	0,000	-9,434	-2,868
	2003	<b>-16,81043(*)</b>	0,628	0,000	-19,395	-14,225
	2004	<b>-22,58032(*)</b>	0,621	0,000	-25,134	-20,026
	2005	<b>-21,35067(*)</b>	0,625	0,000	-23,921	-18,781
2000	1996	<b>4,35463(*)</b>	0,973	0,018	0,354	8,356
	1997	1,66162	0,960	0,964	-2,287	5,610
	1998	0,29916	0,907	1,000	-3,431	4,029
	1999	-1,03465	0,828	0,997	-4,441	2,372
	2001	0,49614	0,815	1,000	-2,858	3,850
	2002	<b>-7,18515(*)</b>	0,808	0,000	-10,508	-3,862
	2003	<b>-17,84508(*)</b>	0,641	0,000	-20,480	-15,210
	2004	<b>-23,61497(*)</b>	0,633	0,000	-26,220	-21,010
	2005	<b>-22,38532(*)</b>	0,637	0,000	-25,006	-19,765

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.



**Fortsetzung Tab. 5-4c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	3,858	0,954	0,060	-0,064	7,781
	1997	1,165	0,941	0,997	-2,704	5,035
	1998	-0,197	0,886	1,000	-3,843	3,449
	1999	-1,531	0,806	0,935	-4,846	1,784
	2000	-0,496	0,815	1,000	-3,850	2,858
	2002	<b>-7,68129(*)</b>	0,785	0,000	-10,910	-4,453
	2003	<b>-18,34122(*)</b>	0,611	0,000	-20,856	-15,826
	2004	<b>-24,11111(*)</b>	0,604	0,000	-26,594	-21,628
	2005	<b>-22,88146(*)</b>	0,608	0,000	-25,381	-20,382
2002	1996	<b>11,53978(*)</b>	0,947	0,000	7,644	15,436
	1997	<b>8,84677(*)</b>	0,934	0,000	5,005	12,689
	1998	<b>7,48431(*)</b>	0,879	0,000	3,867	11,102
	1999	<b>6,15050(*)</b>	0,798	0,000	2,868	9,434
	2000	<b>7,18515(*)</b>	0,808	0,000	3,862	10,508
	2001	<b>7,68129(*)</b>	0,785	0,000	4,453	10,910
	2003	<b>-10,65993(*)</b>	0,601	0,000	-13,133	-8,187
	2004	<b>-16,42982(*)</b>	0,593	0,000	-18,871	-13,989
	2005	<b>-15,20017(*)</b>	0,597	0,000	-17,658	-12,743
2003	1996	<b>22,19972(*)</b>	0,809	0,000	18,871	25,529
	1997	<b>19,50670(*)</b>	0,794	0,000	16,241	22,773
	1998	<b>18,14424(*)</b>	0,729	0,000	15,146	21,143
	1999	<b>16,81043(*)</b>	0,628	0,000	14,225	19,395
	2000	<b>17,84508(*)</b>	0,641	0,000	15,210	20,480
	2001	<b>18,34122(*)</b>	0,611	0,000	15,826	20,856
	2002	<b>10,65993(*)</b>	0,601	0,000	8,187	13,133
	2004	<b>-5,76989(*)</b>	0,332	0,000	-7,134	-4,406
	2005	<b>-4,54024(*)</b>	0,339	0,000	-5,934	-3,146
2004	1996	<b>27,96960(*)</b>	0,803	0,000	24,665	31,275
	1997	<b>25,27659(*)</b>	0,788	0,000	22,035	28,518
	1998	<b>23,91413(*)</b>	0,722	0,000	20,943	26,886
	1999	<b>22,58032(*)</b>	0,621	0,000	20,026	25,134
	2000	<b>23,61497(*)</b>	0,633	0,000	21,010	26,220
	2001	<b>24,11111(*)</b>	0,604	0,000	21,628	26,594
	2002	<b>16,42982(*)</b>	0,593	0,000	13,989	18,871
	2003	<b>5,76989(*)</b>	0,332	0,000	4,406	7,134
	2005	1,230	0,325	0,111	-0,106	2,565
2005	1996	<b>26,73995(*)</b>	0,806	0,000	23,423	30,057
	1997	<b>24,04694(*)</b>	0,791	0,000	20,793	27,301
	1998	<b>22,68448(*)</b>	0,726	0,000	19,699	25,670
	1999	<b>21,35067(*)</b>	0,625	0,000	18,781	23,921
	2000	<b>22,38532(*)</b>	0,637	0,000	19,765	25,006
	2001	<b>22,88146(*)</b>	0,608	0,000	20,382	25,381
	2002	<b>15,20017(*)</b>	0,597	0,000	12,743	17,658
	2003	<b>4,54024(*)</b>	0,339	0,000	3,146	5,934
	2004	-1,230	0,325	0,111	-2,565	0,106

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-4d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	0,017	0,027	1,000	-0,095	0,128
	1998	<b>-0,1491(*)</b>	0,026	0,000	-0,256	-0,043
	1999	<b>-,24342(*)</b>	0,024	0,000	-0,343	-0,144
	2000	<b>-,17228*</b>	0,024	0,000	-0,273	-0,072
	2001	-0,059	0,024	0,721	-0,158	0,039
	2002	0,066	0,024	0,555	-0,031	0,164
	2003	-0,007	0,020	1,000	-0,090	0,077
	2004	<b>-,16326(*)</b>	0,020	0,000	-0,246	-0,080
	2005	<b>-,11906(*)</b>	0,020	0,000	-0,202	-0,036
1997	1996	-0,017	0,027	1,000	-0,128	0,095
	1998	<b>-,16584(*)</b>	0,026	0,000	-0,271	-0,061
	1999	<b>-,26012(*)</b>	0,024	0,000	-0,358	-0,162
	2000	<b>-,18898(*)</b>	0,024	0,000	-0,288	-0,090
	2001	-0,076	0,024	0,317	-0,173	0,021
	2002	0,050	0,023	0,876	-0,047	0,146
	2003	-0,024	0,020	0,998	-0,105	0,058
	2004	<b>-,17996(*)</b>	0,020	0,000	-0,261	-0,099
	2005	<b>-,13576(*)</b>	0,020	0,000	-0,217	-0,054
1998	1996	<b>,14914(*)</b>	0,026	0,000	0,043	0,256
	1997	<b>,16584(*)</b>	0,026	0,000	0,061	0,271
	1999	<b>-,09427(*)</b>	0,023	0,041	-0,187	-0,002
	2000	-0,023	0,023	0,999	-0,117	0,070
	2001	0,090	0,022	0,061	-0,002	0,181
	2002	<b>,21544(*)</b>	0,022	0,000	0,125	0,306
	2003	<b>,14230(*)</b>	0,018	0,000	0,067	0,218
	2004	-0,014	0,018	1,000	-0,089	0,060
	2005	0,030	0,018	0,974	-0,045	0,105
1999	1996	<b>,24342(*)</b>	0,024	0,000	0,144	0,343
	1997	<b>,26012(*)</b>	0,024	0,000	0,162	0,358
	1998	<b>,09427(*)</b>	0,023	0,041	0,002	0,187
	2000	0,071	0,021	0,228	-0,014	0,157
	2001	<b>,18397(*)</b>	0,020	0,000	0,101	0,267
	2002	<b>,30971(*)</b>	0,020	0,000	0,227	0,392
	2003	<b>,23657(*)</b>	0,016	0,000	0,172	0,301
	2004	<b>,08016(*)</b>	0,016	0,002	0,016	0,144
	2005	<b>,12436(*)</b>	0,016	0,000	0,060	0,189
2000	1996	<b>,17228(*)</b>	0,024	0,000	0,072	0,273
	1997	<b>,18898(*)</b>	0,024	0,000	0,090	0,288
	1998	0,023	0,023	0,999	-0,070	0,117
	1999	-0,071	0,021	0,228	-0,157	0,014
	2001	<b>,11283(*)</b>	0,020	0,000	0,029	0,197
	2002	<b>,23857(*)</b>	0,020	0,000	0,155	0,322
	2003	<b>,16543(*)</b>	0,016	0,000	0,099	0,232
	2004	0,009	0,016	1,000	-0,056	0,074
	2005	0,053	0,016	0,268	-0,013	0,119

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-4d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	0,059	0,024	0,721	-0,039	0,158
	1997	0,076	0,024	0,317	-0,021	0,173
	1998	-0,090	0,022	0,061	-0,181	0,002
	1999	<b>-,18397(*)</b>	0,020	0,000	-0,267	-0,101
	2000	<b>-,11283(*)</b>	0,020	0,000	-0,197	-0,029
	2002	<b>,12574(*)</b>	0,020	0,000	0,045	0,207
	2003	0,053	0,015	0,226	-0,010	0,116
	2004	<b>-,10381(*)</b>	0,015	0,000	-0,166	-0,042
	2005	-0,060	0,015	0,083	-0,122	0,003
2002	1996	-0,066	0,024	0,555	-0,164	0,031
	1997	-0,050	0,023	0,876	-0,146	0,047
	1998	<b>-,21544(*)</b>	0,022	0,000	-0,306	-0,125
	1999	<b>-,30971(*)</b>	0,020	0,000	-0,392	-0,227
	2000	<b>-,23857(*)</b>	0,020	0,000	-0,322	-0,155
	2001	<b>-,12574(*)</b>	0,020	0,000	-0,207	-0,045
	2003	<b>-,07314(*)</b>	0,015	0,005	-0,135	-0,011
	2004	<b>-,22955(*)</b>	0,015	0,000	-0,291	-0,168
	2005	<b>-,18535(*)</b>	0,015	0,000	-0,247	-0,124
2003	1996	0,007	0,020	1,000	-0,077	0,090
	1997	0,024	0,020	0,998	-0,058	0,105
	1998	<b>-,14230(*)</b>	0,018	0,000	-0,218	-0,067
	1999	<b>-,23657(*)</b>	0,016	0,000	-0,301	-0,172
	2000	<b>-,16543(*)</b>	0,016	0,000	-0,232	-0,099
	2001	-0,053	0,015	0,226	-0,116	0,010
	2002	<b>,07314(*)</b>	0,015	0,005	0,011	0,135
	2004	<b>-,15642(*)</b>	0,008	0,000	-0,191	-0,122
	2005	<b>-,11222(*)</b>	0,008	0,000	-0,147	-0,077
2004	1996	<b>,16326(*)</b>	0,020	0,000	0,080	0,246
	1997	<b>,17996(*)</b>	0,020	0,000	0,099	0,261
	1998	0,014	0,018	1,000	-0,060	0,089
	1999	<b>-,08016(*)</b>	0,016	0,002	-0,144	-0,016
	2000	-0,009	0,016	1,000	-0,074	0,056
	2001	<b>,10381(*)</b>	0,015	0,000	0,042	0,166
	2002	<b>,22955(*)</b>	0,015	0,000	0,168	0,291
	2003	<b>,15642(*)</b>	0,008	0,000	0,122	0,191
	2005	<b>,04420(*)</b>	0,008	0,001	0,011	0,078
2005	1996	<b>,11906(*)</b>	0,020	0,000	0,036	0,202
	1997	<b>,13576(*)</b>	0,020	0,000	0,054	0,217
	1998	-0,030	0,018	0,974	-0,105	0,045
	1999	<b>-,12436(*)</b>	0,016	0,000	-0,189	-0,060
	2000	-0,053	0,016	0,268	-0,119	0,013
	2001	0,060	0,015	0,083	-0,003	0,122
	2002	<b>,18535(*)</b>	0,015	0,000	0,124	0,247
	2003	<b>,11222(*)</b>	0,008	0,000	0,077	0,147
	2004	<b>-,04420(*)</b>	0,008	0,001	-0,078	-0,011

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-4e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenperiode für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	<b>-,22289(*)</b>	0,038	0,000	-0,380	-0,066
	1998	<b>-,34242(*)</b>	0,037	0,000	-0,493	-0,192
	1999	<b>-,40577(*)</b>	0,034	0,000	-0,546	-0,265
	2000	<b>-,34164(*)</b>	0,034	0,000	-0,483	-0,200
	2001	<b>-,31001(*)</b>	0,034	0,000	-0,449	-0,171
	2002	<b>-,18170(*)</b>	0,034	0,001	-0,320	-0,044
	2003	<b>-,13300(*)</b>	0,029	0,010	-0,251	-0,015
	2004	<b>-,38664(*)</b>	0,028	0,000	-0,504	-0,270
1997	1996	<b>,22289(*)</b>	0,038	0,000	0,066	0,380
	1998	-0,120	0,036	0,279	-0,268	0,029
	1999	<b>-,18288(*)</b>	0,034	0,001	-0,321	-0,044
	2000	-0,119	0,034	0,201	-0,259	0,021
	2001	-0,087	0,033	0,653	-0,224	0,050
	2002	0,041	0,033	0,997	-0,095	0,177
	2003	0,090	0,028	0,332	-0,026	0,206
	2004	<b>-,16375(*)</b>	0,028	0,000	-0,279	-0,049
1998	1996	<b>,34242(*)</b>	0,037	0,000	0,192	0,493
	1997	0,120	0,036	0,279	-0,029	0,268
	1999	-0,063	0,032	0,913	-0,194	0,067
	2000	0,001	0,032	1,000	-0,131	0,133
	2001	0,032	0,031	0,999	-0,097	0,162
	2002	<b>,16072(*)</b>	0,031	0,002	0,033	0,289
	2003	<b>,20942(*)</b>	0,026	0,000	0,103	0,316
	2004	-0,044	0,026	0,965	-0,149	0,061
1999	1996	<b>,40577(*)</b>	0,034	0,000	0,265	0,546
	1997	<b>,18288(*)</b>	0,034	0,001	0,044	0,321
	1998	0,063	0,032	0,913	-0,067	0,194
	2000	0,064	0,029	0,852	-0,056	0,185
	2001	0,096	0,029	0,257	-0,022	0,213
	2002	<b>,22407(*)</b>	0,028	0,000	0,108	0,340
	2003	<b>,27277(*)</b>	0,022	0,000	0,181	0,364
	2004	0,019	0,022	1,000	-0,071	0,110
2000	1996	<b>,34164(*)</b>	0,034	0,000	0,200	0,483
	1997	0,119	0,034	0,201	-0,021	0,259
	1998	-0,001	0,032	1,000	-0,133	0,131
	1999	-0,064	0,029	0,852	-0,185	0,056
	2001	0,032	0,029	0,999	-0,087	0,150
	2002	<b>,15994(*)</b>	0,029	0,000	0,042	0,278
	2003	<b>,20864(*)</b>	0,023	0,000	0,115	0,302
	2004	-0,045	0,022	0,909	-0,137	0,047
2005		-0,004	0,023	1,000	-0,097	0,089

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-4e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenperiode für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	<b>,31001(*)</b>	0,034	0,000	0,171	0,449
	1997	0,087	0,033	0,653	-0,050	0,224
	1998	-0,032	0,031	0,999	-0,162	0,097
	1999	-0,096	0,029	0,257	-0,213	0,022
	2000	-0,032	0,029	0,999	-0,150	0,087
	2002	<b>,12831(*)</b>	0,028	0,011	0,014	0,243
	2003	<b>,17701(*)</b>	0,022	0,000	0,088	0,266
	2004	-0,077	0,021	0,169	-0,165	0,011
	2005	-0,036	0,022	0,973	-0,124	0,053
2002	1996	<b>,18170(*)</b>	0,034	0,001	0,044	0,320
	1997	-0,041	0,033	0,997	-0,177	0,095
	1998	<b>-,16072(*)</b>	0,031	0,002	-0,289	-0,033
	1999	<b>-,22407(*)</b>	0,028	0,000	-0,340	-0,108
	2000	<b>-,15994(*)</b>	0,029	0,000	-0,278	-0,042
	2001	<b>-,12831(*)</b>	0,028	0,011	-0,243	-0,014
	2003	0,049	0,021	0,813	-0,039	0,136
	2004	<b>-,20494(*)</b>	0,021	0,000	-0,291	-0,119
	2005	<b>-,16409(*)</b>	0,021	0,000	-0,251	-0,077
2003	1996	<b>,13300(*)</b>	0,029	0,010	0,015	0,251
	1997	-0,090	0,028	0,332	-0,206	0,026
	1998	<b>-,20942(*)</b>	0,026	0,000	-0,316	-0,103
	1999	<b>-,27277(*)</b>	0,022	0,000	-0,364	-0,181
	2000	<b>-,20864(*)</b>	0,023	0,000	-0,302	-0,115
	2001	<b>-,17701(*)</b>	0,022	0,000	-0,266	-0,088
	2002	-0,049	0,021	0,813	-0,136	0,039
	2004	<b>-,25364(*)</b>	0,012	0,000	-0,302	-0,205
	2005	<b>-,21279(*)</b>	0,012	0,000	-0,262	-0,164
2004	1996	<b>,38664(*)</b>	0,028	0,000	0,270	0,504
	1997	<b>,16375(*)</b>	0,028	0,000	0,049	0,279
	1998	0,044	0,026	0,965	-0,061	0,149
	1999	-0,019	0,022	1,000	-0,110	0,071
	2000	0,045	0,022	0,909	-0,047	0,137
	2001	0,077	0,021	0,169	-0,011	0,165
	2002	<b>,20494(*)</b>	0,021	0,000	0,119	0,291
	2003	<b>,25364(*)</b>	0,012	0,000	0,205	0,302
	2005	0,041	0,011	0,179	-0,006	0,088
2005	1996	<b>,34578(*)</b>	0,029	0,000	0,228	0,463
	1997	<b>,12290(*)</b>	0,028	0,023	0,008	0,238
	1998	0,003	0,026	1,000	-0,102	0,109
	1999	-0,060	0,022	0,600	-0,151	0,031
	2000	0,004	0,023	1,000	-0,089	0,097
	2001	0,036	0,022	0,973	-0,053	0,124
	2002	<b>,16409(*)</b>	0,021	0,000	0,077	0,251
	2003	<b>,21279(*)</b>	0,012	0,000	0,164	0,262
	2004	-0,041	0,011	0,179	-0,088	0,006

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-4f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	0,466	0,116	0,067	-0,013	0,945
	1998	0,210514	0,111	0,937	-0,248	0,669
	1999	<b>-,653093(*)</b>	0,104	0,000	-1,081	-0,225
	2000	-0,24789	0,105	0,781	-0,679	0,184
	2001	0,209	0,103	0,901	-0,214	0,633
	2002	<b>,432464(*)</b>	0,102	0,036	0,012	0,853
	2003	<b>,506183(*)</b>	0,087	0,000	0,147	0,865
	2004	0,086	0,087	0,999	-0,271	0,442
	2005	0,176	0,087	0,904	-0,182	0,534
1997	1996	-0,466	0,116	0,067	-0,945	0,013
	1998	-0,255	0,110	0,800	-0,708	0,198
	1999	<b>-1,118947(*)</b>	0,103	0,000	-1,541	-0,697
	2000	<b>-,713745(*)</b>	0,104	0,000	-1,140	-0,288
	2001	-0,256	0,101	0,700	-0,674	0,161
	2002	-0,033	0,101	1,000	-0,448	0,381
	2003	0,040	0,086	1,000	-0,312	0,393
	2004	<b>-,380039(*)</b>	0,085	0,018	-0,730	-0,030
	2005	-0,290	0,085	0,241	-0,641	0,061
1998	1996	-0,211	0,111	0,937	-0,669	0,248
	1997	0,255	0,110	0,800	-0,198	0,708
	1999	<b>-,863607(*)</b>	0,097	0,000	-1,262	-0,465
	2000	<b>-,458404(*)</b>	0,098	0,009	-0,861	-0,056
	2001	-0,001	0,096	1,000	-0,394	0,392
	2002	0,222	0,095	0,791	-0,168	0,612
	2003	0,296	0,079	0,117	-0,028	0,619
	2004	-0,125	0,078	0,979	-0,445	0,196
	2005	-0,034	0,078	1,000	-0,356	0,288
1999	1996	<b>,653093(*)</b>	0,104	0,000	0,225	1,081
	1997	<b>1,118947(*)</b>	0,103	0,000	0,697	1,541
	1998	<b>,863607(*)</b>	0,097	0,000	0,465	1,262
	2000	<b>,405203(*)</b>	0,089	0,015	0,038	0,773
	2001	<b>,862528(*)</b>	0,087	0,000	0,505	1,220
	2002	<b>1,085557(*)</b>	0,086	0,000	0,732	1,440
	2003	<b>1,159276(*)</b>	0,068	0,000	0,881	1,438
	2004	<b>,738909(*)</b>	0,067	0,000	0,463	1,014
	2005	<b>,829274(*)</b>	0,067	0,000	0,552	1,106
2000	1996	0,248	0,105	0,781	-0,184	0,679
	1997	<b>,713745(*)</b>	0,104	0,000	0,288	1,140
	1998	<b>,458404(*)</b>	0,098	0,009	0,056	0,861
	1999	<b>-,405203(*)</b>	0,089	0,015	-0,773	-0,038
	2001	<b>,457326(*)</b>	0,088	0,001	0,096	0,819
	2002	<b>,680354(*)</b>	0,087	0,000	0,322	1,039
	2003	<b>,754073(*)</b>	0,069	0,000	0,470	1,038
	2004	<b>,333706(*)</b>	0,068	0,005	0,053	0,615
	2005	<b>,424071(*)</b>	0,069	0,000	0,141	0,707

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-4f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum Januar bis Dezember unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	-0,209	0,103	0,901	-0,633	0,214
	1997	0,256	0,101	0,700	-0,161	0,674
	1998	0,001	0,096	1,000	-0,392	0,394
	1999	<b>-0,862528(*)</b>	0,087	0,000	-1,220	-0,505
	2000	<b>-0,457326(*)</b>	0,088	0,001	-0,819	-0,096
	2002	0,223	0,085	0,643	-0,125	0,571
	2003	<b>0,296747(*)</b>	0,066	0,016	0,025	0,568
	2004	-0,124	0,065	0,935	-0,391	0,144
	2005	-0,033	0,066	1,000	-0,303	0,236
2002	1996	<b>-0,432464(*)</b>	0,102	0,036	-0,853	-0,012
	1997	0,033	0,101	1,000	-0,381	0,448
	1998	-0,222	0,095	0,791	-0,612	0,168
	1999	<b>-1,085557(*)</b>	0,086	0,000	-1,440	-0,732
	2000	<b>-0,680354(*)</b>	0,087	0,000	-1,039	-0,322
	2001	<b>-0,223</b>	0,085	0,643	-0,571	0,125
	2003	0,074	0,065	0,998	-0,193	0,340
	2004	<b>-0,346648(*)</b>	0,064	0,001	-0,610	-0,083
	2005	-0,256	0,064	0,071	-0,521	0,009
2003	1996	<b>-0,506183(*)</b>	0,087	0,000	-0,865	-0,147
	1997	-0,040	0,086	1,000	-0,393	0,312
	1998	-0,296	0,079	0,117	-0,619	0,028
	1999	<b>-1,159276(*)</b>	0,068	0,000	-1,438	-0,881
	2000	<b>-0,754073(*)</b>	0,069	0,000	-1,038	-0,470
	2001	<b>-0,296747(*)</b>	0,066	0,016	-0,568	-0,025
	2002	-0,074	0,065	0,998	-0,340	0,193
	2004	<b>-0,420367(*)</b>	0,036	0,000	-0,568	-0,273
	2005	<b>-0,330002(*)</b>	0,037	0,000	-0,480	-0,180
2004	1996	-0,086	0,087	0,999	-0,442	0,271
	1997	<b>0,380039(*)</b>	0,085	0,018	0,030	0,730
	1998	0,125	0,078	0,979	-0,196	0,445
	1999	<b>-0,738909(*)</b>	0,067	0,000	-1,014	-0,463
	2000	<b>-0,333706(*)</b>	0,068	0,005	-0,615	-0,053
	2001	0,124	0,065	0,935	-0,144	0,391
	2002	<b>0,346648(*)</b>	0,064	0,001	0,083	0,610
	2003	<b>0,420367(*)</b>	0,036	0,000	0,273	0,568
	2005	0,090	0,035	0,672	-0,054	0,234
2005	1996	-0,176	0,087	0,904	-0,534	0,182
	1997	0,290	0,085	0,241	-0,061	0,641
	1998	0,034	0,078	1,000	-0,288	0,356
	1999	<b>-0,829274(*)</b>	0,067	0,000	-1,106	-0,552
	2000	<b>-0,424071(*)</b>	0,069	0,000	-0,707	-0,141
	2001	0,033	0,066	1,000	-0,236	0,303
	2002	0,256	0,064	0,071	-0,009	0,521
	2003	<b>0,330002(*)</b>	0,037	0,000	0,180	0,480
	2004	-0,090	0,035	0,672	-0,234	0,054

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-5b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum März bis August.

Korrelation nach Pearson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 1996 N = 1388	sign. Wellenhöhe	1	,632(**)	,655(**)	,904(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,632(**)	1	,992(**)	,618(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,655(**)	,992(**)	1	,659(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,904(**)	,618(**)	,659(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1997 N = 1448	sign. Wellenhöhe	1	,754(**)	,780(**)	,878(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,754(**)	1	,992(**)	,645(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,780(**)	,992(**)	1	,696(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,878(**)	,645(**)	,696(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1998 N = 1752	sign. Wellenhöhe	1	,763(**)	,780(**)	,882(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,763(**)	1	,993(**)	,682(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,780(**)	,993(**)	1	,723(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,882(**)	,682(**)	,723(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1999 N = 2465	sign. Wellenhöhe	1	,683(**)	,698(**)	,873(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,683(**)	1	,993(**)	,616(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,698(**)	,993(**)	1	,653(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,873(**)	,616(**)	,653(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2000 N = 2356	sign. Wellenhöhe	1	,609(**)	,623(**)	,848(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,609(**)	1	,994(**)	,538(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,623(**)	,994(**)	1	,573(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,848(**)	,538(**)	,573(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2001 N = 2630	sign. Wellenhöhe	1	,668(**)	,688(**)	,888(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,668(**)	1	,992(**)	,620(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,688(**)	,992(**)	1	,663(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,888(**)	,620(**)	,663(**)	1
		0,000	0,000	0,000	

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).



**Fortsetzung Tab. 5-5b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum März bis August.

Korrelation nach Pearson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 2002 N = 2738	sign. Wellenhöhe	1	,685(**)	,466(**)	,867(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,685(**)	1	,716(**)	,601(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,466(**)	,716(**)	1	,411(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,867(**)	,601(**)	,411(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2003 N = 13837	sign. Wellenhöhe	1	,720(**)	,344(**)	,899(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,720(**)	1	,636(**)	,662(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,344(**)	,636(**)	1	,359(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,899(**)	,662(**)	,359(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2004 N = 16432	sign. Wellenhöhe	1	,766(**)	,491(**)	,849(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,766(**)	1	,714(**)	,653(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,491(**)	,714(**)	1	,454(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,849(**)	,653(**)	,454(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2005 N = 14993	sign. Wellenhöhe	1	,721(**)	,454(**)	,841(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,721(**)	1	,733(**)	,608(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,454(**)	,733(**)	1	,414(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,841(**)	,608(**)	,414(**)	1
		0,000	0,000	0,000	

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Tab. 5-5c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	-2,411	1,204	0,911	-7,365	2,544
	1998	<b>-5,07839(*)</b>	1,154	0,022	-9,827	-0,330
	1999	-1,98559	1,200	0,974	-6,922	2,950
	2000	-3,05683	1,227	0,719	-8,103	1,989
	2001	-2,791	1,178	0,778	-7,639	2,056
	2002	<b>-10,33000(*)</b>	1,155	0,000	-15,081	-5,579
	2003	<b>-21,31623(*)</b>	0,995	0,000	-25,408	-17,225
	2004	<b>-23,02180(*)</b>	0,986	0,000	-27,076	-18,968
	2005	<b>-25,67125(*)</b>	0,985	0,000	-29,724	-21,619
1997	1996	2,411	1,204	0,911	-2,544	7,365
	1998	-2,668	0,995	0,617	-6,759	1,424
	1999	0,425	1,047	1,000	-3,883	4,733
	2000	-0,646	1,078	1,000	-5,079	3,787
	2001	-0,380	1,023	1,000	-4,587	3,826
	2002	<b>-7,91913(*)</b>	0,995	0,000	-12,013	-3,825
	2003	<b>-18,90536(*)</b>	0,804	0,000	-22,212	-15,599
	2004	<b>-20,61092(*)</b>	0,793	0,000	-23,871	-17,351
	2005	<b>-23,26037(*)</b>	0,792	0,000	-26,519	-20,002
1998	1996	<b>5,07839(*)</b>	1,154	0,022	0,330	9,827
	1997	2,668	0,995	0,617	-1,424	6,759
	1999	3,093	0,989	0,369	-0,976	7,162
	2000	2,022	1,021	0,917	-2,180	6,223
	2001	2,287	0,963	0,775	-1,674	6,248
	2002	<b>-5,25161(*)</b>	0,934	0,000	-9,094	-1,410
	2003	<b>-16,23784(*)</b>	0,727	0,000	-19,227	-13,249
	2004	<b>-17,94340(*)</b>	0,714	0,000	-20,881	-15,006
	2005	<b>-20,59286(*)</b>	0,714	0,000	-23,529	-17,657
1999	1996	1,986	1,200	0,974	-2,950	6,922
	1997	-0,425	1,047	1,000	-4,733	3,883
	1998	-3,093	0,989	0,369	-7,162	0,976
	2000	-1,071	1,073	0,999	-5,484	3,341
	2001	-0,806	1,017	1,000	-4,990	3,379
	2002	<b>-8,34442(*)</b>	0,990	0,000	-12,416	-4,273
	2003	<b>-19,33065(*)</b>	0,797	0,000	-22,610	-16,052
	2004	<b>-21,03621(*)</b>	0,786	0,000	-24,268	-17,804
	2005	<b>-23,68566(*)</b>	0,785	0,000	-26,916	-20,455
2000	1996	3,057	1,227	0,719	-1,989	8,103
	1997	0,646	1,078	1,000	-3,787	5,079
	1998	-2,022	1,021	0,917	-6,223	2,180
	1999	1,071	1,073	0,999	-3,341	5,484
	2001	0,266	1,049	1,000	-4,048	4,579
	2002	<b>-7,27317(*)</b>	1,022	0,000	-11,477	-3,069
	2003	<b>-18,25940(*)</b>	0,837	0,000	-21,701	-14,817
	2004	<b>-19,96497(*)</b>	0,826	0,000	-23,362	-16,568
	2005	<b>-22,61442(*)</b>	0,825	0,000	-26,010	-19,219

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-5c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	2,791	1,178	0,778	-2,056	7,639
	1997	0,380	1,023	1,000	-3,826	4,587
	1998	-2,287	0,963	0,775	-6,248	1,674
	1999	0,806	1,017	1,000	-3,379	4,990
	2000	-0,266	1,049	1,000	-4,579	4,048
	2002	<b>-7,53868(*)</b>	0,964	0,000	-11,503	-3,575
	2003	<b>-18,52491(*)</b>	0,764	0,000	-21,669	-15,381
	2004	<b>-20,23048(*)</b>	0,752	0,000	-23,326	-17,135
	2005	<b>-22,87993(*)</b>	0,752	0,000	-25,973	-19,787
2002	1996	<b>10,33000(*)</b>	1,155	0,000	5,579	15,081
	1997	<b>7,91913(*)</b>	0,995	0,000	3,825	12,013
	1998	<b>5,25161(*)</b>	0,934	0,000	1,410	9,094
	1999	<b>8,34442(*)</b>	0,990	0,000	4,273	12,416
	2000	<b>7,27317(*)</b>	1,022	0,000	3,069	11,477
	2001	<b>7,53868(*)</b>	0,964	0,000	3,575	11,503
	2003	<b>-10,98623(*)</b>	0,728	0,000	-13,979	-7,994
	2004	<b>-12,69179(*)</b>	0,715	0,000	-15,633	-9,751
	2005	<b>-15,34125(*)</b>	0,715	0,000	-18,280	-12,402
2003	1996	<b>21,31623(*)</b>	0,995	0,000	17,225	25,408
	1997	<b>18,90536(*)</b>	0,804	0,000	15,599	22,212
	1998	<b>16,23784(*)</b>	0,727	0,000	13,249	19,227
	1999	<b>19,33065(*)</b>	0,797	0,000	16,052	22,610
	2000	<b>18,25940(*)</b>	0,837	0,000	14,817	21,701
	2001	<b>18,52491(*)</b>	0,764	0,000	15,381	21,669
	2002	<b>10,98623(*)</b>	0,728	0,000	7,994	13,979
	2004	<b>-1,70556(*)</b>	0,409	0,042	-3,386	-0,025
	2005	<b>-4,35502(*)</b>	0,408	0,000	-6,032	-2,678
2004	1996	<b>23,02180(*)</b>	0,986	0,000	18,968	27,076
	1997	<b>20,61092(*)</b>	0,793	0,000	17,351	23,871
	1998	<b>17,94340(*)</b>	0,714	0,000	15,006	20,881
	1999	<b>21,03621(*)</b>	0,786	0,000	17,804	24,268
	2000	<b>19,96497(*)</b>	0,826	0,000	16,568	23,362
	2001	<b>20,23048(*)</b>	0,752	0,000	17,135	23,326
	2002	<b>12,69179(*)</b>	0,715	0,000	9,751	15,633
	2003	<b>1,70556(*)</b>	0,409	0,042	0,025	3,386
	2005	<b>-2,64945(*)</b>	0,385	0,000	-4,233	-1,066
2005	1996	<b>25,67125(*)</b>	0,985	0,000	21,619	29,724
	1997	<b>23,26037(*)</b>	0,792	0,000	20,002	26,519
	1998	<b>20,59286(*)</b>	0,714	0,000	17,657	23,529
	1999	<b>23,68566(*)</b>	0,785	0,000	20,455	26,916
	2000	<b>22,61442(*)</b>	0,825	0,000	19,219	26,010
	2001	<b>22,87993(*)</b>	0,752	0,000	19,787	25,973
	2002	<b>15,34125(*)</b>	0,715	0,000	12,402	18,280
	2003	<b>4,35502(*)</b>	0,408	0,000	2,678	6,032
	2004	<b>2,64945(*)</b>	0,385	0,000	1,066	4,233

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-5d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	<b>-,14246(*)</b>	0,027	0,001	-0,255	-0,030
	1998	<b>-,35599(*)</b>	0,026	0,000	-0,464	-0,248
	1999	<b>-,16235(*)</b>	0,027	0,000	-0,275	-0,050
	2000	-0,09534	0,028	0,232	-0,210	0,019
	2001	-0,080	0,027	0,441	-0,190	0,030
	2002	0,063	0,026	0,761	-0,045	0,171
	2003	<b>-,14098(*)</b>	0,023	0,000	-0,234	-0,048
	2004	<b>-,21809(*)</b>	0,022	0,000	-0,310	-0,126
	2005	<b>-,23750(*)</b>	0,022	0,000	-0,330	-0,145
1997	1996	<b>,14246(*)</b>	0,027	0,001	0,030	0,255
	1998	<b>-,21354(*)</b>	0,023	0,000	-0,307	-0,121
	1999	-0,020	0,024	1,000	-0,118	0,078
	2000	0,047	0,025	0,930	-0,054	0,148
	2001	0,062	0,023	0,620	-0,033	0,158
	2002	<b>,20562(*)</b>	0,023	0,000	0,113	0,299
	2003	0,001	0,018	1,000	-0,074	0,077
	2004	<b>-,07563(*)</b>	0,018	0,040	-0,150	-0,002
	2005	<b>-,09505(*)</b>	0,018	0,001	-0,169	-0,021
1998	1996	<b>,35599(*)</b>	0,026	0,000	0,248	0,464
	1997	<b>,21354(*)</b>	0,023	0,000	0,121	0,307
	1999	<b>,19364(*)</b>	0,022	0,000	0,101	0,286
	2000	<b>,26065(*)</b>	0,023	0,000	0,165	0,356
	2001	<b>,27578(*)</b>	0,022	0,000	0,186	0,366
	2002	<b>,41916(*)</b>	0,021	0,000	0,332	0,507
	2003	<b>,21501(*)</b>	0,017	0,000	0,147	0,283
	2004	<b>,13791(*)</b>	0,016	0,000	0,071	0,205
	2005	<b>,11849(*)</b>	0,016	0,000	0,052	0,185
1999	1996	<b>,16235(*)</b>	0,027	0,000	0,050	0,275
	1997	0,020	0,024	1,000	-0,078	0,118
	1998	<b>-,19364(*)</b>	0,022	0,000	-0,286	-0,101
	2000	0,067	0,024	0,580	-0,033	0,167
	2001	0,082	0,023	0,181	-0,013	0,177
	2002	<b>,22552(*)</b>	0,023	0,000	0,133	0,318
	2003	0,021	0,018	0,998	-0,053	0,096
	2004	-0,056	0,018	0,373	-0,129	0,018
	2005	<b>-,07515(*)</b>	0,018	0,039	-0,149	-0,002
2000	1996	0,095	0,028	0,232	-0,019	0,210
	1997	-0,047	0,025	0,930	-0,148	0,054
	1998	<b>-,26065(*)</b>	0,023	0,000	-0,356	-0,165
	1999	-0,067	0,024	0,580	-0,167	0,033
	2001	0,015	0,024	1,000	-0,083	0,113
	2002	<b>,15851(*)</b>	0,023	0,000	0,063	0,254
	2003	-0,046	0,019	0,764	-0,124	0,033
	2004	<b>-,12274(*)</b>	0,019	0,000	-0,200	-0,046
	2005	<b>-,14216(*)</b>	0,019	0,000	-0,219	-0,065

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-5d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	0,080	0,027	0,441	-0,030	0,190
	1997	-0,062	0,023	0,620	-0,158	0,033
	1998	<b>-,27578(*)</b>	0,022	0,000	-0,366	-0,186
	1999	-0,082	0,023	0,181	-0,177	0,013
	2000	-0,015	0,024	1,000	-0,113	0,083
	2002	<b>,14338(*)</b>	0,022	0,000	0,053	0,234
	2003	-0,061	0,017	0,201	-0,132	0,011
	2004	<b>-,13788(*)</b>	0,017	0,000	-0,208	-0,068
	2005	<b>-,15730(*)</b>	0,017	0,000	-0,228	-0,087
2002	1996	-0,063	0,026	0,761	-0,171	0,045
	1997	<b>-,20562(*)</b>	0,023	0,000	-0,299	-0,113
	1998	<b>-,41916(*)</b>	0,021	0,000	-0,507	-0,332
	1999	<b>-,22552(*)</b>	0,023	0,000	-0,318	-0,133
	2000	<b>-,15851(*)</b>	0,023	0,000	-0,254	-0,063
	2001	<b>-,14338(*)</b>	0,022	0,000	-0,234	-0,053
	2003	<b>-,20415(*)</b>	0,017	0,000	-0,272	-0,136
	2004	<b>-,28125(*)</b>	0,016	0,000	-0,348	-0,214
	2005	<b>-,30067(*)</b>	0,016	0,000	-0,368	-0,234
2003	1996	<b>,14098(*)</b>	0,023	0,000	0,048	0,234
	1997	-0,001	0,018	1,000	-0,077	0,074
	1998	<b>-,21501(*)</b>	0,017	0,000	-0,283	-0,147
	1999	-0,021	0,018	0,998	-0,096	0,053
	2000	0,046	0,019	0,764	-0,033	0,124
	2001	0,061	0,017	0,201	-0,011	0,132
	2002	<b>,20415(*)</b>	0,017	0,000	0,136	0,272
	2004	<b>-,07710(*)</b>	0,009	0,000	-0,115	-0,039
	2005	<b>-,09652(*)</b>	0,009	0,000	-0,135	-0,058
2004	1996	<b>,21809(*)</b>	0,022	0,000	0,126	0,310
	1997	<b>,07563(*)</b>	0,018	0,040	0,002	0,150
	1998	<b>-,13791(*)</b>	0,016	0,000	-0,205	-0,071
	1999	0,056	0,018	0,373	-0,018	0,129
	2000	<b>,12274(*)</b>	0,019	0,000	0,046	0,200
	2001	<b>,13788(*)</b>	0,017	0,000	0,068	0,208
	2002	<b>,28125(*)</b>	0,016	0,000	0,214	0,348
	2003	<b>,07710(*)</b>	0,009	0,000	0,039	0,115
	2005	-0,019	0,009	0,841	-0,055	0,017
2005	1996	<b>,23750(*)</b>	0,022	0,000	0,145	0,330
	1997	<b>,09505(*)</b>	0,018	0,001	0,021	0,169
	1998	<b>-,11849(*)</b>	0,016	0,000	-0,185	-0,052
	1999	<b>,07515(*)</b>	0,018	0,039	0,002	0,149
	2000	<b>,14216(*)</b>	0,019	0,000	0,065	0,219
	2001	<b>,15730(*)</b>	0,017	0,000	0,087	0,228
	2002	<b>,30067(*)</b>	0,016	0,000	0,234	0,368
	2003	<b>,09652(*)</b>	0,009	0,000	0,058	0,135
	2004	0,019	0,009	0,841	-0,017	0,055

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-5e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenperiode für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	-0,165	0,041	0,064	-0,334	0,004
	1998	<b>-,37314(*)</b>	0,039	0,000	-0,535	-0,211
	1999	-0,14328	0,041	0,201	-0,312	0,025
	2000	<b>-,24103(*)</b>	0,042	0,000	-0,413	-0,069
	2001	<b>-,20706(*)</b>	0,040	0,002	-0,373	-0,042
	2002	-0,160	0,039	0,058	-0,322	0,002
	2003	-0,100	0,034	0,465	-0,240	0,040
	2004	<b>-,20400(*)</b>	0,034	0,000	-0,342	-0,066
	2005	<b>-,32708(*)</b>	0,034	0,000	-0,465	-0,189
1997	1996	0,165	0,041	0,064	-0,004	0,334
	1998	<b>-,20784(*)</b>	0,034	0,000	-0,348	-0,068
	1999	0,022	0,036	1,000	-0,125	0,169
	2000	-0,076	0,037	0,895	-0,227	0,076
	2001	-0,042	0,035	0,998	-0,185	0,102
	2002	0,005	0,034	1,000	-0,134	0,145
	2003	0,065	0,027	0,777	-0,048	0,178
	2004	-0,039	0,027	0,991	-0,150	0,073
	2005	<b>-,16179(*)</b>	0,027	0,000	-0,273	-0,051
1998	1996	<b>,37314(*)</b>	0,039	0,000	0,211	0,535
	1997	<b>,20784(*)</b>	0,034	0,000	0,068	0,348
	1999	<b>,22986(*)</b>	0,034	0,000	0,091	0,369
	2000	0,132	0,035	0,110	-0,011	0,276
	2001	<b>,16608(*)</b>	0,033	0,002	0,031	0,301
	2002	<b>,21332(*)</b>	0,032	0,000	0,082	0,345
	2003	<b>,27295(*)</b>	0,025	0,000	0,171	0,375
	2004	<b>,16914(*)</b>	0,024	0,000	0,069	0,269
	2005	0,046	0,024	0,937	-0,054	0,146
1999	1996	0,143	0,041	0,201	-0,025	0,312
	1997	-0,022	0,036	1,000	-0,169	0,125
	1998	<b>-,22986(*)</b>	0,034	0,000	-0,369	-0,091
	2000	-0,098	0,037	0,624	-0,248	0,053
	2001	-0,064	0,035	0,948	-0,207	0,079
	2002	-0,017	0,034	1,000	-0,156	0,123
	2003	0,043	0,027	0,981	-0,069	0,155
	2004	-0,061	0,027	0,823	-0,171	0,050
	2005	<b>-,18381(*)</b>	0,027	0,000	-0,294	-0,074
2000	1996	<b>,24103(*)</b>	0,042	0,000	0,069	0,413
	1997	0,076	0,037	0,895	-0,076	0,227
	1998	-0,132	0,035	0,110	-0,276	0,011
	1999	0,098	0,037	0,624	-0,053	0,248
	2001	0,034	0,036	1,000	-0,113	0,181
	2002	0,081	0,035	0,796	-0,062	0,225
	2003	<b>,14084(*)</b>	0,029	0,004	0,023	0,258
	2004	0,037	0,028	0,995	-0,079	0,153
	2005	-0,086	0,028	0,408	-0,202	0,030

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-5e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenperiode für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	<b>,20706(*)</b>	0,040	0,002	0,042	0,373
	1997	0,042	0,035	0,998	-0,102	0,185
	1998	<b>-,16608(*)</b>	0,033	0,002	-0,301	-0,031
	1999	0,064	0,035	0,948	-0,079	0,207
	2000	-0,034	0,036	1,000	-0,181	0,113
	2002	0,047	0,033	0,990	-0,088	0,183
	2003	0,107	0,026	0,052	-0,001	0,214
	2004	0,003	0,026	1,000	-0,103	0,109
	2005	<b>-,12003(*)</b>	0,026	0,009	-0,226	-0,014
2002	1996	0,160	0,039	0,058	-0,002	0,322
	1997	-0,005	0,034	1,000	-0,145	0,134
	1998	<b>-,21332(*)</b>	0,032	0,000	-0,345	-0,082
	1999	0,017	0,034	1,000	-0,123	0,156
	2000	-0,081	0,035	0,796	-0,225	0,062
	2001	-0,047	0,033	0,990	-0,183	0,088
	2003	0,060	0,025	0,763	-0,043	0,162
	2004	-0,044	0,024	0,952	-0,145	0,056
	2005	<b>-,16727(*)</b>	0,024	0,000	-0,268	-0,067
2003	1996	0,100	0,034	0,465	-0,040	0,240
	1997	-0,065	0,027	0,777	-0,178	0,048
	1998	<b>-,27295(*)</b>	0,025	0,000	-0,375	-0,171
	1999	-0,043	0,027	0,981	-0,155	0,069
	2000	<b>-,14084(*)</b>	0,029	0,004	-0,258	-0,023
	2001	-0,107	0,026	0,052	-0,214	0,001
	2002	-0,060	0,025	0,763	-0,162	0,043
	2004	<b>-,10381(*)</b>	0,014	0,000	-0,161	-0,046
	2005	<b>-,22689(*)</b>	0,014	0,000	-0,284	-0,170
2004	1996	<b>,20400(*)</b>	0,034	0,000	0,066	0,342
	1997	0,039	0,027	0,991	-0,073	0,150
	1998	<b>-,16914(*)</b>	0,024	0,000	-0,269	-0,069
	1999	0,061	0,027	0,823	-0,050	0,171
	2000	-0,037	0,028	0,995	-0,153	0,079
	2001	-0,003	0,026	1,000	-0,109	0,103
	2002	0,044	0,024	0,952	-0,056	0,145
	2003	<b>,10381(*)</b>	0,014	0,000	0,046	0,161
	2005	<b>-,12308(*)</b>	0,013	0,000	-0,177	-0,069
2005	1996	<b>,32708(*)</b>	0,034	0,000	0,189	0,465
	1997	<b>,16179(*)</b>	0,027	0,000	0,051	0,273
	1998	-0,046	0,024	0,937	-0,146	0,054
	1999	<b>,18381(*)</b>	0,027	0,000	0,074	0,294
	2000	0,086	0,028	0,408	-0,030	0,202
	2001	<b>,12003(*)</b>	0,026	0,009	0,014	0,226
	2002	<b>,16727(*)</b>	0,024	0,000	0,067	0,268
	2003	<b>,22689(*)</b>	0,014	0,000	0,170	0,284
	2004	<b>,12308(*)</b>	0,013	0,000	0,069	0,177

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-5f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996	1997	<b>-,328304(*)</b>	0,074	0,019	-0,632	-0,025
	1998	<b>-,696933(*)</b>	0,071	0,000	-0,988	-0,406
	1999	-0,232651	0,074	0,349	-0,535	0,070
	2000	-0,173878	0,075	0,802	-0,483	0,135
	2001	-0,216	0,072	0,444	-0,513	0,081
	2002	-0,029	0,071	1,000	-0,320	0,262
	2003	-0,235	0,061	0,094	-0,486	0,015
	2004	<b>-,417927(*)</b>	0,060	0,000	-0,666	-0,170
	2005	<b>-,415114(*)</b>	0,060	0,000	-0,663	-0,167
1997	1996	<b>,328304(*)</b>	0,074	0,019	0,025	0,632
	1998	<b>-,368629(*)</b>	0,061	0,000	-0,619	-0,118
	1999	0,096	0,064	0,987	-0,168	0,360
	2000	0,154	0,066	0,792	-0,117	0,426
	2001	0,113	0,063	0,955	-0,145	0,370
	2002	<b>,298915(*)</b>	0,061	0,004	0,048	0,550
	2003	0,093	0,049	0,937	-0,110	0,296
	2004	-0,090	0,049	0,946	-0,289	0,110
	2005	-0,087	0,049	0,956	-0,286	0,113
1998	1996	<b>,696933(*)</b>	0,071	0,000	0,406	0,988
	1997	<b>,368629(*)</b>	0,061	0,000	0,118	0,619
	1999	<b>,464282(*)</b>	0,061	0,000	0,215	0,714
	2000	<b>,523056(*)</b>	0,063	0,000	0,266	0,780
	2001	<b>,481165(*)</b>	0,059	0,000	0,238	0,724
	2002	<b>,667544(*)</b>	0,057	0,000	0,432	0,903
	2003	<b>,461673(*)</b>	0,045	0,000	0,279	0,645
	2004	<b>,279006(*)</b>	0,044	0,000	0,099	0,459
	2005	<b>,281819(*)</b>	0,044	0,000	0,102	0,462
1999	1996	0,233	0,074	0,349	-0,070	0,535
	1997	-0,096	0,064	0,987	-0,360	0,168
	1998	<b>-,464282(*)</b>	0,061	0,000	-0,714	-0,215
	2000	0,059	0,066	1,000	-0,212	0,329
	2001	0,017	0,062	1,000	-0,239	0,273
	2002	0,203	0,061	0,260	-0,046	0,453
	2003	-0,003	0,049	1,000	-0,204	0,198
	2004	-0,185	0,048	0,096	-0,383	0,013
	2005	-0,182	0,048	0,109	-0,380	0,015
2000	1996	0,174	0,075	0,802	-0,135	0,483
	1997	-0,154	0,066	0,792	-0,426	0,117
	1998	<b>-,523056(*)</b>	0,063	0,000	-0,780	-0,266
	1999	-0,059	0,066	1,000	-0,329	0,212
	2001	-0,042	0,064	1,000	-0,306	0,222
	2002	0,144	0,063	0,805	-0,113	0,402
	2003	-0,061	0,051	0,998	-0,272	0,150
	2004	<b>-,244050(*)</b>	0,051	0,006	-0,452	-0,036
	2005	<b>-,241237(*)</b>	0,051	0,007	-0,449	-0,033

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.



**Fortsetzung Tab. 5-5f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum März bis August unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001	1996	0,216	0,072	0,444	-0,081	0,513
	1997	-0,113	0,063	0,955	-0,370	0,145
	1998	<b>-,481165(*)</b>	0,059	0,000	-0,724	-0,238
	1999	-0,017	0,062	1,000	-0,273	0,239
	2000	0,042	0,064	1,000	-0,222	0,306
	2002	0,186	0,059	0,353	-0,056	0,429
	2003	-0,019	0,047	1,000	-0,212	0,173
	2004	<b>-,202159(*)</b>	0,046	0,023	-0,392	-0,013
	2005	<b>-,199346(*)</b>	0,046	0,028	-0,389	-0,010
2002	1996	0,029	0,071	1,000	-0,262	0,320
	1997	<b>-,298915(*)</b>	0,061	0,004	-0,550	-0,048
	1998	<b>-,667544(*)</b>	0,057	0,000	-0,903	-0,432
	1999	-0,203	0,061	0,260	-0,453	0,046
	2000	-0,144	0,063	0,805	-0,402	0,113
	2001	-0,186	0,059	0,353	-0,429	0,056
	2003	<b>-,205871(*)</b>	0,045	0,011	-0,389	-0,023
	2004	<b>-,388538(*)</b>	0,044	0,000	-0,569	-0,208
	2005	<b>-,385725(*)</b>	0,044	0,000	-0,566	-0,206
2003	1996	0,235	0,061	0,094	-0,015	0,486
	1997	-0,093	0,049	0,937	-0,296	0,110
	1998	<b>-,461673(*)</b>	0,045	0,000	-0,645	-0,279
	1999	0,003	0,049	1,000	-0,198	0,204
	2000	0,061	0,051	0,998	-0,150	0,272
	2001	0,019	0,047	1,000	-0,173	0,212
	2002	<b>,205871(*)</b>	0,045	0,011	0,023	0,389
	2004	<b>-,182666(*)</b>	0,025	0,000	-0,286	-0,080
	2005	<b>-,179854(*)</b>	0,025	0,000	-0,283	-0,077
2004	1996	<b>,417927(*)</b>	0,060	0,000	0,170	0,666
	1997	0,090	0,049	0,946	-0,110	0,289
	1998	<b>-,279006(*)</b>	0,044	0,000	-0,459	-0,099
	1999	0,185	0,048	0,096	-0,013	0,383
	2000	<b>,244050(*)</b>	0,051	0,006	0,036	0,452
	2001	<b>,202159(*)</b>	0,046	0,023	0,013	0,392
	2002	<b>,388538(*)</b>	0,044	0,000	0,208	0,569
	2003	<b>,182666(*)</b>	0,025	0,000	0,080	0,286
	2005	0,003	0,024	1,000	-0,094	0,100
2005	1996	<b>,415114(*)</b>	0,060	0,000	0,167	0,663
	1997	0,087	0,049	0,956	-0,113	0,286
	1998	<b>-,281819(*)</b>	0,044	0,000	-0,462	-0,102
	1999	0,182	0,048	0,109	-0,015	0,380
	2000	<b>,241237(*)</b>	0,051	0,007	0,033	0,449
	2001	<b>,199346(*)</b>	0,046	0,028	0,010	0,389
	2002	<b>,385725(*)</b>	0,044	0,000	0,206	0,566
	2003	<b>,179854(*)</b>	0,025	0,000	0,077	0,283
	2004	-0,003	0,024	1,000	-0,100	0,094

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-6b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum September bis Februar.

Korrelation nach Pearson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 1996/1997 N = 619	sign. Wellenhöhe	1	,867(**)	,893(**)	,872(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,867(**)	1	,992(**)	,745(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,893(**)	,992(**)	1	,801(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,872(**)	,745(**)	,801(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1997/1998 N = 290	sign. Wellenhöhe	1	,840(**)	,856(**)	,890(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,840(**)	1	,992(**)	,743(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,856(**)	,992(**)	1	,789(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,890(**)	,743(**)	,789(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1998/1999 N = 1292	sign. Wellenhöhe	1	,897(**)	,919(**)	,854(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,897(**)	1	,991(**)	,749(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,919(**)	,991(**)	1	,812(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,854(**)	,749(**)	,812(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 1999/2000 N = 1308	sign. Wellenhöhe	1	,897(**)	,918(**)	,870(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,897(**)	1	,991(**)	,755(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,918(**)	,991(**)	1	,813(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,870(**)	,755(**)	,813(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2000/2001 N = 1335	sign. Wellenhöhe	1	,810(**)	,835(**)	,880(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,810(**)	1	,992(**)	,703(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,835(**)	,992(**)	1	,758(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,880(**)	,703(**)	,758(**)	1
		0,000	0,000	0,000	

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Fortsetzung Tab. 5-6b.** Korrelation (nach Pearson) der Wellenparameter für den Zeitraum September bis Februar.

Korrelation nach Perarson		sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	Wellenlänge	Energiemaximum
Jahr 2001/2002 N = 1280	sign. Wellenhöhe	1	,815(**)	,498(**)	,853(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,815(**)	1	,705(**)	,693(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,498(**)	,705(**)	1	,487(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,853(**)	,693(**)	,487(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2002/2003 N = 6951	sign. Wellenhöhe	1	,811(**)	,625(**)	,872(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,811(**)	1	,826(**)	,682(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,625(**)	,826(**)	1	,541(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,872(**)	,682(**)	,541(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2003/2004 N = 7877	sign. Wellenhöhe	1	,785(**)	,632(**)	,847(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,785(**)	1	,834(**)	,664(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,632(**)	,834(**)	1	,531(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,847(**)	,664(**)	,531(**)	1
		0,000	0,000	0,000	
Jahr 2004/2005 N = 6357	sign. Wellenhöhe	1	,835(**)	,631(**)	,856(**)
			0,000	0,000	0,000
	Wellenperiode	,835(**)	1	,778(**)	,685(**)
		0,000		0,000	0,000
	Wellenlänge	,631(**)	,778(**)	1	,535(**)
	0,000	0,000		0,000	
	Energiemaximum	,856(**)	,685(**)	,535(**)	1
		0,000	0,000	0,000	

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Tab. 5-6c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996/97	1997/98	4,087	2,264	0,917	-4,830	13,004
	1998/99	2,020	1,555	0,989	-4,106	8,145
	1999/00	5,299	1,552	0,168	-0,815	11,412
	2000/01	5,492	1,547	0,126	-0,601	11,586
	2001/02	-2,839	1,558	0,913	-8,974	3,296
	2002/03	<b>-12,72628(*)</b>	1,335	0,000	-17,982	-7,470
	2003/04	<b>-23,16808(*)</b>	1,328	0,000	-28,399	-17,937
	2004/05	<b>-18,51176(*)</b>	1,340	0,000	-23,788	-13,236
1997/98	1996/97	-4,087	2,264	0,917	-13,004	4,830
	1998/99	-2,068	2,068	0,998	-10,210	6,075
	1999/00	1,211	2,065	1,000	-6,922	9,345
	2000/01	1,405	2,061	1,000	-6,713	9,524
	2001/02	-6,926	2,069	0,190	-15,076	1,223
	2002/03	<b>-16,81357(*)</b>	1,907	0,000	-24,324	-9,303
	2003/04	<b>-27,25537(*)</b>	1,903	0,000	-34,748	-19,763
	2004/05	<b>-22,59905(*)</b>	1,911	0,000	-30,123	-15,075
1998/99	1996/97	-2,020	1,555	0,989	-8,145	4,106
	1997/98	2,068	2,068	0,998	-6,075	10,210
	1999/00	3,279	1,248	0,547	-1,636	8,194
	2000/01	3,473	1,242	0,451	-1,418	8,363
	2001/02	-4,859	1,255	0,059	-9,800	0,083
	2002/03	<b>-14,74588(*)</b>	0,964	0,000	-18,542	-10,950
	2003/04	<b>-25,18768(*)</b>	0,955	0,000	-28,949	-21,426
	2004/05	<b>-20,53136(*)</b>	0,971	0,000	-24,355	-16,707
1999/00	1996/97	-5,299	1,552	0,168	-11,412	0,815
	1997/98	-1,211	2,065	1,000	-9,345	6,922
	1998/99	-3,279	1,248	0,547	-8,194	1,636
	2000/01	0,194	1,238	1,000	-4,681	5,069
	2001/02	<b>-8,13740(*)</b>	1,251	0,000	-13,064	-3,211
	2002/03	<b>-18,02478(*)</b>	0,959	0,000	-21,802	-14,248
	2003/04	<b>-28,46658(*)</b>	0,950	0,000	-32,208	-24,725
	2004/05	<b>-23,81026(*)</b>	0,966	0,000	-27,615	-20,006
2000/01	1996/97	-5,492	1,547	0,126	-11,586	0,601
	1997/98	-1,405	2,061	1,000	-9,524	6,713
	1998/99	-3,473	1,242	0,451	-8,363	1,418
	1999/00	-0,194	1,238	1,000	-5,069	4,681
	2001/02	<b>-8,33134(*)</b>	1,245	0,000	-13,233	-3,429
	2002/03	<b>-18,21871(*)</b>	0,951	0,000	-21,963	-14,474
	2003/04	<b>-28,66051(*)</b>	0,942	0,000	-32,369	-24,952
	2004/05	<b>-24,00419(*)</b>	0,958	0,000	-27,777	-20,232

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-6c.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der Wellenlänge für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001/02	1996/97	2,839	1,558	0,913	-3,296	8,974
	1997/98	6,926	2,069	0,190	-1,223	15,076
	1998/99	4,859	1,255	0,059	-0,083	9,800
	1999/00	<b>8,13740(*)</b>	1,251	0,000	3,211	13,064
	2000/01	<b>8,33134(*)</b>	1,245	0,000	3,429	13,233
	2002/03	<b>-9,88738(*)</b>	0,968	0,000	-13,699	-6,076
	2003/04	<b>-20,32918(*)</b>	0,959	0,000	-24,106	-16,553
	2004/05	<b>-15,67286(*)</b>	0,975	0,000	-19,512	-11,834
2002/03	1996/97	<b>12,72628(*)</b>	1,335	0,000	7,470	17,982
	1997/98	<b>16,81357(*)</b>	1,907	0,000	9,303	24,324
	1998/99	<b>14,74588(*)</b>	0,964	0,000	10,950	18,542
	1999/00	<b>18,02478(*)</b>	0,959	0,000	14,248	21,802
	2000/01	<b>18,21871(*)</b>	0,951	0,000	14,474	21,963
	2001/02	<b>9,88738(*)</b>	0,968	0,000	6,076	13,699
	2003/04	<b>-10,44180(*)</b>	0,524	0,000	-12,504	-8,380
	2004/05	<b>-5,78548(*)</b>	0,552	0,000	-7,960	-3,611
2003/04	1996/97	<b>23,16808(*)</b>	1,328	0,000	17,937	28,399
	1997/98	<b>27,25537(*)</b>	1,903	0,000	19,763	34,748
	1998/99	<b>25,18768(*)</b>	0,955	0,000	21,426	28,949
	1999/00	<b>28,46658(*)</b>	0,950	0,000	24,725	32,208
	2000/01	<b>28,66051(*)</b>	0,942	0,000	24,952	32,369
	2001/02	<b>20,32918(*)</b>	0,959	0,000	16,553	24,106
	2002/03	<b>10,44180(*)</b>	0,524	0,000	8,380	12,504
	2004/05	<b>4,65632(*)</b>	0,536	0,000	2,544	6,769
2004/05	1996/97	<b>18,51176(*)</b>	1,340	0,000	13,236	23,788
	1997/98	<b>22,59905(*)</b>	1,911	0,000	15,075	30,123
	1998/99	<b>20,53136(*)</b>	0,971	0,000	16,707	24,355
	1999/00	<b>23,81026(*)</b>	0,966	0,000	20,006	27,615
	2000/01	<b>24,00419(*)</b>	0,958	0,000	20,232	27,777
	2001/02	<b>15,67286(*)</b>	0,975	0,000	11,834	19,512
	2002/03	<b>5,78548(*)</b>	0,552	0,000	3,611	7,960
	2003/04	<b>-4,65632(*)</b>	0,536	0,000	-6,769	-2,544

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-6d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996/97	1997/98	0,154	0,058	0,525	-0,074	0,382
	1998/99	0,001	0,040	1,000	-0,156	0,157
	1999/00	0,111	0,040	0,450	-0,045	0,267
	2000/01	<b>,26245(*)</b>	0,040	0,000	0,107	0,418
	2001/02	<b>,32839(*)</b>	0,040	0,000	0,172	0,485
	2002/03	<b>,42253(*)</b>	0,034	0,000	0,288	0,557
	2003/04	<b>,16838(*)</b>	0,034	0,002	0,035	0,302
	2004/05	<b>,24427(*)</b>	0,034	0,000	0,109	0,379
1997/98	1996/97	-0,154	0,058	0,525	-0,382	0,074
	1998/99	-0,154	0,053	0,390	-0,362	0,054
	1999/00	-0,043	0,053	1,000	-0,251	0,165
	2000/01	0,108	0,053	0,837	-0,099	0,316
	2001/02	0,174	0,053	0,211	-0,034	0,382
	2002/03	<b>,26823(*)</b>	0,049	0,000	0,076	0,460
	2003/04	0,014	0,049	1,000	-0,177	0,206
	2004/05	0,090	0,049	0,907	-0,102	0,282
1998/99	1996/97	-0,001	0,040	1,000	-0,157	0,156
	1997/98	0,154	0,053	0,390	-0,054	0,362
	1999/00	0,110	0,032	0,152	-0,015	0,236
	2000/01	<b>,26182(*)</b>	0,032	0,000	0,137	0,387
	2001/02	<b>,32776(*)</b>	0,032	0,000	0,202	0,454
	2002/03	<b>,42190(*)</b>	0,025	0,000	0,325	0,519
	2003/04	<b>,16774(*)</b>	0,024	0,000	0,072	0,264
	2004/05	<b>,24363(*)</b>	0,025	0,000	0,146	0,341
1999/00	1996/97	-0,111	0,040	0,450	-0,267	0,045
	1997/98	0,043	0,053	1,000	-0,165	0,251
	1998/99	-0,110	0,032	0,152	-0,236	0,015
	2000/01	<b>,15144(*)</b>	0,032	0,003	0,027	0,276
	2001/02	<b>,21738(*)</b>	0,032	0,000	0,092	0,343
	2002/03	<b>,31152(*)</b>	0,025	0,000	0,215	0,408
	2003/04	0,057	0,024	0,694	-0,038	0,153
	2004/05	<b>,13326(*)</b>	0,025	0,000	0,036	0,231
2000/01	1996/97	<b>-,26245(*)</b>	0,040	0,000	-0,418	-0,107
	1997/98	-0,108	0,053	0,837	-0,316	0,099
	1998/99	<b>-,26182(*)</b>	0,032	0,000	-0,387	-0,137
	1999/00	<b>-,15144(*)</b>	0,032	0,003	-0,276	-0,027
	2001/02	0,066	0,032	0,829	-0,059	0,191
	2002/03	<b>,16008(*)</b>	0,024	0,000	0,064	0,256
	2003/04	-0,094	0,024	0,054	-0,189	0,001
	2004/05	-0,018	0,024	1,000	-0,115	0,078

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-6d.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001/02	1996/97	<b>-,32839(*)</b>	0,040	0,000	-0,485	-0,172
	1997/98	-0,174	0,053	0,211	-0,382	0,034
	1998/99	<b>-,32776(*)</b>	0,032	0,000	-0,454	-0,202
	1999/00	<b>-,21738(*)</b>	0,032	0,000	-0,343	-0,092
	2000/01	-0,066	0,032	0,829	-0,191	0,059
	2002/03	0,094	0,025	0,070	-0,003	0,192
	2003/04	<b>-,16002(*)</b>	0,025	0,000	-0,257	-0,064
	2004/05	-0,084	0,025	0,180	-0,182	0,014
2002/03	1996/97	<b>-,42253(*)</b>	0,034	0,000	-0,557	-0,288
	1997/98	<b>-,26823(*)</b>	0,049	0,000	-0,460	-0,076
	1998/99	<b>-,42190(*)</b>	0,025	0,000	-0,519	-0,325
	1999/00	<b>-,31152(*)</b>	0,025	0,000	-0,408	-0,215
	2000/01	<b>-,16008(*)</b>	0,024	0,000	-0,256	-0,064
	2001/02	-0,094	0,025	0,070	-0,192	0,003
	2003/04	<b>-,25416(*)</b>	0,013	0,000	-0,307	-0,202
	2004/05	<b>-,17826(*)</b>	0,014	0,000	-0,234	-0,123
2003/04	1996/97	<b>-,16838(*)</b>	0,034	0,002	-0,302	-0,035
	1997/98	-0,014	0,049	1,000	-0,206	0,177
	1998/99	<b>-,16774(*)</b>	0,024	0,000	-0,264	-0,072
	1999/00	-0,057	0,024	0,694	-0,153	0,038
	2000/01	0,094	0,024	0,054	-0,001	0,189
	2001/02	<b>,16002(*)</b>	0,025	0,000	0,064	0,257
	2002/03	<b>,25416(*)</b>	0,013	0,000	0,202	0,307
	2004/05	<b>,07589(*)</b>	0,014	0,000	0,022	0,130
2004/05	1996/97	<b>-,24427(*)</b>	0,034	0,000	-0,379	-0,109
	1997/98	-0,090	0,049	0,907	-0,282	0,102
	1998/99	<b>-,24363(*)</b>	0,025	0,000	-0,341	-0,146
	1999/00	<b>-,13326(*)</b>	0,025	0,000	-0,231	-0,036
	2000/01	<b>0,018</b>	0,024	1,000	-0,078	0,115
	2001/02	0,084	0,025	0,180	-0,014	0,182
	2002/03	<b>,17826(*)</b>	0,014	0,000	0,123	0,234
	2003/04	<b>-,07589(*)</b>	0,014	0,000	-0,130	-0,022

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-6e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenperiode für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996/97	1997/98	0,220	0,081	0,493	-0,098	0,538
	1998/99	0,123	0,056	0,769	-0,096	0,341
	1999/00	<b>,35385(*)</b>	0,055	0,000	0,136	0,572
	2000/01	<b>,35156(*)</b>	0,055	0,000	0,134	0,569
	2001/02	<b>,54011(*)</b>	0,056	0,000	0,321	0,759
	2002/03	<b>,59414(*)</b>	0,048	0,000	0,407	0,782
	2003/04	0,166	0,047	0,138	-0,020	0,353
	2004/05	<b>,35647(*)</b>	0,048	0,000	0,168	0,545
1997/98	1996/97	-0,220	0,081	0,493	-0,538	0,098
	1998/99	-0,097	0,074	0,988	-0,388	0,193
	1999/00	0,134	0,074	0,914	-0,156	0,424
	2000/01	0,132	0,074	0,921	-0,158	0,421
	2001/02	<b>,32017(*)</b>	0,074	0,016	0,029	0,611
	2002/03	<b>,37420(*)</b>	0,068	0,000	0,106	0,642
	2003/04	-0,054	0,068	1,000	-0,321	0,214
	2004/05	0,137	0,068	0,856	-0,132	0,405
1998/99	1996/97	-0,123	0,056	0,769	-0,341	0,096
	1997/98	0,097	0,074	0,988	-0,193	0,388
	1999/00	<b>,23111(*)</b>	0,045	0,001	0,056	0,407
	2000/01	<b>,22881(*)</b>	0,044	0,001	0,054	0,403
	2001/02	<b>,41737(*)</b>	0,045	0,000	0,241	0,594
	2002/03	<b>,47140(*)</b>	0,034	0,000	0,336	0,607
	2003/04	0,044	0,034	0,990	-0,091	0,178
	2004/05	<b>,23373(*)</b>	0,035	0,000	0,097	0,370
1999/00	1996/97	<b>-,35385(*)</b>	0,055	0,000	-0,572	-0,136
	1997/98	-0,134	0,074	0,914	-0,424	0,156
	1998/99	<b>-,23111(*)</b>	0,045	0,001	-0,407	-0,056
	2000/01	-0,002	0,044	1,000	-0,176	0,172
	2001/02	<b>,18626(*)</b>	0,045	0,026	0,011	0,362
	2002/03	<b>,24029(*)</b>	0,034	0,000	0,106	0,375
	2003/04	<b>-,18750(*)</b>	0,034	0,000	-0,321	-0,054
	2004/05	0,003	0,034	1,000	-0,133	0,138
2000/01	1996/97	<b>-,35156(*)</b>	0,055	0,000	-0,569	-0,134
	1997/98	-0,132	0,074	0,921	-0,421	0,158
	1998/99	<b>-,22881(*)</b>	0,044	0,001	-0,403	-0,054
	1999/00	0,002	0,044	1,000	-0,172	0,176
	2001/02	<b>,18855(*)</b>	0,044	0,021	0,014	0,364
	2002/03	<b>,24258(*)</b>	0,034	0,000	0,109	0,376
	2003/04	<b>-,18521(*)</b>	0,034	0,000	-0,318	-0,053
	2004/05	0,005	0,034	1,000	-0,130	0,140

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.



**Fortsetzung Tab. 5-6e.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) der signifikanten Wellenperiode für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001/02	1996/97	<b>-,54011(*)</b>	0,056	0,000	-0,759	-0,321
	1997/98	<b>-,32017(*)</b>	0,074	0,016	-0,611	-0,029
	1998/99	<b>-,41737(*)</b>	0,045	0,000	-0,594	-0,241
	1999/00	<b>-,18626(*)</b>	0,045	0,026	-0,362	-0,011
	2000/01	<b>-,18855(*)</b>	0,044	0,021	-0,364	-0,014
	2002/03	0,054	0,035	0,964	-0,082	0,190
	2003/04	<b>-,37376(*)</b>	0,034	0,000	-0,509	-0,239
	2004/05	<b>-,18364(*)</b>	0,035	0,001	-0,321	-0,047
2002/03	1996/97	<b>-,59414(*)</b>	0,048	0,000	-0,782	-0,407
	1997/98	<b>-,37420(*)</b>	0,068	0,000	-0,642	-0,106
	1998/99	<b>-,47140(*)</b>	0,034	0,000	-0,607	-0,336
	1999/00	<b>-,24029(*)</b>	0,034	0,000	-0,375	-0,106
	2000/01	<b>-,24258(*)</b>	0,034	0,000	-0,376	-0,109
	2001/02	-0,054	0,035	0,964	-0,190	0,082
	2003/04	<b>-,42779(*)</b>	0,019	0,000	-0,501	-0,354
	2004/05	<b>-,23767(*)</b>	0,020	0,000	-0,315	-0,160
2003/04	1996/97	-0,166	0,047	0,138	-0,353	0,020
	1997/98	0,054	0,068	1,000	-0,214	0,321
	1998/99	-0,044	0,034	0,990	-0,178	0,091
	1999/00	<b>,18750(*)</b>	0,034	0,000	0,054	0,321
	2000/01	<b>,18521(*)</b>	0,034	0,000	0,053	0,318
	2001/02	<b>,37376(*)</b>	0,034	0,000	0,239	0,509
	2002/03	<b>,42779(*)</b>	0,019	0,000	0,354	0,501
	2004/05	<b>,19012(*)</b>	0,019	0,000	0,115	0,266
2004/05	1996/97	<b>-,35647(*)</b>	0,048	0,000	-0,545	-0,168
	1997/98	-0,137	0,068	0,856	-0,405	0,132
	1998/99	<b>-,23373(*)</b>	0,035	0,000	-0,370	-0,097
	1999/00	-0,003	0,034	1,000	-0,138	0,133
	2000/01	-0,005	0,034	1,000	-0,140	0,130
	2001/02	<b>,18364(*)</b>	0,035	0,001	0,047	0,321
	2002/03	<b>,23767(*)</b>	0,020	0,000	0,160	0,315
	2003/04	<b>-,19012(*)</b>	0,019	0,000	-0,266	-0,115

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Tab. 5-6f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1996/97	1997/98	<b>1,481540(*)</b>	0,297	0,002	0,310	2,653
	1998/99	-0,085	0,204	1,000	-0,890	0,719
	1999/00	0,752	0,204	0,092	-0,051	1,555
	2000/01	<b>1,507722(*)</b>	0,203	0,000	0,707	2,308
	2001/02	<b>1,670433(*)</b>	0,205	0,000	0,865	2,476
	2002/03	<b>2,105306(*)</b>	0,175	0,000	1,415	2,796
	2003/04	<b>1,399335(*)</b>	0,174	0,000	0,712	2,086
	2004/05	<b>1,465534(*)</b>	0,176	0,000	0,773	2,159
1997/98	1996/97	<b>-1,481540(*)</b>	0,297	0,002	-2,653	-0,310
	1998/99	<b>-1,566579(*)</b>	0,272	0,000	-2,636	-0,497
	1999/00	-0,729	0,271	0,512	-1,797	0,339
	2000/01	0,026	0,271	1,000	-1,040	1,092
	2001/02	0,189	0,272	1,000	-0,881	1,259
	2002/03	0,624	0,250	0,625	-0,363	1,610
	2003/04	-0,082	0,250	1,000	-1,066	0,902
	2004/05	-0,016	0,251	1,000	-1,004	0,972
1998/99	1996/97	0,085	0,204	1,000	-0,719	0,890
	1997/98	<b>1,566579(*)</b>	0,272	0,000	0,497	2,636
	1999/00	<b>,837388(*)</b>	0,164	0,001	0,192	1,483
	2000/01	<b>1,592762(*)</b>	0,163	0,000	0,950	2,235
	2001/02	<b>1,755472(*)</b>	0,165	0,000	1,106	2,405
	2002/03	<b>2,190345(*)</b>	0,127	0,000	1,692	2,689
	2003/04	<b>1,484374(*)</b>	0,125	0,000	0,990	1,978
	2004/05	<b>1,550573(*)</b>	0,128	0,000	1,048	2,053
1999/00	1996/97	-0,752	0,204	0,092	-1,555	0,051
	1997/98	0,729	0,271	0,512	-0,339	1,797
	1998/99	<b>-,837388(*)</b>	0,164	0,001	-1,483	-0,192
	2000/01	<b>,755373(*)</b>	0,163	0,006	0,115	1,396
	2001/02	<b>,918084(*)</b>	0,164	0,000	0,271	1,565
	2002/03	<b>1,352957(*)</b>	0,126	0,000	0,857	1,849
	2003/04	<b>,646986(*)</b>	0,125	0,001	0,156	1,138
	2004/05	<b>,713185(*)</b>	0,127	0,000	0,213	1,213
2000/01	1996/97	<b>-1,507722(*)</b>	0,203	0,000	-2,308	-0,707
	1997/98	-0,026	0,271	1,000	-1,092	1,040
	1998/99	<b>-1,592762(*)</b>	0,163	0,000	-2,235	-0,950
	1999/00	<b>-,755373(*)</b>	0,163	0,006	-1,396	-0,115
	2001/02	0,163	0,163	0,998	-0,481	0,807
	2002/03	<b>,597584(*)</b>	0,125	0,004	0,106	1,089
	2003/04	-0,108	0,124	0,999	-0,596	0,379
	2004/05	-0,042	0,126	1,000	-0,538	0,453

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.

**Fortsetzung Tab. 5-6f.** Mehrfachvergleiche (ANOVA) des Energiemaximums für den Zeitraum September bis Februar unter Anwendung der Scheffé-Prozedur

Jahr	Vergleich Jahr mit anderen Jahren	Mittlere Differenz	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
2001/02	1996/97	<b>-1,670433(*)</b>	0,205	0,000	-2,476	-0,865
	1997/98	-0,189	0,272	1,000	-1,259	0,881
	1998/99	<b>-1,755472(*)</b>	0,165	0,000	-2,405	-1,106
	1999/00	<b>-,918084(*)</b>	0,164	0,000	-1,565	-0,271
	2000/01	-0,163	0,163	0,998	-0,807	0,481
	2002/03	0,435	0,127	0,165	-0,066	0,935
	2003/04	-0,271	0,126	0,796	-0,767	0,225
	2004/05	-0,205	0,128	0,959	-0,709	0,299
2002/03	1996/97	<b>-2,105306(*)</b>	0,175	0,000	-2,796	-1,415
	1997/98	-0,624	0,250	0,625	-1,610	0,363
	1998/99	<b>-2,190345(*)</b>	0,127	0,000	-2,689	-1,692
	1999/00	<b>-1,352957(*)</b>	0,126	0,000	-1,849	-0,857
	2000/01	<b>-,597584(*)</b>	0,125	0,004	-1,089	-0,106
	2001/02	-0,435	0,127	0,165	-0,935	0,066
	2003/04	<b>-,705971(*)</b>	0,069	0,000	-0,977	-0,435
	2004/05	<b>-,639772(*)</b>	0,073	0,000	-0,925	-0,354
2003/04	1996/97	<b>-1,399335(*)</b>	0,174	0,000	-2,086	-0,712
	1997/98	0,082	0,250	1,000	-0,902	1,066
	1998/99	<b>-1,484374(*)</b>	0,125	0,000	-1,978	-0,990
	1999/00	<b>-,646986(*)</b>	0,125	0,001	-1,138	-0,156
	2000/01	0,108	0,124	0,999	-0,379	0,596
	2001/02	0,271	0,126	0,796	-0,225	0,767
	2002/03	<b>,705971(*)</b>	0,069	0,000	0,435	0,977
	2004/05	0,066	0,070	0,999	-0,211	0,344
2004/05	1996/97	<b>-1,465534(*)</b>	0,176	0,000	-2,159	-0,773
	1997/98	0,016	0,251	1,000	-0,972	1,004
	1998/99	<b>-1,550573(*)</b>	0,128	0,000	-2,053	-1,048
	1999/00	<b>-,713185(*)</b>	0,127	0,000	-1,213	-0,213
	2000/01	0,042	0,126	1,000	-0,453	0,538
	2001/02	0,205	0,128	0,959	-0,299	0,709
	2002/03	<b>,639772(*)</b>	0,073	0,000	0,354	0,925
	2003/04	-0,066	0,070	0,999	-0,344	0,211

\* Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant.



## Zusammenfassung/Summary

In der vorliegenden Arbeit werden rezente *Mya arenaria* dominierende Schill-Vorkommen innerhalb des eulitoralischen Gezeitenbereiches zwischen Jadebucht und Außenelbe untersucht. Ziel der Arbeit ist es detaillierte Informationen über dessen strukturellen Aufbau sowie ihrer Genese zu erhalten. Das Interesse gilt dabei besonders den unterschiedlichen Lagerungszuständen der Einzelklappen die auf den Oberflächen der Vorkommen vorzufinden sind. Besonders betrachtet werden dabei die bislang selten beschriebenen Hochkantstrukturen, bei denen *M. arenaria* Einzelklappen vertikal eingeregelt sind und mit ihrer Längsachse nahezu senkrecht stehen.

Im ersten Kapitel der vorliegenden Dissertation wird zunächst ein allgemeiner Überblick in die Thematik der Schalen-Akkumulationen sowie in das Untersuchungsgebiet und der Muschelart *Mya arenaria* gegeben.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich dann mit der Beschreibung von drei Schill-Vorkommen die während des Untersuchungszeitraumes mehrmals bei Geländekampagnen aufgesucht wurden. Es erfolgten detaillierte Aufnahmen der Oberflächenstrukturen sowie die Entnahme mehrerer Reliefgussprofile. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Schill-Akkumulationen hauptsächlich durch laterale Priel-Wanderungen verursacht werden. Aufgrund von Erosionsprozessen werden dadurch ehemalige *M. arenaria* Siedlungshorizonte mit postmortalen *M. arenaria* Doppelklappen freigelegt. Durch biostratinomischen Prozesse die durch hydrodynamische Ereignisse gesteuert werden entstehen auf den Oberflächen der Vorkommen wiederkehrende und charakteristische Lagerungs- und Einregelungsmuster. Aufgrund dessen erfolgt eine allgemeine Einteilung in sieben unterschiedliche Zonenbereiche. Die Zonen umfassen dabei die ehemalige *M. arenaria* Siedlungshorizonte mit postmortalen Doppelklappen (Zone 1), verschiedene Pflastervariationen (Zone 2a bis c), Schill-Streifen (Zone 3), Rosettenanordnungen (Zone 4), richtungsorientierte Hochkantschill-Strukturen (Zone 5) sowie Terrassenanordnungen (Zone 6) und inselartige Schill-Felder (Zone 7). Ferner kann festgestellt werden, dass die ansteigende Morphologie der Schill-Vorkommen eine Veränderung der hydrodynamischen Wirkungsgrenze des Wassers während der Tidenzyklen verursacht und für die unterschiedlichen Lagerungszustände verantwortlich ist.

Im dritten Kapitel werden *M. arenaria* Schalen an ausgewählten Schill-Vorkommen taphonomisch untersucht. Das Schalenmaterial zweier Transekte wurde einer semi-quantitativen taphonomischen Analyse unterzogen bei der folgende Beanspruchungsmerkmale erfasst wurden: Abrasion, Inkrustation, Bioerosion, Randerhaltung und Fragmentation. Neben bivariaten-taphonomischen Korrelationsanalysen wurden Größenhäufigkeitsverteilungen, Regressions- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Des Weiteren wurde das rechts/links Seitenverhältnis der *M. arenaria* Einzelklappen bestimmt. Ähnlichkeiten in der taphonomischen Beanspruchung zwischen Lagerungszuständen und Ablagerungsbereichen wurden mittels multivariater Datenanalyse erfasst.

Die Ergebnisse der Größenhäufigkeitsverteilungen zeigen signifikante Unterschiede zwischen zwei ehemaligen *M. arenaria* Siedlungshorizonten sowie der Klappenverteilung innerhalb der Schill-Vorkommen. Eine Frachtsonderung konnte nur an einem Transekt signifikant belegt werden. Die semi-quantitativen taphonomischen Analysen zeigen, dass der Beanspruchungsgrad des Schalenmaterials mit zunehmender Transportentfernung ansteigt. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Klappen während anhaltender Transportbewegungen entlang der Transekte überwiegend physikalischen Beanspruchungsprozessen ausgesetzt sind, welche sich auf die Randerhaltung, Abrasion sowie Fragmentation auswirken. Erst nachdem die Klappen im rückwertigen Transektbereich aufgrund geringerer hydrodynamischer Aktivitäten abgelagert werden, setzen bioökologische Prozesse infolge von Inkrustationsbeanspruchungen durch Balaniden und Bryozoen ein.

Die Analysen zeigen weiter, dass mit zunehmender Schalengröße auch der taphonomische Beanspruchungsgrad der Abrasion, Inkrustation und Randerhaltung signifikant ansteigt. Es kann nachgewiesen werden, dass der taphonomische Erhaltungszustand maßgeblich durch hydrodynamische und die daraus resultierenden biostratinomischen Prozesse beeinflusst wird. Die multivariaten Analysen belegen, dass mit der Lagerungsvariation der Klappen auf dem Untergrund (horizontal, vertikal) sich auch der taphonomische Beanspruchungsschwerpunkt verändert. Infolge dessen kann eine taphonomische Differenzierung aufgrund von Lagerungsanordnungen zwischen postmortalen *M. arenaria* Doppelklappen in Lebensposition, Pflaster- und Dachziegellagerung, vertikal eingeregelt Klappen (Hochkantschillen) sowie Schalenfeldern des rückwertigen Transektbereiches vorgenommen werden. Die Untersuchungen belegen, dass der taphonomische Erhaltungszustand der untersuchten *M. arenaria* Klappen 1. von der jeweiligen Exponierungsposition auf der Oberfläche und 2. von der Lagerungsorientierung innerhalb der Schill-Vorkommen abhängt.

Im vierten Kapitel wurden durch Experimentreihen in einem Wellenkanal der Geneseprozess sowie die hydrodynamischen Randparameter bestimmt, die zu einer vertikalen Hochkantstellung von *M. arenaria* Einzelklappen führen.

Ziel der Untersuchung war es detaillierte Informationen über die Genese von Hochkantschill-Strukturen zu erhalten. Es sollte geprüft werden, ob die Geländeuntersuchungen sich mit den Laborexperimenten am Wellenkanal decken. Ergänzend zu den Naturbeobachtungen im Arbeitsgebiet sollen die Experimentreihen dazu dienen, die Bildungsprozesse sowie die hydrodynamischen Randparameter zu entschlüsseln, die zu den verschiedenen Lagerungsstrukturen auf den Schill-Vorkommen führen.

Um diese Fragen zu klären wurden systematische Versuchsreihen zu jeweils unterschiedlichen Wassertiefen am Marburger Wellenkanal durchgeführt. Folgende Parameter wurden hierbei aufgenommen und berechnet: Die Höhe und Länge sowie die Periode und die Laufgeschwindigkeit einer Welle. Des Weiteren rechnerisch bestimmt wurde die vertikale und horizontale Partikelgeschwindigkeit. Es sollte geprüft werden, ob ein Zusammenhang der vertikalen Einregelung und der Schalenkonzentration besteht. Hierzu wurden Konzentrationsversuche mit *M. arenaria* Einzelklappen unter Laborbedingungen durchgeführt.

Mit Hilfe der Experimentreihen gelang es die hydrodynamischen Randparameter in einem engen Entstehungsfeld einzugrenzen, welche zu einer vertikalen Einregelung der Klappen führen. Die Experimente verdeutlichen, dass für eine Hochkantschill-Genese mehrere Randbedingungen erfüllt sein müssen als bislang vermutet. Neben der morphologischen und konzentrationsbedingten Abhängigkeit sind die wichtigsten Randparameter neben der Wassertiefe eine entsprechende Wellenlänge und Wellenperiode sowie eine entsprechende horizontale Teilchengeschwindigkeit die von der jeweiligen Welle erzeugt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass Hochkantschille im Wellenkanal in nur einem relativ kleinen Genesefenster entstehen. Die Erforderlichen Parameter wurden wie folgt bestimmt: Wellenperiode  $T$  2 bis 4 s, Wellenlänge  $L$  4 bis 6 m, Wellenhöhe  $H$  0,14 bis 0,25 m, Phasengeschwindigkeit  $c$  1,75 bis 2 m/s, horizontale Partikelgeschwindigkeit  $u$  0,3 bis 0,6 m/s, vertikale Partikelgeschwindigkeit  $v$  0,02 bis 0,05 m/s. Ihre endgültige und vertikale Position erhalten die Klappen letztendlich durch einen periodischen Wellengang.

Neben dem Hochkantschill gelang es zudem künstliche Pflaster- und Dachziegellagerungen sowie Rosettenanordnungen zu generieren. Die Versuchsreihen zeigten, dass auch diese Schalenanordnungen unter Laborbedingungen ebenfalls nur in einem engen Entstehungsfenster entstehen.

Durch die Wellenkanalexperimente konnten die einzelnen Schritte des Entstehungsprozesses der Hochkantschille entschlüsselt werden. Des Weiteren wurde ein enger Zusammenhang zwischen der Hochkantschill-Genese und der dazu nötigen Schalenkonzentration nachgewiesen.

Im fünften Kapitel wird die zeitliche Entwicklung und Veränderung der Schill-Flächen im Arbeitsgebiet untersucht. Ziel dieser Untersuchung war es Informationen über die Entwicklung und Veränderung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Vorkommen in Raum und Zeit zu erhalten. Des Weiteren sollte geprüft werden, ob und in welchem Umfang die Schill-Bedeckung mit den hydrodynamischen Prozessen im Arbeitsgebiet einhergehen. Es sollte die Frage geklärt werden, ob Schill-Vorkommen im Arbeitsgebiet als eventueller Indikator zur Rekonstruktion von hydrodynamischen Aktivitäten genutzt werden können.

Um diese Fragen zu klären wurden systematische Kartierungen auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996 bis 2005 durch analoge Luftbildauswertungen erfasst und begleitend durch Geländeuntersuchungen verifiziert. Um einen Zusammenhang zwischen Schill-Bedeckung und den hydrodynamischen Aktivitäten im Arbeitsgebiet herzustellen wurde eine thematische Verknüpfung von Luftbildkartierung- und Wellenparametern durchgeführt. Es galt nachzuweisen, ob Schwankungen bezüglich der Schill-Bedeckung eine zufällige Erscheinung sind oder im Zusammenhang mit den hydrodynamischen Wellenaktivitäten stehen. Im Zuge dieser Auswertung standen Daten des Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung.

Mit Hilfe der Luftbildkartierungen gelang es das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung im südöstlichen Gezeitenbereich der inneren Deutschen Bucht hochauflösend zu erfassen. Aufgrund von älterer Luftbildserien gelang es zudem auch frühere Zustände der Bedeckungsmuster der Schill-Flächen aufzuzeigen.

Es wurde festgestellt, dass sich in einem Zeitraum von zehn Jahren die Bedeckung von *M. arenaria* dominierenden Schill-Flächen insgesamt um 71,6 % zugenommen hat. Innerhalb

dieser relativ stetigen Bedeckungszunahme wurde im Jahr 2003 eine geringere Flächenbedeckung festgestellt. Sowohl die Gesamtzunahme als auch der Rückgang der Bedeckung wurden nicht nur für das gesamte Arbeitsgebiet, sondern auch für regionale und lokale Gebiete nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass Schill-Vorkommen nur in Gezeitenbereichen auftreten, in denen der Tidenhub höher als 3,2 m beträgt. Eine gegenläufige Entwicklung zu der Bedeckungszunahme wurde im Bezug auf die Schill-Flächenanzahl festgestellt. Die Kartierungen zeigen, dass aufgrund der Schill-Expansion die Flächenanzahl durch Anlagerungsprozesse abnimmt.

Nach Auswertung der Kartierungen und der Wellendaten konnte nachgewiesen werden, dass das Verteilungsmuster der Schill-Bedeckung und dessen Veränderung in Raum und Zeit nicht als zufälliges Ereignis zu deuten ist, sondern im engen Zusammenhang mit den hydrodynamischen Aktivitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes steht.

Die Untersuchung zeigt auch, dass die Schill-Bedeckung innerhalb des Arbeitsgebietes ohne entsprechende Geländeüberprüfung jedoch nur bedingt als natürlicher Indikator sowohl lokal als auch regional für die Rekonstruktion von ehemaligen hydrodynamischen Intensitäten herangezogen werden kann.

## Summary

The subject of this Ph.D. dissertation is the investigation of modern bivalve (*Mya arenaria*) dominated shell deposits within the eulitoral tidal range between the Jade Bay and Elbe River Mouth in the German Bight of the North Sea. The goal of this study is to obtain detailed information concerning the taphonomy, structure, distribution and genesis of these mass accumulations. Of special interest is the type of bivalve deposition found at the investigated sites. These include a variety of structures ranging from loose, separated valves on the sediment surface, to densely packed bivalves fragments (chips), to the rarely described densely packed, upright, vertically stacked single valves with longitudinal axes perpendicular to the sediment surface.

The shell deposits were studied by a variety of methods including: 1) field observations and collections with quantified surface and subsurface sampling methods, 2) detailed semi-quantitative taphonomic analysis of shell preservation, 3) flume experiments to analyze constraining parameters of flow conditions for shell accumulation, and finally 4) systematic mapping using GIS methods to determine yearly surface shell coverage and comparing these to measured wave intensities. These subdivisions correspond to the separate chapters of the dissertation and will be described in more detail in the following paragraphs.

The first chapter of this thesis gives a general introduction and an overview of the study area and the bivalve *Mya arenaria*.

Field observations and collections were made during numerous field campaigns in three different localities. These activities entailed recording surface textures, taking relief cast along profiles, as well as collecting samples for further investigations. The results (summarized in chapter 2) show that the processes leading to mass shell accumulation



include several steps starting with 1) the removal of shells from subfossil shell horizons; 2) the transport of shells to the shell accumulation sites and 3) deposition in the shell accumulations itself. Shell accumulation is initiated by erosion of old settlement horizons made up of double valved post-mortal *in situ* *M. arenaria* by lateral migration of tidal channels. Hydrodynamic and biostratinomic processes during transport and sedimentation then lead to a recurring deposition patterns. The shell deposit show a ramp-like morphology which can be divided into seven different zones each with characteristic shell orientations and taphonomic features. These zones include old settlement horizons made up of double valved post-mortal *in situ* *M. arenaria* (zone 1), different types of shell pavements (zone 2 a-c), shell “ribs” with imbricated shells (zone 3), rosette structures and chips (zone 4), the vertical packed structures (zone 5), terrace structure (zone 6) and shell patches in the leeward areas behind the deposits (zone 7).

The results of a taphonomic investigation of the *M. arenaria* shells in two selected shell deposits are presented in the third chapter. Semi-quantitative taphonomic analyses were conducted on the following taphonomic features: abrasion, encrustation, bioerosion, edge preservation and fragmentation. Bivariate taphonomic correlation analyses and size frequency distributions were calculated. Right/left ratios of the *M. arenaria* valves were analyzed to determine selective transport mechanisms. Multivariate data analysis was conducted to compare the taphonomy of different samples and localities. The size frequency distributions show significant differences between two different *M. arenaria* settlement horizons as well as between valve distributions within the shell deposits. A significant selective transport of valves could be shown for only one transect.

The semi-quantitative taphonomic analyses show that the increasing intensity of taphonomic features of shell preservation correlates with increasing transport distance. It can be shown that preservation states are mainly affected by hydrodynamic activity and the resulting biostratinomic processes. The results show that the individual valves are predominantly exposed to physical processes such as edge destruction, abrasion and fragmentation during continuous transport along the transects. Biological taphonomic process such as encrustation by balanids and bryozoans occur only after deposition and only in areas with reduced hydrodynamic flow velocities. The multivariate analysis shows that the intensity of abrasion, encrustation and edge destruction significantly increases with valve size. The analyses also show that the preservation of *M. arenaria* valves depends on 1) exposition and 2) the orientation of shells on the sediment surface within the shell deposits.

The fourth chapter describes flume tank experiments for determining the hydrodynamic constraining parameters of in the genesis of vertical upright single valves of *M. arenaria*. The results of the flume tank experiments were compared with the deposits as seen in the field. The experiments were also conducted to deduce the hydrodynamic wave parameters needed to produce the various packing and stacking patterns observed in the field. A series of experiments with different water depths and shell concentrations were conducted. The following parameters were considered: wave height, length, period and the run speed. Vertical and horizontal particle speed was furthermore determined computationally.

The test runs showed that it was possible to constrain the hydrodynamic condition leading to the vertical orientation of the valves and that several boundary conditions must be fulfilled in order to generate vertical orientation. Apart from shell morphology and concentration, the most important boundary conditions are wavelength, water depth and wave period as well as a specific horizontal particle speed. The vertical orientation of shells was reached in laboratory conditions within the following boundary conditions - wave period:  $T$  2-4 s, wavelength:  $L$  4-6 m, wave height:  $H$  0,14–0,25 m, phase velocity:  $c$  1,75-2 m/s, horizontal particle speed:  $u$  0,3-0,6 m/s and vertical particle speed:  $v$  0,02-0,05 m/s. The valves attain the final vertical position by a periodic wave movement. It was also possible to generate shell pavement, imbrications as well as rosette structures. Using the flume experiments, it was possible to decipher the individual steps leading to vertical packing. Furthermore, there is a close correlation between experimental and field based observations of the genesis and resulting shell packing structures.

Temporal developments and changes of shell deposit surface cover are examined in the fifth chapter. A goal of these investigations was 1) to study the change of *M. arenaria* shell deposits in space and time as well as to correlate these to hydrodynamic processes in the study area, and 2) to elucidate if the presence and development of these types of shell deposits can be used as a proxy for the reconstruction of hydrodynamic parameters. These goals were achieved by systematic mapping of shell cover based on aerial photographs from the years 1996 to 2005. These were verified by accompanying investigations of specific occurrences. Aerial mapping results and wave parameters were combined in order to study the relationship between shell cover and hydrodynamic parameters. For this reason, wave data from the "Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie" (Federal Office for Maritime and Hydrography) was edited and statistically analyzed.

The results show that in a period of ten years (1996 to 2005), the aerial cover of the shell deposits increased by 71,6 %. The only exception was in 2003 when a slight decrease was recorded. Both the overall increase, as well as the decline in shell cover was found not only for the entire study area, but also for regional and local areas. The results demonstrate that modern bivalve (*M. arenaria*) dominated shell deposits only occur in tidal flats with a tidal range higher than 3,2 m. It could also be demonstrated that the distribution pattern of shell cover and the change in space and time is not random, but closely related to hydrodynamic parameters within the study area. The results of this fifth chapter show that shell deposits within the tidal range due can potentially be used, at least partially, as a natural indicator for the reconstruction of former hydrodynamic intensities.

## Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit direkt oder indirekt geholfen und mir in den vergangenen Jahren zur Seite gestanden haben.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. James Nebelsick danke ich für die Vergabe und engagierte Betreuung dieser Promotion. Ein großes Dankeschön auch für die konstruktiven Anmerkungen und fachlichen Diskussionen sowie der finanzielle Unterstützung zum Ende meiner Promotionszeit. Ebenfalls bedanke ich mich für ein stets offenes Ohr und Verständnis für alle Dinge, die über fachliche Belange hinausgingen.

Herrn Prof. Dr. Franz T. Fürsich danke ich für die prompte Bereitschaft das Zweitgutachten für diese Arbeit zu erstellen.

Für das Interesse an meinem Dissertationsthema sowie den Anregungen und Diskussionen während der Kaffeepausen danke ich Herrn Prof. Dr. Burghard Flemming.

Für die Einführung in die Wellenkanal-Thematik in Marburg bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Klaus-Werner Tietze.

Herrn Dr. Günther Hertweck danke ich mich für die hilfreichen Gespräche und Diskussionen. Herrn Dr. Achim Wehrmann danke ich für die Vergabe der Thematik und der Bereitstellung der Logistik und des Arbeitsplatzes in Wilhelmshaven. Für die Unterstützung am Wellenkanal und den Arbeiten im Gelände danke ich Torsten Janßen. Bei Jeanette Horn bedanke ich mich für die Literaturbeschaffung und den netten Gesprächen. Des Weiteren bedanke ich mich beim gesamten Forschungsinstitut Senckenberg für die Unterstützung sowie für die Zusammenarbeit während meiner Dissertationszeit. Der Schiffsbesatzung des Forschungskutters „F/K Senckenberg“ danke ich für die Unterstützung während der Ausfahrten ins Wattenmeer.

Im besonderen Maße bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Gerald Millat für die Einführung und Hilfestellung in die Luftbildinterpretation sowie für die Nutzung des Aviopreten und der Luftbildserien in der Niedersächsischen Nationalparkverwaltung Wilhelmshaven.

Mein Dank gilt auch den Entscheidungsträgern der Landesgraduiertenförderung des Landes Baden-Württembergs für die Bewilligung meines Promotionsstipendiums.

Herzlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei meiner Freundin Janin Knie, die mir während dieser Zeit immer zur Seite stand und sich zum Schluss auch noch durch das Manuskript quälen musste.

Nicht zuletzt gilt ein ganz besonderer und herzlicher Dank meinen Eltern, die mich in jeder Hinsicht stets unterstützt haben.