GEOINFORMATIONSDIENST DER BUNDESWEHR

– Schriftenreihe–

Regionale Ozeanvorhersagemodelle im operationellen Betrieb für die Marine

von

Oberregierungsrat
Diplom-Ozeanograph Uwe Paul,

Marinekommando Rostock,
Unterabteilung Geoinformation,
Fachprojekt 3310-0050-5570

Heft Nr, 2018

Herausgeber: Leiter Geoinformationsdienst der Bundeswehr
Bearbeitung und Herstellung: Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr Euskirchen 2018

ISSN 1865-6978
Druck: D01-IX.18-5-G181131

Inhalt

Zusammenfassung 5

1 Der Bedarf der Deutschen Marine, Ziele des Fachprojektes und der Nutzen für die Marine 7

1.1 Anforderungen des Bedarfsträgers „Deutsche Marine“ 7

1.2 Das Ziel des Fachprojektes 7

1.3 Bereitstellung der Ergebnisse für den Einsatz 11

1.4 Einordnung des Fachprojektes in die übergeordnete Zielsetzung zur Koordinierung der Forschungsarbeiten des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr 11

1.5 Genehmigte Ziele des Fachprojektes 11

1.6 Der Nutzen des Fachprojektes für die Deutsche Marine 12

2 Der formale Start des Fachprojektes 13

3 Der aktuelle Sachstand, was bis jetzt erreicht wurde und Herausstellungsmerkmale 14

3.1 Fachlich „wissenschaftlicher Sachstand“ 14

3.2 Sachstand zum „Operationellen Betrieb“ 14

3.3 Herausstellungsmerkmale 14

3.3.1 Vollautomatischer operationeller Betrieb mit intelligenten Funktionalitäten für die „Restart- und Neustartsituation“ 14

3.3.2 Optimale Versorgung der Ozeanmodelle mit hoch aufgelöstem meteorologischem Antrieb, der exakt zugeschnitten ist auf die Region und Gitterkonfiguration 14

4 Theoretischer Hintergrund: Von den physikalischen Gleichungen zur programmtechnischen Umsetzung durch das ROMS – Modell 16

4.1 Das System der hydrodynamischen Gleichungen 16

4.2 Anfangsbedingungen 20

4.3 Randbedingungen 21

4.3.1 Oberflächenrandbedingungen 21

4.3.2 Bodenrandbedingungen 23

4.3.3 Seitliche Randbedingungen 23

4.4 Das ROMS – Modell 24

5 Die Entwicklung vom ROMS-Rechenkern zum RELOC-System, die Projektleistung 28

5.1 Vorbemerkungen: Zur Auswahl des ROMS-Ozeanmodelles als Basis 28

5.2 Vom ROMS-Rechenkern zum RELOC-System, die Projektleistung 28

5.3 Die gegenwärtig verwendete Rechnerplattform und Umgebung am DMRZ 29

5.4 Der zeitliche Ablauf im „operationellen Betrieb“ auf dem RELOC - Rechner 29

6 Beispiele zu allen acht Ozeanvorhersagemodellen welche derzeit operationell in Betrieb sind und deren militärischer Bezug 31

6.1 Ionische See 31

6.2 Straße von Gibraltar 32

6.3 Östliches Mittelmeer 33

6.4 Westliches Schwarzes Meer 33

6.5 Golf von Aden 34

6.6 Ostküste von Somalia 34

6.7 Straße von Hormus 35

6.8 Zentrales Mittelmeer 36

7 Weiterentwicklungen 37

7.1. Technische Weiterentwicklungen 37

7.2 Wissenschaftliche Weiterentwicklungen 38

7.2.1 Datenassimilation 39

7.2.2 Einführung eines Nudging – Algorithmus 39

7.2.3 Folgemodelle 39

8 Ausblick 40

Literaturverzeichnis 41

Abkürzungsverzeichnis 42

Bisherige Veröffentlichungen in der Schriftenreihe des GeoInfoDBw 45

Adresse:
Uwe Paul
Marinekommando
Abteilung Einsatz UA GeoInfo
Kopernikusstraße 1

18057 Rostock

Zusammenfassung

Die Deutsche Marine hat einen dauerhaften und unabweisbaren Bedarf an zuverlässigen und gesicherten ozeanographischen Vorhersagen als Voraussetzung für die missionsbezogene Beratung ihrer weltweiten Einsätze. Grundlage dafür sind Simulationen des Ozeans, die durch den Routinebetrieb eines numerischen Modells auf einem Computer gewonnen werden. Da für die außerheimischen Einsatzgebiete, z.B. am Horn von Afrika/Somalia (EU Operation ATALANTA) keine verlässlichen Ozean - Modellvorhersagen verfügbar waren[1], wurde bereits am 31.01.2011 beim Marineamt in Rostock das Fachprojekt (FP) „Regionales Ozeanmodell“ initiiert, um diese Fähigkeitslücke zu schließen. Ab 01.10.2012 wurde dieses Fachprojekt dann beim Marinekommando[2] in Rostock (MarKdo) fortgesetzt und kam im März 2015 zum Abschluss[3]. In diesem Bericht wird nun das Fachprojekt in seiner Gesamtheit beschrieben, von der Vorbereitungsphase, bis zum fertigen Endergebnis, dem operationellen Betrieb aller Ozeanmodellnester und der Weiterentwicklungsphase. Während der Vorbereitung wurde der „Prototyp“ eines Modellnestes für die Ionische See erstellt. Auf der Basis der dadurch gewonnenen Erfahrungen konnte das Fachprojekt geplant und realisiert werden. Dadurch konnten sechs weitere Modellnester vollautomatisiert am Deutschen Meteorologischen Rechenzentrum (DMRZ) installiert werden, welche seit März 2015 im Routinebetrieb laufen: Straße von Gibraltar, östliches Mittelmeer, westliches Schwarzes Meer, Golf von Aden, Ostküste von Somalia und Straße von Hormus. Während der Weiterentwicklungsphase konnte dann ein weiteres Modellnest in Betrieb genommen werden: Zentrales Mittelmeer. Somit stehen gegenwärtig acht Modellnester zur Verfügung.

Dieser Betrieb von hochaufgelösten ozeanographischen Vorhersagemodellen für die außerheimischen Einsatzgebiete der Marine, so wie wir ihn von meteorologischen Vorhersagemodellen am DMRZ schon lange kennen (NWP, Numerical Weather Prediction), ist völlig neu und sollte schon alleine aus diesem Grund mit dieser Publikation bekannt gemacht werden. Als Folge der numerischen Modellvorhersagen ergibt sich ein Zugewinn für die ozeanographische Einsatzberatung der Flotte. Als Zielgruppe dieses Berichtes sind anvisiert: Derzeitige und zukünftige Modellbetreiber, Modellentwickler, Fachkollegen, Berater und schließlich alle, die interessiert sind und wissen wollen, wie eine numerische Ozeanvorhersage funktioniert und welcher Nutzen dadurch entsteht. Somit steht eine Dokumentation des Fachprojektes für den Geoinformationsdienst der Bundeswehr zur Verfügung.

Insgesamt stellt dieses Fachprojekt eine konsequente Fortführung/Erweiterung der ozeanographischen Modellfamilie dar (Strömung und Schichtung, Seegang bis Brandung): Nachdem der Verfasser das erste Ozeanmodell für die Marine im Oktober 2010 operationell nutzbar gemacht hat (für das NATO–Uboot Übungsgebiet östlich von Sizilien installiert und voll automatisiert, Paul 2012), konnte basierend auf diesen Erfahrungen das Fachprojekt mit weiteren Modellen realisiert werden, so wie es im Fachprojektblatt 3310-0050-5577, 2011, S.3 gefordert wurde.

Durch den bis jetzt erreichten Sachstand als „Basis“ erschließen sich völlig neue Möglichkeiten, welche im Rahmen einer Weiterentwicklung realisiert und daher in diesem Bericht aufgezeigt werden (vgl. Kapitel 5).

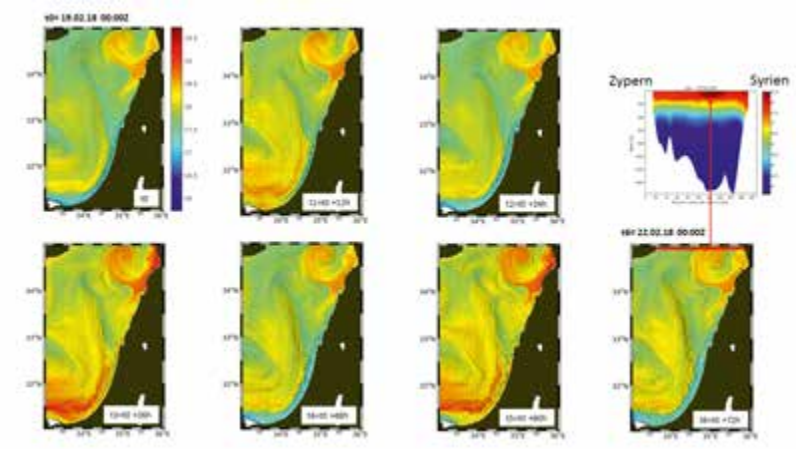
Als Standard ist gegenwärtig für die Ozeanmodellnester eine Vorhersage über drei Tage (72 Stunden) vorgesehen, mit einer Schrittweite der Vorhersagetermine von $\Delta t = 12$ Stunden4. Der Vorhersagezeitraum kann jeder Zeit erweitert und die Schrittweite (Abb. 1) in der Ausgabedatei verkleinert werden. Somit gibt es als Modellausgabe einen „5D – Modellozean“: (1) Länge-x, (2) Breite-y, (3) Tiefe/Höhe-z, (4) Zeit-t, für jeden ozeanographischen Parameter (5).

[1] Frei verfügbare Informationen aus dem Internet sind **nicht verlässlich**. Genau so schnell wie beliebige Modellvorhersagen auf ständig neu verbreiteten Webseiten angeboten werden, können diese auch wieder verschwinden. Überdies ist ein Zugriff auf externe Quellen wie z.B. MyOcean/Copernicus, über das Internet nicht möglich, da das Bundeswehrnetz über den PROXY – Server Strausberg aus IT- Sicherheitsgründen dieses nicht zulässt. Daher wurde das Fachprojekt im Deutschen Meteorologischen Rechenzentrum Anteil Bw realisiert.
Offizielle, amtliche Ozeanmodellvorhersagen stellt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) für den zivilen Bereich bereit, aber nur für Ost- und Nordsee bis zum NW- Schelf, um vorrangig verlässliche Informationen für die Deutschen Hoheitsgewässer zu erhalten. Für den militärischen Bereich, mit seinen weltweiten Einsatzgebieten, ist dies die Aufgabe des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (GeoInfoDBw). Diese Informationen sind mitunter sensibel/vertraulich, um eine Operation, Mensch und Material nicht zu gefährden.

[2] Das MarKdo wurde im Okt. 2012 neu aus dem Führungsstab der Marine, dem Flottenkommando und dem Marineamt aufgestellt.

[3] Eine wissenschaftliche Fachprojektfortsetzung (FP 3310-0050-5570) wurde anvisiert. Unabhängig davon konnten aber 2017 vermittels eines Rahmenvertrages der Bw (EuMetSys Projekt-Nr. 217401.70) mit der Firma Ernst Basler & Partner Deutschland umfangreiche technische Verbesserungen durchgeführt werden (Kapitel 5, Weiterentwicklung).

[4] Die selbst gewählte Schrittweite von 12h besagt einfach nur, dass alle 12 Stunden das berechnete Ergebnis in eine Ausgabedatei (history.nc) hineingeschrieben wird. Somit bleibt die Ausgabedatei für den RELOC-PC klein, da dort die Kapazitäten begrenzt sind. Das hat nichts mit der numerischen internen Rechenschrittweite zu tun! Siehe dazu Kapitel 4.4 Das ROMS-Modell/CFL- Kriterium.



Die Abbildung zeigt beispielhaft die aufeinanderfolgenden Vorhersagetermine für den Parameter Temperatur der Ozeanoberfläche über 72 Stunden. Als Beispiel für einen Vertikalschnitt wurde die nördliche Begrenzung des Modellgebietes dargestellt: Von der Insel Zypern bis nach Syrien und von der Meeresoberfläche bis zum Meeresboden. Der auffällige Warmwasserwirbel (roter Pfeil) findet sich im Vertikalschnitt und in der Horizontaldarstellung.

1 Der Bedarf der Deutschen Marine, Ziele des Fachprojektes und der Nutzen für die Marine

1.1 Anforderungen des Bedarfsträgers *„Deutsche Marine“*

Die Deutsche Marine benötigt für ihre Operationen im gesamten Einsatzspektrum Informationen über die ozeanographischen Bedingungen in ihren Einsatzgebieten. Mittel- und langfristig werden die seitens der Ozeanographie zu liefernden Beiträge für die Vorbereitung, Durchführung aber auch Auswertung von Einsätzen weiter an Bedeutung zunehmen.

Für die Deckung des Bedarfs an ozeanographischen Informationen in den außerheimischen Einsatzgebieten gab es bisher im Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfoDBw) kein ozeanographisches Vorhersagemodell im Routinedienst, welches Beratungen über die Meeresströmungen und Schichtungsverhältnisse mit deren Auswirkungen auf die Einsätze, zuverlässig und gesichert ermöglicht hätte.

Erst durch die Schließung dieser Fähigkeitslücke werden die Anforderungen des Bedarfsträgers erfüllt. Es sind bereits jetzt wichtige Ziele erreicht (Kapitel 3), weitere werden im Kapitel 7 „Weiterentwicklung“ erläutert.

1.2 Das Ziel des Fachprojektes

Ziel des Fachprojektes „Regionales Ozeanmodell“ ist die bedarfsgerechte Erstellung und Bereitstellung von umfassenden ozeanographischen Informationen für die Einsatzgebiete der Deutschen Marine.

Durch die Implementierung aller acht Ozeanmodellnester (zu den Beschreibungen siehe Kapitel 6) soll:

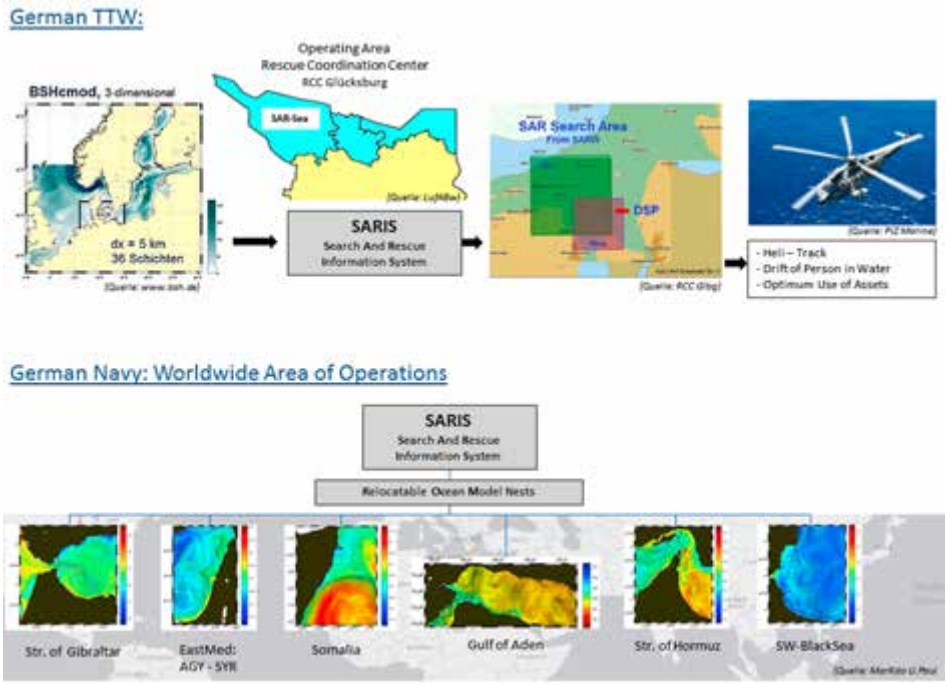
- *die Fähigkeit* der Bw, einsatzbezogene Szenarien und Bewertungen von Einsatzräumen für Planungszwecke und kurzfristig zur NRF-Unterstützung bereitstellen zu können, sichergestellt und ausgebaut werden.
- *die Fähigkeit* der Bw, eingegangene NATO-Verpflichtungen als Lead-Nation im Rahmen des IMETOC-Support-Konzepts, zu Beiträgen zum „Rapid Environmental Assessment (REA)“ und zum „Recognized Environmental Picture (REP)“ zu entsprechen, sichergestellt und ausgebaut werden.
- *die Fähigkeit* zur raschen Versorgung von Einheiten der DEU Marine und ggf. der Partner (NATO, EU) mit ozeanographischen Informationen zu den Einsatzgebieten und missionsbezogenen Beratungen sichergestellt und ausgebaut werden für:

Ocean Current
Influences AUV: Velocity, Drift, Endurance

Ocean Stratificaton
Influences Communication Ranges: Ship - AUV

- *SAR-Einsätze*

Strömungsvorhersagen für das „Search and Rescue Information System, SARIS“ zur Minimierung der Suchzeiten (Abb. 2).



Die Abbildung zeigt oben im Bild beispielhaft den Datenstrom für einen SAR-Einsatz, der durch das RCC Glücksburg für das Gebiet „SAR-See“ für deutsche Hoheitsgebiete koordiniert wird. Vom BSH werden die Vorhersagedaten des BSHcmod-Modells zweimal täglich als Datei nach Glücksburg transferiert. Dort wird die Datei vom SARIS-Programm gelesen und SAR Informationen ausgegeben (Drift einer Person im Wasser, Track eines SAR-Helikopters, Optimaler Einsatz aller Assets: SAR-Helikopter und SAR-Schiffe etc.). Der untere Teil der Abbildung zeigt die für die weltweiten Einsätze der Marine (inkl. „Combat SAR (CSAR)“) erforderlichen verschiebbaren Ozean-Modellnester, damit SARIS auch weltweit genutzt werden kann

- *AUV-Einsätze*

  Strömungsvorhersagen werden benötigt für die Beratung der Missionsplanung und Durchführung, zur Minimierung der Unsicherheiten durch Strömungsabdrift und zur Bestimmung der maximalen Einsatzzeiten des AUV im Strömungsfeld. Schichtungsvorhersagen werden benötigt zur Bestimmung der Reichweiten der Unterwasserkommunikation: Zur Bestimmung der Distanz mit der das AUV noch „getrackt“ werden kann, ihm neue Wegepunkte via Unterwasserkommunikation geben werden, oder gewonnene Messdaten abgefragt werden können.

  Die Abbildung zeigt Verteidigungsministerin von der Leyen (2013ff) beim Besuch des Marinestützpunkts Eckernförde (16. Jun. 2014). Der Kommandeur des Seebataillons, FKpt Krüger, erklärt das autonome Unterwasserfahrzeug, engl. „Autonomous Underwater Vehicle“ (AUV).

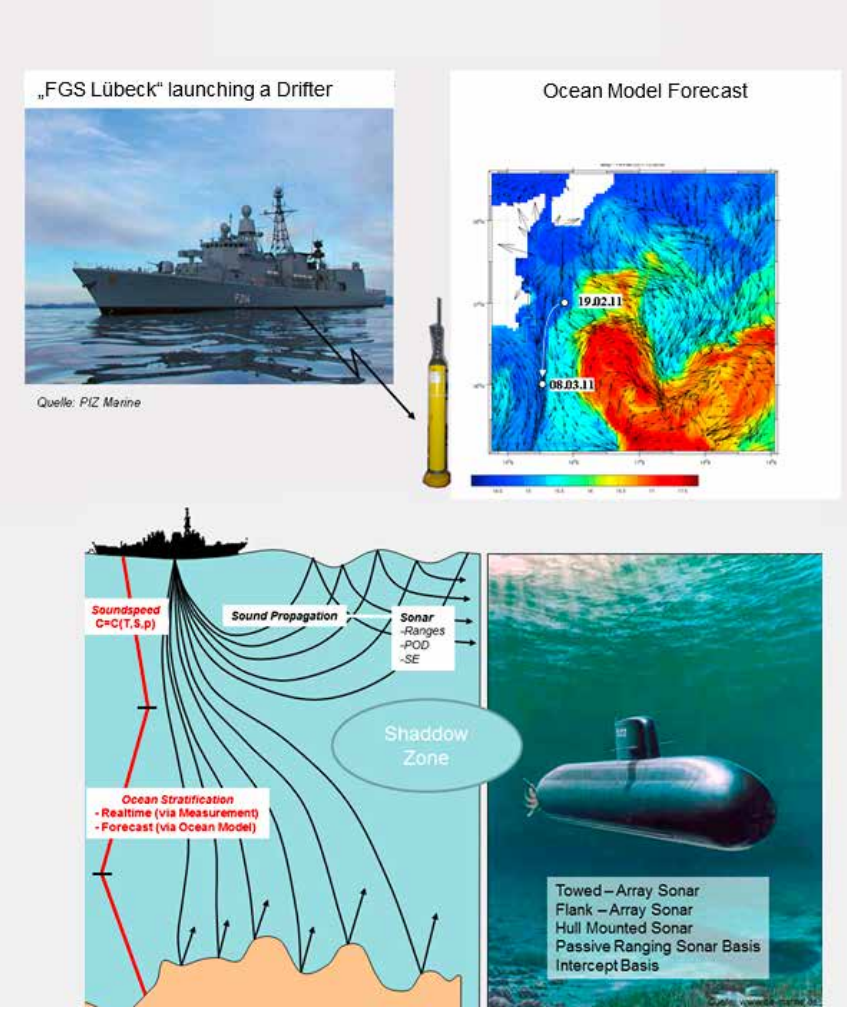
  Bei einer Übung mit dem niederländischen „Korps Mariniers“ wird die Unterwasserdrohne bei einer gemeinsamen Übung (1. Nov. 2016) eingesetzt. Die Vorhersage von Ozeanströmung und Schichtung kann zum Erfolg einer AUV-Mission beitragen: Die Strömung beeinflusst die Geschwindigkeit des AUV (0-5kn), die Abdrift gegen die es arbeiten muss und somit die Einsatzzeit/Leistung. Die Ozeanschichtung beeinflusst die Reichweite einer Unterwasserkommunikation zwischen Mutterschiff und AUV bzw. Schwarm von AUV's.

- *Uboot-Jagd* (SW, ASW)

  Vorhersage der Sonarperformance verschiedener Sonare/Sensoren vermittels eines hydroakustischen Folgemodelles. Aus den ozeanographischen Analysen und Vorhersagen können nun die unterwasserakustischen Verhältnisse im 3-D Raum abgeleitet werden.

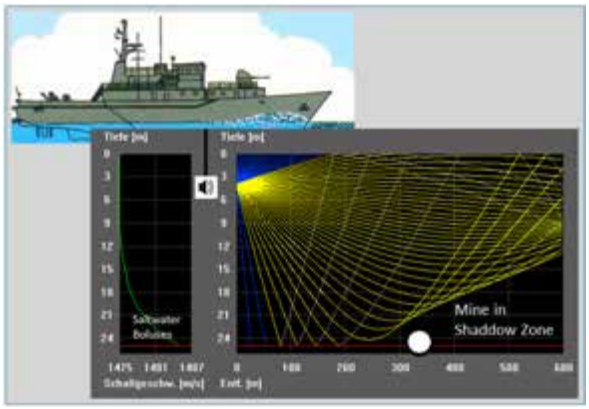
  Die Abbildung zeigt oben links eine Möglichkeit zur Messung von Schallgeschwindigkeitsprofilen vermittels eines ARGO-Drifters. 4D-Analysen und Vorhersagen der Schallgeschwindigkeitsfelder (Raum und Zeit) können mit den Ozeanvorhersagemodellen gewonnen werden. Oben rechts sind beispielhaft die Meeresoberflächentemperatur und die Meeresströmung in der Ionischen See dargestellt, einem Uboot

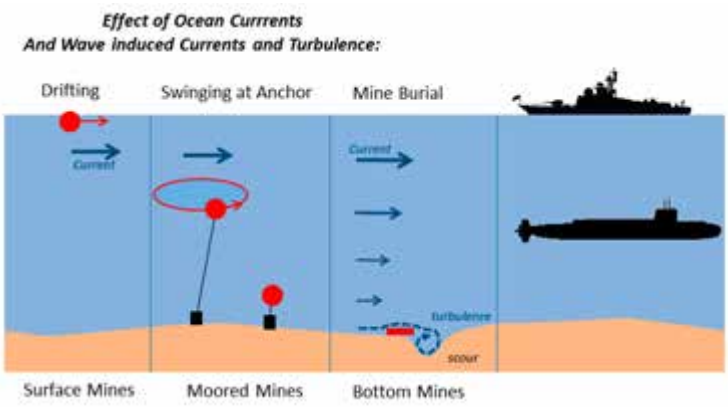
Übungsgebiet (Paul, 2012). Aus Temperatur, Salzgehalt und Druck wird die Schallgeschwindigkeit berechnet. Die Abbildung zeigt unten links schematisch ein Schallgeschwindigkeitsprofil in Rot. Dieses Profil kann die Vorhersage für einen bestimmten Zeitpunkt sein. Daraus leiten sich alle für diesen Zeitpunkt erwarteten Sonarparameter ab: Schallstrahlenverlauf (mit erster Information, ob Schallkanäle oder Schattenzonen vorliegen), Entdeckungswahrscheinlichkeiten, Signalüberschuß etc. Somit sind auch taktische Überlegungen möglich, wann der beste Zeitpunkt für eine Uboot-Jagd ist und mit welcher Sonarleistung für die unterschiedlichen Anlagen/Systeme (unten rechts im Bild) gerechnet werden kann.



- *Minen-Jagd* (MCM)

  Vorhersage und Analyse der Minenjagdverhältnisse. Dazu gehen die Schichtungsvorhersagen aus den Ozeanmodellnestern in die Minenjagdmodelle „Minenjagd Simulationsmodell (MSM)" (Abb. 5a) oder „Sonar Performance Indicator (SPI)" ein. So können auch Informationen zur Sonarleistungsfähigkeit gewonnen werden. Zur Missionsplanung können die Schichtungsdaten auch in andere Tools eingehen, wie z.B. dem Operations-Research System MCMEXPERT.





Die Abbildung zeigt mögliche Auswirkungen von Schichtung und Strömung einer Wassersäule auf Minen und Minenjagd:

- Eine Schicht, oder Tropfen von salzreichem Wasser am Meeresboden (Salzwasserblasen, engl. saltwater boluses) können eine Bodenmine maskieren (Schattenzone), also „unsichtbar" machen (Abb. 5a).

- Durch Meeresströmungen können Oberflächenminen verdriften. Verankerte Minen „schwojen“ um den Ankerstuhl. Eine Bodenmine kann durch Strömung versanden: Es kann an der Leeseite zu Auskolkungen kommen, die Mine darin versinken, bis diese bei anschließender Sedimentauffüllung, nicht mehr sichtbar/detektierbar ist (Abb. 5b).

- *Objekt-Drift*

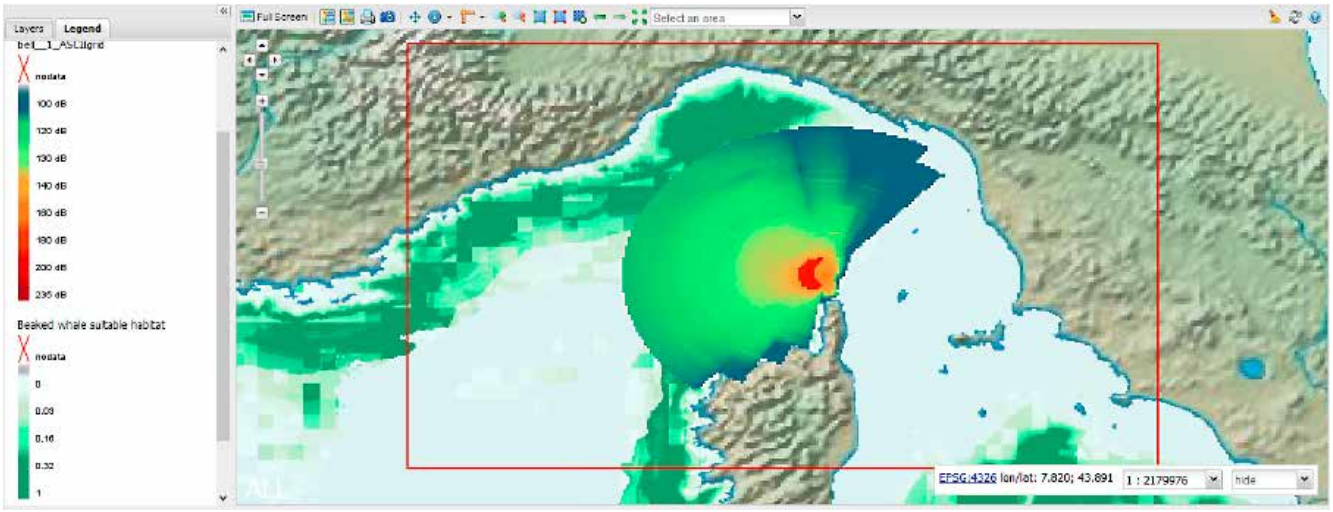
  Um zu bestimmen, wohin (teil)getauchte Körper (Container, AUV’s ohne Kontrolle) verdriften.

- *Taktik*

  Bereiche von Strahlströmungen/Jets, ozeanischen Fronten und Internen Wellen sollten in die taktischen Überlegungen, sowie der Schiffssicherheit (Uboote) mit einbezogen werden, denn diese erzeugen z.B. Störungen in der Signalausbreitung durch Variationen der Breite des ozeanischen Transmitterkanals („Sonarlöcher“), oder können für eine ökonomisch leise Fortbewegung und Einsparung von Energie (Batterieleistung) genutzt werden. Ein AUV oder Uboot kann sich durch die Strömung zumindest teilweise mittragen lassen.

- *Meeressäuger, Aktivsonareinsatz, Risikobegrenzung*

  Schichtungsvorhersagen aus den Ozeanmodellnestern können genutzt werden, um Regionen zu identifizieren, in denen z.B. durch Konvergenzen das vom Schiffssonar abgestrahlte Schallniveau akkumuliert bzw. fokussiert wird und dadurch ein erhöhtes Risiko für bestimmte Meeressäugetiere bedeuten kann. Diese Kenntnisse müssen in die Beratungspraxis eingebracht werden. Praktisch werden dazu den Ozeanmodellen hydroakustische Ausbreitungsverlustmodelle (Transmission Loss Modeling) nachgeschaltet und daraus Risikokarten zur Beratungsunterstützung erstellt (Abb. 6).



Die Abbildung zeigt Risikogebiete, in denen das empfangene Schallniveau über dem Schwellenwert von 140 dB re 1µPa liegt und somit für negative ökologische Auswirkungen sorgen kann. Die Fläche ist in beige dargestellt (A.B-Nagy et.al. (2012)). Es können auch andere Schwellenwerte kartiert werden, die für bestimmte ausgewählte Walarten kritisch werden können (Fläche in rot).

- *Bekämpfung von Menschenschmuggel und Schleusern*

  Die Strömungsvorhersagen aus den Ozeanmodellen werden u.a. genutzt zur METOC- Beratung der EU-Mission EUNAVORMED Operation Sophia an der die Deutsche Marine beteiligt ist. Siehe dazu auch das Faltblatt: „Unsere Marine hilft Menschen in Not“, (Marinekommando, Presse- und Informationszentrum, www.marine.de). Weitere militärische Bedarfsträger (MilNW) und zivile Dienststellen (Bundespolizei Lage- und Einsatzzentrale See, BND) werden ebenfalls zu diesem Zweck mit aktuellen Strömungsvorhersagen versorgt. Im Zusammenhang mit Einsätzen des Seebataillons wurden auch Informationen zur Brandungshöhe oder Brandungsströmung in Küstennähe abgefragt, da diese z.B. jegliche Art von Aktivitäten in Küstennähe/Brandungszonen beeinflussen können (Paul, 2010).

  Die Abbildung zeigt das Einsatzgebiet der Deutschen Marine im Mittelmeer (EU-Mission EU NAVOR MED Operation Sophia) zur Bekämpfung von Menschenschmuggel und Schleusern (Quelle: Bundeswehr.de).

Diese Fähigkeiten sind ebenfalls von Interesse für den Betrieb und Ausbau einer Multinational METOC Support Group (MN MSG).

Die Beschreibung der einzelnen Modelle erfolgt in Kapitel 6.

1.3 Bereitstellung der Ergebnisse für den Einsatz

Die Ozeanmodellnester werden für die Einsatzgebiete der Deutschen Marine aufgesetzt. Die Übermittlung der Ergebnisse von der „Produktionsstätte“ bis zum Bedarfsträger an Bord einer seegehenden Einheit oder einem Planungs-/ Einsatzstab erfolgt über:

- Intranet Bw
- FTP Abholpunkte (z.B. für MSTPA in der Norwegensee) auf einem Datenserver
- NATO METOC Data Hub (NMDH) bei ZGeoBw in Euskirchen
- E-Mail-Anhang.

1.4 Einordnung des Fachprojektes in die übergeordnete Zielsetzung zur Koordinierung der Forschungsarbeiten des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr

Die Koordinierung des Fachprojektes erfolgte zu Projektbeginn über das sog. Ziel- und Kennzahlensystem. Innerhalb dieses Systems gehörte das Fachprojekt zu dem strategischen Ziel „Ausbau von GeoInfo Einzelfähigkeiten“, dem Teilziel „Weiterentwicklung der ozeanographischen Modellfamilie für weltweite Einsätze der Marine“ und dem Bereichsziel „Ausweitung von Zirkulationsmodellen auf weltweite operationelle Anwendungen“.

Im Zuge des Leistungsprozesses „Geoinformationswesen sicherstellen“ (LP GEO) werden die Ergebnisse des Fachprojektes nun operationalisiert und (mit der Pflege der zugehörigen Software) als Vorhaben mittelfristig geplant.

1.5 Genehmigte Ziele des Fachprojektes

Die genehmigten Ziele des Fachprojektes sind die Erstellung von sechs „Regionalen Ozeanmodellen“ für die Einsatzgebiete der Deutschen Marine, sowie der Aufbau und die Entwicklung eines voll automatisierten RELOC-Systems (Relocatable Ocean Modeling System):

- Erstellung eines bathymetrischen- und numerischen Rechengitters für die jeweiligen Ozeanmodellgebiete mit Belegung der Land-Seegitterpunkte und Wassertiefen unter Beachtung der Stabilitätskriterien. Somit gibt es für jedes Modellnest eine grid.nc Datei, die bei jedem Modellstart gelesen wird.
- Versorgung des Ozeanmodelles mit meteorologischem Antrieb, zugeschnitten für das jeweilige Ozeanmodellgitter (Region und Gitterkonfiguration).
- Einschachtelung von RELOC in ein Ozeanmodell geringerer Auflösung zur Randwertversorgung (Randbedingungen von MERCATOR).
- Datenassimilation auf der Basis der optimalen Interpolation.
- Intelligente Funktionalitäten für die Restart- und Neustartsituation.

1.6 Der Nutzen des Fachprojektes für die Deutsche Marine

Das Fachprojekt steigert nicht nur die Effektivität in Bereichen der maritimen GeoInfo-Unterstützung, sondern macht diese überhaupt erst für bestimmte Bereiche möglich (z.B. genaue SARIS – Vorhersagen in außerheimischen Gewässern, Vorhersage der Schichtungs- und Schallfelder mit Auswirkung auf die Sonarverhältnisse für verschiedene Träger und Sensoren).

2 Der formale Start des Fachprojektes

Zuerst wurden umfangreiche Informationen über das geplante Fachprojekt „Regionales Ozeanmodell“ in dem sogenannten „Fachprojektblatt“ bereitgestellt. Die Informationen waren thematisch breit gefächert und wurden durch das Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (AGeoBw, jetzt Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, ZGeoBw) geprüft. In einer Fachprojektkonferenz wurde das Projekt durch Vertreter des Marineamtes (MarA) vorgestellt und begründet. Aufgrund positiver Bewertung und entsprechender Priorisierung wurde dann die Realisierung eingeleitet.

Am 31.01.2011 wurde das Fachprojektblatt, welches vom Verfasser erstellt und vorgelegt wurde, fachlich genehmigt und vom „Stellvertretenden Amtschef des Amtes für Geoinformationswesen der Bundeswehr (Stv AC AGeoBw, EDir Liebing)“ am 23.03.2011 gezeichnet.

Das Fachprojekt war damit bei AGeoBw (jetzt ZGeoBw) angegliedert und wurde aus den Projektmitteln dieser Ressortforschungseinrichtung finanziert und vom Verfasser fachlich betreut, vom Projektstart bis zum Projektende mit Übergabe der Ergebnisse in 2015.

Projektnehmer für das Fachprojekt war das „NATO Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE)“, aufgrund seiner Expertise für weltweite operationelle Ozeanvorhersagen für NATO-Einsatzgebiete, welche zu der Zeit keine deutsche Institution zur Verfügung stellen konnte.

Alle im o.g. Fachprojektblatt spezifizierten und zwingend notwendigen Leistungen, z.B. Anzahl der Modellnester und deren Installation im DMRZ Anteil Bw, sowie deren Kostennote, wurden im nächsten Bearbeitungsschritt in einem Vertrag zwischen Projektgeber (AGeoBw) und Projektnehmer (CMRE) festgelegt.

Der Vertrag „M/ AMG/ CA588“ zwischen CMRE und AGeoBw (eng. BGIO) wurde schlussendlich am 22.06.2013 vom Amtschef des AGeoBw General Brunner und dem Direktor des CMRE Dr. Tielbürger unterzeichnet.

In der Zeit vom 16.-27. März 2015 wurde das fertige Produkt – ein Computer mit allen Vorhersagemodellen – in das Rechennetz des DMRZ eingespleißt, alle Eingabe- und Ausgabedatenströme aktiviert und der operationelle Modellbetrieb gestartet.

3 Der aktuelle Sachstand, was bis jetzt erreicht wurde und Herausstellungsmerkmale

Das wichtigste Ergebnis ist, dass das Vorhaben RELOC realisiert wurde und seit seiner Installation im DMRZ im März 2015 störungsfrei arbeitet und täglich operationell nutzbare Ozeanvorhersagen für die Realzeitberatung der Flotte produziert.

Die erzeugten Vorhersageprodukte werden als Daten oder Graphiken vollautomatisch täglich bereitgestellt.

3.1 Fachlich „wissenschaftlicher Sachstand“

Der wissenschaftliche Sachstand entspricht dem im Fachprojektblatt und Vertrag mit dem CMRE geforderten Umfang: Entwicklung des „Model set-up“ für alle sechs Modellgebiete, Bereitstellung der Land-Seegitterpunkt Bathymetrien/Topographien, Organisation eines vollautomatischen Datenstromes für das ozeanographische Muttermodell MERCATOR und die meteorologischen Modelle (RLM und ICON-EU), sowie eines Skriptes für die Gesamtsteuerung des Modelliersystems. Auf das zugrunde liegende ROMS-Modell wird in Kapitel 4 und 5 Bezug genommen.

Während der Realisierung des Projektes und dem späteren operativen Betrieb zeigten sich wissenschaftlich technische Weiterentwicklungsmöglichkeiten, die später in diesem Bericht aufgeführt werden (Kapitel 7).

3.2 Sachstand zum „Operationellen Betrieb“

Das Gesamtsystem läuft durchgehend und stabil bereits seit März 2015 im operationellen Betrieb.

Trotzdem ist es erforderlich, dass dieses System fachkundig ozeanographisch betreut wird. Eine einfache Überwachung reicht nicht aus, denn die Kenntnis des komplexen Gesamtsystems ist notwendig, wenn darin gearbeitet werden muss: Gelegentlich ändern sich die Eingabeformate bei dem Ozeanmodell MERCATOR oder es muss eine Anpassung an die hochaufgelösten meteorologischen Nester erfolgen, weil es z.B. ein neues RLM-Nest für eine erforderliche Region gibt, oder es ist die Verwendung von neuen Python- oder NetCDF – Bibliotheken erforderlich. Bei der Portierung auf eine neue Rechnergeneration (ca. alle 3-5 Jahre am DMRZ) oder eines neuen ROMS-Rechenkernes (ROMS-Version) ist die Kenntnis des Gesamtsystems ebenso erforderlich wie bei der Implementierung von wissenschaftlich technischen Neuerungen (siehe Kapitel 7, Weiterentwicklung).

3.3 Herausstellungsmerkmale

Es gibt im Wesentlichen zwei wichtige Herausstellungsmerkmale, die hier vorgestellt werden.

3.3.1 Vollautomatischer operationeller Betrieb mit intelligenten Funktionalitäten für die „Restart- und Neustartsituation“

Kommt der Programmablauf einmal zum Erliegen z.B. aufgrund von Wartungsarbeiten an der Rechenanlage, Rechnerstillstand oder nicht zur Verfügung stehenden Eingabedateien (meteorologische- und ozeanographische Felder), dann startet das Gesamtsystem bei nächster Gelegenheit selbständig neu, mit den aktuell gezogenen Feldern als Restartfile.

3.3.2 Optimale Versorgung der Ozeanmodelle mit hoch aufgelöstem meteorologischem Antrieb, der exakt zugeschnitten ist auf die Region und Gitterkonfiguration

Der Geoinformationsdienst der Bundeswehr betreibt seine eigenen hochaufgelösten meteorologischen Regionalmodelle für die Einsatzgebiete. Diese sogenannten RLM- Nester basieren auf dem COSMO-Model und haben eine horizontale Auflösung von 7 km. Der Vorhersagezeitraum der genutzten RLM’s umfasst 48 h – 72 h. Da die RLM-Modellnester durch die Gruppe numerische Wettervorhersagemodelle des ZGeoBw beim Deutschen Wetterdienst (MetBw in Offenbach) selbst konfiguriert werden können, ist es auch möglich, die meteorologischen und ozeanographischen Modelle optimal aufeinander abzustimmen, um z.B. die Datenversorgung zu optimieren.

Am 20.01.2015 hat der DWD das ICON-Globalmodell eingeführt, mit einem horizontalen Gittermaschenabstand von 13 km. Durch eine lokale Maschenweitenverfeinerung wurde seit dem 21.07.2015 für das Gebiet Europa das sogenannte ICON-EU-Nest aktiviert. Die besonderen Maße (Größe und Lage) dieses großen Nestes gehen auf den Wunsch der Bundeswehr zurück. Deswegen wird auch ein Teil des Bw-Anteils am gemeinsamen DMRZ für diese Berechnungen verwendet (Majewski et al., 2016, S.14). Vergleiche des DWD haben gezeigt, dass das ICON-EU - Nest bessere Vorhersagen liefert als das bisherige COSMO-EU - Nest. Daher löst das ICON-EU-Nest ab 2016 sowohl das COSMO-EU-Nest des DWD, als auch das entsprechende RLM der Bw für diese Region ab.

Für Regionen/Einsatzgebiete außerhalb des ICON-EU Gebietes ist die Verwendung der weltweit verschiebbaren RLM's auf COSMO-Modell basierend mit einer Auflösung von 7 km, für die Bundeswehr weiterhin erforderlich.

Das bedeutet, dass auch seit 2016 unsere Ozeanmodellnester, die in den ICON-EU Ausschnitt fallen, nunmehr von einem deutlich besseren meteorologischen Antrieb profitieren. Davon betroffen sind die Ozean-Nester: Straße von Gibraltar, östliches Mittelmeer und Schwarzes Meer. Unsere Ozeanmodellnester, welche außerhalb des ICON-EU Ausschnittes liegen, können trotzdem immerhin noch weltweit mit einer Auflösung von 7km durch die RLM's versorgt werden. Davon betroffen sind die Ozean-Nester: Straße von Hormus, Golf von Aden und das große Seegebiet vor Somalia.

4 Theoretischer Hintergrund: Von den physikalischen Gleichungen zur programmtechnischen Umsetzung durch das ROMS – Modell

Die Aufgabe eines Ozeanvorhersagemodelles ist es, ausgehend vom jetzigen Zustand des Ozeans (Analyse) die zukünftige Entwicklung des Ozeans vorherzusagen (Prognose/Vorhersage). Die „Analyse“ gibt Aufschluss über den aktuellen Zustand der Größen wie z.B. die Meeresströmung oder Wassertemperatur und die „Prognose“ wie diese Größen in Zukunft, also morgen oder übermorgen sein werden. Das ausgewählte Ozeangebiet nennen wir „Modellgebiet“.

4.1 Das System der hydrodynamischen Gleichungen

Der Zustand des Ozeans wird vollständig durch sieben physikalische Zustandsgrößen beschrieben, wobei „vollständig“ bedeutet, dass die Größen

u- Ostkomponente der Horizontalgeschwindigkeit

v- Nordkomponente der Horizontalgeschwindigkeit

w- Vertikalgeschwindigkeit

p- Druck

T- Temperatur

S- Salzgehalt

ρ - Dichte

an jedem Ort und zu jeder Zeit bekannt sind. Dazu gib es ein Gleichungssystem von sieben linear unabhängigen Gleichungen für die sieben gesuchten Größen.

Diese sieben Gleichungen leiten sich ab aus den Erhaltungssätzen der Physik für Drehimpuls, Masse und Energie, sowie der Zustandsgleichung für Meerwasser.

Somit gibt es ein System aus sechs nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen

(6 x Dgln) und einem Polynom höherer Ordnung (1x Poly).

Dieses Gleichungssystem ist grundsätzlich lösbar, aber es wurde bisher noch nicht analytisch gelöst. Daher wurde dieses Gleichungssystem diskretisiert und numerisch gelöst. Die numerische Lösung erfolgt dann auf einem Computer, hier auf der Basis des ROMS-Modelles (siehe Kapitel 4.4).

Das Gleichungssystem bezeichnet man auch als „Primitive Gleichungen“ (engl. „primitive equations“) und ist die Basis nahezu aller Ozeanmodelle.

Genaue Kenntnisse der Gleichungen – und vor allem deren physikalische Bedeutung – sind wichtig für das Verständnis des numerischen Gesamtsystems, insbesondere wenn in dem Gesamtsystem RELOC mit seinem komplexen Integrationskern ROMS gearbeitet werden muss. Dies ist z.B. der Fall, wenn Steuerdateieinstellungen für den Aufruf der einzelnen physikalischen Programmmodule neu angepasst werden, oder einzelne physikalische oder numerische Größen, oder gesetzte Parameter neu gesetzt/aktualisiert werden müssen. Da ROMS selbst innerhalb einer Community weiterentwickelt wird, können in gewissen Zeitabständen die Weiterentwicklungen in Form neuer Modellversionen implementiert bzw. ausgetauscht werden. Ebenso bei einer Rechnerregeneration muss ggf. Software neu angepasst werden, schon aufgrund neuer Compiler, oder Module. Nun zu den Gleichungen:

1) (3xDgln) Die **„Drehimpulserhaltungsgleichungen“** werden in der Hydrodynamik beschrieben durch die sog. „Navier-Stokes Gleichungen“, benannt nach Henri Navier und Gabriel Stokes. Diese Gleichungen für die Raumkomponenten x- (Länge), y- (Breite) und z- (Tiefe) beschreiben „die zeitliche Veränderung des Geschwindigkeitsvektors“ der Meeresströmung.

   Wichtig: Die „Navier-Stokes Gleichungen“ sind die Bewegungsgleichungen für die Momentanwerte der Strömung. Die Reynoldsgleichungen sind die Bewegungsgleichungen für die Mittelwerte der Strömungsgrößen in einer turbulenten Strömung. Letztere werden im ROMS-Kern verwendet.

   Vorab: Ausgehend von den „Navier-Stokes Gleichungen“ leiten sich die „Reynolds gemittelten Navier-Stokes Gleichungen“ ab (Reynoldsgleichungen). Somit wird der wichtige Unterschied zwischen beiden Gleichungen deutlich, welcher in dem Spannungstensor besteht, den sog. Reynoldsspannungen bzw. den turbulenten Zusatzspannungen.

   Die Navier-Stokes Gleichung in „Vektorschreibweise“ zeigt,

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{g} + \vec{f} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \qquad (1)$$

dass die Veränderung des Geschwindigkeitsvektors balanciert wird durch die Schwere, die Corioliskraft, den Druckgradienten und die Reibung (engl. drag). Mit dem Reibungskoeffizienten μ wird die Zähigkeit, Dickflüssigkeit, bzw. Viskosität einer Flüssigkeit beschrieben. Teilen wir (auf beiden Seiten alle Terme) durch die Dichte ρ, dann wird aus der dynamischen Viskosität μ die kinematische Viskosität ν, ν=μ/ρ. In Ansätzen zur Ozeanmodellierung, siehe dazu die Community Webpage: www.myroms.org und das detaillierte ROMS-Tutorial (Hedström, 2016), oder auf ROMS basierende Modellsysteme wie RELOC, CORSAR (Onken, 2015a, 2015b) oder ROPS (Onken, 2017), finden sich noch zwei zusätzliche Terme, die in Lehrbüchern zur Hydrodynamik zumeist nicht zu finden sind (weil vereinfacht), welche aber in Gleichung (1) ebenfalls enthalten sind, um den Naturverhältnissen möglichst nahe zu kommen:

- $\vec{\mathcal{F}}$, „Forcing-Term" für extern einwirkende Kräfte, wie z.B. Gezeitenkräfte, Windkräfte, oder Auftriebskräfte (langwellige/kurzwellige Strahlung, latente/sensible Wärme, Verdunstung, Niederschlag, Flusswasser Zulauf, diese beeinflussen Temperatur und Salzgehalt im Ozean und damit auch die Dichte und den Auftrieb, die sog. „Buoyancy-Kräfte").
- $\vec{\mathcal{D}}$, „Diffusiver Term".

Dabei ist in Gln (1)

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \tag{2}$$

der Lagrange Operator. In der „Multi-Index Schreibweise" ist dann Gln (1)

$$\frac{\partial \vec{v_i}}{\partial t} + \vec{v_j}\ \frac{\partial \vec{v_i}}{\partial x_j} = \vec{g_i} + \vec{f_i} - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu\ \frac{\partial^2 \vec{v_i}}{\partial x_j^2} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \tag{3}$$

mit i,j=1,2,3, $\vec{v_{i,j}} = (u, v, w)$, $x_{i,j} = (x, y, z)$, $\vec{f_i} = (f_x, -$

Aus Gln (3) erhält man direkt in „Komponentenschreibweise":
j=1,2,3

$$i = 1 \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = g_x + f_x - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \tag{4}$$

$$i = 2 \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = g_y - f_y - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \tag{5}$$

$$i = 3 \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = g_z + f_z - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \mathcal{F}_w + \mathcal{D}_w \tag{6}$$

Approximationen: Zuerst werden die Horizontalkomponenten der Schwerebeschleunigung $g_x = g_y = 0$ und die Vertikalkomponente der Corioliskraft $f_z = 0$ gestrichen. Dann wird in der vertikalen Impulsgleichung (6) die hydrostatische Approximation $\frac{Dw}{Dt} = 0$ (linke Seite, vgl. (2)) gemacht und die Reibung (in der Vertikalkomponente) $\nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) = 0$ vernachlässigt. Dito $\mathcal{F}_w = 0$, $\mathcal{D}_w = 0$. Dann verbleibt aus Gln. (4), (5) und (6)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \tag{7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -f_y - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \tag{8}$$

$$0 = g_z - \frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial z} \tag{9}$$

Nun zum Reynolds-Ansatz: Hierbei besteht das Geschwindigkeitsfeld aus einem Mittelwert und Fluktuationen um den Mittelwert: $\vec{v} = \bar{v} + v'$, $p = \bar{p} + p'$. Dabei soll der Mittelwert über alle Fluktuationen Null sein: $v' = 0$, $p' = 0$. Wird dieser Ansatz direkt in Gln (3) gesetzt (am einfachsten/kürzesten), dann erhält man:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i'}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + v_j' \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \bar{v}_j \frac{\partial v_i'}{\partial x_j} + v_j' \frac{\partial v_i'}{\partial x_j} =$$

$$g_i + f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} + \nu \frac{\partial^2 v_i'}{\partial x_j^2} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \tag{10}$$

Jetzt werden beide Seiten über die Zeit gemittelt:

$$\overline{\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial v_i'}{\partial t}}_{=0} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \underbrace{v_j' \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j}}_{=0} + \underbrace{\bar{v}_j \frac{\partial v_i'}{\partial x_j}}_{=0} + v_j' \frac{\partial v_i'}{\partial x_j}} =$$

$$\overline{g_i + f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i}}_{=0} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 v_i'}{\partial x_j^2}}_{=0} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}}} \tag{11}$$

Bei den dann verbleibenden Termen

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \underbrace{\overline{v_j' \frac{\partial v_i'}{\partial x_j}}}_{=a} = g_i + f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \tag{12}$$

wird a) auf die rechte Seite gebracht und umgeformt (Kontinuitätsgleichung und Produktregel rückwärts), dann ergibt sich die Reynoldsgleichung:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = g_i + f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2}}_{=b} \underbrace{- \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\left(v_j' v_i' \right)}}_{a_Reynolds} + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \tag{13}$$

Die Reynoldsgleichung unterscheidet sich formal nur durch einen einzigen zusätzlichen Term von der Navier-Stokes Gleichung, nämlich durch die Reynoldsspannungen, welche in Gln (13) als „a_Reynolds" markiert wurden und oft auch „turbulente Zusatzspannungen" genannt werden. Werden in Gln (13) die Terme „a_Reynolds und „b" zusammengefasst, indem $\frac{\partial}{\partial x_j}$ vor die Klammer gezogen wird,

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = g_i + f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\left(v_j' v_i' \right)} - \nu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right) + \vec{\mathcal{F}} + \vec{\mathcal{D}} \tag{14}$$

dann erhält man die bekannten Reynoldsgleichungen in Komponenten (Hedström, 2016, Gleichungen (1) - (3), oder Onken, 2015b Gleichungen (1)-(3)):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \underbrace{\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)}_{= \vec{v} \cdot \nabla u} - fv = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \tag{15}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \underbrace{\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)}_{= \vec{v} \cdot \nabla v} + fu = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \tag{16}$$

$$\rho g = \frac{\partial p}{\partial z} \tag{17}$$

Nun werden die Reynoldsspannungen parametrisiert:

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{und} \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z} \tag{18}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}\left(-K_M\frac{\partial u}{\partial z} - \nu\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \quad (19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla v + fu = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\left(-K_M\frac{\partial v}{\partial z} - \nu\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \quad (20)$$

$$\rho g = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (21)$$

2) (1xDgl) Die „Kontinuitätsgleichung“ besagt, dass die „Masse Ozeanwasser“ erhalten bleibt („Masseerhaltung Wasser“). Sie bringt Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsquerschnitt in Zusammenhang: Wird der Strömungsquerschnitt kleiner (bei unveränderter Volumen- Wasserfördermenge), dann muss die Strömungsgeschwindigkeit zunehmen, die Stromlinien werden enger und es gibt ggf. eine „Strahlströmung“ im Ozean.

Masseerhaltung Lagrange: $\frac{D\rho}{Dt} + \nabla\cdot(\rho\,\vec{v}) = 0$ (22)

Masseerhaltung Euler‘sch: $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\,\vec{v}) = 0$ (23)

Approximationen: Es wird die Boussinesq-Approximation angewandt, d.h. kleinräumige Dichteunterschiede und Schwankungen werden vernachlässigt, $\frac{D\rho}{Dt}=0$, $\frac{\partial\rho}{\partial t}=0$. Ist die Dichte ρ unabhängig (oder nur schwach abhängig) von dem Ort/ Position, dann kann die Dichte vor den Divergenz-Operator gezogen werden $\rho\nabla\cdot\vec{v}$ und es wird aus der Masseerhaltung nur noch die Volumenerhaltung in der inkompressiblen Flüssigkeit:

$$\nabla\cdot\vec{v} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (25)$$

3) (2xDgln) Die **„Erhaltung einer Größe C“** wird durch eine „Advektions- Diffusions-Gleichung“ beschrieben (Gleichung 26, jeweils für C = T und

C = S). Setzen wir zuerst für die Größe C = S (Salz), dann besagt dies, dass Salz im Ozeanwasser nicht einfach verschwinden kann. Salz kann durch Advektion (Meeresströmung) an einen anderen Ort gelangen, oder sich auf kleineren Raumskalen (Millimeter-Skala oder kleiner, bis hin zum Molekül, Atom oder Ladungsträger), aufgrund der thermischen Energie wegbewegen, aber nicht völlig verschwinden „im abgeschlossenen System“. Somit beschreibt die Gleichung die Erhaltung der Masse an Salz im Meer (**„Masseerhaltung Salz“**).

Wird für den Skalar C = T (Temperatur) gesetzt, so führt die Gleichung auf die „Erhaltung der thermischen Energie“. Diese Form der **„Energieerhaltung“** entspricht dem „Ersten Hauptsatz der Thermodynamik“, der den Energieaustausch eines Systems mit seiner Umgebung beschreibt. Nur in einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie konstant und dessen Änderung Null. Die Energieformen Wärme und Arbeit sind umwandelbar, aber nicht erzeug- oder vernichtbar.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla C = -\frac{\partial}{\partial z}\left(-K_C\frac{\partial C}{\partial z} - \nu_\theta\frac{\partial C}{\partial z}\right) + \mathcal{F}_C + \mathcal{D}_C \quad (26)$$

Darin sind die turbulenten Tracer Flüsse (vgl. Gln 18) wieder parametrisiert:

$$\overline{C'w'} = -K_C\frac{\partial C}{\partial z} \quad (27)$$

4) (1x Poly) Die **„Zustandsgleichung“** für Meerwasser beschreibt in einer Funktion – ein Polynom – den Zusammenhang zwischen Temperatur, Salzgehalt, Druck und der daraus resultierenden Dichte. Dichte ist eine nichtlineare Funktion von Temperatur (T), Salzgehalt (S) und Druck (p).

$$\rho = \rho\,(T,S,p) \tag{28}$$

Tabelle1: Aufstellung der verwendeten Variablen.

C (x,y,z,t)	skalare Größe, wie Temperatur, Salzgehalt, Nährstoffe etc.
$\mathcal{D}_u$, $\mathcal{D}_v$, $\mathcal{D}_C$	diffusive Terme
$\mathcal{F}_u$, $\mathcal{F}_v$,$\mathcal{F}_C$	Antriebsterme
f (x,y)	Coriolisparameter
g	Schwerebeschleunigung
h (x,y)	Wassertiefe zwischen Meeresboden und mittl. Meeresniveau
ν, ν_θ	molekulare Viskosität
K_M, K_C	vertikale Wirbelviskosität und Diffusivität
p	totaler Druck
Q_C	Oberflächenkonzentrationsflüsse von Temperatur oder Salzgehalt
t	Zeit
T (x,y,z,t)	potentielle Temperatur
S (x,y,z,t)	Salzgehalt
τ_b^x, τ_b^y	(x,y) - Komponenten des Bodenspannungsvektors $\overrightarrow{\tau_b}$
τ_s^x, τ_s^y	(x,y) - Komponenten des Windspannungsvektors $\overrightarrow{\tau_s}$
u,v,w	(x,y,z) – Komponenten des Geschwindigkeitsvektors $\vec{v}$
x,y	horizontal Koordinaten
z	Vertikalkoordinate
c_p	Spezifische Wärme von Seewasser
ζ (x,y,t)	Meeresoberflächenauslenkung

4.2 Anfangsbedingungen

Ein Satz an nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen stellt wie immer ein „Anfangs- und ein Randwertproblem“ dar. Hier geht es jetzt um das *Anfangswertproblem*. Die Differentialgleichungen lassen sich bis auf eine beliebige „Integrationskonstante“ numerisch lösen, genau wie es auch bei analytischen Lösungen von Differentialgleichungen bekannt ist. Diese Integrationskonstante stellt den Anfangszustand dar, von dem aus die Integration für jeden Rechenschritt beginnt. Zu diesem Startzeitpunkt müssen die sieben Zustandsgrößen für alle Gitterpunkte bekannt sein.

Um die Gitterpunkte zur Initialisierung zu belegen, wird auf die Analyse des operationellen Modelles „MERCATOR-Global“ zurückgegriffen. Das „Muttermodell“ hat eine Auflösung von 1/12° (= 5‘ = 5 nm = 9,26 km) und bietet einen Vorhersagezeitraum von 7 Tagen.

Es wurde auch die alternative Verwendung von höheraufgelösten beckenweiten Modellen für verschiedene Regionen diskutiert und testweise genutzt: so könnte für das Mittelmeer z.B. das Mediterranean Forecasting System (MFS) des INGV der Universität Bologna (ITA) verwendet werden. Dieses hat eine Auflösung von 1/16° (= 3,75‘ = 3,75nm = 6,945 km). Aber der vergleichsweise geringen Verbesserung in der Auflösung bei dem MFS-Modell von gerade mal 1,25 nm, steht der Vorteil des MERCATOR- Global Modells gegenüber[5], dass bei kaum geringerer Auflösung, die einzelnen RELOC – Nester beliebig weltweit in die sich ändernden globalen Einsatzgebiete verschoben werden können.

Eine Vielzahl verschiedener Modellquellen zur Belegung der Anfangsbedingungen für die RELOC-Nester wird auch nicht angestrebt („Flickenteppich an verschiedenen Modellen“), da die damit verbundene Vielzahl an ver-

[5] Darüber hinaus ist das MERCATOR Modell im Mittelmeerraum besser als das zunächst testweise genutzte MFS Modell (pers. Mitteilung Dr. Onken, CMRE/HZG), es reproduziert die Wassermassen besser. MFS ist in der Thermokline zu kalt.

schiedenen Datenströmen eine entsprechende Störanfälligkeit mit sich bringt, was bei einem voll automatisierten „operationellen Modelbetrieb“ absolut unerwünscht ist. Das ist auch der Grund, warum große Zentren, wie der britische Wetterdienst, bei dem auch die Ozeanographie stark vertreten ist (UKMO), ihre regionalen Nester für Krisenregionen auf Ihr Ozean-Globalmodell (FOAM) aufsetzen. Wie bei dem französischen Globalmodell MERCATOR, so basiert auch bei dem britischen Globalmodell FOAM der Modellkern auf dem Community Modell NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean), welches in der Community beständig weiterentwickelt wird.

Die Europäische Kommission hat die französische Non-Profit Gesellschaft Mercator- Ocean beauftragt, einen Dienst, der bekannt ist als „Copernicus Marine Environment Monitoring Service“ (CMEMS), bereitzustellen.

Dieser Dienst (CMEMS) dient als europäischer maritimer Provider und wird zukünftig durch die (Eigentums-) Beteiligung verschiedener Nationen getragen. Nochmals: Aus dem Gesamtpool verschiedenster Modelle, wird hier aus o.g. Gründen das MERCATOR-Modell verwendet.

Auf den CMEMS-Server wird täglich mittels eines Python-Skriptes zugegriffen. Es wird für die einzelnen Modellnester der passende Ausschnitt aus dem Globalmodell herausgeschnitten und zu dem DMRZ kopiert. Dort werden die Daten weiter preprozessiert, d.h. die Mercator-Daten für die RELOC-Nester angepasst, da diese unterschiedlichen Gitterpunktfelder (vertikal und horizontal) und Projektionen haben. Dazu gehören u.a. Koordinatentransformationen, Umrechnung von Vektoren und Interpolation auf das entsprechende Modellnest.

Einer Initialisierung mit Klimadaten wird nicht gefolgt, da diese oft zu sehr von den aktuellen Verhältnissen abweichen, weil durch die 30 Jahre Mittelung mesoskalige Strukturen (z.B. Wirbel, Mäander, Transienten) weggemittelt oder verwischt werden. Eine Initialisierung mit echten Messungen also in-situ Daten wie z.B. ARGO-Daten ist für globale Skalen/Modelle ideal, aber für kleine Nester nicht überall in ausreichender Menge (flächendeckend) verfügbar. Eigene flächendeckende in-situ Vermessungen, gleichzeitig mit mehreren Forschungsschiffen u.a. zur Versorgung regionaler Modelle, sind sehr aufwändig und wurden daher auch nur für besondere und auch zeitlich befristete Vorhaben, wie z.B. MILOC- oder REA-Surveys durchgeführt (Paul, 2015, S.27ff).

4.3 Randbedingungen

Nun geht es um das *Randwertproblem* des Differentialgleichungssystems, d. h., die Lösung muss an den Rändern vorgeschrieben werden, bzw. die Lösung muss an den Rändern erfüllt sein. Die „Modellbox“ hat eine Oberfläche, eine Randfläche zum Meeresboden und im allgemeinen vier seitliche Ränder/Flächen: im Norden, Süden, Westen und Osten, abhängig davon wie die Modellbox geographisch liegt und wie daraus folgend, die Verteilung der Land- Seegitterpunkte ist.

4.3.1 Oberflächenrandbedingungen

Der Zustand, also die Lösung des Modellozeans an der Oberfläche, hängt stark von dem Austausch mit der darüber befindlichen Atmosphäre ab. Daher werden die einzelnen Ozeanmodellnester mit den „darüber befindlichen“ hochaufgelösten meteorologischen Modellnestern[6], den RLM's der Gruppe MetBw am DWD in Offenbach (Majewski et. al., 2016) im operationellen Betrieb in Echtzeit gekoppelt. In den Gebieten, in denen das ICON-EU-Nest des DWD verfügbar ist, wird dieses genutzt. Bei der Kopplung handelt es sich derzeit um eine Einwege-Kopplung[7], das heißt, der aktuelle Zustand der Atmosphäre (Analyse) und die zeitlich- und räumlich vorhergesagten Zustandsgrößen (Vorhersagen) werden genau passend in „Ein Stunden Schritten“ (derzeitiges Sampleintervall) an das Ozeanmodell übergeben. Das Ozeanmodell reagiert nun auf diesen meteorologischen Antrieb, bzw. das meteorologische „Forcing“. Dazu werden sieben meteorologischen Größen aus der Datenbank des DWD mit stündlichen Werten ausgelesen, aufgearbeitet (Anpassung der verschiedenen Gitter und Projektionen, Berechnung abgeleiteter Größen, wie z.B. dem Windstress aus dem Windvektor) und als Eingabedatei (*roms_met_frc_datum.nc*) für den nächsten ROMS- Rechenlauf bereitgestellt:

1) **Oberflächenwind** (*wind_u_v_10m_date.nc*). Durch die Windreibung werden die Meeresoberflächenströmungen maßgeblich bestimmt, oder modifiziert[8] (Ekman-Strömung), sowie das Druckfeld geändert.

---

[6] Zum Vergleich die Auflösung bekannter meteorologischer Modelle/Modellnester:
- ICON-global (DWD): horizontal 13 km
- ICON-EU (DWD): horizontal 7 km, nutzen wir für die Ozeannester: St. v. Gibraltar, östliches Mittelmeer, westliches Schwarzes Meer
- RLM's (BW): 7 km, genutzt für die Ozeannester: Golf v. Aden, Str. v. Hormus, Somalia
- GFS-global (NOAA/NCEP): horizontal 28km. Wird trotz grober Auflösung gerne von Seeleuten genutzt, da es frei und kostenlos im Internet verfügbar ist. Mit der zugehörigen Software „zyGrib“ kann dann an Bord maßgeschneidert und komprimiert ein Datenausschnitt im GFS-Grib Format ausgewählt und via Modem geladen werden, um dann meteorologische Karten mit „zyGrib“ an Bord zu plotten („Box um das eigene Boot“). Schon aufgrund der Auflösung werden diese Daten nicht als Antriebsfelder genutzt.

[7] Eine „Zweiwege Kopplung“, bei der die Reaktion des Ozeans, bedingt durch den met. Antrieb, auch wieder an das atmosphärische Model zurückgegeben wird, ist Gegenstand aktueller Forschung. So können z.B. erhöhte Wärmeinhalte des Ozeans auch die Zustandsgrößen der Atmosphäre beeinflussen, wie bei der Entstehung von Wirbelstürmen – Hurrikans – El Nino etc., bekannt.

[8] Auch ohne Wind gibt es z.B. starke Gezeitenströme, diese werden aber bei Wind/Sturm modifiziert: „Sturmfluten“.

2) **Niederschlag** (*total_accumulated_precipitation_date.nc*). Durch Niederschlag und Verdunstung ändert sich der Salzgehalt. Die Meeresdichte ist abhängig von Temperatur, Salzgehalt und Druck.
3) **Kurzwellige Einstrahlung** (*short_wave_radiation_date.nc*). Verändert die Temperatur in den oberflächennahen Schichten des Ozeans und daher die Wärmeinhalte. Somit kann es erst zum Tagesgang in der Meeresoberflächentemperatur kommen.
4) **Bewölkung** (*total_cloud_cover_date.nc*). Bei starker Bewölkung kann die Strahlungsenergie der Sonne schlechter die Meeresoberfläche erreichen und für eine Temperaturerhöhung sorgen (Punkt 3), daher ist die Kenntnis der Wolkenbedeckung notwendig. Eine konstante langwellige Ausstrahlung der Erde kann durch die Bewölkung gedeckelt oder zugelassen werden: „Ausstrahlungswetter".
5) **Luftdruck** (*pressure_msl_date.nc*). Großräumige Änderungen des Atmosphärendruckes beeinflussen auch die Höhe der Meeresoberflächenauslenkung und ist auch wichtig für die Berechnung der Verdunstung.
6) **Relative Feuchte** (*relative_humidity_date.nc*). Gibt an, wieviel Prozent des maximal möglichen Wasserdampfgehaltes die Luft im Augenblick enthält. Aus der relativen Feuchte und der aktuellen Temperatur kann die Taupunkttemperatur berechnet werden, aus der Taupunkttemperatur umgekehrt auch die relative Feuchte. Unterhalb der Taupunkttemperatur kann sich (bei konst. Druck) der in der Luft enthaltene Wasserdampf als Tau (oder Nebel) abscheiden und somit zu einem Eintrag von Feuchte in den Ozean kommen (latente Wärme). Wichtig für die Wärme- und Wasserbilanz ist aber auch der umgekehrte Fall, die Verdunstung.
7) **Lufttemperatur** (*air_temp_2m_date.nc*). Die Lufttemperatur ist für den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre eine wichtige Größe (sensible Wärme) und für die Berechnung der latenten Wärme.

Diese sieben Größen sind wichtig für den Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre. Sie wechselwirken miteinander bzw. bedingen einander, was am Beispiel der *Strahlungs- und Wärmeflüsse* deutlich wird:

Bei der Betrachtung der *Wärmeflüsse* durch direkte Wärmeleitung (z.B. bei zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur: von Warm nach Kalt) oder Wärmeströmung (z.B. Golfstrom), sind die Auswirkungen durch einen Wärmeaustausch in Form der „fühlbaren/sensiblen Wärme" direkt messbar (Punkt 7, Lufttemperatur). Kommt es zu Verdunstung oder Niederschlag (Punkt 2 und 6) von Wasserdampf, so wird die mit dem Prozess (Phasenübergang) verbundene „verborgene/latente Energie" freigesetzt oder gebunden, wodurch sich die Lufttemperatur wiederum erhöhen/erniedrigen kann (Punkt 7).

Neben den (sensiblen und latenten) Wärmeflüssen sind die *Strahlungsflüsse* (Wärmestrahlung, also elektromagnetische Strahlung, z.B. im Infrarotbereich) von Bedeutung: Die kurzwellige Einstrahlung wurde in Punkt 3 bereits aufgeführt, die langwellige Ausstrahlung ist wiederum abhängig von der Temperatur (global gemittelt nach Stefan-Boltzmann-Gesetz), aber auch von der Bewölkung die eine Ausstrahlung reduzieren kann. Punkt 3 und Punkt 4 führen auf eine Betrachtung der „Strahlungsbilanz".

An der Meeresoberfläche $z = \zeta(x,y,t)$ wird der vertikale Impulstransport durch die Windschubspannung (Windstress ($\overline{\tau_s}$) beschrieben und die Drehimpulsgleichungen (19) und (20) ersetzt durch

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_s^x (x,y,t) \tag{29}$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_s^y (x,y,t) \tag{30}.$$

Die dazu gehörende Routine berechnet den Windstress aus dem Wind (bulk flux routine).

Aus der Kontinuitätsgleichung (25) wird an der Seeoberfläche

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \tag{31},$$

das heißt, die Vertikalgeschwindigkeit w ist gleich der vertikalen Bewegung der Meeresoberfläche $\zeta(x,y,t)$.

Aus der Erhaltungsgleichung einer skalaren Größe C (26) wird eine Gleichung für die Oberflächenkonzentrationsflüsse für e.g. Temperatur und Salzgehalt.

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p} \tag{32}$$

4.3.2 Bodenrandbedingungen

Die untere Randbedingung ist der Meeresboden: z = -h (x, y). Hier kann bei ROMS die horizontale Geschwindigkeit durch einen linearen, quadratischen oder logarithmischen Bodenspannungsterm $\overrightarrow{\tau_b}$ vorgegeben werden. Die Geschwindigkeiten verlaufen parallel zum Meeresboden und werden aufgrund der Reibung direkt am Meeresboden zu Null: u ≡ v ≡ 0

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_b^x (x,y,t) \tag{33}$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_b^y (x,y,t) \tag{34}$$

Da gleiche gilt für die Vertikalgeschwindigkeit: Es gibt keinen Austausch durch den Meeresboden: w ≡ 0

$$w = \vec{v} \cdot \nabla h \tag{35}$$

Die vertikalen Konzentrationsflüsse werden am Boden ebenfalls zu Null gesetzt

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \tag{36}$$

(vgl. www.myroms.org, Hedström, 2016, Onken 2015a und 2015b).

4.3.3 Seitliche Randbedingungen

Die hochaufgelösten Ozeanmodelle haben unterschiedliche Ränder, je nach geographischer Lage ist auch die Verteilung der Land-Seegitterpunkte verschieden.

- Wird die seitliche Begrenzung durch eine Küste gebildet, sprich man von *geschlossenen Rändern* und es gibt keinen Austausch von physikalischen Größen.
- Geht die seitliche Begrenzung durch die offene See/Ozean, dann spricht man von *offenen Rändern*. Hier gibt es und muss es einen Austausch mit der Umwelt via Muttermodell geben, denn nicht alle ozeanographischen Vorgänge in diesem kleinen aber hoch aufgelösten Modellgebiet entstehen bzw. entwickeln sich in diesem Gebiet. Vielmehr können Strömungen und Wellen über die offenen Ränder in dieses Modellgebiet eingetragen werden und sich dort weiter fortpflanzen oder wechselwirken. Daher wird hier die Methode des „Nestings" genutzt. Dabei werden an den offenen Rändern die aktuellen Zustandsgrößen von dem MERCATOR- Globalmodell übernommen. In einem ersten Schritt werden mit einem Python-Skript aus dem Globalmodell nur die Daten ausgeschnitten und transferiert, die auch das Modellnest überdecken. Das RELOC-Modellnest und das MERCATOR- Muttermodell sind aber, wie bereits in Abschnitt 2.2 Anfangsbedingungen angesprochen, verschieden:
  - Die RELOC-Nester basieren auf dem ROMS-Modell, welches ein *„sigma-Koordinaten Modell"* ist, also die Vertikalkoordinaten der jeweiligen Bodentopographie folgen. Das MERCATOR-Muttermodell basiert auf dem NEMO-Modell, welches ein *„z-Koordinaten Modell"* ist, also feste vertikale Stützstellen enthält. Es muss also eine vertikale Interpolation auf die zu berechnenden ROMS Tiefen erfolgen.
  - Horizontal muss eine Interpolation auf das höheraufgelöste RELOC-Gitter erfolgen.
  - iDie Landmasken und Bathymetrien sind bei RELOC und MERCATOR verschieden. Diese werden bei der Modellerstellung, dem „Modell set-up" erarbeitet und müssen auf das höheraufgelöste RELOC-Modellgitter (*grid.nc*) angepasst werden.
  - Die Variablennamen müssen angepasst werden, die Zeitangaben auf ein einheitliches Bezugsdatum gebracht werden und schließlich die Randwerte aus den dreidimensionalen Feldern ausgelesen werden.

  Daher muss in verschiedenen vorbereitenden Verarbeitungsschritten (Routine LARGE2ROMS.m) der MERCATOR-Output so aufgearbeitet werden, dass als Ergebnis nur noch eine Eingabedatei für das entsprechende RELOC-Nest vorhanden ist (*boundary.nc*), welche die Randwerte für jeden Zeitschritt an jedem Randgitterpunkt bereitstellt und vor jedem RELOC-Modelllauf eingelesen wird.

Zur Erinnerung: Vor jedem Modellauf werden also vier Dateien von ROMS aus dem Eingabe-Verzeichnis (ROMS-input) eingelesen:

- *boundary.nc* enthält die lateralen Randwerte. Die Datei wird jeden Tag neu aus dem ozeanographischen Muttermodell erstellt.
- *forcing.nc* enthält die Oberflächenrandwerte aus dem meteorologischen Modell. Die Datei wird jeden Tag neu erstellt.
- *grid.nc* enthält das numerische Gitter, die Land-Seegitterpunktverteilung, also die Topographie und Bathymetrie, welche so bearbeitet wurde, dass das Modell stabil läuft. Zu starke Hangneigungen, kleine Inseln, extreme Flachwasserbereiche mit vielen vertikalen Schichten etc. können kritisch für einen stabilen Modelllauf werden. Man kann also nicht einfach „irgendeine" Bathymetrie für einen stabilen Modellbetrieb verwenden. Ist die Datei aber einmal erfolgreich im Sinne der Modellstabilität erstellt, bleibt diese für dieses Modellnest unverändert erhalten.
- *restart.nc* enthält die Modellergebnisse des letzten Modelllaufes.

4.4 Das ROMS – Modell

In Abschnitt 4.1 bis 4.3 wurden die „Primitiven Gleichungen" mit den Anfangs- und Randwertbedingungen dargestellt. Werden diese Gleichungen nun durch ein geeignetes Verfahren approximiert (Finite-Differenzen-Schema, Gitterpunktverfahren), dann kann durch Vorwärtsintegration der zukünftige Zustand $t = t_0 + \Delta t$ berechnet werden, wenn der Zustand des Ozeans zur Zeit $t_0 = t_0$ (u, v, w, T, S, …) bekannt ist.

Und genau das macht das ROMS-Modell. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Ozeanmodelle (z.B. ROMS, NEMO)[9] durch die jeweiligen Methoden der verwendeten Diskretisierung:

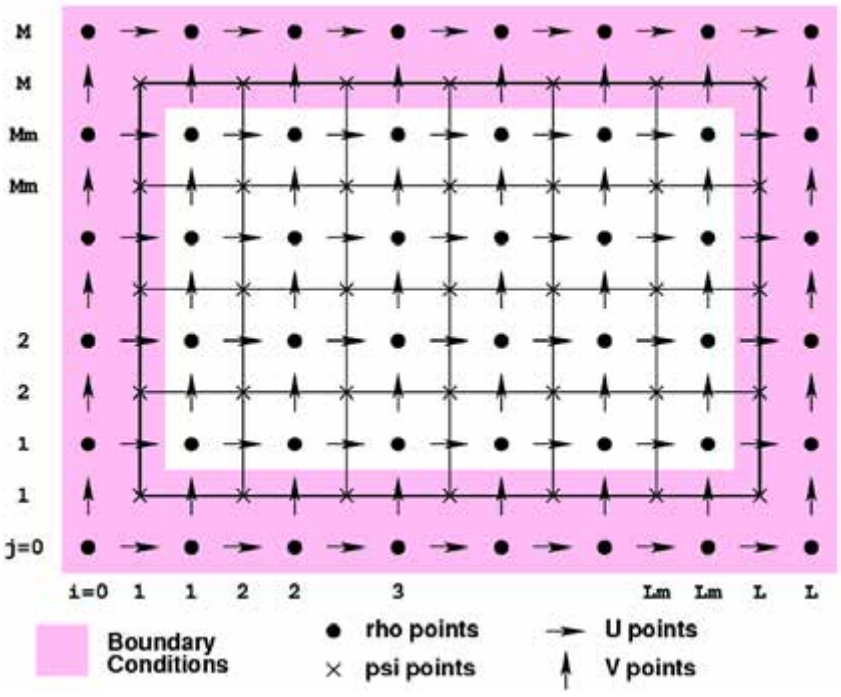
- Das numerische Schema
- Das horizontale Gitter
- Das vertikale Gitter
- Die zeitliche Diskretisierung und CFL- Kriterium

Numerisches Schema

ROMS verwendet ein „zentrales Differenzenschema" (zentraler Gitterpunkt *i* wird durch Gitterpunkt *i-1* und Gitterpunkt *i+1* berechnet) zweiter Ordnung (Taylorreihenentwicklung bis zu quadratischen Termen).

Horizontales Gitter

Es wird das „Arakawa-C-Gitter" verwendet. Abb. 8 zeigt: Es handelt sich um ein „staggered - grid", also ein verschobenes Gitter. Im Zentrum der Gitterzellen (rho-points) wird die freie Oberfläche (ζ), Dichte (ρ), Temperatur (T) und Salz (S) berechnet, die Geschwindigkeitskomponenten (u, v) aber an den (Ost, West) - und (Nord, Süd) - Begrenzungen der Gitterzellen (u-points, v-points). Die Kreuze in Abb. 8 sind die sog. „psi-points", diese werden für interne Berechnungen benötigt, wie z.B. zur Belegung und Weiterverarbeitung des Land- Seegitterpunktfeldes.



[9] Informationen zur Auswahl von ROMS im Vgl. zu NEMO als Basis für dieses FP finden sich in Abschnitt 3.

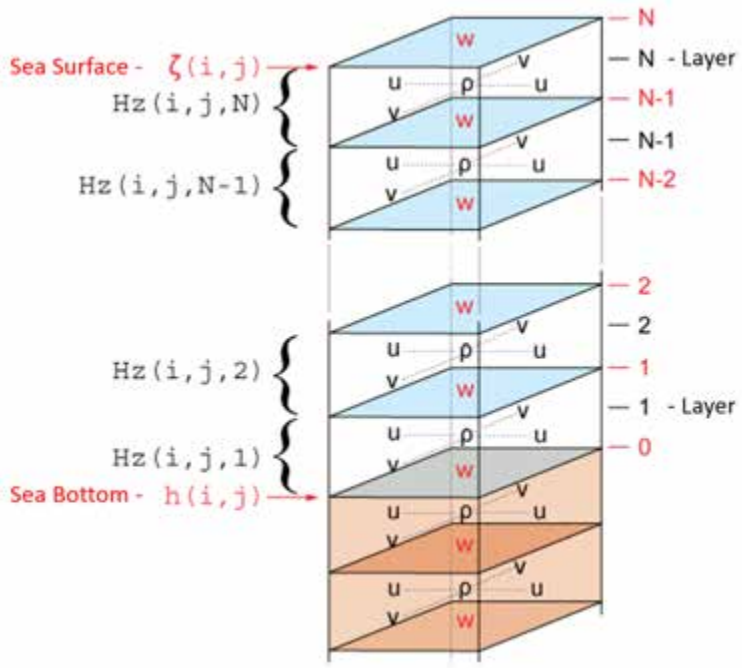
Dargestellt ist das horizontale ROMS-Rechengitter (Arakawa-C). Der weiße Bereich ist das Modellgebiet, der rote Bereich ist die Randbedingung, die vom Muttermodell kommt. Zu den Variablen siehe Text (Quelle: www.myroms.org).

Vertikales Gitter

Die vertikale Diskretisierung wird ebenfalls vermittels zentraler Differenzen zweiter Ordnung auf einem „staggered-grid" durchgeführt. Als Vertikalkoordinaten werden „geländefolgende Koordinaten" verwendet, welche parallel zur Bodentopographie verlaufen. Abb. 9 zeigt: Die Anzahl der Vertikalkoordinaten j = 0, …, N vom Meeresboden h (i, j) bis zur Meeresoberfläche ζ (i, j) ist um eins größer als die Anzahl der dazwischen liegenden Schichten Hz (1, …, N)[10]. Jede Gitterzelle kann unterschiedliche Schichtdicken (Hz) und Volumen haben. Die Zustandsvariablen

u, v, ρ, T, S werden im Zentrum jeder Gitterzelle berechnet, die Vertikalgeschwindigkeiten an der Oberfläche und am Boden jeder Gitterzelle. Somit wird klar: In Küstennähe werden die Schichten extrem flach und erreichen auch bei Hz/2 fast die Oberfläche bis auf wenige Zentimeter. Im offenen Ozean erreicht der oberste Gitterpunkt für (u, v, ρ, T, S) ebenfalls nicht die Meeresoberfläche (nur für die Vertikalgeschwindigkeit w), sondern ebenfalls nur Hz/2, was aber hier einige Meter betragen kann.

Besteht ein Interesse an der Belegung der ozeanographischen Parameter an der Meeresoberfläche z=0 Meter, so muss vom oberflächennächsten sigma-Gitterpunkt Hz/2 bis zur Oberfläche z=0 Meter extrapoliert werden



Dargestellt ist das vertikale ROMS-Rechengitter. Blau dargestellt ist der ozeanische Bereich (Erklärung siehe Text).

Zeitliche Diskretisierung und CFL-Kriterium

Zur Vorhersage ist die Vorwärtsintegration notwendig. Es gibt verschiedene numerische Schemata (Euler, Leapfrog, AB3 etc.) und verschiedene ROMS- Versionen benutzen auch unterschiedliche Algorithmen zur Vorwärtsintegration. Einen Überblick gibt die ROMS – Community Webseite (www.myroms.org).

An dieser Stelle soll nur beschrieben werden, was für das Verständnis eines *operativen Betriebes der Modellnester* notwendig ist (z.B. bei notwendigen Veränderungen der Steuerdatei).

Für jedes Modellnest gibt es einen Steuerfile, *„ocean.in"*. Dieser kann leicht verändert werden, wenn z.B. die Vorhersageergebnisse in unterschiedlichen Zeitschritten (Parameter: NHIS) ausgegeben werden sollen, z.B. alle 12 Stunden um die Ausgabedateien klein zu halten oder alle 30 Minuten um detaillierte Strömungsinformationen zu erhalten, welche auch die Gezeiten erkennen lassen, oder um Strömungsvideos zu erzeugen.

Die Rechenzeitschritte können jedoch nicht frei gewählt werden! Diese sind unter Beachtung des Courant-Friedrich-Levi Stabilitätskriterium (CFL- Kriterium) zu ermitteln. Es liegt folgende Betrachtung zugrunde:

[10] Oft werden die Begriffe „Layer" (Schichten Hz (1, …,N)) und „Level" (Vertikalkoordinaten j=0, … , N) verwendet, mit der Erkenntnis, es gibt N Layers und N+1 Levels. Das ist bei ROMS berücksichtigt, durch den unterschiedlichen Start des Laufindex.

Die benötigte Computerrechenzeit ist proportional zur Anzahl der verwendeten Modellgitterpunkte in (x, y, z) und der Anzahl der benötigten Rechenzeitschritte t. Da für eine möglichst realistische Abbildung der Natur auch eine möglichst hohe Modellgitterpunktauflösung angestrebt wird[11], steigt die Anzahl der Modellgitterpunkte[12]. Daher wird eine geringe Anzahl Rechenschritte t, also eine größtmögliche Rechenschrittweite Δt_{max} angestrebt.

Und genau dieses Δt_{max} wird durch das CFL-Kriterium vorgegeben (Glnl 38). Dem liegt die Idee zugrunde, dass bei einer vorgegebenen Modellgitterpunktauflösung Δx, Δy und Δz das zeitliche Sample-Intervall Δt nicht größer sein darf, als ein zu bestimmendes Δt_{max}, damit voranschreitende Signale im Ozean (Strömungen und Wellen) auch noch aufgelöst werden und nicht durch das Rechengitter fallen.

Die maximale Geschwindigkeit der numerischen Integration muss also größer sein, als die schnellsten voranschreitenden Signale im Ozean:

$$\underbrace{\frac{\Delta x}{\Delta t_{max}}}_{Integrationsgeschwindigkeit} > \underbrace{\vec{v}_{max}}_{Signalgeschwindigkeit\ im\ Ozean} \qquad (37)$$

Es kann eine Skalierung, die CFL-Zahl eingeführt werden, wobei cfl < 1 sein muss, damit die numerische Integration[13] stabil verläuft, also gegen eine Lösung konvergiert und die Zahlenwerte nicht unbegrenzt anwachsen, bis zur „Modellexplosion“:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t_{max}} \cdot cfl > \vec{v}_{max} \quad , mit\ cfl = [0,1] \qquad (38)$$

Für cfl = 0,5 erkennt man das „Abtasttheorem“ wieder, welches besagt,

$$\Delta t_{max} < 0{,}5 \cdot \frac{\Delta x}{\vec{v}_{max}} \qquad (39)$$

dass die maximale Zeitschrittweite Δt_{max} so bemessen sein muss, dass das Signal $\vec{v}_{max}$ während eines Zeitschrittes t maximal die Hälfte einer Gitterzelle 0,5 ·Δx durchlaufen darf.

Das ROMS-Modell unterscheidet in seinem Steuerfile (*ocean.in*) zwei verschiedene Zeitschritte:

8) DT, der *„barokline Zeitschritt“*

9) DTFAST, der *„barotrope Zeitschritt“*

Zu 1: Mit DT soll das Signal der schnellsten baroklinen Strömung bzw. Welle aufgelöst werden. Diese darf während eines Zeitschrittes max. die Hälfte einer Gitterzelle durchqueren (Gln 39). Wird als „First Guess“ $\vec{v}_{max}$=2 m/s und Δx=1500 m (z.B. beim Gibraltar Modell) gesetzt, dann erhält man

$\Delta t_{max(horizontal,\ baroklin)}$ =375 sec.

Zu 2: Mit DTFAST sollen die schnellen barotropen Schwerewellen aufgelöst werden, also lange Wellen wie z.B. Tsunamis. Wird als „First Guess“ eine Wassertiefe von H = 4000 m gesetzt, dann erhält man eine Phasengeschwindigkeit dieser Wellen von

$$\vec{v}_{max} = \sqrt{g\,H}\ \left[\frac{m}{s}\right] \sim \sqrt{40.000}\ \frac{m}{s} \sim 200\ m/s \text{ und mit } \Delta x = 1500\ m$$ erhält man

$\Delta t_{max(horizontal,\ barotrop)}$ =3,75 sec.

Das ROMS Modell setzt beide Zeitschritte (DT, DTFAST) dadurch in Beziehung, indem es in der Steuerdatei vorgibt, in wie viele barotrope Zeitschritte der langsame barokline Zeitschritt gesplittet werden kann: NDTFAST = DT/DTFAST.

$$NDTFAST = \frac{\Delta t_{max(horizontal,baroklin)}}{\Delta t_{max(horizontal,barotrop)}} = \frac{375sec}{3{,}75sec} = 100$$

Damit sind als „First Guess“ die Ergebnisse für die größtmöglichen Zeitschritte unter Beachtung des horizontalen CFL-Kriteriums bekannt: DT= 375 sec und NDTFAST = 100.

---

[11] Daher die Methode des „Nestings“, da nicht global mit beliebig hoher Auflösung gerechnet werden kann.

[12] Alleine die Halbierung des horizontalen Gitterpunktabstandes in einem numerischen Modell erhöht die Computerrechenzeit um das 8-Fache (Roeckner, 2003).

[13] Das gilt für ein „Explizites Eulerverfahren“. Andere Diskretisierungsschemata können zu anderen Stabilitätsbedingungen führen.

Nun ist aber noch das vertikale CFL-Kriterium zu beachten:

„Die Vertikalgeschwindigkeit der Strömung darf ebenfalls pro Zeitschritt nur maximal eine halbe vertikale Schichtdicke durchqueren."

Bei einer hohen Anzahl von Schichten (N = 40 oder größer) werden diese im Flachwasserbereich sehr dünn, daher werden die Zeitschritte je nach Anzahl der Schichten, der Bathymetrie (je nach dem Auftreten von extremen Flachwasserstellen) und der größten auftretenden Vertikalgeschwindigkeiten (z.B. starkes Upwellinggebiet oder nicht) entsprechend kürzer. Ausgehend von dem o.g. „First Guess" wird dann Δt_{max} iterativ bestimmt. Daher sind für die regional unterschiedlichen Modellnester auch die größtmöglichen Zeitschritte unterschiedlich und liegen für die gegenwärtig operativ laufenden acht Modellnester zwischen
DT = 108 sec und DT = 432 sec mit NDTFAST = 30 bis 40.

5 Die Entwicklung vom ROMS-Rechenkern zum RELOC-System, die Projektleistung

5.1 Vorbemerkungen: Zur Auswahl des ROMS-Ozeanmodelles als Basis

Bei der Auswahl eines geeigneten Ozeanmodelles als Basis für dieses Fachprojekt, verblieben letztlich nur noch die Modelle ROMS und NEMO. NEMO hat sich als erste Wahl für globale Modellierung und beckenweite Modelle etabliert. Für „Regionale Modelle“ wird NEMO aber auch verwendet: So werden z.B. NEMO-Regionalmodelle am UKMO in das NEMO-Globalmodell genestet. ROMS wiederum ist als Regionalmodell weltweit etabliert. Dazu gibt es eine sehr große Entwickler und Benutzer-Community (www.myroms.org). Das ROMS – Modell bietet auch weitere sehr umfangreiche Ausbaustufen (Abschnitt 3.2). Innerhalb der NATO (NURC/CMRE) und der US-NAVY (als TOMS Modell Version: Tactical Ocean Modeling System) wurde ROMS im operationellen Betrieb favorisiert. Daher ist bei der Initialisierung des Fachprojektes 2011 die Wahl auf das ROMS Modell gefallen.

5.2 Vom ROMS-Rechenkern zum RELOC-System, die Projektleistung

Das ROMS-Paket ist frei und kostenlos verfügbar im Internet[14]. Als Ausbaustufen können bei ROMS verschiedene Module hinzu geladen werden: ein Tidenmodell, Sedimentausbreitungsmodell, Ozeaneismodell oder ein Bio-Geochemisches Modell. ROMS verfügt über Module zur Datenassimilation nach verschiedenen Variationsverfahren und Software zur Ensemble Vorhersage. Es kann mit dem Seegangs Modell SWAN gekoppelt werden und es gibt weitere umfangreiche Softwarepakete zum Pre- und Postprocessing.

Die Projektleistung:

Der Verfasser des Fachprojektes hat 2011 genaue Vorgaben formuliert, wie das Gesamtsystem RELOC beschaffen sein muss, damit es den Anforderungen der Marine und den Anforderungen an einen operationellen Betrieb entspricht.

Nur der Besitz einzelner mathematisch hoch komplexer ROMS-Softwareroutinen als Quelltexte reicht nicht aus, es muss erst ein Modellnest für die speziellen Umweltbedingungen jedes Einsatzgebietes konfiguriert (Model „set-up“) und dann vollständig automatisiert werden. Das so entstandene „System“ muss für den operationellen Betrieb robust und ausfallsicher programmiert werden.

Es seien nur beispielhaft einige Vorgaben genannt:

- Es sind Vorhersagemodelle für die benannten Einsatz- und Übungsgebiete der Deutschen Marine zu erstellen
- Es ist als Integrationskern ROMS zu verwenden
- Die Modelle müssen hoch aufgelöst sein
- Es ist ein Nesting durchzuführen um die hohe Auflösung zu erreichen
- Es muss eine Modellinitialisierung und Randwertversorgung mit MERCATOR-Modelldaten in Realzeit erfolgen, da *eine Initialisierung mit klimatologischen Feldern definitiv zu falschen Resultaten führt*.
- Für die meteorologische Randwertversorgung sind die Daten der Gruppe MetBw am DWD oder des DWD zu verwenden.
- Land- Seegitterpunktfelder für alle Modellnester sind zu erzeugen.
- Der gesamte operative Ablauf des Modellbetriebes ist vermittels Skripte zu automatisieren. Das betrifft auch die gesamten Datenströme aus Frankreich (MERCATOR) und Offenbach (MetBw/DWD)
- Der operative Betrieb muss ausfallsicher sein: Es wurde dazu eine intelligente Restart- Neustartmethode realisiert
- Die Vorhersageergebnisse sind für eine Nachkontrolle 7 Tage zu archivieren
- Das Gesamtsystem RELOC muss am DMRZ laufen

[14] Das ROMS-Paket ist „open-source“ Software unter der GNU/MIT/X – Lizenz: „Copyright © 2002-2014 The ROMS/TOMS Group “. Siehe http://www.opensource.org/licenses/mit-license.php
„Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the „Software“), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to the following conditions:
The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.
THE SOFTWARE IS PROVIDED „AS IS“, WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE. “

Nach den Vorgaben ist in beständig enger Kooperation zwischen der fachlichen Projektleitung und dem Projektwissenschaftler das „RELOC-System“ entstanden. Das Gesamtsystem wurde vom Projektwissenschaftler Dr. Onken am NATO-CMRE in La Spezia entwickelt (jetzt HZG, Helmholtz Zentrum Geesthacht).

5.3 Die gegenwärtig verwendete Rechnerplattform und Umgebung am DMRZ

Als Rechnerplattform wurde ab 2015 ein handelsüblicher „Personal Computer Intel I5 mit 4 Kernen“ genutzt („RELOC-Rechner“), der in das Rechennetz des DMRZ am DWD eingespleist wurde. Erst über das DWD-Netz gab es eine Verbindung zu externen Rechnern und somit war es überhaupt erst möglich die benötigten externen Daten (MERCATOR-Modelldaten/FRA) für den Routinebetrieb bereit zu stellen (siehe Fußnote 1).

Aufgrund der geringen Prozessoranzahl des „RELOC-PC“ mussten alle Modellnester nacheinander gerechnet werden. Im Rahmen einer programmtechnischen Weiterentwicklung (Kapitel 7.1) konnten die Modelle testweise auf die Rechner des DMRZ portiert werden, auf dem der Modellbetrieb parallelisiert erfolgt. Bis zum Ende der Testphase wird der Routinebetrieb aber weiterhin auf dem RELOC – PC erfolgen (Parallelbetrieb). Im folgenden Abschnitt wird zunächst der serielle Programmablauf auf dem RELOC-PC erklärt, in Abschnitt 7.1 dann die Weiterentwicklung auf den Computern des DMRZ.

5.4 Der zeitliche Ablauf im „operationellen Betrieb“ auf dem RELOC - Rechner

Die Modellläufe beginnen mit *„Aden“* um 05:30 UTC und sind mit *„BlackSea“* um 18:30 UTC abgeschlossen. Alle Modelle machen einen Hindcast von drei Tagen (siehe Abschnitt 7.2.1 Datenassimilation). Folgende Modelle machen einen Forecast von 2 Tagen: Aden, Somalia, Hormus. Die Modelle: Gibraltar, EastMed, BlackSea machen einen Forecast von 3 Tagen. Unter Preprocessing gehört: Datentransfer (Download) der ozeanographischen und meteorologischen Eingangsdaten und deren komplette Aufbereitung. Unter Integrationszeit fällt die Vorwärtsintegration des Hindcast und des Forecasts vermittels ROMS. Unter Postprocessing werden die Interpolation auf ein regelmäßiges vertikales Gitter, das Zusammenfassen der Ausgabedateien („Merge and Grid“), die gesamte Graphikproduktion und der Datentransfer vom RELOC-PC in Euskirchen zum Marine GeoInfo– Rechner in Rostock zusammengefasst. Folgender Aufzählung können die Details entnommen werden (Auszug aus den Logfiles):

I)	Aden		
	05:30Z Start	Preprocessing: 33‘	Gesamtlauf: 2h 16‘
	06:03Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 54‘	
	06:57Z Integration Tag 5: Ende		
	07:46Z Job finalized	Postprocessing: 43‘	
II)	Somalia		
	07:45Z Start	Preprocessing: 31‘	Gesamtlauf: 4h 2‘
	08:16Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 2h 17‘	
	10:33Z Integration Tag 5: Ende		
	11:47Z Job finalized	Postprocessing: 1h 14‘	
III)	Hormus		
	11:00Z Start	Preprocessing: 23‘	Gesamtlauf: 1h 54‘
	11:23Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 53‘	
	12:16Z Integration Tag 5: Ende		
	12:54Z Job finalized	Postprocessing: 38‘	
IV)	Gibraltar		
	12:45Z Start	Preprocessing: 15‘	Gesamtlauf: 1h 30‘
	13:00Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 49‘	
	13:49Z Integration Tag 6: Ende		
	14:15 Job finalized	Postprocessing: 26‘	
V)	EastMed		
	14:20Z Start	Preprocessing: 19‘	Gesamtlauf: 2h 41‘
	14:39Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 1h 36‘	
	16:15Z Integration Tag 6: Ende		
	17:01Z Job finalized	Postprocessing: 46‘	

VI) BlackSea

17:15Z Start	Preprocessing: 14‘	Gesamtlauf: 1h 13‘
17:29Z Integration Tag 1: Beginn	Integrationszeit: 29‘	
17:58Z Integration Tag 6: Ende		
18:28 Job finalized	Postprocessing: 30‘	

Der gesamte Produktionslauf dauert also 13 Stunden und die letzten Ergebnisse liegen erst 18:28 UTC vor. Durch die Weiterentwicklung (Abschnitt 7.1) reduziert sich der gesamte Produktionslauf auf maximal 2 Stunden.

6 Beispiele zu allen acht Ozeanvorhersagemodellen welche derzeit operationell in Betrieb sind und deren militärischer Bezug

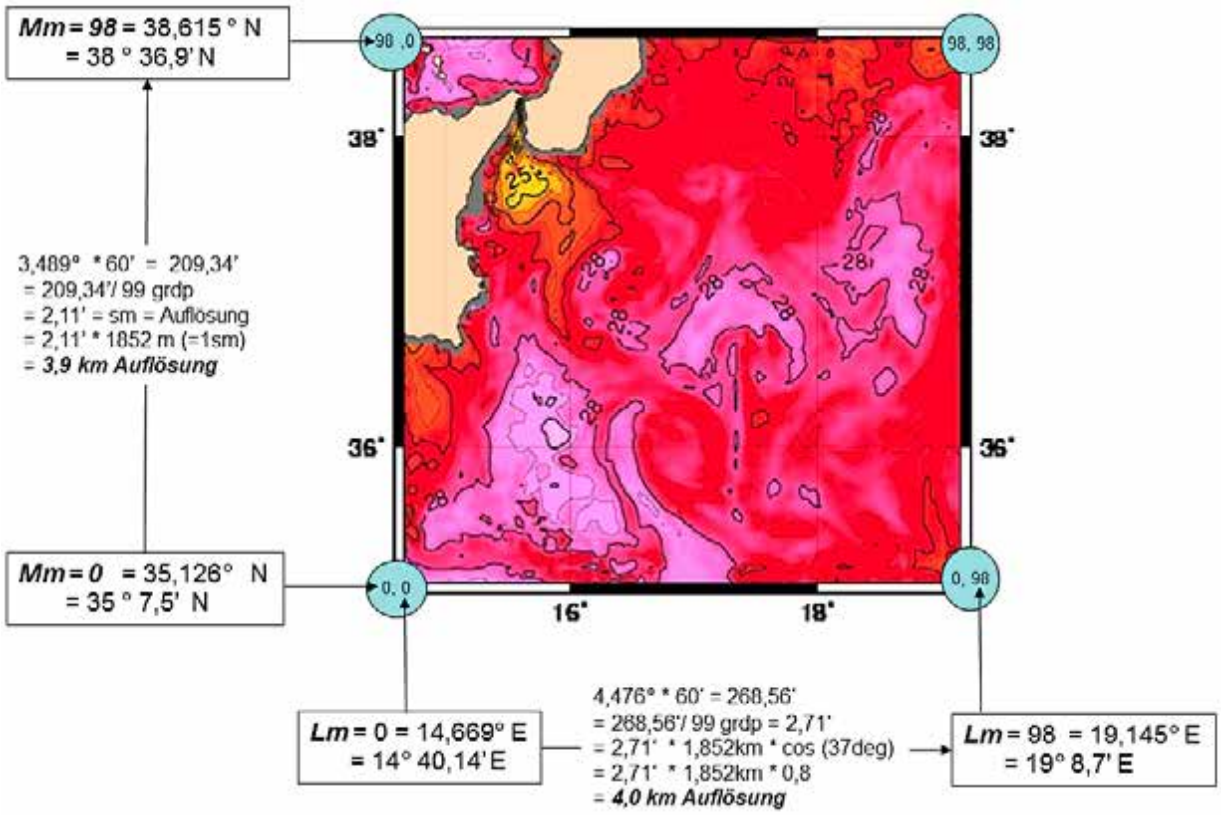
Es wird entsprechend der zeitlichen Entwicklung der Modelle zunächst das Ionische See Modell dargestellt, welches als „Prototyp" für das FP diente, dann die sechs RELOC-Modelle und schließlich das Einsatzmodell Libya/SOFIA, welches neu aus der Weiterentwicklung (Abschnitt 7) hervorgegangen ist und seit 2017 operationell im Betrieb ist.

Zu jedem Modell gibt es in Form einer Tabelle eine kurze Zusammenstellung von Fakten.

6.1 Ionische See

Dieses Ozeanmodell läuft bereits seit Okt. 2010 operationell für die Deutsche Marine auf einem Server in Rostock[15] (Paul, 2012) und diente als „Demonstrator" für die Entwicklung aller Folgemodelle. Im Rahmen der Weiterentwicklung (Kapitel 7.1) wird dieses Modell 2018 auf einen modernen Python-Code für das Pre- und Postprocessing, sowie zur Jobsteuerung umgeschrieben und kann damit ebenfalls parallel zu allen anderen Ozeanmodellen im DMRZ betrieben werden. Um den operationellen Dienst zu vereinheitlichen und zu verbessern, wird auch hier die Anfangs- und Randwertversorgung von MFS auf MERCATOR umgestellt.

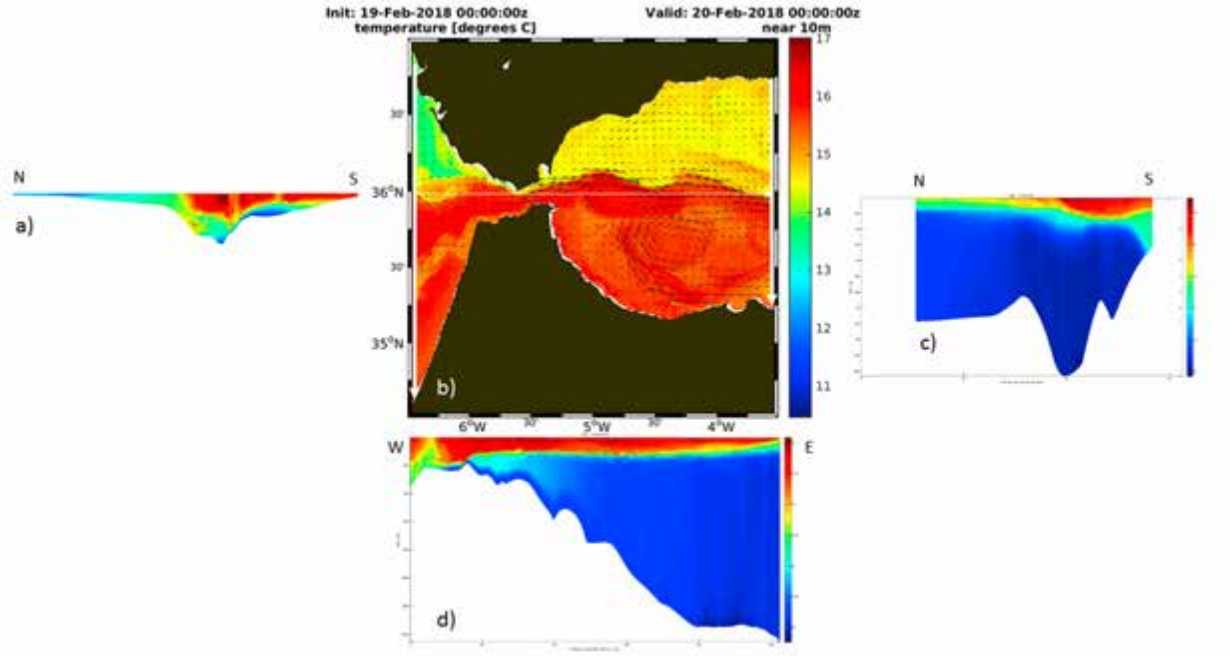
Dargestellt ist das Seegebiet „Ionische See" östlich von Sizilien und die Meeresoberflächentemperatur. Anhand dieser Abb. wird die Anzahl und Verteilung der Gitterpunkte in Länge und Breite und die daraus resultierende Modellauflösung gezeigt (vgl. Abb. 8): Gut zu erkennen ist das Array Lm x Mm.



Kurzname: IonSea Militärischer Bezug: Nato-Uboot Übungsgebiet („Proud Manta", „Noble Manta", etc.)	
Auflösung horizontal: 3,9 km	Anzahl vertikaler Schichten N =40
Lm = 98 Mm = 98	NTIMES = 864 DT = 300 sec NDTFAST = 30

[15] Das Modell läuft seit 2010 auf dem Sever des GeoInfoW MarA Rostock, später MarKdo Rostock. Einen RELOC-Rechner gab es erst ab 2015.

6.2 Straße von Gibraltar



Dargestellt ist das Modellgebiet „Straße von Gibraltar“ und drei Vertikalschnitte: der erste Schnitt (a) geht entlang des westlichen Randes von Nord nach Süd, welche in der Horizontaldarstellung (b) markiert ist, der zweite Schnitt (d) geht quer durch die Meerenge von West nach Ost und der dritte Schnitt (c) entlang des östlichen Randes, ebenfalls von Nord nach Süd. Es ist gut zu erkennen, wie vergleichsweise flach der Eingang zur Meerenge ist (max. 300 m) und wie schnell der Meeresboden zur Alboransee hin auf über 1400 m abfällt. Der Alboranwirbel ist gut zu erkennen, obgleich er durch die Einstromlage nur den südlichen Teil der Alboransee einnimmt. Der zentrale Querschnitt (d) zeigt eine deutliche Grenze zwischen dem aus dem Atlantik einströmenden warmen Wasser an der Oberfläche (rot) und dem darunter liegenden kalten Ausstromwasser (blau). An dem flachen Sattel im Eingangsbereich der Meerenge (d) erkennt man im Vertikalschnitt Störungen in dem Zweischichtenregime, was auf Strömungsverwirbelungen, hydraulische Sprünge und folgende Interne Wellen zurückzuführen sein kann.

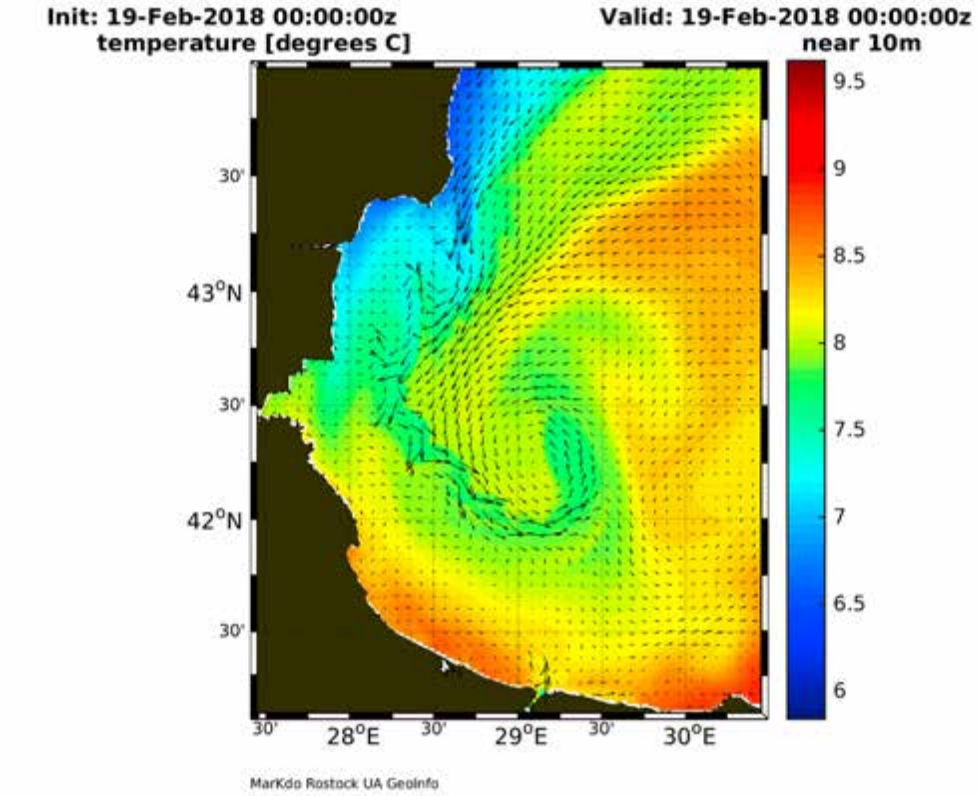
Kurzname: Gibraltar Militärischer Bezug: OAE, OSG (Operation Active Endeavor, NATO Operation Sea Guardian)	
Auflösung horizontal: 1,84 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 179 Mm =183	NTIMES = 800 DT = 108 sec NDTFAST = 40

6.3 Östliches Mittelmeer

Das Seegebiet, die Oberflächentemperatur und Strömung ist in Abb. 1 dargestellt.

Kurzname: EastMed Militärischer Bezug: UNIFIL	
Auflösung horizontal: 1,78 km	Anzahl vertikaler Schichten N =32
Lm = 191 Mm = 294	NTIMES = 800 DT = 108 sec NDTFAST = 40

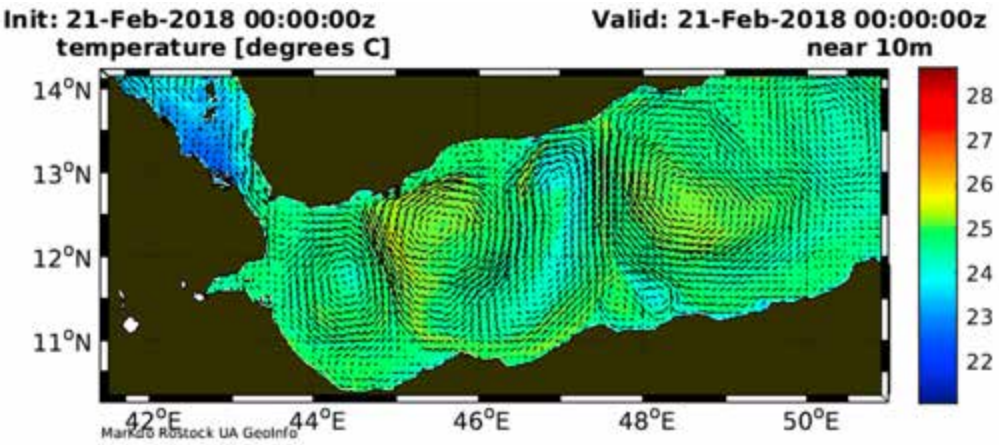
6.4 Westliches Schwarzes Meer



Exemplarisch dargestellt ist das Seegebiet „Westliches Schwarzes Meer“, die Wasseroberflächentemperatur und die Meeresströmungen.

Kurzname: BlackSea Militärischer Bezug: NATO Kräfte	
Auflösung horizontal: 2,03 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 168 Mm = 213	NTIMES = 400 DT = 216 sec NDTFAST = 40

6.5 Golf von Aden

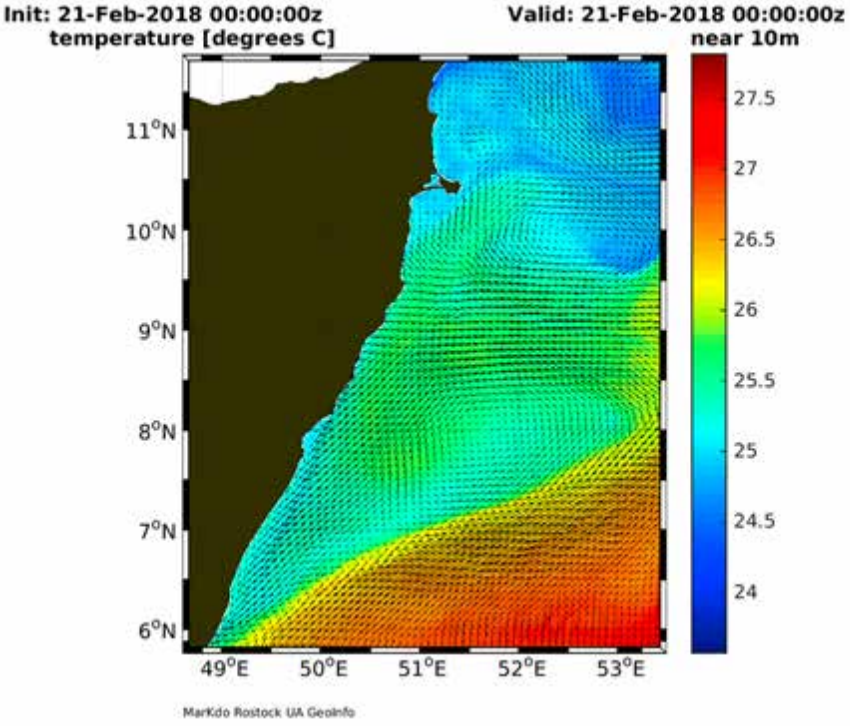


Die Abbildung zeigt als Beispiel die Wasseroberflächentemperatur und Meeresströmungen des Seegebietes „Golf von Aden“. Die zentralen Doppelwirbel in dieser Region sind immer wieder beobachtet worden und sind auch aus der Literatur/Briefing Dockets bekannt.

Kurzname: Aden Militärischer Bezug: ATALANTA/ Ocean Shield	
Auflösung horizontal: 2,56 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 414 Mm = 176	NTIMES = 400 DT = 216 sec NDTFAST = 40

6.6 Ostküste von Somalia.

Von Dezember bis März herrscht vor der Küste Somalias der Nordostmonsun (vergleichbar der Nordostpassate) welcher mit einer starken küstennahen Meeresströmung in südlicher Richtung, der „Somali Strömung“, verbunden ist. Abb. 14 zeigt eine kräftige Strömung küstenparallel nach Süden.

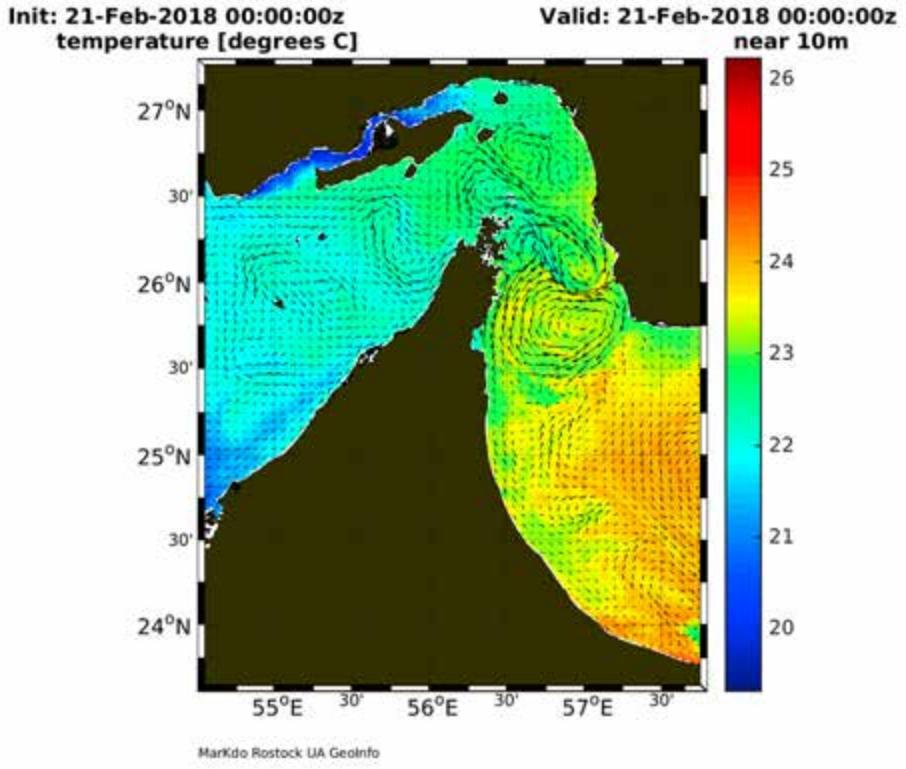


Die Abbildung zeigt das große Seegebiet vor Somalia, welches durch die jahreszeitlichen Monsunwinde und Monsunmeeresströmungen beherrscht wird. Vor der Küste Somalias ist eine kräftige Strömung nach Süden zu erkennen.

Kurzname: Somalia Militärischer Bezug: ATALANTA/ Ocean Shield	
Auflösung horizontal: 2,02 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 268 Mm = 331	NTIMES = 800 DT = 108 sec NDTFAST = 40

6.7 Straße von Hormus

Das Modell zeigt Wirbel, Mäander und Strömungsäste. Oft kommt es vor der Küste des Oman zu einer Wasserakkumulation von extrem warmen Wasser von über 30°C, welches dann auch in Satellitenbildern zu erkennen ist. Das Warmwasser aus dem Arabischen Meer breitet sich über den Golf von Oman oft bis zur nördlichsten Stelle der Meerenge aus (schmalste Stelle 30 Seemeilen), wo der Golf von Oman in den Persischen Golf übergeht.



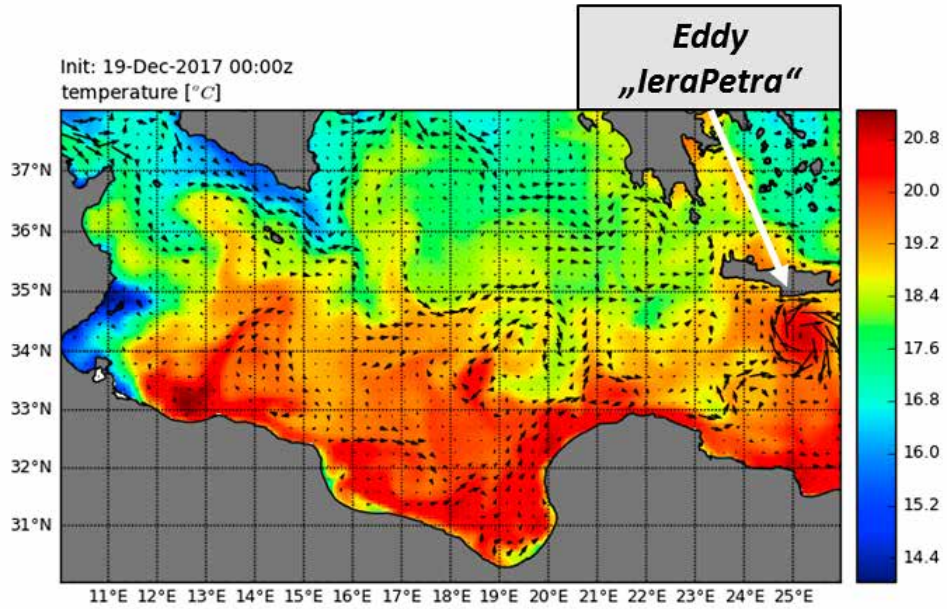
Die Abbildung zeigt das Seegebiet/Modellgebiet „Straße von Hormus“. Wirbel, Mäander und Strömungsäste sind deutlich zu erkennen, sowie der Warmwassereinfluss aus der offenen See, dem Golf von Oman.

Kurzname: Hormus Militärischer Bezug: Ocean Shield	
Auflösung horizontal: 1,66 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 219 Mm = 271	NTIMES = 400 DT = 216sec NDTFAST = 40

6.8 Zentrales Mittelmeer

Zur Beratung von Einsätzen die im Zusammenhang mit der Flüchtlingsproblematik stehen, wurde das Modell Libya erstellt. Erst nach der technischen Weiterentwicklung 2017 (Abschnitt 7.1) konnte das Modell in den operationellen Betrieb genommen werden.

Abbildung 16 zeigt exemplarisch das Modellgebiet, die Oberflächentemperaturen und Meeresströmungen. Besonders auffallend ist, dass der in der Literatur bekannte (quasi) permanente Wirbel „Iera Petra“ ebenfalls erfasst wird (Mkhinini N. et. al., 2014), welches u.a. auch als „Qualitätsprüfung für Modelle“ herangezogen wird (Kantha L., (2000), S.618). Der Wirbel ist nach der südlichsten Stadt Europas benannt („Iera Petra“) und liegt im Süden der Insel Kreta.



Die Abbildung zeigt das Einsatzgebiet „SOFIA“. Exemplarisch sind die Meeresströmungen und Oberflächentemperaturen dargestellt. Das Modell arbeitet „wirbelauflösend“, wie man auch an dem (quasi) permanenten Wirbel „Iera Petra“ erkennt.

Kurzname: Libyn Militärischer Bezug: Operation SOFHIA	
Auflösung horizontal: 4.8 km	Anzahl vertikaler Schichten N = 32
Lm = 414 Mm = 220	NTIMES = 200 DT = 432 sec NDTFAST = 40

7 Weiterentwicklungen

Weiterentwicklungen werden nun in zwei Bereichen betrachtet: Technische Weiterentwicklungen, welche z.B. die Rechnerarchitektur (PC oder HPC), die Software auf dem entsprechenden Rechner etc. betreffen und eine wissenschaftliche Weiterentwicklung, welche die Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse betreffen.

7.1. Technische Weiterentwicklungen.

- *Relocatable Ocean Circulation Model* (ROCM)

  Die Programmsteuerung für die acht Modellnester, sowie das gesamte Pre- und Postprocessing wurde von MATLAB in Python umprogrammiert. Dabei wurden bereits jetzt weite Teile in Python optimiert und parallelisiert. Erst dadurch war es möglich die Modelle auf die Computer des DMRZ zu portieren[16] und parallel auszuführen. Die neue Version der Modelle, welche jetzt auch auf den Computern des DMRZ laufen, werden im Folgenden als ROCM bezeichnet, um beide Versionen zu unterscheiden (PC-Version in MATLAB vs. HPC-Version in Python).

- *Produktserver*

  Die o.g. acht Modelle wurden auf dem sog. „lcb“ - Produktserver der Bundeswehr installiert. Dabei handelt es sich um ein Linux-Cluster mit derzeit 384 Kernen, welche zusätzlich zu dem 20% Anteil am Großrechner des DMRZ von der Bw für spezielle Aufgaben beschafft wurden (Abb. 17). Im Gegensatz zum Betrieb auf einem RELOC-PC ist es nunmehr notwendig, die Anzahl der zu verwendenden Kerne zu bestimmen. Diese richtet sich nach der Größe des Einsatzgebietes: Pro 1 Grad wird ein MPI-Task erzeugt, bei einem Gebiet von 3 x 2 Grad also 6 MPI- Tasks (s. Tab. 2). Die berechnete Anzahl wird in die Modellsteuerdatei (*ocean_service.ksh*) eingetragen. Die Gesamtsumme wird auf max. 128 begrenzt, damit es nicht zu Ressourcen-Problemen kommt.

Die Abbildung zeigt den Produktserver der Bw am DMRZ-Anteil in Euskirchen, auf dem derzeit alle Ozeanmodellnester laufen.

[16] Das betrifft nicht den Rechenkern ROMS (!), da dieser bereits in modernem F90/F95 programmiert ist.

Modell	Rechenzeit	Kerne
Aden	1h 25‘	55
Somalia	1h 35‘	42
Hormus	1h 9‘	20
Gibraltar	46‘	16
EastMed	1h 27‘	20
BlackSea	1h	16
Libyn	2h	128

Tabelle 2: Gibt eine Übersicht über die Gesamtlaufzeiten der einzelnen Modelle bei der entsprechenden Anzahl der z.Zt. verwendeten Rechenkerne [17].

– *High Performance Computer, Großrechner* (HPC)
  Die Portierung auf den Routinerechner des DMRZ (Abb. 18, HPC CRAY-XC40) [18] ist anvisiert, wenn die Testphase auf dem Produktserver (Abb. 17) abgeschlossen ist. Eine weitere Verkürzung der gesamten Modelllaufzeiten ist hier gegenwärtig im Bereich der Modellintegration zu erwarten, weniger bei den Pre- und Postprocessingzeiten. Sollten weiterführende wissenschaftliche Verfahren wie Ensemble Vorhersagen und Datenassimilation (Kapitel. 7.2) eingeführt werden, dann ist die Verwendung eines HPC Voraussetzung.

Die Abbildung zeigt den Großrechner des DMRZ (CRAY-XC40) in Offenbach. Der Rechner wird vom DWD betrieben, der Anteil der Bundeswehr an der Rechenkapazität beträgt zwanzig Prozent (Quelle: DWD).

7.2 Wissenschaftliche Weiterentwicklungen

Eine Qualitätsverbesserung der Beratungsleistung, schnelle Bereitstellung von hochaufgelösten Informationen/Vorhersagen für neue Seegebiete/Einsatzgebiete durch eine *„einfache, schnelle und weltweite Verschiebbarkeit der Ozeannester“* ist durchaus anstrebenswert! Dazu muss aber erst mal ein numerisches Gitter erstellt werden, weltweit mit regionaler Auflösung (mindestens 1 km – 4 km), welches eine
„Land-Seegitterpunktverteilung“ der Bathymetrie und Topographie enthält, auf dem auch numerisch stabil gerechnet werden kann (vgl. Kapitel 4.4 Absatz CFL-Kriterium). Diese oft geforderte und an den Verfasser herangetragene Weiterentwicklung hat durchaus Potential für ein eigenes wissenschaftliches Fachprojekt. Bereits an der

[17] Modell Ionische See wird zeitnah portiert, da auch die Randwertversorgung (von MFS nach MERCATOR) umgestellt werden muss.

[18] Am DMRZ gibt es zwei Großrechner (CRAY-XC40), für Routinebetrieb (Westhalle) und Forschung (Osthalle).

Harvard Universität hat Prof. Allan Robinson[19] das Projekt angedacht: *„Dynamical Modelling Along the Fleet"* (Dr. Onken pers. Mitteilung), aber es ist leider nicht zur Durchführung gekommen, oder veröffentlicht worden.

7.2.1 Datenassimilation

Das CMRE und Joint Research Partner (JRP) hat verschiedene Experimente zur Datenassimilation (DA) durchgeführt, bei dem die von den Forschungsschiffen „RV Alliance" und „FS Planet" gewonnen Messdaten in quasi Echtzeit in ROMS-Ozeanmodelle assimiliert wurden, aber mit verschiedenen Assimilationsmethoden (Onken et al. 2014):

- ROMS EnKF, Ensemble Kalman Filter
- ROMS 4Dvar, Vierdimensionales Variationsschema (JRP, WTD71)
- ROMS EnOI, Ensemble Optimale Interpolation

Da diese am NATO-CMRE getesteten Verfahren sehr aufwändig sind, bleiben diese zunächst einmal wissenschaftlichen Studien vorbehalten mit der Begründung:

- Die Rechenzeiten für einen Modellauf vergrößern sich z.B. bei Einsatz des 4Dvar Verfahrens um das 10 bis 100-fache (60 Stunden CPU Zeit auf einer 8 Kerne Intel Workstation bei o.g. Experiment, Onken et.al. 2014, Seite 55). Bei einer wissenschaftlichen Analyse des o.g. Datenmaterials im Hindcast spielt eine derartig lange Rechenzeit keine Rolle, aber für eine Vorhersage im operationellen Betrieb in Echtzeit ist dieser massive Rechenaufwand nur noch auf einem Großrechner durchführbar.
- Eine sinnvolle Datenversorgung muss ständig gewährleistet sein. Dazu muss eine ausreichende Anzahl von Messwerten und deren geeignete flächenhafte *Verteilung* regelmäßig für jeden Modelllauf bereitgestellt werden.

Daher wird derzeit folgende Vorgehensweise angestrebt:

- Für die bis jetzt vorliegenden acht operationell laufenden Modelle ist zuerst einmal die genaue Vorhersagequalität zu ermitteln. Dann zeigt sich, ob überhaupt eine Verbesserung der Vorhersagegüte vermittels aufwändiger Datenassimilation notwendig ist, oder die derzeitige Vorhersagegüte für operative Zwecke genügt. Es ist zu bedenken, in das Muttermodell MERCATOR werden bereits Messdaten assimiliert und diese Informationen werden durch das „Nesting" bei der Initialisierung übergeben. Das Modellnest läuft dann für eine nur relativ kurze Zeit voraus (3 Tage), bei der es dann regelmäßig mit aktuellen Randwerden aus dem Muttermodell versorgt wird.
- Die Modellvalidierung soll vermittels aller zur Verfügung stehenden Datenquellen (Satellitendaten, Schiffsmessungen, ARGO-Drifter etc.) erfolgen. Es ist zu bedenken, dass die regionalen Modellnester bedingt durch ihre hohe Auflösung (z.T. kleiner 2 km) nur eine vergleichsweise kleine Fläche abdecken, in der genügend Daten für einen Modell-Daten Vergleich vorliegen müssen, um eine belastbare statistische Aussage zu treffen.
- Soll die Vorhersagequalität der Ozeannester weiter verbessert werden und genügend Daten in Anzahl und Fläche zur Verfügung stehen, kann ein vergleichsweise einfaches, schnelles und etabliertes Verfahren wie die Optimale Interpolation (OI) zur Datenassimilation genutzt werden. Sachstand: Das OI- Verfahren existiert bereits im System, die Modelle rechnen bereits den dafür notwendigen 3 Tage Hindcast. Es muss nur noch ein Datenpool für den Routinebetrieb erstellt werden, der von CMEMS ebenfalls frei zur Verfügung gestellt wird.

7.2.2 Einführung eines Nudging – Algorithmus

Die Ozeanmodelle laufen im operationellen Betrieb voll automatisch. Damit sich die Modelllösungen nicht beliebig weit vom Muttermodell entfernen können (drift), soll ein Nudging-Algorithmus zwischen Modellnest und Muttermodell installiert werden. Sachstand: Der Algorithmus liegt vor und kann bei dem nächsten Softwareupdate implementiert werden.

7.2.3 Folgemodelle

Alle ozeanographischen Parameter liegen nun als Analyse und Vorhersage für verschiedene Einsatzgebiete vor (5D-Informationen, z.B. Schallgeschwindigkeitsfelder c (x, y, z, t). Somit kann auch erstmals ein zeitlich und räumlich entfernungsabhängiges hydroakustisches Folgemodell (Range Dependend, RD) zur Bestimmung der Sonarverhältnisse damit angetrieben werden, welches im Vergleich zu einem entfernungsunabhängigen Verfahren die

[19] Allan Robinson (17.10.32 bis 25.09.2009) war Prof. an der Havard Universität in Cambridge (Massachusetts US) und hatte gemeinsame Projekte mit dem NATO – Unterwasserforschungsinstitut in La Spezia (SACLATCEN/NURC jetzt CMRE) u.a. auf dem Gebiet der Ozeanmodellierung (Havard Ocean Prediction System, HOPS).

Natur besser abbildet, da bei der Schallausbreitung im Ozean der Einfluss von Fronten, Wirbeln, Mäander etc. auf die Sonarverhältnisse berücksichtigt werden kann, welche auch zeitlich und räumlich veränderlich sind. Auch im Bereich der sog. Sonar-Multistatik wurden die Modellergebnisse bereits genutzt

Bzgl. weiterer Folgemodelle (Drift etc.) und deren Nutzen für die Marine siehe Abschnitt 1.2.

8 Ausblick

Zunehmende Einsätze der Marine in außerheimischen Gewässern, auch weltweit, erfordern die Kenntnis der maritimen Umwelt. Von der Planung eines Auslandseinsatzes, dem optimalen Einsatz von Sensoren auch unter taktischen Gesichtspunkten, bis hin zur Gefahrenvermeidung für Mensch und Material wird die ozeanographische Beratung unerlässlich sein.

Da sich die ozeanographische Umwelt aber rasch räumlich und zeitlich verändern kann, ist es auch in Zukunft notwendig, diese Veränderungen vermittels numerischer Vorhersagemodelle zu erfassen und mögliche Auswirken auf eine militärische Operation zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

Fachprojektblatt 3310-0050-5577 (2011). *Regionales Ozeanmodell*. Projektmanagementhandbuch, AGeoBw.

Hedström Katherine (2016) *Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/ Ocean Circulation Model (Version4)*. Arctic Regional Supercomputing Center University of Alaska Fairbanks, US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Alaska OCS Region, Anchorage Alaska, Cooperative Agreement No. M14AC00014, OCS Study BOEM 2016-037.

Mkhinini N. et. al. (2014) *Long-lived mesoscale eddies in the eastern Mediterranean Sea: Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities*. J. Geophys. Res., Oceans 119.

Kantha, L. (2000) *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes. AP International Geophysics Series*, Volume 66.

Majewski D., T. Reinhard und D. Thiel (2016) *Numerische Wettervorhersage*. GeoInfoForum, Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2016.

Marinekommando (2015) *Unsere Marine hilft Menschen in Not*. Marinekommando Presse- und Informationszentrum, 5.8.2015, (www.marine.de).

Nagy A. B. et.al. (2012) *Integrated Decision Aid (IDA)*, User Manual. Draft CMRE Technical Report.

Onken R. et.al. (2014) *REP14-MED Cruise Report*. NATO Science and Technology Organization Centre for Maritime Research and Experimentation (STO-CMRE). CMRECR201406REP14MED

Onken R. (2015a) RELOC. *Eine detaillierte Systembeschreibung*. Unveröffentlichtes Manuskript, CMRE-Februar 2015.

Onken R. (2015b) CORSAR- *A Rapidly Relocatable Ocean Forecasting System*. CMRE-MR-2015-011. November 2015.

Onken R. (2017) *Forecast skill score assessment of a relocatable ocean prediction system, using a simplified objective analysis method*. Ocean Science, EGU, 13.

Paul U. (2010): *Vorhersage von Wellen und Strömung in der Brandungszone als taktische Entscheidungshilfe*. GeoInfoForum, Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2012

Paul U. (2012): *Erstmals ARGO- Drifter von Deutscher Marine ausgelegt – FGS Lübeck in der Ionischen See*. GeoInfoForum, Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2012

Paul U. (2012): *Das Regionale Ozeanmodell bei MarA Geo für die Ionische See/Mittelmeer im operationellen Betrieb*. GeoInfoForum, Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2012

Paul U. (2015) *Mehrzweckboot „FGS Kronsort" im Einsatz: Ozeanographische Messfahrt in der Straße von Gibraltar, im Nordostatlantik und bei den Britischen Kanalinseln*. Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1, 2015, ISSN 1865-6978.

Paul U. (2018) *Regionale Ozeanvorhersagemodelle im operationellen Betrieb für die Marine*. Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1, 2018, ISSN 1865-6978.

Roeckner E. (2003) *Allgemeine Zirkulationsmodelle*, Atmosphäre. Promet, Jahrg. 29, Nr.1-4, 2003.

Strode, C. (2010) *Transitioning the Multistatic Tactical Planning Aid (MSTPA) towards decision support software*. NURC-FR-2010-013.

Abkürzungsverzeichnis

AGeoBw	Amt für GeoInformationswesen der Bundeswehr. Jetzt ZGeoBw.
ARGO	Das ARGO-Programm ist ein Gemeinschaftsprojekt von mehr als 30 Nationen aus aller Welt. Etwa 3900 sog. ARGO-Drifter vermessen die Ozeane in Realzeit. Diese auf- und abtauchenden Roboter messen von der Oberfläche bis in ca. 2000 Meter Wassertiefe Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff u.a. Parameter. Das ARGO-Programm ist Bestandteil des globalen Ozean Überwachungssystems GOOS. Der Name ARGO ist nach dem Schiff Argo aus der griechischen Mythologie benannt.
ASW	Anti Submarine Warfare (eng.). Anti Uboot Jagd (z.B. Fregatte vs. Uboot)
ATALANTA	EU NAVFOR Somalia – Operation Atalanta. Sind EU Seestreitkräfte (NAVFOR, naval forces) zum Schutz humanitärer Hilfslieferungen nach Somalia, der freien Seefahrt und zur Bekämpfung der Piraterie vor der Küste Somalias, am Horn von Afrika und im Golf von Aden. Der Operationsname „Atalanta“ lehnt sich an die gleichnamige jungfräuliche Jägerin aus der griechischen Mythologie an.
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (eng.). Autonomes Unterwasserfahrzeug
BND	Bundesnachrichtendienst
CFL – Kriterium	Courant Friedrich Levi - Stabilitätskriterium
COSMO	Consortium for small – scale Modelling. Wettervorhersagemodell als Basis für RLM – Modellnester.
COSMO – EU	COSMO - Europaausschnitt.
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Europäischer maritimer Dienstleister.
CMRE	Center for Maritime Research and Experimentation (Früher NURC, SACLANT CEN, Unterwasserforschungszentrum der NATO in La Spezia, ITA)
CSAR	Combat SAR. Durchführung von SAR - Einsätzen in Kampfgebieten (combat).
DMRZ	Deutsches Meteorologisches Rechenzentrum. Wird gemeinsam vom DWD und der Bundeswehr betrieben.
DWD	Deutscher Wetterdienst
EUNAVFOR MED	EU Operation Sofia zur Bekämpfung von Menschenschmuggel und Krisenbewältigung im Mittelmeer.
FOAM	Forecasting Ocean Assimilation Model. Britisches Ozeanmodell.
FTP	File Transfer Protocol. Methode zur Übertragung von Daten zwischen Computern.
GeoInfoDBw	Geoinformationsdienst der Bundeswehr
GOOS	Global Ocean Observing System.
HPC	High Performance Computer. Großrechner am DWD, z.Zt. zwei CRAY-XC40 mit Linux-Vorcluster
HZG	Helmholz - Zentrum Geesthacht. Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH. Ist Mitglied der Helmholz – Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (größte deutsche Wissenschaftsorganisation).
ICON	ICOsahedral Nonhydrostatic. Globales nichthydrostatisches Wettervorhersagemodell des DWD auf Icosaeder Gitter.
ICON – EU	ICON Europa Ausschnitt
IMETOC	NATO Kooperation bei der METOC - Unterstützung von Übungen und Einsätzen.
INGV	Instituo nationale di geofisica e vulcanologia (ita.). Ist eine staatliche geowissenschaftliche Forschungseinrichtung Italiens mit Sitz in Rom und verschiedenen Außenstellen und Observatorien.

MarA	Marineamt
MarKdo	Marinekommando
MCM	Mine Counter Measure. Minenjagd.
MERCATOR	Name des Ozeanmodells, welches von der französischen Non-Profit Gesellschaft Mercator-Ocean betrieben wird.
MetBw	Gruppe des ZGeoBw beim Deutschen Wetterdienst
MFS	Mediterranean Forecasting System (eng.)
MilNW	Militärisches Nachrichtenwesen
METOC	Meteorology and Oceanography.
MN MSG	Multinational METOC Support Group.
MSTPA	Multistatic Tactical Planning Aid.
NATO	North Atlantic Treaty Organization (eng.)
NEMO	Nucleus for European Modeling of the Ocean. Community Ozeanmodell der EU.
NetCDF	Network Common Data Format. In Geowissenschaften weit verbreitetes Format zur Abspeicherung/ Austausch von Daten.
NMDH	NATO METOC Data Hub. Computer mit Software zur Verteilung von METOC – Daten zur Unterstützung von NATO – Einsätzen.
NURC	NATO Undersea Research Center (jetzt CMRE).
NWP	Numerical Weather Prediction (eng.). Numerische Wettervorhersage.
OAE	Operation Active Endeavor. NATO-Solidarität und Bekämpfung des Terrorismus im Mittelmeerraum.
Ocean Shield	Operation Ocean Shield ist eine NATO-Marinemission zur Bekämpfung der Piraterie im Golf von Aden.
OSG	Operation Sea Guardian.OAE wurde durch OSG abgelöst.
REA	Rapid Environmental Assessment. NATO - Konzept zur schnellen Gebietserfassung. Erfassung der Umweltverhältnisse und Bewertung der Auswirkungen auf NATO - Einsätze.
RLM	Relocatable Local Model. Hochaufgelöstes meteorologisches Modellnest.
ROMS	Regional Ocean Modeling System (eng.). Ozeanmodell der Rutgers Universität, USA. Derzeit größte und sehr aktive Nutzer Community (ROMS-Forum): www.myroms.org.
RELOC	Relocatable Ocean Modeling System. Ozeanvorhersagesystem mit Pre- und Postprozessierung auf MATLAB Basis.
ROCM	Relocatable Ocean Circulation Model. Ozeanvorhersagesystem mit Pre- und Postprozessierung auf PYTHON Basis. Weiterentwicklung von RELOC, Laufzeitoptimiert.
SACLANT CEN	Supreme Allied Commander Atlantic (SACLANT) Anti Submarine Research Center (jetzt CMRE).
SAR	Search and Rescue. Im staatlichen Auftrag international tätige Rettungsdienste für Notfälle. Zur Koordination sind alle Staaten verpflichtet Rettungsleitstellen (RCC, Rescue Coordination Center) einzurichten. Für Deutschland befindet sich die Leitstelle für Seerettung (MRCC, Maritime Coordination Center) in Glücksburg.
SARIS	Search and Rescue Information System. Software/ Computer Programm zur optimalen Durchführung von SAR - Einsätzen.
SW	Submarine Warfare (eng.), Uboot Jagd.(z.B. Uboot vs. Uboot)
MCM	Mine Countermeasure (eng.), Minenjagd

MCMEXPERT	NATO MCM EXclusive Planning Evaluation Risk Tool (engl). NATO Software/Modell für die Minenjagd (MCM)
MSM	Minenjagd Simulationsmodell. Wie SPI, Sonarleistungsanalysator für Minensonare
SPI	Sonar Performance Indicator (eng.), Sonarleistungsanalysator für Minensonare
TOMS	Tactical Ocean Modeling System. ROMS Version für die US- Marine.
UKMO	United Kingdom Met Office. Britischer Wetterdienst, Hauptsitz Exeter, UK.
UNIFIL	United Nations Interim Force in Lebanon. Flottenverband unter Führung der Vereinten Nationen vor der Küste des Libanon. Einsatz für angestrebten Frieden zwischen Israel und Libanon, Kontrolle der Seewege, Ausbildung der libanesischen Marine.
ZGeoBw	Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr.

Bisherige Veröffentlichungen in der Schriftenreihe des GeoInfoDBw

Mit der Fusion des Militärgeographischen Dienstes der Bundeswehr und des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr werden die Fachpublikationen der beiden Dienste in der ***Schriftenreihe*** *des GeoInfoDBw zusammengefasst. Damit beginnt eine neue Aufzählung der bisherigen Veröffentlichungen.*

Heft 1, 2003 Regierungsdirektor Dr.-Ing. Fischer
Geophysikalisch bedingte Leistungsgrenzen der Hubschrauber CH-53G und CH-53GS

Heft 1, 2004 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Oskar Albrecht
Beiträge zum militärischen Vermessungs- und Kartenwesen und zur Militärgeographie in Preußen (1803-1921)

Heft 2, 2004 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Hafeneder
Überblick über das Militärische Geowesen Deutschlands im 19. und 20. Jahrhundert

Heft 1a, 2008 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Rudolf Hafeneder
Deutsche Kolonialkartographie 1884–1919 (TEXT-BAND)

Heft 1b, 2008 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Rudolf Hafeneder
Deutsche Kolonialkartographie 1884–1919 (ANLAGEN-BAND)

Heft 1, 2009 Regierungsdirektor Dipl.-Met. Wolfgang Meyer und weitere Autoren
Geschichte des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr – 1956 bis 2003 –

Heft 2, 2009 Georg Mischuk
Piraterie in Südostasien

Heft 3, 2009 Hartmut Behrend, Dr. Wolfhart Dürrschmidt, Christian D. Falkowski, Dr. Monika Lanik, Dr. Judith Miggelbrink, Dennis Tänzler, Prof. Dr. Heinz Theisen, Frank Wehinger
Jahresheft Geopolitik 2008 (Inhalt: ● Migration in die erweiterte EU, ● Klimawandel)

Heft 4, 2009 GeoDir Dr. Willig
Die Odyssee des Wehrgeologenarchivs als Teil der Heringen Collection

Heft 5, 2009 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Theo Müller und Dirk Hubrich
Überblick über das Karten- und Vermessungswesen des deutschen Heeres von 1919 bis 1945

Oberst a. D. Dipl.-Ing. Theo Müller
Die Divisionskartenstellen des deutschen Heeres von 1939 bis 1945

Heft 1, 2010 T. Albrecht und D. Gärtner
Besonderheiten der Seewetterberatung (Teil 1)

T. Albrecht und I. Hinrichs
Der Einfluss des küstennahen Auftriebsphänomens auf die Konzentrationen von Dimethylsulfid an der Meeresoberfläche (Teil 2)

T. Albrecht und R. Wolke
Messung und Modellierung von CH2O-Variationen in der marinen Atmosphäre (Teil 3)

T. Albrecht
Meteorologische Verhältnisse im Atlantik und Nordpazifik im Sommer 2004 (Teil 4)

Heft 2, 2010 Steffen Bauer, M.A., PD Dr. Stefan Bayer, Col John Fitzgerald, Prof. Hermann Kreutzmann, Dr. Hans-Jochen Luhmann, Prof. Christian-D. Schönwiese
Jahresheft Geopolitik 2009 (Inhalt: • Geopolitische Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, • Klimawandel und Energiesicherheit)

Heft 3, 2010 Andreas Dachs
Rechenzeitoptimierung, Robustifizierung und Tuning eines Kalmanfilters zur Datenfusion für Navigationsanwendungen

Heft 4, 2010 Dr. Torsten Albrecht
Atmosphäre und Ozean im Nördlichen Polargebiet

Heft 1, 2011 Rolf Clement, Leonhardt Van Efferink, Melanie Hanif, Michel-André Horelt, Ralf Lasinski, Annegret Mähler, Peter Cornelius Mayer-Tasch, Georg Mischuk & Johannes Hamhaber, Martin Müller, Heinz Nissel, Rainer Rothfuß, Wolfgang Schreiber, Ricarda Steinbach
Jahresheft Geopolitik 2010 (Inhalt: • Ziviler Aufbau unter Konfliktbedingungen – Die Arbeit der GIZ in Afghanistan, · Umweltgeologie hilft die Lebensbedingungen der Menschen zu verbessern – Fallbeispiel Malawi, • Rolle und Aufgabenwahrnehmung durch die internationale Polizei im Rahmen multinationaler Einsätze der Vereinten Nationen)

Heft 1, 2012 Christian Marius Stahmer, Hans-Günter Mylius, Arno Langanke

Jahresheft Geopolitik 2011 (Inhalt: • Ziviler Aufbau unter Konfliktbedingungen – Die Arbeit der GIZ in Afghanistan, • Umweltgeologie hilft die Lebensbedingungen der Menschen zu verbessern – Fallbeispiel Malawi, • Rolle und Aufgabenwahrnehmung durch die internationale Polizei im Rahmen multinationaler Einsätze der Vereinten Nationen)

Heft 1, 2013 Wolfgang Schreiber, Kinan Jaeger, Reza Hajatpour, Daniel Lambach, Leonhardt van Efferink, Inken Wiese, Werner Ruf

Jahresheft Geopolitik 2012 (Inhalt: • Tunesien – Hintergründe und Perspektiven der Jasmin-Revolution, • Der Syrien-Konflikt – Risiken und Chancen, • Islamische Republik Iran und die Grüne Bewegung, • Fragile Staatlichkeit – ein brauchbares Konzept zur Erklärung der Umbrüche in Nordafrika und Nahost?, • Länderrisiken, Rating Agenturen und der Arabische Frühling, • Deutsche Nahost- und Nordafrikapolitik: . . . , • Möglichkeiten und Grenzen der Demokratieförderung in der arabischen Welt)

Heft 1, 2014 Tobias von Lossow, Dr. Annabelle Houdret, Dr. Thomas Hennig

Jahresheft Geopolitik 2013 (Inhalt: • Wasserkonflikte und Kooperationsabkommen an Indus und Nil, • innerstaatliche Konflikte um Wasser: Ursachen und Präventionsmöglichkeiten, • Innerstaatliche und transnationale Wasserkonflikte in China und Indien)

Heft 1, 2015 Oberregierungsrat Diplom-Ozeanograph Uwe Paul

Mehrzweckboot „FGS Kronsort" im Einsatz: Ozeanographische Messfahrt in der Straße von Gibraltar, im Nordostatlantik und bei den Britischen Kanalinseln

Heft 2, 2015 – Zeitzeugen berichten –, Band I

25 Jahre Armee der Einheit
Die „Geo-Dienste" im Zuge der Wiedervereinigung

Heft 3, 2015 Florian Oßner, Thorben Hoffmeister, Thomas Zumbrunnen, Prof. Dr. Rüdiger Gerdes & Kathrin Riemann-Campe, Kerstin Kloss, Olaf Martins, Dr. Sören Scholvin, Stefan Opitz, Adam Widera

Jahresheft Geopolitik 2014 (Inhalt: • Geopolitik und Infrastruktur, • Erschließung von Verkehrsräumen im alpinen Bereich,
· Transarktische Seerouten, • Der Nicaraguakanal, • Die Entwicklung der Energieträger Öl und Erdgas und ihre Verkehrswege,
· Geopolitik in den internationalen Beziehungen, • Verkehrsinfrastruktur aus geopolitischer Sicht am Beispiel der Volksrepublik China, • Verkehrsinfrastruktur zwischen Entwicklungs- und Machtpolitik, • Logistik im Kontext humanitärer Hilfe)

Heft 4, 2015 RDir Dr. Dierk Willig, Dr. Edward P. F. Rose, Professor Dr. Irénée Heyse, Dr. Christoph Allersmeier, Professor Dr. Peter Doyle

Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien)

Heft 1, 2016 RDir a.D. Dipl.-Met. Dr. Gerhard Schmager

Der Hydro-Meteorologische Dienst der Volksmarine - Geschichte-Routinedienst-Spezialaufgaben

Heft 2, 2016 Dr. Andreas Iskam, Jochen Moninger, Dr. Sven M. Funke, Dr. Judith Vorrath und Dr. Bettina Rudloff

Jahresheft Geopolitik 2015 Die Ebola-Epidemie 2014 im westlichen Afrika unter geopolitischen Gesichtspunkten (Inhalt: • Die Ebola-Epidemie im Westlichen Afrika • Ebola-Abwehr in Sierra Leone und Folgen für die Gesellschaft • Humanitäre Hilfe Westafrika – „Ebola must go" • „Bedrohung der zivilen Ordnung": Den langfristigen Folgen von Ebola begegnen

Heft 3, 2016 Oberst a. D. Dipl.-Ing. Jochen Landmann

Die Topographietruppe 1957 – 2003

Heft 1, 2017 Thorben Hoffmeister, Dr. Bernhard Rinke, Mg. Juan José Borrell, Maj. Michael A. Hehn, Dr. Enrico Fels, Thomas Dehling,

Gyola Csurgai, PhD, Tassilo Singer
Jahresheft Geopolitik 2016