

<b>Zuwendungsempfänger / Ausführende Stelle:</b> Alfred-Wegener-Institut Helmholtzzentrum für Polar- und Meeresforschung	<b>Förderkennzeichen:</b> 2819HS001
<b>Vorhaben Bezeichnung:</b> Krillbestandsforschung im Südpolarmeer II (KrillBIS-II)	
<b>Laufzeit des Projektes:</b> 01.04.2019 bis 31.01.2023	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.04.2019 bis 31.01.2023 (gesamte Projektlaufzeit)	

# Abschlussbericht KrillBIS-II

## 1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

Mit der Gewährung der Zuwendung ist folgender Zweck zu erfüllen:

Die bisherige Herangehensweise für das *feedback management* mit dem Fokus ‚Krillbiologie‘, ‚saisonale Verteilungsmuster seiner Entwicklungsstadien‘ und ‚Adaptationsfähigkeit‘ soll um die Wechselwirkungen des Krills (v.a. *Euphausia superba*) zu klimatisch bedingten Umweltveränderungen ergänzt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen sollten in Kooperation mit anderen CCAMLR Mitgliedsländern wie z.B. Großbritannien, den USA und v.a. Norwegen

- i) sowohl die Grenzen des bisherigen Ansatzes zum *feedback management* aufgezeigt werden, als auch wie es durch die zusätzlich berücksichtigten Daten ergänzt und optimiert werden kann,
- ii) anhand von mehreren Expeditionen im Krill-Fanggebiet das Potential von Krill-Fischereischiffen zur regelmäßigen Erhebung von Daten zur Optimierung des *feedback managements* aufgezeigt werden und
- iii) Vorhersagen zur Krill-Populationsentwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Klima-Szenarien erstellt und auf Grundlage der erhobenen Daten und bisherigen Modellergebnisse ein Vorschlag zum Krill-Fischereimanagement ausgearbeitet werden.

Weiterhin soll in Abstimmung mit BMEL Referat-614 an Sitzungen diverser CCAMLR-Gremien mit anschließender Berichterstattung teilgenommen werden (z. B. EMM, SC-CAMLR).

### 1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Umsetzung der **Zielvorgabe (i)** wurden saisonale Datensätze von verschiedenen Krill-Entwicklungsstadien aus der Literatur und internationalen Datenbanken sowie publizierte prognostische Modellstudien zum Krillbestand zusammengetragen, mit Umweltparametern in Beziehung gesetzt und ausgewertet. Zusätzlich wurden Datensätze zur saisonalen Krill Abundanz aus der kommerziellen Krill-Fischerei und von wissenschaftlichen Expeditionen analysiert. Diese Daten dienen dazu aufzuzeigen, wo Wissens- und dementsprechend Datenlücken zur Optimierung des *feedback managements* mit dem Fokus ‚Krillbiologie‘ vorhanden sind, und wie sich der Krillbestand anhand von Langzeitdaten zur Abundanz und Verteilung seit den ersten Datenerhebungen in 1920er Jahren entwickelt hat.

Aufbauend auf den generierten Ergebnissen in der Zielvorgabe (i) sowie den Diskussionen in den CCAMLR Gremien zur möglichen Verbesserung des *feedback managements* erfolgte die Planung der **Zielvorgabe (ii)**, der saisonalen Krill Untersuchungen auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance*, die in den folgenden Zeiträumen durchgeführt wurden: Antarktischer Spätsommer/Herbst 2020 (20.02.-02.05.; Testphase), Herbst und Winter 2021 (04.04.-04.07.) und Sommer 2021/2022 (17.12.-08.04.).

Aufbauend auf die Ergebnisse, die sich aus der Zielvorgabe (i) ergeben haben, wurde die **Zielvorgabe (iii)**, ein Modell, entwickelt, welches in der Lage ist, die Populationsentwicklung des Krills anhand spezifischer Umweltparameter zu prognostizieren.

Weiterhin erfolgte im Projektzeitraum die Teilnahme an den für die Krillbestandsforschung relevanten **CCAMLR Sitzungen**. Dazu zählen die Arbeitsgruppensitzungen zur Überwachung und Management des Ökosystems (WG-EMM) sowie die Jahrestagungen der wissenschaftlichen Kommission der CCAMLR in Hobart (SC-CAMLR). Es hat sich gezeigt, dass die Teilnahme an den Sitzungen der Arbeitsgruppe zur Bewertung der Fischbestände (WG-FSA) in Bezug zum Reformierungsprozess des *feedback managements* immer bedeutender wird, sodass in 2021 und 2022 an der Sitzung teilgenommen wurde. Bedingt durch die Corona Pandemie fanden 2020 und 2021 alle Sitzungen im Rahmen von CCAMLR online statt. In 2022 wurde WG-EMM weiter online durchgeführt, während WG-FSA sowie SC-CAMLR wieder in Präsenz in Hobart stattfand. Die Berichte zu diesen Sitzungen wurden dem BMEL-Referat 614 übermittelt. Die jährlich anfallenden Zwischenberichte wurden im Projektzeitraum fristgerecht bei Herrn Dr. Hamm (BLE-Referat 323) eingereicht.

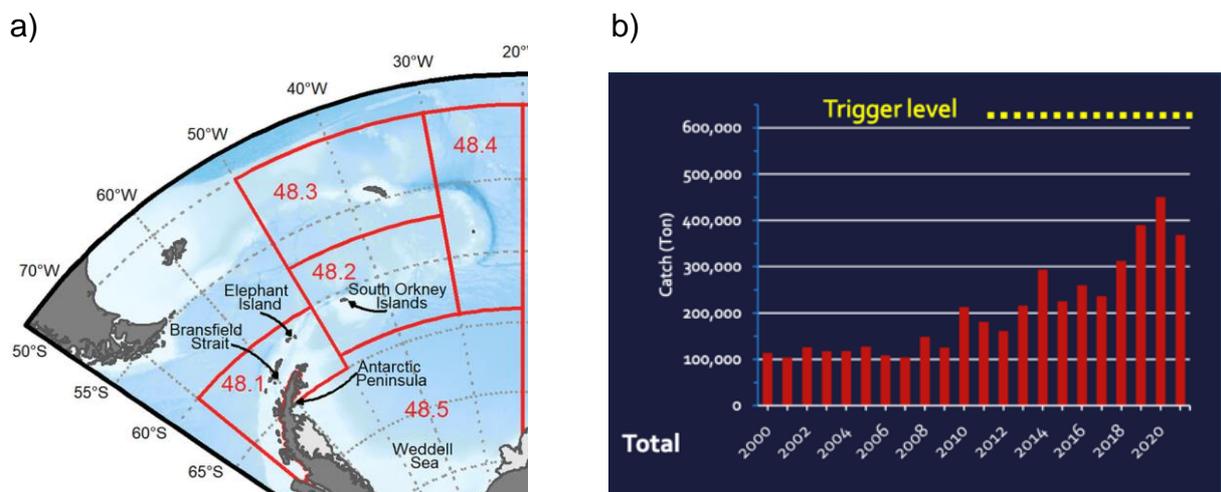
## **1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde**

Die zunehmenden kommerziellen Fänge von antarktischem Krill, *Euphausia superba* (im folgenden Krill genannt), und die komplexen, weitgehend unbekanntem Auswirkungen des sich verstärkenden Klimawandels im Südpolarmeer auf den Krillbestand und die vom Krill abhängigen Nahrungsketten haben bei CCAMLR-Mitgliedsstaaten Besorgnis erregt. Die traditionellen Methoden zur Krillbestandsaufnahme reichen unter diesen Bedingungen nicht mehr aus, eine sichere und nachhaltige Bewirtschaftung zu garantieren. CCAMLR ist deshalb bemüht, ein adaptives Krill-Fischereimanagement (*feedback management*) zu entwickeln, in dem sowohl lokale und regionale Abschätzungen der Krill Verteilung und Abundanz in Relation zur Abundanz und Verteilung der Krill Prädatoren, als auch variable Umweltparameter und Ökosystemfaktoren in Zeit und Raum berücksichtigt werden. Es besteht jedoch Uneinigkeit zwischen den Mitgliedsstaaten bezüglich der Umsetzung dieses Ansatzes. In der aktuellen Methode zur Krillbestandsaufnahme wird nur die Abundanz und Verteilung der Krill-Prädatoren in Abhängigkeit der Krill Abundanz und Verteilung als Maß für die Fangquoten herangezogen.

Das vorangegangene Projekt zur Krillbestandsforschung (KrillBIS-I, 2815HS022) hat jedoch gezeigt, dass der Fokus auf die Nahrungsbedürfnisse der Krill Prädatoren zur Bestimmung der Fangquoten im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels nicht ausreicht. Der Zielorganismus der Fischerei, Krill, seine Biologie, das saisonale Verteilungsmuster seiner Entwicklungsstadien sowie seine Adaptationsfähigkeit gegenüber den klimatisch bedingten Umweltveränderungen müssen in dem Bestandsschutzgedanken eine ausreichende Berücksichtigung finden. Krill, die Hauptnahrungsquelle im Südpolarmeer für Seevögel, Fische, Pinguine, Robben und Wale, ist das strukturierende Element für die funktionelle Biodiversität des marinen Ökosystems in der Antarktis. Dieses Ergebnis wurde im Rahmen der CCAMLR Sitzungen vorgestellt und fand eine breite Unterstützung, die in der Einrichtung einer „Krill Action Group“ unter dem Dach von SCAR (Scientific Committee of Antarctic Research) und unter deutscher Leitung (Prof. Dr. Bettina Meyer) mündete. Im August 2022 wurde diese Gruppe

als Krill EXPERT Group (SKEG) in SCAR etabliert und unterstützt CCAMLR im Reformationsprozess des Krill-Fischereimanagements.

Durch den seit 2010 stetig steigenden Fischereidruck auf den Krill in CCAMLR Gebiet 48 (Abbildung 1a und b) und den Einfluss des Klimawandels auf den Krillbestand, ist der Krill selbst und seine Populationsschwankungen weiter in den Fokus von CCAMLR gerückt und wird nicht mehr nur aus Sicht von Krill Prädatoren und ihren Bedürfnissen betrachtet. In 2010 wurde erstmalig die maximale Fangquote von 150.000 Tonnen im CCAMLR Gebiet 48.1 erreicht (Abbildung 2a), wozu die *Bransfield Strait*, die Regionen um die Antarktische Halbinsel, die *South Shetland Islands* und *Elephant Island* gehören. Seit 2013 wird die maximale Quote immer früher im Jahr erreicht, was zur Folge hat, dass der Krill-Fischereidruck auf das Gebiet 48.2 um die *South Orkney Islands* immer mehr zunimmt (Abbildung 2b) und dort schon 70% der maximalen Fangquote von 270.000 Tonnen erreicht wurden. Ausschließlich das Gebiet 48.3 (*South Georgia*) hat noch einen größeren Freiraum in der Fangquote von 279.000 Tonnen (Abbildung 2c), jedoch wird dieses Gebiet für die Krill-Fischerei durch die aufgrund des Klimawandels zunehmende Kontraktion der Krill-Population in Richtung Antarktische Halbinsel (Atkinson et al. 2019) und durch die Kosten der Fang-Lizenzen zunehmend unattraktiver.

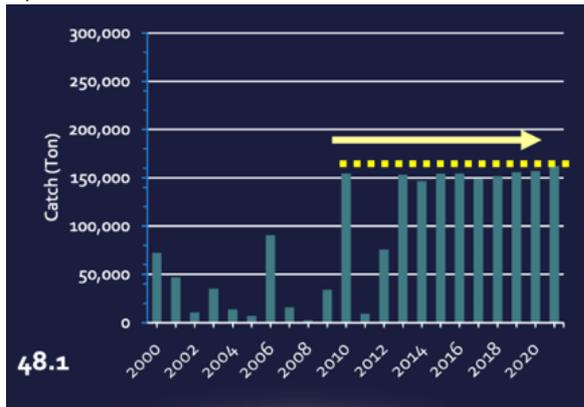


**Abbildung 1:** Karte des Krill-Fischereigebiets 48 der CCAMLR und seine Untergebiete. (a) Darstellung des stetigen Anstiegs des Fischereidrucks auf Krill seit 2013. Der Trigger level umfasst die maximal erlaubte Fangmenge von 620.000 Tonnen im Gesamtgebiet 48 der CCAMLR (b).

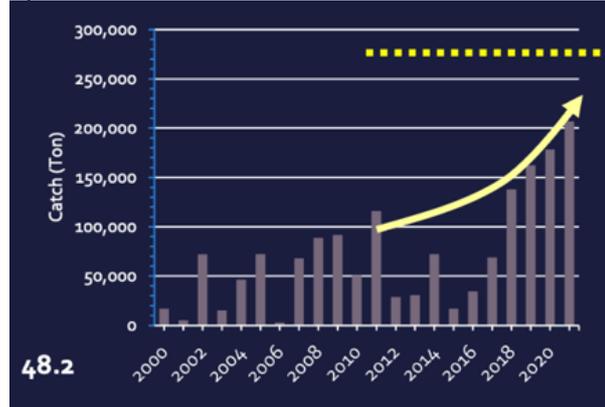
Hinzu kommt, dass 80% des jährlichen Krill Fangs in den CCAAMLR Gebieten 48.1 und 48.2 mit Krill-Fischereischiffen erfolgen, die über ein Vakuumpumpsystem den Krill an Bord befördern und nicht mit traditionellen Schleppnetzen, die übers Schiffsheck geschleppt werden. Diese Schiffe befischen die Krillschwärme sehr effektiv, auf kleinen räumlichen Skalen mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 Knoten und operieren aufgrund der stetig abnehmenden Meereisbedeckung im Winter über das gesamte Jahr.

An diesen Wissensstand anknüpfend und aus dem sich daraus ergebenden Reformationsprozess hin zu einem neuen Bewirtschaftungskonzept des Antarktischen Krill, der den neuen Herausforderungen gerecht wird, haben sich die Zielvorgaben in KrillBIS-II ergeben.

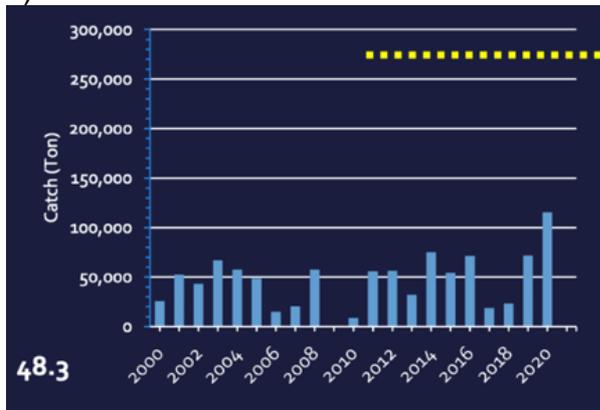
a)



b)



c)

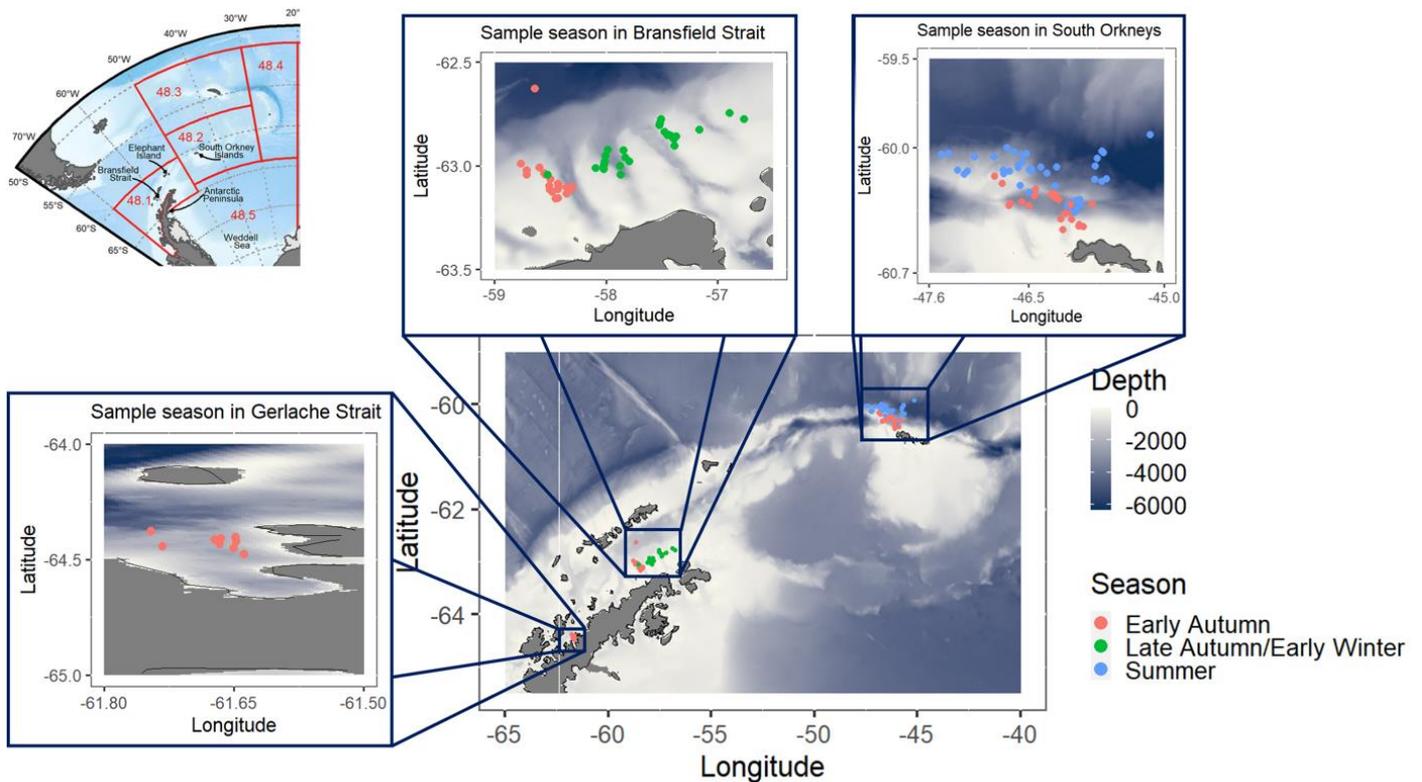


**Abbildung 2:** Darstellung der Entwicklung des Krill-Fischereidruck auf die CCAMLR Gebiete 48.1 (a) und 48.2 (b) sowie 48.3 (c). Die gepunkteten Linien stellen die maximalen Fangquoten von 155.000 t in CCAMLR Gebiet 48.1 bzw. 270.000 t in CCAMLR Gebiet 48.2 bzw. 278.000 t in CCAMLR 48.3 dar.

## 2. Material und Methoden

Zur Umsetzung der **Zielvorgabe (i)** wurden die verwendeten Daten aus publizierter Literatur sowie internationalen Datenbanken extrahiert, in Zusammenarbeit mit internationalen CCAMLR Kollegen analysiert und bildlich illustriert.

Im Rahmen der **Zielvorgabe (ii)** wurden auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* in verschiedenen Jahreszeiten die Populationsstrukturen des Krills in drei unterschiedlichen Regionen untersucht (Abbildung 3): *South Orkney Islands*, *Bransfield Strait* und *Gerlache Strait*. Dafür wurden zu verschiedenen Tageszeiten Proben von Krill aus dem Fangsystem des Schiffs entnommen (Abbildung 4) und an 100 – 200 Krill-Individuen das Geschlecht und die Länge bestimmt. In Abhängigkeit vom Geschlecht lassen sich durch die Häufigkeitsverteilung der Länge CCAMLR relevante Aussagen über die Altersstruktur innerhalb der untersuchten Krill Populationen treffen. In Verbindung mit Strömungsmodellen können weiterhin die Ursprungsregionen des juvenilen Krills ermittelt werden.



**Abbildung 3:** Krill Probennahme auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* im antarktischen Frühherbst 2020 (20.02.-02.05.), Spätherst und Frühwinter 2021 (04.04.-04.07.) und Sommer 2021/2022 (17.12.-08.04.).

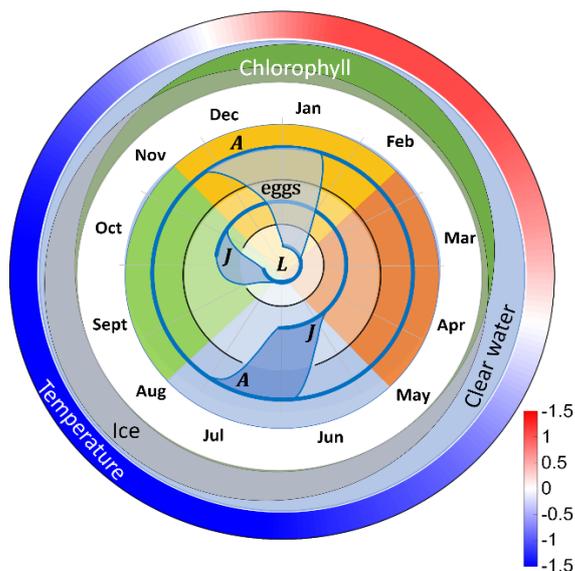
Parallel zu den demographischen Untersuchungen der Krillpopulationen wurde im direkten Umfeld des Schiffes mithilfe akustischer Messverfahren (Simrad ES80) das Verhalten der Krillschwärme analysiert. Über mehrere Tage wurden akustische Daten bei einer Frequenz von 200 kHz aufgezeichnet, die das Rückstreusignal speziell von Antarktischem Krill widerspiegelt. Die Daten wurden später mithilfe von geeigneter Software (Echoview 11) ausgewertet. Mit diesen Daten lässt sich die vertikale Bewegung von den detektierten Krillschwärmen nachvollziehen, welche u.a. zur Untersuchung der Populationsstrukturen beprobt wurden.



**Abbildung 4:** Ort, an dem Krill an Bord der *Antarctic Endurance* gepumpt und beprobt wird.

In der Umsetzung der **Zielvorgabe iii** wurde ein neues Stadien-spezifisches Krill-Populationsmodell entwickelt, um die Mechanismen, die maßgeblich zu den großen zwischenjährlichen Schwankungen der befischten Krillpopulationen beitragen, zu identifizieren. In dem Modellansatz wurde insbesondere ein Fokus auf die Interaktion von intraspezifischer Konkurrenz um Ressourcen sowie auf die Variabilität verschiedener Umweltvariablen gelegt (Chlorophyll a, Meereisbedeckung, Meerwassertemperatur), die im bestehenden Klimawandel großen Schwankungen unterliegen.

Im Stadien-spezifischen Modell wurde die Population des Krills in drei funktionale Stadien gemäß Piñones et al. (2013) aufgeteilt: Larven (L), Jungtiere (J) sowie erwachsener, geschlechtsreifer Krill, der mindestens zwei Jahre alt ist (A, Abbildung 5). In den Modellen entstehen Larven in jedem Sommer durch das Laichen von erwachsenem Krill und sind die am häufigsten vorkommende, aber auch am stärksten vom Hunger bedrohte Gruppe, da sie über keine Energiereserven verfügen. Nach frühestens 9 Monaten können die Larven in einem festgelegten Zeitfenster zu Jungtieren werden. Diese ähneln äußerlich erwachsenem Krill, sind jedoch noch nicht geschlechtsreif. Erst nach einer Lebenszeit von 2 Jahren kann die Geschlechtsreife erreicht werden und Jungtiere werden in die Klasse erwachsener, geschlechtsreifer Individuen transferiert. Zuwächse in der Krillabundanz eines funktionalen Stadiums ergeben sich daher durch Laichen (L) sowie Rekrutierung aus dem vorherigen Entwicklungsstadium (J, A). Abnahmen der Krillabundanz eines funktionalen Stadiums entstehen durch Sterblichkeit (L, J, A) oder den Übergang in ein höheres Entwicklungsstadium (L, J).



**Abbildung 5:** Der Reproduktionszyklus des Krills. Schematische Darstellung des Labyrinthmodells der Lebensgeschichte des Krills. Die inneren Kreise zeigen die verschiedenen Funktionsstadien: Larven (L), Jungtiere (J) und Erwachsene (A). Der Lebenszyklus (blaue Linie) beginnt in der Mitte des Labyrinths, dreht sich mit der Jahreszeit im Uhrzeigersinn und dreht sich spiralförmig nach außen, wenn der Übergang offen ist (schwarze Linien stellen die Wände des Labyrinths dar). Die verschiedenen Jahreszeiten sind mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet (z. B. Sommer gelb). Die äußeren Kreise zeigen die Mittelwerte der Chlorophyllkonzentration (grün), der Temperatur (rot-blaue Farbkarte) und der Eisbedeckung (grau).

Die Grundlage der Berichte an das BMEL-Referat 614 waren die diskutierten Inhalte zum Thema Krill auf den teilgenommenen Sitzungen der WG-EMM, SC-CAMLR und WG-FSA.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

##### Zielvorgabe (i)

Die Zusammentragung des Datenmaterials aus der publizierten Literatur sowie internationalen Datenbanken hat Wissenslücken bezüglich der ‚Krillbiologie‘ identifiziert, welche für ein effektives Krill-Fischereimanagement essentiell sind und in dem *feedback management* Ansatz von CCAMLR bisher nicht berücksichtigt werden.

Zu den identifizierten Wissenslücken zählen:

- Identifizierung von *Spawning Hotspots* und der Krill-Larven-Advektion
- Mechanismen der saisonalen Krill Biomasse Verschiebung
- Identifizierung der regionalen Verteilung des Laichbestands von Krill
- Identifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Krillbestand
- Identifizierung von Mechanismen, welche für einen hohen Rekrutierungserfolg verantwortlich sind, inklusive der Parameter, die gemessen werden müssten, um dies in Zukunft erfassen zu können

Langzeitdatenerhebungen zur Verteilung und Abundanz des Krill im atlantischen Sektor des Südpolarmeers, auf den sich die Krill-Fischerei seit 2020 ausschließlich konzentriert, zeigen eine Abnahme des Bestands von ~1920 bis in die 1980er Jahre von über 50%, somit weit vor dem Anstieg der Krill-Fischerei in dem Gebiet. Die Krillabundanzdaten legen in Verbindung mit Umweltparametern, wie z. B. der Meerwassertemperatur und der Meereisbedeckung im Winter, den Schluss nahe, dass diese Abnahme mit dem Klimawandel in Verbindung steht. Seit den 1990er Jahren bis heute scheint die von großen zwischenjährlichen Schwankungen geprägte Krill Population im atlantischen Sektor stabil zu sein. Diese Aussage ist jedoch von hoher Unsicherheit geprägt, da die momentane Datenlage eventuell noch zu gering ist, um aufgrund der hohen zwischenjährlichen Schwankungen einen weiter abnehmenden Trend aus dem Schwankungsrauschen zu identifizieren. Neben der Abnahme des Krillbestands zeigen die Langzeitdaten zur Krill Abundanz und Verteilung von 1996-2016 eine südwärts gerichtete Kontraktion der Krill Population von *South Georgia* an die Antarktische Halbinsel.

Diese Ergebnisse, die sich aus der Literatur- und Datenbankrecherche ergeben haben, wurden in einem Manuskript zusammengefasst („*Successful ecosystem-based management of Antarctic krill should address uncertainties in krill recruitment, behaviour and ecological adaptation*“), welches in Zusammenarbeit mit internationalen CCAMLR Kollegen in der internationalen Zeitschrift *Communication Earth & Environment – Nature* im Oktober 2020 veröffentlicht wurde (Meyer et al 2020, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00026-1>). Es wurde dargelegt, wie der momentane Ansatz zur Umsetzung des *feedback managements* durch die fehlenden relevanten Daten zur ‚Krillbiologie‘ ergänzt und optimiert werden kann. In der Publikation wurden Maßnahmen und Techniken zur Datenerhebung vorgeschlagen um a) die vorhandenen Wissenslücken zu schließen und b) um diese Daten zur Optimierung des *feedback managements* regelmäßig erfassen zu können. Als wichtiger Partner, um diese Datenerhebung zu realisieren, wurde die Krill-Fischerei identifiziert, die in allen Jahreszeiten im CCAMLR Bereich 48 tätig ist und als Plattform für die reguläre Erhebung dieser Daten zur Optimierung des *feedback managements* in Zukunft dienen könnte.

Die Publikation wurde nach Rücksprache mit dem BMEL Referat 614 in der WG-EMM eingereicht und vorgestellt. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass auf dem SC-CAMLR Symposium im Februar 2022 die zukünftige strategische Ausrichtung des SC-CAMLR von 2023-2027 diskutiert wurde. Unter anderem wurden die in der Publikation identifizierten Punkte zur Optimierung des *feedback managements* zur weiteren Bearbeitung im SC-CAMLR identifiziert.

## **Zielvorgabe (ii)**

Mit den saisonalen Studien auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* konnte erstmals gezeigt werden, was für ein Potential in einer engen Kooperation zwischen Wissenschaft und Krill-Fischerei steckt, um die in Zielvorgabe (i) identifizierten offenen Fragen zur Verbesserung des Krill-Fischereimanagements zu beantworten:

### Saisonale Längen- und Geschlechterverteilung von Krill

Die Krill-Fischereisaison beginnt im antarktischen Frühjahr nördlich der *South Orkney Islands* in CCAMLR 48.2. Die Fischerei bewegt sich erst später in der Saison in das CCAMLR Gebiet 48.1 im Bereich der Antarktischen Halbinsel (*Bransfield Strait, Gerlache Strait*), aufgrund der dann reduzierten Meereisbedeckung und der zu der Jahreszeit hohen Lipid-Konzentrationen in dem dort lebenden Krill. Die Daten der Längenverteilung zeigen, dass juveniler Krill (um ca. 30 mm), entgegen vorheriger Annahmen, in allen untersuchten Regionen im Herbst und Winter mit >7% in relevanten Anteilen im Fang enthalten ist (Abbildung 6 und 7). Dies verdeutlicht, dass die Fangmethode (z.B. Maschengröße des Netzes) nicht grundsätzlich kleineren Krill ausschließt und somit auch den Krill-Nachwuchs erfasst. Um die jahreszeitlichen und regionalspezifischen Unterschiede in der Geschlechtszusammensetzung des Krills, der von der Fischerei gefangen wird, deutlicher zu machen, haben wir die Daten aus Abbildung 6 in drei Jahreszeiten zusammengefasst (Abbildung 7). Die Daten zeigen, dass juveniler Krill im Frühherbst in der *Bransfield Strait* und *Gerlache Strait* einen Anteil von 23% und 14% am Gesamtfang ausmachen kann. Dies deutet darauf hin, dass die Fischereigebiete entlang der westlichen Antarktischen Halbinsel (48.1) mit möglichen Hotspots für das Krill-Recruitment überlappen, was von hoher populationsbiologischer Relevanz ist. Die Daten zeigen außerdem, dass im antarktischen Spätherbst und Winter Krill Weibchen und somit der zukünftige „Spawning-Bestand“ bis zu 55% des Fangs ausmachen. Auch in den Sommermonaten nördlich der *South Orkney Islands* werden zu über 50% laichreife Weibchen gefangen (Abbildung 7).

Eine Zusammenfassung aller Längen- und Geschlechtsbestimmungen über alle Regionen hinweg, die in den jeweiligen Jahreszeiten auf der *Antarctic Endurance* durchgeführt wurden, verdeutlicht den Trend, dass im antarktischen Sommer sowie im Spätherbst/Winter über 50 % des gefangenen Krill geschlechtsreife Weibchen sind (Abbildung 8). Da geschlechtsreife Weibchen einen überproportional großen Anteil am Reproduktionserfolg einer Population haben, sollte ihre Fangmenge möglichst geringgehalten werden. Weitere Datenerhebungen dieser Art und deren Einbettung in Rekrutierungsmodelle helfen, zukünftige Populationsentwicklungen zu identifizieren, wenn sich der Fischereidruck auf juvenilen Krill und laichreife Weibchen in diesem Maße bestätigt oder sich in Zukunft erhöhen würde.

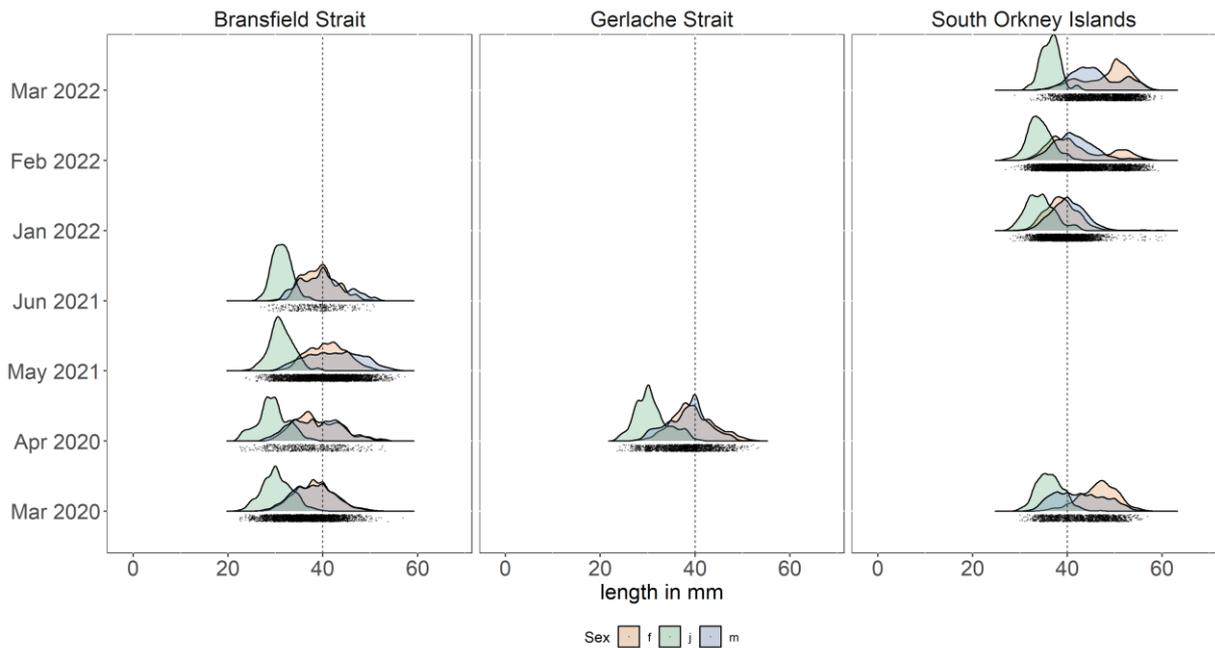
Diese ersten Auswertungsergebnisse der saisonalen Erhebung der Längen und Geschlechtsbestimmungen zeigen, dass mit der Nutzung von Krill-Fischereifahrzeugen als Forschungsplattform, speziell diejenigen Schiffe, die als Fangmethode das Krill-Pumpsystem etabliert haben, Datenlücken zu folgenden Themen geschlossen werden können:

- Anteil geschlechtsreifer Weibchen, die von der Fischerei erfasst werden
- Abundanz der Krill-Rekruten
- Identifizierung von Krill-Rekrutierungs- und Laich-Hotspots

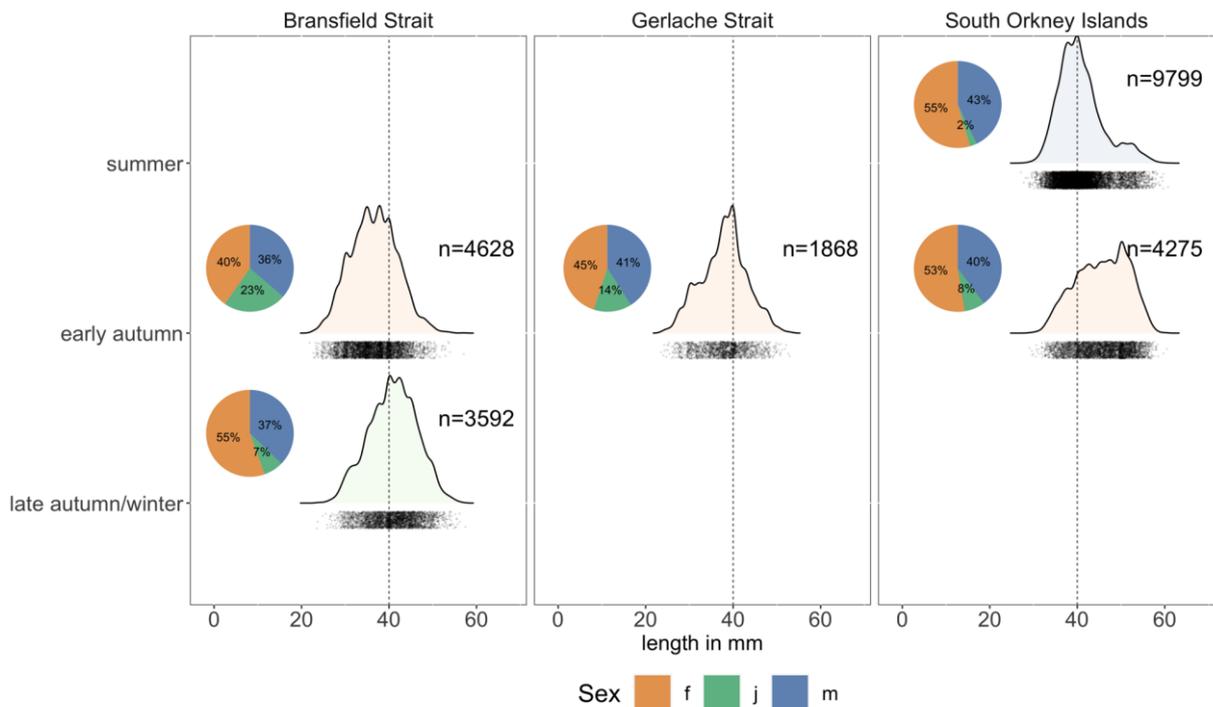
Eine Rückverfolgung der im Sommer gefangenen juvenilen Tiere ermöglicht es, anhand von ozeanographischen Advektionsmodellen potenzielle Herkunftsgebiete der Krill Rekruten zu ermitteln. Erste Vergleiche mit in der Literatur vorhandenen Advektionsmodellen (Abbildung 9) legen die Vermutung nahe, dass das Laichgebiet der Rekruten, die nördlich der *South Orkney Islands* gefangen wurden, das nordwestliche Weddellmeer ist (Meyer et al. 2017). Diese Region ist ein Teilbereich des Weddell Sea Marine Protected Area (WSMPA). Würde sich die Hypothese anhand einer detaillierten Modellierungsanalyse und weiterer zukünftiger Datenerhebungen bestätigen, würde der Region eine neue Tragweite als Schutzgebiet zukommen.

#### Saisonale vertikale Verteilungsmuster vom Krill

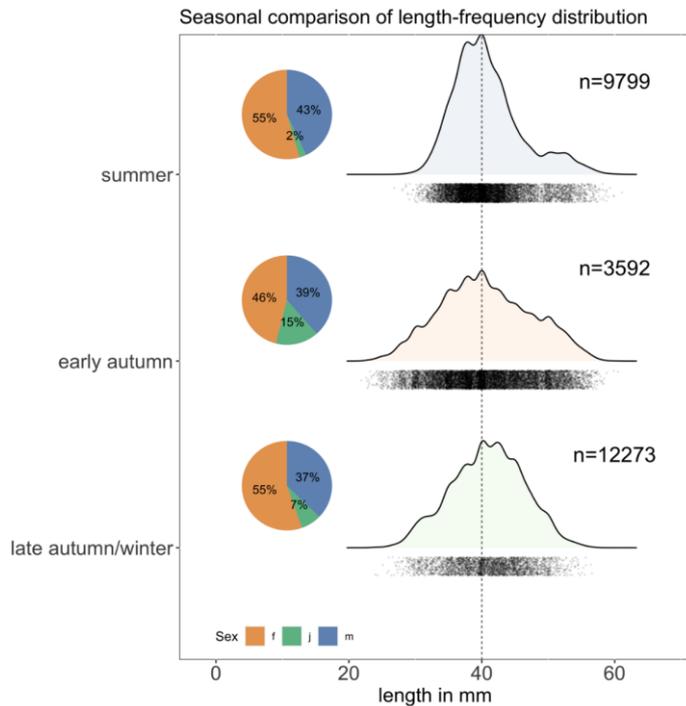
In den letzten 10 Jahren hat sich aus einzelnen Beobachtungen die Hypothese entwickelt, dass sich Krill zum antarktischen Spätherbst und Winter in tiefere Bereiche der Wassersäule bewegt, wo er, zumindest von der Fischerei, die über Pumpfangsysteme verfügt, weniger effektiv erfasst werden kann (die maximale Fangtiefe beträgt hier ca. 200m). Durch die Erfassung der saisonalen Fangtiefen auf der *Antarctic Endurance* konnten wir untersuchen, ob sich diese Hypothese bestätigen lässt. Da normalerweise die jeweilige Fangtiefe der höchsten Dichte in der Krill-Biomasse entspricht, ist diese Tiefe ein Indikator für die vertikale Verteilung der Krill-Biomasse. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich die durchschnittliche Fangtiefe tatsächlich im Spätherbst und Winter in größere Tiefen verschiebt, was die Hypothese zur saisonalen vertikalen Krill-Verteilung erstmalig bestätigt (Abbildung 10). Weitere Analysen der akustischen Daten, die während unserer saisonalen Untersuchung auf der *Antarctic Endurance* gesammelt wurden, werden einen noch detaillierteren Einblick in das saisonale Schwarmverhalten des Krills in Bezug auf seine vertikale Verteilung in der Wassersäule und in Interaktionen mit Raubtieren geben. Die vollständige Auswertung der Daten bis zum Sommer 2024 ermöglicht detaillierte Aussagen zum sogenannten saisonalen Krill-Flux und der Identifizierung von Gebieten, die eine wichtige Rolle in der Interkonnektivität von Krill-Populationen spielen, z. B. zwischen den beiden geplanten Schutzregionen dem WSMPA und Domain 1.



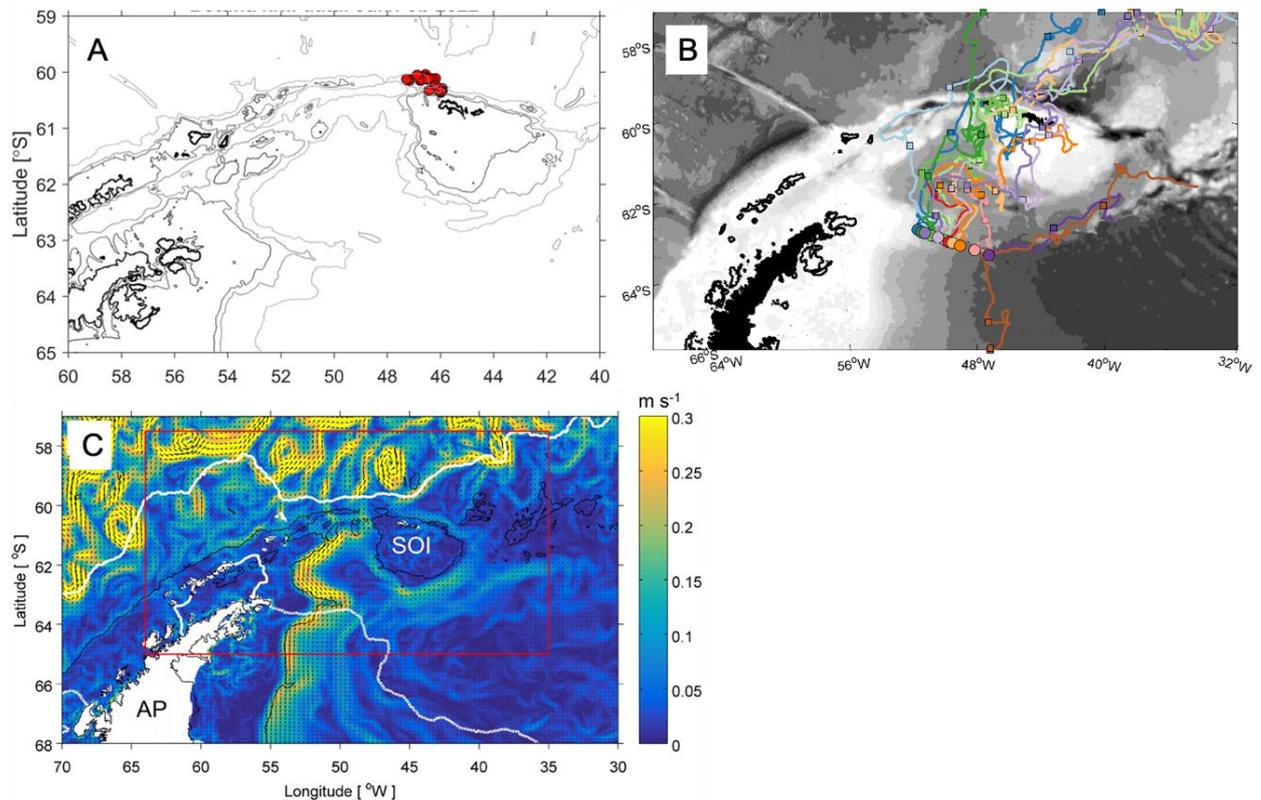
**Abbildung 6:** Krill-Längenhäufigkeitsverteilung für die verschiedenen Geschlechter in chronologischer Reihenfolge der Probenahme in verschiedenen Jahren, Monaten und Regionen, wobei „f“ den weiblichen „j“ den juvenilen und „m“ den männlichen Krill repräsentiert. Die Probenahme auf dem Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* erfolgte in folgenden Zeiträumen: 20.02.-02.05.2021, 04.04.-04.07.2021, 17.12.2021-08.04.2022.



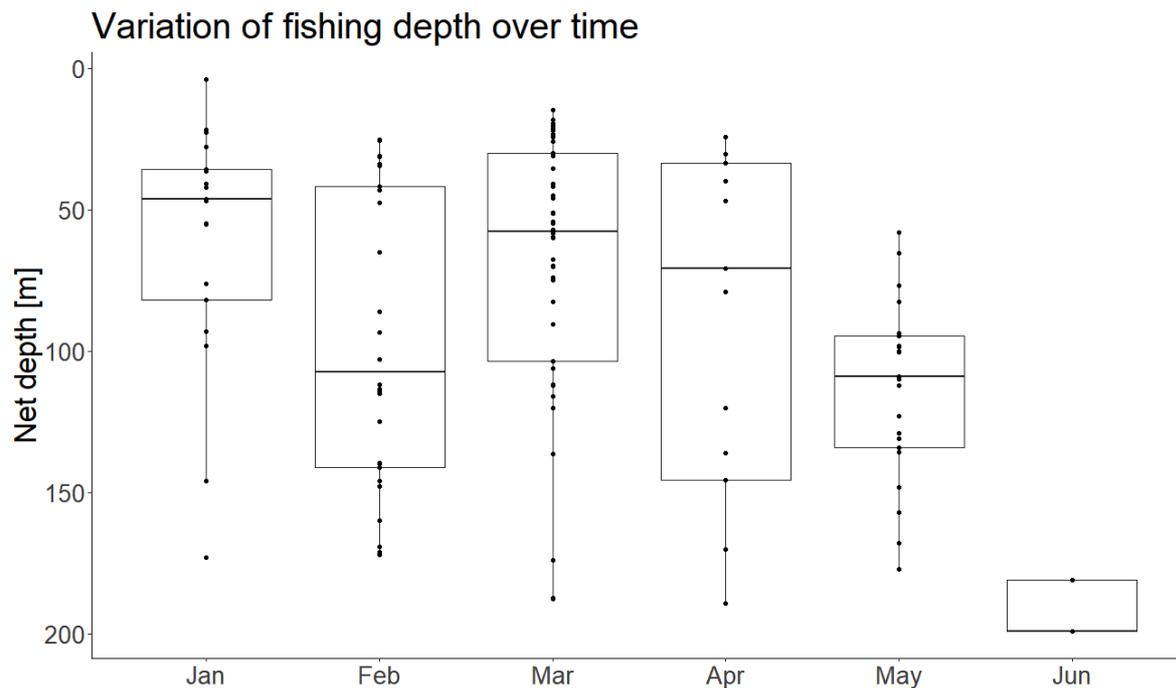
**Abbildung 7:** Saisonaler Vergleich der Längen- und Geschlechtsverteilung von Krill, der in den CCAMLR-Gebieten 48.1 (*Bransfield Strait, Gerlache Strait*) und 48.2 (*South Orkney Islands*) in den jeweiligen Jahreszeiten gefangen wurde. „f“ repräsentiert den weiblichen „j“ den juvenilen und „m“ den männlichen Krill. Die Jahreszeiten sind wie folgt definiert: Sommer (Januar und Februar), Frühherbst (März und April), Spätherbst/Winter (Mai und Juni). Die Probenahme auf dem Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* erfolgte in folgenden Zeiträumen: 20.02.-02.05.2021, 04.04.-04.07.2021, 17.12.2021-08.04.2022.



**Abbildung 8:** Zusammenfassung aller Längen- und Geschlechtsbestimmungen, die in den jeweiligen Jahreszeiten auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* vorgenommen wurden. „f“ repräsentiert den weiblichen „j“ den juvenilen und „m“ den männlichen Krill. Die Jahreszeiten sind wie folgt definiert: Sommer (Januar und Februar), Frühherbst (März und April), Spätherbst/Winter (Mai und Juni). Für die Zeiträume der Probenahmen siehe Abbildungsbeschreibung von Abb. 3. Die Probenahme erfolgte in folgenden Zeiträumen: 20.02.-02.05.2021, 04.04.-04.07.2021, 17.12.2021-08.04.2022.



**Abbildung 9:** Driftmodelle aus der Literatur (B, C), die nahelegen, dass das nordöstliche Weddellmeer ein wichtiges Krill-Laichgebiet für die von uns gefangenen Rekruten (juveniler Krill) nördlich der *South Orkney Islands* darstellen könnte (A). Die roten Punkte in (A) stellen die Fangorte des juvenilen Krill dar.



**Abbildung 10:** Saisonale Veränderung der Fangtiefe von Krill auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance*, welches über ein Vakuumpumpsystem verfügt, um Krill zu fangen.

### Zielvorgabe (iii)

Zur Entwicklung des Krill Populationsmodells wurden als treibende Kräfte für die Populationsdynamik des Krill folgende Parameter identifiziert: Meerwassertemperatur, Eisbedeckung, Chlorophyll Konzentration als Indikator für Futterverfügbarkeit (Phytoplankton), Klima-Indizes (El Niño Southern Oscillation = ENSO; Southern Annular Mode = SAM) und intraspezifische Konkurrenz der Krill-Entwicklungsstadien auf die Krill-Dynamik.

Der Vorteil des entwickelten Krill-Populationsmodells ist die geringe Zahl an Parametern sowie die Möglichkeit, die Krillpopulationen kontinuierlich über das ganze Jahr hinweg modellieren zu können und somit alle Umweltfaktoren, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf die Krill-Populationen auswirken, einbeziehen zu können. Dies ist ein Vorteil gegenüber den bisherigen Modellen, die in der Regel die Krill-Biomasse zu bestimmten Zeitpunkten, z. B. nur im Hochsommer betrachten (Wiedenmann et al. 2009; Kinzey et al. 2019), was die Modellierung von Prozessen erschwert, die sich im Laufe des Jahres ständig ändern, wie z. B. Fischereieinflüsse, Prädatoren, Eisbedeckung, Meeresströmungen. Das Modell zeigt, dass die Krill Rekrutierung weitgehend von der Nahrungsverfügbarkeit (Chlorophyll-Konzentrationen), Meerwassertemperatur und Eisbedeckung beeinflusst wird. Darüber hinaus sind Schwankungen in der Krill-Biomasse das Ergebnis des Wettbewerbs zwischen erwachsenem und larvalem Krill um gemeinsame Futter Ressourcen (z. B. Phytoplankton, Ryabov et al. 2017).

Das Modell zeigt weiterhin eine Nischentrennung zwischen Larven und Jungtieren, die sich darin äußert, dass Umweltfaktoren, die die Larvenhäufigkeit erhöhen, das Überleben der Jungtiere negativ beeinflussen können und umgekehrt. So hat das Modell

gezeigt, dass höhere Meerwassertemperaturen und eine geringere Eisbedeckung während des Laichens (Frühjahr) und der ersten Larvenentwicklung (Frühherbst) die Larvenverluste verringern. Im Gegensatz dazu wirken sich erhöhte Meerwassertemperaturen und eine geringere Eisbedeckung negativ auf das Überleben des juvenilen Krills aus. Am ausgeprägtesten ist dies im Frühjahr, wenn sich die ersten juvenilen Tiere entwickeln (Y0-Stadium) und im Winter, wenn 1-Jahr alter juveniler Krill (Y1-Stadium) sich vor dem Übergang zum Erwachsenenstadium in sein 2. Lebensjahr befindet. Die Gründe für die erhöhte Abundanz des larvalen Krills in Abhängigkeit von den beschriebenen Umweltfaktoren und die entgegengesetzte Auswirkung auf das Überleben der juvenilen Tiere stimmen sehr gut mit den saisonalen ökologischen und ernährungsphysiologischen Bedürfnissen von Krill-Kohorten für eine erfolgreiche Rekrutierung überein (Meyer et al. 2009; Michael et al. 2021; Bernard et al. 2022, Steinke et al. 2022).

Anhand der Modellergebnisse konnte in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Experimenten zu den physiologischen Anforderungen von Krill Kohorten für eine erfolgreiche Rekrutierung erstmals ein mechanistischer Zusammenhang zwischen Umweltfaktoren und Rekrutierungserfolg gezeigt werden. Das bedeutet, dass das Modell zukünftig dazu beitragen kann, die Grundlage für die Modellierung der Krillpopulationen in verschiedenen Regionen im Südpolarmeer in Relation zu sich verändernden Umweltfaktoren zu schaffen. Das Manuskript, welches die Details zur Modellentwicklung aufzeigt, befindet sich zurzeit bei der internationalen Zeitschrift *Science Advances* in Begutachtung (Ryabov et al. 2023).

### **3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die im Projekt generierten Ergebnisse stellen einen aktiven Beitrag zur Unterstützung des Reformationsprozesses des Krill-Fischereimanagements (*feedback management*) im Gebiet 48 dar, ein zentrales Thema in CCAMLR seit der Verabschiedung dieses Vorhabens auf der Kommissionssitzung in 2019.

Die in 2019 verabschiedete neu zu bearbeitende Bewirtschaftungsstrategie des Krillbestands im CCAMLR Gebiet 48 umfasst drei Komponenten (CCAMLR-38, Absatz 5.17): (1) eine Bestandsabschätzung zur Schätzung der vorsorglichen Befischungsrates; (2) die regelmäßige Aktualisierung der Biomasseschätzung zunächst auf der Ebene bestehender Fanggebietseinheiten (48.1-4), die aber zukünftig auf kleineren Ebenen innerhalb der einzelnen Fanggebiete erweitert werden sollen; und (3) die Ausarbeitung eines Rahmens für die Risikobewertung für die räumliche und saisonale Aufteilung der Fänge.

Die Ergebnisse, die sich aus den Zielvorgaben im Zuwendungsbescheid ergeben haben, fließen in Punkt (3) der neuen Bewirtschaftungsstrategie ein. Die Ergebnisse aus der Zielvorgabe (i) zeigen Wissenslücken auf, die geschlossen werden sollten, um eine umfängliche Risikobewertung für die räumliche und saisonale Aufteilung der Fänge zu gewährleisten. Des Weiteren wird anhand der Ergebnisse aus Zielvorgabe (ii) dargestellt, wie die Daten, die zur Schließung der Wissenslücken dienen, mit Hilfe der Krill-Fischereischiffe als Wissenschaftsplattformen erhoben werden können. Anhand des entwickelten Krill-Populationsmodells in Zielvorgabe (iii) sind wir in der Lage, die Krill-Populationsdynamik über das gesamte Jahr unter Einbeziehung aller Faktoren, die

sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf die Krill-Population auswirken können, abzubilden (z. B. Fischereieinflüsse, Prädatoren, Eisbedeckung, Meeresströmungen, Wassertemperatur) sowie anhand von Klimaszenarien und den damit verbundenen Umweltszenarien zukünftige Entwicklungen zum Krillbestand aufzeigen. Derartige Prognosen sind für eine nachhaltige Bewirtschaftungsstrategie des Krillbestands und damit für eine Risikobewertung für die räumliche und saisonale Aufteilung der Fänge unerlässlich.

Bezüglich der Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse ist weiterhin hervorzuheben, dass auf dem SC-CAMLR Symposium im Februar 2022 die zukünftige strategische Ausrichtung des SC-CAMLR von 2023-2027 diskutiert wurde. Unter anderem wurden die in KrillBIS-II erarbeiteten Wissenslücken in der ‚Krillbiologie‘ zur Optimierung des *feedback managements* zur weiteren Bearbeitung und in Hinblick auf die neu zu erarbeitende Bewirtschaftungsstrategie im SC-CAMLR identifiziert.

#### 4. Zusammenfassung

Mit dem Projektvorhaben KrillBIS-II konnten wir folgende Wissenslücken bezüglich der ‚Krillbiologie‘ identifizieren, welche in dem *feedback management* Ansatz von CCAMLR bisher nicht berücksichtigt werden, jedoch in der neu zu entwickelnden Bewirtschaftungsstrategie zur Risikobewertung für eine zukünftige räumliche und saisonale Aufteilung der Fänge einen wichtigen Beitrag leisten:

- Identifizierung von *Spawning Hotspots* und der Krill-Larven-Advektion
- Mechanismen der saisonalen Krillbiomasse-Verschiebung
- Identifizierung der regionalen Verteilung des Laichbestands von Krill
- Identifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Krillbestand
- Identifizierung von Mechanismen, welche für einen hohen Rekrutierungserfolg verantwortlich sind, inklusive der Parameter, die gemessen werden müssten, um dies in Zukunft erfassen zu können

Weiterhin konnten wir darlegen, welches hohe Potential mit der Nutzung von Krill-Fischereischiffen der neuen Generation (Vakuum-Pumpensystem) als Wissenschaftsplattformen verbunden ist, um diese Wissenslücken zu schließen sowie die dafür notwendigen Daten standardmäßig zu erheben.

Anhand der Modell-Ergebnisse konnte in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Experimenten zu den physiologischen Anforderungen von Krill-Kohorten für eine erfolgreiche Rekrutierung erstmals ein mechanistischer Zusammenhang zwischen Umweltfaktoren und Rekrutierungserfolg gezeigt werden.

Das entwickelte Krill-Populationsmodell kann zukünftig dazu beitragen, die Grundlage für die Modellierung der saisonalen Krill-Populationsdynamik unter Berücksichtigung sich zukünftig verändernder Faktoren wie z. B. Fischereidruck, Prädatoren Anzahl und Verteilung, Eisbedeckung, Wassertemperatur zu schaffen. Dies stellt ebenfalls einen wichtigen Baustein für die Risikobewertung der räumlichen und saisonalen Aufteilung der Fänge in der neu zu entwickelnden Bewirtschaftungsstrategie dar.

## 5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; ggf. mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Trotz der widrigen Umstände durch die COVID-19 Pandemie konnten alle im Projekt geplanten Zielvorgaben, wenn auch mit Zeitverzögerung in einigen Bereichen, erfolgreich umgesetzt werden. Die durch die COVID-19 Pandemie bedingten zeitlichen Verschiebungen der Krill Untersuchungen auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* führten zu einer Verzögerung in der Analyse und Auswertung der auf dem Krill-Fischereischiff erhobenen Krill-Proben und des akustischen Datenmaterials.

Weiterführend wäre es sehr sinnvoll, den bestehenden, umfassenden, saisonalen Datensatz, der auf dem norwegischen Krill-Fischereischiff *Antarctic Endurance* erhoben wurde, unter folgenden Gesichtspunkten vollständig zu analysieren und auszuwerten, sodass die Ergebnisse unterstützend in das WSMPA sowie in weitere MPA-Planungen, wie z.B. der Planung des Domain 1 MPA, einfließen können. Dazu gehören eine:

- Detaillierte Beschreibung des saisonalen Krill-Flux, der Quantifizierung der Konnektivität der Krill-Population zwischen dem nordwestlichen Weddellmeer Bereichs des WSMPA und der *Bransfield Strait* sowie den *South Orkney Islands*, als auch die Relevanz sogenannter Spillover-Effekte, welche den Einfluss lokaler Eingriffe (z.B. nordwestliche Weddellmeer Bereich des WSMPA) auf räumlich entfernte Populationen (z.B. in der *Bransfield Strait*) beschreiben.
- Identifizierung von Krill-Rekrutierungsregionen mit besonderer Berücksichtigung des nordwestlichen Weddellmeer Bereichs des WSMPA anhand von ozeanographischen Advektionsmodellen (ausgehend von den Positionen, an denen juvenile Tiere im antarktischen Sommer von der *Antarctic Endurance* erfasst wurden).

Mit diesen Arbeiten könnte speziell den Fragen nachgegangen werden, inwieweit der nordwestliche Bereich des WSMPA...

- einen „Spawning-Hotspot“ darstellt, um als Quelle für die Krill-Population nördlich der *South Orkney Islands* zu fungieren, die für die Fischerei von großem Interesse ist,
- einen Akkumulationsort für adulten, laichfähigen Krill darstellt, der über ozeanographische sowie tidale Strömungen von der *Bransfield Strait* und *Gerlache Strait* in den Bereich des nordwestlichen Bereichs des WSMPA einströmt und
- eine Anschlussfähigkeit zum MPA Domain 1 liefern kann.

Daraus ableitend würden die generierten Ergebnisse dazu beitragen, den Bereich des nordwestlichen WSMPA als zukünftige „Krill Research Zone“ auszuweisen sowie den Nutzen des WSMPA für die Fischerei zu verdeutlichen, was Widersachern des WSMPA einen neuen Blickwinkel auf die Etablierung von Marinen Schutzzonen im Südpolarmeer geben könnte.

## 6. Literaturverzeichnis

- Atkinson A, Hill SL, Pakhomov EA, Siegel V, Reiss CS, Loeb VJ, Steinberg DK, Schmidt K, Tarling GA, Gerrish L, Salliey SF (2019). Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nature Climate Change*, **9**, pages 142–147, <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0370-z>
- Bernard K, Steinke K B, Fontana J M (2022). Winter condition, physiology, and growth potential of juvenile Antarctic krill. *Front. Mar. Sci* **9**, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.990853/full>
- Kinzey, D., Watters, G.M. & Reiss, C.S. (2019). Estimating recruitment variability and productivity in Antarctic krill. *Fisheries Research, Recruitment: Theory, Estimation, and Application in Fishery Stock Assessment Models*, **217**, 98–107, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.09.027>
- Meyer B, Fuentes V, Guerra C, Schmidt K, Atkinson A, Spahic S, Cisewski B, Freier U, Olariaga A, Bathmann U (2009) Physiology, growth and development of larval krill *Euphausia superba* in autumn and winter in the Lazarev Sea, Antarctica. *Limnol Oceanogr* **54**:1595–1614, <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.5.1595>
- Meyer, B., Freier, U., Grimm, V., Groeneveld, J., Hunt, B.P., Kerwath, S. (2017). The winter pack-ice zone provides a sheltered but food-poor habitat for larval Antarctic krill. *Nature Ecology & Evolution*, **1**, <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0368-3>
- Meyer B, Atkinson a, Bernard K, Brierley A, Driscoll R, Hill S, Marschoff E, Maschette D, Perry F, Reiss C, Rombola E, Tarling G, Thorpe S, Trathan P, Zhu G, Kawaguchi S (2020). Successful ecosystem-based management of Antarctic krill should address uncertainties in krill recruitment, behaviour and ecological adaptation, *Communications Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00026-1>
- Michael K., Suberg L A, Wessels W, Kawaguchi S, Meyer B (2021). Facing Southern Ocean warming temperature effects on whole animal performance of Antarctic krill (*Euphausia superba*). *Zoology* **146**, <https://doi.org/10.1016/j.zool.2021.125910>
- Piñones, A., Hofmann, E., Daly, K., Dinniman, M. & Klinck, J. (2013). Modeling the remote and local connectivity of Antarctic krill populations along the western Antarctic Peninsula. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **481**, 69–92, <https://doi.org/10.3354/meps10256>
- Ryabov, A.B., Roos, A.M. de, Meyer, B., Kawaguchi, S. & Blasius, B. (2017). Competition-induced starvation drives large-scale population cycles in Antarctic krill. *Nature Ecology & Evolution*, **1**, 0177.
- Ryabov, A.B, Berger U, Blasius B, Meyer B (2023). Driving forces of Antarctic krill abundance. *Science Advances*. In Begutachtung
- Steinke KB, Bernard K S, Fontana J M, Copeman L A, Garcia L M (2022). The energetic cost of early reproductive development in juvenile Antarctic krill at the Western Antarctic Peninsula. *Front. Mar. Sci.*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1009385>
- Wiedenmann, J., Cresswell, K.A. & Mangel, M. (2009). Connecting recruitment of Antarctic krill and sea ice. *Limnol. Oceanogr.*, **54**, 799–811, <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.3.0799>