

Mainzer naturwiss. Archiv	58	S. 149–178	14 Abb., 4 Tab.	Mainz 2021
---------------------------	----	------------	-----------------	------------

**Zur Farbgebung von *Donax trunculus* LINNAEUS, 1758
aus Populationen eines Hochenergiestrandes von
Trez Bellec / Anse de Caon bei Telgruc-sur-Mer
(Bucht von Douarnenez, Dep. Finistère, Bretagne, Frankreich)**

MATTHIAS C. GRIMM & GÜNTHER ENTENMANN

Kurzfassung

Untersuchungen an Schalen von *Donax trunculus* aus der Bucht von Douarnenez mit visuellen und fotografischen Methoden lassen eine Klassifizierung der Farbgebung in sieben verschiedene Farbvarianten zu. In Kombination mit der Farbgebung der Weichteile kann festgestellt werden, dass es zwei Pigmentgruppen gibt, die von blauvioletter oder gelboranger Färbung sind. Die gelborangen Pigmente können sehr wahrscheinlich auf Carotinoide zurückgeführt werden, die Herkunft der violetten Pigmente ist derzeit unbekannt.

Die Variationen der Farbgebung bei den Schalen können mit bestimmten Bereichen der Muschel-Anatomie korreliert werden. Ihre Entwicklung lässt sich teilweise durch gezeitenabhängige Wechselwirkungen der Anaerobiosis (Anreicherung von Metaboliten) und der Aerobiosis (Frischwasserdurchströmung) erklären, hängt darüber hinaus jedoch mit dem individuellen Lebensstil zusammen oder beeinflusst diesen. Tiefviolette Individuen sind tendenziell tiefer eingegraben, größer, schwerer und überwiegend männlich, weiße und gelbliche Individuen sind kleiner, leichter und enthalten einen höheren Anteil an weiblichen Tieren (morphologischer Geschlechtsdimorphismus). Die weiblichen Tiere unterscheiden sich von den männlichen durch einen höheren Blauanteil der Weichteile (chemischer Geschlechtsdimorphismus).

Durch die Erzeugung von individuellen Farbmittelwerten M_1 und Farbklassenmittelwerten M_2 können die Farbvarianten im HSB-Farbraum dargestellt und die Farbgebung unterschiedlicher Populationen verglichen werden. Demnach unterscheiden sich die Farbvarianten bei den untersuchten Populationen durch ihren Farbton (H), die Sättigung (S) und die Helligkeit (B). Die Population PTB mit höherem Nahrungsanteil an Braun- und Rotalgendetritus zeigt im Vergleich zur Population AC einen geringeren Rotanteil (bzw. höheren Blauanteil) bei M_1 und M_2 . Bei den Totfunden sind die Gelb-Rotanteile durch Sonnenbestrahlung reduziert.

Die Untersuchungen von trockenen Acetonextrakten der Weichteile mittels UV-VIS-Spektroskopie und Dünnschichtchromatographie ergaben, dass diese Carotinoide, Chlorophyllderivate und unbekannte farblose, unter UV-Licht weißblau fluoreszierende Substanzen enthalten. Es wurden fünf unterschiedliche Carotinoide erkannt, die jedoch nicht bestimmt werden konnten. Die durchschnittlichen Carotinoidgehalte der untersuchten Populationen unterscheiden sich nicht, die Individuen mit gelben Schalenpigmenten enthalten jedoch signifikant höhere Carotinoidgehalte in ihren Weichteilen, als die Individuen mit blauvioletten Schalenpigmenten.

Abstract

**The colouration of *Donax trunculus* LINNAEUS, 1758 in populations of a
high-energy beach at Trez Bellec / Anse de Caon near Telgruc-sur-Mer
(Baie de Douarnenez, Dep. Finistère, Brittany, France)**

Investigations on the shell colouration of *Donax trunculus* from the Bay of Douarnenez using visual and photographic methods allow the classification into seven colour variants. In combination with the colouration of the soft tissues, two pigment-groups can be determined, which are purple or yellow-orange in colour. The yellow-orange pigments can very probably be traced back to carotenoids. The origin of the purple pigments is unknown.

The variation of the shell colouration can be correlated with certain areas of the bivalve anatomy. Their development can partly be explained by tide-dependent interactions of anaerobiosis (accumulation of metabolites) and aerobiosis (cleansing water circulation), but is also related to or influenced by the individual lifestyle. Deep purple specimens tend to be buried deeper, are larger and heavier and predominately male; white and yellowish specimens are smaller, lighter and contain a higher proportion of females (morphological sexual dimorphism). Females differ from males by a higher blue value in soft tissue colouration (chemical sexual dimorphism).

Generating individual colour mean values M_1 and colour class mean values M_2 , the colour variants can be represented in the HSB-colour system and the colouration of different populations can be compared. Accordingly, the colour variants differ in the examined populations in terms of their hue (H), saturation (S) and brightness (B). The PTB population with a higher food supply of brown and red algae detritus shows a lower red value (resp. higher blue value) in M_1 and M_2 compared to the AC population. In the case of the beached dead shells, the yellow-red components are reduced by exposure to sunlight.

The examination of dry acetone extracts of the soft tissues with UV-VIS spectroscopy and thin-layer chromatography showed that these contain carotenoids, chlorophyll derivatives and unknown colourless substances with light blue UV-fluorescence. Five different carotenoids were recognized, but they could not be determined. The average carotenoid contents of the examined populations do not differ, but the individuals with yellow shell pigments contain significantly higher carotenoid contents in their soft tissues than the individuals with purple shell pigments.

Key words

Donax, Donacidae, Bivalvia, sexual dimorphism, shell colouration, HSB-colour system, UV-VIS spectroscopy, thin layer chromatography, carotenoids, population ecology

1. Einleitung

Die Familie Donacidae FLEMING, 1828 (Bivalvia, Heteroconchia) ist weltweit mit etwa 120 Arten in 4 Gattungen (Auflistung in WoRMS, Zugriff Mai 2021) in hochenergetischen sandigen Habitaten der unteren Gezeitenzone und im Flachwasserbereich tropischer bis gemäßigter Küsten beheimatet und wegen ihrer Häufigkeit oft vorherrschender Faunenbestandteil der dort anzutreffenden Biozönosen (ANSELL 1983, McLACHLAN 1983, LAUDIE et al. 2003, RIOS-JARA et al. 2019). Die rezenten Donacidae sind Suspensionsfilterer und leben flach bis mäßig tief vergraben im Sediment. Es handelt sich weitgehend um schnell grabende Formen (STANLEY 1970), wobei ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Eingrabetiefe und der Granulometrie besteht (DE LA HUZ et al. 2002). *Donax trunculus* zeigt ein negatives allometrisches Wachstum (GASPAR et al. 2002), lebt getrenntgeschlechtlich und bildet nach bisherigen Erkenntnissen, abgesehen von den Geschlechtsteilen, keinen erkennbaren Sexualdimorphismus und auch keine Zwitter aus (KANDEEL et al. 2018). Die Verhältnisse der Weibchen zu den Männchen schwanken je nach Milieu und Jahreszeit zwischen etwa 30 : 70 und 60 : 40 (LUCAS 1965, MOUËZA & FRENKIEL-RENAULT 1973, HAFSAOUI et al. 2016a, KANDEEL et al. 2018).

An Sandküsten der Adria stellen *Donax trunculus* LINNAEUS, 1758, *Donax semistriatus* POLI, 1795 und *Donax venustus* POLI, 1795 in der sogenannten *Donax*-Zone das häufigste Faunenelement des nassen Strandes unterhalb der Brecherzone. An den atlantischen Gezeitenküsten von der westlichen Bretagne bis Nouvelle-Aquitaine (Frankreich) sind an Sandstränden im unteren Infralitoral bis Subtidal ebenfalls *Donax*-Zonen ausgebildet. Sie wird dort von den Arten *Donax trunculus* LINNAEUS, 1758 und *Donax variegatus* (GMELIN, 1791) dominiert (ANSELL & LAGARDÈRE 1980, GUILLOU & LE MOAL 1980).

Am Sandstrand von Trez Bellec / Anse de Caon bei Telgruc-sur-Mer (Dep. Finistère, Bretagne, Frankreich) reicht die *Donax*-Zone vom nassen Strand des unteren Intertidals bis zum subtidalen Vorstrand. Sie wird im Intertidal von *Donax trunculus* dominiert, im Sublitoral ist *Donax variegatus* die häufigste Art (GUILLOU & LE MOAL 1980). Die *Donax*-Bestände wurden 2020 nicht befischt, da die Muscheln erhöhte Gehalte an Phytotoxinen enthielten.

Der 1,3 km breite, NW-SE-verlaufende Sandstrand von Trez Bellec / Anse de Caon wird durch zwei, wenige hundert Meter vorspringende Felssteilküsten begrenzt, dem Pointe du Bellec im SE und dem Pen ar Vir im NW. Der Tidenhub in der Bucht beträgt je nach Mondphase zwischen 2,70 m und

5,20 m. Der Strand liegt auf der NE-Seite der Bucht von Douarnenez. Diese wird durch das nach Südwesten vorspringende Cap de la Chèvre etwas eingeengt. Dies führt dazu, dass am Strand von Trez Bellec / Anse de Caon bei Flut eine von SW kommende auf-landige Strömung vorherrscht. Dadurch werden im Südosten des Strandes häufig auf den Felsgründen am Pointe du Bellec abgerissene Algen angeschwemmt, wobei im oberen Strandbereich Braunalgen (*Fucus vesiculosus*, *Fucus serratus*, *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata*, *Dictyopteris membranacea*, *Himantalia elongata*, *Laminaria digitata* u. a.), im unteren Strandbereich Rotalgen (hauptsächlich *Chondrus crispus*, untergeordnet *Palmaria palmata*) vorherrschen (vgl. Abb. 1). *Donax*-Arten sind hinsichtlich ihrer Morphologie und Färbung häufig auch innerhalb einer Population relativ variabel (SOARES et al. 1998, TAN & LOW 2013, AMBARWATI & FAIZAH 2017) und einzelne Arten aufgrund ihrer Farbe daher kaum unterscheidbar.

Die Wahrnehmung der Farbe von Muscheln, wie auch bei allen anderen Objekten ist sub-

jektiv. Sie hängt individuell vom Auge des Betrachters, der Beleuchtung, dem Schatteneinwurf, dem Glanz, der Oberflächenstruktur, der Feuchtigkeit und vielen weiteren Faktoren ab. Objektive Farbuntersuchungen an gefärbten Materialien erfolgen deshalb häufig nach standardisierten Verfahren anhand von Vergleichsfarbskalen, z. B. mit Hilfe der in den Geowissenschaften verbreiteten MUNSELL-Farbtafeln (MUNSELL COLOR 2009a, b) oder den seit 1993 in der Industrie gebräuchlich Farbtafeln des RAL-Design System (RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung). Gute Ergebnisse können auch mit spektroskopischen Scannersystemen erzielt werden. Diese finden z. B. in der Bodenkunde Anwendung (VISCARRA ROSSEL et al. 2006, SPRAFKE 2016). Alle diese Methoden setzen allerdings eine gewisse Gleichmäßigkeit der Farbgebung zumindest im Scannerfenster voraus. Meist wird dies durch Homogenisierung der Proben und standardisierte Verarbeitungsverfahren herbeigeführt.

Eine Sortierung von Lebewesen nach ihrer Farbe ist erheblich schwieriger als bei un-



Abb. 1: Blick vom Pointe du Bellec auf den Sandstrand von Trez Bellec / Anse de Caon mit Lage der Probenahme-stellen und der im Text genannten Algenanschwemmzone.

belebten Gegenständen, weil sie z. T. aus kleinräumig verzahnten Farbmosaiken unterschiedlicher Farbtöne, Sättigung und Helligkeit bestehen. Eine Unterscheidung farblicher Varianten wird zudem dadurch erschwert, dass sich die Färbungen häufig nicht stufenweise, sondern allmählich ändern und die Klassifizierung somit eher willkürlich ist. Zudem wird die technische Erfassung der Farbzusammensetzung dadurch erschwert, dass insbesondere kleinere Lebewesen in der Regel nicht eben sind und auch meist nicht bzw. nicht sinnvoll homogenisiert werden können. Die Einteilung von Lebewesen in Farbklassen erfolgt daher in der Regel empirisch.

Für die Donacidae werden als Schalenspigmente z. T. Carotinoide angenommen. Diesbezügliche Untersuchungen erfolgten bisher nur für *Donax serra* RÖDING, 1798 (BARNARD & DE WAAL 2006) und ergaben lediglich Hinweise auf Polyacetylene.

Untersuchungen von *Donax trunculus*-Populationen aus dem Schwarzen Meer zeigen, dass die Weichteile bei adäquater Bestimmungsmethodik Gesamtcarotinoidgehalte von bis zu ca. 50 mg/kg Trockenmasse (TM) enthalten (TAN & KIZILKAYA 2020). Untersuchungen zur Zusammensetzung der Carotinoide in den Weichteilen von Donacidae wurden bisher jedoch nicht durchgeführt (YABUZAKI 2017 [2020], Abfrage der Organismenliste Januar 2021).

2. Material und Methodik

2.1 Probenahme

Um einen ersten Überblick über die Farbvarianten bei *Donax trunculus* zu erhalten, wurden zunächst bei Ebbe im Spülgut 69 doppelklappige Schalen (Totfunde ohne Weichteile) aufgesammelt. Anschließend wurden in einem 0,6 m² und in einem 1 m² großen Areal innerhalb der *Donax*-Zone jeweils alle lebenden Individuen von *Donax* entnommen. Die Lokalitäten wurden so gewählt, dass die Probenahmestelle PTB innerhalb des Rotalgenabschnitts der eingangs erwähnten Algen-Anschwemmzone lag (PTB: UTM 30U E0398032 N5340646,

Aufsammlung am 09.08.2020, 0,6 m² Fläche, unteres Infralitoral, ca. 2,0 m ü. NN). Die zweite Probenahmestelle AC lag ca. 375 m nordwestlich von PTB außerhalb der Algen-Anschwemmzone (AC, UTM 30U E0397842 N5340979, Aufsammlung am 12.08.2020, 1 m² Fläche, ca. 3,0 m ü. NN). Zur Lage der Probenahmestellen siehe Abb. 1. PTB ergab 156 Individuen, AC ergab 191 Individuen der untersuchten Art. Die entnommenen Individuen wurden zunächst nach ihrer Farbgebung der Außenseite in die an den Totfunden ermittelten Farbvarianten sortiert und als Sammelprobe fotografiert. Anschließend wurde je ein Individuum geöffnet um die Farbgebung der Weichteile beurteilen zu können. Die Populationen wurden danach getrennt nach Probenahmestelle und nach Farbvarianten tiefgefroren um sie anschließend in Mainz weiter bearbeiten zu können.

2.2 Totfunde

Die im Spülgut aufgesammelten Totfunde wurden unmittelbar nach einer Reinigung mit Meerwasser visuell-deskriptiv nach ihrer Farbgebung auf der Außen- und Innenseite in Farbvarianten unterteilt und nach dem Abtrocknen sowohl von der Außenseite als auch von der Innenseite fotografiert. Alle Fotos wurden mit einer auf einem Stativ fixierten digitalen Spiegelreflexkamera Canon EOS 70D und einem handelsüblichen Makro-Objektiv im Nahaufnahmemodus bei ISO 400 gemacht.

Nach der fotografischen Aufnahme wurden die Schalen vermessen. Dabei wurde die Höhe *h* (senkrecht zur antero-posterioren Achse), die Länge *L* (parallel zur antero-posterioren Achse), der Durchmesser *d* (senkrecht zu *h*) und der Schalenrand-Winkel α (Winkel zwischen den hinter zu vor dem Wirbel gelegenen oberen Schalenrändern) erfasst.

2.3 Lebendfunde, Schalen

Nach dem Auftauen der Proben der Fundstellen AC und PTB wurden zunächst alle Individuen im geschlossenen Zustand vermessen. Anschließend wurden die Schalen

geöffnet und die Weichteile entnommen. Die Schalen und die Weichteile wurden anschließend separiert und getrennt weiterbearbeitet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Zuordnung sowohl der Schale, als auch der Weichteile zu jeweils einem bestimmten Individuum nachverfolgbar blieb. Nach vollständiger Entnahme der Weichteile wurden die Schalen in trockenem Zustand gewogen. Anschließend wurde jede der Schalen analog zur Behandlung der Totfunde vermessen und von innen fotografiert.

2.4 Lebendfunde Weichteile

Die Weichteile wurden zur weiteren Bearbeitung zunächst entwässert. Überschüssige Flüssigkeit wurde mittels einer Pipette entnommen und in ein Headspacegläschen überführt. Anschließend wurden die Weichteile auf ein Filterpapier gelegt um den Rest an freier Flüssigkeit aufzusaugen. Danach wurden die Weichteile gewogen. Das Gewicht wird im Folgenden als Frischgewicht (FW) bezeichnet. Danach wurden die Weichteile der Individuen einzeln fotografiert und wieder eingefroren. Nach Sortierung der Schalen in Farbklassen wurden die zugehörigen Weichteile im gefrorenen Zustand geordnet und zu je 2-5 g schweren farbklassenabhängigen Mischproben je Fundort vereint. Auf diese Weise wurden 15 Mischproben aus der Population der Fundstelle PTB und 16 aus der Population der Fundstelle AC gebildet. Die Nummerierung der MPs erfolgte als: Fundstelle Farbvariante-Mischprobennummer. Die erste Zahl nach AC oder PTB beschreibt somit die Farbvariante, die zweite bezieht sich auf die Mischprobennummer (z. B. AC 3-3 = Fundstelle AC, Farbvariante 3 – Mischprobe 3 oder PTB 1-2 = Fundstelle PTB, Farbvariante 1 – Mischprobe 2). Auf eine Wärme-Trocknung bzw. Veraschung der Weichteile zur Bestimmung von populationsdynamischen Parametern, wie dem Condition Index CI wurde verzichtet, da damit die geplante Bestimmung der Carotinoide gefährdet worden wäre. Eine Kalkulation der Biomasse erfolgte analog zu LAMINE et al. (2019) als Frischgewicht aller Individuen pro Quadratmeter (g/m²).

2.5 Bildung von Farbvarianten, Klassifizierung der Farbe

Die digitale Verarbeitung der aufgenommenen Fotografien erfolgte mit Adobe® Photoshop®. Dabei erfolgte zunächst erneut ein Weißabgleich, obwohl ein solcher bereits durch die Kamerasoftware vorgenommen wird. Anschließend wurden die Fotos der Innenseiten der Individuen freigestellt und mit Hilfe des Photoshop-Tools Histogramm die Mittelwerte M_{RGB} für Rot (R), Grün (G) und Blau (B) im RGB-Farbraum bestimmt. Diese Daten wurden dann im Einstellfeld für die Hintergrundfarbe manuell eingegeben und damit für jedes Individuum Mittelwerte M_i für den Farbton (Hue), die Sättigung (Saturation) und die Helligkeit (Brightness) im HSB-Raum berechnet. Der HSB-Farbraum entspricht einem Zylinder, bei dem die Helligkeit B von von oben weiß (100 %) nach unten schwarz (0 %) abnimmt, die Sättigung S von der zentralen Achse (0 %) nach außen zum Zylindermantel (100 %) zunimmt und der Farbton H auf einem linksdrehenden 360°-Farbkreis dargestellt wird, dessen Nullpunkt der Farbe Rot entspricht und rechts liegt (0° = 360°). Da eine dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse im HSB-Raum schwer erfassbar ist, wurden die Einzelergebnisse zur graphischen Darstellung auf zwei Schnittebenen projiziert. Die verwendeten Schnittebenen sind ein Querschnitt senkrecht zur Helligkeitsachse (H gegen S, Abb. 2a, 3a, 4a) und ein Längsschnitt durch den HSB-Farbzyylinder (S gegen B, Abb. 2b, 3b, 4b). Das Diagramm in Abb. 2b wird definiert als Ebene SB zwischen H = 237,5° (links) über B = 0-100 % zu H = 57,5° (rechts). Der ermittelte Farbton H wurde dabei empirisch in zwei Gruppen H₁ und H₂ aufgetrennt, die den an den Muscheln festgestellten Farbklassen-Endgliedern entsprechen (blauviolett und gelblich). Bei den Totfunden umfasst H₁ die Farbtöne 146° und 330° (grün-blau-purpur) und liegt in der Grafik auf der x-Achse links der zentralen B-Achse (S= 100 bis 0 %, „negative Werte“). H₂ umfasst die Farbtöne zwischen 331° und 145° (rot-gelb-grün) und wurde zur Darstellung auf der x-Achse

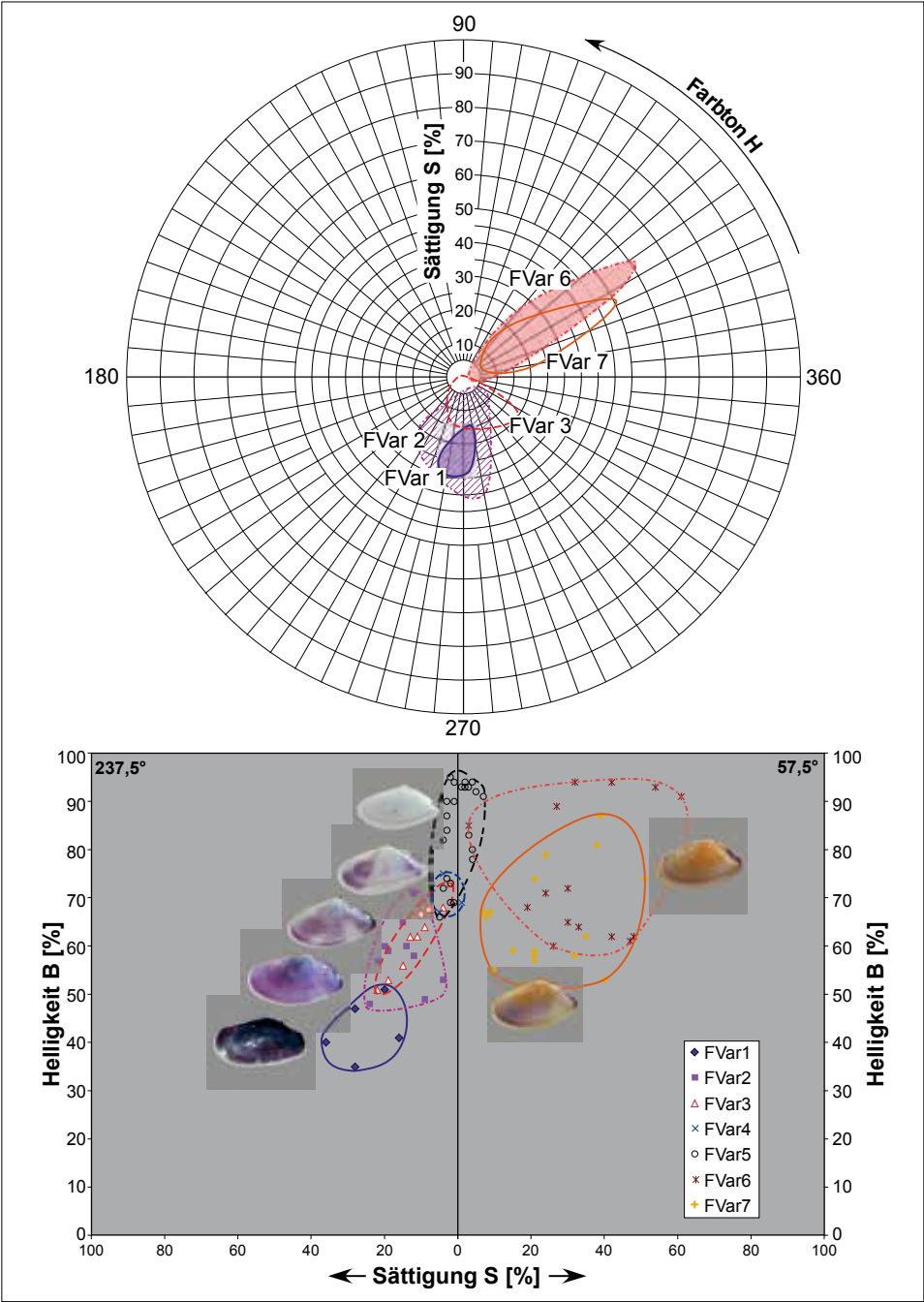


Abb. 2: Projektion der M_1 -Farbmittelwerte der Farbvarianten 1 bis 7 der untersuchten Totfunde von *D. trunculus* auf definierte Schnittebenen des HSB-Farbraums, 2a. Querschnittsebene HS (die Farbvarianten 4 und 5 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt), 2b. Querschnittsebene BS von $H = 237,5^\circ$ links nach $H = 57,5^\circ$ rechts.

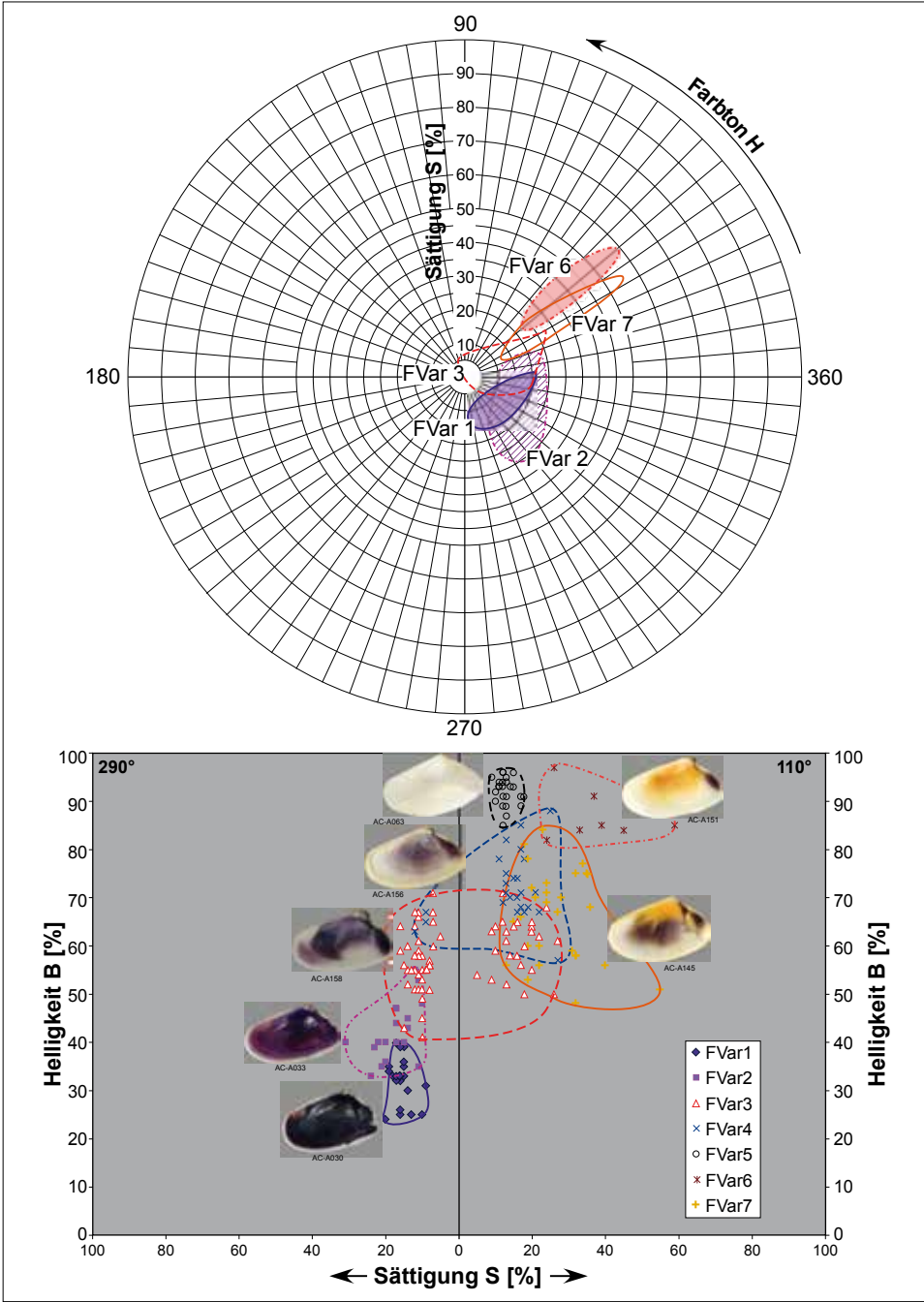


Abb. 3: Projektion der M_1 -Farbmittelwerte der Farbvarianten 1 bis 7 der *D. trunculus*-Population AC auf definierte Schnittebenen des HSB-Farbraums, 3a. Querschnittsebene HS (Darstellung als M1-Felder, die Farbvarianten 4 und 5 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt), 3b. Querschnittsebene BS von $H = 290^\circ$ links nach $H = 110^\circ$ rechts.

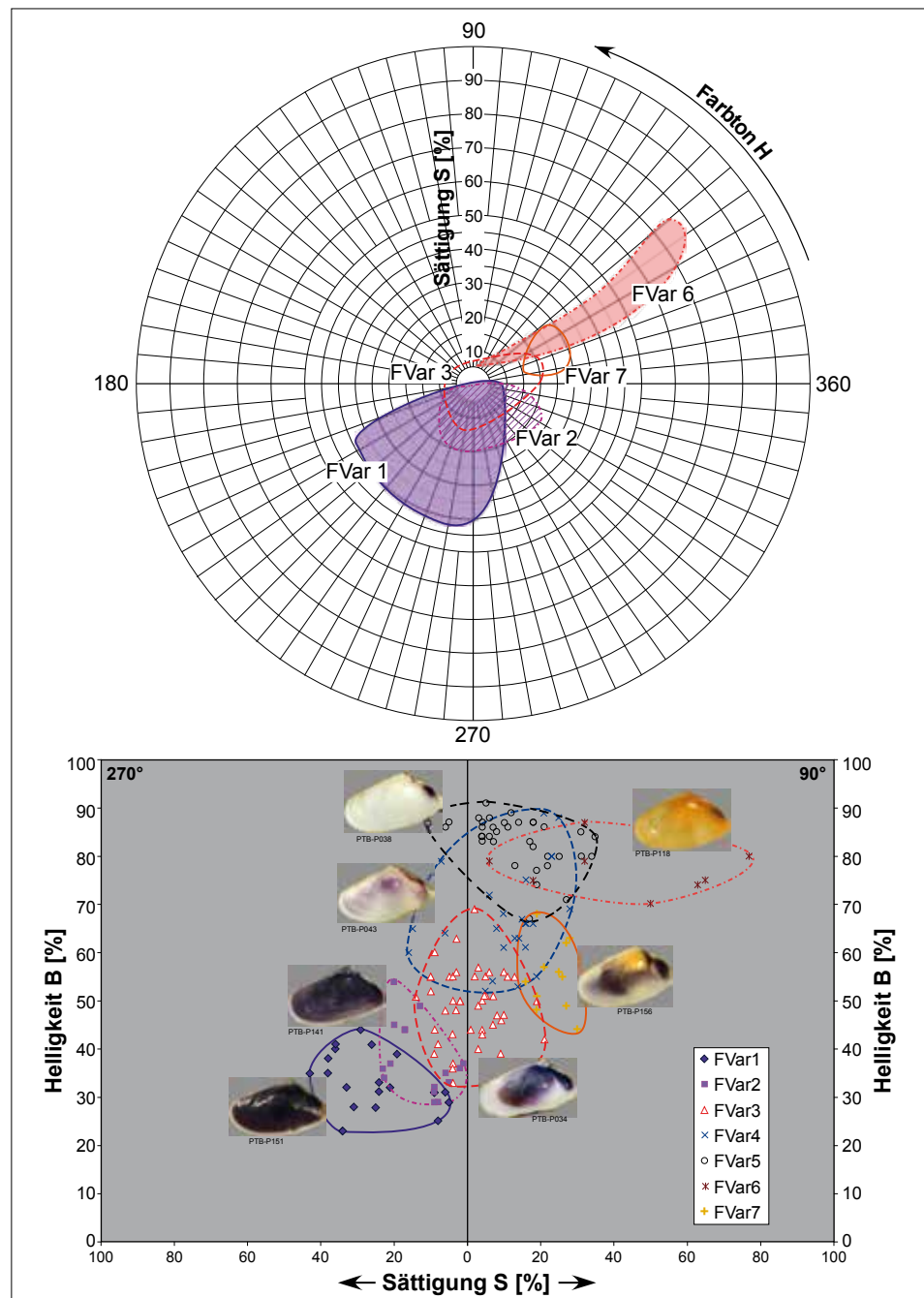


Abb. 4: Projektion der M_1 -Farbmittelwerte der Farbvarianten 1 bis 7 der *D. trunculus*-Population PTB auf definierte Schnittebenen des HSB-Farbraums, 4a. Querschnittsebene HS (Darstellung als M1-Felder, die Farbvarianten 4 und 5 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt), 4b. Querschnittsebene BS von $H = 270^\circ$ links nach $H = 90^\circ$ rechts.

spiegelbildlich rechts von B dargestellt ($S = 0$ bis 100 %, „positive Werte“). Die Darstellung der H_1 -Werte als negative Werte wurde ausschließlich deshalb eingeführt, damit das Datenverarbeitungsprogramm diese von den H_2 -Werten unterscheiden kann.

Bei den Schalen der beiden lebenden Populationen AC und PTB erfolgte die Verarbeitung der Fotos wie bei den Totfunden. Da für die erstellten Farbklassen insbesondere die Schaleninnenseiten benötigt wurden, mussten bei diesen Arbeiten z. T. Umsortierungen gegenüber der im Feld bestimmten Farbvarianten vorgenommen werden. Farbverschiebungen gegenüber den Totfunden führten weiterhin zu Verschiebungen der Längsschnitte durch den HSB-Farbzyylinder (S gegen B, Abb. 3b und 4b).

Auch an den Weichteilen erfolgen Farbuntersuchungen. So wurde analog zur o. g. Methodik die Farbe des Fußes im HSB-Farbraum bestimmt und Farbveränderungen an den Enden der Siphonen betrachtet.

2.6 Chemische Analytik, Bestimmung der Carotinoidgehalte

Die nach Kap. 2.4 aus den Weichteilen gebildeten Mischproben wurden in Anlehnung an MAOKA et al. (2011, 2012) zu Bestimmung des Gesamtcarotinoidgehaltes weiterverarbeitet. Jede Mischprobe wurde dazu in gefrorenem Zustand mit einem Keramikmesser zerkleinert und das zerkleinerte Fleisch danach bei Temperaturen zwischen 5°C und -20°C gefriergetrocknet. Das Trockenmaterial wurde anschließend zerkleinert und in 20 ml-EPA-Braunglas-Gewindefläschchen mit Butyl-PTFE-Schraubdeckeln überführt. Die Herstellung der Extrakte orientiert sich an TORISSEN & NAEVDAL (1984) und dort zitierten Arbeiten, YANAR et al. (2004), SUNHEL et al. (2009) und BONDAREV & MALAKOVA (2016) (siehe Anhang 1). Zur Messung wurden die Extrakte mit einer Tropfpipette in 1 cm-Quarzküvetten abgefüllt und mit einem Spektrometer das UV-VIS-Spektrum aufgenommen. Ausgewertet wurden die Extinktionen bei 663,0, 646,8 und 470,0 nm

mit den in LICHTENTHALER & BUSCHMANN (2001) bzw. LICHTENTHALER (2010) angegebenen Gleichungen:

- (1) Chlorophyll a: $c_a = 12,25 A_{663,2} - 2,79 A_{646,8}$ [$\mu\text{g/ml}$]
- (2) Chlorophyll b: $c_b = 21,50 A_{646,8} - 5,10 A_{663,2}$ [$\mu\text{g/ml}$]
- (3) Gesamtcarotinoide: $c_c = (1000 A_{470} - 1,82 c_a - 85,02 c_b) / 198$ [$\mu\text{g/ml}$]

In den untersuchten Proben wurden zwar Carotinoide gemessen, daneben sind nach den o. g. Gleichungen aber auch unbekannte Mengen an Chlorophyll zu erwarten. Das ist zunächst überraschend, weil nach den vorliegenden Literaturdaten Muscheln mit wenigen Ausnahmen nur auf Carotinoide untersucht wurden (z. B. KANTHA 1989, MAOKA et al. 2012). Zur Klärung der Fragestellung wurden die o. g. Extrakte daher auch dünnschichtchromatografisch untersucht. Chromatografiert wurde auf DC Aluminiumfolien der Fa. Macherey-Nagel mit Kieselgelschicht Alugram Xtra SIL G UV254 4×8 cm. Für die Untersuchung der Chromatogramme im UV-Licht wurde eine Schwarzlichtlampe Refoss RUV 001 mit einer Wellenlänge von 295 nm verwendet. Einige Chromatogramme wurden mit einem Smartphone fotografiert, andere hingegen ebenso wie alle Aufnahmen unter UV-Licht mit einer Panasonic Lumix Modell DMC-FZ2000. Die Tageslichtaufnahmen wurden zugeschnitten und zur Hervorhebung der kontrastarmen Flecken mit Photoshop nachbearbeitet. Aufnahmen unter UV-Licht wurden nur zugeschnitten.

Als Vergleichssubstanzen wurden Petersilienextrakt (enthält Chlorophyll a, Chlorophyll b, Phäophytin a, Lutein, Violaxanthin und Neoxanthin) und handelsübliche Carotinoidpräparate eingesetzt, welche Astaxanthin, β -Carotin, Fucoxanthin, Luteoxanthin und Violaxanthin enthalten. Die Herstellung der Extrakte und Vergleichslösungen ist im Anhang 2 beschrieben.

Es wurden unterschiedliche Laufmittel verwendet:

- Laufmittel A Benzin (130-220°) /
Isopropanol / Wasser 100 :
12,5 : 0,25.
Laufmittel B₁ Benzin (130-220°) /
Aceton 100 : 10
Laufmittel B₂ Benzin (130-220°) /
Aceton 70 : 30
Laufmittel C Benzin (130-220°) /
Isopropanol 100 : 20
Laufmittel D Benzin (130-220°) /
Isopropanol 100 : 30

Die Identifizierung erfolgt anhand der mitlaufenden Vergleichssubstanzen über publizierte Retentionsfaktoren (Rf-Werte, siehe Anhang 2), die Farbe und das Fluoreszenz-Verhalten der Substanzen.

3. Ergebnisse

3.1 Artspezifische Diagnose

Die Vermessungen der Schalen ergaben keine Hinweise auf eine Untergliederung der aufgesammelten Individuen in zwei oder mehr Arten. Die Schalenrandwinkel liegen bei allen untersuchten Individuen zwischen 113 und 134° (Mittelwert 122°). Die Längung (Länge / Höhe) variiert zwischen etwa 1,45 und 1,85 (durchschnittlich 1,64). Mit Zunahme der Längung nimmt auch der Schalenrandwinkel zu. Die Wölbungsverhältnisse (Höhe / halber Durchmesser) liegen im Mittel bei etwa 0,97. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der untersuchten Art eine geringfügige Ungleichklappigkeit besteht: So sitzt der Wirbel und der posteriordorsale Schalenrand der linken Klappe etwas höher als bei der rechten Klappe, wodurch die rechte Klappe minimal niedriger ist und etwas flacher wirkt. Die Größenzunahme erfolgt negativ allometrisch. Die untersuchten Individuen unterscheiden sich leicht von *Donax variegatus*, die einen größeren Schlossrandwinkel (ca. 135 bis 150°) und ein größeres Längen-Höhen-Verhältnis (ca. 2,0 bis 2,4) hat. *Donax vittatus*, die

ebenfalls in der Bretagne zu finden ist, unterscheidet sich durch ihren posterior-ventral leicht eingedrückten Schalenrand und tritt erst unterhalb der Niedrigwasserlinie auf.

3.2 Lebensraum und Populationsdynamik

Die vorliegenden Untersuchungen beruhen auf einmaligen Aufsammlungen an zwei Fundstellen. Aussagen zur Populationsdynamik sind damit nur begrenzt möglich. Die Untersuchung populationsdynamischer Prozesse war auch nicht vorrangiges Ziel der Untersuchungen. Die diesbezüglichen Angaben dienen lediglich als Hintergrundinformationen für die nachfolgende Diskussion.

An der Probenahmestelle PTB wurde mit 260 Individuen pro m² und einer Biomasse von 117 g m⁻² eine sehr hohe Besiedlungsdichte mit hohem Biomasseanteil festgestellt. Außer den gesammelten *Donax*-Individuen wurde keine weitere Makrofauna gefunden. Die Größe (Länge) der Individuen reicht von 15,0 bis 34,1 mm. Alle gesammelten Individuen lebten in den oberen 4-6 cm der Sedimentsäule im oxischen bis suboxischen Milieu in einem feinsandigem, schwach kiesigem Mittelsand. Die anaerobe Bodenzone, erkennbar an dem Farbwechsel des Sediments von braunen zu grauen Farben (= Oberkante der Sulfatreduktionszone), lag im Bereich der Untergrenze der Grabtiefe der Arten bei ca. 5-6 cm Tiefe und war zusätzlich durch einen Sedimentwechsel zu feinkiesigen Grobsanden markiert. Aufgrund der Lage innerhalb der o. g. Algenanschwemmzone ist im Bereich der Probenahmestelle ein hoher Gehalt an verfügbarem Biodetritus in der Wassersäule zu erwarten, der aus Braun- und Rotalgendetritus besteht.

An der Probenahmestelle AC wurde mit 191 Individuen pro m² eine ebenfalls sehr hohe Besiedlungsdichte festgestellt. Der Biomasseanteil von 62 g m⁻² liegt im Vergleich zu *Donax trunculus*-Populationen anderer Untersuchungsgebiete jedoch im unteren jahreszeitlichen Schwankungsbereich (LAMINE et al. 2019). Er ist deutlich geringer als an der Probenahmestelle PTB. Die Größe (Länge)

Tabelle 1: Längenangaben in mm für die Jahreszyklen (Jahresringe im Winterminimum) für ausgewählte Individuen aus den Population AC (AZahl) und PTB (PZahl), wobei die Zahl die Individuen-Nr. beschreibt. Die Anordnung erfolgt nach der Länge am 1. Jahresring.

Individuum	A60	P3	P82	A28	A24	A140	P122	P119	A112	A82	P121
Winter 2016/17	--	5,8	7,0	--	8,1	8,2	8,3	--	--	--	--
Winter 2017/18	--	16,1	16,2	7,5	12,4	16,6	16,2	--	--	10,4	10,7
Winter 2018/19	--	21,0	21,2	18,3	17,7	21,2	22,4	--	9,3	20,0	21,0
Winter 2019/20	5,7	26,4	26,6	25,4	24,1	27,3	28,4	8,7	20,7	26,5	27,1
08/2020	14,9	28,8	27,3	26,6	26,9	29,8	30,3	16,6	25,7	28,7	28,3

der Individuen reicht von 14,9 bis 30,8 mm. Außer den gesammelten *Donax*-Individuen ließen sich im untersuchten Areal während ablaufendem Wasser in der Schwappzone einige jagende *Euridice pulchra* (Seelaus, Isopoda) und *Talitrus saltator*-Männchen (Strandflohkrebs, Amphipoda) sowie ein juveniler *Ophiobrix fragilis* (Schlangenster, Ophiuroidea) nachweisen. Die gesammelten *Donax*-Individuen von AC lebten in den oberen 5-6 cm der Sedimentsäule im oxischen bis suboxischen Milieu in einem schwach feinsandigem, schwach grobsandigen, schwach kiesigem Mittelsand mit einem Schillanteil von ca. 10 %. Die Oberkante der Sulfatreduktionszone (= Oberkante der anaeroben Bodenschicht) lag nur knapp unter der Grabtiefe der Arten bei ca. 6-8 cm Tiefe und somit etwas tiefer als an der Probenahmestelle PTB. Die maximalen Längen von *Donax trunculus* betragen nach GUILLOU & LE MOAL (1980) in der Bucht von Douarnenez etwa 42 mm. Solche großen Individuen sind im Untersuchungsmaterial zwar nicht vorhanden, am untersuchten Strandabschnitt aber hin und wieder zu finden. Die untersuchten Individuen mit einer Länge von maximal 34,1 mm liegen im üblichen Größenrahmen. Individuen mit einer Länge von < 14,9 mm konnten jedoch nicht festgestellt werden. Über die absoluten Lebensalter von *Donax trunculus*-Individuen gibt es je nach Untersuchungsgebiet unterschiedliche Angaben. Anhand der auf den untersuchten Schalen häufig erkennbaren Anwachslineenmuster mit z. T. deutlichen Jahresringen kann man feststellen, dass die lebend gefundenen Individuen mehr als ein Jahr und höchstens

fünf Jahre alt sind (Jahrgänge 2016 bis 2019, vgl. Tabelle 1). Die absoluten Lebensalter der untersuchten *Donax trunculus*-Populationen entsprechen somit denen anderer Fundpunkte in der Bucht von Douarnenez (GUILLOU & LE MOAL 1980, GUILLOU 1982, THÉBAUD et al. 2005) und von der Île d'Oleron in der Biscaya (ANSELL & LAGARDÈRE 1980), unterscheiden sich aber deutlich von z. B. marokkanischen Fundstellen, an denen die Art bei gleichen Größen z. T. nur 1,5 Jahre alt werden soll (LAMINE et al. 2019).

Die an den Schalen abgegriffenen Längenverhältnisse für die bis einjährigen Individuen liegen bei unter 11 mm (vgl. Tabelle 1) und somit deutlich unter den Größen der kleinsten nachgewiesenen Individuen. Daraus lässt sich folgern, dass bei den untersuchten Populationen keine Individuen auftreten, die weniger als ein Jahr alt sind. Das Fehlen der juvenilen Individuen kann damit erklärt werden, dass diese gewöhnlich höher am Strand zu finden sind (GUILLOU 1982).

Aus dem Unterschied im Größenzuwachs der juvenilen Schalentteile bis zum ersten winterlichen Anwachsring kann man ableiten, dass im Untersuchungsbereich pro Jahr mehr als eine Larvenfreisetzung stattfindet. Die Individuen wachsen nach dem ersten Winter, bezogen auf die Länge etwa 10-11 mm, danach nur noch etwa 5-7 mm pro Jahr. Die Zuwachsraten sind geringer als diejenigen, die in den 1970er bis 1980er Jahren bestimmt wurden (GUILLOU & LE MOAL 1980, GUILLOU 1982).

Eine Auswertung der Größenverhältnisse mit Hilfe der Methodik von BHATTACHARYA (1967) ermöglicht die Einteilung der untersuchten Populationen in sieben (AC) bis neun

Gruppen (PTB) gleichaltriger Individuen (= Kohorten). Die relativen Maxima der Kohorten liegen relativ dicht zusammen (vgl. Abb. 5). In Verbindung mit den ermittelten absoluten Altern von ca. 5 Jahren (siehe oben) und unter der Annahme, dass noch mindestens eine Kohorte für die fehlenden juvenilen Individuen hinzu zu rechnen ist, muss man auch nach dieser Darstellung davon ausgehen, dass es zwei Larvenfreisetzungsphasen pro Jahr gibt.

Die Untersuchungen der Verhältnisse der Frischgewichte zur Schalenlänge ergeben bei Anwendung einer potenziellen (geometrischen) Regression hohe Korrelationsfaktoren von $r = 0,93$ für PTB und $0,96$ für AC bzw. hohe Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0,872$ für PTB und $R^2 = 0,929$ für AC (vgl. Abb. 6). Ähnliche Zusammenhänge wurden von HAFSAOUI et al. (2016b) für *Donax trunculus*-Populationen von der nordafrikanischen Mittelmeerküste (Nordost-Algerien) ermittelt, wobei diese eine exponentielle

Regression verwenden. Bei den untersuchten Populationen PTB und AC aus der Bretagne sind die Frischgewichte im Verhältnis zu den von HAFSAOUI et al. (2016b) untersuchten *Donax*-Populationen von Nordost-Algerien relativ hoch.

3.3 Farbgebung, Farbvarianten

Die untersuchten *Donax*-Populationen lassen sich sowohl bei den aufgesammelten Totfunden, als auch bei den beiden Probenahmestellen PTB und AC sieben Farbvarianten (FVar1 bis FVar7) zuordnen, die sich durch die Färbungen der Innen- und Außenseite der Schalen, jedoch kaum durch Farbunterschiede bei den Weichteilen unterscheiden lassen (vgl. Tab. 2). Da die Färbungen der Schalenaußenseiten infolge einer Überdeckung durch das dünne Ligament oder Erosion häufig verfälscht sind, wurde bei der Zuordnung hauptsächlich die Färbung der Schaleninnenseiten berücksichtigt. Die

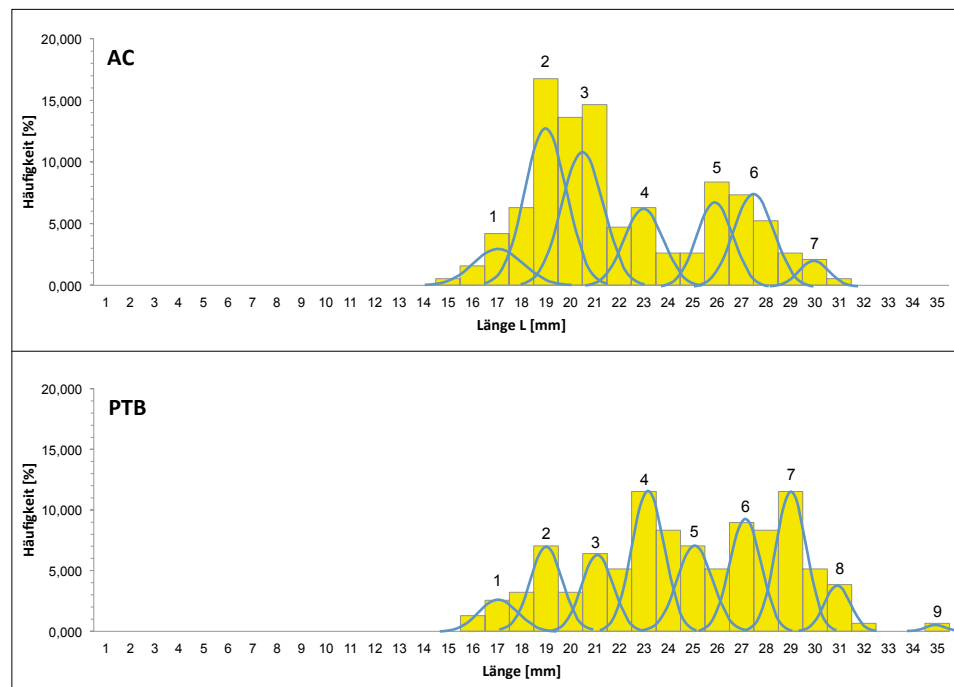


Abb. 5: Größenverteilung von *Donax trunculus* an den Probenahmestellen AC (a) und PTB (b) mit Angaben der erkennbaren Kohorten.

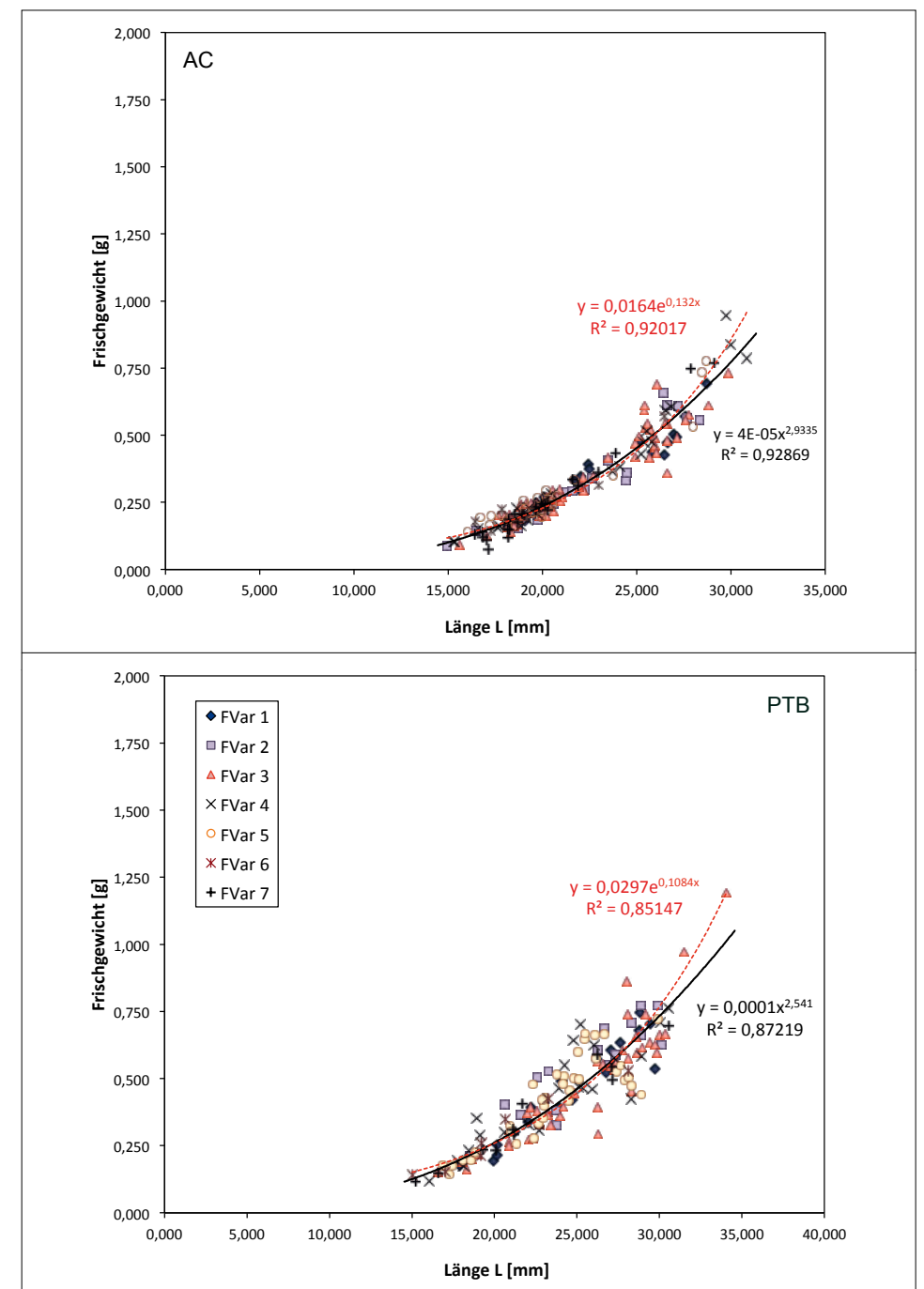


Abb. 6: Darstellung der Größenverhältnisse im Verhältnis zur Gewichts Zunahme an den Probenahmestellen AC (a) und PTB (b) und Regressionskurven (rot = exponentielle Regression, schwarz = geometrische Regression).

Tabelle 2: Farbvarianten bei den untersuchten *Donax*-Populationen vom Plage de Trez Bellec / Anse du Caon.

Farbvariante	Außenseite	Innenseite	Weichteile
FVar1	blauviolett bis beige-grauhellgelb Radialstreifung deutlich	violett bis blauviolett	F + M gelbbraun, MR orange, G + Spitzen der Siphonen meist orange
FVar2	rosabräunlich bis violett, Radialstreifung undeutlich bis fehlend	zwischen U und PL größtenteils violett bis rotviolett, PLS, PS und PA hellviolett bis weiß	F + M gelbbraun, MR orange, G hellgelb, randlich orange, Spitzen der Siphonen meist orange
FVar3	rosabräunlich bis hellbraun, Radialstreifung undeutlich bis fehlend, weiß bis braun	U, PLS, PS, AA und PA weiß, zwischen AA und Schalenrand violett, sonst fleckig hellviolett bis rotviolett	F + M hellgelblichbraun, MR gelb, G hellgelb, randlich orange, Spitzen der Siphonen orange
FVar4	hellbraun bis hellbeige-braun, Radialstreifung weiß oder fehlend	U, PLS, PS, AA und PA weitgehend weiß, zwischen AA und Schalenrand violett, sonst fleckig hellviolett-weiß	F + M + MR hellgelborange, G hellgelb, randlich orange, Spitzen der Siphonen orange
FVar5	hellbeige-braun bis cremeweiß	zwischen AA und Schalenrand violett bis weiß, sonst weiß	hellgelb bis hellbeige-braun, Spitzen der Siphonen meist orange
FVar6	gelblich bis gelblich-braun mit 2-3 breiten undeutlichen Radialstreifen	zwischen AA und Schalenrand violett bis gelblich, U gelb-orange, Richtung PL abnehmende gelbe Pigmentdichte, sonst größtenteils weiß	F + M + MR hellgelb, G rotorange, Spitzen der Siphonen meist orange
FVar7	dottergelb bis ocker, Protoconch orange, ungestreift oder mit 2-3 undeutliche Radialstreifen	wie FVar6, jedoch Hintergrundfarbe fleckig hellviolett	F + M hellgelborange, MR hellorange, G hellgelb, randlich orange, Spitzen der Siphonen orange

AA = vorderer Schließmuskelabdruck, F = Fuß, G = Kiemen, M = Mantel, MR = ventraler Mantelrand, PA = hinterer Schließmuskelabdruck, PL = Palliallinie, PLS = Bereich zwischen Palliallinie und Schalenrand, PS = Mantelsinus, U = Wirbel

Farbvarianten 1 (tiefviolett), 5 (weiß) und 6 (gelb), jeweils bezogen auf die Pigmentierung der Innenseiten, stellen die drei Grundtypen dar, die Farbvarianten 2 bis 4 liegen zwischen der tiefviolett (FVar1) und weißen Variante (FVar5), die Farbvariante 7 zwischen der gelben (FVar6) und der tiefviolett Variante (FVar1). Im Bereich der weißen bis gelben Farbvarianten 5 bis 6 gibt es ebenfalls unterschiedliche Pigmentabstufungen, doch lassen sich diese visuell kaum noch unterscheiden und wurden daher auch nicht als Farbvariante ausgewiesen. Weiterhin bestehen Übergänge der violett-fleckigen Farbvariante 3 zur gelb-violett-fleckigen Farbvariante 7. Die statistische Verteilung der Farbvarianten in den untersuchten Populationen AC und PTB sowie bei den Totfunden unterscheiden sich teilweise (vgl. Abb. 7). Die Farbvariante

3 ist bei den lebenden Populationen am häufigsten, bei den Totfunden dominieren dagegen die Farbvarianten 5 und 6. Die Farbvariante FVar5 ist auch bei PTB häufig (zweithäufigste), in AC ist dagegen FVar7 die zweithäufigste. Die Methodik der graphischen Darstellung der Farbvarianten 1 bis 7 in den Abbildungen 2 bis 4 wurde bereits oben erläutert. Die Punkte der Individuen in den Diagrammen stellen jeweils individuelle Mittelwerte (M_i) für die Farbe, die Sättigung und die Helligkeit der gesamten Schale eines Individuums im HSB-Farbraum dar und entsprechen somit nur bei einfarbigen, gleichmäßig gefärbten Individuen etwa der tatsächlichen Farbe. Dies ist nur bei den Farbvarianten 1 (tiefviolett), 5 (weiß bis cremeweiß) und 6 (gelb) der Fall. Bei allen anderen ist die Abweichung relativ

groß, am deutlichsten ist sie bei der Farbvariante 7 (gelb-violett-weiß gefleckt), bei der M_i im Bereich von beigen bis braunen Farbtönen zu liegen kommt. Dennoch führt die Darstellung der M_i -Werte in den HS- und BS-Diagrammen zu einer deutlich erkennbaren Aufgliederung. Die Übergänge der einzelnen Farbvarianten ineinander sind auch bei der visuellen Untergliederung als Übergänge erkennbar. Unterschiede zwischen unterschiedlichen Aufsammlungen sind dagegen innerhalb einer Farbvariante visuell kaum bemerkbar. Bei den Farbmessungen fiel jedoch auf, dass sich die Farbvarianten zwischen den einzelnen untersuchten Populationen unterscheiden und auch Unterschiede zu den Farbvarianten der Totfunde bestehen. Dies wird insbesondere deutlich, wenn man für jede Farbvariante der drei Aufsammlungen die Varianten-Mittelwerte (M_2) bestimmt und vergleicht (siehe Tab. 3 und Abb. 8). Bei allen drei Serien nimmt die Helligkeit (B) der M_2 -Werte von FVar1 zu FVar5 hin zu und dann von FVar5 zu FVar7 wieder ab. Die Farbwertgrade (H) der M_2 -Werte nehmen bei AC und PTB von FVar1 zu FVar5 zu und dann

zu FVar7 wieder ab, bei den Totfunden nehmen sie von FVar1 zu FVar7 ab. Die Unterschiede bei M_2 zwischen den einzelnen Serien sind in der Visualisierung in Abb. 8 deutlich erkennbar. So ist zu beobachten, dass sich die M_2 -Werte bei den Totfunden von FVar1 bis FVar4 vom violetten bis in den blauen Bereich verschieben, während sie sich bei PTB von FVar1 bis FVar4 von violett zu rot-orange und bei AC von rotviolett zu orange verändern. Der M_2 -Wert der Farbvariante 5 liegt bei den Totfunden dann im Übergangsbereich grün-türkis, die Farbvarianten 5 und 6 reichen bis zu gelben Farbtönen. Bei PTB und AC liegt FVar1 dagegen im gelben Farbbereich, bei den Farbvarianten 6 und 7 laufen die M_2 -Werte dann wieder in den Rotbereich zurück. Die visuellen Farbwahrnehmungen in Abb. 8 unterscheiden sich dabei von den vorgenannten technischen, da die geringe Sättigung und große Helligkeit zu einer Störung der optischen Wahrnehmung führt. Anhand der Farbtöne (H) ist erkennbar, dass die Farbgebungen der Population AC einen höheren Rotanteil aufweisen als PTB. Bei beiden Populationen verlaufen die H-Werte entgegen dem Uhrzeigersinn von violett über rot

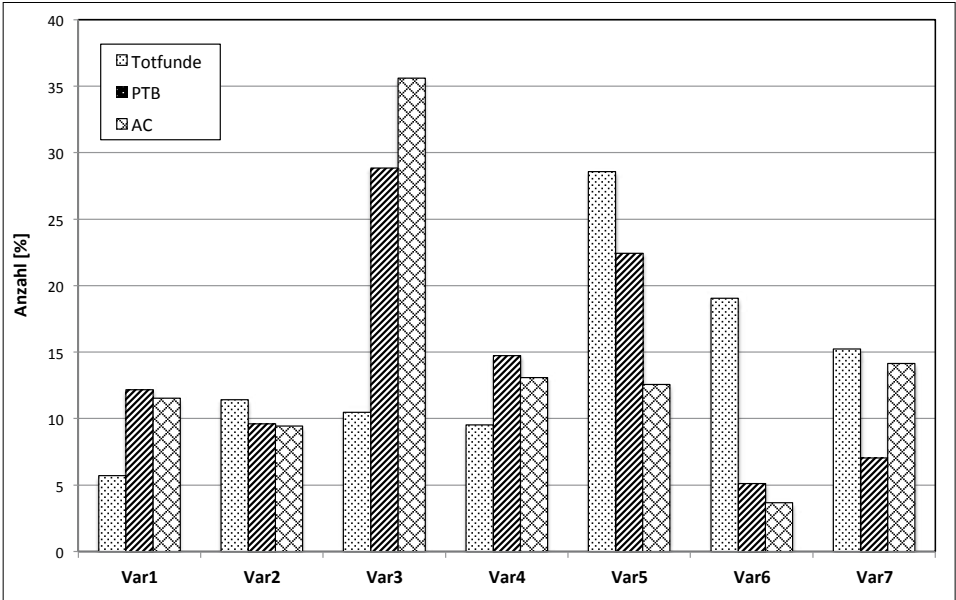


Abb. 7: Verteilung der Farbvarianten von *D. trunculus* bei den Totfunden und den Populationen AC und PTB.

Tabelle 3: M_2 (= arithmetisches Mittel aller M_1 -Werte einer Farbvariante) der Farbvarianten 1 bis 7 der untersuchten Populationen im Vergleich. Angaben im HSB-Farbraum, dargestellt als H/S/B (vgl. Abb. 8).

Farbvariante	FVar 1	FVar 2	FVar 3	FVar 4	FVar 5	FVar 6	FVar 7
Totfunde	269/26/44	261/15/56	259/10/64	203/7/72	173/6/81	58/33/76	48/21/69
PTB	269/26/33	278/12/37	352/6/49	10/14/66	40/15/83	40/43/77	23/23/55
AC	328/16/32	342/18/42	7/13/58	27/16/72	51/13/92	42/38/87	30/27/66

zu gelb und dann wieder Richtung rot. Die H-Werte der Farbvarianten der Totfunde verlaufen dagegen im Uhrzeigersinn von violett über grün zu gelb. Zudem weisen die Farben insgesamt eine geringere Variabilität auf, sind weitgehend heller (Ausnahmen FVar5 und 6) oder besitzen eine geringere Sättigung (FVar5 bis 7). Visuell betrachtet wirken die M_2 -Farben der Totfunde blasser. Übergänge von z. B. der Farbvariante 3 zu 7 kommen bei den Totfunden nicht vor, sind bei PTB selten, bei AC dagegen überaus häufig. Zusammenhänge zwischen schalenmorphologischen oder populationsdynamischen Parametern und den Farbvarianten sind nicht direkt erkennbar. Allerdings wurde bei den Aufsammlungen beobachtet, dass die Individuen mit den Farbvarianten 1 und 2 häufig tiefer eingegraben waren als die übrigen. Die Farbmessungen der Farbe des Fußes bei der Population AC ergaben eine mäßig gute lineare Korrelation zwischen dem Farbton H und der Sättigung S (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,473$, vgl. Abb. 9), es lassen sich aber keine Zusammenhänge zu den Farbvarianten bei den Schalen erkennen. Eine meist gelblich bis orangefarbene Verfärbung der Siphonenspitzen tritt bei nahezu allen Farbvarianten häufig auf, ist jedoch bei den Farbvarianten 1 und 6 mit nur 71-73 % weniger häufig als bei den Farbvarianten 3, 4, und 7 mit über 88-



Abb. 8: Visuelle Darstellung der M_2 -Farbmittelwerte der unterschiedlichen sieben Farbvarianten von *D. trunculus* bei den Totfunden (obere Zeile) und den Populationen PTB (mittlere Zeile) und AC (untere Zeile). Die zugehörige HSB-Datensätze sind in Tabelle 3 aufgelistet.

96 %. Weiterhin ist auffällig, dass die hinteren Weichteile und die unteren Teile der Siphonen bei den Farbvarianten unterschiedlich häufig eine visuell erkennbare leichte Graufärbung (Zunahme des Blauanteils) aufweisen (vgl. Abb. 10). Diese Graufärbung macht bei FVar1 bei beiden Populationen unter 25 % aus und ist bei FVar5 am höchsten. Insgesamt machen die Individuen mit einer Graufärbung der Weichteile bei AC etwa 49 % der Population aus. Der Anteil von Individuen mit Weichteilen, deren Farbe einen erhöhtem Blauanteil zeigt, ist bei PTB im Vergleich zu AC nur etwa 8 % höher. Die Verteilungen unterscheiden sich aber deutlich. Während bei AC von FVar1 zu FVar5 eine Zunahme, danach bis FVar7 eine Abnahme erkennbar ist, liegen die Graufärbungsanteile bei PTB außer bei FVar1 (Minimum) und FVar5 (Maximum) bei allen Farbvarianten bei etwa 60 %.

3.4 Pigmentgehalte der Weichteile

Die untersuchten Extrakte der Mischproben enthalten Carotinoide, unbekannte Chlorophylle und Chlorophyll-Derivate sowie unbekannte farblose, UV-aktive Substanzen. Bei der benutzten UV-VIS-spektroskopischen Methodik von LICHTENTHALER & BUSCHMANN (2001) und LICHTENTHALER (2010) werden die Carotinoide in Summe und die Chloro-

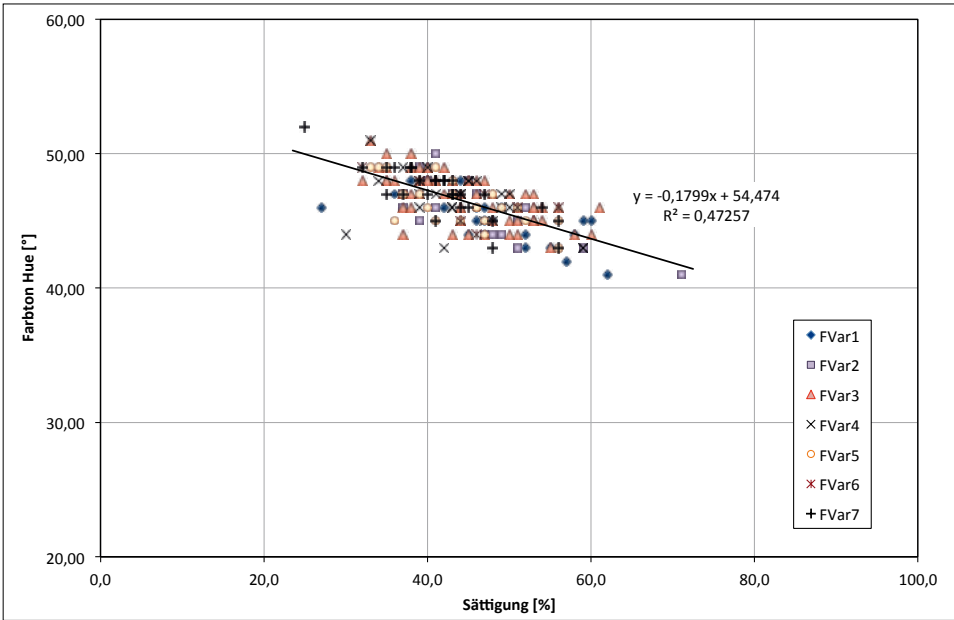


Abb. 9: HSB-Farbton (Hue) und Sättigung der Farbe des Fußes bei der Population AC.

phyll und deren Derivate als Chlorophyll a und Chlorophyll b erfasst. Ein typisches Spektrum ist in Abbildung 11 zusammen mit den Spektren einiger Vergleichssubstanzen

dargestellt. Die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen zur Pigmentzusammensetzung der Weichteile sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

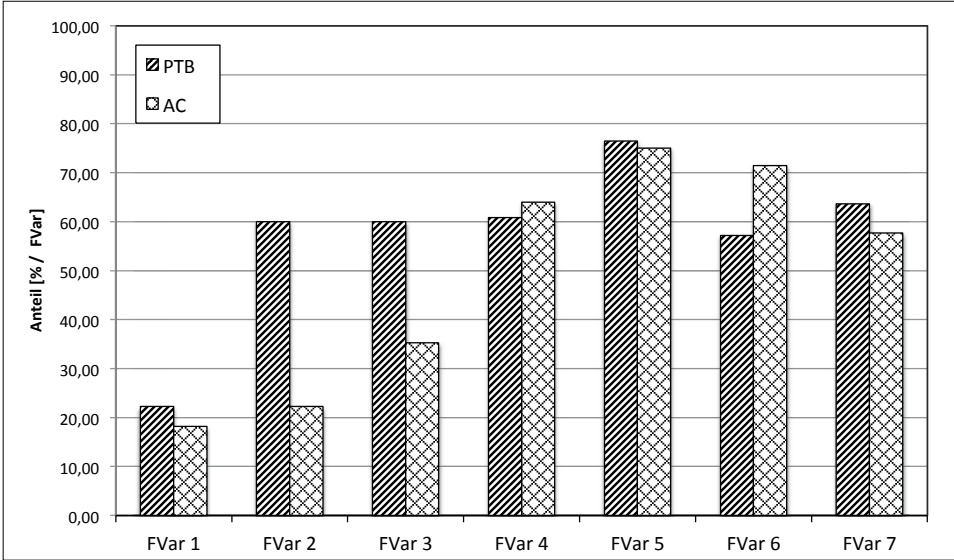


Abb. 10: Prozentualer Anteil der Individuen mit erhöhtem Blauanteil (Graufärbung) im Bereich der hinteren Weichteile und der unteren Teile der Siphonen bei den Farbvarianten der Populationen AC und PTB im Vergleich.

Mit Hilfe des verwendeten Laufmittels (vgl. Kap. 2.6) werden die untersuchten Extrakte, sowie die als Vergleichssubstanzen verwendeten Carotinoide (β -Carotin, Astaxanthin), der Petersilienextrakt und der Extrakt des Fucoxanthin-haltigen Seealgenmehls ausreichend aufgetrennt (siehe Abb. 12). Die untersuchten *Donax*-Extrakte enthalten weder Chlorophyll a noch Chlorophyll b, stattdessen jedoch ein hellgrünes Chlorophyll unbekannter Zusammensetzung und beträchtliche Mengen eines unbekannten Chlorophyll-Metaboliten. Auf Grund der Absorptions-Spektren handelt es sich möglicherweise um Chlorophyll der Chlorophyll c-Gruppe, Chlorophyll d und sehr wahrscheinlich um Phäophorbid a (vgl. Abb. 11). Weiterhin lassen sich bis zu 5 unterschiedliche gelbe bis orange-farbene Carotinoide nachweisen, die nicht näher bestimmt werden konnten. Wir vermuten, dass es sich um Carotinoidester und Xanthophylle aus der Verstoffwechselung von Fucoxanthin, Peridinin, Diatoxanthin und anderen handelt, die im Nahrungsangebot vorhanden

sind. Zusätzlich treten mindestens zwei farblose, jedoch unter UV-Licht fluoreszierende Substanzen (Fluoreszenzemission ca. 490 nm) unbekannter Zusammensetzung auf, deren Retentionsfaktoren sich z. T. mit denen der Chlorophylle überschneiden. Eine tabellarische Auflistung der festgestellten Pigmente und deren Retentionsfaktoren im Vergleich zu Literaturdaten sind als Anhang 3 beigelegt. In der Literatur wird das mögliche Vorkommen von Chlorophyll-Derivaten in Bivalven meist nicht erwähnt. Bei der Spektroskopie stören die Chlorophylle, weil sie im gleichen Wellenlängenbereich absorbieren wie Carotinoide. Chlorophyll und Chlorophyll-Derivate wurden in den Proben aus Tabelle 4 dünnstschichtchromatografisch in beträchtlichen Mengen nachgewiesen (Abb. 12). Ihre Berücksichtigung bei der Spektroskopie ist daher zwingend, da es sonst zu Überbefunden bei den Carotinoidgehalten kommt. Daher wurden im o. a. Vergleich nur Daten herangezogen, die nach Abtrennung oder bei gleichzeitiger Messung der Chlorophylle er-

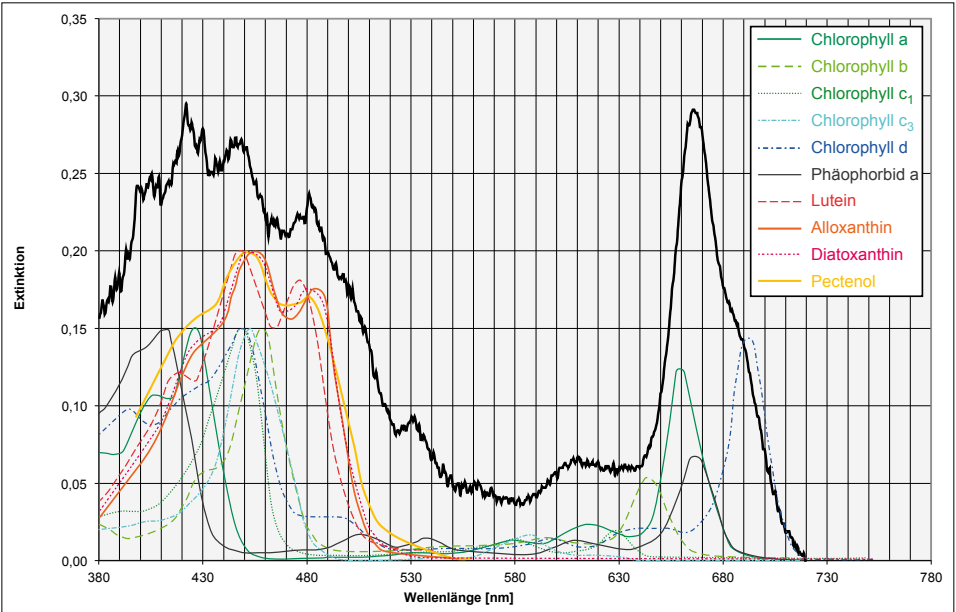


Abb. 11: Absorptionsspektrum der Probe AC 1-2 (Fundstelle AC, Farbvariante 1, Mischprobe 2 im Vergleich zu Absorptionsspektren von Chlorophyllen, Chlorophyllderivaten und in Bivalven auftretenden Carotinoiden (nach JEFFREYS 1972, SOLDATOV et al. 2013 und CLEMENTSON & WOJASIEWICZ 2019), Pectenol im Hexan-Extrakt, alle anderen Angaben für Aceton-Extrakte.

Tabelle 4: Pigmentgehalte der Weichteile der untersuchten farbklassenabhängigen Mischproben in mg/kg Trockenmasse (vgl. Kap. 2.4), a: Probenahmestelle AC, b: Probenahmestelle PTB. Car = Carotinoide, Chl = Chlorophyll.

Mischprobe	Car	Chl a	Chl b	Σ Chl
AC 1-1	16,3	46,1	11,7	57,8
AC 1-2	12,7	41,1	4,3	45,4
AC 2-1	15,3	49,6	3,2	52,8
AC 2-2	20,0	39,1	6,4	45,5
AC 3-1	15,5	40,2	1,1	41,3
AC 3-2	21,2	50,8	11,3	62,1
AC 3-3	32,9	55,8	13,0	68,6
AC 3-4	15,6	50,7	8,7	59,4
AC 3-5	16,7	47,3	8,5	55,8
AC 4-1	16,5	46,9	9,8	56,7
AC 4-2	22,1	38,3	4,8	43,1
AC 5-1	12,4	35,1	10,7	45,8
AC 5-2	18,3	51,5	6,0	57,5
AC 6-1	36,7	63,4	21,8	85,2
AC 7-1	17,6	61,2	7,7	68,9
AC 7-2	22,6	50,8	1,9	52,7
Mittelwert	19,5	48,0	8,2	56,2
SD (X)	6,7	8,0	5,0	11,1

Mischprobe	Car	Chl a	Chl b	Σ Chl
PTB 1-1	21,6	29,4	1,6	31,0
PTB 1-2	13,7	31,7	1,0	32,7
PTB 2-1	7,7	23,5	1,8	25,3
PTB 2-2	19,2	26,4	3,5	29,9
PTB 3-1	12,3	27,5	0,7	28,2
PTB 3-2	13,8	26,2	0,4	26,6
PTB 3-3	17,9	28,4	0,6	29,0
PTB 3-4	24,5	29,6	1,9	31,5
PTB 4-1	22,8	25,7	0,4	26,1
PTB 4-2	20,5	19,5	0,0	19,5
PTB 5-1	13,7	22,4	1,2	23,6
PTB 5-2	11,5	31,4	1,2	32,6
PTB 5-3	13,8	17,2	0,7	17,9
PTB 6-1	44,9	24,7	1,1	25,8
PTB 7-1	38,8	46,0	2,8	48,8
Mittelwert	19,8	27,3	1,3	28,6
SD (X)	10,2	6,6	0,9	6,9

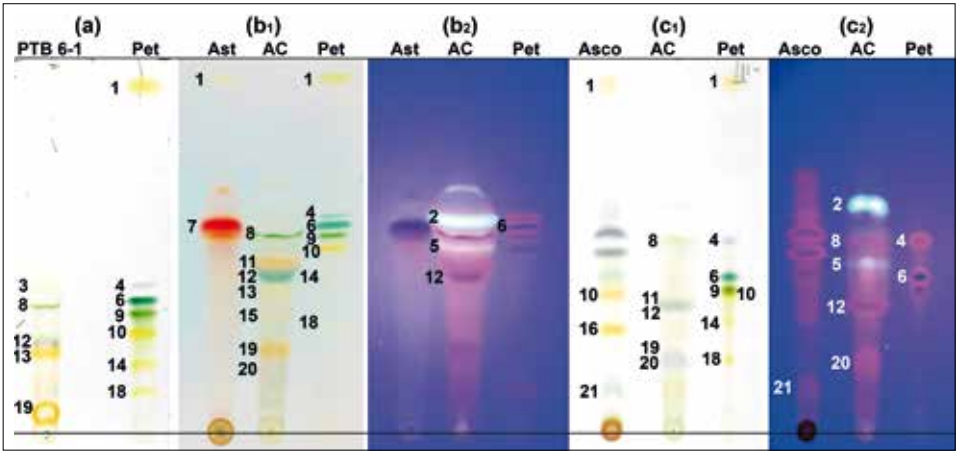


Abb. 12: Dünnschicht-Chromatogramme der untersuchten Extrakte, untere Linie = Startlinie, obere Linie = Laufmittelfront. a. Extrakt PTB 6-1 im Vergleich zu einem Petersilien-Pflanzenextrakt (Pet), Laufmittel A (Benzin / Isopropanol / Wasser 100 : 12,5 : 0,25). b. Mischextrakt AC im Vergleich zu einem Petersilien-Pflanzenextrakt (Pet) und zu Astaxanthin nach Verseifung der Astaxanthinester mit alkoholischer Kalilauge (Ast) unter Normallicht (links) und im UV-Licht (rechts), Laufmittel C (Benzin / Isopropanol = 100 : 20). c. Mischextrakt AC im Vergleich zu *Ascophyllum nodosum*-Extrakt (Asco) und zu Petersilien-Pflanzenextrakt (Pet) unter Normallicht (links) und im UV-Licht (rechts), Laufmittel B₂ (Benzin / Aceton = 70 : 30). 1 = β -Carotin, 2 = unbekannte fluoreszierende Substanz Df1, 3 = unbekanntes Carotinoid D1, 4 = Phäophytin a, 5 = unbekannte fluoreszierende Substanz Df2, 6 = Chlorophyll a, 7 = Astaxanthin, 8 = unbekanntes Chlorophyll, 9 = Chlorophyll b, 10 = Zeaxanthin / Lutein, 11 = unbekanntes Carotinoid D2, 12 = unbekanntes Chlorophyll-Derivat, 13 = unbekanntes Carotinoid D3, 14 = Violaxanthin, 15 = unbekanntes Carotinoid D4, 16 = Fucoxanthin, 18 = Neoxanthin, 19 = unbekanntes Carotinoid D5, 20 = Phäophorbid a, 21 = Chlorophyllid a/b.

mittelt wurden. Erschwerend kommt jedoch hinzu, dass es sich nach den durchgeführten chromatographischen Untersuchungen bei den nachgewiesenen Chlorophyllderivaten nicht um die nach LICHTENTHALER & BUSCHMANN (2001) und LICHTENTHALER (2010) genannten Chlorophylle a und b handelt, sondern um unbekannte Chlorophyllmetabolite und Chlorophylle. Aktuelle sind über 100 Substanzen aus der Chlorophyll-Gruppe bekannt (TANIGUCHI & LINDSEY 2021). Zwar gibt es auch Berechnungsmethoden zur Bestimmung weiterer Chlorophylle (z. B. RITCHIE 2006, 2008), doch werden deren Abbauprodukte dabei weitgehend nicht berücksichtigt. Die spektroskopischen Auswertungen beruhen auf den Absorptionen bei 470 nm (β -Carotin), 644,8 nm und 661,6 nm (Chlorophylle a und b). Die Extinktionskoeffizienten der einzelnen Chlorophylle unterscheiden sich deutlich (RITCHIE 2006, 2008). Da bisher nicht eindeutig bekannt ist, welches Chlorophyll in den *Donax trunculus*-Proben vorliegt, geben die gemessenen Konzentrationswerte in Tabelle 4 vermutlich nur die Größenordnung wieder.

4. Diskussion

Bei den Untersuchungen der Weichteile der vorhandenen *Donax*-Populationen konnten Carotinoide in Konzentrationen zwischen 7,7 und 44,9 mg/kg TM nachgewiesen werden. Diese Gehalte stimmen mit den in der Literatur beschriebenen Carotinoidgehalten von *Donax trunculus* (TAN & KIZILKAYA 2020: 11,6-51,8 mg/kg TM), *Mytilus galloprovincialis* (MAOKA et al. 2011: 16-36 mg/kg TM), verschiedenen Süßwasserbivalven (MAOKA et al. 2012: 10 bis 110 mg/kg TM) und anderen essbaren Mollusken (KANTHA 1989: 0-9,6 mg/kg TM) überein. Carotinoide bilden üblicherweise gelbliche bis rötliche Pigmente, in Verbindung mit Proteinen jedoch auch violette bis blaue Carotinoidproteine, die auch als Ursache der Färbung von Bivalvenschalen angenommen werden und häufig mit Carotinoiden in den Weichteilen korreliert werden (WADE et al. 2019).

Bisher sind uns keine Untersuchungen zur qualitativen Zusammensetzung der Carotinoide in den Weichteilen von *Donax* bekannt (YABUZAKI 2017 [2020]). Bei Untersuchungen der Weichteile von ähnlich lebenden marinen Muscheln aus den Familien Mactridae und Veneridae (*Mactra*, *Meretrix*, *Paphia*, *Ruditapes*) erfolgten jedoch bereits Einzelkomponentenbestimmungen (Übersicht in MAOKA 2011). Demnach handelt es sich bei den orangen bis roten Pigmenten meist um Derivate von Fucoxanthin, das aus der Nahrungsaufnahme von „Mikroalgen“ stammt und dann zu körpereigenen Metaboliten umgewandelt wird (MAOKA et al. 2007, 2010). Fucoxanthin ist das häufigste Carotinoid in Diatomeen und Braunalgen (TAKAICHI 2011, MAOKA 2019). Weiterhin sind Metabolite aus der Verstoffwechselung des roten Carotinoids Peridinin aus der Nahrungsaufnahme von Dinoflagellaten bekannt (MAOKA et al. 2008, TAKAICHI 2011). Die üblichen Mikroalgen-Nahrungsquellen in der Bucht von Douarnenez bestehen hauptsächlich aus Dinoflagellaten und Diatomeen. Episodisch treten Coccolithophoriden, untergeordnet Silicoflagellaten, Chlorophyceen, Rhaphidophyceen und Prymnesiophyceen hinzu (IOCCG 2000: Fig. 3.4, THÉBAUD et al. 2005, HERNÁNDEZ FARIÑAS 2015). Auch die Aufnahme von Mikro-Braunalgendetritus aus dem Bereich der eingangs genannten Algen-schwemmzone ist durchaus wahrscheinlich. Zusätzlich ist aber auch anzunehmen, dass Mikrodetritus aus Rotalgen aufgenommen wird. Die im Untersuchungsbereich nachgewiesenen Rotalgen enthalten neben Phycobiproteinen hauptsächlich α -Carotin, β -Carotin, Lutein und Zeaxanthin (BJØRNLAND & AGUILAR-MARTINEZ 1978, PINA et al. 2014). Die Metabolite aus der Verstoffwechselung dieser Carotinoide sind bei Bivalven bisher nicht untersucht. Bei Crustaceen bildet β -Carotin, bei Karpfenartigen Zeaxanthin die Ausgangssubstanz zur Bildung von Astaxanthin-Isomeren (MAOKA 2011, 2019).

Aus Fütterungsversuchen ist bekannt, dass es Zusammenhänge zwischen der Nahrungsquelle und der biochemischen Zusammensetzung der Eiweißbausteine und Fettsäuren gibt (MARTÍNEZ-PITA et al. 2012). Carotinoide

wurden bei *Donax trunculus* in diesem Zusammenhang bisher jedoch nicht untersucht. Nach unseren Untersuchungen kann angenommen werden, dass sich die Nahrungsgrundlage der beiden Populationen signifikant unterscheidet. Während an der Fundstelle AC nur die üblichen Nahrungsquellen zu Verfügung stehen (s. o.), sind an der Fundstelle PTB zusätzlich große Mengen an Feindetritus aus aufgearbeiteten Rot- und Braunalgen verfügbar. Vor allem der Rotalgendetritus unterscheidet sich durch seine Carotinoidzusammensetzung deutlich vom üblichen Nahrungsangebot (höherer Anteil an Carotin, Lutein und Zeaxanthin, s. o.). Die Annahme, dass dies zu einem Effekt bei der Menge und der Zusammensetzung der Carotinoidgehalte führt konnte jedoch nicht bestätigt werden. Die o. g. Farbverschiebungen bei den M_2 -Werten der Schalen der beiden untersuchten Populationen AC und PTB (höherer Rotanteil bei AC vgl. Abb. 8 und Tab. 3) korreliert nicht mit den Carotinoidgehalten, ein Zusammenhang mit den geringeren Chlorophyllgehalten in den Weichteilen der Population AC wäre möglich, lässt sich aber derzeit nicht erklären.

Die angewandte Bestimmungsmethodik mittels UV-VIS-Spektroskopie erlaubt keine Unterscheidung der Carotinoide in Einzelsubstanzen. Untersuchungen mittels LC/MS, HPLC, ODS oder vergleichbaren Methoden zur Aufklärung der molekularen Strukturen der Carotinoide standen den Autoren bisher nicht zu Verfügung. Durch Dünnschichtchromatographie konnte mit Hilfe der mitgemessenen Vergleichssubstanzen nach dem Ausschlussverfahren festgestellt werden, dass es sich bei den gelblichen bis orangefarbenen Carotinoiden nicht um β -Carotin, Adonirubin, Astaxanthin und Astaxanthin-Ester, Zeaxanthin, Lutein, Violaxanthin, Fucoxanthin, Peridinin oder Neoxanthin handelt (Anhang 3), obwohl diese Substanzen z. T. im Nahrungsangebot in der Bucht von Douarnenez reichlich vorhanden sind. Die Autoren nehmen an, dass es sich um körpereigene Carotinoid-Metabolite handelt, die aus den Nahrungs-Carotinoiden gebildet wurden (vgl. hierzu MAOKA 2011, 2019).

Die Mittelwerte der Carotinoidgehalte in den Weichteilen der beiden untersuchten Populationen AC und PTB liegen bei 19,5

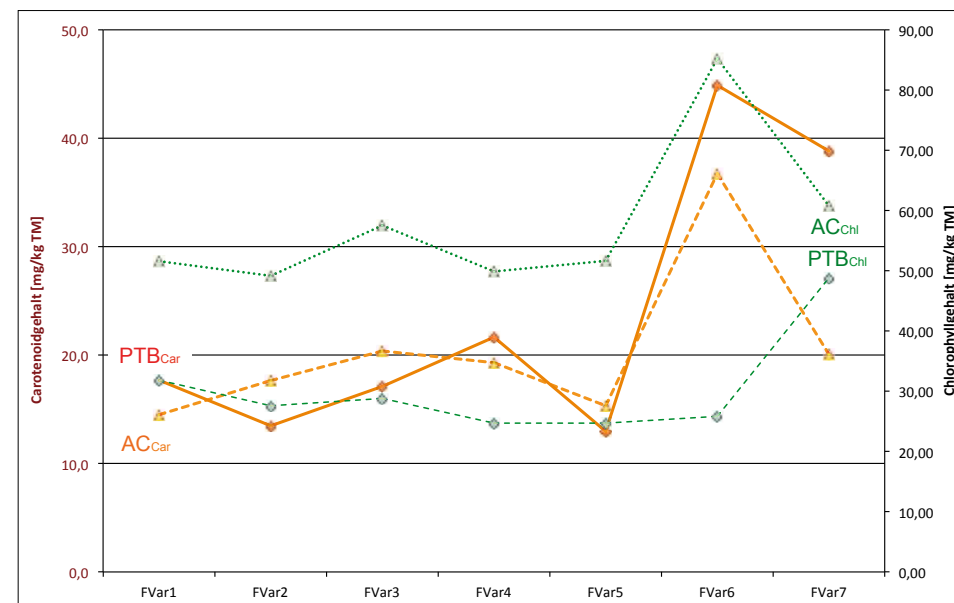


Abb. 13: Durchschnittsgehalte der Carotinoide (Car) und „Chlorophylle“ (ChI) der Farbvarianten bei den Populationen AC und PTB im Vergleich.

bzw. 19,8 mg/kg TM und sind somit praktisch identisch. Eine Gegenüberstellung der Carotinoidgehalte der Weichteile im Verhältnis zur Farbsättigung S der Schaleninnenseiten ergab eine nur mäßige lineare Korrelation (Korrelationskoeffizient $r = 0,54$). Ein linearer Zusammenhang zwischen der Helligkeit B und dem Carotinoidgehalt der Weichteile lässt sich nicht erkennen ($r = 0,23$).

Bei genauerer Betrachtung der Carotinoidgehalte fällt jedoch auf, dass diese bei den Individuen mit gelben Schalen-Pigmenten (AC-FVar3, 6 und 7, PTB-FVar6 und 7) höher sind, als bei den anderen Farbvarianten (vgl. Abb. 13). Ein Vergleich der Mittelwerte der rein gelben Farbvariante FVar6 mit den violetten Farbvarianten FVar1 und 2 zeigt dies besonders deutlich: bei den beiden Proben AC 6-1 (Fundstelle AC, Farbvariante 6, Mischprobe 1) und PTB 6-1 (Fundstelle PTB, Farbvariante 6, Mischprobe 1) sind die Carotinoidgehalte ca. doppelt so hoch, wie bei den Proben AC 1-1 bis AC 2-2 bzw. PTB 1-1 bis PTB 2-2 (vgl. Tab. 4). Aus Sicht der Autoren ist dies keine zufällige Verteilung und deutet darauf hin, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Carotinoidgehalt der Weichteile und dem Auftreten gelber Pigmente in der Schale gibt. Wir vermuten daher, dass die gelben Schalenpigmente bei *Donax trunculus* Carotinoide oder Carotinoid-Metabolite sind. Für diese Vermutung spricht auch, dass bei den Totfunden die Gelb-Rotanteile bei den Schalenpigmenten reduziert sind. Carotinoide sind sehr lichtempfindlich und verblassen daher rasch bei Sonnenbestrahlung. Dass trotzdem bei den Totfunden viele gelbe Schalen auftreten, hängt damit zusammen, dass die gelben Individuen flacher vergraben sind als die blavioletten und daher schneller freigelegt werden.

Aus den Beobachtungen lässt sich aber auch der Schluss ziehen, dass die violetten Schalenpigmente mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Carotinoide oder Carotinoid-Derivate sind. Die Zusammensetzung dieser violetten Pigmente ist bislang unbekannt, sie überdecken aber die möglicherweise vorhandenen Carotinoide.

Auch aufgrund der visuellen und fotomess-technischen Untersuchungen der unterschiedlichen Farbvarianten ist sowohl an den Schalen wie auch an den Weichteilen erkennbar, dass für die Färbung mindestens zwei verschiedene Pigmentgruppen verantwortlich sind. Dabei lassen sich gelblich-rötliche und blaviolette Pigmente unterscheiden. Blaue Pigmente sind auch von den Sexualdrüsen und Ovarien weiblicher *D. trunculus*-Individuen während der Fruchtbarkeitsphase bekannt, gelbe Pigmente sind dagegen eher für die männlichen Geschlechtsorgane typisch (MOUËZA & FRENKIEL-RENAULT 1973, HAFSAOUI et al. 2016b). Untersuchungen zur generellen Färbung der Weichteile außerhalb der Fertilität liegen bisher nicht vor, doch liegt es nahe anzunehmen, dass auch dann bei den Weibchen eher blaue Farbpigmente und bei den Männchen eher gelbe Pigmente vorherrschen. Auffallend ist auf jeden Fall, dass die als Graufärbung bezeichneten höheren Blauanteile bei den Weichteilen der untersuchten Individuen (vgl. Abb. 11) an der Fundstelle AC mit 49 % und PTB mit 57 % ziemlich gut mit den in der Literatur beschriebenen Anteilen an Weibchen innerhalb von *Donax trunculus*-Populationen übereinstimmt (LUCAS 1965, MOUËZA & FRENKIEL-RENAULT 1973, TIRADO et al. 2011, HAFSAOUI et al. 2016a, KANDEEL et al. 2018). Bei einzelnen Studien wird die Farbe der Geschlechtsorgane sogar als diagnostischen Merkmal zur Bestimmung des Geschlechts benutzt (TIRADO et al. 2011, HAFSAOUI et al. 2016a). Geschlechtsspezifische chemische Zusammensetzungen wurden auch bei Untersuchungen der Fettsäuren im Weichkörper von weiblichen und männlichen Individuen bei *Donax trunculus* belegt (MARTÍNEZ-PITA et al. 2012). Die Autoren nehmen an, dass die höheren Blauanteile der Weichteile (Graufärbung) außerhalb der Zeit der Fertilität ebenfalls geschlechtsspezifisch sind. *Donax trunculus* würde demnach, entgegen der Annahmen von KANDEEL et al. (2018), doch einen chemischen Geschlechtsdimorphismus aufweisen, der mit Hilfe von Farbu-ntersuchungen, jedoch nicht mit bloßem Auge erkennbar ist.

Im Rahmen der Erfassung der Größen und Frischgewichte der einzelnen Individuen konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Individuen mit Schalen der Farbvarianten 1 und 2 sowohl bei der Population AC als auch bei PTB etwa 9-15 % größere Schalen und bis zu 45 % höhere Frischgewichte haben als die Individuen der Farbvarianten 6 und 7 (vgl. Abb. 14). Gleichzeitig ist der Anteil graufleischiger Individuen bei den Farbvarianten 1 und 2 am geringsten. Bei der o. g. Annahme würde dies bedeuten, dass bei den großen Individuen männliche Tiere dominieren, bzw. die männlichen Tiere durchschnittlich etwas größer und zumindest saisonal schwerer sind als die weiblichen. Dies kann als morphologischer Geschlechtsdimorphismus gewertet werden.

Bei der Probenahme fiel auf, dass die Individuen mit Schalen der violetten Farbvarianten 1 und 2 tiefer eingegraben waren, als die anderen Individuen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass in der Farbvariante 1 bevorzugt Männchen auftreten, die männlichen Individuen nach den vorliegenden

Daten statistisch etwas größer sind und größere Individuen tiefer graben als kleinere. Obwohl bei den Farbvarianten 1 bis 3 durchschnittlich mehr männliche Tiere auftreten als bei den Farbvarianten 4 bis 7, ist ein Zusammenhang zwischen dem Grauteil der Weichteile bzw. dem chemischen Geschlechtsdimorphismus und der Farbvariation der Schalen nicht eindeutig belegbar, da in jeder Farbklasse genügend Individuen von beiden Geschlechtern auftreten.

Nach den vorliegenden Untersuchungen stellt die Farbzonierungen in den Schalen keine Zufallsverteilungen dar. Vielmehr ist zu erkennen, dass die Aufhellung der violetten Farben meist zuerst entlang des Mantelrandes bzw. des Kiemenrandes erfolgt (Farbvarianten 3, 4, 7) der regelmäßig mit Frischwasser rückgespült wird (MOUËZA 1976). Der Bereich zwischen dem hinteren Schließmuskel und der Ausströmröhre („Exhalant Siphon“) bzw. der Bereich in dem der Anus in die Ausströmröhre mündet, bleibt dagegen selbst bei Individuen der Farbklassen 5 und 6 meistens violett gefärbt. Die Gelb-

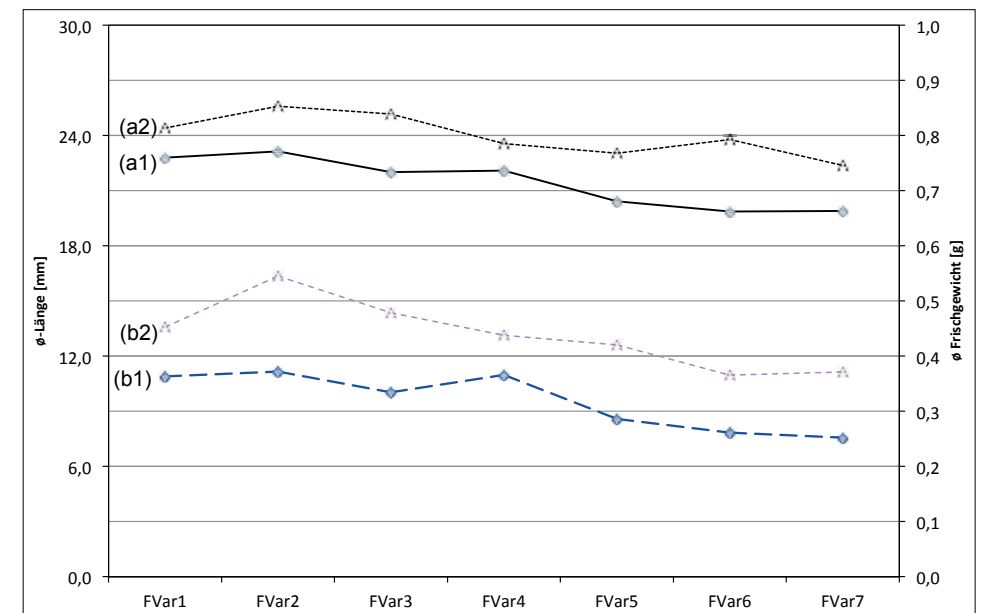


Abb. 14: Durchschnittslängen und durchschnittliche Frischgewichte der untersuchten Farbvarianten 1 bis 7. (a1) = Durchschnittslängen AC, (a2) = Durchschnittslängen PTB, (b1) = durchschnittliches Frischgewicht AC, (b2) = durchschnittliches Frischgewicht PTB.

färbung der Schale beginnt meist links und rechts des äußeren Kiemenlappens und wird in Strömungsrichtung der Kiemenströmung zunehmend aufgelöst (Farbvariante 7) bzw. blasser (Farbvariante 6). Über den anaeroben Metabolismus von *Donax trunculus* liegen uns keine Untersuchungen vor, doch kann man bereits aufgrund der grabenden Lebensweise bis knapp in die Sulfatreduktionszone darauf schließen, dass die Art gegenüber suboxischen Bedingungen relativ tolerant ist. Aufgrund der sehr langen Siphonen kann sich die Art unter Wasserbedeckung (während der Aerobiosis) auch in einem Sediment mit reduzierten Sauerstoffverhältnissen noch gut mit Atemwasser versorgen. Während der Ebbe ist die Schale jedoch geschlossen und die Sauerstoffversorgung ist stark eingeschränkt (Anaerobiosis). Nun kommt es in der Mantelhöhle rasch zu einer Sauerstoffzehrung und Anreicherungen von Kohlendioxid und Abscheidungsprodukten, die reaktive Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle enthalten (DONAGHY et al. 2015). Aus der Verteilung der Farben kann man entnehmen, dass die violetten Farbtöne eher an Stellen mit temporär reduzierten Sauerstoffverhältnissen (tieferes Eingraben) und auftretenden Abscheidungsprodukten (z. B. Ammoniak und Aminosäuren im Bereich des Anus) auftreten, die gelborangen Farbtöne dagegen eher in Bereichen mit überwiegend oxischen Verhältnissen. Bei der Verteilung der gelben bis orangen Farbtönen spielt zusätzlich offensichtlich die Sonneneinstrahlung eine wesentliche Rolle, die ebenfalls zur Bildung von Sauerstoffradikalen beiträgt. Diese gelben Carotinoide sind z. B. an den Spitzen der Siphonen angereichert, die im flachen Wasser auch dem kurzwelligen Spektrum des Sonnenlichts (der UV-Strahlung) ausgesetzt sind. Für die eingegrabene Schale spielt dies dagegen eher keine Rolle, da selbst in nassen hellen Quarzsanden nur der langwellige Anteil des Sonnenlichts in relevanter Intensität in den Boden eindringen kann (BAUMGARTNER 1953). Zum Schutz einer Überhitzung ist es daher für flachvergrabene Individuen günstiger eine höhere Albedo

aufzuweisen (optimal bei der weißen Farbvariante 5) um v. a. die Wärmestrahlung abzuweisen.

Nach Ansicht der Autoren hängt die Farbvariation bei *Donax trunculus* grundsätzlich auch mit dem Mikromilieu der Umgebung und der Lebensweise des Einzelindividuums zusammen. Größere Individuen leben tiefer vergraben und müssen deshalb eher suboxische Umgebungsbedingungen und möglicherweise ein Auftreten von freiem Schwefelwasserstoff tolerieren. Zugleich besitzen sie einen höheren Stoffwechselumsatz. Sie sind vorwiegend violett gefärbt. Kleinere Individuen leben eher höher am Strand (längere Anaerobiosis), sind dafür aber etwas höher in der Sedimentsäule in eher oxischer Umgebung zu finden und müssen gegen Hitze und Sonneneinstrahlung toleranter sein. Sie zeigen häufiger gelbliche Carotinoid-Pigmente oder sind heller bis weiß.

Die Gehalte an Chlorophyll-Derivaten bei den beiden Populationen unterscheiden sich gravierend. Sie sind bei AC mit durchschnittlich 56,2 mg/kg TM fast doppelt so hoch wie bei der Population PTB mit durchschnittlich 28,6 mg/kg TM, wobei berücksichtigt werden muss, dass die tatsächlichen Gehalte aufgrund der unscharfen Bestimmungsmethodik möglicherweise noch geringfügig höher sind. Donacidae enthalten keine symbiontischen Bakterien oder Zooxanthellen. Die Herkunft der Chlorophylle und Chlorophyll-Derivate ist daher sicherlich nahrungsgeliefert und geht vermutlich auf die während der Anaerobiosis in der Mantelhöhle und im Magen-Darmtrakt angesammelten Verdauungsprodukte zurück. Vergleichbare Chlorophyll-Abbauprodukte sind z. B. im Verdauungsapparat der Miesmuschel *Mytilus edulis* und der Trogmuschel *Spisula solidissima* nachgewiesen worden (ROBINSON et al. 1984, HAWKINS et al. 1986).

Die Herkunft und Zusammensetzung der in den Chromatogrammen farblosen, jedoch unter UVB/C-Licht weiß bis cyan fluoreszierenden Substanzen konnte nicht geklärt werden und war auch nicht Ziel der vorliegenden Untersuchungen.

6. Danksagung

Wir danken Frau Prof. Dr. Kirsten GRIMM, Kuratorin der naturwissenschaftlichen Sammlungen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und Herrn Jan-Niklas WITTEMANN, B.Sc., Heidelberg für die Beschaffung von Literaturdaten sowie Herrn Dr. Richard SPALL, Labor Dr. GRANER & Partner für die hilfreichen Diskussionen und Frau OStD Anja FAATZ, Otto Schott Gymnasium Mainz, für die Unterstützung der Laborarbeiten. Unseren Familien, bestehend aus Elke, Kirsten und Bastian danken wir für den Verzicht auf viele Stunden gemeinsamer Aktivitäten zugunsten der vorliegenden Forschungsarbeit und die kritische Durchsicht des vorliegenden Textes.

7. Literatur

- AMBARWATI, R. & FAIZAH, U. (2017): Colour and morphometric variation of Donacid bivalves from Nipa Beach, Madura Island, Indonesia. – *Biosaintifika* **9** (3): 466-473. Semarang, Indonesia [DOI: 10.15294/biosaintifika.v9i3.11267].
- ANSELL, A. D. (1983): The biology of the genus *Donax*. – 607-635. In: McLachlan, A. & Erasmus, T. [eds.]: *Sandy beaches as ecosystems*. – *Developments in Hydrobiology* **19**: viii + 757 pp., Springer. Dordrecht.
- ANSELL, A. D. & LAGARDÈRE, F. (1980): Observations on the biology of *Donax trunculus* and *D. vittatus* at Ile d'Oléron (Frenche Atlantic Coast). – *Marine Biology* **57**: 287-300. Berlin, Heidelberg.
- BJØRNLAND, T. & AGUILAR-MARTINEZ, M. (1978): Carotenoids in red algae. – *Phytochemistry* **15** (2): 291-296. Amsterdam.
- BARNARD, W. & DE WAAL, D. (2006): Raman investigation of pigmentary molecules in the molluscan biogenic matrix. – *Journal of Raman Spectroscopy* **37**: 342-352. Hoboken, NJ.
- BAUMGARTNER, A. (1953): Das Eindringen des Lichtes in den Boden. – *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* **72**: 172-184. Berlin.
- BEUTTLER, H. (2010): Biosynthese von Carotinoiden mittels rekombinanten Mikroorganismen. – Dissertation Universität Stuttgart, Institut für technische Biochemie. 158 S., Stuttgart [http://dx.doi.org/10.18419/opus-1281].
- BHATTACHARYA, C. G. (1967): A simple method of resolution of a distribution into gaussian components. – *Biometrics* **23** (1): 115-135. Hoboken, NJ.
- BONDAREV, I. P. & MALAKOVA, L. V. (2016): The total concentration of carotenoids in *Rapana venosa* gonad. – *International Journal of Marine Science* **6** (11): 1-7. Richmond BC.

- CLEMENTSON, L. A. & WOJASIEWICZ, B. (2019): Dataset on the absorption characteristics of extracted phytoplankton pigments. – *Data in brief* **24**, 103875: 1-6. Amsterdam [https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103875].
- DONAGHY, L., HONG, H.-K., JAUZEIN, C. & CHOI, K.-S. (2015): The known and unknown sources of reactive oxygen and nitrogen species in haemocytes of marine bivalve molluscs. – *Fish & Shellfish Immunology* **42**: 91-97. Amsterdam.
- GASPAR, M. B., SANTOS, M. N., VASCONCELOS, P. & MONTEIRO, C. C. (2002): Shell morphometric relationship of the most common bivalve species (Mollusca: Bivalvia) of the Algarve coast (southern Portugal). – *Hydrobiologia* **477**: 73-80. Dordrecht.
- GUILLOU, J. (1982): Variabilité des populations de *Donax trunculus* et *Donax vittatus* en Baie de Douarnenez. – *Netherlands Journal of Sea Research* **16**: 88-95. Leiden.
- GUILLOU, J. & LE MOAL, Y. (1980): Dynamic aspects of population *Donax trunculus* and *Donax vittatus* in Douarnenez Bay. – *Annales de l'Institut Océanographie* **56**: 55-64. Paris.
- HAFSAOUI, I., BOUAZIZ, R., DRAREDJA, B. & BELDI, H. (2016a): Reproduction cycle of *Donax trunculus* (Mollusca, Bivalvia) in the Gulf of Annaba (Northeast Algeria). – *Advances in Environmental Biology* **10** (5): 82-95. Amman, Jordanien.
- HAFSAOUI, I., DRAREDJA, B., LASOTA, R., COMO, S. & MAGNI, P. (2016b): Population dynamics and secondary production of *Donax trunculus* (Mollusca, Bivalvia) in the Gulf of Annaba (Northeast Algeria). – *Mediterranean Marine Science* **17** (3): 738-750, Athen [DOI: https://doi.org/10.12681/mms.1760].
- HAWKINS, A. J. S., BAYNE, B. L., MANTOURA, R. F. C., LLEWELLYN, C. A. & NAVARRO, E. (1986): Chlorophyll degradation and absorption throughout the digestive system of the blue mussel *Mytilus edulis* L. – *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **96** (3): 213-223. Amsterdam.
- HERNÁNDEZ FARÍÑAS, T. (2015): Analyse et modélisation des évolutions à long terme de la biodiversité phytoplanctonique dans les zones côtières sous l'effet des pressions environnementales et anthropiques. – Thèse de Doctorat Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques. 290 + 38 pp., Nantes.
- HUZ, R. DE LA, LASTRA, M. & LÓPEZ, J. (2002): The influence of sediment grain size on burrowing, growth and metabolism of *Donax trunculus* L. (Bivalvia: Donacidae). – *Journal of Sea Research* **47**: 85-95. Amsterdam.
- IOCCG (2000): Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. – In: SATHYENDRANATH, S. [ed.]: *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group* **3**: 1-140. Dartmouth, Canada.
- JEFFREY, S. W. (1972): Preparation and some properties of crystalline chlorophyll c_1 and c_2 from marine algae. – *Biochimica et Biophysica Acta* **279**: 15-33. Amsterdam.
- KANDEEL, E. K., MOHAMMAD, S. Z., EL-GHITANY, A. H. & EL-GHOSBASHY, A. E. (2018): Reproductive cyc-

- le of the carpet clam; *Donax trunculus* LINNAEUS, 1758, from new Damietta shore, Egypt. – *Egyptian Journal of Zoology* **69**: 1-14. Cairo.
- KANTHA, S. S. (1989): Carotenoids of edible molluscs; a review. – *Journal of Food Biochemistry* **13**: 429-442. Trumbull, CT.
- KUSMITA, L., PUSPITANINGRUM, I. & LIMANTARA, L. (2015): Identification, Isolation and antioxidant activity of Pheophytin from green tea (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). – *Procedia Chemistry* **14**: 232-238. Amsterdam.
- LAMINE, I., AIT ALLA, A., BEN HADAD, M., EL HABOUZ, H., NADIR, M. & MOUKRIM, A. (2019): Population dynamics of *Donax trunculus* on the sandy beach of Taghazout (southern Morocco). – *Regional Studies in Marine Science* **33** (2020) 100912: 13 pp. [DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100912].
- LAUDIEN, J., BREY, T. & ARNT, W. E. (2003): Population structure, growth and production of the surf clam *Donax serra* (Bivalvia, Donacidae) on two Namibian sandy beaches. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **58S**: 105-115. Amsterdam.
- LICHTENTHALER, H. (2010): Chlorophyll and carotenoid determination (after Lichtenthaler 1987), a practical instruction. – 2 pp., Karlsruhe. [https://www.botanik.kit.edu/molbio/download/Chlorophyll%20and%20Carotenoid%20determination%202010.pdf].
- LICHTENTHALER, H. & BUSCHMANN, C. (2001): Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. – *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* **1** (1): F4.3.1-F4.3.8. New York.
- LUCAS, A. (1965): Recherches sur la sexualité des Mollusques bivalves. – *Bulletin Biologiques de la France et de la Belgique* **99**: 115-247. Paris.
- MAOKA, T. (2011): Carotinoids in Marine Animals. – *Marine Drugs* **9** (2): 278-293. Basel [https://doi.org/10.3390/md9020278].
- MAOKA, T. (2019): Carotenoids as natural functional pigments. – *Journal of Natural Medicines* **74**: 1-16 [2020]. Tokyo [https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x].
- MAOKA, T., AKIMOTO, N., MURAKOSHI, M., SUGIYAMA, K. & NISHINO, H. (2010): Carotenoids in clams, *Ruditapes philippinarum* and *Meretrix petechialis*. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **58** (9): 5784-5788. Washington D.C.
- MAOKA, T., AKIMOTO, N., YIM, M.-J., HOSOKAWA, M. & MIYASHITA, K. (2008): A new C₄₂-skeletal carotenoid from the clam, *Paphia amabilis*. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **56** (24): 12069-12072. Washington D.C.
- MAOKA, T., ETOH, T., BORODINA, A. V. & SOLDATOV, A. (2011): A series of 19'-Hexanoyloxyfucoxanthin derivatives from the sea mussel, *Mytilus galloprovincialis*, grown in the Black Sea, Ukraine. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **59** (24): 13059-13064. Washington D.C.
- MAOKA, T., FUJIWARA, Y., HASHIMOTO, K. & AKIMOTO, N. (2007): Characterization of fucoxanthin and fucoxanthinol esters in the chinese surf clam, *Macrura chinensis*. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **55** (4): 1563-1567. Washington D.C.
- MAOKA, T., OCHI, J., MORI, M. & SAKAGAMI, Y. (2012): Identification of carotenoids in the freshwater shellfish *Unio douglasiae nipponensis*, *Anadonta lauta*, *Cipangopaludina chinensis laeta*, and *Semisulcospira libertina*. – *Journal of Oleo Science* **61** (2): 69-74. Tokio.
- MARÓTI, I. & GABNAI, É. (1971): Separation of chlorophylls and carotinoids by thin-layer chromatography. – *Acta Biologica Szegediensis* **17** (1-4): 67-77. Szeged.
- MARTÍNEZ-PITA, I., HACHERO-CRUZADO, I., SÁNCHEZ LAZO, C. & MORENO, O. (2012): Effect of diet on the lipid composition of the commercial clam *Donax trunculus* (Mollusca: Bivalvia): Sex-related differences. – *Aquaculture Research* **43** (8): 1134-1144. Hoboken, NJ [DOI: 10.1111/j.1365-2109.2011.02917.x].
- MCLACHLAN, A. (1983): Sandy beach ecology – a review. – 321-380. In: MCLACHLAN, A. & ERASMUS, T. [eds.]: *Sandy beaches as ecosystems*. – *Developments in Hydrobiology* **19**: viii + 757 pp., Springer. Dordrecht.
- MIKAMI, K. & HOSOKAWA, M. (2013): Biosynthetic pathway and health benefits of fucoxanthin, an algae-specific xanthophyll in brown seaweeds. – *International Journal of Molecular Sciences* **14** (7): 13764-13781. Basel [https://doi.org/10.3390/ijms140713763].
- MOUËZA, M. (1976): Contribution à l'étude de *Donax trunculus* (Mollusques Lamellibranches): Mécanisme de la nutrition. – *Journal of Molluscan Studies* **42** (1): 17-30. London.
- MOUËZA, M. & FRENKIEL-RENAULT, L. (1973): Contribution à l'étude de la biologie de *Donax trunculus* L. (Mollusques Lamellibranches) dans l'Aléris: La reproduction. – *Cahiers de Biologie Marine* **14** (1): 261-283. Roscoff.
- MUNSELL COLOR COMPANY (2009a): Munsell Rock Color Chart. – Munsell Color. Grand Rapids, MI.
- MUNSELL COLOR COMPANY (2009b): Munsell Soil Color Chart. – Munsell Color. Grand Rapids, MI.
- PINA, A. L., COSTA, A. R., LAGE-YUSTY, M. A. & LOPEZ-HERNÁNDEZ, J. (2014): An evaluation of edible red seaweed (*Chondrus crispus*) components and their modification during the cooking process. – *LWT-Food Science and Technology* **56** (1): 175-180. Amsterdam.
- RÍOS-JARA, E., ESQUEDA-GONZÁLEZ, M. C., MICHEL-MORFIN, J. E., LÓPEZ-URIARTE, E. & BARRAGÁN, J. S. (2019): Growth and morphometric relationship of the bean clam *Donax punctatosiatus* HANLEY, 1843 in a sandy beach of southern Sinaloa, Mexico. – *Latin American Journal of Aquatic Research* **47** (5): 764-773. Valparaíso, Chile.
- RITCHIE, R. J. (2006): Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. – *Photosynthesis Research* **89**: 27-41. Dordrecht.
- RITCHIE, R. J. (2008): Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photo-synthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. – *Photosynthetica* **46** (1): 115-126. Praha, Heidelberg.
- ROBINSON, W. E., WEHLING, W. E. & MORSE, M. P. (1984): The effect of suspended clay on feeding and digestive efficiency of the surf clam, *Spisula solidissima* (Dillwyn). – *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **74** (1): 1-12. Amsterdam.
- SOARES, A. G., CALLAHAN, R. K., DE RUYCK, A. M. C. (1998): Microevolution and phenotypic plasticity in *Donax serra* RÖDING (Bivalvia: Donacidae) on high energy sandy beaches. – *Journal of Molluscan Studies* **64**: 407-421. London.
- SOLDATOV, A. A., GOSTYUKHINA, O. L., BORODINA, A. V. & GOLOVINA, I. V. (2013): Qualitative composition of carotenoids, catalase and superoxide dismutase in tissues of the bivalve mollusc *Anadara inaequivalvis* (Bruguere, 1789). – *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology* **49** (4): 389-398. New York, Moskva.
- SPRAFKE, T. (2016): Löss in Niederösterreich – Archiv quartärer Klima- und Landschaftsveränderungen. – Dissertation. 253 S., University Press. Würzburg.
- STANLEY, S. M. (1970): Relation of shell form to life habits of the Bivalvia. – *Memoirs of the Geological Society of America* **125**: 296 pp., Boulder, CO.
- SUNHEL, S., LAGREZE, F., FERREIRA, J. F., CAMPESTRINI, L. H. & MARASCHIN, M. (2009): Carotenoid extraction from the gonad of scallop *Nodipecten nodosus* (LINNAEUS, 1758) (Bivalvia: Pectinidae). – *Brazilian Journal of Biology* **69** (1): 209-215. São Carlos, SP. [https://doi.org/10.1590/S1519-69842009000100028].
- TAKAICHI, S. (2011): Carotinoids in Algae: Distributions, biosyntheses and functions – *Marine Drugs* **9** (2): 1101-1118. Basel [https://doi.org/10.3390/md9061101].
- TAN, E. & KIZILKAYA, B. (2020): Determination of total carotene and chlorophyll contents of tellina (*Donax trunculus* LINNAEUS, 1758) using UV spectrophotometer in Black Sea. – *Research in Marine Sciences* **5** (3): 747-753. Tehran, Iran.
- TAN, S. K. & LOW, M. E. Y. (2013): Singapore Mollusca: 3. the family Donacidae (Bivalvia, Veneroidea: Tellinoidea). – *Nature in Singapore* **6**: 257-263. Singapore.
- TANIGUCHI, M. & LINDSEY, J. S. (2021): Absorption and fluorescence spectral database of Chlorophylls and analogues. – *Photochemistry and Photobiology* **97**: 136-165. New York.
- THÉBAUD, O., VÉRON, G. & FIFAS, S. (2005): Incidences des épisodes d'efflorescences de microalgues toxiques sur les écosystèmes et sur les pêcheries de coquillages en baie de Douarnenez. – 88 pp., Ifremer. Brest.
- TIRADO, C., RUEDA, J. L. & SALAS, C. (2011): Reproduction of *Donax trunculus* in the littoral of Huelva (southern Atlantic Spain): is there any difference with the Mediterranean population from the Andalusian coast? – *Iberus* **29** (1): 47-57. Málaga.
- TORISSEN, O. J. & NAEVDAL, G. (1984): Pigmentation of salmonids – genetical variation in carotenoid deposition in rainbow trout. – *Aquaculture* **38** (1): 59-66. Amsterdam.
- VISCARRA ROSSEL, R. A., MINASNY, B., ROUDIER, P. & MCBRATNEY, A. B. (2006): Colour space models for soil science. – *Geoderma* **133**: 320-337. Amsterdam.
- WADE, J., PUGH, H., NIGHTINGALE, J., KIM, J. S. & WILLIAMS, S. T. (2019): Colour in bivalve shells: Using Resonance Raman spectroscopy to compare pigments at different phylogenetic levels. – *Journal of Raman Spectroscopy* **50** (10): 1527-1536. Hoboken, NJ.
- WAKAHAMA, T., LAZA-MARTÍNEZ, A., BIN HAJI MOHD TAHA, A. I., OKUYAMA, H., YOSHIDA, K., KOGAME, K., AWAI, K., KAWACHI, M., MAOKA, T. & TAKAICHI, S. (2012): Structural confirmation of a unique carotenoid lactoside, P457, in *Symbiodinium* sp. strain NBRC 104787 isolated from a sea anemone and its distribution in dinoflagellates and various marine organisms. – *Journal of Phycology* **48**: 1392-1402. Hoboken, NJ.
- YABUZAKI, J. (2017): Carotenoids Database: structures, chemical fingerprints and distribution among organisms. – *DATABASE* 2017, 11 pp. [Update Sept. 2020; https://doi.org/10.1093/database/bax004].
- YANAR, Y., CELIK, M. & YANAR, M. (2004): Seasonal changes in total carotenoid contents of wild marine shrimps (*Penaes semisulcatus* and *Metapenaeus monoceros*) inhabiting in the eastern Mediterranean. – *Food Chemistry* **88** (2): 267-296. Amsterdam.

Anschriften der Verfasser

Dr. Matthias Claudius Grimm
UDL Dr. Grimm Umweltdienstleistungen
Eduard-Frank-Straße 12
D-55122 Mainz
E-Mail: UDL.Dr.Grimm@t-online.de

Dr. Günther Entenmann
Schützenpfad 16
D-55218 Ingelheim am Rhein

Manuskript eingegangen: 28.05.2021

Anhang 1: Vorschrift zur Herstellung und spektroskopischen Untersuchung von Extrakten aus getrockneten Weichteilen von *Donax trunculus*.

ca. 0,5 g zerkleinerte Proben wurden
 auf 0,001 g genau in 20 ml-EPA-Braunglas-Gewindefläschchen eingewogen, mit
 ca. 0,5 g Natriumsulfat wasserfrei zur Analyse (LabChem Röttinger Art. 83300.1000)
 gemischt und aus einer 5 ml Messpipette mit
 5,0 ml Aceton zur Analyse (Geyer GmbH Art. 2645.1000) versetzt.
 Diese Mischung wurde unter gelegentlichem Schütteln 48 Stunden im
 Kühlschrank aufbewahrt, dann in Zentrifugengläser abgefüllt und mit einer
 Hettich EBA 3S-Zentrifuge jeweils fünf Minuten bei 5000 min⁻¹ zentrifugiert.
 Die überstehende klare Lösung wurde in 20 ml-EPA-Braunglas-Gewinde-
 fläschchen mit PP-Schraubdeckeln und Butyl-PTFE-Septum abgefüllt und bis
 zur weiteren Untersuchung im Kühlschrank aufbewahrt.

Zur Messung wurde der Extrakt mit einer Tropfpipette in 1 cm-Quarzküvetten abgefüllt. Nach Auf-
 nahme des Spektrums wurden die Extinktionen bei 663,0, 646,8 und 460,0 nm ausgewertet.

Anhang 2: Herstellung der Extrakte und Vergleichslösungen.Ausgangssubstanzen:

Carotin Hautschuttkapseln, dm-Drogeriemarkt, Hauptinhaltsstoff β -Carotin
 Astaxanthin (*Haematococcus pluvialis*), Time Health Ltd., UK., 7 mg Astaxanthin pro Kapsel
 frische Petersilie
 Fucoxanthin (*Ascophyllum nodosum*-Pulver), VICUPETS® ONE Seealgenmehl, Snaabt GmbH,
 Heinsberg, enthält Fucoxanthin als Hauptbestandteil neben β -Carotin, Luteoxanthin und
 Violaxanthin
 Muschelfleisch von *Donax trunculus*

Herstellung der Lösungen:

1,0 g getrocknetes Muschelfleisch, Mischmuster aus AC wird mit
 2,0 ml Aceton versetzt, 2 Stunden auf dem Magnetrührer gerührt und bis zu Chromatografie
 im Kühlschrank aufbewahrt.

1,0 g *Haematococcus pluvialis*-Pulver wird mit
 2,0 ml Aceton versetzt, 2 Stunden auf dem Magnetrührer gerührt und bis zu Chromatografie
 im Kühlschrank aufbewahrt.

1,0 g frische zerkleinerte Petersilie wird mit
 2,0 ml Aceton versetzt, 2 Stunden auf dem Magnetrührer gerührt und bis zu Chromatografie
 im Kühlschrank aufbewahrt.

1,0 g Kaliumhydroxid (Aldrich Cat.Nr. 22,147-3, 85+ %) wird in
 10 ml absolutem Ethanol z. A. (Merck 983.2500) gelöst.

1,0 g *Haematococcus pluvialis*-Pulver wird mit
 2,0 ml der ethanolischen Lösung von Kaliumhydroxid versetzt und 24 Stunden auf dem
 Magnetrührer gerührt. Sodann wird die Mischung mit
 ca. 0,2 ml Eisessig unter Verwendung von Universalindikatorpapier neutralisiert.

1,0 g *Ascophyllum nodosum*-Algenmehl wird mit
 2,0 ml Aceton versetzt, 1 Stunde auf dem Magnetrührer extrahiert, dann 10 Minuten mit
 5000 U/min zentrifugiert und bis zu Chromatografie im Kühlschrank aufbewahrt.

Anhang 3: Retentionsfaktoren *R_f* der untersuchten Pigmente in unterschiedlichen Laufmitteln im Vergleich zu Literaturdaten, kursiv gesetzte Werte wurden aus den publizierten Chromatogrammen ermittelt. In **Fettdruck** die in den *Donax*-Extrakten beobachteten Pigmente (D1 bis D5 = Carotinoide, Df1-2 = fluoreszierende Substanzen)

Pigment	Farbe	(1)				(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
		A	B ₂	C	D					
1. β -Carotin	dottergelb	0,92	0,93	0,95	0,93	1,00	0,98	0,98	0,95-0,97	0,96
2. unbekannte Substanz Df1	farblos, UV-Fluoreszenz	0,42	0,61	0,57	0,56					
3. unbekanntes Carotinoid D1	orangebraun, gelb	0,39	0,59	n.n.	0,55					
4. Phäophytin a	grau, graugrün	0,38	0,52	0,58	0,44	0,73		0,66	0,77	0,60
5. unbekannte Substanz Df2	farblos, UV-Fluoreszenz	0,38	0,44	0,50	0,37					
6. Chlorophyll a	blaugrün	0,35	0,41	0,55	0,29	0,53		0,55	0,63-0,64	
7. Astaxanthin	intensiv rot	0,35	n.b.	0,55	n.b.		0,25			
8. unbekanntes Chlorophyll	hellgrün	0,33	0,51	0,53	0,37					
9. Chlorophyll b	grasgrün	0,31	0,38	0,53	0,22	0,49			0,51	0,42
10. Zeaxanthin	dottergelb	0,27	0,37	0,49	0,22	0,40	0,15		0,41	
10. Lutein	dottergelb	0,27	0,37	0,49	0,22	0,38	0,15		0,41	
11.unbekanntes Carotinoid D2	orange	n.n.	n.n.	0,46	0,22					
12. unbek. Chlorophyll-Derivat	graugrün	0,24	0,33	0,42	0,21					
13. unbekanntes Carotinoid D3	orange, gelb	0,21	n.n.	0,38	0,18					
14. Violaxanthin	hellgelb	0,18	0,30	0,41	0,15	0,34			0,27	0,36
15. unbekanntes Carotinoid D4	orangebraun	n.n.	0,29	0,31	0,12					
16. Fucoxanthin	orange	n.b.	0,27	n.b.	n.b.	0,34		0,33	0,28	
17. Peridinin	orange	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.			0,27		
18. Neoxanthin	hellgelb	0,11	0,20	0,29	0,07	0,24		0,13	0,13	
19. unbekanntes Carotinoid D5	orange	0,08	0,23	0,21	0,06					
20. Phäophorbid a	hellgrau	0,03	0,20	0,17	0,04					0,20
21. Chlorophyllid a/b	grau	n.b.	0,14	n.b.	n.b.	0,10				

- (1) Laufmittel A, B₂, C und D nach Kap. 2.5 (diese Arbeit)
(2) Petrolether / Benzin / Äthanol / Wasser = 5 : 5 : 1 : 0,5 (MARÓTI & GABNAI 1971)
(3) MTBE / Toluol / Hexan = 1:1:1 (BEUTTLER 2010)
(4) Hexan / Aceton / Essigsäure = 50 : 50 : 1 (WAKAHAMA et al. 2012)
(5) Petrolether / Aceton = 7 : 3 (MIKAMI & HOSOKAWA 2013)
(6) Hexan / Diethyläther / Aceton = 6 : 3 : 2 (KUSMITA et al. 2015)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mainzer naturwissenschaftliches Archiv](#)

Jahr/Year: 2021

Band/Volume: [58](#)

Autor(en)/Author(s): Grimm Matthias C., Entenmann Günther

Artikel/Article: [Zur Farbgebung von *Donax trunculus* Linnaeus, 1758 aus Populationen eines Hochenergiestrandes von Trez Bellec / Anse de Caon bei Telgruc-sur-Mer \(Bucht von Douarnenez, Dep. Finistère, Bretagne, Frankreich\) 149-178](#)