

## 4.5 Biodiversität mariner Makroalgen in arktischen Gewässern

INKA BARTSCH

**Biodiversität mariner Makroalgen in arktischen Gewässern:** Marine Makroalgen sind wichtige Primärproduzenten und Habitatbildner entlang arktischer Hartbodenküsten. Der Bestand pan-arktischer Makroalgenarten ist mit ca. 160 Arten relativ klein und es gibt nur 19 arktisch endemische Arten. Wenige Zeitserien dokumentieren die auf Grund der Klimaerwärmung erwartete Veränderung der Biodiversität im Feld. Das Inselarchipel Svalbard ist in dieser Hinsicht am Besten untersucht. Diverse Standorte weisen mittlerweile eine erhöhte Algen-Biodiversität im Gezeitenbereich und Flachwasser auf, die Biomasse der Makroalgen im Flachwasser nimmt an manchen Standorten deutlich zu und gleichzeitig verringern sich partiell die Algengrenzen. Diese Veränderungen sind Folge der Erwärmung, die zu einer Verringerung des Küstenmeereises im Winter und einer Erhöhung des Schmelzwasserabflusses im Sommer führen. Die erwartete Verschiebung der geografischen Verbreitung einzelner Arten bzw. Einwanderung südlicher Arten in die Arktis sind jedoch noch nicht zweifelsfrei beobachtet worden.

**Biodiversity of marine macroalgae in Arctic waters:** Marine macroalgae are important primary producers and habitat engineers along Arctic and sub-Arctic coastal rocky shorelines. The species inventory of approx. 160 macroalgal species is relatively small and there are only 19 Arctic endemic species. Few time series document the change of biodiversity in situ that is expected as a consequence of global warming. The island archipelago Svalbard has been the most extensively investigated. Several locations show an increased algal biodiversity at intertidal or shallow subtidal sites. The biomass of macroalgae increases considerably at some shallow water sites and in parallel the algal depth extension decrease. These changes are considered a consequence of warming inducing a sea-ice retreat in winter and meltwater increase in summer. The expected changes in the geographical distribution of species or the immigration of southern species have not yet been unequivocally documented.

### Was sind arktische Makroalgen?

Marine Makroalgen sind meist vielzellige, photosynthetisch aktive Organismen mit mehr oder weniger komplexem Thallusaufbau, die sich aus drei Großgruppen zusammensetzen, den Grün-, Rot-, und Braunalgen. Sie leben fast immer auf festem Hartsubstrat im lichtdurchfluteten Uferbereich bis ca. zur mittleren 1% Lichteindringtiefe und finden sich dementsprechend an allen Hartbodenküsten der Welt. In polaren bis kalt-gemäßigten Zonen bilden Makroalgen charakteristische waldartige 3-dimensionale Lebensgemeinschaften (Tangwälder), die Habitat, Kinderstube und Lebensraum für eine Vielzahl assoziierter anderer Makroalgen, Fische, und wirbelloser Tiere bieten.

Was nun sind arktische Makroalgen? Die südliche Grenze der Arktis ist nicht klar durch Landgrenzen definiert, sondern wird durch klimatische oder vegetationsgeografische Kriterien von der kalt-gemäßigten Zone abgegrenzt. Da die Verbreitung mariner Makroalgen besonders durch die Meerwassertemperaturen reguliert wird, besagt ein vorherrschendes Konzept, dass die südliche Verbreitungsgrenze arktischer Makroalgen durch die mittlere 9-10 °C Oberflächenwasser-Isotherme im Sommer (August) und die mittlere 0 °C Oberflächenwasser-Isotherme im Winter begrenzt wird (LÜNING 1990). Das führt dazu, dass sich besonders im Nordwest-Atlantik die arktisch-biogeographische Region bis unterhalb des Polarkreises ausbreitet. Im Norden wird das Vorkommen von Makroalgen in der Arktis normalerweise durch die Packeisgrenze und eher durch die jährliche Lichtverfügbarkeit als durch die Temperatur bestimmt. Die nördlichsten Makroalgenvorkommen lie-

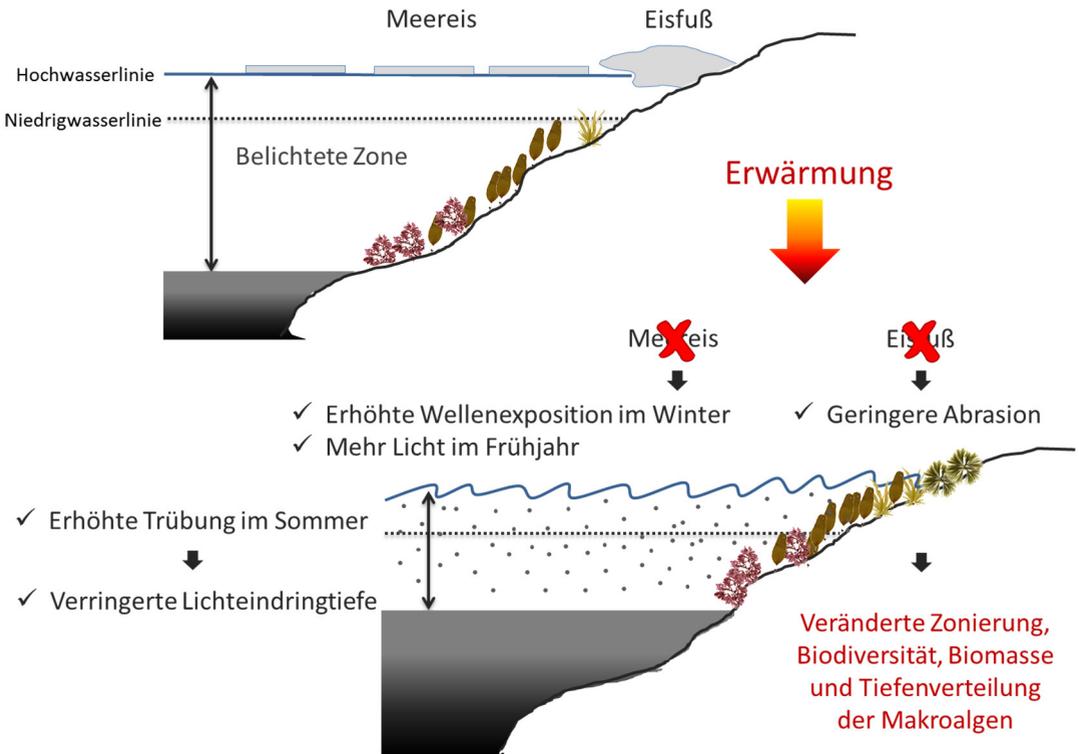
gen bisher bei 80-82 °N. Damit erstreckt sich die arktisch biogeographische Region der Makroalgen über die nordamerikanische Arktis (West- und Nord-Alaska, nördliche Beringstraße, Chukchi und Beaufort See) zu den vielen Inseln der kanadischen Arktis, Ellesmere und Baffin Insel sowie Labrador über Grönland und Svalbard nach Franz Josef Land und der Jan Mayen Insel. Weiter östlich erstreckt sich die russische Arktis, die nur im Bereich der norwegisch russischen Grenze bis zum Weißen Meer und entlang der Küsten Novaya Zemlyas auch Felssubstrat und damit Makroalgen aufweist (LÜNING 1990).

### Physikalische Umweltfaktoren

Während Artenreichtum und Biomasse der Pflanzen auf dem Land immer geringer werden je näher man der Arktis kommt, gilt dies nicht im selben Maß im marinen Bereich, da die Umweltfaktoren, die Richtung Norden immer extremer werden, unter Wasser weniger ausgeprägt sind (TAYLOR 1954). Trotzdem schwanken auch unter Wasser die für die arktischen Makroalgen wichtigsten Umweltfaktoren Strahlung, Temperatur, Nährstoffe, Salzgehalt, und Wellenexposition im Jahresverlauf. Nördlich des Polarkreises (66°34'N) sind besonders die Lichtverhältnisse extrem. Nach der Sonnenwende im Frühjahr, je nach Standort früher oder später, herrscht Dauerlicht und nach der Sonnenwende im Herbst schwindet die Tageslänge schnell und führt ins Dauerdunkel. Neben dieser ausgeprägten Saisonalität der Sonneneinstrahlung ist auch der Sonnenstand im Norden sehr viel schräger als in südlichen Breiten, was die Jahreslichtmenge ebenfalls reduziert. Darüber

hinaus wird das Licht unter Wasser durch zwei weitere Faktoren reduziert: im Frühjahr nach Ende des Dauerdunkels sind hoch-arktische Standorte noch durch Meereis und Schnee bedeckt und lassen gar kein oder nur wenig Licht für die Algen durch. Im Sommer führt vermehrter Schmelzwasserabfluß zu einem Eintrag von Sedimenten, die trotz Dauerlichtes wiederum zu einer Lichtreduktion führen und sich zusätzlich als Schicht auf Algenblättern ablegen (Abb. 4.5-1, 2d,e). Die Überlagerung durch Süßwasser führt im Sommer zu einer Schichtung des Meerwassers mit weniger salzhaltigem, wärmerem Wasser an der Oberfläche als in der Tiefe. Die Wassertemperatur an arktischen Standorten ist dagegen relativ gleichbleibend und schwankt maximal zwischen -1.8 und ca. 6-7 °C; in der Hocharktis bleibt die Wassertemperatur sogar ganzjährig gleichbleibend um 0 °C. Neben der Wirkung auf die Lichtverhältnisse

hat das Küstenmeereis noch andere Auswirkungen auf marine Makroalgen. Im Winter schützt die Eisdecke die im Flachwasser siedelnden Makroalgen vor den zerstörerischen Kräften von Wellenexposition, im Frühjahr dagegen führt das Abtauen des Eises dazu, dass die Gezeitenzone bis ins Flachwasser großem mechanischem Stress ausgesetzt ist und der Algenbewuchs mehr oder weniger stark abgeschabt wird. Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor, die für das Wachstum von Pflanzen unerlässlich sind, zeigen in der Arktis ebenfalls einen ausgeprägten Jahreswechsel. Im Winter bis zur Phytoplanktonblüte im Frühjahr sind genügend Nährstoffe vorhanden, dann jedoch sinken die Werte in den Sommermonaten bis auf Null. Durch die Erwärmung der Arktis wird das Zusammenspiel dieser Umweltfaktoren gleichzeitig, aber je nach Standort in unterschiedlichem Maße, verändert, was direkte Auswirkungen auf die



**Abb. 4.5-1:** Schematische Zusammenfassung beobachteter Umweltveränderungen und ihrer Konsequenzen für die Makroalgenvegetation entlang arktischer Hartsubstratküsten: In der nicht erwärmten Hocharktis kommt es regelmäßig zur Bildung eines Eisfußes und von landgebundenem Meereis, so dass Makroalgen in der Gezeitenzone und in der oberen Flachwasserzone abwesend sind oder sich nur über Sommer in geschützten Spalten entwickeln können; gleichzeitig ist die Tiefenausbreitung der Makroalgen relativ groß, da das Wasser ausgesprochen klar ist (*oben*). Bei dauerhafter Erwärmung schmilzt der Eisfuß und das Meereis, was erhöhte Trübung durch Schmelzwasserabfluß und Erosion durch Wellenbewegung verursacht. Dies führt zu einer Verschlechterung des Lichtklimas aber geringerer mechanischer Störung des Habitates. Als Folge davon wandern die Algentiefengrenzen nach oben, die Biomasse kann sich im Flachwasser erhöhen und die Gezeitenzone wird dauerhaft besiedelt (*unten*) (nach WESLAWSKI et al. 2011, verändert).

Makroalgen dominierten Habitats, ihre Biodiversität, Biomasse und funktionelle Ökologie hat und schematisch in *Abb. 4.5-1* dargestellt ist.

## **Arktische Makroalgengemeinschaften und ihre Biodiversität**

Obwohl jeder Standort einzigartig ist, sind bestimmte Arten und Gemeinschaften sowie Zonierungsmuster in der Uferregion charakteristisch für die Makroalgenvegetation der Arktis (*Abb. 4.5-2*). Das Arteninventar der Arktis setzt sich aus nord-atlantischen und auch nord-pazifischen Arten zusammen, die nach Süden bis in die kalt-temperierte Zone vordringen, mit nur wenigen kosmopolitischen und nur 19 arktisch-endemischen Makroalgenarten (WILCE, im Druck). Der Schwede F. R. KJELLMAN war einer der Pioniere der arktischen Makroalgenforschung und hatte im 19. Jahrhundert die Gelegenheit an mehreren Schiffsexpeditionen teilzunehmen, die direkt oder indirekt die Nord-West-Passage durch die Arktis suchten. In seinem daraus resultierenden Werk, das die erste holistische Betrachtung der arktischen marinen Makroalgenflora darstellt, beschrieb er die marine Algenflora der Arktis sehr kurz und treffend: Die herausragenden Aspekte seien Mangel an Individuen, Monotonie und Üppigkeit (KJELLMAN 1883). Die Monotonie bezieht sich auf die Vorherrschaft der braunen Farbe, die durch die deutliche Dominanz von Braunalgenarten hervorgerufen wird. Die Üppigkeit bezieht sich auf die Größe einzelner Brauntange, die im Gegensatz zu Geschwisterarten aus den gemäßigten Breiten Thalluslängen von 4-5 Metern erreichen können.

Die Spritzwasser- und Gezeitenzone bis hinunter in die ständig vom Wasser bedeckte flache Küstenregion (Sublitoral) ist in der Hocharktis dauerhaft oder über große Zeiträume kahl und wird erst nach Abschmelzen des Küsteneises durch wenige, vor allem schnell wüchsige, opportunistische Grün-, Braun- oder Rotalgen charakterisiert, die sich im Sommer gerne in geschützten Nischen und Höhlen des Gesteins entwickeln (*Abb. 4.5-2a,b*). Darunter schließt sich dann bis in ca. 15 m Tiefe ein Wald aus verschiedenen Brauntangen an, die unter dem englischen Begriff ‚kelp‘ bekannt sind (*Abb. 4.5-2d,e*). Brauntange sind vieljährig und in der Hocharktis selten reichlich vorhanden, bilden aber an manchen Standorten sehr dichte Bestände und eine hohe Biomasse, was vor allem für Svalbard dokumentiert ist. Unter den Brauntangen wachsen kleinwüchsige fädige und buschige Rotalgen und wenige Grünalgenarten. Unterhalb der Tiefengrenze der Brauntange erstreckt sich dann bis in große Tiefen ein Teppich aus wenigen buschigen Rotalgenarten und Krustenalgen (*Abb. 4.5-2f*). Im Kongsfjord (West-Spitzbergen) wurden diese durch Videotransakte bis in eine Tiefe von 60 m nachgewiesen

(FREDRIKSEN et al. im Druck). Ein weiterer sehr wichtiger, aber weniger auffälliger Baustein der arktischen Algenwälder sind braune Krustenalgen und kalzifizierende Rotalgen, die extrem geringe Lichtansprüche aufweisen und als biotische Primärschicht fast jedes Hartsubstrat krustenförmig überziehen (*Abb. 4.5-2f*) oder als sogenannte Rhodolithen-Betten ausgedehnte Ökosystemkomponenten bilden. Rhodolithen sind sehr langsam wachsende frei lebende kalzifizierte Rotalgenknollen, die viele hundert bis 1.200 Jahre alt werden können und mittlerweile als Klimaarchiv herangezogen werden (ADEY et al. 2015). Ebenso wie alle anderen Algenarten erhöhen sie die lokale Biodiversität ihres Lebensraumes durch die Bereitstellung von Mikrohabitaten. Ihre Bedeutung für die arktischen Ökosysteme wird erst langsam erkannt, vor allem ihre Funktion als großskalige Karbonat-Fabriken, die vergleichbar mit Korallenriffen sind (TEICHERT et al. 2014).

Da die Beprobung arktischer Standorte weiterhin eine logistische Herausforderung darstellt, gibt es relativ wenige umfassende Inventarlisten arktischer Makroalgenarten und noch weniger quantitative Basisstudien, die für eine Beurteilung von Veränderung herangezogen werden können. Grundsätzlich ist die Arktis im Vergleich zu temperierten Standorten relativ artenarm. Eine erste moderne Inventur, die die Biodiversität arktischer Makroalgen verlässlich schätzt, listet 161 Makroalgenarten mit pan-arktischer Verbreitung auf (WILCE, im Druck). Der Vergleich zweier gut untersuchter Standorte aus der kanadischen Arktis (Boulder Patch, Beaufort See) und von West-Spitzbergen (Kongsfjord, Svalbard) ergab eine floristische Gemeinsamkeit von ca. 56%, was gemessen an der großen Distanz der beiden Standorte eine hohe Ähnlichkeit darstellt (WILCE & DUNTON 2014). Eine Übersichtsarbeit, die den Algenbestand des Svalbard Archipels erstmalig zusammenfasst, registrierte insgesamt 197 Makroalgenarten, davon 51 Grünalgen, 76 Braunalgen und 70 Rotalgen und – wie überall – nur wenige arktisch endemische Arten (FREDRIKSEN et al. im Druck). Für ganz Grönland, was im Südwesten ebenfalls sub-arktische Standorte beinhaltet, wurden um die 200 Makroalgen beschrieben (PEDERSEN 2011). Auch wenn einzelne Standorte relativ wenig Makroalgenarten aufweisen können, darf dies nicht darüber hinweg täuschen, dass arktische Makroalgenwälder durch die assoziierte Fauna insgesamt sehr viele Arten und Individuen beherbergen können. Im Kongsfjord (West-Spitzbergen, Svalbard) wurden an Makroalgenstandorten zwischen 0 und 30 m Tiefe ca. 400 Arten wirbelloser Tiere registriert und die mittlere Dichte wirbelloser Tiere im Brauntangwald zwischen 2.5 und 15 m betrug ca. 4.800 Individuen/m<sup>2</sup> (Voronkov et al. 2013, PAAR et al. 2015). Interessanterweise können Standorte, die von langen



**Abb. 4.5-2:** Beispiele für typische Makroalgenvegetation arktischer Standorte. **a:** Bei Niedrigwasser freifallende Felsküste im Sommer: die oberen Gesteinsflächen bleiben unbesiedelt und die Algenvegetation siedelt sich eher in geschützten Nischen an. **b:** Durch Eis und Schnee blank geputzte Steine der Spritzwasserzone, die im Sommer durch einen Biofilm schnell wüchsiger, opportunistischer, filamentöser Grün- und Braunalgen besiedelt werden. **c:** Ansicht eines Gezeitentümpels, der eine hohe Diversität vor allem von Braunalgen aufweist. **a-c:** Inka Bartsch, AWI. **d:** Die Filamente im Vordergrund zeigen die für das Flachwasser typische arktisch endemische Rotalge *Devaleraea ramentacea*, deren Spitzen durch hohe Sonneneinstrahlung ausgebleicht sind. Im Hintergrund der gewellte Thallus des Zuckertanges (*Saccharina latissima*). **e:** Ein typischer Vertreter des dichten Brauntangwaldes, der sich bis in >15 m Tiefe erstreckt, ist der Flügeltang (*Alaria esculenta*). Die Algen werden im Sommer je nach Nähe zu Gletscherabflüssen mehr oder weniger stark von Sediment bedeckt. **f:** Ein typischer Aspekt der Algenvegetation unterhalb des Brauntangwaldes, der bis in Tiefen von 60-80 m vordringen kann. Hier im Vordergrund der rote Eichtang (*Phycodrys rubens*) und die rosa Überzüge der kalkifizierenden Krusten, die fast jedes Hartsubstrat überziehen und deren Lichtansprüche extrem gering sind. **d-f:** Max Schwanitz, AWI. Alle Fotos: Hansneset, Kongsfjord, Spitzbergen.

Weichbodenküsten umgeben sind, wo keine oder kaum Makroalgen wachsen, Hotspots von Makroalgendiversität sein. So wachsen in der kanadischen Beaufort See in einem nur ca. 125 km<sup>2</sup> großen Bereich, der von losem Gestein und Felsbrocken gekennzeichnet ist, insgesamt 98 Makroalgenarten (WILCE & DUNTON 2014). Ein weiterer umfassend untersuchter Standort der Hocharktis, die Baffin Insel der kanadischen Arktis, weist 71 Makroalgenarten auf (KÜPPER et al. 2016). Hier ermöglichte erstmalig eine Kombination klassischer Taxonomie, molekularer Marker und der Kultivierung von Umweltproben eine umfassende Bestandsaufnahme, die auch neue unbeschriebene Arten mit geringer Auffälligkeit in der Natur erfasste. Diese Form der Untersuchung ist bisher für die Arktis einmalig und i.a. nur mit deutlich hohem Aufwand an Zeit und Kosten zu leisten, was den meisten Forschungsprojekten verwehrt ist. Da auch an anderen arktischen Standorten diverse Arten neu beschrieben, oder kryptische Artenkomplexe identifiziert wurden, ist zu erwarten, dass sich das Arteninventar der arktischen Makroalgen bei größerer Fokussierung auf diesen Lebensraum in Zukunft erhöhen wird, und zwar unabhängig davon, ob es durch globale Umweltveränderungen zu Einwanderungen, Verlust oder Verschiebungen von Arten kommt. Nur gute Basisdaten, deren Aufnahme regelmäßig wiederholt wird, ermöglichen deshalb eine Beurteilung von Biodiversitäts- und Ökosystemveränderungen.

### **Einwanderung von Arten und Verschiebung von Arealgrenzen aufgrund globaler Erwärmung**

Diverse Modellstudien haben in den letzten Jahren Ausbreitungsszenarien von Makroalgen unter Szenarien globaler Erwärmung erstellt (MÜLLER et al. 2009, BARTSCH et al. 2012, JUETERBOCK et al. 2016). Im Wesentlichen wurde dabei deutlich, dass diverse Arten oder ganze Gemeinschaften, die jetzt ihre nördliche Verbreitungsgrenze in der Subarktis haben, sich in den kommenden Jahren vermutlich nach Norden ausbreiten werden. Gleichzeitig wird sich die nördliche Grenze hoch-arktischer Arten weiter nach Norden verschieben und, sofern Hartbodensubstrat zur Verfügung steht, der Packeisgrenze folgen. Bisher sind die Hinweise für die tatsächliche Ausbreitung kalt-temperierter Makroalgenarten in die Arktis noch umstritten. So wird zum Beispiel die Ausbreitung des Nordost-Atlantischen Palmentanges (*Laminaria hyperborea*), der bisher nur bis Nord-Norwegen vorkommt, nach Svalbard vorhergesagt (MÜLLER et al. 2009) und einzelne Veröffentlichungen erwähnen die Art bereits auf Spitzbergen, ohne jedoch abschließend überzeugende Beweise zu liefern. Die Einwanderung ist aber nur eine Frage der Zeit.

Neben den zukünftig günstigeren Temperaturverhältnissen müssen temperierte Arten ihren Vorstoß in die Arktis aber mit den vorherrschenden extremen Lichtverhältnissen in Einklang bringen können. So weist besonders der arktisch endemische Brauntang *Laminaria solidungula* eine Anpassung an besonders lichtarme Standorte auf und kann sogar im Dauerdunkel wachsen und sich fortpflanzen, was als besondere arktische Anpassung angesehen wird (WILCE & DUNTON 2014). Im sich erwärmenden Kongsfjord auf Spitzbergen wird der Verdrängungswettbewerb bereits deutlich: die arktisch endemische Art ist nur als Zwergform vorhanden, entweder im Unterwuchs anderer Brauntange, in größeren Tiefen oder im inneren Fjord, wo das Jahreslichtbudget für andere Brauntang-Arten vermutlich zu gering ist. Die meisten der jetzt in der Arktis vorkommenden Makroalgen-Arten werden in naher Zukunft jedoch nicht auf Grund der ansteigenden Temperaturen verschwinden. Bisherige Erkenntnisse zeigen, dass alle bisher untersuchten Arten erhöhte Temperaturen bis mind. 12 °C tolerieren oder sogar bevorzugen (WIENCKE et al. 1994, GÓMEZ et al. 2009). Ob das jedoch auch für die wenigen arktisch endemischen Arten gilt, ist Großteils unbekannt.

### **Veränderungen von Biodiversität und Funktionalität arktischer Standorte aufgrund globaler Erwärmung**

Es gibt es nur wenige Feldstudien, die die beginnende Veränderung der Unterwasserflora arktischer Standorte einwandfrei dokumentieren. Bis 2009 gab es nur 12 Studien der Meeresbodenzone, die den Abdruck der Klimaveränderungen in der Arktis einwandfrei belegten, davon schlossen nur 2 auch Makroalgen ein (WASSMANN et al. 2011). Diese Situation hat sich seitdem etwas geändert. Hervorzuheben ist besonders eine photographische Zeitreihe, die ein norwegisches Forscherteam bereits vor 30 Jahren entlang der Westküste Spitzbergens begann (KORTSCH et al. 2012 und Zitate darin). Jeden Sommer wurden 2 Standorte in 15 m Tiefe unterhalb der Brauntang-Zone in West- und Nordwest-Spitzbergen überwacht. Erste strukturelle Veränderungen wurden bereits 1996 in West-Spitzbergen und ab 2000 im kälteren Nordwest-Spitzbergen beobachtet, verbunden mit einem deutlichen Anstieg fadenförmiger Braunalgen. Während ein leichter Temperaturanstieg bereits 1996 sichtbar wurde, stieg die Zahl der eisfreien Tage erst ab 1998 an. Seitdem wurde die Erwärmung Spitzbergens eindeutig dokumentiert (COTTIER et al. 2007, NORDLI et al. 2014). Weitere 4 Studien aus dem westlichen Spitzbergen, die frühere Untersuchungen vor einer deutlichen Erwärmung der Standorte wiederholten, untermauern diese Veränderungen (FREDRIKSEN et al. im Druck, und Zitate darin): In drei verschie-

denen Fjorden erhöhte sich die Anzahl der Makroalgenarten, vor allem in der Gezeitenzone, innerhalb von 15-50 Jahren deutlich. Das Arteninventar der Fjorde selbst veränderte sich aber nur geringfügig. Die dauerhafte Besiedelung der Gezeitenzone und damit einhergehende Erhöhung der Biodiversität in dieser Zone wird als Folge der winterlichen Erwärmung gedeutet, die zu einer Reduzierung des Meereises und damit zu dem Verlust der regelmäßigen mechanischen Störung führt. Im Kongsfjord wurde am Untersuchungsstandort bereits seit 2005/2006 kein winterliches Meereis mehr dokumentiert (COTTIER et al. 2007). Parallel zu dieser Entwicklung veränderte sich die Tiefenzonierung einiger Makroalgen. In zwei Fjorden wurde eine Vervielfachung der Algenbiomasse nach 15-20 Jahren festgestellt, besonders im flachen Sublitoral. Im Kongsfjord wurde gleichzeitig zu dem Biomasseanstieg der Brauntange auch ein Biomasseanstieg der assoziierten wirbellosen Tiere beschrieben, die mit einer Veränderung des funktionellen Fraßtypes der Tiere einherging, was auf ökosystemare Veränderungen schließen lässt (PAAR et al. 2015). Es wird vermutet, dass diese Produktivitätsveränderungen eine Kombination von veränderter Jahreslichtmenge durch den Rückgang des Meereises, des erhöhten Abflusses sedimentreicher Gletscher und Flüsse und einer verringerten Eisenwirkung im flachen Sublitoral darstellen (BARTSCH et al. 2016). Entsprechende vergleichende Feldstudien aus anderen Gebieten der Arktis fehlen bisher. Da sich das Jahreslichtbudget für die unter Wasser lebenden Makroalgenarten in der abtauenden Arktis in Zukunft verbessern wird, zumindest an Standorten, die nicht drastisch vom Sedimenteintrag tauender Gletscher beeinflusst werden, sagen alle Konzeptstudien eine deutliche Erhöhung der Makroalgen-Produktivität in der Arktis voraus (KRAUSE-JENSEN & DUARTE 2014). Damit werden viele arktische Makroalgen vermutlich als Gewinner aus der Erwärmung der Arktis hervorgehen. Unklar ist jedoch, ob das auch für die assoziierten Fische und wirbellosen Tiere und die arktisch endemischen Makroalgenarten gilt.

## Literatur

- ADEY, W., J. HALFAR, A. HUMPHREYS, T. SUSKIEWICZ et al. (2015): Subarctic rhodolith beds promote longevity of crustose coralline algal buildups and their climate archiving potential. *Palaios* 30: 281-293.
- BARTSCH, I., C. WIENCKE & T. LAEPPLER (2012): Global seaweed biogeography under a changing climate: the prospected effects of temperature. In: WIENCKE C. & K. BISCHOF (eds) *Seaweed Biology. Novel Insights into Ecophysiology, Ecology and Utilization*. Springer, Heidelberg, 383-406.
- BARTSCH, I., M. PAAR, S. FREDRIKSEN, M. SCHWANITZ et al. (2016): Changes in kelp forest biomass and depth distribution in Kongsfjorden (Spitsbergen) between 1996-1998 and 2012-

- 2014 reflect Arctic warming. *Polar Biol.*, doi: 10.1007/s00300-015-1870-1.
- COTTIER, F. R., F. NILSEN, M. E. INALL, S. GERLAND et al. (2007): Wintertime warming of an Arctic shelf in response to large-scale atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters* 34: L10607.
- FREDRIKSEN, S., U. KARSTEN, I. BARTSCH, J. WOELFEL et al. (im Druck): Biodiversity of benthic macro- and microalgae from Svalbard with special focus on Kongsfjorden. *Adv. Polar Ecol.*
- GÓMEZ, I., A. WULFF, M. Y. ROLEDA, P. HUOVINEN et al. (2009): Light and temperature demands of marine benthic microalgae and seaweeds in Polar regions. *Bot. Mar.* 52: 593-608.
- JUETERBOCK, A., I. SMOLINA, J. A. COYER & G. HOARAU (2016): The fate of the Arctic seaweed *Fucus distichus* under climate change: an ecological niche model approach. *Ecol. Evol.* 6: 1712-1724. doi: 10.1002/ece3.2001.
- KJELLMAN, F. R. (1883): *Norra Ishafvets algflora. Vega-Exped Vetensk Iakttag* 3: 1-431.
- KRAUSE-JENSEN, D. & C. M. DUARTE (2014): Expansion of vegetated coastal ecosystems in the future. *Front. Mar. Sci.* 1: Article 77.
- KORTSCH, S., R. PRIMICERIO, F. BEUCHEL, P. E. RENAUD et al. (2012): Climate-driven regime shifts in Arctic marine benthos. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 109: 14052-14057.
- KÜPPER, F. C., A. F. PETERS, D. M. SHEWRING, M. D. J. SAYER et al. (2016): Arctic marine phyto-benthos of northern Baffin Island. *J. Phycol.* 52: 532-549.
- LÜNING, K. (1990): *Seaweeds. Their environment, biogeography and ecophysiology*. John Wiley and Sons, New York.
- MÜLLER, R., T. LAEPPLER, I. BARTSCH & C. WIENCKE (2009): Impact of oceanic warming on the distribution of seaweeds in polar and cold-temperate waters. *Bot. Mar.* 52: 617-638.
- NORDLI, Ø., R. PRZYBYLAK, A. E. J. OGILVIE & K. ISAKSEN (2014): Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898-2012. *Polar Res.* 33: 21349. doi: 10.3402/polar.v33.21349.
- PAAR, M., A. VORONKOV, H. HOP, T. BREY et al. (2015): Temporal shift in biomass and production of macrozoobenthos in the macroalgal belt at Hansneset, Kongsfjorden, after 15 years. *Polar Biol.* doi:10.1007/s00300-015-1760-6.
- PEDERSEN, P. M. (2011): *Grønlands Havalger*. Epsilon, Copenhagen.
- TAYLOR, W. R. (1954): The cryptogamic flora of the Arctic. II. Algae: non - planktonic. *Bot. Rev.* 20: 363-399.
- TEICHERT, S., W. WOLKERLING, A. RÜGGERBERG, M. WISSHAK et al. (2014): Arctic rhodolith beds and their environment. *Facies* 60: 15-37.
- VORONKOV, A., H. HOP & B. GULLIKSEN (2013): Diversity of hard-bottom fauna relative to environmental gradients in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Res.* 32: 11208. doi:10.3402/polar.v32i0.11208.
- WASSMANN, P., C. M. DUARTE, S. AGUSTÍ & M. K. SEJR (2010): Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Glob. Change Biol.* 17: 1235-1249.
- WESLAWSKI, J. M., M. A. KENDALL, M. WLODARSKA-KOWALCZUK, K. IKEN et al. (2011): Climate change effects on Arctic fjord and coastal macrobenthic diversity – observations and predictions. *Mar. Biodiv.* 41: 71-85.
- WIENCKE, C., I. BARTSCH, B. BISCHOFF, A. F. PETERS et al. (1994): Temperature requirements and biogeography of Antarctic, Arctic and amphiequatorial seaweeds. *Bot. Mar.* 37: 247-259.
- WILCE, R. T. & K. H. DUNTON (2014): The Boulder Patch (North Alaska, Beaufort Sea) and its benthic algal flora. *Arctic* 67: 43-56.

## Kontakt:

Dr. Inka Bartsch

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven  
inka.bartsch@awi.de

Bartsch, I. (2016): *Biodiversität mariner Makroalgen in arktischen Gewässern*. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 243-248. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi: 10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.39.