

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger: Universität Oldenburg

Vorhabenbezeichnung: SO299/2 - BIO-OBS 2023: Erhebung bio-optischer 'Unterwegs'-
Forschungsdaten im Indischen Ozean mit 'State-of-the-Art' Beobachtungsmethoden

FKZ: BMBF, 03G0299TB

Laufzeit des Vorhabens: 15.05.2023 - 31.10.2024

Principal Investigator: Dr. Jochen Wollschläger

Teil I – Kurzbericht

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Rahmen der Expedition SO299-2 mit dem Forschungsschiff SONNE untersuchte ein Team der AG Marine Sensoren (ICBM, Universität Oldenburg) die bio-optischen Eigenschaften des Oberflächenwassers im Indischen Ozean. Die Aufgabenstellung umfasste die Erfassung hochauflösender hyperspektraler Daten, um die vertikale Lichtdämpfung und deren Einflussfaktoren (Phytoplankton, gelöste organische Stoffe, Partikel) zu analysieren. Diese Messungen dienen sowohl der Grundlagenforschung als auch der Validierung von Satellitendaten und bio-optischen Modellen. Da der Indische Ozean bisher nur unzureichend untersucht ist, bot die Transitfahrt entlang der Hauptströmungen eine einzigartige Gelegenheit, wertvolle Referenzdaten zu gewinnen. Zusätzlich wurden Fluoreszenz-Sensoren an Bord validiert und fünf Argo-Floats des CSIRO-Instituts ausgebracht, um das globale Beobachtungsnetzwerk zu erweitern.

2 Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens umfasste verschiedene Messmethoden: Am Bug der SONNE wurden hyperspektrale Radiometer installiert, um die Fernerkundungsreflektanz (R_{rs}) zu messen, während ein FerryBox-System kontinuierlich biogeochemische Parameter wie Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll-a-Fluoreszenz erfasste. Zusätzlich wurden täglich Wasserproben entnommen und im Labor analysiert, darunter Absorptionmessungen (PSICAM) und fluorometrische Untersuchungen von gelöstem organischen Material (DOM). Herausforderungen traten durch technische Störungen auf, etwa Luftblasen im Schiffs-Seewassersystem oder Lichtreflexionen, die die radiometrischen Daten beeinflussten. Dennoch konnten sowohl hochaufgelöste kontinuierliche als auch diskrete Datensätze gewonnen werden, die eine umfassende Charakterisierung der Wassereigenschaften ermöglichten.

3 Wesentliche Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Gewässer typische oligotrophe Bedingungen aufwiesen, mit leichten Anstiegen in Salzgehalt und Trübung entlang der Strecke. Die Chl-a-Fluorometrie offenbarte tageszeitliche Schwankungen, die auf Lichtakklimatisierung des Phytoplanktons

zurückzuführen sind. Die Validierung der Sensoren verlief erfolgreich, jedoch müssen radiometrische Daten noch um Störeffekte (Schatten, Reflexionen) bereinigt werden. Die diskreten Proben stimmten weitgehend mit den kontinuierlichen Messungen überein, was die Datenqualität bestätigt. Die abschließende Auswertung folgt den FAIR-Prinzipien, und die Publikation der Ergebnisse soll künftig Satellitenkalibrierung und ozeanographische Modelle unterstützen. Insgesamt lieferte die Fahrt wertvolle Einblicke in die Dynamik des Indischen Ozeans und demonstrierte die Leistungsfähigkeit moderner bio-optischer Messtechniken.

Gefördert vom:



Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger: Universität Oldenburg

Vorhabenbezeichnung: SO299/2 - BIO-OBS 2023: Erhebung bio-optischer 'Unterwegs'-
Forschungsdaten im Indischen Ozean mit 'State-of-the-Art' Beobachtungsmethoden

FKZ: BMBF, 03G0299TB

Laufzeit des Vorhabens: 15.05.2023 - 31.10.2024

Principal Investigator: Dr. Jochen Wollschläger

Teil II: Eingehende Darstellung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1. Aufgabenstellung und Vorkommnisse während der Projektlaufzeit

Im Rahmen der Fahrt SO299-2 des Forschungsschiffes SONNE, unter Fahrtleitung des GEOMAR mit geologischer Schwerpunktausrichtung, hat ein Team der AG Marine Sensorsystem (ICBM, Universität Oldenburg) die bio-optischen Eigenschaften der oberen Ozeanschicht im Indischen Ozean erfasst. Die Verfügbarkeit von Licht stellt eine grundlegende Lebensvoraussetzung dar, da es die Photosynthese und damit die aquatische Primärproduktion antreibt. Daher ist ein genaues Verständnis seiner vertikalen Abschwächung wichtig, die von der Konzentration und Zusammensetzung der Wasserinhaltsstoffe (Phytoplankton, CDOM, nicht-Algen Partikel) abhängt. Auf diese kann dementsprechend über die Messung der bio-optischer Eigenschaften des Wassers rückgeschlossen werden. Aus diesem Grund sind hyperspektrale bio-optische Messungen ein wesentlicher Bestandteil moderner Meeresbeobachtungen und können sowohl Grundlagen- als auch angewandte Forschung (z. B. Satellitenbeobachtungen oder bio-optische Modellierungen) mit hochauflösenden Datensätzen unterstützen. Der indische Ozean ist, wie viele Regionen der Weltmeere, allerdings nur spärlich untersucht. Insofern war die Transitfahrt SO299-2 eine gute Gelegenheit, zusätzliche Daten zu generieren, insbesondere da die Strecke die Hauptströmungen des Indischen Ozeans kreuzt und somit unterschiedliche Wassermassen erfasst.

Nachdem das Geologen-Team seine Untersuchungen um den aktiven Vulkan Anak Krakatau beendet hatte, führte das ICBM-Team auf der sich anschließenden Transitstrecke durch internationale Gewässer nach Port Louis (Mauritius) hochauflösende „Unterwegs“-Messungen durch, unter anderem von Temperatur, Salzgehalt, Trübung und Wasserreflektanz. Zusammen mit Labormessungen von Wasserabsorption und Fluoreszenz ermöglicht dies eine hyperspektrale bio-optische Charakterisierung der Transitstrecke. Die gemessenen bio-optischen Parameter und abgeleiteten Variablen können dadurch zum weiteren Verständnis der Dynamik und Prozesse im Indischen Ozean beitragen. Zudem sollen die Ergebnisse mit Daten früherer SONNE-Tranekte im Pazifik verglichen werden und dienen außerdem der Validierung der (Fluoreszenz)-Sensoren in den selbstreinigenden Monitoring-Boxen (SMBs) an Bord der FS SONNE. Das ICBM ist für die Validierung und Qualitätskontrolle dieser Sensoren im Rahmen der Aktivitäten der DAM (Deutsche Allianz

Meeresforschung) verantwortlich. Der geplante Transekt in internationalen Gewässern eignet sich ideal für Validierungsmessungen der Sensoren, die spezielle Instrumente erfordern und daher nicht auf jeder Fahrt möglich sind.

Weiterhin unterstützte das ICBM-Team die Ausbringung von fünf Argo-Floats (auf- und abtauchenden Driftbojen) des CSIRO-Institute for Marine and Antarctic Studies, um das Argo-Netzwerk im Indischen Ozean zu erweitern.

Nach Abschluss der Fahrt wurden die Daten ausgewertet, qualitätskontrolliert und auf den universitätseigenen Servern archiviert. Die Publikation nach den FAIR-Standards ist in Arbeit.



Abb. 1: FS Sonne im Arbeitsgebiet am Krakatau, Indonesien

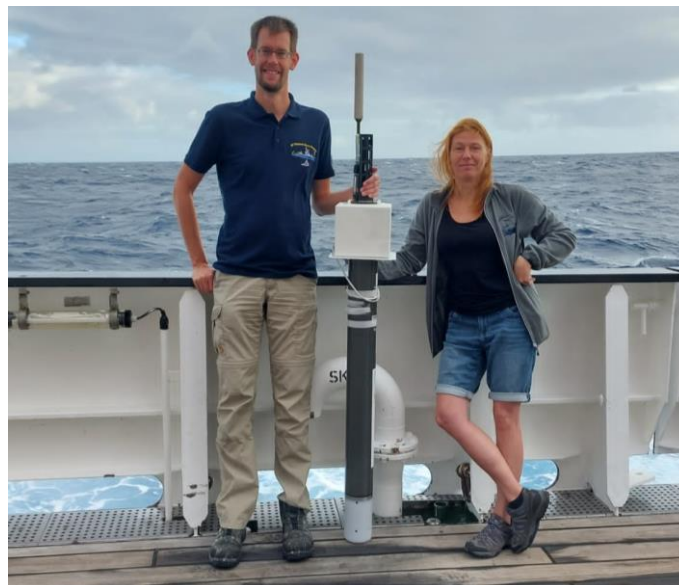


Abb. 2: Auszubringendes Argo-Float

2. Detaillierte Beschreibung der Arbeiten an Bord

Während der Fahrt wurden mehrere Unterwegs-Messsysteme eingesetzt, um zeitlich (und durch die Bewegung des Schiffes auch räumlich) hochauflösende Datensätze zu erfassen. Am Bug der FS SONNE wurde eine Reihe hyperspektraler Radiometer installiert (Abb. 3, links). Aus diesen radiometrischen Messungen kann die Fernerkundungsreflektanz (remote sensing reflectance, R_{rs}) als wichtige scheinbare optische Eigenschaften (Apparent Optical Property, AOP) abgeleitet werden. Diese wiederum kann mit geeigneten Algorithmen im Hinblick auf optisch aktive Substanzen wie etwa Phytoplankton hin ausgewertet werden.

Des Weiteren wurde ein 4H Jena FerryBox-System (Abb. 3, rechts) an das Schiffs-Seewassersystem angeschlossen um kontinuierlich biogeochemische Parameter im Oberflächenwasser zu messen (z. B. Salzgehalt, Temperatur, Sauerstoff, Trübung und Chl-a-Fluoreszenz). An einen Bypass der FerryBox wurden zusätzliche Instrumente zur Messung der optischen Transmission und der Nitratkonzentration angeschlossen. Des Weiteren wurden aus diesem Bypass täglich in definierten Intervallen Oberflächenwasserproben für weitere Laboranalysen an Bord entnommen.

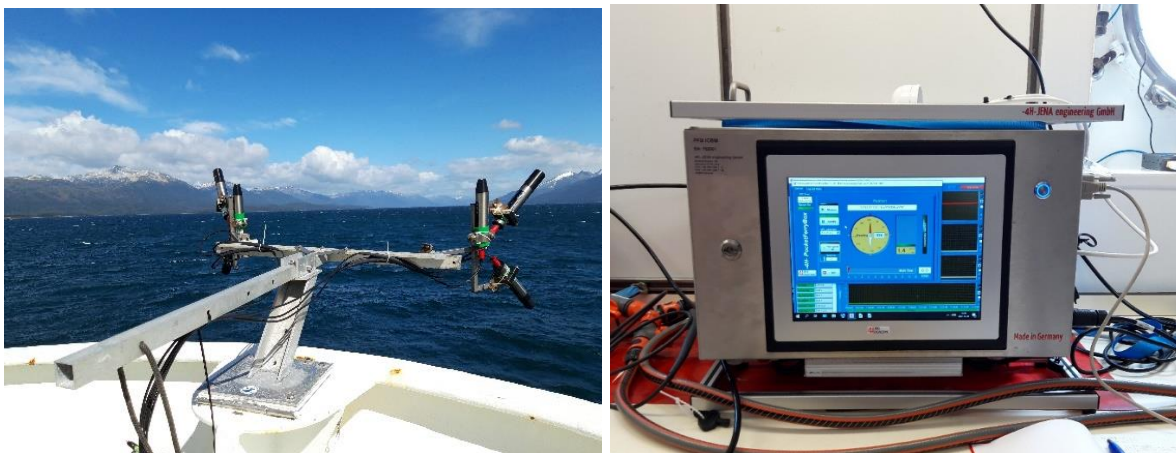


Abb. 3: Unterwegs-Messsysteme. Links: Radiometrischer Aufbau am Schiffsbug, Rechts: FerryBox-System

Diese Laboranalysen umfassten spektral aufgelöste Messungen (ca. 400-700 nm) des Absorptionskoeffizienten der Wasserproben. Diese wurden sowohl an ungefiltertem Wasser als auch nach Filtration (0.2 μm Porenweite) für die gelöste Fraktion durchgeführt. Die Differenz dieser beiden Messungen ergibt rechnerisch das Absorptionskoeffizientenspektrum des partikulären Materials in der Probe. Die Messungen erfolgten mit einem Point-Source Integrating Cavity Absorption Meter (PSICAM) und ergänzen die aus den radiometrischen Beobachtungen abgeleiteten Variablen. Die Chlorophyll-a Konzentration der Probe wurde außerdem mit einem fluorometrischen Chl-a Sensor (FLNTU) gemessen.

Zusätzlich wurde die filtrierte Probe auch noch im Hinblick auf die Zusammensetzung der enthaltenen gelösten organischen Substanz (DOM, Material $<0,2 \mu\text{m}$) mittels hyperspektraler Fluorometrie hin untersucht (Abb. 4). Die daraus entstandenen Excitation-Emission-Matrizen (EEM) werden im weiteren Verlauf der Datenanalyse mittels einer Parallel Factor Analysis (PARAFAC) untersucht, um Fraktionen innerhalb des DOM-Pools zu differenzieren. Dies ermöglicht potentiell Rückschlüsse auf die Herkunft der DOM (z. B. marine vs. terrestrisch) und Umwandlungsprozesse (z. B. bakterielle und photochemische Degradation).

Aus den unterwegs genommenen Proben wurden außerdem Aliquots für Analysen im Heimatlabor nach der Fahrt abgenommen. Dazu gehören Proben für die taxonomische Zusammensetzung des Phytoplanktons, die später mit einem FlowCam-Instrument analysiert werden sollen.

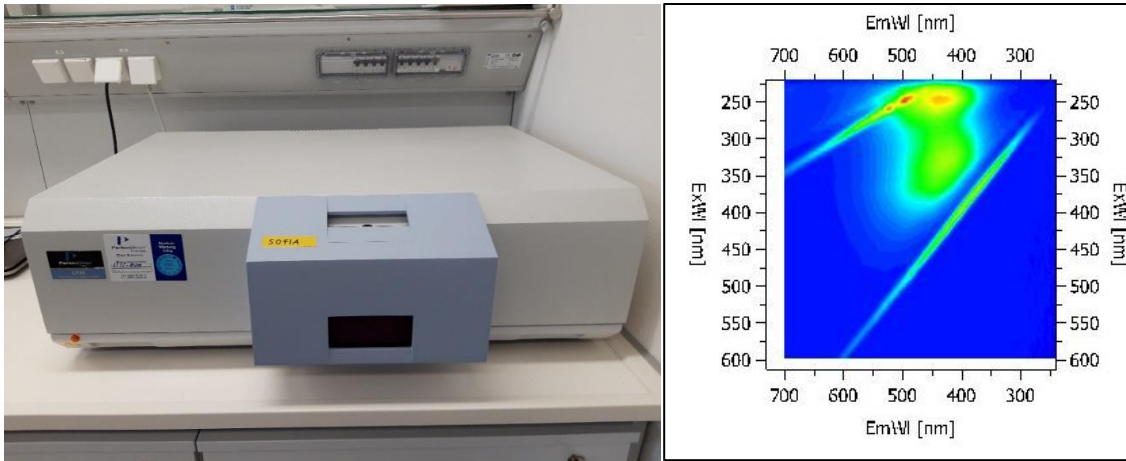


Abb. 4: Hyperspektrales Laborfluorometer mit Beispieldaten (Anregungs-Emissions-Matrix)

3. Post-Cruise Arbeiten

Die im Anschluss an die erfolgreich durchgeführte Fahrt erfolgten Arbeiten lagen in erster Linie im Bereich der Datenauswertung und nachträglichen Kalibrierung der verwendeten Sensorik (wo nötig). Erste Ergebnisse der Datenauswertung werden im nachfolgenden Kapitel 4 gezeigt. Die Kalibrierung der Sensorik umfasste zum einen die Korrektur der radiometrischen Spektren in Bezug auf ihre Absolutwerte. Dies wurde mit Hilfe von Messungen einer sogenannten FieldCal-Lampe (TriOS GmbH), die in konstantes Lichtspektrum abgibt, durchgeführt. Die ermittelten Abweichungen haben sich allerdings als vernachlässigbar klein erwiesen. Zum anderen wurden die Messungen des diskret eingesetzten Fluoreszenzensors (FLNTU) in Bezug zur Konzentration an Chlorophyll-a gesetzt (Anfertigung einer Verdünnungsreihe und einer entsprechenden Kalibrierkurve anhand von Labormessungen). Neben diesen Arbeiten wurden die mitgebrachten, fixierten Wasserproben im Heimatlabor mit Hilfe einer Partikelkamera (FlowCam) untersucht, um Zahl und Art der Partikel auf dem Transit zu charakterisieren. Wie man anhand von Abb. 5 sehen kann, haben die meisten Partikel eine Größe unter 40 μm , was für oligotrophe Regionen des offenen Ozeans durchaus typisch ist. Es ist weiterhin zu sehen, dass in der zweiten Hälfte des Transits die Menge an Partikeln zunimmt. Grund hierfür ist vermutlich eine höhere Nährstoffkonzentration mit abnehmender Distanz zur Küste, die das Wachstum von Phytoplankton begünstigt. Dies zeigt auch der Anstieg der Chlorophyll-a Fluoreszenz ab dem 27.08. (vgl. Abb. 6).

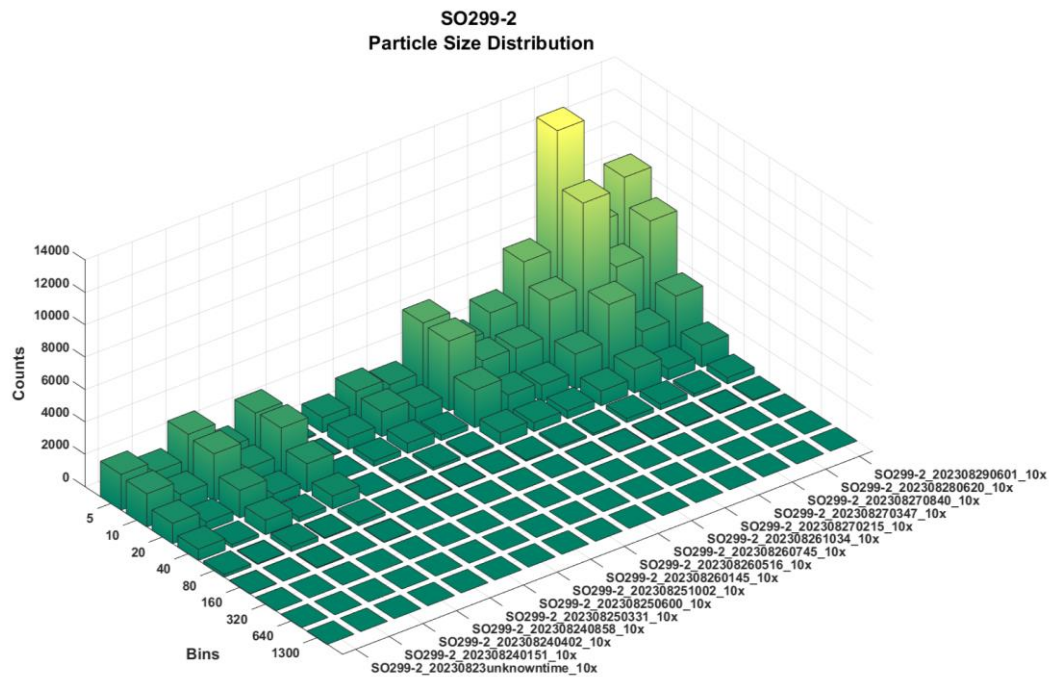


Abb. 5: Partikelgrößenverteilung entlang des Transits. X-Achse: Name/Zeitstempel der Probe. Y-Achse: Größenklassen in μm . Z-Achse: Anzahl der Partikel pro 5 mL in der jeweiligen Größenklasse.

4. Beispieldaten

Die folgende Abbildung (Abb. 6) zeigt Beispieldaten aus dem FerryBox-System. Generell waren die Bedingungen während der Fahrt relativ konstant, was für oligotrophen ozeanische Gewässer zu erwarten war. Dennoch zeigten Salzgehalt, Trübung und Chl-a-Fluoreszenz einen leichten Anstieg vom Start bis zum Ende der Fahrt. Die Datenlücke um den 25.08.2023 entstand beim Durchfahren der AWZ (Ausschließliche Wirtschaftszone) der Kokosinseln. Der starke Abfall nach anfänglich hohen Werten, der in den Sauerstoffdaten nach der Lücke und zu Beginn der Fahrt sichtbar ist, ist wahrscheinlich ein Artefakt des Schiffs-Seewassersystems. Dieses musste in den AWZs Indonesiens und der Kokosinseln deaktiviert werden, und nach der Reaktivierung befanden sich viele Luftblasen im System, die auch die FerryBox passierten und diese ungewöhnlich hohen Werte verursachten. Teilweise war auch der Trübungssensor betroffen (hohe und verrauschte Werte am 24.08.2023). Die täglichen Schwankungen der Chl-a-Fluoreszenzwerte spiegeln vermutlich keine tatsächlichen Veränderungen der Phytoplankton-Biomasse wider, sondern eher deren Lichtakklimation (nicht-photochemische Löschung der Fluoreszenz). Dies ist ein typisches Artefakt in fluorometrisch bestimmten Chl-a Konzentrationen. Die kontinuierlich gemessenen Nitratmessungen sind leider nicht zu verwerten, da die Konzentrationen nahezu während des gesamten Transits unter der Detektionsgrenze des Instrumentes lagen.

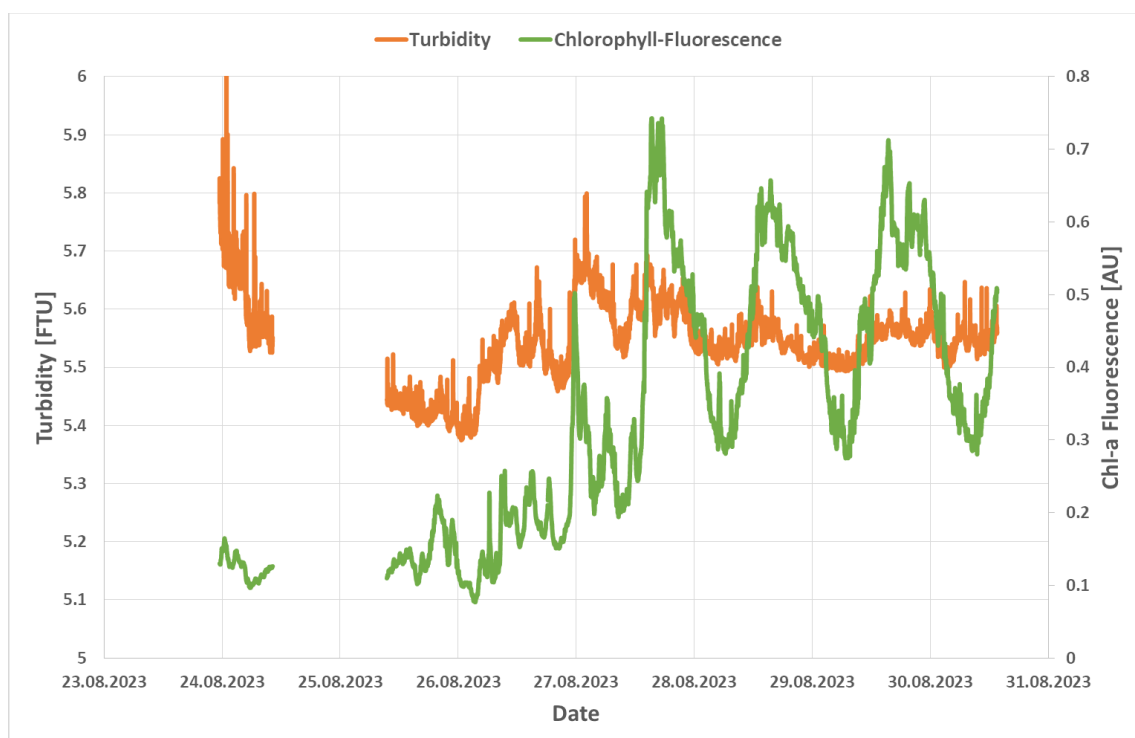
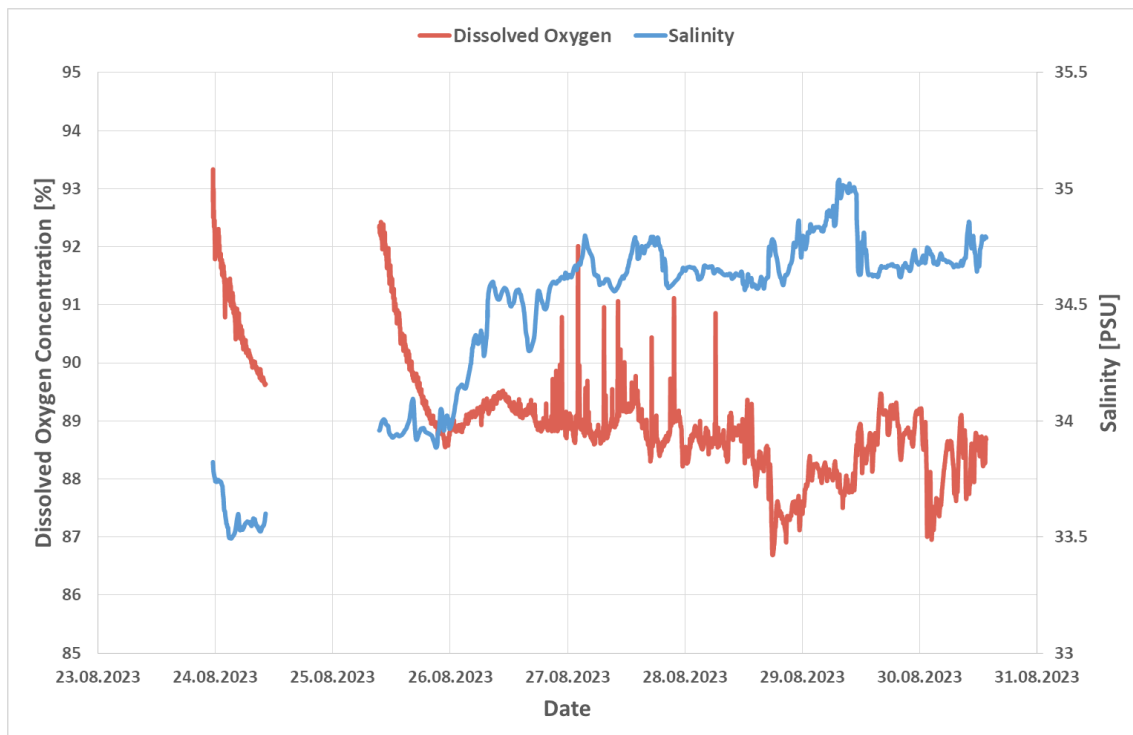


Abb. 6: Verlauf der Sensordaten (gelöster Sauerstoff, Salzgehalt, Trübung und Chlorophyll-a Fluoreszenz) über die Transitstrecke.

Aus den am Schiffsbug montierten Radiometern werden kontinuierliche Messungen der remote sensing reflectance R_{rs} als Verhältnis der vom Wasser abgestrahlten Radanz zur einfallenden Irradianz berechnet. Diese dienen als Referenz für Satellitenbeobachtungen in diesem Gebiet und als Grundlage für die Berechnung von Ozeanfarben-Produkten (z. B. Chl-a-Konzentration). Da die Radiometer Licht aus der ersten optischen Tiefe erfassen, werden diese Daten wahrscheinlich nicht immer mit den Messungen der FerryBox im Oberflächenwasser übereinstimmen. Ein Vergleich beider Datensätze wird daher Aufschluss über die vertikale Chl-a-Verteilung geben. Ein bislang noch nicht gelöster Punkt ist

die Korrektur der radiometrischen Daten im Hinblick auf die sich während der Fahrt ändernde relative Position von Sensoren und Sonne. Hierdurch kann es entweder zur Messung von direktem, von der Wasseroberfläche reflektiertem Sonnenlicht kommen oder aber der Sichtbereich der Radiometer gelangt zeitweise in den Schatten des Schiffes. In beiden Fällen sind die entsprechenden Daten nicht zu verwenden und müssen durch geeignete Qualitätskontrollroutinen erkannt und aussortiert werden. Zum Zeitpunkt dieses Berichtes steht dies noch aus.

Die im Labor an Bord bzw. im Heimatlabor an diskreten Proben durchgeführten Messungen sind ausgewertet und befinden sich im Prozess der Qualitätskontrolle und Veröffentlichung. Die diskreten Daten passen dabei in den meisten Fällen gut zu den verschiedenen Unterwegs-Messungen (Abb. 7).

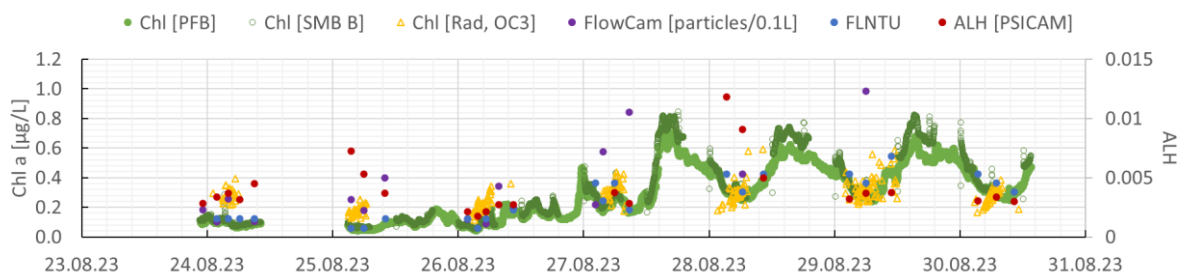


Abb. 7: Unterwegs-Messungen von Chlorophyll-a (PFB: FerryBox; SMB B: schiffseigener Sensor; Rad OCR3: Radiometrie) im Vergleich zu den diskreten Probenmessungen (FlowCam: Direkte Partikelzahl; FLNTU: fluorometrisch bestimmte Chl-a Konzentration, ALH: Chl-a Messung basierend auf der partikulären Absorption).

5 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben des Projektes lagen wie beantragt in erster Linie in Sach- und Reisemitteln, die der Vorbereitung und Durchführung der Fahrt gedient haben. Weitere Reisemittel wurden genutzt um die Projektergebnisse auf einer Konferenz vorzustellen (Ocean Optics 2024, Gran Canaria). Auch dies war im Antrag dargestellt. Die beantragten Personalmittel wurden für die Aufstockung einer vorhandenen Personalstelle genutzt. Der entsprechende Mitarbeiter sollte ursprünglich auch an der Fahrt teilnehmen, konnte aber aufgrund eines familiären Notfalls nicht realisiert werden. Stattdessen hat die Person die entsprechenden Personalstunden in die Vor- und Nachbereitung der Fahrt investiert (Kalibrierung bzw. Wartung der verwendeten Sensorik) sowie bei der Aufarbeitung der Daten im Anschluss an die Fahrt unterstützt.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Alle hier dargestellten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele notwendig. Die Kosten für die Anreise zur Expedition und für die Verbrauchsmittel zu Ihrer Durchführung konnten nicht aus den Haushaltsmitteln der Arbeitsgruppe aufgebracht werden und machten die Beantragung beim BMFTR notwendig. Gleiches gilt für die Kosten, die durch die Konferenzteilnahme, auf der die Expeditionsergebnisse vorgestellt wurden, entstanden sind.

7 Zukünftige Verwertung der Ergebnisse

Da es sich um eine Transit-Forschungsfahrt als Nebennutzer handelt, ist keine anschließende Projektstellung geplant. Die Ergebnisse werden primär im Rahmen von weiteren (Daten)Veröffentlichungen genutzt. Insbesondere ist ein Datenpaper geplant, welches Underway-Daten aus verschiedenen Ozeangebieten, die im Verlauf verschiedener Expeditionen gesammelt wurden, zusammenführt. Hierfür müssen die verschiedenen Daten allerdings erst noch harmonisiert

und einer einheitlichen Qualitätskontrolle unterzogen werden. Des Weiteren können die radiometrischen Messungen wie im Antrag genannt der Validierung von Daten dienen, die im Rahmen der jüngst gestarteten hyperspektralen Satelliten-Fernerkundungsmission PACE gesammelt werden. Die restlichen Daten dienen in diesem Zusammenhang als Metadaten, um die radiometrischen Daten in einen ozeanographischen und biologischen Kontext einordnen zu können. Außerdem dienen die Daten natürlich auch

8 Relevante Ergebnisse oder Fortschritte bei anderen Stellen

Es liegen zum Zeitpunkt des Berichtes keine entsprechenden Informationen vor.

9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Oelker, J; Urlaub, M; Voß, D et al. (2025): Continuous optical chlorophyll-a and turbidity data along R/V SONNE cruise SO299/2. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.974880>

Voss, D; Wollschläger, J; Oelker, J (2024): bio-optical characterization of surface waters underway the indian ocean – from singapore to mauritius