

45 Jahre Seegangmodellvorhersagen im Geoinformationsdienst der Bundeswehr für die Deutsche Marine im Einsatz

Von den ersten Forschungsprojekten für die Bundeswehr ab 1974,
über den operationellen Betrieb seit 1982,
bis zum aktuellen Sachstand und geplanten Weiterentwicklungen

von

Oberregierungsrat
Uwe Paul
Marinekommando
Unterabteilung Geoinformation

Regierungsoberamtsrat
Thomas Gunkel
Marinekommando
Unterabteilung Geoinformation

Heft 1, 2021

Herausgeber: Leiter Geoinformationsdienst der Bundeswehr
Bearbeitung und Herstellung: Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr Euskirchen 2021

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Zur Motivation: Warum Seegangmodellvorhersagen?	6
1.1 Einführende Betrachtung und Grundlagen	6
1.1.1 Impressionen von Schiffen auf See	6
1.1.2 Erste grundlegende physikalische Betrachtungen: Seegang und Riesenwellen	9
1.2 Mögliche Folgen oder Schäden durch gefährliche Situationen bei schwerer See und die Auswirkungen von Riesenwellen, Rollresonanz oder parametrischem Rollen	11
1.2.1 Materialschäden an Schiffen, Öl- und Forschungsplattformen	12
1.2.2 Zerstörte Gegenstände durch Seeschlag, wie z.B. Container, oder deren Verlust durch Rollresonanz, oder parametrisches Rollen	14
1.2.3 Gefahren für die Besatzung bei schwerer See und Präventionsmaßnahmen	17
1.3 Durch Seegang beeinflusste Prozesse und Zustände	17
1.4 Der Einfluss der Bathymetrie, Topographie, dem Wasserstand und der Meereströmung auf den Seegang	18
1.4.1 Beispiel 1: Seegebiet vor Frankreich um Quessant bei Brest	20
1.4.2 Beispiel 2: Seegebiet um Südafrika im Bereich Agulhas- und Benguelar-Strömung ..	22
1.4.3 Beispiel 3: Weltweite Riesenwellen-Gefährdungskarte für die Realzeitberatung: Die Karte des Benjamin-Feir Index (BFI), das "Riesenwellen-Warnsystem" ..	24
2 Der Bedarf der Deutschen Marine und der Nutzen der Weiterentwicklung von Seegangsvorhersagemodellen für die Marine	26
2.1 Anforderungen des Bedarfsträgers Deutsche Marine	26
2.2 Der nutzen der Weiterentwicklung von Seegangsvorhersagemodellen für die Deutsche Marine	26
3 Von den Anfängen der Seegangmodellvorhersagen bis zum aktuellen Stand	26
3.1 Von den Anfängen der Seegangmodellvorhersagen für die Deutsche Marine: Geschichtlicher Überblick über die Entwicklungsphasen der letzten 45 Jahre: 1974 bis 2019	26
3.2 Aktueller Sachstand der Seegangmodellvorhersagen: Das WAM-Globalmodell und die neun schnell verschiebbaren RSM-Nester auf WAM Basis	28
4 Theoretischer Hintergrund der Seegangmodellvorhersagen mit WAM	29
5 Anmerkungen zur Auswahl des Seegangmodelles WAM für den operationellen Betrieb im GeoInfoDBw und weitere gegenwärtig verfügbare Seegangmodelle, wie z.B. SWAN- oder das FE-Modell	31
5.1 Vorbemerkungen: Zur Auswahl des Seegangmodelles WAM als Basis für den operationellen Betrieb im GeoInfoDBw	31
5.2 Zum SWAN-Modell	31
5.3 Zum FEM Seegangmodell „Wind Wellenmodell“	31

6	Neun Seegangmodellnester und die zukünftige Umstellung auf Ikosaeder	33
7	Ziele der Projekte: Seegangmodellvorhersagen	34
8	Folgemodelle	35
9	Schlussbemerkungen und Rückblick	35
	Danksagung	35
	Literaturverzeichnis	36
	Abkürzungsverzeichnis	40
	Anhang	42

Zusammenfassung

Die Bundeswehr (Bw), insbesondere die Deutsche Marine, hat einen dauerhaften und unabweisbaren Bedarf an präzisen Seegangsvorhersagen als Voraussetzung für die sichere und auftragsgerechte Durchführung ihrer weltweiten Einsätze. Grundlage für eine bedarfsgerechte Beratung sind Simulationen des Seegangs, welche durch ein numerisches Modell auf einem Computer gewonnen werden. Die Kenntnis der Modellergebnisse/Vorhersagen ist wichtig, denn schwere See kann sehr gefährlich für die seegehenden Einheiten (Schiffe und Material), die Durchführbarkeit einer Mission (z. B. das Risiko der Befahrbarkeit eines Seegebietes, Starten und Landen eines Helikopters an Deck, Aufnahme/Abgabe von Kraftstoff auf See, Wünschen von Personen von Schiff zu Helikopter) oder für die Besatzungen selbst (Mann über Bord) und die Beladung (z. B. Container) werden.

Daher hat sich die Bw seit 1974 an der Entwicklung, der beständigen Weiterentwicklung und der Verbesserung von Seegangsvorhersagemodellen beteiligt und betreibt seit 1982 Seegangmodellvorhersagen im operationellen Betrieb für Tiefwasserbereiche (Hybrid Parametrical [HYPA] Water Wave Model) sowie seit 1983 für Flachwasserbereiche (Hybrid Parametrical Shallow [HYPAS] Water Wave Model).

Seit 2006 verfügt die Bw über ein „Globales Seegangmodell“ (GSM) und neun auf dem GSM schnell und weltweit verschiebbare „Regionale Seegangmodelle“ (RSM), sog. RSM-Nester, welche auf der Physik eines Seegangsmo­dells „Wave Model“ (WAM) der dritten Generation basieren (Kapitel 3.2) und auch fortführend, in den sog. WAM-Cycle-Updates, aktualisiert werden.

Einen Überblick über die Entwicklungsphasen der letzten 45 Jahre (1974–2019), die Kooperation der Bw mit Behörden, Forschungsinstitutionen und der „Deutschen Seegangsguppe“ beim Deutschen Wetterdienst (DWD) wird in Kapitel 3 in Form einer zeitlichen Aufstellung der Meilensteine der Entwicklung gegeben.

Auf diesem Sachstand basierend, werden in Kapitel 7 die aktuellen Fachprojekte zur Weiterentwicklung vorgestellt:

- Migration der Seegangmodellfamilie von dem bisherigen Großrechner CRAY auf den neuen Großrechner NEC des Deutschen Meteorologischen Rechenzentrums (DMRZ) in Offenbach und Ludwigshafen, sowie der Installation auf dem Bw-Clusterrechner am Standort Euskirchen. Dies erfolgt innerhalb des Projektes/Rahmenvertrages GEOVOR Anteil Migration Seegangmodell und Ozeanmodell: Y_U2CK_LA150_T1003.
- Weiterentwicklungen des Seegangsmo­dells WAM im Einwegeantrieb durch das meteorologische Modell "Icosahedral Nonhydrostatic" (ICON) als Interimslösung für den Bedarfsträger Marine und Vorarbeit auf dem Wege zur vollständigen Zweiwegekopplung. Dafür wurde der Projektplan „Weiterentwicklung des Regionalen Seegangsmo­dells“, eine Fortführung des Auftrags M/AMG0/IA208, erstellt.
- Eine Zweiwegekopplung von WAM mit ICON. Beteiligung des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (GeoInfoDBw) an dem DWD-Projekt „Two Way ICON-WAM Coupling“ (2WICWAM)¹.

Für spezielle Anwendungen in der NATO, der Europäischen Union (EU) und der Deutschen Marine, wie z. B. dem Antrieb von Brandungsmodellen, werden Seegangmodellnester aus der Modellfamilie der „Simulating Waves Nearshore“ (SWAN)² Modelle betrieben und in Kapitel 5.2 vorgestellt.

¹ Der DWD führt eigene Forschungsprogramme durch. Um seinen Bereich der „Angewandten Forschung und Entwicklung“ zu unterstützen, betreibt der DWD das interne Forschungsprogramm „Innovation in der angewandten Forschung und Entwicklung“ (IAFE) mit derzeit elf Projekten. 2WICWAM ist eines davon.

² SWAN ist, wie WAM auch, ein spektrales Seegangmodell der dritten Generation und wurde an der Delft University of Technology entwickelt. SWAN ist in der NATO u. a. im Zusammenhang mit Brandungsmodellen bekannt: Interface for SWAN and Surf Models (ISSM) (RUSU et al. 2006).

1 Zur Motivation: Warum Seegangsvorhersagen?

1.1 Einführende Betrachtung und Grundlagen

Das Erscheinungsbild des Meeres und damit die von den Besatzungen wahrgenommene Meeresumwelt kann sich innerhalb von Stunden, von friedlich harmonisch, zu bedrohlich belastend verändern, wenn der Seegang zunimmt. In diesem Kapitel wird daher im Abschnitt 1.1.1 zunächst durch Abbildungen von Schiffen auf See in die Problematik der schnell veränderlichen Meeresumwelt eingeführt. In Abschnitt 1.1.2 folgen erste grundlegende Fachbegriffe und einführende physikalische Betrachtungen.

1.1.1 Impressionen von Schiffen auf See



Abb. 1 a: Die Fregatte BADEN-WÜRTTEMBERG (Typ F125) bei ruhiger See im Kattegat. Soldaten der Bordeinsatzkompanie 2 vom Seebataillon ziehen bei der Erprobung des Bootstyps BUSTER an der Fregatte vorbei. Nicht immer ist die See derartig ruhig und friedlich. Wie lange dieser Zustand anhält, wird durch Seegangsvorhersagen bekannt. (Quelle: Deutsche Marine)

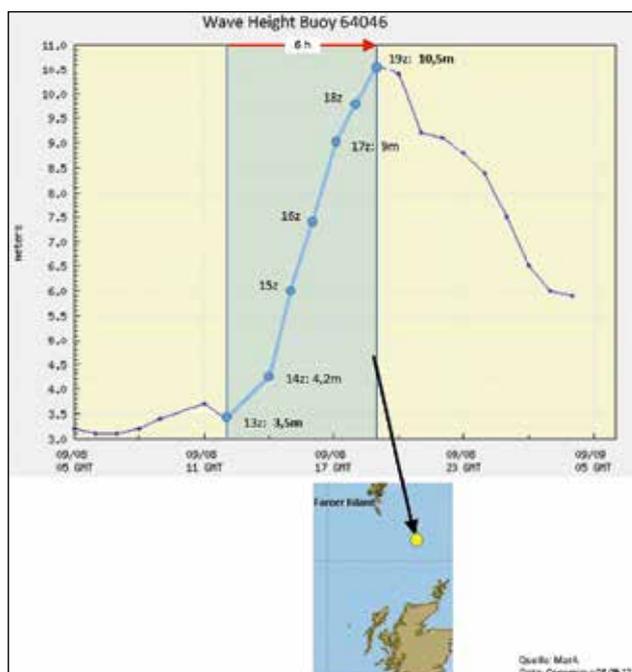


Abb. 1 b: Die Abb. zeigt beispielhaft, wie schnell sich die Seegangsverhältnisse ändern können. Dargestellt sind die Messungen einer Seegangsboje südlich der Färoer-Inseln: Innerhalb von nur sechs Stunden stieg die Wellenhöhe um sieben Meter an. Derartige Veränderungen werden durch Seegangsvorhersagen mind. 72 Stunden im Voraus bekannt gemacht, um darauf angemessen reagieren zu können. (Quelle: Marinekommando)



Abb. 1 c: Forschungsschiff Valdivia auf hoher See im Nordatlantik. (Quelle: U. Paul, Marinekommando)



Abb. 1 d: Korvette LUDWIGSHAFEN AM RHEIN (F264) in bewegter See im Mittelmeer im Rahmen der Mission EUNAVFOR MED Operation Sophia. (Quelle: Deutsche Marine)



Abb. 1 e: Einsatzgruppenversorger FRANKFURT AM MAIN (Typ EGV 702) bei Seegang. Container stehen an Deck. (Quelle: Deutsche Marine)

1.1.2 Erste grundlegende physikalische Betrachtungen: Seegang und Riesenwellen

Seegang kann große Energiemengen speichern, diese über weite Strecken transportieren, wechselwirken und bei Störungen des voranschreitenden Seegangsfeldes diese auch wieder freisetzen. Den Gewalten des Seegangs sind sowohl die Seeschifffahrt als auch Offshore- und Küstenbauwerke massiv ausgesetzt: Gerade die Masse von Seewasser, die enormen Wellenhöhen und die hohen Wellengeschwindigkeiten können zerstörerische „Anprallkräfte“ erzeugen: Viele Kubikmeter Wasser prallen dabei mit einer Geschwindigkeit von mehreren Metern pro Sekunde gegen Schiffe, Aufbauten und Ladung. Viele Schiffe waren früher – und sind es möglicherweise derzeit noch – nicht für derartig extreme Belastungen konstruiert. Wichtige Parameter dazu sind die maximal zu erwartende Wellenhöhe sowie die Geschwindigkeit und der daraus abgeleitete, maximale belastbare Druck in Tonnen pro Quadratmeter, welchem z. B. Ladeluken und Fenster standhalten müssen (siehe Vorschriften GERMANISCHER LLOYD SE 2011).

Seegangsfeld: Ein Seegangsfeld besteht aus der Überlagerung verschiedener Einzelwellen, mit unterschiedlichen Wellenhöhen (H), Wellenlängen (L), Perioden (T) und Wellenaufrichtungen (θ) zur Zeit (t) bei einer Wassertiefe (d). Bei dieser sog. „linearen Superposition“ oder „konstruktiven Interferenz“ entsteht die Höhe einer neu entstandenen Welle einfach durch Addition der Höhen der Einzelwellen. Diese sog. Schwerewellen haben unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, je nach Wassertiefe (d) bei Flachwasserwellen, oder je nach Wellenlänge (L) bei Tiefwasserwellen³.

Um eine Riesenwelle⁴ allerdings auf diese Weise zu erklären, müssten sich genügend Einzelwellen an einem Punkt addieren. Dann aber ist das Seegangsfeld nicht mehr homogen, normalverteilt und zufallsbedingt. Die zusätzliche Energie über den linearen Anteil hinaus, welche zu der Entstehung einer Riesenwelle führt, muss also aus anderen Frequenzbereichen bzw. physikalischen Prozessen kommen. JANSSEN (2003, S. 87) erklärt, dass erst durch die Nichtlinearitäten die Wellenhöhen das Drei- bis Fünffache der normalen Wellenhöhen erreichen können. Daher sei hier schon darauf hingewiesen, dass die Beschreibung von Riesenwellen über die lineare Theorie hinausgeht und erst durch nichtlineare Wechselwirkungen der Wellenenergie und anderer Prozesse, welche bei bestimmten Naturverhältnissen auftreten, erklärt werden kann (siehe dazu Kapitel 1.4). Werden Einzelwellen nach ihrer Wellenhöhe in drei Gruppen – Gruppe der hohen Wellen, mittelhohen Wellen und niedrigen Wellen – sortiert, dann ergibt sich die sog. „signifikante Wellenhöhe“ (H_s) durch Mittelwertbildung des höchsten Drittels aller auftretenden Einzelwellen (Mittelwert der Gruppe der hohen Wellen). Natürlich kann auch die mittlere Wellenhöhe (H_m) über alle Einzelwellen errechnet werden, also nicht nur über das obere Drittel, aber es ist gebräuchlicher H_s zu verwenden, da diese mit der „beobachteten Wellenhöhe“ bei Schiffsbeobachtungen gut übereinstimmt.

³ Im Allg. kommen Schwerewellen nicht als monochromatische Einzelwellen vor, sondern als lineare Überlagerung von Einzelwellen mit Nachbarfrequenzen, woraus Wellenpakete und Wellengruppen entstehen, die sich mit Gruppengeschwindigkeit c_g fortbewegen. Für Schwerewellen gilt:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad \text{Fall a) für große Wellenlängen } L \text{ ist } x \text{ klein, } \tanh(x) \approx x, c = \sqrt{gd},$$

Flachwasserwellen, „lange Wellenlänge“: Die Schwerewelle spürt den Meeresboden, weil die Wellenlängen im Vergleich zur Wassertiefe groß sind: $L > 20d$ mit $d =$ Wassertiefe. Es ist $c = \sqrt{gd}$, oder $c = 3,13 \sqrt{d}$ m/s (mit $c = c_{\text{Gruppe}}$), d. h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt nur von der Wassertiefe d ab. Die Einzelwelle ist gleichschnell wie ein Wellenpaket, welches daher nicht auseinanderläuft. Die Einzelwelle bzw. das Wellenpaket sind umso schneller, je größer die Wassertiefe ist. Ein Tsunami erreicht z. B. bei $d = 4000$ m $c = 720$ km/h ($L > 80$ km).

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad \text{Fall b) für kleine Wellenlängen } L \text{ und große Wassertiefen } d, \text{ wird } x \text{ groß, } \tanh(x) \rightarrow 1, c = \sqrt{gL/2\pi}$$

Tiefwasserwellen, „kurze Wellenlänge“: Die Schwerewelle spürt den Meeresboden nicht, weil die Wellenlänge im Vergleich zur Wassertiefe klein ist: $d > L/2$. Es ist $c = \sqrt{gL/2\pi}$ oder $c = 1,25 \sqrt{L}$ (m/s $\cdot 3,6 =$ km/h), d. h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt nur von der Wellenlänge L ab (Dispersion). Die Phasengeschwindigkeit der Einzelwelle ist doppelt so schnell wie die Gruppengeschwindigkeit $c = 2 c_{\text{Gruppe}}$ des Wellenpaketes. Da längere Wellen schneller sind, kurzperiodische stärker gedämpft werden, laufen die langen Dünungswellen aus einem Sturmgebiet heraus. Die Periode ist $T = \sqrt{2\pi/g} \cdot L = 0,8 \sqrt{L}$ (s).

Mit $L = 50$ m ist $c = 32$ km/h ($T = 6$ s), mit $L = 125$ m ist $c = 50$ km/h ($T = 9$ s, $d > 62,5$ m), mit $L = 100$ 0m ist $c = 142$ km/h ($T = 25$ s).

⁴ Zumeist werden drei Arten von Riesenwellen, auch Monsterwellen genannt, unterschieden: 1) Kaventsmann (engl.: „Rogue Wave“) ist eine riesige, schnelle Welle die nicht der Richtung des vorherrschenden Seegangs folgt, 2) Weiße Wand (engl.: „White Wall“) ist eine extrem hohe und steile Welle, die oben am Wellenkamm instabil wird, Gischt ablöst und von einem tiefen Wellental gefolgt wird. 3) Drei Schwestern (engl.: „Three Sisters“) sind zwei oder mehr kurz aufeinander folgende riesige Wellen, die aufgrund des sehr kurzen Wellentales und der extremen Wellenteilheit nur schwer abgeritten werden können und zumeist spätestens ab der zweiten Welle zum Eintauchen des Schiffsbugs und Überrollen von der Welle führt.

Je nachdem wie stark die Wellenhöhen der Einzelwellen streuen, können deutlich höhere Maximalwerte (H_{\max}) erreicht werden. Als Maß für die Streuung der Wellenhöhen H aller Einzelwellen um den Mittelwert H_s wird wie üblich die Standardabweichung (s) bzw. Varianz⁵ (Var) verwendet.

Die Schwankungsbreite liegt dann im Bereich von $H_s - s$ bis $H_s + s$. In diesem Bereich sollten nun 68% aller Wellenhöhen H liegen, wenn denn alle Einzelbeiträge der Variablen H „normalverteilt“ sind. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Überlagerung aller Einzelwellen linear und zufallsbedingt ist.

Die zu H_s und s gehörige Glockenkurve⁶ oder Gaußsche Normalverteilung $p(H)$ lässt sich nach Gleichung (1) berechnen (siehe Abb. 2):

$$p(H) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-0,5 \frac{(H-H_s)^2}{s^2}\right) \quad (1)$$

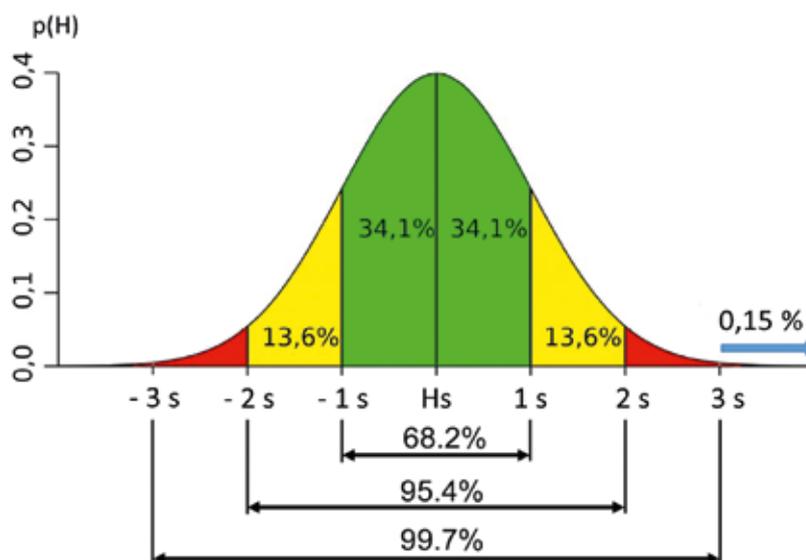


Abb. 2: Beispiel für eine Glockenkurve $p(H_s, s)$. Die Fläche unter der Kurve ist normiert auf „Eins“, d. h. die Höhe und Breite von p hängt von der Standardabweichung s ab. Nur 0,15% aller Wellenhöhen liegen über $3s$ des betrachteten Mittelwertes H_s . (Quelle: U. Paul, Marinekommando)

Bei dieser Betrachtungsweise wird davon ausgegangen, dass der Seegang statistisch homogen, also das Seegangsfeld ausreißerfrei ist. Es werden somit evtl. relevante Einzelphänomene, wie bspw. Riesenwellen, welche nicht „normal“ durch bloßen Zufall erklärbar sind, nicht durch den linearen Ansatz erfasst (vgl. LOHÖFER 2003, S. 163). Es wird in diesem Fall nicht phasenaufgelöst jede Einzelwelle betrachtet, sondern unter statistischen Gesichtspunkten das gesamte Seegangsfeld über eine bestimmte Fläche und Zeit.

Diese Vorgehensweise lässt viel größere Gitterpunktabstände bei Seegangsvorhersagemodellen zu (GÜNTHER 1996, S. 130) und erst dadurch ist die Modellierung und Vorhersage des Seegangs für große Seegebiete – mit Regionalen Seegangsmoellen (RSMs) – bis hin zur globalen Skala – mit Globalen Seegangsmoellen (GSMs) – möglich. Bei der Betrachtung von Einzelwellen, welche in Küstennähe branden (PAUL 2010), ist eine sehr viel höhere Auflösung des numerischen Gitters, etwa im Zentimeterbereich, aber auch der Bathymetrie und Topographie notwendig. Daher sind diese Modelle auf kleine Regionen beschränkt.

⁵ Die Varianz ist die mittlere quadratische Abweichung vom arithmetischen Mittelwert. Berechnung: $\text{Var} = s^2$

⁶ Die Glockenkurve wird mitunter auch Dichtefunktion der Normalverteilung, Gaußsche Normalverteilung, Gaußsche Glockenkurve etc. genannt. In einigen Arbeiten (LOHÖFER 2003) wird nur der Spezialfall mit Mittelwert $H_s = 0$ und Standardabweichungen $s = 1$ als Gaußsche Normalverteilung bezeichnet. Die Gesamtfläche unter dem Graphen ist normiert 1, daher ist eine geringe Streuung steiler/höher.

Eine Erweiterung dieser grundlegenden physikalischen Betrachtung (lineare Theorie) durch die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten wie Wellenwechselwirkungen sowie Wechselwirkungen mit Meeresströmungen und Wirbeln erfolgt später in dieser Ausarbeitung. Zum Erstaunen vieler Wissenschaftler kommen die Auswirkungen dieser physikalischen Prozesse viel häufiger vor als zunächst vermutet bzw. im Rahmen einer Gaußschen Normalverteilung zu erwarten wäre und sind zudem von äußerst gefährlicher Natur:

Innerhalb des EU-Projektes „MaxWave“⁷ (BASENER 2013, S. 116; ROSENTHAL & LEHNER 2004) wurden anhand von weltweiten Satellitenradarmessungen, u. a. mit ERS-1 und ERS-2 Satelliten, innerhalb von nur drei Wochen zehn Wellen gemessen, welche über 25 m hoch waren. Das hat gezeigt, dass Riesenwellen, auch Monsterwellen, Freakwaves, Roque-Waves etc. genannt, nicht so selten wie bisher angenommen sind. Bis zum EU-Projekt „MaxWave“ vermutete man das Auftreten einer Monsterwelle nur alle zehn bis 100 Jahre. In der Literatur findet sich oft der Begriff „Jahrhundertwelle“.

Als Riesenwelle wird eine Welle definiert, welche mind. das 2,15-fache der signifikanten Wellenhöhe erreicht. Daher ist die rechtzeitige Vorhersage von

- gefährlichem Seegang durch operationelle Seegangsvorhersagen und die
- Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Riesenwellen (Benjamin-Feir Index [BFI])⁸

für die Seeschifffahrt von größter Bedeutung, um angemessen reagieren zu können – z. B. durch Umfahren eines Gefahrengebietes (Routenauswahl), geeignete nautische Manöver⁹, rechtzeitiges Überprüfen von Ladung und geeignete Ladungssicherung.

1.2 Mögliche Folgen oder Schäden durch gefährliche Situationen bei schwerer See und die Auswirkungen von Riesenwellen, Rollresonanz oder parametrisches Rollen

In diesem Abschnitt soll verdeutlicht werden, dass die Bereitstellung von Seegangsvorhersagen mittels eines operationellen Vorhersagemodells, wie es in der GeoInfo-Beratung der Marine oder der Routenberatung des Deutschen Wetterdienstes (DWD)/Seewetteramtes üblich ist, nicht nur eine empfehlenswerte Option, sondern für die Schiffsicherheit – also für Mensch und Material – von fundamentaler Bedeutung ist. Um sich einen Überblick über mögliche Folgen von gefährlichen Situationen zu verschaffen, sind u. a. folgende Quellen wichtig: Sämtliche Seeunfälle werden in Deutschland durch die „Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung“ (BSU) untersucht und mit veröffentlichten Berichten abgeschlossen. Diese Berichte sind nicht eingestuft und somit für jeden Interessierten einsehbar. Zudem veröffentlicht die BSU in ihren Jahresberichten auch Statistiken und besondere Vorkommnisse. Organisatorisch befindet sich die BSU am „Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie“ (BSH) in Hamburg. Für die Untersuchung von Havarien, an denen ausschließlich Wasserfahrzeuge der Deutschen Marine beteiligt sind, ist der „Beauftragter für Havarieuntersuchungen der Marine“ (BHavM) am Marinekommando (MarKdo) Rostock zuständig, welcher u. a. Jahresberichte im Auftrag des Inspektors der Marine anfertigt.

Im Folgenden werden Beispiele für schadhafte Auswirkungen genannt, die schwerer Seegang, Riesenwellen und extremes Rollen auf die Seeschifffahrt haben können. Bei rechtzeitiger Kenntnis der Gefahren aufgrund der Vorhersagen besteht die Möglichkeit zur Gefahrenabwehr durch geeignete Gegenmaßnahmen. Darüber hinaus ist dieser Abschnitt auch ein Beitrag zur Aufklärung über „All Weather Ships“, welche angeblich unempfindlich gegenüber allen Wetter- und Seegangbedingungen sein sollen.

⁷ „MaxWave“ war ein im Zeitraum von 2000 bis 2003 von der Europäischen Union (EU) gefördertes Projekt, welches von Dr. ROSENTHAL am Forschungszentrum „Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH“ (HZG) koordiniert wurde. Teilnehmer waren die EU-Wetterdienste von Frankreich, Großbritannien und Norwegen; die Firma „OceanWaves“; Universitäten aus Belgien, Deutschland, Polen und Portugal; eine norwegische Schiffsklassifizierungsgesellschaft; die Hamburgische Schiffbauversuchsanstalt GmbH und die Forschungsinstitute des HZG und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Ziel des Projektes war es, einen Beweis für die Existenz von Monsterwellen zu erbringen sowie deren Kartierung und Vorhersage zu erforschen.

⁸ Der sog. Benjamin-Feir Index (BFI) ist definiert als $BFI = \frac{\text{Wellensteilheit}}{\text{Breite des Wellenspektrums}}$. Je größer der BFI ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Riesenwellen. Im Allg. liegt der BFI zwischen 0 und 1, bei $BFI > 1$ sind die Wellen instabil. Im Oktober 2003 wurde der BFI als Indikator für das Auftreten von Riesenwellen am „Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage“ (engl.: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) eingeführt und veröffentlicht (JANSSEN 2003, 2008). Seitdem wird die Validierung des „Freak Wave Warning System“ vom ECMWF angestrebt. Die kontinuierliche Beobachtung und Vermessung von Riesenwellen ist aber leider zeitlich begrenzt (vgl. MaxWave-Experiment über drei Jahre; ROSENTHAL & LEHNER 2004). Die extreme Wellensteilheit der Monsterwellen, bei schmalen Wellenspektrum (alle Energie entfällt auf eine Einzelwelle oder wenige Wellen in einer Gruppe) führt zu hohem BFI.

⁹ Während der Seereisen des Erstautors auf verschiedenen Forschungsschiffen im nördlichen Nordatlantik (siehe Anhang 1) musste bei schwerer See der Stationsbetrieb, welcher mit am Draht ausgebrachten Sonden bis fast 4.000 m Tiefe verbunden war, eingestellt werden. Dies war notwendig, damit die Schiffsführung vermittels geeigneter nautischer Manöver so lange abwettern konnte, bis sich die schwere See beruhigt hatte. Erst dann konnten die Messungen bis in die Tiefsee fortgesetzt werden.

1.2.1 Materialschäden an Schiffen, Öl- und Forschungsplattformen

- Schiffskonstruktionsteile. Um Materialschäden an den Spanten von Schnellbooten¹⁰ zu vermeiden, wurden Ampelvorhersagen des Seegangsfeldes an das Schnellbootgeschwader zur Einsatzplanung übermittelt. Seegebiete mit kurzer, steiler und hoher See wurden darin gesondert gekennzeichnet.
- Bei der Teilnahme an diversen Forschungsreisen im nördlichen Nordatlantik (s. Anhang: die Word Ocean Circulation Experiment-Seereisen [WOCE-Seereisen] und Analyse von hydrographischen Daten, PAUL 1994) hat der Erstautor selbst miterlebt, wie bei schwerer See Schäden am Schanzkleid entstanden sind oder ein Windenhaus verbogen wurde. Auch ein massiver Container aus rostfreiem Edelstahl, welcher am Heck stand, wurde durch eine einsteigende Welle enorm verbogen. Die Reisen führten zumeist in den Bereich des Subpolarwirbels bis Cap Farewell an der Südspitze Grönlands. Südlich von Island befinden sich die Maxima der signifikanten Wellenhöhen über die weltweit größte zusammenhängende Fläche (vgl. Abb. 3, SCHMAGER et al. 2006).
- Öl- und Forschungsplattformen. Als Beispiel sei hier die sog. „Draupnerwelle“ genannt, welche am 1.01.1995 um 16:20 Uhr in der Nordsee die norwegische Draupner-Ölplattform als Einzelwelle mit 26 m Höhe getroffen hat; bei einem signifikanten Seegang von nur 12 m. Die sog. „Neujahreswelle“ wurde durch Laseraufzeichnungen dokumentiert und somit im Jahr 1995 erstmals die Existenz von Monsterwellen nachgewiesen. Größere Schäden an der Plattform sind nicht entstanden bzw. nicht bekannt.

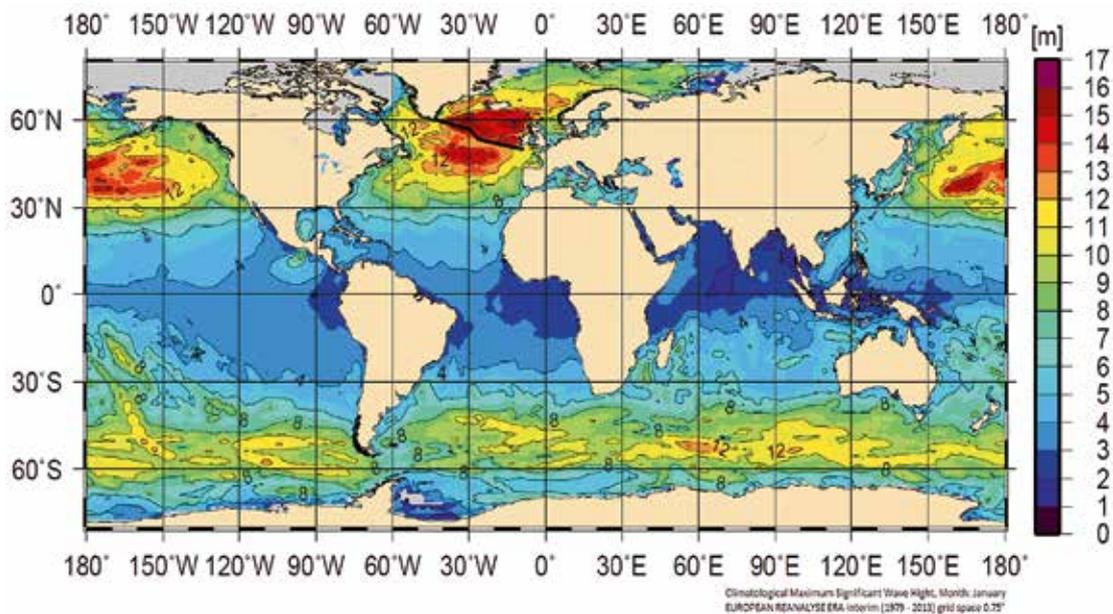


Abb. 3: Die größte zusammenhängende Fläche des Maximums der signifikanten Wellenhöhe weltweit, mit Wellenhöhen über 14 m, tritt auf der Nordhalbkugel im Januar südlich von Island auf. Der Schiffstrack des WOCE Hydrographischen Schnittes A1E ist als Linie schematisch eingezeichnet und geht überwiegend durch dieses Gebiet. (Quelle: Marinekommando).

Als zweites Beispiel sei hier das Orkantief BRITTA genannt, welches am 1.11.2006 zu signifikanten Wellenhöhen bis zu 10 m in der Nordsee führte. Der DWD berichtet auf seiner Internetseite (LEFEBVRE 2006) von Havarien auf hoher See, Schäden und Todesopfern im Zusammenhang mit dem Orkan.

An der Forschungsplattform FINO-1¹¹, welche ca. 50 km nördlich der Insel Borkum gelegen ist, führte die schwere See zu Beschädigungen am unteren Laufgang; in 15 m Höhe (s. Abb. 4). Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) berichtete auf seiner Internetseite (PLESKACHEVSKY 2012), dass die Forschungsplattform von drei Einzelwellen von jeweils mindestens 15 m Wellenhöhe getroffen wurde.

¹⁰ 2016 wurde das 7. Schnellbootgeschwader außer Dienst gestellt und damit die Ära der Schnellboote in der Deutschen Marine beendet.

¹¹ FINO-1 gehört zum BSH-Messnetz MARNET (Messnetz automatisch registrierender Stationen in der Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee). Es gibt drei „Eorschungsplattformen in Nord- und Ostsee“ (FINOs) in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone.

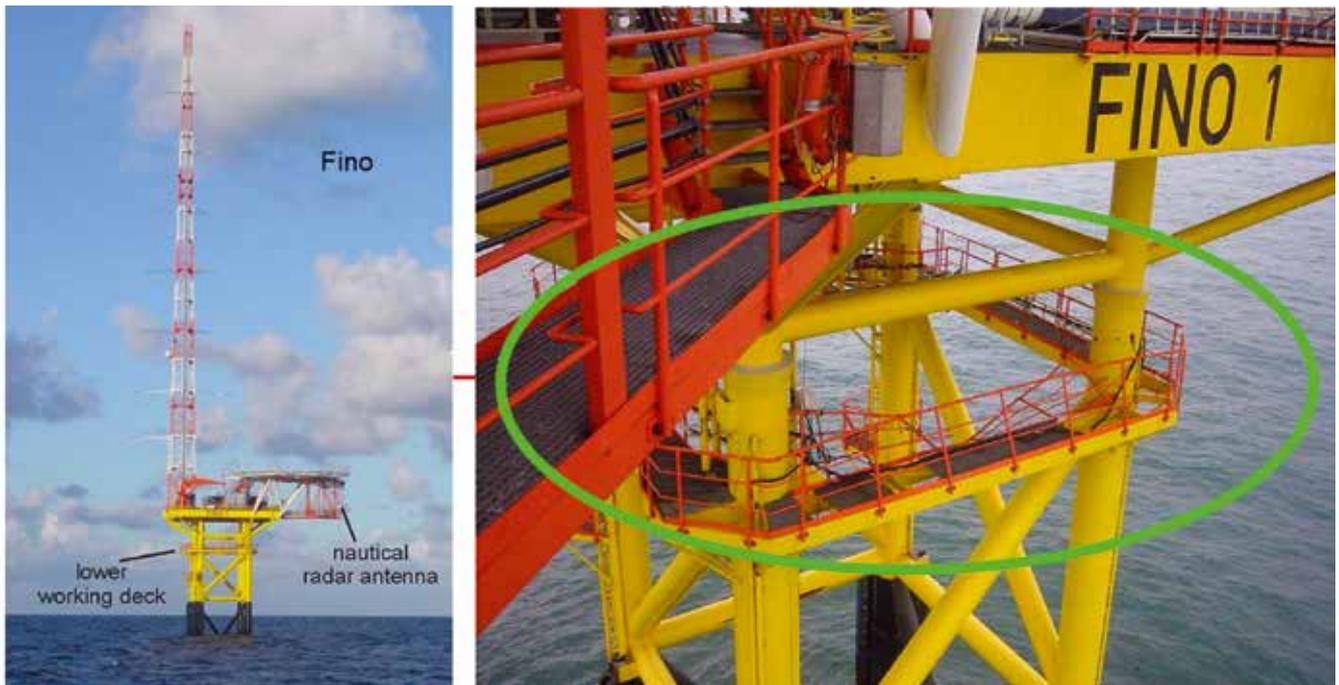
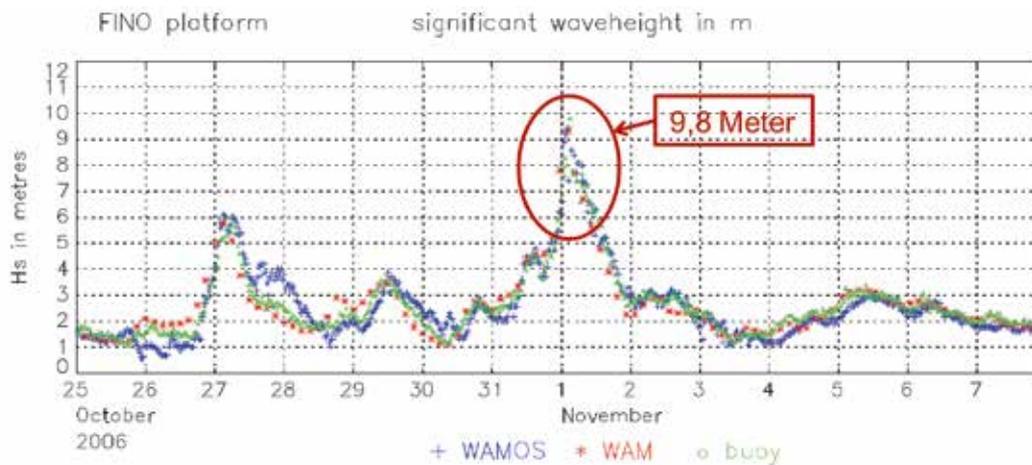


Abb. 4: Beschädigung des unteren Laufganges an FINO-1 in 15 m Höhe durch Sturm BRITTA am 31.10/1.11.2006. (Quelle: BEHRENS, HZG)

Dieses Seegangereignis mit einer Wellenhöhe von $H_s = 10$ m, wie in Abbildung 5 deutlich zu sehen ist, wurde durch das „Wave Model“ (WAM) ausgezeichnet aufgelöst (BEHRENS 2009).



WAMOS = Wave and Surface Current Monitoring System

Abb. 5: Das Seegangmodell WAM erfasst ausgezeichnet die Seegangssituation $H_s = 10$ m und liegt zwischen den H_s -Werten, welche aus den Messwerten eines Seegangradars (Wave Monitoring System, WAMOS) und Bojen Messwerten berechnet wurden. (Quelle: BEHRENS, HZG)

Da das WAM nicht phasenauflösend drei Einzelwellen/Monsterwellen mit 15 m Höhe darstellen kann, sondern den Seegang statistisch über Fläche und Zeit, wird auch die statistische Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Riesenwellen vermittels des BFI ermittelt (JANSSEN 2003, 2008).

Wenn die Windgeschwindigkeit¹², wie während des Orkans BRITTA (31.10–1.11.2006) über der nördlichen Nordsee, nahezu gleich der Wellengeschwindigkeit¹³ ist, wirkt der Wind beständig auf die gleichen Wellen ein und führt diesen damit kontinuierlich Energie zu. Diese können dadurch immer weiter anwachsen. In der Folge entsteht ein Überschuss an Energie, der auf die Seitenbänder der Peakwelle durch nichtlineare Wechselwirkungen übertragen werden kann (vgl. HASSELMANN 1962, BENJAMIN 1967, BENJAMIN & FEIR 1967, JANSSEN 2003). Bei der höherfrequenten Seitenkeule im Spektrum dissipiert die Energie im Allgemeinen, während bei dem niederfrequenten Anteil die Energie akkumuliert und neue niederfrequente Wellenkomponenten entstehen (WMO 1989, S. 60), die das Drei- bis Fünffache an linearer Wellenhöhe erreichen können (JANSSEN 2003). Das Spektrum wird also zum niederfrequenten Anteil verschoben und schmaler, was bei großer Wellensteilheit zu einem erhöhten BFI führt. Daher wird auch in der GeoInfo Beratung der Marine, wie bereits von JANSSEN (2003) am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (engl.: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) eingeführt, der BFI im operationellen Betrieb zusätzlich als Beratungsunterlage zur Verfügung gestellt.

1.2.2 Zerstörte Gegenstände durch Seeschlag, wie z. B. Container, oder deren Verlust durch Rollresonanz oder parametrisches Rollen



Abb. 6: Containersituation nach Seeschlag: Verbogene und herumgeworfene Container. (Quelle: DWD. <https://rcc.dwd.de/DE/leistungen/seegutachten>)

Seeschlag¹⁴. Ein Kubikmeter Wasser wiegt bereits eine Tonne. Wenn dieser mit einer Wellengeschwindigkeit von 50 bis 100 km/h gegen einen Container prallt, kann der Container wie eine Getränkedose verbogen werden. Container können so regelrecht durcheinandergeworfen werden. Man kann sich leicht vorstellen, welche Kräfte von einer 20 m hohen Riesenwelle, etwa vom Typ „Weiße Wand“, ausgehen. Abb. 6 zeigt eine Containersituation nach einem Seeschlag.

Rollresonanz, parametrisches Rollen. Gefahr auf See muss nicht alleine von „Schwerer See“ oder „Riesenwellen“ ausgehen. Bei bestimmten Schiffstypen reichen auch geringere Wellenhöhen um die 5 m schon aus, wenn das betroffene Schiff durch den

Seegang derart ins Rollen gebracht wird, dass es aufgrund extremer Schräglage Ladung wie Container verliert oder sogar kentern kann (KRÜGER 2011, Kapitel 7.2).

Im Folgenden wird beispielhaft ein physikalischer Ablauf dargestellt, der zur Schiffsgefährdung durch Rollen führen kann, welches durch ein Seegangsfeld angefacht wurde:

- 1) Das Schiff wird durch eine Welle aus dem Gleichgewichtszustand ausgelenkt. Dann ist der Gewichts- schwerpunkt des gesamten Schiffes (G) nicht mehr lotrecht über dem Auftriebsschwerpunkt (B) des eingetauchten Unterwasserschiffes, weil durch die Krängung des Schiffes der Auftriebsschwerpunkt (B) zur eingetauchten Seite hin verschoben wurde und zwar in das Zentrum des jetzt verdrängten Wassers. Dadurch entsteht ein aufrichtender Hebelarm (h), das Rückstell-Drehmoment (Abb. 7). Da sich die Form und das Volumen des verdrängten Wassers beim Schiff im Seegang ständig mit der Zeit ändern, kommt es auch zu ständigen Veränderungen des Auftriebsschwerpunktes (B) und daher zu „Hebelarmschwankungen“. Diese Initial-Rollbewegung kann durch weitere Effekte verstärkt werden (SCHILLER 2010, S. 6).

¹² Die mittlere Windgeschwindigkeit bei Orkan BRITTA betrug 50 kn ~ 100 km/h in der nördlichen Nordsee, mit Böen bis 150 km/h (LEFEBVRE 2006, S. 2 f.).

¹³ Eine Wellengeschwindigkeit, die einer Windgeschwindigkeit von 100 km/h in der nördlichen Nordsee entsprechen soll (Orkan Britta), damit die Welle vom Wind optimal angefacht wird, kann bei Wassertiefen $d > L/2$ entstehen (Tiefwasserwelle), wenn z. B. $L = 125$ m ist und die Wassertiefe größer als 63 m. Die Wellengeschwindigkeit hängt dann nur noch von der Wellenlänge ab ($c = 1,25 \sqrt{L}$) und die Einzelwelle ist mit 100 km/h doppelt so schnell wie die Gruppe ($c_{\text{phase}} = 2 c_{\text{Gruppe}}$). Steigt die Wellenlänge über 125 m, steigt die Wellengeschwindigkeit über 100 km/h an (s. Fußnote 3).

¹⁴ Seeschlag (engl.: seawash): Einwirkungen sowie Schäden durch ungebrochen massiv an Deck von Schiffen oder Offshore-Konstruktionen einwirkendes Wasser. Spritzwasser ist hier nicht gemeint.

2) Rollresonanz. Jeder Schiffstyp ist ein schwingungsfähiges System mit seiner eigenen „Rolleigenperiode“ (TR). Begegnet das Schiff während einer Rolleigenperiode (TR) nur einer Welle, d. h. das Schiff stampft nur einmal während einer Rolleigenperiode, kann es bei beständiger Wiederholung zu einer Energieakkumulation kommen, die das Rollen bis zur 1:1 Rollresonanz verstärkt. Trifft das Schiff während einer Rollperiode (TR) nacheinander auf zwei Wellenberge, d. h. das Schiff stampft zweimal während einer Rolleigenperiode, dann wird die doppelte Energiemenge vom Seegang auf die Schiffsschwingung übertragen und es kann bei beständiger Wiederholung zum 2:1-Resonanzfall kommen. Die Zeit, die vergeht, bis zwei aufeinanderfolgende Wellenberge an der gleichen Schiffsstelle eintreffen, heißt „Begegnungszeit“ (TB). Diese ist von der Wellenperiode (oder Wellengeschwindigkeit und Wellenlänge), dem Schiffskurs relativ zur Seegangsrichtung und der Schiffsgeschwindigkeit abhängig (See-BG 2003).

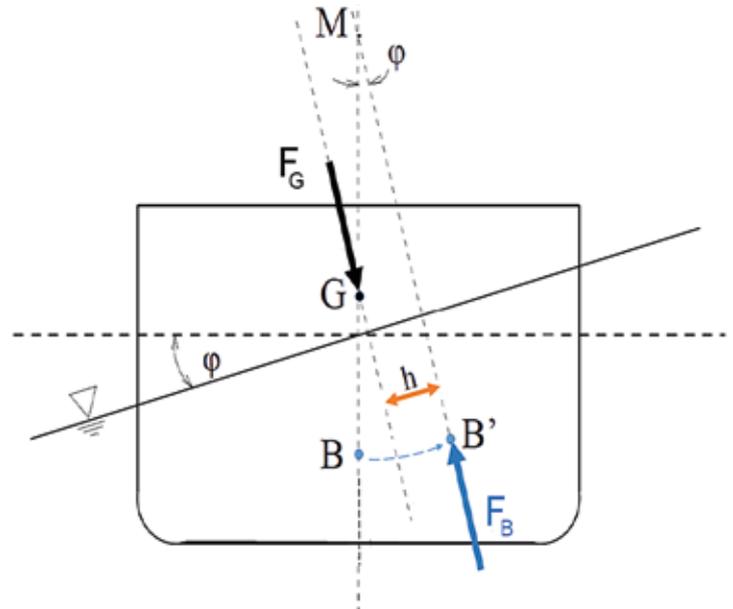


Abb. 7: Durch eine Krängung um den Winkel Φ (φ) wandert der Auftriebsschwerpunkt (B) zur eingetauchten Seite nach B' und somit entsteht zwischen dem Gewichtsschwerpunkt (G) und B' der Hebelarm (h), das Rückstell-Drehmoment. F_G und F_B sind die Kraftvektoren. M ist das Metazentrum. Das ist der Schnittpunkt der Linien „Schiffsmitte“ und „Kraftvektor F_B “. (Quelle: In Anlehnung an KRÜGER 2013, Abb. 14)

3) Parametrisches Rollen. Man spricht von parametrischem Rollen, wenn die Rollbewegung nicht direkt durch eine äußere Kraft wie die Wellenschräge angeregt wird, sondern indirekt über einen Parameter (BG-See 2003). In diesem Fall ist der Parameter der Hebelarm, also das Aufstell- oder aufrichtende Drehmoment. Und genau dieses ändert sich periodisch, je nach der Wellensituation und der Lage des Schiffes in der Welle. Diese bestimmt die Form und das Volumen des Verdrängungskörpers (Abb. 7), also die periodischen Schwankungen des Verdrängungsschwerpunktes (B) (KRÜGER 2011, S. 57). Besonders gefährlich ist die Situation des Schiffes bei vorderlichem oder achterlichem Seegang: Aufgrund einer geringeren Stabilität auf dem Wellenberg und einer größeren im Wellental, kommt es zu periodischen Schwankungen der Stabilität. Werden diese periodischen Schwankungen durch den Seegang angeregt (siehe 2), kann es zu extremen Rollbewegungen kommen und das Schiff Ladung verlieren oder im Extremfall sogar kentern. Das Großcontainerschiff APL CHINA hat auf diese Weise 1998 500 Container durch heftiges Rollen verloren (KRÜGER 2011, S. 56). 2019 hat in der Nordsee vor Borkum das Containerschiff MSC ZOE, welches eine Länge von 395 m hat, 342 Container bei zwei Rollereignissen bei nur 5,5 m Wellenhöhe verloren (Abb. 8). Zitat aus dem BSU-Bericht (2019) AZ3/19, S. 6: „Als plötzlich sechs aufeinanderfolgende stärkere Rollbewegungen auftraten, wurde der Ladungsverlust nördlich von AMELAND festgestellt. [...] Am 2. Januar gegen 01:30 Uhr, kurze Zeit später, kam es wieder zu starken Rollbewegungen und nördlich von BORKUM zum nächsten Containerverlust.“ Erstaunlich allerdings ist, dass selbst derart kompakte Schiffe wie Eisbrecher von parametrischem Rollen betroffen sein können: Das Seewetteramt berichtet, dass selbst der deutsche Eisbrecher „FS POLARSTERN“, ein Forschungs- und Versorgungsschiff, auf seiner Fahrt nach Punta Arenas ins parametrische Rollen geraten ist (BRUNS et.al. 2011).

Folgerungen: Die Eigenrollperiode als Schiffseigenschaft des verwendeten Schiffstyps ist bekannt oder kann von den Schiffsbauingenieuren ermittelt werden. Kurs und Geschwindigkeit wird bei der Routenplanung durch die Wegepunkte und Zeit vorgegeben.

Die Seegangseigenschaften (H_s , T, L, c, aber zusätzlich auch d)¹⁵ sind durch die Seegangsvorhersagen alle bekannt und können für ein Modell zur Vorhersage der Gefahr von Rollresonanz genutzt werden. Zum Validieren der Seegangsvorhersagen ist ein Seegangsradar geeignet (PAUL 2015, S. 16).

¹⁵ H_s : Signifikante Wellenhöhe, T: Wellenperiode, L: Wellenlänge, c: Wellengeschwindigkeit, d: bei Flachwasserwellen hängt die Wellengeschwindigkeit alleine von der Wassertiefe d ab.



Abb. 8a: Großcontainerschiff MSC ZOE (395 m Länge). Verschiedene Containerstacks kollabierten, 342 Container fielen außerbords. (Quelle: Havariekommando)



Abb. 8b: Einzelne deformierte Container. (Quelle: Havariekommando)

Somit ist es möglich, zu jeder Routenplanung, zu jedem Nav-Track/Schiffstrack, neben der Seegangsvorhersage auch eine „Schiffs-Risikoanalyse“ bereitzustellen (s. Kapitel 9).

1.2.3 Gefahren für die Besatzung bei schwerer See und Präventionsmaßnahmen

Gefahren im Außenbereich und Präventionsmaßnahmen: Um Gefahren vorsorglich zu vermeiden, werden die Außenbereiche an Bord zumeist rechtzeitig vor Eintreten der Gefahrenlage für das Betreten gesperrt. Ist dies nicht möglich, so wird das Deck abgespannt und die Besatzungen können sich vermittels eingehakter Laufleinen gesichert an Deck im Außenbereich bewegen (Abb. 9).



Abb. 9: Segelschulschiff GORCH FOCK in schwerer See. Das Deck ist abgespannt, die Besatzung ist mit Lifebelt und Life-line sicher eingehakt. (Quelle: Marineamt, Abteilung Geoinformationswesen)

Gefahren im Innenbereich: Auf der Brücke sind durch extreme Rollbewegungen und enorme Beschleunigungen bereits Verletzungen und sogar Todesfälle aufgetreten. Hier soll nur auf den Fall der CMS CHICAGO EXPRESS (Länge ü. a. 336 m) vom 24.09.2008 eingegangen werden. Zitat aus dem BSU-Bericht (2009) AZ_510/08 Seite 7: „Gegen 02:45 Uhr wurde das Schiff, welches zu diesem Zeitpunkt vom Kapitän geführt und vom Rudergänger per Hand gesteuert wurde, plötzlich von einer besonders heftigen, von Steuerbord kommenden Welle getroffen, als es gerade nach Steuerbord rollte. Die CHICAGO EXPRESS holte daraufhin mehrfach stark über, wobei das Inklinometer bei einer geschätzten Periode von zehn Sekunden einen (unkorrigierten) maximalen Rollwinkel von 44 Grad registrierte. Durch die enormen Beschleunigungswerte auf der Brücke verloren der Kapitän, der Rudergänger (OS) und der ebenfalls auf der Brücke anwesende Ausguck (AB) den Halt und wurden quer durch die Brücke geschleudert.“¹⁶ Es kam zu Verletzungen und einem Todesfall.

Ziel der GeoInfo-Beratung der Marineeinheiten muss es daher sein, die Gefahren von schwerer See, Riesenwellen und parametrischem Rollen vorab zu erkennen und durch Routenberatung und rechtzeitige Warnungen vor aufkommenden Risikosituation zu vermeiden.

1.3 Durch Seegang beeinflusste Prozesse und Zustände

Austauschprozesse mit der Atmosphäre. Bereits GÜNTHER (1996) hat darauf hingewiesen, dass neben der direkten Wirkung des Seegangs, die Austauschprozesse mit der Atmosphäre zunehmend an Bedeutung gewinnen. Der Austausch von Energie und Stoffen (z. B. Wasser, Gase [CO₂], Aerosole) ist u. a. abhängig vom

¹⁶ OS: engl.: Ordinary Seaman, Hilfskraft Deck (Leichtmatrose), Funktion an Bord gemäß Musterrolle.
AB: engl.: Able Bodied Seaman, Fachkraft (Vollmatrose), Funktion an Bord gemäß Musterrolle.

Seegangszustand (Oberflächenrauigkeit Z_0) und findet daher bei der künftigen Entwicklung von gekoppelten Atmosphäre-Seegangmodellen Berücksichtigung (vgl. Kapitel 7).

Durchmischung der ozeanischen Deckschicht und Sonar. Seegang sorgt für eine Durchmischung der ozeanographischen Deckschicht bis maximal zur Reibungstiefe. In diesem Bereich kann sich ein positiver Schallgeschwindigkeitsgradient einstellen, welcher Auswirkungen auf die Sonarreichweiten hat. Nachdem der Seegangslärm (engl.: Noise) und der durch Seegang entstandene Blasen Teppich abgeklingen sind, kann durch die positive Schichtung eine größere Sonarreichweite erreicht werden.

Brandung. Im flachen Wasser geht der Seegang in Brandung über und verliert dadurch Energie. Ein Teil seiner Energie dissipiert am Meeresboden (Quellterm S_{bf}). Ein Energie- und Volumenanteil (Nettotransport in der Brandungszone) kann aber auch zur Entwicklung von küstenparallelen seegangsinduzierten Querströmungen führen. Es ist daher gebräuchlich, Seegangmodelle wie WAM oder „Simulating Waves Nearshore“ (SWAN) mit Ozeanmodellen zu koppeln, welche die Meeresströmungen und Schichtungen vollständig für jeden Raum- und Zeitpunkt berechnen¹⁷. Es bieten sich dazu „Regionale Ozeanmodelle“ an, wie z. B. von PAUL (2012, 2018) beschrieben. Einfachere Abschätzungen des Anteils der welleninduzierten Strömung an der Gesamtströmung (verursacht durch Gezeitenströmungen, geostrophische Strömungen, Trägheitsströmungen etc.) liefern Brandungsmodelle, wie z. B. das „Navy Standard Surf Model“ (NSSM) der US Navy (METTLACH et al. 2002), das darauf basierende NATO-Tool „Interface for SWAN and Surf Models“ (ISSM) von RUSU et al. (2006), oder das von der Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur (engl.: United Nations Educational, Scientific and Culutal Organization, UNESCO) geförderte Brandungsmodell XBeach (DELTA RES 2015), welches im Fall der nichthydrostatischen Auflösung von Einzelwellen auf „Simulating Waves till Shore“ (SWASH) (ZIJLEMA 2011) basiert. Die Deutsche Marine hat für die Brandungsvorhersage das Tool „Surf Zone View“ (GUEDES et al. 2015; MetOcean 2015), welches auf XBeach basiert, im praktischen Einsatz getestet und eine Beschaffung für die operationelle Nutzung initiiert.

Erosion und Sedimenttransporte. Insbesondere die Orbitalbewegungen der Wellen sind aufgrund ihrer Stärke ein wichtiger Prozess, bei dem es zu Erosionen am Meeresboden kommt: bei schwerem Seegang oder dem Durchgang großer Einzelwellen. Bei Brandung in flachen Gebieten, oder direkt an der Küste, kommen auch noch Turbulenzen hinzu. Eine Sandbank in der Nordsee, die Doggerbank, ist z. B. nur 15 m flach und Riesenwellen von 10 bis 15 m Höhe wurden nachgewiesen. Diese hohen Wellen spüren den für sie flachen Meeresboden und es kann zur sog. Grundsee kommen, wie im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird. Die erodierten Sedimente können durch küstenparallele Meeresströmungen über weite Strecken abtransportiert werden.

Von den o. g. Prozessen sind Gegenstände, die auf dem Meeresgrund liegen oder darin versandet sind, ebenfalls betroffen: JENKINS & PAPILI (2020) untersuchten z. B. die Verortung von schweren Objekten am Meeresboden aufgrund des Einflusses von sehr hohen Wellen durch Stürme, welche in der Deutschen Bucht (Nordsee) mehrfach im Jahr auftreten. Dazu zählen die sog. „Unexploded Explosive Ordnance“ (UXO), also nicht oder nicht vollständig explodierte Kampfmittel wie Minen und Bomben, die hauptsächlich aus den zwei Weltkriegen stammen. JENKINS & PAPILI (2020) meinen sogar, Regionen identifizieren zu können, in denen UXO-Objekte das Potential haben, zu wandern. PAPILI et al. (2014), GUYONIC et al. (2007) und BOWER et al. (2007) weisen darauf hin, dass Projekte in Frankreich, Belgien und den USA gezeigt haben, dass selbst 500 kg schwere Objekte am Meeresboden verschoben wurden, wenn die Wellen bzw. Seegangsbedingungen stark genug waren.

1.4 Der Einfluss der Bathymetrie, Topographie, dem Wasserstand und der Meeresströmung auf den Seegang

Die Kenntnis des Windantriebs (engl.: Windforcing) ist natürlich von größter Bedeutung für die Vorhersage von Seegang, Riesenwellen und Rolleigenschaften. Es gibt aber auch einige weitere Naturverhältnisse, die von Bedeutung sind, weil sie den Seegang beeinflussen:

Bathymetrie. Nimmt die Wassertiefe ab und die Wellen „spüren“ den Meeresboden (engl.: Shoaling), werden die Wellen langsamer, die Wellenfronten werden zunehmend zur Küste gebeugt bis sie küstenparallel sind (Wellenrefraktion), die Wellenlänge nimmt ab und die Wellen werden steiler (nichtlineare Effekte), bis sie aufgrund ihrer Instabilität brechen und Brandung entsteht. Zumeist wird das „tiefenabhängige Wellen-

¹⁷ Beispiel: Für die prognostische Variable Temperatur erhält man dann $T = T(x,y,z,t)$. Daher wird gelegentlich von der Analyse und Visualisierung von 5-dimensionalen Datengittern gesprochen: Vis5D.

brechen“ nach BATTJES (1974) oder BATTJES & JANSSEN (1978) verwendet; mit Einteilung der verschiedenen Brechertypen anhand der sog. „Brecherkennzahl“ bzw. „Irrbaren Zahl“¹⁸. Die kurze, „hackige“ See über flachen Meeresgebieten (Bänken/Untiefen) ist bei Besatzungen aufgrund des unruhigen Schiffskurses, dem Stabilitätsverlust und der Gefahr von Grundberührung, der sog. Grundsee, unbeliebt. Die o. g. Effekte sind in den Seegangmodellen WAM und SWAN berücksichtigt.

Topographie. Treffen Wellen auf topographische Hindernisse wie Inseln (Abb. 10), Landvorsprünge oder Bauwerke, werden diese durch sog. „Diffraktion“ kreisförmig in den Leebereich/Schattenbereich der Hindernisse hineingebeugt, den die Wellenfront bei linearer Ausbreitung nicht erreichen würde. Standardmäßig ist Diffraktion nicht in allen Seegangmodellen enthalten. Für eine Messfahrt mit dem Mehrzweckboot (MzB) KRONSORT nach Gibraltar in 2012 (PAUL 2015) wurde in der Abteilung Geoinformationswesen des Marineamtes ein hochaufgelöstes SWAN-Modell mit 900 m bzw. 30“ Auflösung zur Routenberatung aufgesetzt, welches mit der fortschreitenden Reise verschoben wurde (engl.: relocatable). SWAN ist ein spektrales Seegangmodell der dritten Generation, bei dem ein gemischter Diffraktions-Refraktionsalgorithmus nach HOLTHUIJSEN et al. (2003) implementiert wurde und somit Beugungseffekte („Diffraktion“) erfassen kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Algorithmus vernünftig mit Beobachtungen und analytischen Lösungen übereinstimmt (HOLTHUIJSEN et al. 2003)¹⁹. Die Straße von Gibraltar ist an der engsten Stelle nur 14 km breit und wirkt daher für Seegang, welcher je nach Wetterlage nach Westen oder Osten setzen kann, wie eine schmale Apertur. Bei einer Modellauflösung von 900 m, wird diese schmale Öffnung von 14 km mit ca.15 Gitterpunkten selbst an der schmalsten Stelle noch korrekt abgetastet. Es konnte beobachtet werden, dass die Richtung der signifikanten Wellenhöhe hinter der Meereseenge Beugungseffekte an den Rändern zeigt. Als Beispiel: Wie „Oberflächenwellen“, so zeigen auch „Interne Wellen“ Diffraktion (Abb. 11).



Abb. 10: Das Satellitenbild zeigt den Seegang um die Azoreninsel Flores im Atlantik. Zu erkennen sind Seegangseffekte wie Diffraktion, Refraktion und Kreuzsee. Die Hilfslinien verdeutlichen schematisch die Effekte. (Quelle: DLR-Neustrelitz, E. Schwarz. Satellitendaten: modifizierte Copernicus Sentinel-Daten [2021] für Sentinel-2. Hilfslinien: U. Paul)

¹⁸ Die „Irrbare Zahl“ wurde nach dem Spanier Ramón Iribarren Cavanillas (1900–1967) benannt, der die dimensionslose Zahl eingeführt hat, um das Wellenbrechen bei unterschiedlichen Strandneigungen zu beschreiben.

¹⁹ „[...] the SWAN diffraction-approximation can be used in most situations near absorbing or reflecting coastlines of oceans, seas, bays, lagoons and fjords with an occasional obstacle such as islands, breakwaters, or headlands but NOT in harbours or in front of reflecting breakwaters or near wall-defined cliff walls“ (SWAN Team (2020), node 28 [modelling of obstacles, diffraction]).

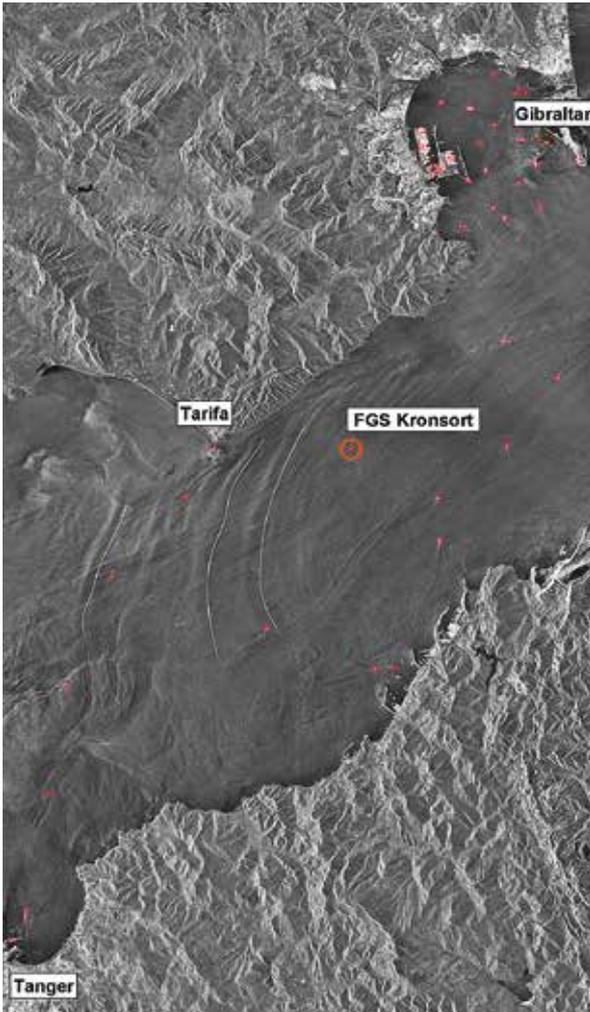


Abb. 11: Diffraktion an einer Apertur: Interne Wellen in der Straße von Gibraltar. Vom Atlantik kommend wird es zunehmend flacher und enger bis zur Meeresenge von nur 14 km; dann öffnet sich wieder der Durchlass zum Mittelmeer. (Quelle: Marinekommando)

Wasserstand (Windstau und Gezeiten). Im Routinebetrieb bei Seegangs- und Brandungsvorhersagen wird von einem mittleren Wasserstand ausgegangen. Für spezielle Brandungsberechnungen, z. B. bei Rerik an der Ostsee, wurden allerdings Wasserstandsschwankungen berücksichtigt, da diese entscheidend sind, ob die Brandung direkt bis vor Rerik aufläuft – bei hohem Wasserstand bis an das Kliff – oder in größerer Entfernung von der Küste vor einer flachen Sandbank auf See stattfindet – bei niedrigem Wasserstand. Diese Kenntnisse über die Brandungszone, Strandlänge etc. waren entscheidend bei einer Anlandungsübung durch Spezialkräfte der Marine.

Meeresströmungen. Ein weltweites Verfahren zur Messung von Meeresströmungen und ozeanischer Schichtung sind ARGO²⁰-Drifter. Die Deutsche Marine hat bereits 2011 mit der Fregatte LÜBECK den ersten ARGO-Drifter ausgelegt (PAUL 2012). Ein allgemeines, vereinfachtes Schema der Wechselwirkungen zwischen Seegang und Meeresströmung ist in Abb. 12 dargestellt: Läuft der Seegang gegen die Meeresströmung, wird die Wellenlänge kürzer und die Wellen steilen sich auf. Läuft der Seegang mit der Meeresströmung, wird dieser flacher und die Wellenlänge größer. Wenn zudem noch mehrere besondere ozeanographische/geophysikalische Verhältnisse gleichzeitig eintreten und wechselwirken, so kann das Gesamtergebnis „Schwerer Seegang“, „Riesenwellen“, oder „Rollresonanz“ gefährlich verstärkt werden. Besonders beachtet werden dabei die Verhältnisse von Wind, Windsee, Dünung, Gezeitenströmung inkl. Tidewasserstand und Flachwassereffekte wie z. B. Grundsee.

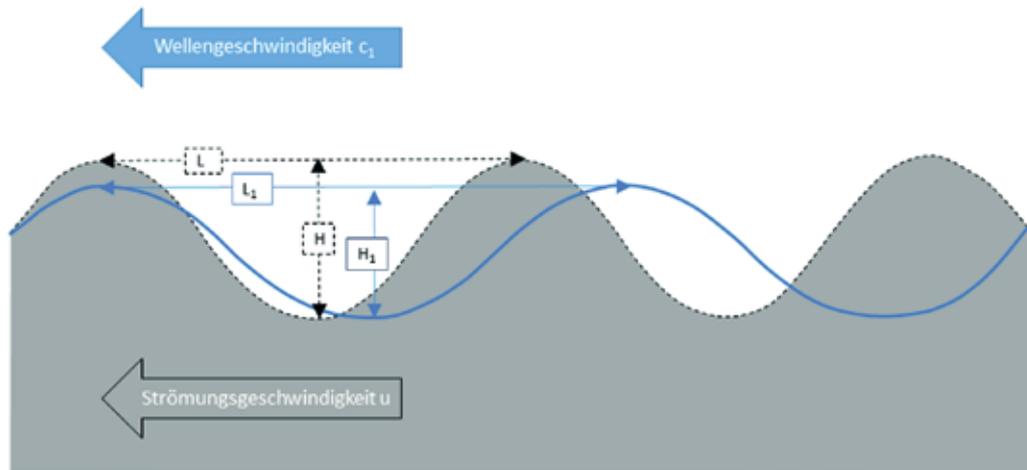
Drei Beispiele, bei denen die Meeresströmungen eine besondere Rolle spielen, sollen hier genannt werden:

- 1) Seegebiet vor Frankreich um Quessant bei Brest
- 2) Seegebiet um Südafrika im Bereich Agulhas- und Benguela-Strömung
- 3) Weltweite Riesenwellen-Gefährdungskarte für die Realzeitberatung: Die Karte des BFI, das „Riesenwellen-Warnsystem“.

1.4.1 Beispiel 1: Seegebiet vor Frankreich um Quessant bei Brest

In einer Internetpublikation informierte das Helmholtz-Zentrum Geesthacht -Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG) über ein Projekt ihrer Abteilung Radarhydrographie, bei dem insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Seegang und Meeresströmungen in Bezug auf Extremwellen untersucht werden sollen (SEIDEL & TRINKAUS 2019a). Eigens dazu hat das HZG auf dem Leuchtturm „Phare de La Jument“, welcher 2 km vor der Insel Quessant isoliert auf einem Felsen im Atlantik steht, eine Radaranlage zur Vermessung des Seegangs sowie der Höhe und Richtung von Einzelwellen installiert. Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen. Das Datenmaterial ist für statistisch belastbare Aussagen über das Auftreten und Verhalten von gefährlichem Seegang und Riesenwellen unabdingbar (Abb. 13b).

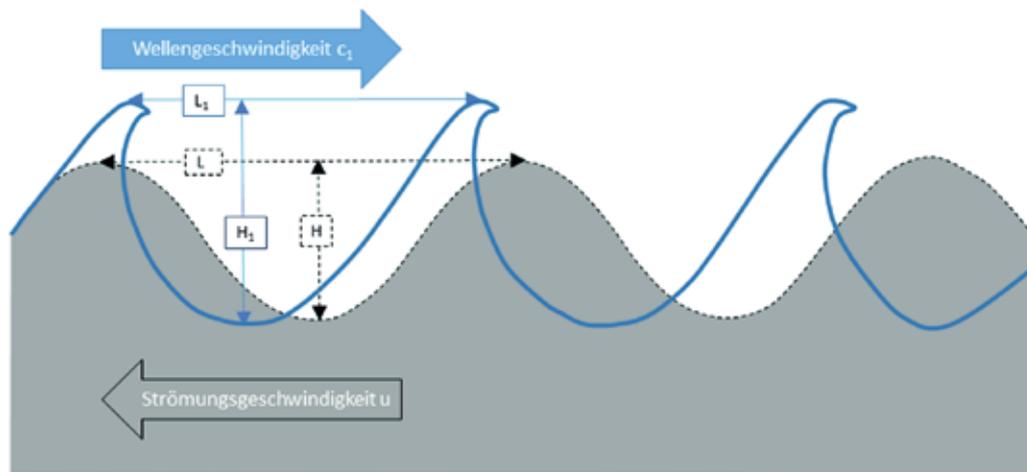
²⁰ Das ARGO-Programm ist ein Gemeinschaftsprojekt von mehr als 30 Nationen aus aller Welt. Etwa 3.900 sog. ARGO-Drifter vermessen die Ozeane in Realzeit. Diese auf- und abtauchenden Roboter messen von der Oberfläche bis in ca. 2.000 m Wassertiefe Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff u. a. Parameter. Das ARGO-Programm ist Bestandteil des globalen Ozeanüberwachungssystems GOOS (Global Ocean Observing System). Der Name ARGO ist nach dem Schiff Argo aus der griechischen Mythologie benannt.



Beispiel, Welle ohne Strömung (gestichelte Linie, schwarz): $L=100\text{ m}$, $T=8\text{ sec}$, $c=12,5\text{ m/sec}$ = L/T
 Läuft diese Welle mit einer Strömung von $1,5\text{ m/s}$ (durchgezogene Linie, blau):

$c_1 = c + u$	Welle wird schneller	$c_1 = 12,5\text{ m/sec} + 1,5\text{ m/sec} = 14\text{ m/sec}$
$L_1 = (c + u) * T$	Wellenlänge nimmt zu $L_1 > L$	$L_1 = 14\text{ m/sec} * 8\text{ sec} = 112\text{ m}$
$H_1 < H$	Wellenhöhe wird geringer	$H_1 = H - 12\%$, weil L um 12% größer, $2\text{ m} \rightarrow 1,76\text{ m}$
$S_1 = H_1 / L_1$	Welle hat geringere Steilheit	$S = H (1,76\text{ m}) / L (112\text{ m}) = 0,020$, $S_1 = 2,24\text{ m} / 88\text{ m} = 0,025$
$T_1 = L / (c - u)$	Periode wird kleiner, weil Wellenlänge kürzer und Welle schneller ist	$T_1 = L (100\text{ m}) / c_1 (14\text{ m/sec}) = 7\text{ sec}$

Abb. 12a: Stark vereinfachtes Schema der Veränderung des Seegangs, wenn dieser mit der Meeresströmung läuft. (Quelle: Marineamt)



Beispiel, Welle ohne Strömung (gestichelte Linie, schwarz): $L=100\text{ m}$, $T=8\text{ sec}$, $c=12,5\text{ m/sec}$ = L/T
 Läuft diese Welle gegen eine Strömung mit $1,5\text{ m/s}$ (durchgezogene Linie, blau):

$c_1 = c - u$	Welle wird langsamer	$c_1 = 12,5\text{ m/sec} - 1,5\text{ m/sec} = 11\text{ m/sec}$
$L_1 = (c - u) * T$	Wellenlänge nimmt ab $L_1 < L$	$L_1 = 11\text{ m/sec} * 8\text{ sec} = 88\text{ m}$
$H_1 > H$	Welle wird höher	$H_1 = H + 12\%$, weil L um 12% kleiner, $2\text{ m} \rightarrow 2,24\text{ m}$
$S_1 = H_1 / L_1$	Welle wird steiler, bis Grenzsteilheit ($S=1/10$) und sie bricht	$S = H (2\text{ m}) / L (100\text{ m}) = 0,020$, $S_1 = 2,24\text{ m} / 88\text{ m} = 0,025$
$T_1 = L / (c - u)$	Periode wird größer, weil Welle langsamer	$T_1 = L (100\text{ m}) / c_1 (11\text{ m/sec}) = 9\text{ sec}$

Abb. 12b: Stark vereinfachtes Schema der Veränderung des Seegangs, wenn dieser gegen die Meeresströmung läuft. (Quelle: Marineamt)



Abb. 13a: Der Leuchtturm bei der Insel Quessant: Radaraufbau auf La Jument. Extreme Seegangsverhältnisse bei Quessant vor Brest, Frankreich, während des Transits von Schnellbooten der Marine. (Quelle: HZG, Jan Bödewadt)

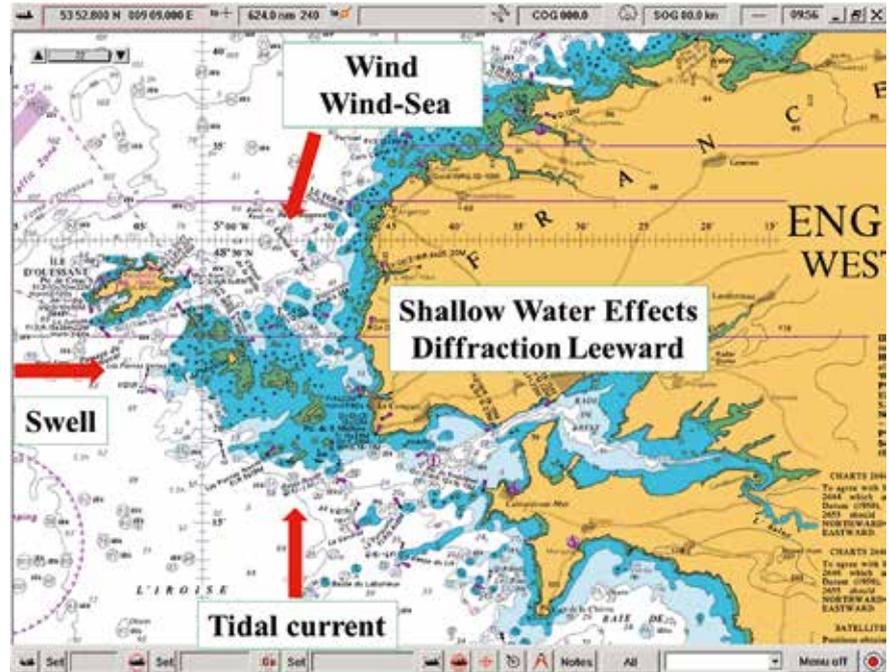


Abb. 13b: Darstellung der Ursachen der extremen Seegangsverhältnisse im Seegebiet um Quessant. (Quelle: Marineamt)

Dass es in diesem Seegebiet zu extremen Seegangsbedingungen kommen kann, ist in der Deutschen Marine bekannt: Bereits das Federal German Ship (FGS) PEGNITZ berichtet von schwerer, steiler Kreuzsee von 5 bis 6 m in diesem Seegebiet, „[...] bei dem das nachfolgende Schnellboot im Wellental nur noch an seiner Mastspitze zu erkennen war“ (AAG 317/94).

Folgende Situation führte in diesem Fall zu den schwierigen Seegangsverhältnissen: Winde aus Nordost mit einer Geschwindigkeit von 30 kn, Windsee aus Nordost mit 3–4 m Höhe, aber ein Gezeitenstrom nach Nord mit einer Geschwindigkeit von 1,5 bis 2 kn – also Wind und Welle gegen die Gezeitenströmung. Von einer atlantischen Dünung aus West wird ebenfalls berichtet (Höhen um 2 m mit 60% Häufigkeit). Dazu kommt eine abnehmende Wassertiefe, welche die Wellen aufsteilt, bis hin zur Grundsee. Diffraktion (Beugung) auf den Leeseiten der Inseln verursachte zusätzlich die Kreuzsee (Abb. 13b).

In dem Spiel der Wechselwirkungen werden die barotropen und baroklinen Anteile an der Gezeitenströmung wiederum beeinflusst durch die spezielle Bathymetrie der Region, wie z.B. der Existenz kritischer Hangneigungen, welche eine Energieumverteilung zwischen den Gezeitenstrommoden möglich machen und Interne Wellen generieren, welche von der Quelle abgestrahlt werden (SIEDLER & PAUL 1991). Durch die Gezeitenstromscherung an sich wird wiederum der Seegang beeinflusst. Daher werden gekoppelte Seegangs- und Strömungsmodelle angestrebt.

1.4.2 Beispiel 2: Seegebiet um Südafrika im Bereich Agulhas- und Benguela-Strömung

Das Kap Agulhas ist der südlichste Punkt von Südafrika (nicht Kap der Guten Hoffnung) und entlang seines Meridians verläuft die Trennung zwischen Atlantischem und Indischem Ozean. Hier befindet sich ein weiterer Hotspot, der für das Auftreten von schwerem Seegang und Riesenwellen bekannt ist. Auf der Südhalbkugel tritt das Maximum der signifikanten Wellenhöhe im August auf, im Bereich der „Antarktischen Zirkumpolarströmung“ (Abb. 14). Hier ist die Wirklänge des Windes fast unbegrenzt. Es treten kaum Hindernisse durch Landmassen auf und auch die Wirkdauer ist zumeist lange genug, so dass die Voraussetzungen für eine ausgereifte Windsee oft gegeben sind. Entlang dieses zirkumpolaren Bandes ziehen die Sturmtiefs und sorgen für schwierigste Seegangs- und Seeschiffahrtsbedingungen. Andere Bezeichnungen für diese Westwindzone sind: „Roaring-Forties“ (40–50°S), „Furious-Fifties“ (50–60°S) und „Screaming-Sixties“ (60–70°S). In diesem Band befinden sich einzelne Maxima der signifikanten Wellenhöhe von über 14 m südwestlich vor Südafrika (in Abb. 14 durch einen Kreis gekennzeichnet), welche sich nach Nordosten bis in die Agulhasstrom-Region ausbreiten. Der schwarze Pfeil in Abb. 14 zeigt die Seegangsrichtung an, genau zu dem Zeitpunkt der in Abb. 15 dargestellten Agulhas-Strömung. Somit sind die Seegangsrichtung (schwarzer Pfeil) und die Strömungsrichtung des Agulhasstromes (Abb. 15) über weite Strecken gegenläufig.

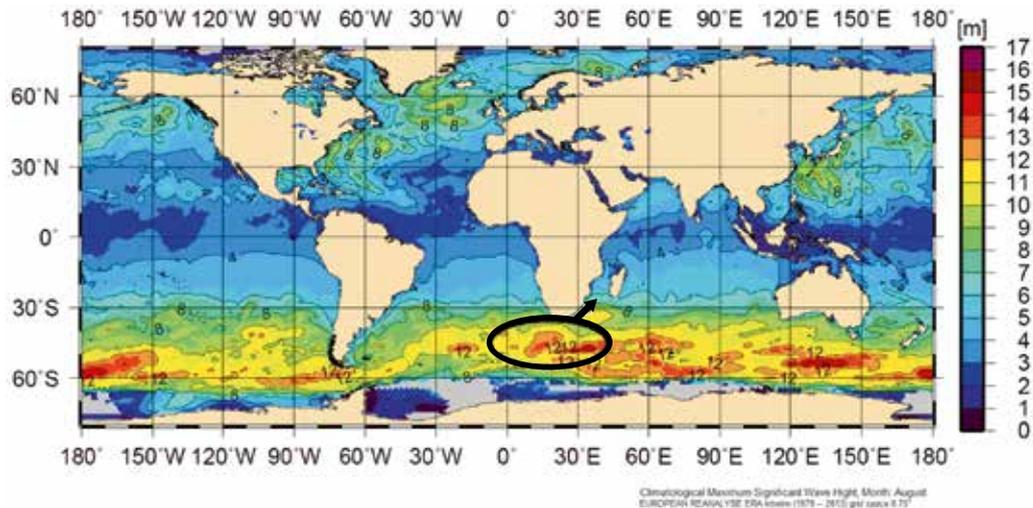


Abb. 14: Das Maximum der signifikanten Wellenhöhe auf der Südhalbkugel tritt im August im Bereich der „Antarktischen Zirkumpolarströmung“ auf. Die Seegangsrichtung zur Zeit der in Abb. 15 dargestellten Agulhas-Strömung ist als Pfeil eingezeichnet. Die Meeresströmung und der Seegang laufen gegeneinander. (Quelle: Marinekommando)

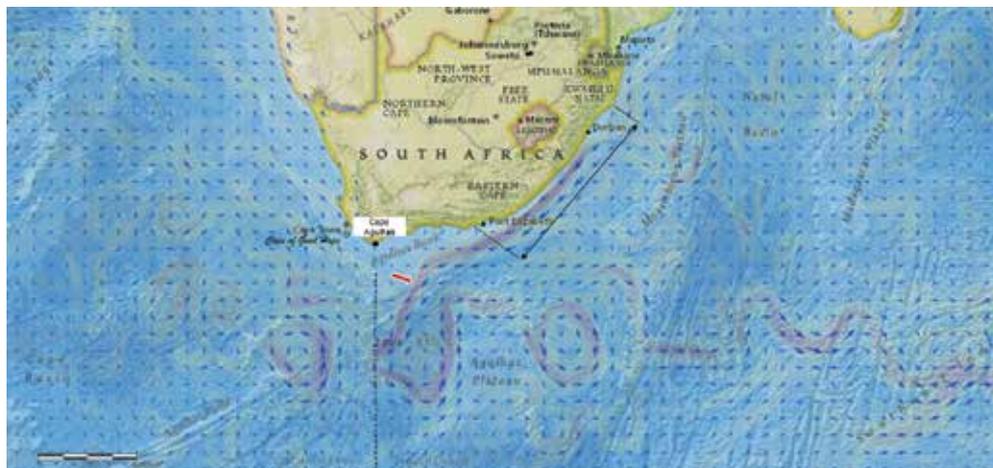


Abb. 15: Der Meeresströmung (MERCATOR Analyse vom 4.08.2020, Tagesmittelwert) ist eine Karte der Bodentopographie (ETOPO 0.5 arcm), transparent überlagert. Somit sieht man, wie stark der Agulhasstrom topographiegeführt wird. Der dargestellte Tagesmittelwert der Strömung von 2 m/s (~4 kn) wird durch seine aktuellen Werte übertriften (Variabilitäten). Bis zur Retroflektion setzt die Meeresströmung nach Südwesten und der Seegang kommt aus Südwesten, sind also gegenläufig. (Quelle: U. Paul, Marinekommando)

Das schmale gebündelte Band des Agulhasstromes (Jetstream) mit über 2 m/s Strömungsgeschwindigkeit als Tagesmittelwert wird in Abb. 15 dargestellt. Die Momentanwerte sind aufgrund der Stromvariabilitäten deutlich höher. Der Strömungskern erreicht eine Tiefe von ca. 305 m (MALLORY 1974, S. 103), daher wird das schmale aber starke Strömungsband (Jet) sehr stark durch den Kontinentalabhang, der bei ca. 200 m liegt, geführt: Von Durban bis Port Elizabeth ist die Strömung aufgrund des schmalen steilen Kontinentalabfalls sehr landnah. Dann entfernt sich der schmale Jet von der Küste, folgt aber weiterhin dem Kontinentalabfall bis zum südlichsten Punkt der Agulhas-Bank, wo er sich dann vom Festlandssockel ablöst (roter Pfeil, Abb. 15) und zwischen dem Agulhas-Rücken und dem westlichen Abhang des Agulhas-Plateaus in einer Kreisbewegung rezirkuliert (Agulhas-Retroflektion) und seinen Weg nach Osten fortsetzt. In dem Bereich der Retroflektion befinden sich viele Wirbel. In Abb. 15 markiert eine schwarze Box vor Ostafrika zwischen Durban und Port Elizabeth den Bereich des Agulhasstromes in dem bereits MALLORY (1974) in elf Jahren elf gefährliche Schiffsbegegnungen mit Riesenwellen beschrieben hat. In dem Fall des Kühltankers TAGANROGSKY ZALIV (UdSSR) ist z. B. die Riesenwelle am Bug eingestiegen, nachdem sich zuvor der Bug im Wellental abgesenkt hatte (siehe Abb. 16). Ein Seemann wurde dabei über Bord gespült und fand den Tod (MALLORY 1974; LAVRENOV 1998). Auch hier waren die Meeresströmung und Meereswellen gegenläufig. Im offenen Ozean sind selbst lange Dünungswellen noch Tiefwasserwellen, die den Meeresboden nicht spüren. Erreichen diese aber den Kontinentalsockel vor Kap Agulhas, der bei ca. 200 m Wassertiefe beginnt und

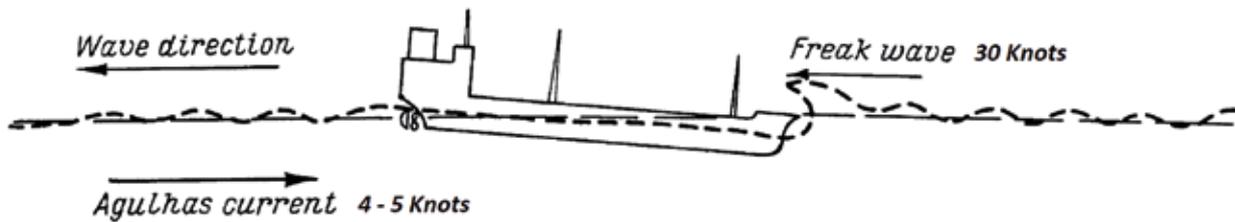


Abb. 16: Agulhas-Strömung und Seegang laufen gegeneinander. Es kommt zur Ausbildung einer Riesenwelle, welche am Bug des Kühltankers TAGANROGSKY ZALIV eingestiegen ist, nachdem sich zuvor der Bug im Wellental abgesenkt hatte. Ein Seemann wurde über Bord gespült. (Quelle: MALLORY 1974)

zunehmend flacher wird, dann spüren die Wellen den Meeresboden, wenn die Wellenlänge L größer 400 m ist (Tiefwasserwelle: Wassertiefe $< L/2$). Lange ozeanische Dünung kann Wellenlängen bis 1.000 m erreichen. Dadurch können sich lange Wellen auf der zunehmend flacher werdenden und auch sehr strukturierten Agulhas-Bank (DE WET 2012) aufsteilen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Geschwindigkeit: Windgeschwindigkeit und Wellengeschwindigkeit. Die Gruppengeschwindigkeit langer Dünungswellen liegt bei 90–142 km/h, wenn die Wellenlänge zwischen 400–1.000 m liegt ($c_{gr} = 1,25 \sqrt{L}$). Die Phasengeschwindigkeit von Einzelwellen ist doppelt so groß wie die Gruppengeschwindigkeit von Wellenpaketen. Somit sind die Wellenpakete genau so schnell wie die Wellenpakete von Orkantiefs (z. B. bei BRITTA, wie in Kapitel 1.2 diskutiert: 100 km/h), wodurch die Wellenpakete permanent mit Windenergie angereichert werden und somit an Wellenhöhe zunehmen.

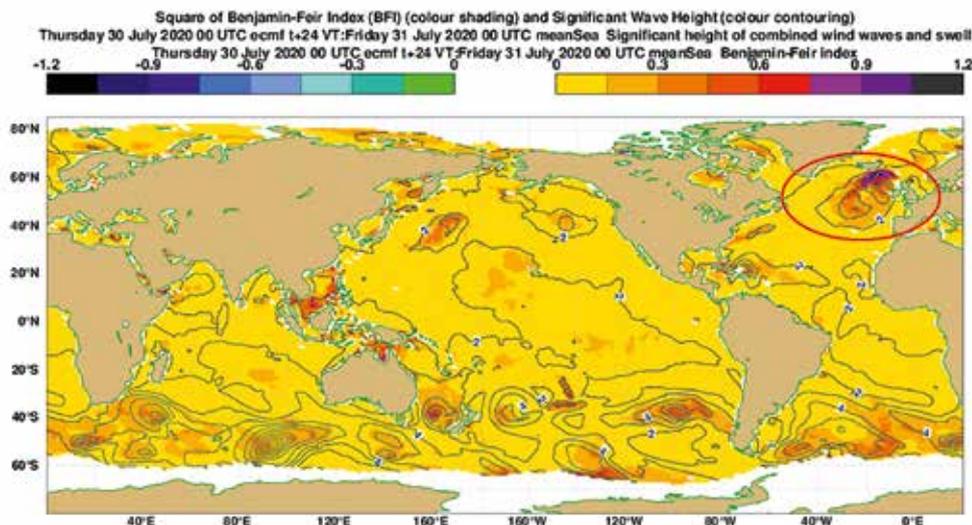


Abb. 17 a: Das „Riesenwellen-Warnsystem“ auf Basis des Seegangmodelles WAM zeigt deutlich die größten Gefahren für den 30.07.2020 südlich von Island. (Quelle: ECMWF)

Dabei können Einzelwellen, nachdem diese durch nichtlineare Wechselwirkung mit ihren Nachbarwellen weiter an Energie gewonnen haben, aufgrund ihrer doppelten Geschwindigkeit einem Wellenpaket voraus-eilen und sich durch Wechselwirkung mit der gegenläufigen Meeresströmung zu gefährlichen Riesenwellen entwickeln.

1.4.3 Beispiel 3: Weltweite Riesenwellen-Gefährdungskarte für die Realzeitberatung: Die Karte des Benjamin-Feir Index (BFI), das „Riesenwellen-Warnsystem“

Die Vorhersage des ECMWF „BFI – Weltweit“ zeigt für den 30.7.2020 die größte Gefahr durch Riesenwellen/Monsterwellen für das Seegebiet südlich von Island, welches in Abb. 17a durch einen Kreis gekennzeichnet ist. Dass diese Gefährdungssituation kein Einzelfall ist, sondern typisch für diese Region, kann den klimatologischen Reanalysen des ECMWF (ERA Interim, 1979–2013)²¹ entnommen werden: Die größten signifikanten Wellenhöhen weltweit treten südlich von Island auf. Dort wird das Maximum im Januar erreicht (Abb. 3).

²¹ Weitere Informationen zu den ERA Interim Daten und die Datensätze selbst, finden sich unter folgender Adresse: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (2020).

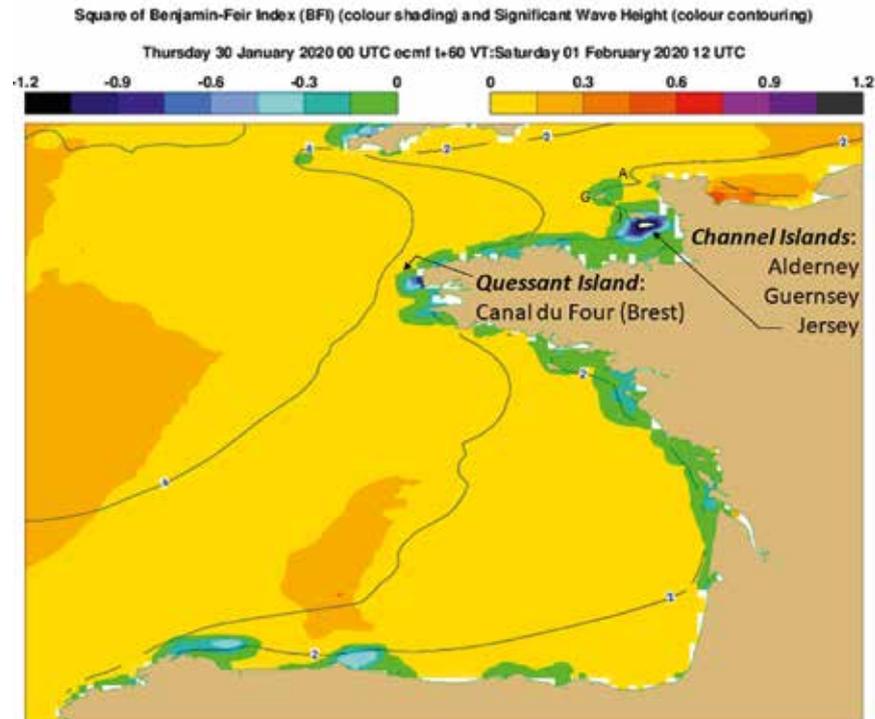


Abb. 17 b: Das „Riesenwellen-Warnsystem“: Vergrößert dargestellt ist für den 30.01.2020 das Gebiet der Britischen Kanalinseln und die Region um Quessant bei Brest, Frankreich. Zu erkennen ist, dass dort die höchste Gefahr für das Auftreten von Riesenwellen im Flachwasserbereich vorliegt. Die Flachwassersituation wird oft in der BFI-Weltkarte nicht sichtbar, sondern erst durch die Ausschnittvergrößerung. (Quelle: ECMWF)

Der „BFI- Weltweit“ wird am ECMWF in Reading, Großbritannien, auf Basis des Seegangmodelles WAM seit Juni 2019 neu berechnet: mit einem Flachwasseranteil (linke Skalierung in Abb. 17a und b negativ) und einem Tiefwasseranteil (rechte Skalierung in Abb. 17a und b positiv) (ECMWF 2020). Dieses ist das „ECMWF Freakwaves Warning System“²². Abb. 17a gibt einen globalen Überblick.

Einen regionalen Überblick gibt die Abb. 17b. Die starken Strömungen in den beiden markierten Regionen Quessant und Kanalinseln sind bekannt. Als Beispiel für die starken Strömungen bei den Kanalinseln ist in Abb. 17c die Meeresströmung von der Oberfläche bis zum Meeresboden bei der Kanalinsel Alderney dargestellt welche 5–7 kn erreichen haben. Die Messungen wurden mit einem akustischen Strömungsmesser (engl.: Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)²³ gewonnen, welcher im Hydrographenschacht des MzB KRON-SORT eingebracht wurde. Dadurch, dass der Strömungsmesser im sog. Bottom-Tracking Mode betrieben werden konnte, waren die Strömungsmessungen sehr genau und somit verlässlich (Paul 2015).

Beim MarkDo wird gegenwärtig ein modifizierter BFI im operationellen Betrieb zur Verfügung gestellt, die Implementierung des neuen ECMWF-BFI mit Flachwasseranteil wird angestrebt.

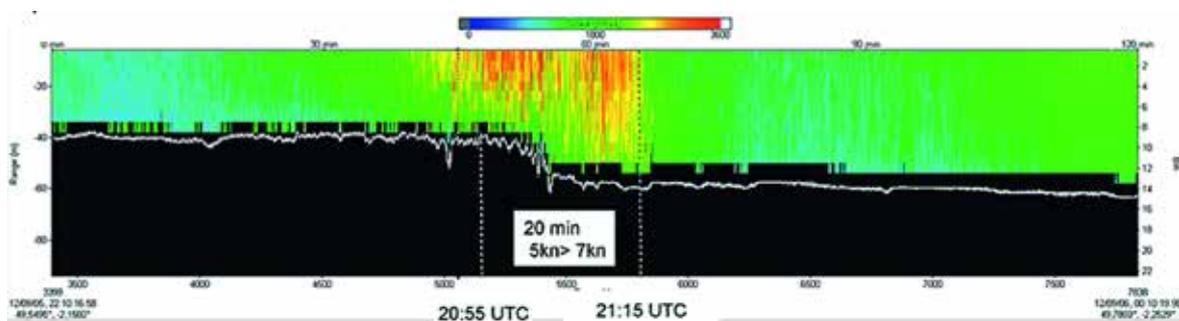


Abb. 17 c: Als Beispiel für die starken Strömungen bei den Kanalinseln sind ADCP-Messungen von der Meeresoberfläche bis zum Meeresboden dargestellt. Die Meeresströmungen erreichen 5 – 7 kn Geschwindigkeit. (Quelle: U. Paul, Marinekommando)

²² Riesenwellen oder auch Monsterwellen werden im Englischen als „Freakwaves“ oder auch „Roque Waves“ bezeichnet (s. auch Fußnote 4).

²³ Es wurde das Teledyne RDI Workhorse Sentinel ADCP 300 kHz verwendet, welches über vier Messtrahlen (engl.: Beams) verfügt, welche vom Gerät kegelförmig in die Tiefe abgestrahlt werden (Teledyne Marine 2020).

2 Der Bedarf der Deutschen Marine und der Nutzen der Weiterentwicklung von Seegangsvorhersagemodellen für die Marine

2.1 Anforderungen des Bedarfsträgers Deutsche Marine

Die Deutsche Marine benötigt für ihre weltweiten Operationen verlässliche Informationen über die ozeanographischen Bedingungen in ihren Einsatzgebieten sowie dem Transit zu den einzelnen Bestimmungsorten. Die Kenntnisse der Seegangsverhältnisse, Gefahr von Riesenwellen oder Rollresonanz ist daher von größter Bedeutung, da diese über die sichere Durchführbarkeit einer Mission, sowie der Schiffssicherheit samt Bordpersonal entscheiden können. Daher betreibt der Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfoDBw) mit dem MarkDo frei verschiebbare Seegangsmodele, welche mit den sich fortbewegenden Einheiten mitgeführt werden können.

Mittel- und Langfristig ist zu erwarten, dass der Bedarf an ozeanographischen Informationen wie Seegangsvorhersagen für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von weltweiten Einsätzen steigt.

Nehmen aufgrund von Klimaänderungen Sturmhäufigkeiten, Intensitäten und daraus resultierende, schwere Seegangsverhältnisse und Riesenwellen zu, so ist deren Vorhersage für die Einheiten auf See umso wichtiger.

2.2 Der Nutzen der Weiterentwicklung von Seegangsvorhersagemodellen für die Deutsche Marine

Schwere See, Riesenwellen oder Rollresonanz können eine Marinemission mit den auf See befindliche Einheiten und ihrer Besatzung gefährden. Daher sind die Unsicherheiten zu minimieren, indem die Risiken durch extreme Naturverhältnisse vorhergesagt werden und somit der Schiffsführung die Gelegenheit gegeben wird, dem entgegen zu wirken; z. B. durch Umfahren der Gefahr oder geeignete Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen.

Dies setzt voraus, dass die Vorhersagen an sich von zeitgemäß höchster Qualität sind. Daher werden die Vorhersagemodelle durch die bereits in der Zusammenfassung aufgeführten Projekte auf den modernsten Stand der Erkenntnisse und Rechnergeneration gebracht.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist dies ein fortwährender Entwicklungsprozess, der qualitative Verbesserungen (Modellvorhersagegüte, Vorhersagezeitraum und Auflösung) aber auch völlige Neuerungen wie dem BFI über die letzten 45 Jahre gebracht hat.

3 Von den Anfängen der Seegangmodellvorhersagen bis zum aktuellen Sachstand

In Kapitel 3.1 wird ein Überblick über die letzten 45 Jahre Seegangsgeschichte beim GeoInfoDBw und dessen Vorgänger in Form einer Aufstellung wichtiger Meilensteine gegeben. In Kapitel 3.2 wird der aktuelle Sachstand dargestellt.

3.1 Von den Anfängen der Seegangmodellvorhersagen für die Bundeswehr: Geschichtlicher Überblick über die Entwicklungsphasen der letzten 45 Jahre: 1974 bis 2019

1974 – 1985 Einrichtung einer Seegangsguppe am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg und Gründung des Sonderforschungsbereiches 94 (SFB 94).

Federführend: Klaus HASSELMANN, Wolfgang ROSENTHAL, Heinz GÜNTHER. Entwicklung des numerischen Wellenmodelles der zweiten Generation HYPÄ (Hybrid Parametric) für Tiefwasservorhersagen (Nordatlantik) ab 1981.

1974 – 1976 Forschungsauftrag vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) an MPI-M (H. GÜNTHER, pers. Mitteilung):

- I. Prediction of calm water conditions and swell-generated pressure distribution at the bottom.
- II. Influence of the sediment on acoustic propagation in water.

1977 – 1979 Forschungsprojekt am MPI-M für BMVg (H. GÜNTHER, pers. Mitteilung)
"Ocean waves prediction especially for calm water conditions".

- 1979 – 1983** Forschungsprojekt am MPI-M für BMVg (H. GÜNTHER, pers. Mitteilung)
"Development of a shallow water surface wave model and comparison with measured data in the North Sea". Vertrag (T/RF35/91030/91326)
- 1982** Bundeswehr (Bw), erster operationeller Betrieb des Tiefwassermodelles HYPa (H. GÜNTHER, pers. Mitteilung).
Implementierung des Nordatlantik-HYPa durch H. LINNÉ (MPI-M in Gruppe SFB 94) am Amt für Wehrgeophysik (AWG) in Traben-Trarbach.
- 1982** DWD, ebenfalls erste Implementierung des Nordatlantik-HYPa am MRZ- Offenbach (heute DMRZ, gemeinsames Rechenzentrum von DWD und 20 %-Bw-Anteil).
- 1983** Bw, erster operationeller Betrieb des Flachwassermodelles HYPAS (pers. Mitteilung H. GÜNTHER)
Erstes und einziges Flachwassermodell im operationellen Betrieb zu der Zeit. Implementierung des Nordsee-HYPAS durch H. LINNÉ (MPI-M) am Amt für Wehrgeophysik in Traben-Trarbach.
Es bestand der Bedarf an Flachwasserseegangsvorhersagen im Zusammenhang mit der Forschungsplattform Nordsee (1974–1993, finanziert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) und 30 %-Anteil Bw). Das Interesse an Seegangsvorhersagen im Flachwasserbereich war groß, aufgrund der sich rasch entwickelnden Offshoretechnologien. Die Offshore-Plattform durfte bei maximal 0,5 m Seegang herausgezogen werden.
- 1983** MPI-M, K. HASSELMANN gründet die WAM-Entwicklergruppe.
- 1985** Der SFB 94 ist abgeschlossen. W. ROSENTHAL und H. GÜNTHER wechseln zur Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH (GKSS)²⁴. Dort wird das WAM beständig weiterentwickelt.
- 1986** Bw, Erstes via SKAGERRAK gekoppeltes Nord- und Ostseemodell im operationellen Betrieb beim AWG in Traben-Trarbach.
- 1999** Das Computer- respektive Softwareproblem für die Behandlung von Jahreszahlen wurde Millennium-Bug oder Jahr-2000-Problem benannt. Dieses wurde für den operationellen Betrieb beim Marineamt in Rostock gelöst.
- 2003** Bw, Der operationelle Betrieb von HYPa und HYPAS wird eingestellt.
- 2006** Bw, Beim Marineamt in Rostock wird der operationelle Betrieb des Seegangsvorhersagesystems auf WAM-Basis neu aufgenommen: Das globale Seegangmodell GSM und die neun auf dem GSM schnell und weltweit verschiebbaren RSM.
Die schnelle, weltweite Verschiebbarkeit der RSM ist bis derzeit nur bei der Bw verfügbar und notwendig, um Einheiten und Verbänden der Marine durch Verschiebung zu folgen.
Seit 2006 werden WAM-Weiterentwicklungen durch das HZG dem DWD und der Bw zur Verfügung gestellt. Diverse kleine Fachprojekte, Softwarepflege- und Wartungsaufgaben werden vom HZG bearbeitet.
High Performance Computer (HPC): Die Modelle laufen auf der IBM-pSeries am DMRZ Anteil Bw in Offenbach.
- 2009** Migration der Modelle zur NEC SX-9 am DMRZ. Dito für DWD. Unterstützungsleistung erfolgt durch HZG.

²⁴ Am 1.11.2010 wurde die GKSS in Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG) umbenannt. Seit dem 31.3.2021 trägt es den Namen Helmholtz-Zentrum Hereon. Das Zentrum ist Mitglied der Helmholtz – Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, welche die größte deutsche Wissenschaftsorganisation darstellt.

- 2011** Bw lässt vom HZG eine WAM-Version erstellen, welche auch auf einer modernen Mehrprozessor-Workstation beim Marineamt in Rostock läuft: als Backup- System, Entwicklungsumgebung und für die schnelle Versorgung von zusätzlichen Einsatzgebieten, welche auch nur für eine kurzzeitige Operation vorgesehen sind. Längerfristige Nester laufen ausschließlich im Routinebetrieb auf dem Großrechner in Offenbach.
- i) Die Mehrfachnestung vom WAM-Globalmodell über Regionalmodelle bis zum hochauflösten Lokalmmodell wird realisiert.
 - ii) Die Auswahl des Modellgitters wird nunmehr nicht mehr auf rein quadratische Nester beschränkt, sondern beliebige, aber rechteckige Modellgebiete können gewählt werden.
 - iii) Die Auswahl der Modellauflösung wird von festen Auflösungen (0.25°, 0.10°, 0,05°) auf beliebig wählbare Auflösungen in Ost- und Nord-Richtung ermöglicht.
 - iv) Das Problem der Meridionalconvergenz der Modellnester im hohen Norden (Einsätze im Seegebiet um Island und Spitzbergen) konnte behoben werden: Bei der Gitterpunktauflösung wird angestrebt, auch in höheren Breiten eine gleiche Auflösung in Kartesischen Koordinaten (X- und Y-Auflösung in Kilometern) in Länge und Breite zu erreichen, was vormals ohne Korrektur zu Stabilitätsproblemen und, aufgrund der zu wählenden sehr kleinen Zeitschritten, zu langen Modelllaufzeiten geführt hatte.
 - v) Die Beschränkung des Modellbereiches zwischen 71° Nord und 71° Süd wird aufgehoben. Nunmehr können auch die nördlich von 71° Nord liegenden Einsatzgebiete wie bspw. das Nordkap bei 71.13° Nord, versorgt werden.
- 2012** Das Seegangsvorhersagesystem vom Marineamt wird beim neu aufgestellten Markdo fortgeführt und stellt eine Beratungsgrundlage dar.
- 2014** DMRZ, Migration der Modelle zur CRAY-XC40.
- 2015** Umstellung des Windantriebes von Globalem Meteorologischen Modell (GME)/ Consortium for small-scale Modelling (COSMO) auf das neue meteorologische ICON-Modell des DWD.
- 2017** Installation einer neuen WAM-Version. WAM-Cycle 4.6 mit verbesserter Topographie.
- 2019** Neuer HPC am DMRZ. Migration auf die neue Großrechenanlage NEC Vektor-Supercomputer SX-Aurora Tsubasa.

3.2 Aktueller Sachstand der Seegangmodellvorhersagen: Das WAM-Globalmodell und die neun schnell verschiebbaren RSM-Nester auf WAM Basis

Zuerst wird das WAM-Globalmodell (GSM) gerechnet; mit meteorologischem ICON Globalantrieb. Damit werden die Randwerte – 2D-Seegangsspektren, also die Seegangsenegie für eine Anzahl vor Frequenzen und Wellenausbreitungsrichtungen – für die neun genesteten RSM für jeden Zeitschritt berechnet. Mit den dann zur Verfügung stehenden Randbedingungen und dem meteorologischen Antrieb aus dem ICON-Modell können dann die neun RSM für jeden Zeitschritt berechnet werden. Damit ist die Seegangsenegieverteilung für jeden Vorhersagetermin an jedem Gitterpunkt bekannt und es können alle Parameter, wie z. B. die signifikante Wellenhöhe und Richtung, abgeleitet und ausgegeben werden. Die RSM sind verschiebbar (engl.: relocatable) und können mit einer Einheit oder einem Verband „mitfahren“ (Abb. 18).

Mit der Migration auf den neuen Großrechner des DMRZ, dem NEC Vektor Superrechner SX-Aurora Tsubasa, erfolgt derzeit auch zeitgleich ein Update von der Bw WAM-Version Cycle 4.5.4 auf die neueste Version Cycle 6. In der neuen WAM-Version sind folgende Änderungen und Neuerungen hinzugekommen:

- Die Physik der Quellterme wurde angepasst an diejenigen, die auch dem ECMWF Routinemodell zugrunde liegen.
- Die Berechnung eines Kopplungsparameters im Hinblick auf die zukünftige Zweiwegekopplung des Seegangsmoделles WAM mit dem meteorologischen Modell ICON wurde installiert: der Rauigkeitsparameter Z_0 .

- Zusätzlich zum Gewinn an Rechenzeit durch Parallelisierung wurde die Möglichkeit zur Dekomposition des Modellgebietes in kleinere Modellgebiete (Rechtecke) installiert, welche dann einzelnen Prozessoren zur Berechnung zugewiesen werden können.

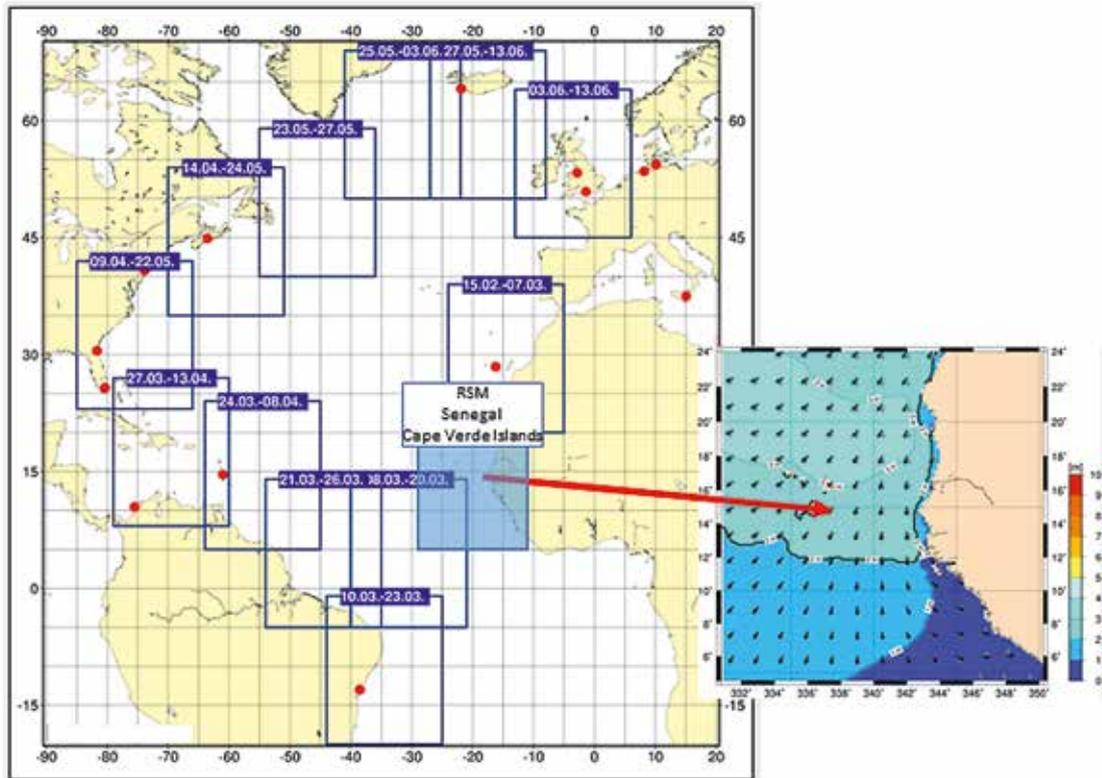


Abb. 18: Als Beispiel dargestellt ist ein RSM, welches so verschoben wurde, dass es den Einsatz- und Ausbildungsverband 2009 (EAV2009) auf seiner Fahrt rund um den Nordatlantik begleitet hat. (Quelle: Marinekommando)

- Weitere Erweiterungen, wie z.B. die Berechnung neuer Ausgabeparameter, kann man dem Projektabschlussbericht entnehmen (HZG 2019b).

4 Theoretischer Hintergrund der Seegangmodellvorhersagen mit WAM

Das „Wave Model“ (WAM) war das erste Seegangmodell der dritten Generation. Entwickelt wurde WAM von einer internationalen Forschergruppe, der „Wave Modelling Group“ (WAMDI Group 1988), welche von K. HASSELMANN 1984 am MPI-M in Hamburg initiiert wurde. Den Vorsitz dieser Gruppe führte G. KOMEN vom "Königlich Niederländisches Meteorologisches Institut" (KNMI). 1985 wechselten Mitglieder der Seeganggruppe vom MPI-M zur GKSS/HZG und arbeiteten von dort aus weiter in der internationalen „Wave Modelling Group“ und an verschiedenen Seegangprojekten (s. Kapitel 3).

Nach zehn Jahren endete die Tätigkeit der WAM-Entwicklergruppe (1984–1994) und es stand das erste Seegangmodell der dritten Generation, das WAM sowie eine umfassende Monographie „Dynamics and Modelling of Ocean Waves“, welche das WAM in allen Einzelheiten erklärt, zur Verfügung (KOMEN et al. 1994). Einen technischen Report des sog. WAM-Cycle 4 haben H. GÜNTHER, S. HASSELMANN und P. JANSSEN bereits 1991 publiziert (GÜNTHER et al. 1991).

Nach KOMEN et al. (1994, S. 214, Gl. 3.33) wird von der „Aktionsdichtegleichung“ (Gln 2) ausgegangen. Diese gemischte Differentialgleichung beschreibt die Physik, die in dem Seegangmodell enthalten ist – also die zeitlichen Veränderungen des Aktionsdichtespektrums N in Form von mathemati-

$$\frac{\partial N}{\partial t} + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} \dot{\varphi} \cos \varphi N + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N + \frac{\partial}{\partial f} (\dot{f} N) = S \quad (2)$$

schen Ableitungen nach der Zeit auf der linken Seite der Gleichung und Termen für die Energiequellen und Senken auf der rechten Seite der Gleichung:

mit den vier Quelltermen: (vgl. KOMEN et.al. 1994, Gl. 3.36)

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} \quad (3)$$

für den Energieeintrag durch den Wind S_{in} , dem Energietransfer durch Nichtlinearitäten S_{nl} bei Wellenwechselwirkungen, der Energiedissipation durch Whitecapping S_{ds} und der Energiedissipation durch Bodenreibung S_{bf} (siehe WMO 1998).

Übergang von der Aktionsdichtegleichung zur Energiedichtegleichung: Bei der Aktionsdichtegleichung (Gln 2) werden Meeresströmungsgeschwindigkeiten nicht separat betrachtet. Um den Einfluss von Meeresströmungen auf Wellen durch Frequenzverschiebungen berücksichtigen zu können, wird die Energiedichtegleichung verwendet. Dann wird als prognostische Variable durch Integration der Gln 4 das Energiedichtespektrum F berechnet.

Der Zusammenhang zwischen dem Aktionsdichtespektrum N und dem Energiedichtespektrum F (Wellen-Varianzspektrum) wird über die intrinsische Frequenz f gegeben:

$$N(f, \theta, \phi, \lambda, t) = F(f, \theta, \phi, \lambda, t)/f \quad (4)$$

mit f = Frequenz

θ = Wellenaufrichtung (nach Norden laufend = 0° , Ost = 90°)

λ = Länge, φ (Phi) = Breite, auf sphärischem Gitter

t = Zeit

Des Weiteren wurden die Quellterme in Gln 3 durch einen fünften Quellterm ergänzt: der Energiedissipation durch Wellenbrechen S_{br} .

Somit können durch den fünften Term auf der linken Seite nun Frequenzverschiebungen durch Meeresströmungen optional berücksichtigt werden

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} \dot{\varphi} \cos \varphi F + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} F + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} F + f \frac{\partial}{\partial f} \dot{f} \frac{1}{f} F = S \quad (5)$$

mit nunmehr fünf Quelltermen: $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} + S_{br}$ (6)

Für das GSM und seine neun darauf verschiebbaren RSMs wird Gln 5 verwendet und numerisch gelöst: Dazu wird die Gleichung vermittels eines Differenzenverfahrens diskretisiert und mit ihren Anfangs- und Randwerten durch Integration für jeden Zeitschritt t_i und jeden Gitterpunkt $(\cos \varphi, \lambda)$ gelöst. Die so berechneten 2D-Spektren F_i aus dem Globalmodell werden u.a. zur Randwertversorgung der RSM-Nester benötigt. Für jeden Gitterpunkt und Zeitschritt erhält man also für eine vorgegebene diskrete Anzahl von Frequenzen f_i die Energiedichte F und Richtung θ . Der DWD rechnet derzeit mit 36 Frequenzen und 36 Richtungen und erhält somit $36 \times 36 = 1.296$ Werte für die Energiedichte für jeden Gitterpunkt und Zeitschritt. Aus dem diskreten 2D-Energiedichtespektrum lässt sich dann u.a. die signifikante Wellenhöhe berechnen. Eine Beschreibung der Modellkette des Seegangsvorhersagesystems beim DWD wird von BEHRENS (2002) gegeben (Nord- und Ostsee, Mittelmeer und Schelfrand Nordostatlantik). In der hier vorgestellten Modellkette des GeoInfoDBw, welche aus dem GSM und den schnell verschiebbaren RSMs besteht, wird eine höhere Anzahl an Frequenzen berechnet, nämlich 40 Frequenzen mit 36 Richtungen, welche 1.440 Werte ergeben; aufgrund der Modellnester in hohen geographischen Breiten und der erwünschten numerischen Stabilität. In hohen geographischen Breiten wird die Meridionaldivergenz wirksam, das horizontale Rechengitter wird kleiner und gemäß Courant-Friedrich-Levi-Stabilitätskriterium (CFL-Kriterium) muss die Rechenschrittweite entsprechend verkürzt werden.

Es sollen noch zwei Neuerungen angesprochen werden, welche die Modellphysik, also den theoretischen Hintergrund betreffen:

- 1) Modellupdate. Derzeit wird der WAM-Cycle 4.5.4 verwendet. Ein Update auf den derzeit neuesten WAM-Cycle 6 ist vorgesehen. Die Neuerungen werden in dem Abschlussbericht des Fachprojektes „Weiterentwicklung des Seegangsmoделles“ vorgestellt, in dem die geplanten Folgeprojekte beschrieben werden (BEHRENS 2019). Es sollte jedoch hier bereits erwähnt werden, dass in dem neuen WAM-Cycle 6 Änderungen und Erweiterungen im Hinblick auf eine zukünftige Kopplung mit dem meteorologischen ICON-Modell des DWD eingebaut wurden, wie z. B. die Rauheitslänge Z_0 als Kopplungsparameter.

Des Weiteren wird die neue WAM-Version auf dem ICON-Ikosaedergitter aufsitzen und somit werden auch die Probleme durch die Meridional Konvergenz vermieden.

- 2) **Zweiwegekopplung.** Als obere Randbedingung braucht das Seegangsmoделl WAM den meteorologischen Antrieb, wie z. B. den Wind. Dieser wird derzeit für jeden Zeitschritt des Vorhersagezeitraumes vom ICON-Modell an das WAM-Modell übergeben. Der GeolInfoDBw wird sich an dem DWD-Projekt 2WICWAM beteiligen, bei dem an einer Zweiwegekopplung gearbeitet wird. Dann wird die aktuelle Rauigkeit der Meeresoberfläche vom Seegangsmoделl WAM an das meteorologische Moделl ICON zurückgegeben. Somit wird der Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre insbesondere in der unteren Grenzschicht verbessert und somit auch die meteorologischen Vorhersagen. Beide Moделle werden dann auf dem Ikosaeder-Gitter aufsitzen.

5 Anmerkungen zur Auswahl des Seegangsmoделles WAM für den operationellen Betrieb im GeolInfoDBw und weitere gegenwärtig verfügbare Seegangsmoделle, wie z. B. SWAN- oder das FE-Modell

5.1 Vorbemerkungen: Zur Auswahl des Seegangsmoделles WAM als Basis für den operationellen Betrieb im GeolInfoDBw

Seit vielen Jahren hat das HZG für die Bw und den DWD das Seegangsmoделl weiterentwickelt (vgl. Kapitel 3) und auf die speziellen Bedürfnisse der Bedarfsträger angepasst. Für die Bw wurde z. B. die schnelle Verschiebbarkeit der Moделlgebiete für die sich ändernden Einsatzgebiete der Bw entwickelt und für den operationellen Betrieb nutzbar gemacht. Insbesondere durch das neue Projekt der angestrebten Kopplung des nationalen Wetterdienstmoделles ICON mit dem Seegangsmoделl WAM (vgl. Kapitel 7), bekommt WAM ein Alleinstellungsmerkmal.

Des Weiteren wird eine WAM-Version am ECMWF ebenfalls im Routinebetrieb genutzt und weiterentwickelt, so dass von einem Fortbestand dieses Moделles auch auf europäischer Ebene auszugehen ist.

5.2 Zum SWAN-Modell

SWAN ist ein speziell für den Flachwasserbereich von der Technischen Universität Delft in den Niederlanden entwickeltes Moделl (SWAN Team 2020), welches in der NATO und der Deutschen Marine bei bestimmten Anwendungen zum Einsatz kommt. Dazu hat z. B. das „NATO Center for Maritime Research and Experimentation“ (NATO CMRE) in La Spezia, Italien, das Softwaretool „Interface for SWAN and Surf Moделls“ (ISSM) entwickelt, welches als Interface zwischen SWAN und Brandungsmoделlen die Vorhersage von Wellen und Strömungen in der Brandungszone ermöglicht (RUSU et al. 2006).

SWAN liefert dann die Eingangswerte für das Brandungsmoделl NSSM, welches als Ergebnis die Brandungshöhe, Querströmung, Brandungstyp, Breite und Anzahl der Brandungszonen und den Befahrbarkeitsindex (engl.: Modified Surf Index, MSI) für amphibische Fahrzeuge liefert (METTLACH et al. 2002). Neuere Brandungsmoделle wie z. B. „Surf Zone View“ (GUEDES et al. 2015), welches auf XBeach (DELTARES 2015) basiert, liefern diesen wichtigen MSI für Amphibienfahrzeuge noch nicht. In Abbildung 19 ist als Beispiel das SWAN-Moделlgebiet dargestellt, welches für eine Anlandungsübung nahe dem Ostseebad Rerik erstellt wurde (PAUL 2010). SWAN liefert die Eingangswerte für das Brandungsmoделl NSSM. Das hochaufgelöste SWAN-Moделl hat nur die Größe von 2.200 m in y-Richtung (Nord) und 3.000 m in x-Richtung (Ost). In diesem Gebiet ist ein Schnitt hineingelegt, entlang dessen alle Brandungsparameter bis zum Strand berechnet werden. Der in dieses kleine SWAN Gebiet hineinlaufende Seegang sowie die hineinlaufende Windsee und Dünung wird von einem größeren RSM über die Randbedingungen übergeben. Das RSM wiederum erhält seine Randwerte von dem GSM. Abbildung 19 zeigt das „Downscaling“ von der globalen Skala bis zur Brandung.

5.3 Zum FEM Seegangsmoделl „Wind Wellenmoделl“

Die Finiten Elemente Methode (FEM) zur Erzeugung von unregelmäßigen Gitternetzen als Basis für numerische Moделle ist im Fachbereich Wasserbau sehr verbreitet, etwa um komplizierte Flussläufe, Ästuar oder sehr detaillierte Küsten zu modellieren. Die Deutsche Marine hat sich früh für diese Methode interessiert, um für ihre Seegangmodellierung im Küstenbereich detailgenaue, engmaschige und nichtstrukturierte Gitter

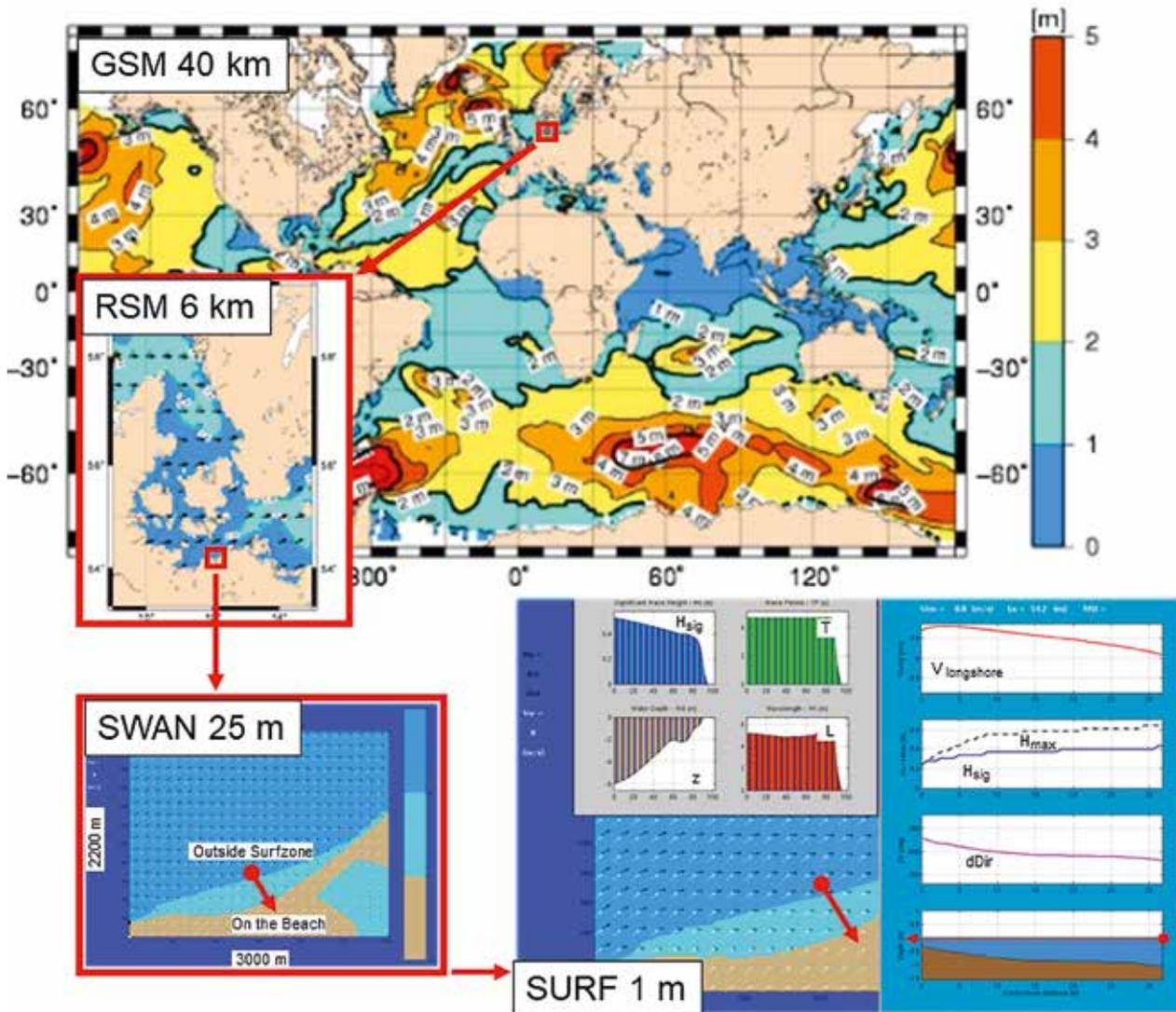


Abb. 19: SWAN liefert Randbedingungen für ein Brandungsmodell, welches u. a. Brandungshöhe und Brandungsquerströmung liefert. Das hochaufgelöste SWAN Modellgebiet hat nur eine Größe von 3.000 x 2.200 m und erhält Informationen über einlaufenden Seegang über seine Ränder vom RSM. Das RSM erhält seine Randbedingungen vom GSM. (Quelle: Marinekommando)

aufzusetzen, welche zur offenen See hin dann zunehmend aufgelockert werden. Diese Methode stellte in Aussicht, mehrfaches Nesten von Modellen mit regelmäßigen Gittern überflüssig zu machen und trotzdem die gleiche Detailgenauigkeit zu erreichen. Zum Test wurde das Wind Wellenmodell (WWM) nach ROLAND (2008) für einen Bereich der Ostsee erfolgreich installiert und ließ durchaus vielversprechende Modellergebnisse zu. Das schnelle Aufsetzen von unregelmäßigen Gittern für detaillierte Küstenverläufe weltweit erwies sich jedoch als sehr aufwändig. Für den operationellen Betrieb war jedoch eine schnelle Verschiebbarkeit der Modelle in die unterschiedlichen Einsatzgebiete der Marine ein wichtiger Punkt, so dass diese Methode zunächst nicht weiterverfolgt wurde.

Inzwischen hat der DWD seine meteorologischen Modelle (ICON) auf ein Ikosaedergitter (Dreiecksgitter) umgestellt. Dieses macht ebenfalls das Mehrfachnesten von Modellen überflüssig, da das Ikosaedergitter beliebig verdichtet werden kann, wie bei ICON-Global, ICON-EU und ICON-DEU. Von dieser Methode profitiert das Seegangsmoell auch, sobald es auf das ICON-Ikosaedergitter aufsitzt. Des Weiteren wird durch die Kopplung ICON-WAM u.a. die aktuelle Oberflächenrauigkeit des Ozeans (Z_0) durch den Seegang an das meteorologische Modell zurückgegeben, wodurch dieses dann auch im Bereich der ozeanischen Grenzschicht deutlich verbessert wird. Dies wird durch die aktuellen Seegangprojekte des Markdo realisiert (vgl. Kapitel 7).

6 Neun Seegangmodellnester und die zukünftige Umstellung auf Ikosaeder

Die neun RSM sind in der Größe frei wählbar und lassen sich auf dem GSM schnell in die Einsatzgebiete verschieben (Abb. 20 a). Angestrebt wird eine Kopplung des meteorologischen Modelles ICON und des See-

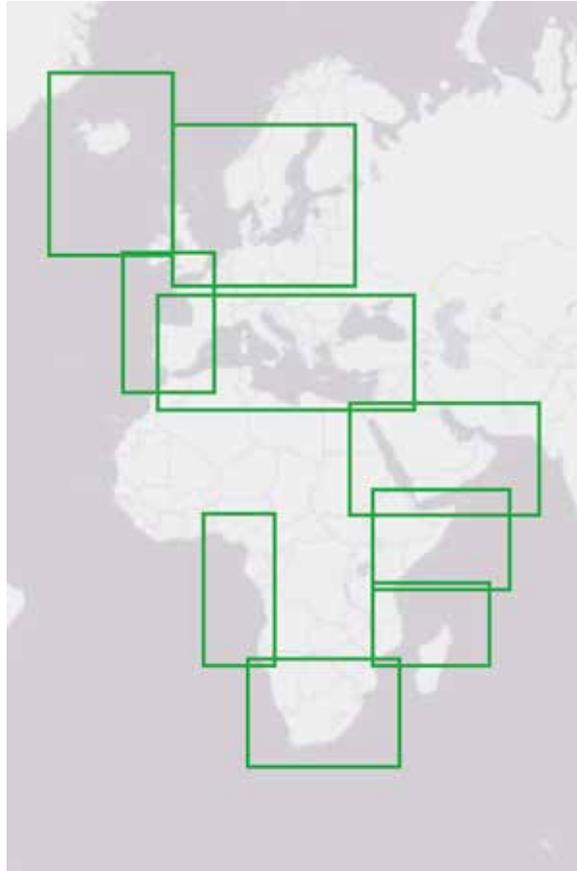


Abb. 20 a: Als Beispiel sind die neun frei verschiebbaren Seegangmodellnester dargestellt. (Quelle: Marinekommando)



Abb. 20 b: ICON und WAM auf Ikosaedergitter mit Verdichtung. (Quelle: Deutscher Wetterdienst)

gangsmoelles WAM auf dem Ikosadergitter. Dann kann eine hohe Auflöfung durch Verdichten des Ikosadergitters erreicht werden und das Nesten ist nicht mehr erforderlich (Abb. 20 b).

7 Ziele der Projekte: Seegangmodellvorhersagen

Hier werden verschiedene Projekte vorgestellt, die sich aufgliedern in (a) das Arbeitspaket eines Rahmenvertrages, (b) einen Herstellungsplan und (c) ein Fachprojekt.

- a) Zuerst müssen die Seegangmodelle von dem bisherigen Großrechner CRAY auf den neuen Großrechner NEC (siehe Abb. 21) des DMRZ portiert werden, da CRAY außer Betrieb genommen wird. Diese Tätigkeiten werden von der Firma „Ernst Basler und Partner Deutschland“ durchgeführt, da diese über Spezialkenntnisse im Umgang mit HPCs verfügt und mit der Infrastruktur des DWD vertraut ist. Die Realisierung erfolgt über den Rahmenvertrag GEOVOR Anteil Migration Seegangsmodell und Ozeanmodell: Y_U2CK_LA150_T1003 Arbeitspaket 3. Im Zeitraum September/Okttober 2020 wurden diese Arbeiten abgeschlossen.
- b) Bis eine vollständige Zweivegekopplung wissenschaftlich entwickelt und operationell in Betrieb genommen wurde, sollen Weiterentwicklungen nutzbar gemacht werden. Die Arbeiten sind innerhalb des Herstellungsplanes „Weiterentwicklung des Regionalen Seegangsmoelles“ als Fortführung des Auftrags M/AMG0/IA208 geplant.
- c) Im März 2019 hat der DWD sein vierjähriges Projekt 2WICWAM gestartet. Dieses ist ein DWD-Projekt innerhalb des hausinternen DWD Forschungsprogrammes „Innovation in der angewandten Forschung und Entwicklung“ (IAFE). Ziel ist eine Zweivegekopplung von WAM mit ICON. Damit werden die Seegangsvorhersagen voll in den operationellen Betrieb des ICON-Modelles des DWD integriert.



Abb. 21: Dargestellt ist der neue Vektor Supercomputer NEC SX-Aurora TSUBASA, der am gemeinsamen Rechenzentrum des DWD und des GeoInfoDBw (DMRZ Anteil Bw 20 %) betrieben wird. (Quelle: DWD NEC TWL-KOM RZ II Ludwigshafen)

Um die Interessen der Bw und der Deutschen Marine zu berücksichtigen, wird das Fachprojekt „Kopplung Wetter-Seegangmodell“ am Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) mit der Fachprojekt-Nr. 3310-0050-5533 zur Unterstützung des DWD-Projektes 2WICWAM gestartet.

8 Folgemodelle

Hier sollen zwei, für die Deutsche Marine erforderliche Folgeprojekte kurz vorgestellt werden:

- a) Brandungsmodell. Ein Brandungsmodell bezieht seine aktuellen Startwerte direkt aus dem vorhergehenden Lauf eines Seegangsmoделles und ist somit als Folgemodell geeignet. Nutzen für die Marine: Die Kenntnis der Brandung mit taktischen Entscheidungshilfen (engl. Tactical Decision Aids, TDA) ist für die GeoInfo Beratung von Spezialoperationen (engl. Special Operations, SpecOps) oder amphibischen Operationen (engl. Amphibious Operations, AmphibOps) von großer Bedeutung (PAUL 2010).
- b) Gefahrenabschätzung. Die Gefahren von Rollresonanz oder parametrischem Rollen (vgl. Kapitel 1.2) können durch ein Modell abgeschätzt werden, bei dem die Eigenrollperiode des Schiffstyps und die Seegangseigenschaften, welche aus WAM bekannt sind, eingehen. Somit ist es möglich, zu jedem Schiffstrack den Seegang und die davon ausgehenden Gefahren vorherzusagen und auf der Basis dieser Kenntnisse entsprechende Entscheidungen bei der Routenauswahl, sowie dem geeigneten Kurs und der Schiffsgeschwindigkeit zu treffen. Ein mögliches Programm ist ARROW (Software for Avoidance of Roll Resonance Or Wave Impact, BENEDICT & KIRCHHOFF 2018).

Nutzen für die Marine: Vermeidung von gefährlichen Situationen für Mensch und Schiff auf See, durch gefährliches Schiffsrollen im Seegang.

9 Schlussbemerkungen und Rückblick

45 Jahre Seegangsgeschichte mit all ihren Facetten der numerischen Seegangsmoделlvorhersagen auf unterschiedlichen Computerplattformen lassen sich nicht vollumfänglich auf wenigen Seiten zusammenfassen.

Daher ist ein Ziel dieser Arbeit, die wichtigsten Meilensteine der Entwicklung festzuhalten, da es eine derartige Zusammenstellung der Fakten für den Bereich des GeoInfoDBw noch nicht gegeben hat.

Die geschichtliche Abfolge der Meilensteine geht aber einher mit den beteiligten Persönlichkeiten und Instituten, der Entwicklung der Modellphysik und den zunehmend leistungsfähiger werdenden Computeranlagen.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der vorliegenden Arbeit ist die Begründung, warum es zwingend notwendig ist, die besten Seegangsvorhersagen der entsprechenden Zeit zur Verfügung zu stellen. Nur so lassen sich mögliche Gefahren durch Seegang minimieren. Dass die See durchaus Gefahren mit sich bringen kann, welche zu Havarien, Material- oder Personenschäden führen können, sind in der vorliegenden Arbeit aufgeführt und anhand von Beispielen aus der Praxis belegt.

Es wird ein aktueller Sachstand zu der im WAM-Modell enthaltenen Modellphysik wie auch zur Weiterentwicklung durch aktuelle Projekte gegeben. Derart detaillierte Kenntnisse sind für eine fundierte Diskussion über das Seegangsmoделl erforderlich.

Schließlich sind auch eigene persönliche Erfahrungen von verschiedenen Seereisen im Nordatlantik sowie in der Nord- und Ostsee mit eingeflossen, welche für das Verständnis des Themas Seegangsverhältnisse und Vorhersagen förderlich waren.

Danksagung

Abschließend bedanken sich die Autoren bei den Herren Dr. Heinz Günther, Dr. Arno Behrens und Dr. Thomas Bruns, welche als Zeitzeugen zur Herleitung der „45 Jahre Seegangsgeschichte im GeoInfoDBw“ maßgeblich beigetragen haben.

Beim ECMWF bedanken sich die Autoren für die Überlassung der BFI-Karten für diesen Aufsatz.

Literaturverzeichnis

- BENEDICT, K. & KIRCHHOFF, M. (2018): ARROW – Quick-Start Guide. In: <https://issims-gmbh.com/yoomla/phoca-download/products/arrow/open/ARROW-QuickStartGuide.pdf> [4.5.2021].
- BASENER, D. (2013): Von den Beobachtungen der Seeschifffahrt. 4. Ausgabe. Berlin: epubli.
- BATTJES, J. A. (1974): Surf Similarity. In: ASCE, American Society of Civil Engineers (Ed.): Proceedings of 14th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen. P 466–480. <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/2921/2586> [4.5.2021].
- BATTJES, J. A. & JANSSEN, J. P. F. M. (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: ASCE, American Society of Civil Engineers (Ed.): Proceedings of 16th Conference on Coastal Engineering, 27. August–3. September 1978, Hamburg. P. 569–587. <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/3294/2962> [4.5.2021].
- BEHRENS, A. (2002): Seegangsvorhersage. In: promet, 28. Jahrgang, Heft 1/2, 2002. S. 17–23. https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/veroeffentlichungen/Promet/dwd_promet_28_1_2_mod2s.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [4.5.2021].
- BEHRENS, A. & GÜNTHER, H. (2009) Operational wave prediction of extreme storms in Northern Europe. In: Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Vol. 49 (2) P. 387–399.
- BEHRENS, A. (2019) Weiterentwicklung Seegangmodell. Abschlussbericht und Abschlusspräsentation des Fachprojektes M/AMG0/IA208 Bundeswehr/HZG.
- BENJAMIN, T. B. (1967): Instability of periodic wavetrains in nonlinear dispersive systems. In: Proceedings of the Royal Society of London. Vol 299, P. 59–75.
- BENJAMIN, T. B. & FEIR, J. E. (1967): The disintegration of wave trains in deep water. Part 1. Theory. In: Worster, G. M. (Ed.): JFM, Journal of Fluid Mechanics, Vol 27. Cambridge University, Department of Applied Mathematics & Theoretical Physics. P. 417–430.
- BOWER, G. R., RICHARDSON, M. D., BRIGGS, K. B., ELMORE, P. A., BRAITHWAITE, E. F., BRADLEY, J., GRIFFIN, S., WEVER, T. F. & LÜDHER, R. (2007): Measured and Predicted Burial of Cylinders During the Indian Rocks Beach Experiment. In: IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 32. P. 91–102. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4273573/citations#citations> [4.5.2021].
- BRUNS, T., LEHNER, S., LI, X.-M., K. HESSNER, K. & ROSENTHAL, W. (2011): Analysis of an event of “Parametric Rolling” on board RV “Polarstern” based on shipborne wave radar and satellite data. In: IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 36, No. 2. P. 364–372. <https://core.ac.uk/download/pdf/30999077.pdf> [4.5.2021].
- BSU, BUNDESSTELLE FÜR SEEUNFALLUNTERSUCHUNG (HRSG.) (2009): Sehr schwerer Seeunfall. Tödlicher Personenunfall an Bord der CMS Chicago Express während des Taifuns „HAGUPIT“ am 24. September 2008 im Seegebiet vor Hongkong. Untersuchungsbericht 510/08. 1. November 2009, . In: https://www.bsu-bund.de/Shared-Docs/pdf/DE/Unfallberichte/2009/UBericht_510_08.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [4.5.2021].
- BSU, BUNDESSTELLE FÜR SEEUNFALLUNTERSUCHUNG (HRSG.) (2019): Gemeinsamer Untersuchungszwischenbericht zu dem sehr schweren Seeunfall 3/19 Überbordgegangene Container MSC ZOE im Verkehrstrennungsgebiet Terschelling – German Bight am 1. und 2. Januar 2019. Az.3/19, 12. Dezember 2019. In: https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2019/Untersuchungszwischenbericht_03_19.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [4.5.2021].
- DE WET, W. M. (2012): Bathymetry of the South African Continental Shelf. Master of Science Dissertation. Department of Geological Sciences, Faculty of Science, University of Cape Town (South Africa).
- DELTARES (HRSG.) (2015): XBeach Manual. Model description and reference guide to functionalities. In: <https://oss.deltares.nl> [4.5.2021].

- GL, GERMANISCHER LLOYD SE (2011): Klassifikations- und Bauvorschriften. Hamburg: Germanischer Lloyd SE.
- GUEDES, R. M. C., ANDRE, A. F., LOBATO, A. F., JOHNSON, D., RUGLYS, M. & GARRETT, S. (2015): SurfZoneView: a modeling-based tool to assess surf zone conditions and support amphibious beach landing operations. Conference Paper. Coasts & Ports Conference 2015, 15–18 September 2015, Auckland (New Zealand). In: https://www.researchgate.net/publication/289509990_Surf_Zone_Tactical_Decision_Aid_a_new_desktop_software_to_support_beach_landing [4.5.2021].
- GÜNTHER, H., HASSELMANN, S. & JANSSEN, P. A. E. M. (1991): The WAM model Cycle 4, . Technical Report No. 4. Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum. In: <https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15215/pdf/ReportNo.04.pdf> [4.5.2021].
- GÜNTHER, H. (1996): Einsatzmöglichkeiten der numerischen Seegangsvorhersage. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Wellen. Dresdner Wasserbauische Mitteilungen 9. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 129–143. <https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/104138/08%20Einsatzmoeglichkeiten%20der%20numerischen%20See...pdf?sequence=1&isAllowed=y> [4.5.2021].
- GUYONIC, S., MORY, M., WEVER, T. F., ARDHUIN, F. & GARLAN, T. (2007): Full-Scale Mine Burial Experiments in Wave and Current Environments and Comparison with Models. In: IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 32. P. 119–132.
- HASSELMANN, K. (1962): On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum Part 1: General theory. In: JFM, Journal of Fluid Mechanics , Vol 12. Cambridge University Press. P. 481–500.
- HOLTHUIJSEN, L. H., HERMAN, A. & BOOIJ, N. (2003): Phase decoupled refraction – diffraction for spectral wave models. Coastal Engineering, Vol 49. P. 291–305.
- SEIDEL, G. & TRINKAUS, M. (2019a): Auf den Spuren der Monsterwellen. In: HZG, Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung. https://www.helmholtz.de/erde_und_umwelt/auf-den-spuren-der-monsterwellen/ [4.5.2021].
- HZG, HELMHOLTZ-ZENTRUM GEESTHACHT – ZENTRUM FÜR MATERIAL- UND KÜSTENFORSCHUNG (2019b): Abschlussbericht für den Auftrag M/AMG0/IA208 Zur Weiterentwicklung des numerischen Seegangmodells.
- JANSSEN, P. A. E. M. (2003): Nonlinear four-wave interactions and freak waves Journal of Physical Oceanography, Vol 33. P. 863–884. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/33/4/1520-0485_2003_33_863_nfi-afw_2.0.co_2.xml [4.5.2021].
- JANSSEN, P. A. E. M. (2008): Progress in ocean wave forecasting. Journal of Computational Physics 227, Issue 7. P. 3572–3594.
- JENKINS, J. & PAPILI, S. (2020): Potential UXO seabed migration in the German Bight. In: Hydrographische Nachrichten 116, 6/ 2020. S. 72–76. https://dhyg.de/images/fachbeitraege/DOI_10.23784_HN116_11.pdf [4.5.2021].
- KOMEN, G. J., CAVALERI, M., DONELAN, M., HASSELMANN, K., S. HASSELMANN, S. & P.A.E.M. JANSSEN, P. A. E. M. (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press..
- KRÜGER, S. (2013): Hydrostatik von Schiffen. In: Schriftenreihe Schiffbau, August 2008. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit.
- KRÜGER, S. & PUNDT, L. (2011) Analyse und Bewertung des Gegenwärtigen Zustandes der Schiffssicherheit. Studie im Auftrag der Delegation DIE LINKE in der Fraktion GUE/NGL im Europaparlament. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit. In: <https://www.dielinke-europa.eu/de/article/8028.analyse-und-bewertung-des-gegenwaertigen-zustandes-der-schiffssicherheit-studie.html> [4.5.2021].
- LAVRENOV, I. V. (1998): The Wave Energy Concentration at the Agulhas Current off South Africa. Natural Hazards 17, P. 117–127. In: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1007978326982.pdf> [4.5.2021].

- LEFEBVRE, C. (2006): Orkan BRITTA am 31.10. und 01.11.2006 und seine Auswirkungen. In: DWD, Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20061201_orkan_britta.pdf [4.5.2021].
- LOHÖFER, H. (2003): Mathematische und statistische Hilfsmittel für Pharmazeuten. Philipps-Universität Marburg, Fachbereich mathematik und Informatik. S. 159–176. In: <https://www.mathematik.uni-marburg.de/~lohoefer/pharma/gesamt-2seitig-ws03.pdf> [4.5.2021].
- MALLORY, J. K. (1974): Abnormal waves in the southeast coast of South Africa. HIS, International Hydrographic Review, Vol 51, P. 99–129. In: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/23802> [4.5.2021].
- METTLACH, T. R., EARLE, M. D. & HSU, Y. L. (2002): Software Design Documents for the Navy Standard Surf Model Version 3.2. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center. Mississippi.
- PAPILI, S., WEVER, T., DUPONT, Y. & VAN LANCKER, V. (2014): Storm influence on the burial of objects in a shallow sandy shelf environment. Marine Geology, Vol. 349, P. 61–72. In: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322714000243> [4.5.2021].
- PAUL, U. (1994): Objektive Analyse ozeanographischer Daten mit orthogonalen Polynomflächen. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 46, S. 29–60. In: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02225740.pdf> [4.5.2021].
- PAUL, U. (2010): Vorhersage von Wellen und Strömung in der Brandungszone als taktische Entscheidungshilfe. In: GeInfo Forum, Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2012.
- PAUL, U. (2012): Erstmals ARGO-Drifter von Deutscher Marine ausgelegt – FGS Lübeck in der Ionischen See. In: GeInfo Forum. Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, 1/2012.
- PAUL, U. (2012): Das Regionale Ozeanmodell bei MarA Geo für die Ionische See/Mittelmeer im operationellen Betrieb. In: GeInfo Forum. Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr, Heft 1/2012.
- PAUL, U. (2015): Mehrzweckboot „FGS Kronsport“ im Einsatz: Ozeanographische Messfahrt in der Straße von Gibraltar, im Nordostatlantik und bei den Britischen Kanalinseln. In: LtrGeInfoDBw, Leiter des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (Hrsg.): Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1/2015, ISSN 1865-6978.
- PAUL, U. (2018): Regionale Ozeanvorhersagemodelle im operationellen Betrieb für die Marine. In: LtrGeInfoDBw, Leiter des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (Hrsg.): Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1a/2018, ISSN 1865-6978.
- PAUL, U. (2018): Regional Ocean Prediction Models for Operational Use in the Navy. In: LtrGeInfoDBw, Leiter des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (Hrsg.): Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1b/2018, ISSN 1865-6978.
- PAUL, U. (2021): Simulation: Weiterentwicklung Regionales Ozeanmodell. In: BMVg, Bundesministerium der Verteidigung (Hrsg.): Jahresbericht Wehrwissenschaftliche Forschung 2020. Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte. Bonn.
- PAUL, U. & GUNKEL, T. (2021): 45 Jahre Seegangmodellvorhersagen im Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeInfoDBw) für die Deutsche Marine im Einsatz. Von den ersten Forschungsprojekten für die Bundeswehr ab 1974, über den operationellen Betrieb seit 1982, bis zum aktuellen Sachstand und geplanten Weiterentwicklungen. Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr, Heft 1, 2021, ISSN 1865-6978.
- PLESKACHEVSKY, A. (2012): Monsterwellen in der Nordsee. In: DLR, Deutsche Luft- und Raumfahrt. https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-7707/13134_read-35699/ Archiv 2012 [4.5.2021].

- ROLAND, A. (2009): Entwicklung von WWM II - Zur Seegangmodellierung auf unregelmäßigen Gitternetzen. Dissertation, TU Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. In: Zanke, U. & Ostrowski, M. (Hrsg.) (2009): Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt. Heft 146. https://www.researchgate.net/publication/256198066_Development_of_WWM_II_Spectral_wave_modeling_on_unstructured_meshes [4.5.2021].
- ROSENTHAL, W. & LEHNER, S. (2004): Results from the MAXWAVE Project. Proc. OMAE 2004, Vancouver 2004, 9 S.
- RUSU, E., CONLEY, D. C. & FERREIRA-COELHO, E. (2006): A NATO tool for prediction of waves and longshore currents in the surf zone. Technical Report NURC-FR-2006-014. In: NATO S&T, NATO Science & Technology Organisation. <https://www.cmre.nato.int/research/publications/latest-techreports/235-a-nato-tool-for-prediction-of-waves-and-longshore-currents-in-the-surf-zone> [4.5.2021].
- SCHILLER, P. (2010): Untersuchung der theoretischen Vermeidbarkeit von Seeunfällen durch die Anwendung der MSC.1/Circ. 1228 und MSC/Circ. 707. Diplomarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit.
- SCHMAGER, G., TINZ, B. & HUPFER, P. (2006): Roaring Forties und Riesenwellen – Gefahren im Südpolarmeer. In: Lozán, J. L., Graßl, H., Hubberten, H.-W., Hupfer, P., Karbe, L. & Piepenburg, D. (Hrsg.): Warnsignale aus den Polarregionen. Wissenschaftliche Auswertungen. S. 80–85.
- SEE-BG, SEE-BERUFSGENOSSENSCHAFT (2003): Richtlinien für die Überwachung der Schiffsstabilität, Kapitel 2: Stabilität und Rollbewegungen im Seegang. U+S Ausschuss der See-BG.
- SIEDLER, G. & PAUL, U. (1991): Barotropic and baroclinic tidal currents in the eastern basins of the North Atlantic. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol 96. P. 22,259-22,271. In: <https://oceanrep.geomar.de/15390/1/91JC02319.pdf> [4.5.2021].
- SWAN TEAM (2020): SWAN. Scientific and technical documentation SWAN Cycle III version 41.31A. In: http://swanmodel.sourceforge.net/online_doc/swantech/swantech.html [4.5.2020].
- TELEDYNE MARINE (2020): Workhorse Monitor. Direct Reading 1200, 600, 300 kHz ADCP. Product Datasheet. In: http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/monitor_datasheet_hr.pdf [18.05.2021].
- WAMDI GROUP (1988): The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography., Vol. 18. P. 1775–1810. In: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2) [4.5.2021].
- WMO, WORD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (ED.) (1998): Guide to wave analysis and forecasting. WMO-No. 702. ISBN 92-63-12702-6. In: <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/121/WMO702.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [4.5.2021].

Abkürzungsverzeichnis

AAG	Ausbildungsfahrt Außerheimische Gewässer Übungsform der Bundesmarine
AB	Able Bodied seaman (dt.: Fachkraft, Vollmatrose)
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler Strömungsmesser
AGeoBw	Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr Seit 1.10.2013 ZGeoBw.
AmphibOps	Amphibious Operations (dt.: Amphibische [militärische] Operationen))
ARROW	Avoidance of Roll Resonance Or Wave Impact Software
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie Bis 1994, dann wurde aus dem BMFT und dem Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft (BMBW) das heutige Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gebildet.
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
BFI	Benjamin-Feir Index.
BHavM	Beauftragter für Havarieuntersuchungen der Marine
Bw	Bundeswehr
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BSU	Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
CFL-Kriterium	Courant-Friedrich-Levi-Stabilitätskriterium
COSMO	Consortium for small-scale Modelling. Wettervorhersagemodell als Basis für RLM-Modellnester.
CMRE	Center for Maritime Research and Experimentation Von 1959 bis 1986 als Supreme Allied Command Atlantic (SACLANT) Anti-submarine Warfare (ASW) Research Centre und von 1987 bis 2003 als SACLANT Underwater Research Centre – bides unter dem Namen SACLANTCEN bekannt – benannt. Dann unter dem Name NATO Underwater Research Centre (NURC)geführt.
DMRZ	Deutsches Meteorologisches Rechenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (dt.:Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen)
EU	Europäische Union
FEM	Finite Elemente Methode
FE-M	Finite Elemente Modell Seegangmodell auf FEM basierend
FINO	Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee
FGS	Federal German Ship (dt.: Schiff der Deutschen Marine)
GeoInfoDBw	Geoinformationsdienst der Bundeswehr
GKSS	Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH Am 1.11.2010 wurde die GKSS in Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG) umbenannt. Seit dem 31.3.2021 trägt es den Namen Helmholtz-Zentrum Hereon.
GME	Globales Meteorologisches Modell des DWD
GSM	Globales Seegangmodell

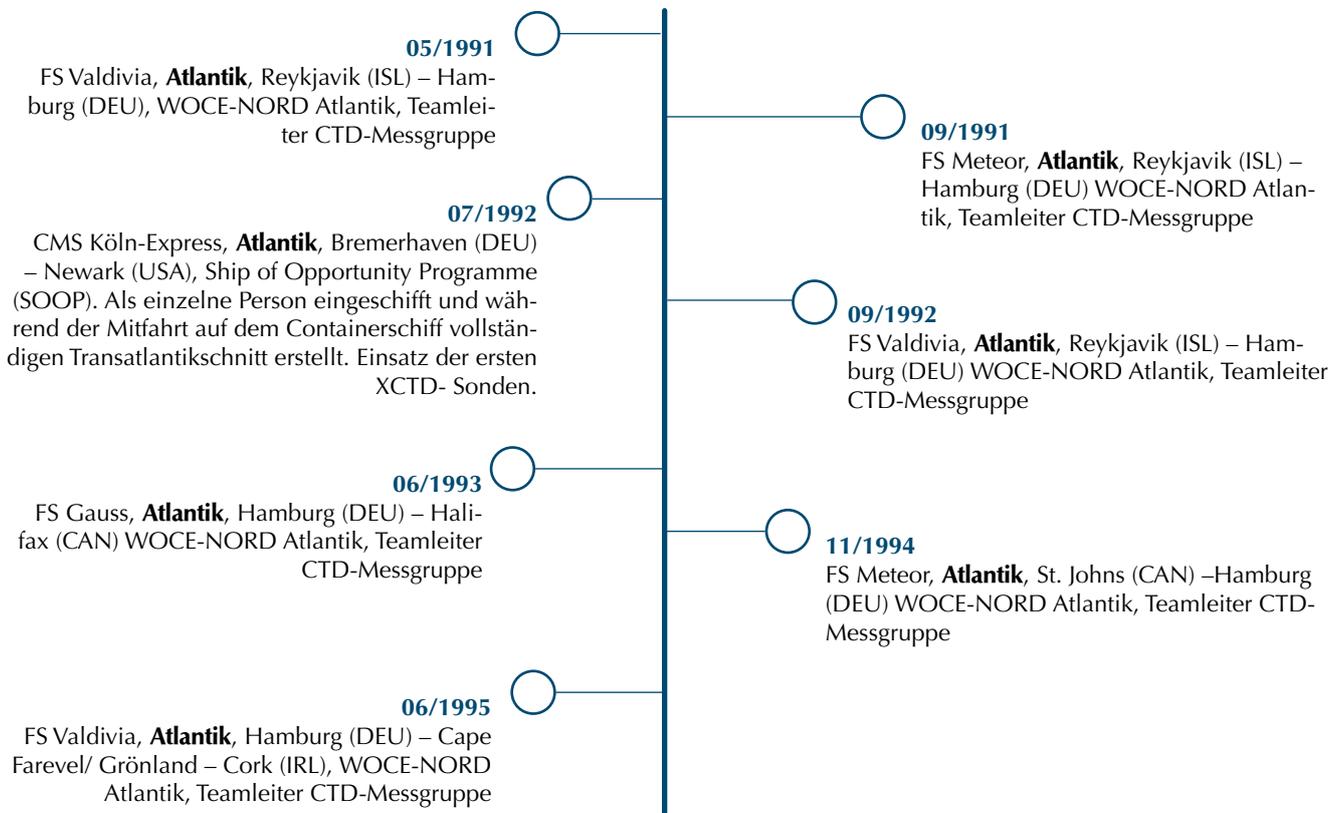
HPC	High Performance Computer Hier Großrechner beim DWD/DMRZ: früher zwei CRAY-XC40 mit Linux-Vorcluster, jetzt zwei NEC Vektor-Supercomputer SX-Aurora Tsubasa
HYP A	Hybrid Parametric Tiefwasserseegangmodell der zweitenten Generation:
HYPAS	HYP A für Shallow Water Flachwasserseegangmodell
HZG	Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH. Das HZG war vor dem 1.11.2010 als unter dem Namen GKSS bekannt. Am 31.3.2021 wurde das HZG zu Helmholtz-Zentrum Hereon umbenannt.
IAFE	Innovation der angewandten Forschung und Entwicklung Internes forschungsprogramm des DWD
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic Globales nichthydrostatisches Wettervorhersagemodell des DWD auf Icosaedergitter
ISSM	Interface for SWAN and Surf Models NATO-Tool für Brandung
KNMI	Königlich Niederländisches Meteorologisches Institut
MarKdo	Marinekommando
MARNET	Messnetz automatisch registrierter Stationen in der Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee
MPI-M	Max Plank Institut für Meteorologie
MSI	Modified Surf Index (dt.: Befahrbarkeitsindex)
MzB	Mehrzweckboot
NATO	North Atlantic Treaty Organization (dt.: Nordatlantikpakt, Atlantisches Bündnis)
OS	Ordinary Seaman (dt.:Hilfskraft Deck,Leichtmatrose)
RSM	Regionales Seegangmodell
NSSM	Navy Standard Surf Model Brandungsmodell der US-Marine
SFB 94	Sonderforschungsbereich 94
SpecOps	Special Operations
SPI	Sonar Performance Indicator (dt.:Sonarleistungsanalysator)
SWAN	Simulating Waves Nearshore Seegangmodell der dritten Generation für Flachwasser
SWASH	Simulating Waves till Shore
TDA	Tactical Decision Aids Software zur taktischen Entscheidungshilfe. Auswirkung von Umweltparametern auf eine Mission
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (dt.: Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft, Kultur)
UXO	Unexploded Underwater Munitions
WAM	Wave Model Seegangmodell der dritten Generation
WAMOS	Wave Monitoring System
WOCE	Word Ocean Circulation Experiment
WWM	Wind Wellen Modell Seegangmodell auf FEM basierend
ZGeoBw	Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
2WICWAM	Two Way ICON-WAM Coupling

Anhang: Ausgewählte Seereisen des Erstautors bei Forschungs- und Messreisen im Atlantik, Mittelmeer, Nord- und Ostsee, welche u. a. auch für das Verständnis des Themas Seegang, sowie praktische Seegangserfahrungen nützlich waren Geschichte

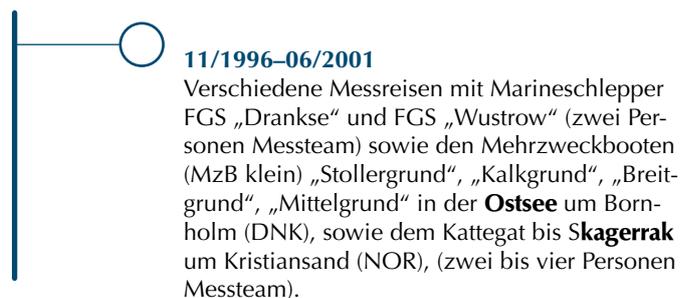
Beim Institut für Meereskunde Kiel (IFM-K, jetzt Geomar)



Beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, Hamburg)



Beim Flottenkommando, Glücksburg



Beim NATO Undersea Research Center, (NURC, La Spezia (ITA), jetzt CMRE)



05/2002

NFS Alliance, Seegebiete **Mittelmeer** (Tyrrhenisches Meer/ Elba/ Procchio Bay). Projekt: ASCOT-02, Funktion: Military Survey Officer MILSURVO, MILOC Projekte-Koordination)

Beim Marineamt, Rostock (MarA)

Projektplanung, Durchführung mit Schiffs- und Messgeräteeinsatz, Auswertung und Publikation

09/2005

FGS Kronsor, Seegebiet **Ostsee**, Bornholmsee, Insel Bornholm. (DANEX).
Funktion Fahrtleiter.



04/2006

FGS Planet, Seegebiet **Atlantik**, Kanarische Inseln (ESP) bis Kapverdische Inseln (CPV). (Steadfast Jaguar).
Funktion: Messgruppe MarA.

04/2007

FGS Schwedeneck, Seegebiet **Ostsee**, Ustka (POL) bis Gdynia (POL) (Loyal Mariner).
Funktion Fahrtleiter.

Info: Seit 2011 ist das MzB nach Umbau als Forschungsschiff „RV Elisabeth Mann Borgese“ für das Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) im Einsatz.



07/2007

FGS Kronsor, Seegebiet **Ostsee**, Eckernförde (DEU) – Tallin (EST) – RIGA (LAT) - Eckernförde.
Funktion Fahrtleiter

08/09 2012

FGS Kronsor, Seegebiete **Mittelmeer-Atlantik-Nordsee**, Gibraltar (GBR) – Zeebrügge (BEL), u. a. Seegangsmessungen an Bord mit WAMOS und verschiebbare Seegangsmodelevorhersagen mit SWAN.
Funktion Fahrtleiter

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 Kreuzmann, 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)

Bisherige Veröffentlichungen in der Schriftenreihe des GeoInfoDBw

- 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 Wyttschaete-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 (Inhalt: Die Ebola-Epidemie 2014 im westlichen Afrika unter geopolitischen Gesichtspunkten, • 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
- Heft 2, 2017** Dr. Heinz Hüttl & Dr. Steffen Schobel, Prof. Dr. Mathias Albert & Dorothea Wehrmann, Mag. Dr. Nikolaus Scholik & Dr. Sebastian Bruns, Dr. Volkmar Damm, Dr. Christian Reichert, Dr. Kai Berglar, Dr. Harald Andruleit, Hon.-Prof. Dr. Christoph Gaedicke
Jahresheft Geopolitik 2016; Die Arktis unter Geopolitischen Gesichtspunkten (Inhalt: • Auswirkungen des Klimawandels auf Politik, Wirtschaft und Infrastruktur in der Arktis • Zwischen Kooperation und Konflikt, zwischen Zentralität und Marginalität: Die Arktis im Spiegel politikwissenschaftlicher Forschung • Maritime Sicherheit im Arktischen Raum. Der Hohe Norden als Spielball geopolitischer, maritimer, wirtschaftlicher und ökologischer Interessen • Der Arktische Ozean aus rohstoffwirtschaftlicher und völkerrechtlicher Sicht)
- Heft 1a, 2018** Oberregierungsrat Diplom-Ozeanograph Uwe Paul
Regionale Ozeanvorhersagemodelle im operationalen Betrieb für die Marine
- Heft 1b, 2018** Oberregierungsrat Diplom-Ozeanograph Uwe Paul
Regional Ocean Prediction Models for Operational Use in the Navy.