

## Antarktisches marines Ökosystem

### Handreichungen für Lehrkräfte (Oberstufe)

Das antarktische, marine Ökosystem zählt zu den komplexesten und zugleich empfindlichsten Ökosystemen der Erde. Es ist geprägt von extremen klimatischen Bedingungen, die Lebensprozesse im südlichsten Ozean maßgeblich steuern. Eine zentrale Rolle nimmt dabei das Meereis ein, das nicht nur als physische Barriere fungiert, sondern auch als Lebensraum und Produktionsstätte. An der Basis des antarktischen Nahrungsnetzes steht das Phytoplankton, dessen saisonale Blüte eng mit der Ausdehnung und dem Rückzug des Meereises verknüpft ist. Die durch das Schmelzen des Eises freigesetzten Mineralstoffe fördern das Wachstum des Phytoplanktons und bilden somit die Grundlage für höhere trophische Ebenen. Über Krill und Fische als Primärkonsumenten spannt sich ein vielfältiges Nahrungsnetz, das bis hin zu Prädatoren wie Robben, Pinguinen und insbesondere Walen reicht. Letztere spielen eine bedeutende ökologische Rolle, da sie als Konsumenten großer Mengen antarktischen Krills und durch ihre Ausscheidungen als Mineralstofflieferanten aktiv zur Primärproduktion beitragen. Die Fortpflanzungsrate der Bartenwale ist von der Menge des Phytoplanktons und damit von der Ausdehnung des Meereises abhängig. Geht das Vorkommen des Meereises zurück, ist die Fortpflanzung weniger erfolgreich. Insgesamt stellt das antarktische Meeresökosystem ein hochgradig vernetztes und sensibles System dar, dessen Stabilität eng von klimatischen Veränderungen und der Integrität des Meereises abhängt.

Die Schülerinnen und Schüler erweitern ihr Wissen zu den Polargebieten und erfahren anhand des vorliegenden Forschungsfeldes, wie wissenschaftliches Arbeiten dort durchgeführt wird. Sie vertiefen Fähigkeiten des Textverständnisses sowie das Lesen und Auseinandersetzen von bzw. mit unterschiedlichen Graphiken und deren Verknüpfung. Teilweise sollen sie eigenständig Informationen sammeln und haben die Aufgabe, selbst im Internet zu recherchieren. Das Besondere ist eine Powerpoint-Präsentation zu den oben angesprochenen Themen wie Meereis, Phytoplankton, Klimawandel in der Antarktis und Forschungsmethoden. Diese steht online zum Download zur Verfügung und kann kostenfrei für die Unterrichtseinheit genutzt werden.

### Musterlösungen

#### Arbeitsblatt „Ausschnitt des antarktischen Nahrungsnetzes“

Das Arbeitsblatt ist als Einstieg mit den Schwerpunkten Nahrungsnetz sowie Phytoplankton und Wale gedacht.

- 1) Wale, Robben, Pinguine, Krill, Phytoplankton. Der Lebensraum sind das Meer und Meereis. Dazu organische, absinkende Partikel (abgestorbenes Material) und benthische Lebewesen (viele Destruenten). (Afb: I)
- 2) Ein Beispiel aufzeigen mit Nutzung folgender Begriffe: Produzenten, Konsumenten 1. – x.-Ordnung, Endkonsumenten, Destruenten. Bartenwale sind Konsumenten 2. Ordnung, Zahnwale Endkonsumenten. (Afb: II)
- 3) Phytoplankton bildet die Grundlage des Nahrungsnetzes. Es hat eine zentrale Rolle, da es organisches Material als Nahrung für die Konsumenten 1. Ordnung bereitstellt. Damit

besitzt es indirekt auch eine hohe Bedeutung für alle Konsumenten höherer Ordnung.  
(Afb: II)

- 4) Meereis ist ein wichtiger Teil des Lebensraumes. Es übernimmt wichtige Funktionen:
- Robben und Pinguine: Ruheplatz, Geburtsort und Aufzucht, soziale Interaktion, Fellwechsel/Mauser, Schutz vor Fressfeinden (Orcas)
  - Bartenwale (kleinere Zwergwale): Schutz von Zahnwalen, Nahrung in Form von Krill vorhanden, die Unterschiede zwischen Zahn- und Bartenwalen sollen geklärt werden
  - Kill: Schutz vor Fressfeinden, Eisalgen als Nahrung vorhanden
  - Phytoplankton: Eisalgen leben unter dem Eis, im Meereis gespeicherte Mineralstoffe führen bei Freisetzung im Frühjahr zur Algenblüte.
- Einzusetzende Folien: 04-13. (Afb: II)*

## Arbeitsblatt „Phytoplankton, seine Lebensgrundlagen und seine Bedeutung für das Ökosystem“

Bei diesem Arbeitsblatt werden bei der ersten Aufgabe die Informationen für die Lernenden mithilfe einer Präsentation von Jasmin Groß und Elena Schall durch die Lehrkraft vermittelt. Die Präsentation enthält insgesamt neben Fotos und Abbildungen auch Audios und je Folie auch Erläuterungen zu deren Inhalten.

- 1) Das Thema Photosynthese wird aufgegriffen (ggf. Wiederholung) und durch Informationen zur Eindringtiefe von Licht ins Meerwasser sowie die Freisetzung von Mineralstoffen aus Meereis ergänzt. *Einzusetzende Folien: 14-18. (Afb: I)*
- 2) Die Bedeutung von im Frühjahr schmelzendem Meereis als Lieferant von Mineralstoffen für das Phytoplankton bei zunehmendem Licht sollte erkannt werden. (Afb: I)
- 3) Exkremate der Wale sind ebenfalls wichtige Quellen für Mineralstoffe, insbesondere Eisen. Das Thema kann mit der kleinen Publikation „Odontellina“ von Jasmin Groß und Elena Schall ergänzt werden. (Afb: II)  
Weiterführende Informationen dazu in den Handreichungen für die Mittelstufe.
- 4) Bei dieser Aufgabe geht es um einen Vergleich sowie die Bewertung der unterschiedlichen Eisenkonzentrationen mit konkreten, gemessenen Daten. Die Herausforderung besteht auch im Umrechnen der Daten, wozu Kenntnisse aus der Chemie hilfreich sind: (Afb: III)

**Hinweise:** 1 nM (Nanomolar) = 1 nmol/l

0,2 nM =  $0,2 \times 10^{-9}$  mol/l

Molmasse Eisen  $\approx 55,85$  g/mol

- In g/l umrechnen:  $0,2 \times 10^{-9}$  mol/l  $\times 55,85$  g/mol  $\approx 1,12 \times 10^{-8}$  g/l
- g/l  $\rightarrow$  mg/l (1 mg =  $10^{-3}$  g):  $1,12 \times 10^{-8}$  g/l =  $1,12 \times 10^{-5}$  mg/l

0,2 nM Eisen entsprechen etwa **0,000011 mg/l**, also  $1,1 \times 10^{-5}$  mg/l. Das ist extrem wenig, rund 0,011 µg/l im Meerwasser.

Der Vergleichswert von **146 mg/kg** für die Walexkremate kann als Näherungswert für eine Bewertung der Konzentrationen genutzt werden, auch wenn mg/l mit mg/kg verglichen werden.

Quellen: Balaguer, J., Koch, F., Hassler, C. et al. (2022). Iron and manganese co-limit the growth of two phytoplankton groups dominant at two locations of the Drake Passage. Commun Biol 5, 207. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03148-8>

Nicol, S., Bowie, A., Jarman, S. et al. (2010). Southern Ocean iron fertilization by baleen whales and Antarctic krill. Fish and Fisheries, Vol. 11, 2, 203-209. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2010.00356.x>

Zu den Online-Materialien von Jasmin Groß und Elena Schall:

<https://hifmb.de/de/einblicke-in-die-marine-biodiversitaetsforschung-vortraege-fuer-schuelerinnen-und-schueler/> hier zum Download: Datei „Antarktische Ökosysteme“

Weitere Quelle:

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Ozeand%C3%BCngung>

- 5) Eisen (Fe) spielt bei der Photosynthese eine zentrale Rolle als Spurenelement, weil es an mehreren Schlüsselschritten beteiligt ist. Ohne Eisen kann die Pflanze nicht effizient Lichtenergie in chemische Energie umwandeln. (Afb: II/III)

Bereich	Bedeutung von Eisen
Chlorophyllbildung	Eisen ist notwendig für die Synthese von Chlorophyll. Ohne Eisen entsteht weniger Chlorophyll → Blätter vergilben (Chlorose).
Elektronentransportkette (ETC)	Fe ist Bestandteil von Cytochromen und Eisen-Schwefel-Proteinen, die Elektronen im Photosystem I & II weiterleiten.
Redoxreaktionen	Eisen wechselt leicht zwischen $\text{Fe}^{2+}$ und $\text{Fe}^{3+}$ und ermöglicht so zentrale Oxidations- und Reduktionsreaktionen während der Lichtreaktion.
Bildung von ATP & NADPH	Durch seine Rolle im Elektronentransport trägt Eisen indirekt zur Entstehung von ATP und NADPH bei, die im Calvin-Zyklus benötigt werden.

## Arbeitsblatt „Das antarktische Meereis“

Dieses Arbeitsblatt führt Schülerinnen und Schüler an das Thema Meereis, seine räumliche und zeitliche Verbreitung und die Auswirkungen des Klimawandels auf das Meereis ein.

- 1) Während das Meereis im antarktischen Herbst (März) bis auf wenige Reste im Küstenbereich und im Weddellmeer kaum vorhanden ist, dehnt es sich mit ausgehendem Winter (September) auf eine sehr große Fläche um den Kontinent Antarktika aus. Die hellblaue Linie zeigt die jeweilige, durchschnittliche Meereisausdehnung von 1981-2010. Diese Meereisflächen waren im Vergleich zu 2025 deutlich größer. (Afb. I)
- 2) Die zum Zeitpunkt der Bearbeitung aktuelle Situation soll beschrieben und bewertet werden. Die Aufgabe dient auch dazu, Schülerinnen und Schüler zu motivieren, sich eingehender mit dem Thema Meereis – auch auf dieser Webseite – zu beschäftigen. (Afb. II)

- 3) Mit dieser Abbildung wird der Jahresverlauf der Meereisausdehnung gezeigt und durch Daten belegt. Die Ausdehnung war im Mittel in den Jahren 1980-2010 deutlich größer (3 Mio km<sup>2</sup> Februar, 18,5 Mio km<sup>2</sup> September, Schwankungen der Min/Max-Werte ca. 2 Mio km<sup>2</sup>) als 2024 und 2025 (2 Mio km<sup>2</sup>, 18 Mio km<sup>2</sup>). In diesen Jahren war die Ausdehnung etwa so groß wie die Minimumwerte zwischen 1980 und 2010. Eine Ausnahme bildet der Januar mit einer gleichen Ausdehnung 2025. Auffallend ist das Rekordminimum 2012. Bewertung: Die Meereisausdehnung hat in den vergangenen Jahren im Vergleich zum Zeitraum 1980-2010 deutlich abgenommen. (Afb. II)  
*Einzusetzende Folie: 19.*

## **Arbeitsblatt „Die Rolle von Meereis für das antarktische Ökosystem“**

Nachdem Schülerinnen und Schüler das Meereis mit dem vorangegangenen Arbeitsblatt kennen gelernt haben, geht es bei diesem Arbeitsblatt um seine Bedeutung für die Lebewesen im Südpolarmeer. Wichtig sind das Nahrungsspektrum und die Jagdgebiete der Wale, um Zusammenhänge auch mit dem Meereis erkennen zu können.

*Folien 35-50:*

- 1) Die Forschungsarbeiten werden mit dem AWI Forschungsschiff *Polarstern* durchgeführt. Es werden Rekorder, sogenannte Hydrophone oder Unterwasser-Mikrophone, im Wasser ausgebracht, die alle akustischen Signale in der Umgebung aufzeichnen. Details siehe Kommentare zu den Folien. (Afb. II)  
*Einzusetzende Folien: 35-42.*
- 2) (Afb. I)  
*Einzusetzende Folien: 43-49.*
- 3) Die Forschungsarbeiten mit *Polarstern* finden in der Antarktis hauptsächlich im Bereich des Weddellmeeres statt. (Afb. II)  
*Einzusetzende Folie: 50.*
- 4) An den Stellen, wo sich die meisten Verbreitungsgebiete überschneiden, könne die Forscherinnen davon ausgehen, dass es wichtige Gebiete mit hoher Biodiversität sind. Für diese Gebiete schlagen sie vor, Meeresschutzgebiete einzurichten, um die Ökosysteme und Artenvielfalt in diesen Gebieten zu erhalten. (Afb. II)  
*Einzusetzende Folie: 51.*

*Folien 23-34:*

- 5) Zuerst werden den Walen Gewebeproben entnommen. Das ist ein kleines Stück ihrer Haut mit dem darunterliegenden Fettgewebe. Diese Probe wird dann im Labor untersucht. Im Fettgewebe der Probe sind die „Bausteine“ von allem, was der Buckelwal im Polarmeer gefressen hat, gespeichert. Diese „Bausteine“ kann man durch verschiedene Techniken im Labor sichtbar machen. Das sind vor allem Kohlenstoff und Stickstoff, daneben auch gesättigte und ungesättigte Fettsäuren. Die unterschiedliche Nahrung ergibt dann eine jeweils spezifische Zusammensetzung der genannten Stoffe, wodurch Rückschlüsse auf die Art der Nahrung geschlossen werden kann.  
*Einzusetzende Folien: 23-32.*
- 6) Wenn Wale in größeren Populationen auftreten, muss es ausreichend Nahrung für sie geben. Die Zusammensetzung der Nahrungsquellen gibt dann Aufschluss über das

Vorkommen bestimmter Arten. Diese stehen im Nahrungsnetz auf bestimmten Trophiestufen (Arbeitsblatt „Ausschnitt des antarktischen Nahrungsnetzes“). (Afb. III)

- 7) Neben der Nahrung an sich ist auch der Ort der Nahrungsaufnahme interessant, um die Jagdgebiete der Wale lokalisieren zu können. Anhand des Kohlenstoff-Isotopenverhältnisses von schwerem Kohlenstoff ( $^{13}\text{C}$ ) zu leichtem Kohlenstoff ( $^{12}\text{C}$ ) (wird als  $\delta^{13}\text{C}$  ausgedrückt) im Walgewebe kann erkannt werden, wo die Wale gefressen haben. Mit dieser Methode kann unterschieden werden, ob die Wale eher in der Nähe der Küste bzw. am Meereisrand gefressen haben oder im offenen Meer. *Einzusetzende Folien: 33-34. (Afb. II)*

**Hinweise:** Die  $\delta^{13}\text{C}$ -Analyse bestimmt das Verhältnis des schweren Kohlenstoffisotops  $^{13}\text{C}$  zum häufigeren Isotop  $^{12}\text{C}$  in einem biologischen Gewebe (z. B. Haut, Blubber oder Barten).

Dieses Verhältnis wird als  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert angegeben und in „Promille“ (‰) ausgedrückt.

Die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Meer variieren räumlich:

- Küstennahe und produktive Regionen weisen meist höhere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte auf.
- Offene, hochantarktische Gewässer haben typischerweise niedrigere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte.
- Auch der Einfluss von Meereis erhöht  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte, da Eisalgen und eisnahe Nahrungsketten relativ  $^{13}\text{C}$ -reich sind.

Da Wale den Kohlenstoff ihrer Nahrung in ihr Gewebe einbauen, spiegeln ihre  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte wider, in welchem nahrungsökologischen Raum sie gefressen haben.

Der  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert lässt folgende Aussagen zu:

- Nahrungssuche nahe des Meereises  $\rightarrow$  höhere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte.
- Nahrungssuche im offenen, südpolaren Ozean  $\rightarrow$  niedrigere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte.
- Subantarktische Fressgebiete  $\rightarrow$  häufig mittlere bis hohe  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte.

Mit der Methode lässt sich nicht nur bestimmen, wo ein Wal gefressen hat, sondern bei wachstumsaktiven Geweben wie Barten sogar wann, da diese zeitliche Abfolgen speichern.

- 8) Haben die Wale im offenen Ozean gefressen, sollten sie überproportional leichte Kohlenstoff-Bausteine im Gewebe eingebaut haben. Haben sie näher an der Küste bzw. am Meereis gefressen, sollten mehr schwere Kohlenstoff-Bausteine im Gewebe nachweisbar sein. Da das Vorkommen von Phytoplankton schwerpunktmäßig an Meereis gebunden ist (Arbeitsblatt „Phytoplankton, seine Lebensgrundlagen und seine Bedeutung für das Ökosystem“ und Arbeitsblatt „Das antarktische Meereis“) und damit auch das Krillvorkommen als Nahrung für die (Barten-) Wale, sollten überwiegend schwere Kohlenstoff-Bausteine im Gewebe nachweisbar sein. Dies würde auf eine große Bedeutung des Meereises für das Ökosystem und die Wale hinweisen. (Afb. III)

### **Arbeitsblatt „Die Abhängigkeit der Bartenwale vom Meereis“**

Bei diesem Arbeitsblatt wird auf das Thema Meereis und die Entwicklung seiner Ausdehnung im Rahmen des Klimawandels zurückgegriffen (Arbeitsblatt „Das antarktische Meereis“) und explizit auf die Folgen für das Ökosystem, insbesondere auf die Population der Bartenwale eingegangen. Dabei werden mit aktuellen Daten zu Schwangerschaftsraten belegte negative Tendenzen deutlich. Die Unterschiede zwischen Zahn- und Bartenwalen sollten bereits mit dem Arbeitsblatt „Ausschnitt des antarktischen Nahrungsnetzes“ geklärt worden sein.

- 1) Mit dem zunehmenden Klimawandel wird es weniger Meereis durch wärmere Temperaturen geben. Daher werden weniger Mineralstoffe im Eis gespeichert und es fehlen im Frühjahr wichtige Faktoren für die Photosynthese des Phytoplanktons. Die fehlenden Mineralstoffe sorgen dafür, dass es weniger Phytoplankton gibt, da dieses nicht so viel Photosynthese betreiben kann, wodurch es weniger wächst. Das hat zur Folge, dass es weniger Nahrung für Krill gibt und daher auch weniger Krill. Die kleinere Zahl an Krill führt dazu, dass Wale und auch viele andere Tiere ihre Hauptnahrungsquelle verlieren und entweder etwas anderes fressen müssen oder länger suchen müssen, bis sie genug Nahrung finden und dadurch dünner werden und weniger Fitness besitzen. (Afb. II)

Die Präsentation kann für diese Aufgabe genutzt werden, die Abbildung 12 sollte aber auch so interpretierbar sein. *Einzusetzende Folien: 56-65.*

- 2) Die Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Schwangerschaftsrate bei Bartenwalen von der Ausdehnung der Meereisbedeckung. Sie ergänzt die Erkenntnis aus Aufgabe 1) und Abbildung 12, dass weniger Meereis zu geringerer Lebensaktivität/Gewichtsabnahme und damit zu einer geringeren Fertilität bei Bartenwalen führt. (Afb. II/III)
- 3) Beschreibung des Graphikaufbaus und des Datenverlaufs. Anhand eines 7-jährigen Datensatzes (2013–2020) wird gezeigt, dass die Krillverfügbarkeit mit dem Zeitpunkt des Eisrückgangs korreliert: Geht das Eis früh zurück, ist die Krillpopulation klein, geht es spät zurück, ist sie groß. Die Erkenntnis stimmt mit den Rückschlüssen aus Abbildung 12 überein.

Die Analyse der Schwangerschaftsanomalien zeigen, dass die Schwangerschaftsrate der Wale bei einem späten Eisrückgang und großer Krillpopulation ein Jahr später hoch ist. Bei frühem Eisrückgang und kleiner Krillpopulation ist die Schwangerschaftsrate der Wale ein Jahr später klein. Die Korrelation zwischen Schwangerschaftsrate und Eisrückgangszeitpunkt bzw. der Größe der Krillpopulation ist also um ein Jahr versetzt. Fazit: Damit bestätigen die Daten die in Aufgabe 1 und 2 gewonnene Erkenntnis. Ein besonderer zeitlicher Aspekt ist, dass die Wale ein Jahr nach einem großen Nahrungsangebot offenbar über eine gesteigerte körperliche Fitness oder Kondition verfügen.

Hinweis: Bartenwale fressen saisonal – meist im Sommer in polaren Gewässern – und leben anschließend mehrere Monate von ihren Fettreserven. Wenn Krill in einem Jahr besonders reichlich vorhanden ist, können Wale deutlich mehr Energie in Form von Blubber speichern. Die positiven Effekte (mehr Energie, höhere Körperkondition) zeigen sich erst in der nächsten Fastenperiode. (Afb. II/III)

- 4) Das Meereis hat eine große Bedeutung für das antarktische, marine Ökosystem. Eine anhaltende Erwärmung wird zu frühen Meereisrückgängen führen, wodurch die Krillbestände weiter reduziert werden. In der Folge wird die Bartenwalpopulation (und andere Krillfresser, s. Arbeitsblatt „Ausschnitt des antarktischen Nahrungsnetzes“, Abbildung 2) wahrscheinlich weiter beeinträchtigt. Veränderungen der Trächtigkeitsraten bei Bartenwalen können Hinweise auf die Auswirkungen des Umweltwandels auf Walpopulationen liefern. (Afb. III)