

# DEMARINE-2

## TEILPROJEKT 3 – SEEGANGSMONITOR

# DWD-ABSCHLUSSBERICHT

DWD: Jens Kieser, Peter Hoffmann, Thomas Bruns

DLR: Andrey Pleskachevsky, Susanne Lehner

HZG : Arno Behrens

---

**ZE:** **Deutscher Wetterdienst**

**FKZ:** 50EE1111

**Vorhabenbezeichnung:** DeMarine-2

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.06.2012 - 31.08.2015

**Berichtszeitraum:** 01.06.2012 - 31.08.2015

---

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurzdarstellung des Partners .....	7
1.1	Aufgabenstellung.....	7
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben geführt wurde.....	8
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	8
1.3.1	AP 3.1 – Management .....	10
1.3.2	AP 3.2 – Fernerkundung .....	10
1.3.3	AP 3.3 – Seegang .....	17
1.3.4	AP 3.4 – Kopplung .....	18
1.3.5	AP 3.5 – Validierung .....	19
1.3.6	AP 3.6 - Produkte.....	20
1.4	Stand von Wissenschaft und Technik bei Beginn des Projektes .....	21
1.4.1	Seegang .....	21
1.4.2	Ozeanzirkulation.....	22
1.4.3	Fernerkundung .....	24
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	25
2	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....	25
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses .....	25
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	32
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	33
2.4	Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	34
2.5	Stand von Wissenschaft und Technik.....	34
2.6	Veröffentlichungen.....	35
3	Erfolgskontrollbericht.....	36
3.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen.....	36
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen.....	36

3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	37
3.3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte.....	37
3.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	37
3.3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten .....	37
3.3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	37
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	37
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	37
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung .....	38
4	Literatur.....	39
5	DatenQuellen .....	40
6	Abkürzungsverzeichnis.....	41

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auflistung verschiedener Produkte und Angaben zu deren Verfügbarkeit.....	30
Tabelle 2: Auflistung der Kosten. ....	32

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1:</b> Tabellarischer Zeitplan für den gesamten Projektzeitraum mit Änderungen und Meilensteinen. M1: Zugang zu Datenquellen eingerichtet, M2a: NRT-Erstellung gewährleistet (Neustrelitz), M2b: Start der NRT-Versorgung, M3: Abschluss der Algorithmenentwicklung, M4: Erfolgreiche Testläufe, M5: Erfolgreiche Testläufe, M6a: Erfolgreiche prä-operationelle Testläufe des gekoppelten Systems auf DWD-Rechner, M6b: Interaktiv gekoppeltes System im prä-operationellen Betrieb, M7: Abschluss Verfahrensentwicklung, M8: Festlegung einer Produktpalette, M9: Regelmäßige Produkterstellung. ....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Arbeitspakete und deren Verknüpfungen. ....	10
<b>Abbildung 3:</b> Streifenförmige Bereiche in der Deutschen Bucht, welche durch TerraSAR-X bzw. Tandem-X überflogen und gescannt werden und für welche Aufnahmen für den Seegangsmonitor bestellt wurden. Die Streifen liegen innerhalb des CWAM-Gebietes und beinhalten sechs Positionen mit In-situ-Messungen (links); Beispiele der Kollokation der CWAM-Ergebnisse, TerraSAR-X und Bojen (rechts). Für das gezeigte Beispiel werden drei Bojen von TerraSAR-X gleichzeitig abgedeckt: Westerland, Bunkerhill und Elbe. Insgesamt wurden von 2013 bis 2015 53 Überflüge mit 196 Bildern aufgenommen und prozessiert. ....	11
<b>Abbildung 4:</b> Flussdiagramm des Sea Sate Processors (SSP) für das Ableiten der Meteo-Marinen Parameter. Nach der Prä-Filterung der Sub-Szene wird ein 2-D-Spektrum mit der FFT errechnet (links) und analysiert. Nach dem Eingang der Spektralparameter rechnet die Modellfunktion XWAVE_C die Wellenhöhe. Diese wird nachgeprüft und ausgegeben. ....	13
<b>Abbildung 5:</b> Filterung der Artefakte vor der FFT Analyse. Ein Schiff beeinflusst stark das Bildspektrum. Die SAR-Szene 30km×50km wird rechts dargestellt, welche Seegang mit ausgefilterten Artefakten zeigt. Ein Ausschnitt („before filtering“) zeigt Seegang gerechnet ohne Ausfilterung. Der kleinere Ausschnitt mit den Schiffen wird links gezeigt. Die Spektren (1) und (2) der Subszenen mit den Schiffen (1) und (2) im SAR-Image (links) werden in der Mitte links gezeigt, die davon abgeleiteten Wellenhöhen sind 5m-6m (die Umgebung liegt bei 80cm Wellenhöhe). Nach der Filterung werden die Schiffe mit den hohen Intensitätswerten auf mittlere Umgebungswerte der Subszene gesetzt. ....	14
<b>Abbildung 6:</b> Vergleich aller kollokierter Daten 2013-2015 in der Deutschen Bucht inklusive Sturm am 09.12.2011: 53 TerraSAR-X-Überflüge mit 196 Bildern und 81 Kollokationen (+/-30min und +/-5km). ....	14
<b>Abbildung 7:</b> Signifikante Wellenhöhe des Seegangs in der Deutschen Bucht abgeleitet auf einem Raster 3km×3km mit Hilfe des Seegangs-Prozessors (SSP) mit Algorithmus XWAVE_C (Coastal) aus TerraSAR-X-Überflügen. Drei verschiedene Wettersituationen und Vergleiche mit Bojenmessungen werden gezeigt: leichte Brise, schwach bewegte See (links); mäßige Brise, leicht bewegte See (Mitte); frische Brise/Starker Wind, mäßig bewegte See/ grobe See (rechts). Lokale Windgeschwindigkeit wird mit dem XMOD-2 Algorithmus für die gleichen analysierten Subszenen abgeleitet. Für	

Windgeschwindigkeiten <2 m/s werden die Werte als unzuverlässig ausgeblendet. .... 15

**Abbildung 8:** Beispiele des Seegangs und Wind abgeleitet mit dem Sea State Processor aufgrund der XWAVE\_C und XMOD-2 Modelfunktionen für die Deutsche Bucht: 10.05.2015 um 05:10 UTC und 29.04.2015 um 05:51 UTC. Beide Überflugorbits sind identisch, die Daten zeigen aber unterschiedliche Wind und Seegangssituationen: stürmischer Wind mit Böen und mäßig hohe See (links) und mäßige Brise mit mäßig bewegter See (rechts). .... 15

**Abbildung 9:** Beispiele der analysierten Subszene für eine gleiche Geoposition mit unterschiedlichen Seegang- und Windzuständen (siehe Abb. 11). .... 16

**Abbildung 10:** Prozess-Schema von Empfang bis Auslieferung von TerraSAR-X-Daten. .... 16

Abbildung 11: Grafisch aufbereitetes Ergebnis des entwickelten Validierungsverfahrens. Den Vorhersagen durch CWAM (farbige Konturflächen) sind TerraSAR-X-Messungen (farbige Quadrate) gegenübergestellt. Außerdem werden verschiedene statistische Validierungsmaße und eine Bojenmessung gezeigt. .... 19

**Abbildung 12:** Schematische Darstellung des Seegangsvorhersagesystems des DWD, bestehend aus globalem Wellenmodell (GWAM) und europäischem Wellenmodell (EWAM), mit den zugehörigen Windantrieben. Ebenfalls gezeigt ist die Einbindung des Küstenwellenmodells (CWAM) ins SVS. .... 21

**Abbildung 13:** Das Modellsystem des BSH im Überblick. In zentraler Position das bisherige gekoppelte Modellsystem BSHcm.w. .... 23

**Abbildung 14:** Modellgebiet (grün) des hochauflösenden Küsten-Zirkulationsmodells CMOD des BSH ..... 24

**Abbildung 15:** Vorhersagekarte der signifikanten Wellenhöhe und Wellenaufrichtung für das Vorhersagegebiet des CWAM für einen Vorhersagezeitschritt. Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen. .... 26

**Abbildung 16:** Wie Abbildung 15, jedoch für die Vorhersage der mittleren Wellenperiode. .... 27

**Abbildung 17:** Wie Abbildung 15, jedoch für die Vorhersage der signifikanten Höhe der Dünung und die Laufrichtung der Dünungswellen. .... 27

**Abbildung 18:** Wie Abbildung 15, jedoch für den vorhergesagten Wind in 10 m Höhe. .... 28

**Abbildung 19:** Das Meteogramm zeigt die Vorhersage verschiedener Seegangparameter, Wind, Temperatur und Wetter als Zeitreihe für einen Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Außerdem wird bei Überschreitung einer festgelegten Wellenhöhe eine Warnung angezeigt (rosa Fläche). Darüber hinaus enthält das Produkt einen NRT-Vergleich mit der gemessenen signifikanten Wellenhöhe (rote Sternchen). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu



Wetter- und Seegang am Punkt ElbeBuoy

kritischer Wind = 10.80 m/s, kritische Wellenhoehe = 2.00 m

ZEIT [UTC]	WIND aus [Bft]	BÖEN [Bft]	HS [m]	DÜN. aus [m]	STROM nach [m/s]	T.LUFT [°C]	T.WASS. [°C]	WETTER
2015 - 5 - 13								
01:00	WSW 6	6	1,8	NW 0,8	WNW 0,1	11	11	
02:00	WSW 6	6	1,8	NW 0,8	ESE 0,3	12	11	
03:00	WSW 6	7	1,9	NW 0,5	ESE 0,6	11	11	
04:00	W 6	7	1,9	NW 0,6	ESE 0,6	11	11	
05:00	W 6	7	2,1	NW 0,5	ESE 0,5	11	11	
06:00	W 5	7	2,0	NW 0,7	E 0,2	11	11	
07:00	W 6	7	2,0	NW 0,6	WNW 0,1	10	11	
08:00	W 6	7	2,1	NW 0,6	WNW 0,4	10	11	
09:00	W 5	7	2,1	NW 0,9	WNW 0,6	10	11	
10:00	W 5	7	2,1	NW 1,0	W 0,6	10	11	
11:00	W 5	6	2,0	WNW 1,3	W 0,5	10	11	
12:00	W 5	6	2,0	WNW 1,2	W 0,4	10	11	
13:00	W 5	6	1,9	WNW 1,2	WNW 0,2	10	11	
14:00	WNW 5	6	1,8	WNW 1,1	ESE 0,1	10	11	
15:00	WNW 5	6	1,7	WNW 0,9	ESE 0,4	10	11	
16:00	WNW 5	6	1,7	WNW 0,6	ESE 0,6	11	11	

entnehmen.

..... 28

**Abbildung 20:** Vorhersagetabelle für einen Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen. .... 29

**Abbildung 21:** Meteogramm-Komposition für verschiedene marine und meteorologische Vorhersageparameter an einem Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen. .... 30

**Abbildung 22:** NRT-Validierungsprodukt zeigt die CWAM-vorhergesagte signifikante Wellenhöhe (farbige Kontur-Flächen) für den Zeitpunkt eines TerraSAR-X-Überfluges über die Deutschen Bucht. Die farbigen Rechtecke zeigen die zugehörigen TerraSAR-X-Messungen. Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen. .... 30

**Abbildung 23:** Flussdiagramm der Prozesskette, an deren Ende die Auslieferung der Produkte steht. .... 32

## 1 KURZDARSTELLUNG DES PARTNERS

### 1.1 AUFGABENSTELLUNG

Die meteorologische Sicherung der Seeschifffahrt und des Küstenbereichs, d.h. die Sicherung menschlichen Lebens und von Sachwerten auf See, Katastrophenschutz, Küstenschutz und Gefahrenabwehr gehört zu den gesetzlichen und international vereinbarten Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD). In der Wahrnehmung dieser Aufgabe betreibt der DWD ein Seegangsvorhersagesystem (SVS) als Glied seiner numerischen Wettervorhersagekette (NWV).

Seegangsvorhersagen sind Bestandteil von Seewetterberichten und Warnungen, und sie bilden die Grundlage weltweiter Schiffsroutenberatungen. Hoher Seegang spielt auch eine Rolle beim Küstenschutz, sei es als zusätzliche Belastung der Deiche bei Sturmfluten oder als Quelle küstenparalleler, die Erosion fördernder Strömungen. Ein hoher Anspruch an die Genauigkeit der Wellenvorhersage wird von der Offshore-Industrie geäußert, denn sowohl in der Konstruktionsphase als auch bei der Instandhaltung von Windkraftanlagen gelten oft sehr geringe kritische Grenzwerte der Wellenhöhe.

Mit der Verbesserung der NWV über die Jahre ist auch die Vorhersageleistung des SVS stetig gestiegen, allerdings bestanden besonders im Küstenbereich noch erhebliche Defizite. So wurden Wellen im Flachwasser von den Modellen meist überschätzt. Einerseits wegen zu geringer Auflösung der Bodentopographie und andererseits, weil der Mechanismus des Wellenbrechens nicht ausreichend gut parametrisiert war. Änderungen der Wassertiefe durch Gezeiten und durch Windstau wurden vom operationellen Vorhersagesystem nicht berücksichtigt.

Ziel des Teilprojektes 3 “Seegangsmonitor” (im Folgenden TP3 genannt) war daher die Entwicklung eines hochauflösenden Seegangsmodells für die deutschen Küsten- und Offshore-Regionen unter Berücksichtigung wechselnder Wasserstände und Strömungen. Die daraus abzuleitenden Vorhersageprodukte sollten – wann immer möglich – in nahezu Echtzeit (**Near Real Time, NRT**) anhand von Satelliten- und Bojenmessungen validiert werden. Die Verbindung von Vorhersage und Validierung als Produkt sollte den Nutzern die Möglichkeit einer Qualitätsüberwachung geben.

Zur Erreichung dieses Ziels waren die folgenden Aufgaben zu lösen:

1. Die Modellphysik des bereits im globalen und regionalen Maßstab eingesetzten Seegangsmodells WAM (Wave Model) musste an die speziellen Verhältnisse im Flachwasser angepasst werden. Insbesondere waren die Voraussetzungen für die Kopplung an ein Strömungsmodell zu schaffen. Der assoziierte Projektpartner HZG (Helmholtz-Zentrum Geesthacht) sollte hierzu unterstützende Beiträge liefern.
2. Für die Kopplung wurde das neue Ozean-Zirkulationsmodell HBM (Hiromb Boos Model) des BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) ausgewählt. Dessen Modellgebiet deckt die innere Deutsche Bucht sowie die westliche und südliche Ostsee ab. Die in diesem Modell notwendigen Anpassungen waren vom Projektpartner BSH durchzuführen.
3. Für die Bereitstellung von Wind- und Seegangsdaten aus Radar-Satellitenmessungen war der assoziierte Projektpartner DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) zuständig. Zu diesem Zweck waren bestehende Datenextraktions-Algorithmen anzupassen und eine operationelle NRT-Datenversorgung einzurichten.

## 1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN GEFÜHRT WURDE

Seit vielen Jahren betreibt der DWD ein operationelles Seegangsvorhersagesystem. Dieses basiert auf dem in Abschnitt 1.1 erwähnten WAM und bestand vor Projektbeginn aus dem globalen Seegangmodell (GWAM) und dem europäischen Seegangmodell (EWAM). In einer langjährigen Zusammenarbeit mit HZG werden die Modelle ständig weiterentwickelt. Die zu Projektbeginn vorliegende WAM-Version enthielt bereits wichtige Voraussetzungen für eine spätere Kopplung an das Ozeanzirkulationsmodell. Diese sind eine Parametrisierung des Wellenbrechens im Flachwasser, die Berechnung und Ausgabe von Radiation-Stress und Stokes-Drift, sowie die Möglichkeit der Berücksichtigung von veränderlichen Wasserständen und Strömungen. Den Windantrieb für den Seegang liefert die atmosphärische Modellkette des DWD.

Neben Seegangs- und Atmosphärenmodellen besitzt der DWD ein Hochleistungsrechnersystem, welches für die zuverlässige Durchführung operationeller und rechenintensiver Prozesse ausgelegt ist.

Am BSH wird seit vielen Jahren ein operationelles Zirkulationsmodell betrieben und fortlaufend weiterentwickelt. Es dient als wichtige Grundlage für die Kopplung eines Ozeanzirkulationsmodells an das Seegangmodell. Dazu bestanden vor Projektbeginn bereits Erfahrungen im Bereich der physikalischen Kopplung zwischen Seegangs- und Strömungsmodellen.

Das DLR war vor Projektbeginn bereits über 20 Jahre lang im Bereich der SAR-Ozeanographie (SAR=Synthetic Aperture Radar) erfolgreich tätig. In einer Reihe von bahnbrechenden Untersuchungen und Pilotprojekten wurden Algorithmen entwickelt, um aus Radar-Satellitendaten meteo-marine Parameter wie das Oberflächenwindfeld, Seegangparameter und Unterwassertopographie unter Verwendung verschiedener Auflösungs- und Überdeckungsstufen abzuleiten. Durch den seit 2008 im Umlauf befindlichen Satelliten TerraSAR-X bot sich die Möglichkeit, beim Überflug über deutsche Küsten sehr hochaufgelöste SAR-Szenen zu gewinnen, aus denen sich Felder von Seegangparametern für den direkten Vergleich mit der Simulation ableiten lassen. In früheren Projekten wurden für die TerraSAR-X- und Tandem-X-Mission bereits X-Band-Algorithmen zur Wind- und Seegangsbestimmung entwickelt, die sich zur Implementierung an einer Antennenstation für NRT-Anwendungen eignen.

Mit seiner Empfangsstation in Neustrelitz gewährleistete das DLR schon vor Projektstart einen lückenlosen End-to-End-Service inklusive Empfang von Fernerkundungssatelliten-Daten sowie deren Verarbeitung und Auslieferung relevanter Produkte in Nahe-Echtzeit.

## 1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

In diesem Abschnitt wird der Ablauf des Vorhabens anhand der einzelnen Arbeitspakete (APs) beschrieben, wobei Bezug auf die ursprüngliche Planung genommen wird. Hierzu zeigt [Abbildung 1](#) in schematischer Form die ursprüngliche zeitliche Planung der einzelnen APs sowie Änderungen, die sich während des Projektes ergeben haben.



dukterstellung.

Wie im Projektantrag detailliert dargestellt wurde, sollte das TP3 aus sechs APs bestehen, die in folgender Weise miteinander verknüpft sind (siehe *Abbildung 2*):

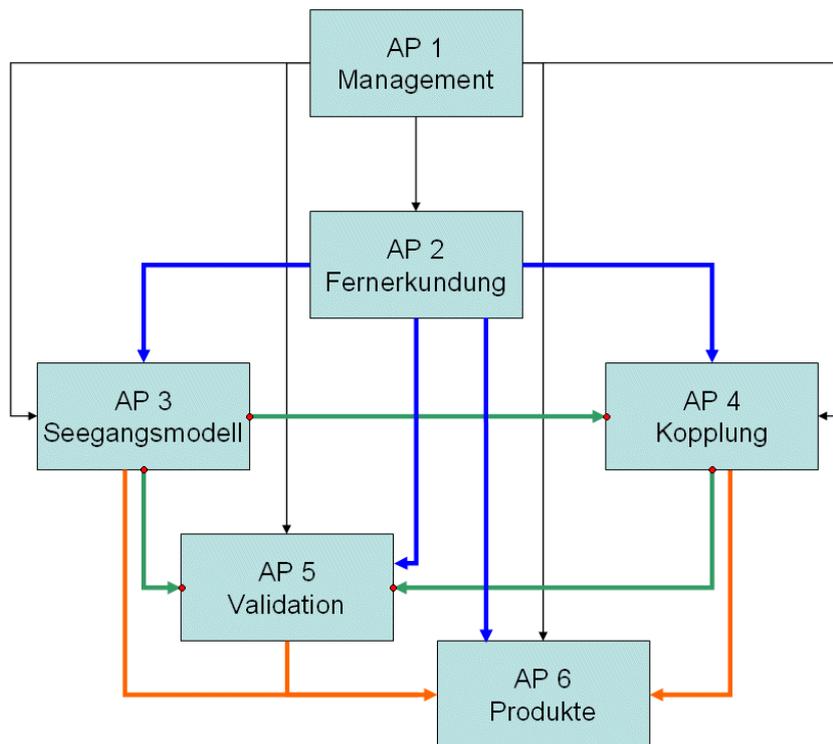


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Arbeitspakete und deren Verknüpfungen.

### 1.3.1 AP 3.1 – MANAGEMENT

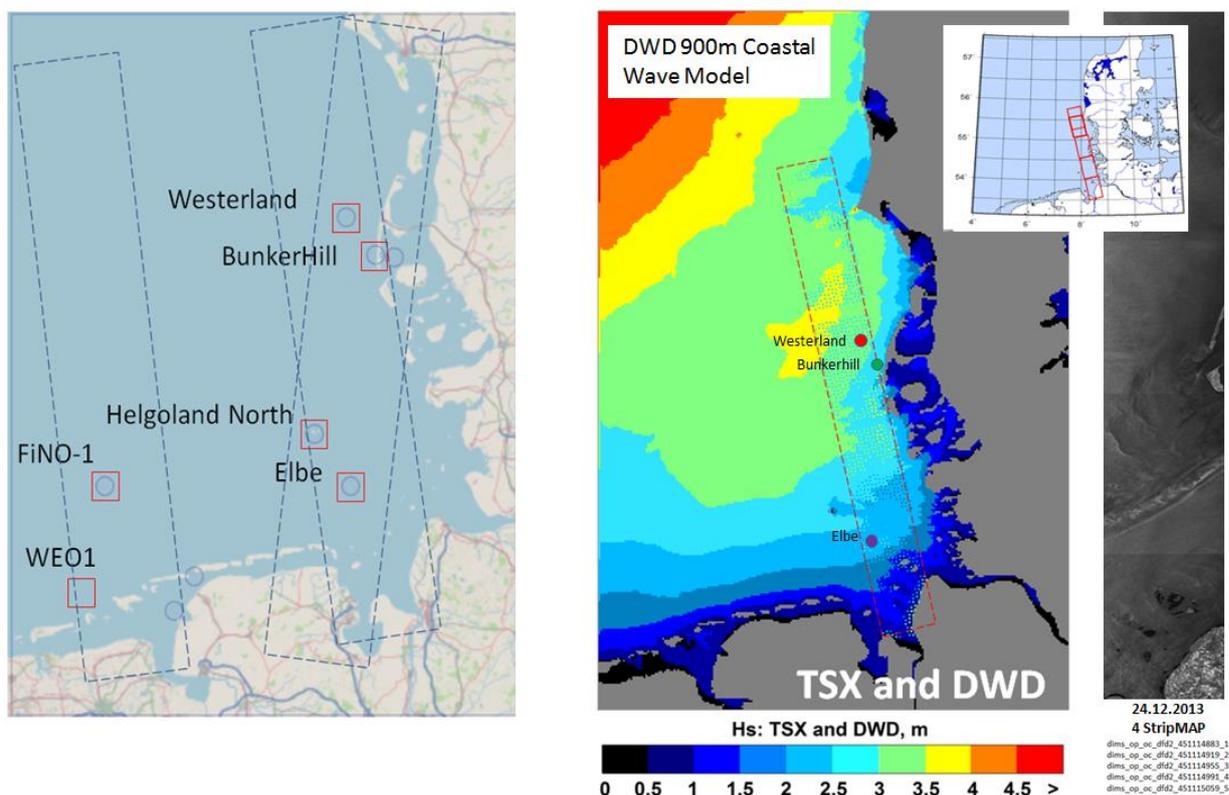
Gemäß der Planung wurden in diesem AP die Arbeiten der einzelnen APs sowie der Austausch zwischen den Arbeitspaketen koordiniert. Hierzu fanden in der ersten Hälfte des Projektes etwa halbjährlich Treffen zwischen den beteiligten Arbeitsgruppen statt. Seit Januar 2014 fanden monatliche Arbeitstreffen zwischen BSH und DWD statt, bei denen die Koordination der Arbeiten von AP 3.3 und AP 3.4 im Vordergrund stand. Da sich diese Arbeiten neben dem Ozeanzirkulationsmodell schwerpunktmäßig der Entwicklung des Seegangmodells widmeten, waren bei mehreren dieser Treffen auch Kollegen von HZG anwesend. Ab Juli 2014 fanden monatlich oder öfter Treffen zwischen dem DWD und dem Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) des DLR statt, bei denen die Arbeiten von AP 3.2 und AP 3.5 abgestimmt wurden. Neben diesen Arbeitstreffen fanden mehrere Teilprojekttreffen des TP3 statt, bei denen alle beteiligten Institutionen teilnahmen. Bei diesen Treffen wurden zusätzlich zur Koordination der APs auch übergeordnete Themen wie beispielsweise Präsentationen auf Gesamtprojekttreffen, Nutzer-Workshops, Konferenzen und Fachtagungen diskutiert.

### 1.3.2 AP 3.2 – FERNERKUNDUNG

Wie den Planungen im Projektantrag zu entnehmen war, ging es in diesem Arbeitspaket um die Verfügbarmachung von Wind- und Seegangsinformationen aus Radarsatellitendaten. Ziel war es insbe-

sondere, regelmäßig die X-Band-Daten des DLR-Satelliten TerraSAR-X (in einer späteren Phase auch Sentinel) zu nutzen. Bereits existierende Wind- und Seegangsalgorithmen (X-WIND und X-WAVE) sollten an der DLR-Bodenstation Neustrelitz echtzeitfähig gemacht und prä-operationell getestet werden. Entsprechende Produkte sollten bezüglich ihrer Auflösung und geografischen Abdeckung definiert und in der Validierungsphase den APs 3.3, 3.4, 3.5 und 3.6 zeitgerecht zur Verfügung gestellt werden.

Dazu wurden während des gesamten Projektzeitraumes für die in *Abbildung 3* gezeigten Bereiche TerraSAR-X-Daten bestellt. Diese wurden zunächst benötigt, um die Algorithmen zur Ableitung von Wind- und Seegangparametern (X-WIND und X-WAVE) zu testen. Wegen der niedrigen Priorität der Science-AO konnten zunächst nur wenige der bestellten Daten erhalten werden. Diese wurden prozessiert und die resultierenden Wind- und Seegangsinformationen an andere APs weitergeleitet. Bei der Analyse der Daten wurden Schwachstellen des Algorithmus zur Ableitung von Seegangparametern aus TerraSAR-X-Messungen detektiert, welche besonders bei der Anwendung in küstennahen und Flachwasser-Gebieten auftraten.



**Abbildung 3:** Streifenförmige Bereiche in der Deutschen Bucht, welche durch TerraSAR-X bzw. Tandem-X überflogen und gescannt werden und für welche Aufnahmen für den Seegangsmonteur bestellt wurden. Die Streifen liegen innerhalb des CWAM-Gebietes und beinhalten sechs Positionen mit In-situ-Messungen (links); Beispiele der Kollokation der CWAM-Ergebnisse, TerraSAR-X und Bojen (rechts). Für das gezeigte Beispiel werden drei Bojen von TerraSAR-X gleichzeitig abgedeckt: Westerland, Bunkerhill und Elbe. Insgesamt wurden von 2013 bis 2015 53 Überflüge mit 196 Bildern aufgenommen und prozessiert.

Ursprünglich war der Algorithmus zur Seegangsdetektion im „offenen“ Ozean entwickelt worden. Dort hatten Vergleiche mit In-situ-Messungen sowohl für die signifikante Wellenhöhe, als auch für die Peak-Wellenlänge und –richtung der langen Wellen insbesondere mit Wellenhöhen über 2 m gute Übereinstimmungen gezeigt. Bei der Anwendung in küstennahen Bereichen ergaben sich zu-

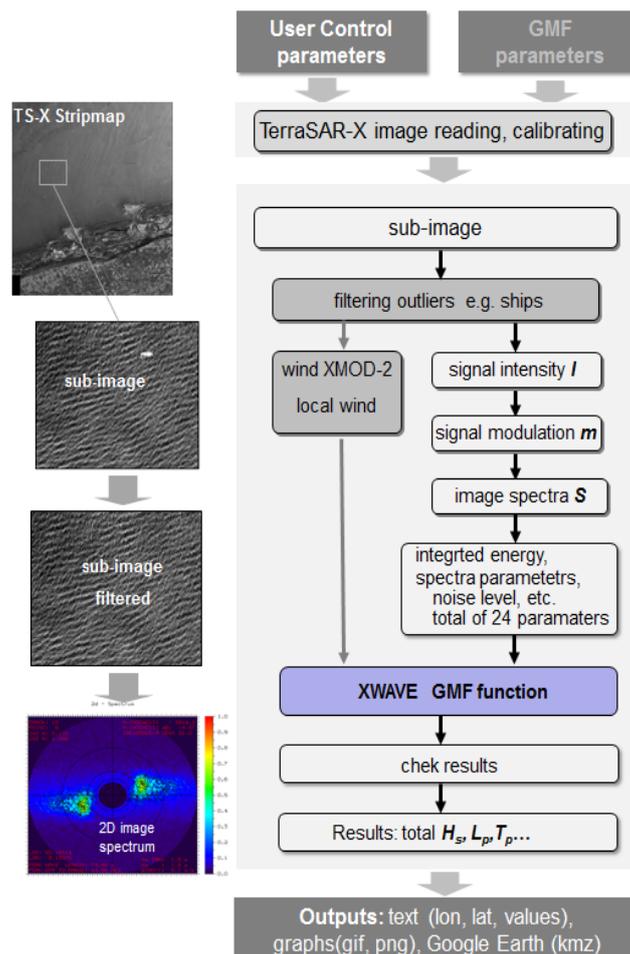
nächst jedoch eine Reihe von Problemen: Wegen großer lateraler Variationen der Wellenfelder in küstennahen Gewässern werden die spektralen Bildeigenschaften unschärfer. Ab etwa 20 m Tiefe spürt der Seegang den Boden, so dass die räumliche Variabilität sichtbar wird. Zusätzlich konnte es zu einer fehlerhaften Ableitung der Seegangparameter kommen, wenn die Sub-Szenen SAR-Signaturen enthielten, die nicht durch Seegang erzeugt wurden. Solche Artefakte sind Schiffe, Strömungskanten, atmosphärische Effekte wie Windböen und Fronten sowie brechende Wellen. Zusätzlich stellten Sandbänke eine große Schwierigkeit dar, da sie zwar unter dem aktuellen Wasserspiegel liegen können, aber so flach sind, dass der Seegang an diesen Stellen bricht (Tiefen im Bereich 0–3 m).

Aufgrund der beschriebenen Problematik wurde der X-WAVE-Algorithmus für die Anwendungen in küstennahen Gewässern und insbesondere für Seegang mit Wellenhöhen unter 2 m und Wellenlängen kürzer als 150 m angepasst und verbessert (XWAVE\_C – Coastal Version).

Der Algorithmus XWAVE\_C wurde für eine flächendeckende Rasteranalyse erweitert und zu einer vollautomatischen NRT-Prozessierung entwickelt (Sea State Processor, SSP). Dazu wurde eine Reihe von Filtern und Korrekturen zusätzlich zu der XWAVE-Modellfunktion einprogrammiert. Dies war nötig, da rund 50% der Daten in Wattgebieten Ausreißer und Artefakte in SAR-Bildern enthalten: Sandbänke, Wellenbrechen, Schiffe, Strömungskanten, atmosphärische Fronten und sogar interne Wellen-Strukturen. Eine schematische Darstellung, welche die Funktion des SSP demonstriert, ist in [Abbildung 4](#) gezeigt.

Der Kern des entwickelten SSP sowohl für HH- und VV-Polarisation besteht aus:

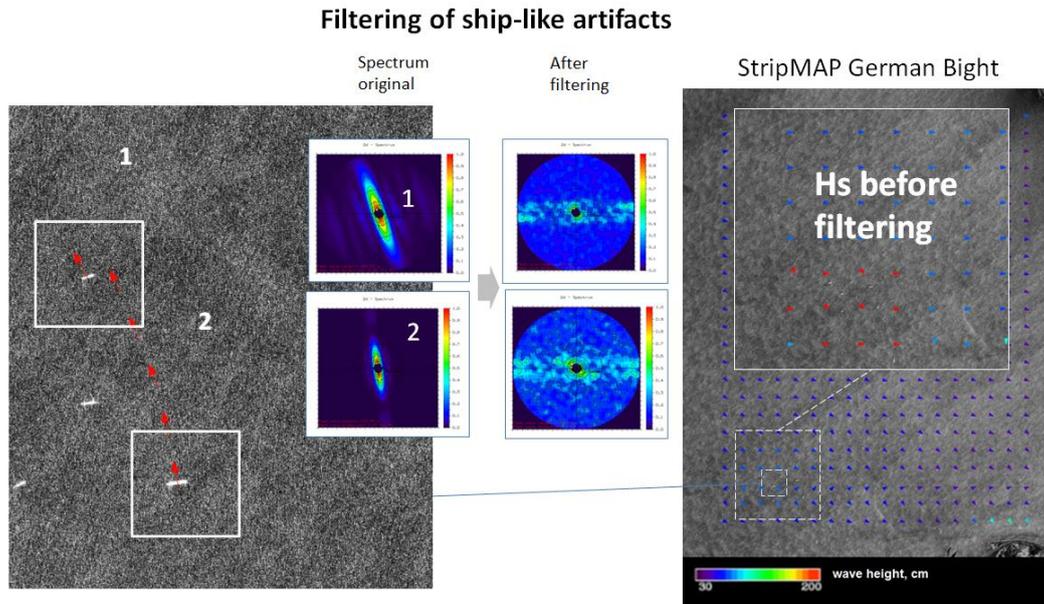
- Schritt 1: Vorfilterung (Entfernen von Ausreißern wie Schiffen, Bojen usw. auf der Grundlage lokaler Intensitätsstatistik), [Abbildung 5](#) zeigt das Verfahren der Filterung von Artefakten in anschaulicher Weise.
- Schritt 2: Berechnung des Windes mit XMOD-2-Algorithmus
- Schritt 3: Spektralanalyse einer Subszene (FFT, Integration, Ableiten der spektralen Parameter),
- Schritt 4: Berechnung des Küstenseegangs mit der neuen XWAVE\_C-Modellfunktion
- Schritt 5: Überprüfung der Ergebnisse mit Hilfe der Windgeschwindigkeit und integrierten spektralen Parametern (z.B. erzeugen Sandbänke hohe spektrale Werte im Spektralraum für kleine  $k$  Werte  $k < 0,01$  und können ausgefiltert werden). Nach der Analyse wird eine Kontrolle der abgeleiteten Spektren durchgeführt und die Ausgabe mit den Bezeichnungen „H“ (High Probability Sea State – Seegang mit 99% Wahrscheinlichkeit), „M“ (Medium Probability Sea State – Seegang wird möglicherweise durch Artefakte verfälscht), und „L“ (Low Probability Sea State – Seegang wird durch Land, Sandbänke oder andere Artefakte komplett verfälscht) versehen.



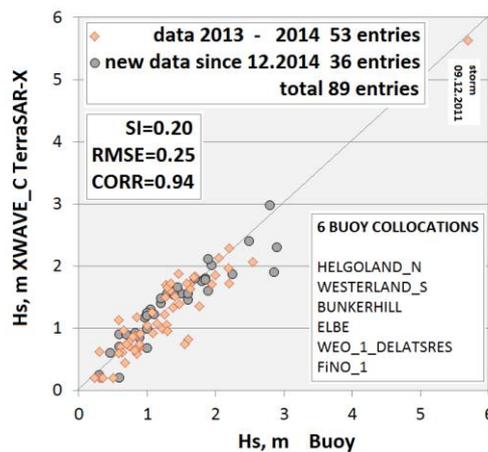
**Abbildung 4:** Flussdiagramm des Sea State Processors (SSP) für das Ableiten der Meteo-Marinen Parameter. Nach der Prä-Filterung der Sub-Szene wird ein 2-D-Spektrum mit der FFT errechnet (links) und analysiert. Nach dem Eingang der Spektralparameter rechnet die Modellfunktion XWAVE\_C die Wellenhöhe. Diese wird nachgeprüft und ausgegeben.

Für den räumlich stark variierenden Seegang wurde eine Zoom-Option einprogrammiert: Eine Sub-Szene kann nun z.B. mit dem Faktor 2 gezoomt werden. Dadurch kann nun mit einer standardmäßigen FFT-Analyse eine kleinere Fläche untersucht werden (Eine FFT-Analyse mit 1024 Stützstellen entspricht nun bei einer Bildauflösung von 1,25 m anstatt 1280 m × 1280 m Fläche einer Fläche von 640 m × 640 m).

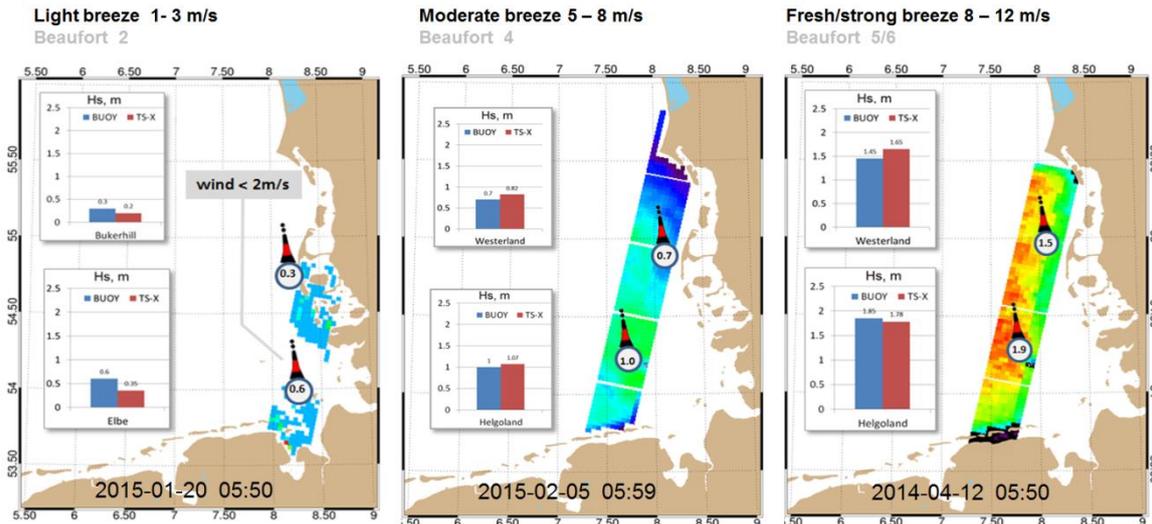
Nach dem Eingang der neuen Daten aus dem Zeitraum von 2013 bis 2014 (neue Wind- und Seegangssituationen, unterschiedliche Kombinationen der Seegangssysteme wie Dünung und Windsee, welche früher in der TerraSAR-X-Datenbank für die Deutsche Bucht nicht vorhanden waren) und Verbesserung der Koeffizienten der Modellfunktion errechnet der Seegangsprozessor die Signifikante Wellenhöhe mit einem Scatter-Index (Streuung) von 20% im Vergleich zu den In-situ-Bojenmessungen (Zeitliche Unsicherheit +/-30 min und räumliche Unsicherheit +/-5 km).



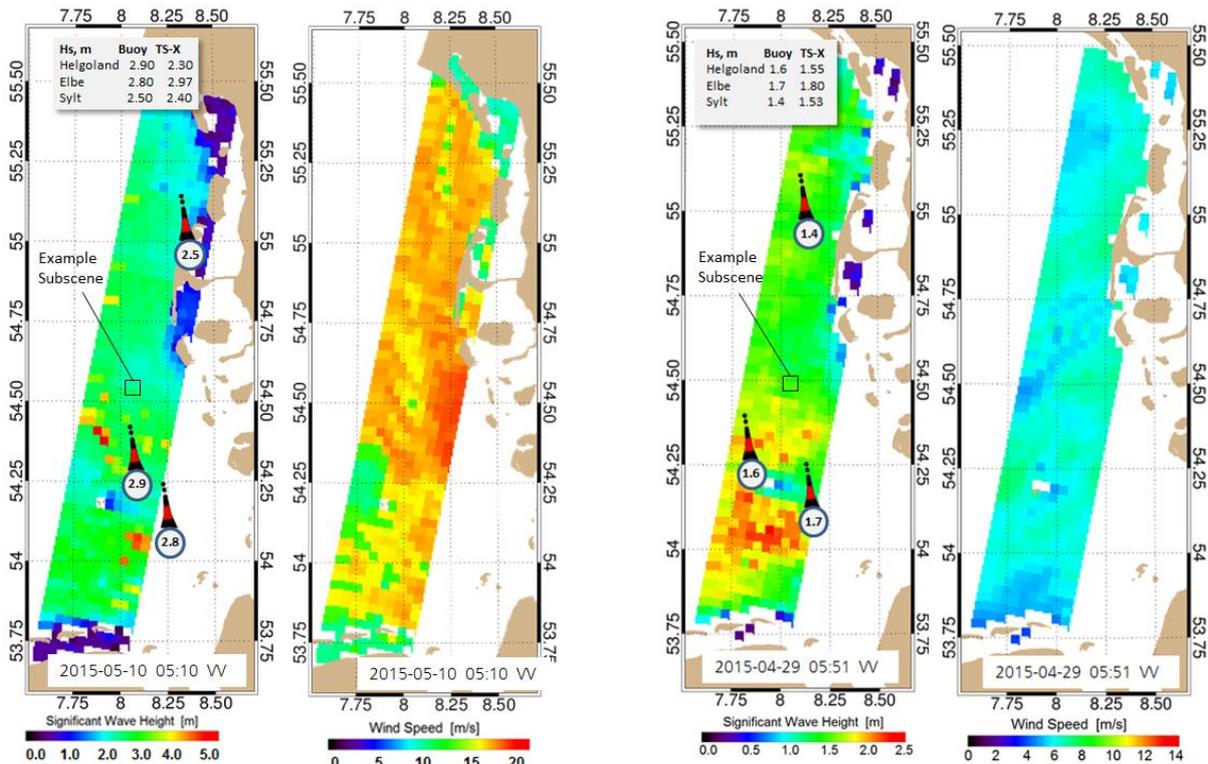
**Abbildung 5:** Filterung der Artefakte vor der FFT Analyse. Ein Schiff beeinflusst stark das Bildspektrum. Die SAR-Szene 30km×50km wird rechts dargestellt, welche Seegang mit ausgefilterten Artefakten zeigt. Ein Ausschnitt („before filtering“) zeigt Seegang gerechnet ohne Ausfilterung. Der kleinere Ausschnitt mit den Schiffen wird links gezeigt. Die Spektren (1) und (2) der Subszenen mit den Schiffen (1) und (2) im SAR-Image (links) werden in der Mitte links gezeigt, die davon abgeleiteten Wellenhöhen sind 5m-6m (die Umgebung liegt bei 80cm Wellenhöhe). Nach der Filterung werden die Schiffe mit den hohen Intensitätswerten auf mittlere Umgebungswerte der Subszene gesetzt.



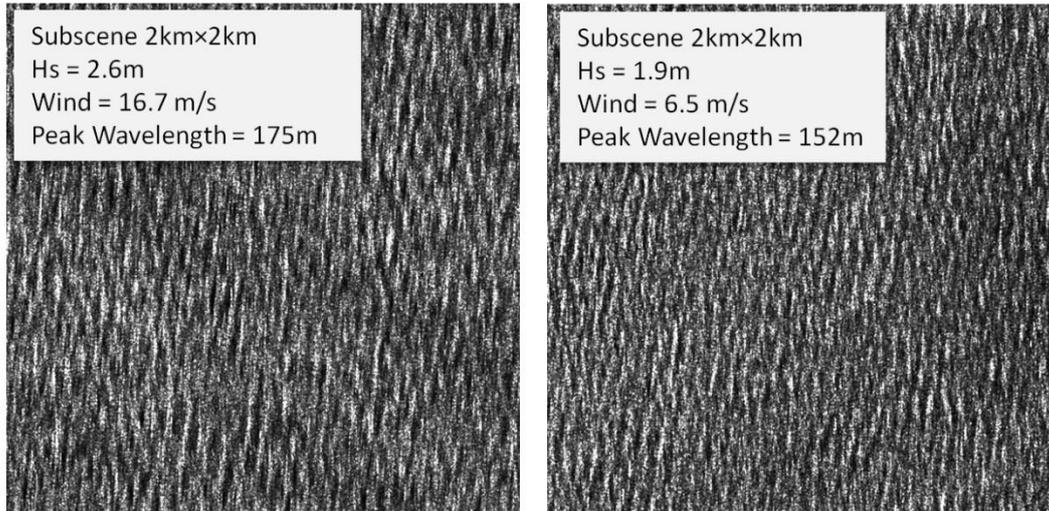
**Abbildung 6:** Vergleich aller kollozierter Daten 2013-2015 in der Deutschen Bucht inklusive Sturm am 09.12.2011: 53 TerraSAR-X-Überflüge mit 196 Bildern und 81 Kollokationen (+/-30min und +/-5km).



**Abbildung 7:** Signifikante Wellenhöhe des Seegangs in der Deutschen Bucht abgeleitet auf einem Raster 3km×3km mit Hilfe des Seegangs-Prozessors (SSP) mit Algorithmus XWAVE\_C (Coastal) aus TerraSAR-X-Überflügen. Drei verschiedene Wettersituationen und Vergleiche mit Bojenmessungen werden gezeigt: leichte Brise, schwach bewegte See (links); mäßige Brise, leicht bewegte See (Mitte); frische Brise/Starker Wind, mäßig bewegte See/ grobe See (rechts). Lokale Windgeschwindigkeit wird mit dem XMOD-2 Algorithmus für die gleichen analysierten Subscenen abgeleitet. Für Windgeschwindigkeiten <2 m/s werden die Werte als unzuverlässig ausgeblendet.



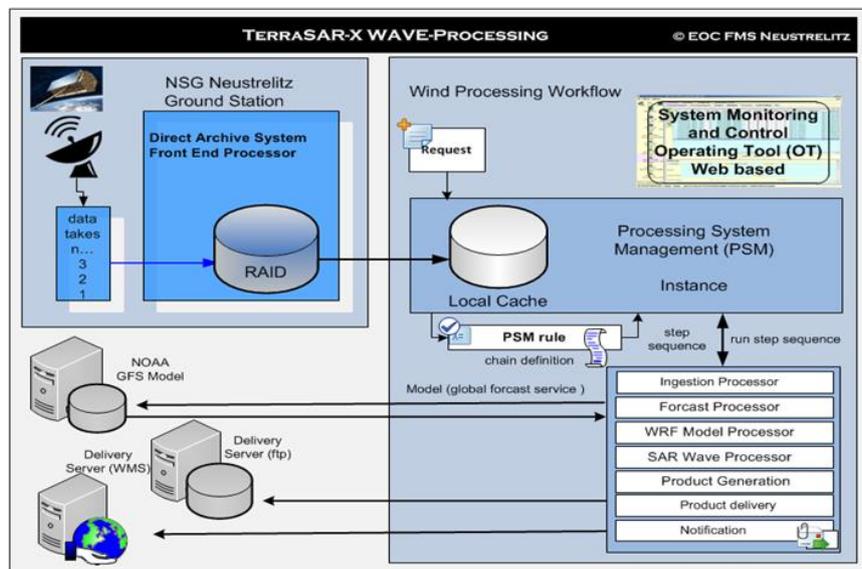
**Abbildung 8:** Beispiele des Seegangs und Wind abgeleitet mit dem Sea State Processor aufgrund der XWAVE\_C und XMOD-2 Modellfunktionen für die Deutsche Bucht: 10.05.2015 um 05:10 UTC und 29.04.2015 um 05:51 UTC. Beide Überflugorbits sind identisch, die Daten zeigen aber unterschiedliche Wind und Seegangssituationen: stürmischer Wind mit Böen und mäßig hohe See (links) und mäßige Brise mit mäßig bewegter See (rechts).



**Abbildung 9:** Beispiele der analysierten Subszenen für eine gleiche Geoposition mit unterschiedlichen Seegangs- und Windzuständen (siehe Abb. 11).

Nach der Verbesserung des X-WAVE-Algorithmus wurden die TerraSAR-X-Daten erneut prozessiert und an andere APs ausgeliefert. Bis zum Projektende wurden im Zeitraum von 2013 bis 2015 insgesamt 50 Überflüge mit 150 Bildern über der Deutschen Bucht aufgenommen, akquiriert und ausgeliefert (allerdings nicht in NRT). Bestellt waren über 150 Überflüge, es wurden jedoch nur 30% der bestellten Daten aufgenommen. Grund hierfür ist die niedrige Priorität von unserem Account als *Science-User* (Science-User erhalten die Daten kostenlos, haben aber niedrige Priorität).

Entsprechend der Planungen wurde die Prozesskette, welche vom Empfang der Satellitendaten über Prozessierung durch die Wind- und Seegangsalgorithmen bis zur Auslieferung der Daten reicht, an der DLR-Bodenstation in Neustrelitz für den NRT-Betrieb implementiert. Dies geschah mit Unterstützung des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR in Neustrelitz. *Abbildung 10* zeigt die Prozesskette schematisch.



**Abbildung 10:** Prozess-Schema von Empfang bis Auslieferung von TerraSAR-X-Daten.

Aufgrund des Datenzugangs mittels Science AO war jedoch kein NRT-Betrieb möglich, wie er zu Projektbeginn in Bezug auf Sentinel-1-Daten geplant war. Allerdings wurde in einigen wenigen Tests die Funktionalität der kompletten NRT-Prozesskette getestet.

Neben der Nutzung von TerraSAR-X-Beobachtungen war außerdem geplant, die Möglichkeit eines NRT-Zugangs zu ASAR-Messungen im C-Band des ESA ENVISAT zu recherchieren und zu erschließen. Wegen des Ausfalls von ENVISAT zu Projektbeginn standen dem Projekt keine entsprechenden Daten zur Verfügung. Die Recherchen bezüglich der Erschließung des NRT-Zugangs zu diesen Daten entfielen daher.

### 1.3.3 AP 3.3 – SEEGANG

Gemäß den Planungen wurde die bestehende Seegangsmodellkette des DWD mit dem Küsten-Wellenmodell um ein zusätzliches Glied erweitert. Obgleich der zugrundeliegende Programmcode des WAM zunächst kaum verändert wurde, waren Anpassungen bezüglich der Topographie notwendig. Es musste eine Kopplung bezüglich der Lieferung von Randwerten durch das EWAM an das Küstenwellenmodell eingerichtet werden. Abgesehen von der Namensgebung für das neue Küstenwellenmodell – hier entschied man sich anstelle des ursprünglich vorgesehenen Namens KWAM für CWAM (Coastal Wave Model) – folgten diese Arbeiten der Projektplanung. Entgegen der ursprünglichen Planungen wurde allerdings entschieden, dass der Windantrieb nicht durch das auf einem 2,8 km-Gitter rechnende COSMO-DE erfolgen soll, sondern durch COSMO-EU, welches auf einem 7 km-Gitter rechnet. Der entscheidende Grund hierfür ist, dass der Vorhersagezeitraum des COSMO-DE nicht den angestrebten Vorhersagezeitraum des CWAM von 48 Stunden abdeckt. Es kann allerdings vermutet werden, dass die Verbesserungen der Seegangsvorhersage durch Berücksichtigung von Windvorhersagen mit der höheren Auflösung von COSMO-DE marginal ausfallen, da für die Ausbildung eines relevanten Seegangs großräumigere Windstrukturen entscheidend sind, welche durch COSMO-EU abgebildet werden können. Es wurden diesbezügliche Tests durchgeführt, welche diese Vermutung unterstützen.

In einer ersten Stufe der Kopplung von Seegangs- und Strömungsmodell wurde eine existierende Schnittstelle genutzt, um CWAM mit Strömungs- und Wasserstandsdaten zu versorgen, welche zweimal täglich durch das am BSH betriebene Ozeanzirkulationsmodell HBM geliefert wurden. In dieser Entwicklungsstufe erfolgte der Datenaustausch zwischen DWD (AP 3.3) und BSH (AP 3.4) automatisiert über eine FTP-Schnittstelle. HBM ist eine Weiterentwicklung des Ozeanzirkulationsmodells CMOD, welches die Daten ursprünglich liefern sollte.

Zur Weiterentwicklung der Kopplung von Seegangs- und Strömungsmodell wurde CWAM auf einem BSH-Rechner implementiert. Parallel hierzu wurde CWAM auf dem Hochleistungsrechner NEC des DWD implementiert. Nach einer kurzen Testphase begann (deutlich früher als ursprünglich geplant) bereits im Januar 2013 der prä-operationelle Betrieb von CWAM. Seitdem liefern zwei CWAM-Versionen 12-stündige Seegangsvorhersagen. Eine CWAM-Version ist an HBM gekoppelt (CWAMC = CWAM Coupling) und berücksichtigt somit Strömungs- und Wasserstandsdaten, und die zweite CWAM-Version läuft ungekoppelt (CWAMN = CWAM No coupling). Im August 2014 wurde der Vorhersagezeitraum, wie im Projektplan angestrebt, auf 48 Stunden ausgeweitet. Neben der Weiterentwicklung und Inbetriebnahme des neuen Modells zählte die Überwachung der Modellläufe, der Datenarchivierung und der Auslieferung der Vorhersagedaten an Projektpartner zu den täglich durchgeführten Aufgaben. Überdies musste innerhalb des Projektzeitraumes eine Migration des Modells inklusive aller daran gekoppelten Prozesse auf den neuen DWD-Hochleistungsrechner CRAY erfolgen. Die damit verbundenen aufwendigen Arbeiten wurden so durchgeführt, dass der laufende

Betrieb der prä-operationellen Prozesskette nicht unterbrochen wurde.

Die Vorhersagen beider CWAM-Versionen wurden gesichert und standen für die Validierung zur Verfügung. Darüber hinaus wurden die Vorhersagen der ungekoppelten Version zeitnah an AP 3.4 gesendet. Die Vorhersagen der gekoppelten Modellversion wurden auf einen FTP-Server transferiert, wo sie zur Nutzung durch AP 3.2 und AP 3.5 zur Verfügung standen.

Ogleich bereits die erste Stufe der Kopplung eine merkliche Verbesserung der Vorhersageergebnisse gebracht hatte, wurde in Zusammenarbeit mit AP 3.4 an der Weiterentwicklung der Kopplung gearbeitet. In einem zweiten Schritt wurde HBM auf dem Hochleistungsrechner des DWD implementiert. Parallel zu den prä-operationellen Modellläufen der ersten Kopplungsstufe wurde auch die zweite Kopplungsstufe, bei der nun beide Modelle auf dem DWD-Hochleistungsrechner laufen, in den prä-operationellen Betrieb überführt. Bei der Kopplung handelt es sich weiterhin um eine Einweg-Kopplung, bei der mit HBM berechnete Strömungs- und Wasserstandsdaten an CWAM übergeben werden.

Durch umfangreiche Validierungsarbeiten in AP 3.5 konnten Schwachstellen von CWAM detektiert und behoben werden. So wurde der Algorithmus für das Wellenbrechen im Flachwasser verbessert. Es wurde eine Tiefenlevel-Interpolation im Modell eingebaut, welche die Diskontinuitäten des Radiation-Stress minimieren soll. Die entsprechenden Modifikationen im Modellcode wurden intensiv mit den Kollegen von HZG/IfK (Institut für Küstenforschung) diskutiert und teilweise schon in den Routine-WAM-Code aufgenommen.

---

#### 1.3.4 AP 3.4 – KOPPLUNG

Einige Aspekte der Kopplung wurden bereits in den Ausführungen zu AP 3.3 betrachtet. Der wesentliche Teil der Entwicklungsarbeiten der Modellkopplung wurde durch das BSH geleistet und ist im Abschlussbericht des BSH detailliert beschrieben. Allerdings wurden auch umfangreiche unterstützende Arbeiten durch den DWD geleistet. Diese konzentrierten sich besonders auf die Implementierung des Ozeanzirkulationsmodells HBM auf dem DWD-Hochleistungsrechner und die Einrichtung eines prä-operationellen Betriebs des gekoppelten Systems.

Im Gegensatz zur Projektplanung, welche eine Kopplung des Wellenmodells an das Ozeanzirkulationsmodell CMOD vorsah, wurde nun eine Kopplung mit HBM, welches eine Weiterentwicklung von CMOD darstellt, umgesetzt. Die Kopplungsansätze der ersten und zweiten Stufe, welche bereits prä-operationell auf dem Hochleistungsrechner des DWD laufen, wurden im vorangegangenen Abschnitt zu den Arbeiten im AP 3.3 beschrieben. Eine dritte Stufe der Kopplung sah einen parallelen Betrieb von HBM und CWAM mit interaktivem Datenaustausch vor. Die Umsetzung dieser interaktiven Kopplung erwies sich als sehr aufwendig, da neben der Einrichtung von Schnittstellen zum Datenaustausch auch eine spezielle Kopplungssoftware eingeführt wurde, die einer intensiven Einarbeitung bedurfte. Da hierfür auch fundierte Kenntnisse in Parallelprogrammierung benötigt wurden, nahmen die Projektangestellten an einer mehrtägigen DWD-Fortbildungsveranstaltung „Paralleles Programmieren mit MPI und OpenMP“ teil. Die interaktive Kopplung wurde auf einem BSH-Rechner für einige Fälle getestet. Es stellte sich heraus, dass die interaktive Kopplung in ihrer derzeitigen Form wegen ihres hohen Wartungs- und Betreuungsbedarfs nicht für den prä-operationellen Einsatz geeignet ist. Allerdings sollen die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse in mögliche Folgeprojekte einfließen. Kopplungen von Ozeanzirkulations- und Seegangsmoellen an Atmosphärenmodelle werden in absehbarer Zeit zu einer weiteren Verbesserung der Vorhersage der Zustände von Ozean und Atmosphäre führen.

Es wurde entschieden, die zweite Stufe der Kopplung, bei der sowohl HBM als auch CWAM auf dem DWD-Hochleistungsrechner laufen, in den operationellen Dienst zu stellen. Diese Art der Kopplung

erfüllt die gesteckten Projektziele. Wie umfangreiche Validierungsarbeiten zeigten, führt sie zu einer wesentlichen Verbesserung der Vorhersage in küstennahen und Flachwassergebieten.

### 1.3.5 AP 3.5 – VALIDIERUNG

Aufgabe dieses Arbeitspaketes sollte es sein, neben der Modellvalidierung unter Nutzung von In-situ-Messungen, geeignete Verfahren zur Validierung mittels Satellitendaten zu finden bzw. zu entwickeln. Dabei sollten weniger zeitlich bezogene Statistiken eine Rolle spielen, als räumliche Validierungsmaße wie z.B. Musterkorrelationen. Mit diesen Arbeiten sollte erst im 2. Jahr begonnen werden, da erst dann erste Modelloutputs zu erwarten waren.

Im Gegensatz zu den Planungen standen regelmäßige Modellergebnisse bereits im ersten Projektjahr zur Validierung bereit. Durch den Ausfall von ENVISAT und die geringe Verfügbarkeit von TerraSAR-X-Messungen fehlte jedoch zunächst die Grundlage zur Validierung der Vorhersagen durch Radar-Satellitendaten. Im Juli 2013 wurde durch AP 3.2 ein erster Datensatz mit aus TerraSAR-X-Messungen abgeleiteten Wind- und Seegangsdaten geliefert. Basierend auf diesen Daten wurden Verfahren zur Validierung der Vorhersagen entwickelt. Ein Beispiel zeigt *Abbildung 11*. Hier wurden den CWAM-Vorhersagen der signifikanten Wellenhöhe TerraSAR-X-Messungen gegenübergestellt und verschiedene statistische Validierungsmaße berechnet.

Bevor jedoch belastbare Validierungsergebnisse gewonnen werden konnten, mussten zunächst die Algorithmen zur Ableitung von Seegangparametern aus TerraSAR-X-Messungen an In-situ-Messungen und Modellergebnissen validiert werden. Nach einer Verfeinerung der Algorithmen (siehe AP 3.2 Fernerkundung) standen im Juli 2014 erste belastbare TerraSAR-X-Daten aus wenigen StripMap-Szenen bereit.

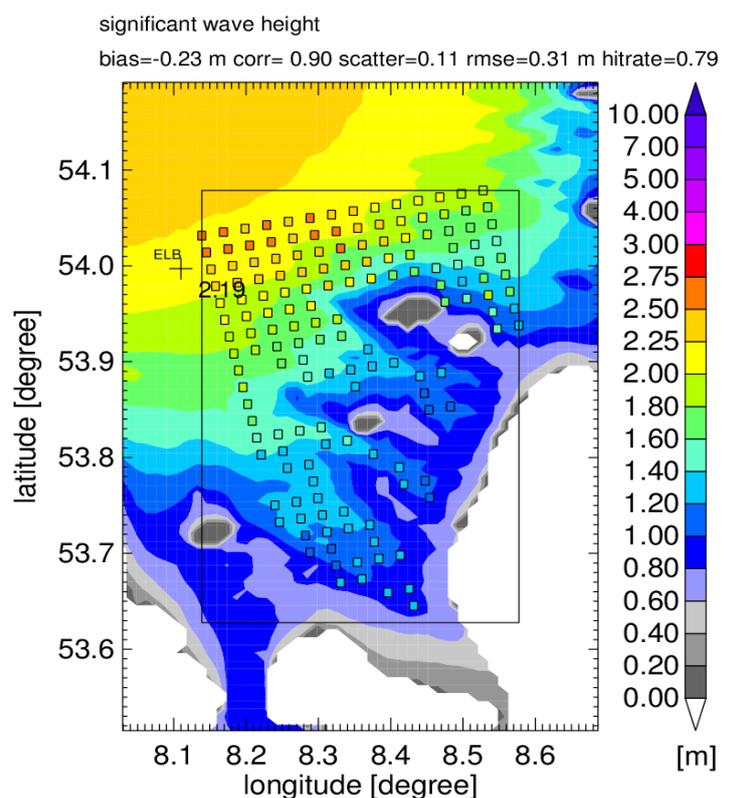


Abbildung 11: Grafisch aufbereitetes Ergebnis des entwickelten Validierungsverfahrens. Den Vorhersagen durch CWAM (farbige Konturflächen) sind TerraSAR-X-Messungen (farbige Quadrate) gegen-

übergestellt. Außerdem werden verschiedene statistische Validierungsmaße und eine Bojenmessung gezeigt.

Parallel zu den Entwicklungen von Validierungsverfahren für die Validierung mittels TerraSAR-X-Daten wurden umfangreiche Vergleichsstudien von Modellvorhersagen und In-situ-Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Validierungsbericht ausführlich dargelegt.

#### 1.3.6 AP 3.6 - PRODUKTE

Als Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes wurde die Einbindung der möglichen Nutzer in die Produktentwicklung formuliert. Mit Hilfe von Befragungen und Workshops sollte die Kundenzufriedenheit erforscht und eine Bedarfsermittlung durchgeführt werden. Ansprechpartner sollten in erster Linie die bisherigen Kunden von DWD und BSH sein, die regelmäßig mit numerischen Vorhersageprodukten versorgt werden. Genannt wurden Vertreter des Küstenschutzes, der Offshore-Industrie, der Schifffahrt und der Landes- und Bundesbehörden. Die Kundenbefragungen sollten im Rahmen von Nutzer-Workshops stattfinden. Während des Projektzeitraums fanden drei Nutzer-Workshops statt. Diese wurden durch das DeMarine-Nutzerbüro organisiert. Während der erste Nutzerworkshop potenziellen Nutzern zunächst die Möglichkeiten des Verbundprojektes näherbringen sollte, konnten bei den folgenden Workshops bereits Produktvorschläge demonstriert und diskutiert werden.

Unabhängig von den nutzerspezifischen Anforderungen war die grobe Richtung der Produktentwicklung aber vor Projektstart bereits absehbar. Vorhersagen von Wind, Seegang und Strömung sollten in Form von Karten und Zeitreihen (Tabellen, Diagramme) an ausgewählten Positionen oder entlang von Offshore-Versorgungsrouten dargestellt werden. Daneben sollte es Darstellungen der aktuellen und vergangenen Situationen in Verbindung mit Vorhersagen der vorangegangenen Prognosen geben. Dem Nutzer sollte damit die Möglichkeit gegeben werden, die Verlässlichkeit der aktuellen Prognose einzuschätzen.

Es war geplant, Informationen dieser Art in der prä-operationellen Phase auf einem Web-Portal für registrierte Nutzer bereitzustellen oder die Daten direkt an den Kunden per ftp auszuliefern. Ein entsprechendes Konzept für die künftige Vertriebsstruktur sollte entwickelt werden.

Nach dem Start der prä-operationellen Phase von CWAM im Januar 2013 wurde mit der Produktentwicklung begonnen. Es wurde eine automatisierte Prozesskette entwickelt, welche die CWAM-Vorhersagen visualisiert und die resultierenden Produkte zeitnah veröffentlicht. Seit Mai 2013 werden zu Demonstrationszwecken zweimal täglich Vorhersagen in Form von Karten für das CWAM-Gebiet und Zeitreihen auf der Internetseite des DWD ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)) veröffentlicht. Diese Grafiken sind auch über die DeMarine-Homepage ([www.demarine.de](http://www.demarine.de)) abrufbar. Zusätzlich werden seit Juni 2014 hochwertige Tabellen und Marinogramme veröffentlicht. Darüber hinaus gibt es ein Produkt, welches der Seegangsvorhersage aktuelle Bojen-Messungen gegenüberstellt.

Neben den zu Demonstrationszwecken im Internet veröffentlichten Produkten werden weitere Produkte erzeugt und auf einen FTP-Server gelegt, wo sie von potenziellen Nutzern bezogen werden können. Beispiele aller Produkte sind in Abschnitt 2.1 gezeigt. Dazu zählt auch ein Produkt, welches in nutzergerechter Weise die CWAM-Vorhersagen den TerraSAR-X-Messungen gegenüberstellt. Während alle anderen Produkte in prä-operationeller Weise erzeugt und ständig mit den neuesten CWAM-Vorhersagen aktualisiert werden, steht das Produkt, welches TerraSAR-X-Messungen einbezieht, nur sehr sporadisch zur Verfügung. Grund ist die bereits mehrfach diskutierte, eingeschränkte Verfügbarkeit der entsprechenden Fernerkundungsdaten sowie die Art des Datenzugangs, die innerhalb des Projektes keinen regelmäßigen NRT-Betrieb zulässt.

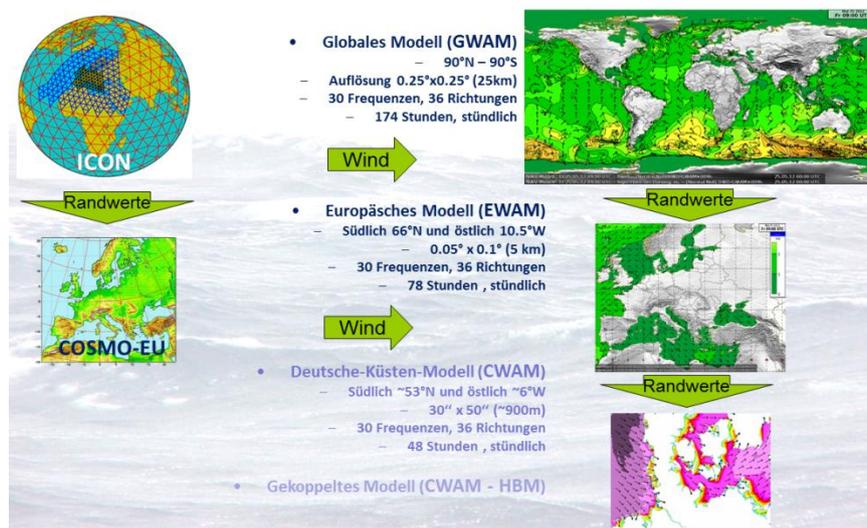
## 1.4 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK BEI BEGINN DES PROJEKTES

### 1.4.1 SEEGANG

Die heutzutage weltweit im operationellen Einsatz befindlichen Seegangmodelle gehen zurück auf die Arbeiten der sogenannten WAMDI-Group (WAMDI 1988, Komen et al. 1994). Das WAM ist ein spektrales Modell der 3. Generation, das anders als seine Vorgänger eine Parametrisierung der nicht-linearen Wellen-Wellen-Wechselwirkungen (Direct Interaction Approximation, DIA) enthält und damit den Energieübergang von der winderzeugten See in die Dünung explizit beschreibt.

Das operationelle Seegangsvorhersagesystem (SVS) des DWD basiert heute, wie auch zu Projektbeginn, auf WAM. Dabei besteht das SVS aus dem globalen Modell GWAM, welches eine Auflösung von  $0.25^\circ$  besitzt und die Randwerte für das höher auflösende ( $0.05^\circ \times 0.1^\circ$ ) europäische Regionalmodell EWAM liefert. Beiden Modellen gemein ist die spektrale Auflösung von 36 Richtungen und 30 Frequenzen. Den Windantrieb für den Seegang liefert die atmosphärische Modellkette des DWD, welche aus dem globalen GME bzw. ICON und dem europäischen Regionalmodell COSMO-EU mit einem horizontalen Gitterpunktsabstand von 7 km besteht. *Abbildung 12* zeigt das SVS in schematischer Form.

### DWD SeegangsvorhersageSystem



**Abbildung 12:** Schematische Darstellung des Seegangsvorhersagesystems des DWD, bestehend aus globalem Wellenmodell (GWAM) und europäischem Wellenmodell (EWAM), mit den zugehörigen Windantrieben. Ebenfalls gezeigt ist die Einbindung des Küstenwellenmodells (CWAM) ins SVS.

Der Programmcode der Seegangmodelle wurde im Verlauf einer vieljährigen Zusammenarbeit zwischen DWD und dem IfK am HZG (ehemals GKSS) an die Erfordernisse der operationellen Vorhersage angepasst (Behrens & Günther, 2008). Zu Projektbeginn wurde an einer weiteren Verfeinerung des globalen Gitters und dessen Ausweitung bis zum Nordpol gearbeitet.

Als Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren untersuchte das Helmholtz-Zentrum Geesthacht mit seinem Institut für Küstenforschung die Problematik des weltweit wachsenden Siedlungs- und Industrialisierungsdrucks in den Küstenregionen und deren Verstärkung durch natürliche Gefahren wie Tsunamis und Sturmfluten. Die Forschungsaktivitäten erstreckten sich sowohl auf naturwissenschaftliche als auch auf gesellschaftliche Aspekte im regionalen und globalen

Kontext. Aus Untersuchungen des aktuellen Zustands des Lebensraums Küste sowie seiner Empfindlichkeit gegenüber natürlichen und menschlichen Einflüssen wurden Szenarien künftiger Optionen abgeleitet.

Die zu Projektstart aktuelle WAM-Version des DWD enthielt bereits wichtige Voraussetzungen für die spätere Kopplung an ein Strömungsmodell.

- Wellenbrechen im Flachwasser
- Radiation Stress (Resultierende Strömung infolge von Gradienten der Wellenenergie)
- Stokes-Drift (Massentransport aufgrund der Orbitalbewegung in den Wellen)
- Zeitlich veränderliche Wasserstände und Strömungen

Bereits in einem langjährigen Zeitraum vor Projektbeginn haben sich nicht nur verschiedene Varianten des WAM entwickelt, sondern es wurden zunehmend Anstrengungen unternommen, den Seegang in flachen Gewässern adäquat zu modellieren. Die differenzierte Topographie der Flachwassergebiete stellt unter dem Einfluss der Gezeiten und den damit verbundenen örtlich starken Strömungen, wechselnden Wassertiefen und dem Trockenfallen von Wattflächen besondere Anforderungen an die Seegangsvorhersage. Die gegenseitige Beeinflussung von Seegang und Strömung findet aber nicht nur in der Brandungszone, wo die Wellen brechen, sondern auch im gesamten Off-Shore-Bereich vor der Küste statt. Einerseits hängen Propagation und Refraktion der Wellen nichtlinear von der Wassertiefe und der Strömungsgeschwindigkeit ab. Andererseits liefern die Wellen einen nicht unerheblichen Impulsbeitrag zur mittleren Strömung.

Seegangsmodele wurden und werden überwiegend mit Bojenmessungen validiert. In einem von der Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM) durchgeführten internationalen Vergleich globaler Seegangsvorhersagemodele gehen die Messungen von über 300 Bojen ein. Zwar befinden sich die meisten Bojen in Küstennähe, jedoch sind sie für die Validierung hochauflösender Küstenmodelle nur eingeschränkt geeignet. Im Bereich der Deutschen Bucht gibt es gerade einmal 5 (Elbe, FINO, Helgoland, Nordseeboje 2, Westerland) und in der Ostsee 3 Bojen (Arkona Becken, Darsser Schwelle und Oder Bank), die zudem sehr störanfällig sind und entsprechend große Beobachtungslücken aufweisen.

Eine Alternative zu In-situ-Messungen besteht in der Verwendung von Fernerkundungsdaten für die Validierung. Im operationellen Betrieb nutzen die meisten Wetterzentren bei der Datenassimilation für die globalen Modelle satellitengestützte Altimetermessungen (z.B. ERS-2, ENVISAT, JASON1+2). Diese liefern signifikante Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten entlang der Satellitenflugbahnen. Mittels optimaler Interpolation werden daraus mehr oder weniger flächendeckende, spektrale Korrekturen für das First-guess-Anfangsfeld des Seegangs gewonnen. Daher stellen diese Daten keine unabhängige Information mehr dar und eignen sich nur für Validierungszwecke der Vorhersagen auf der globalen Skala. Wegen ihrer geringen Auflösung und einem hohen Rauschanteil eignen sie sich nur eingeschränkt für die Validierung der Vorhersagen im Küstenbereich.

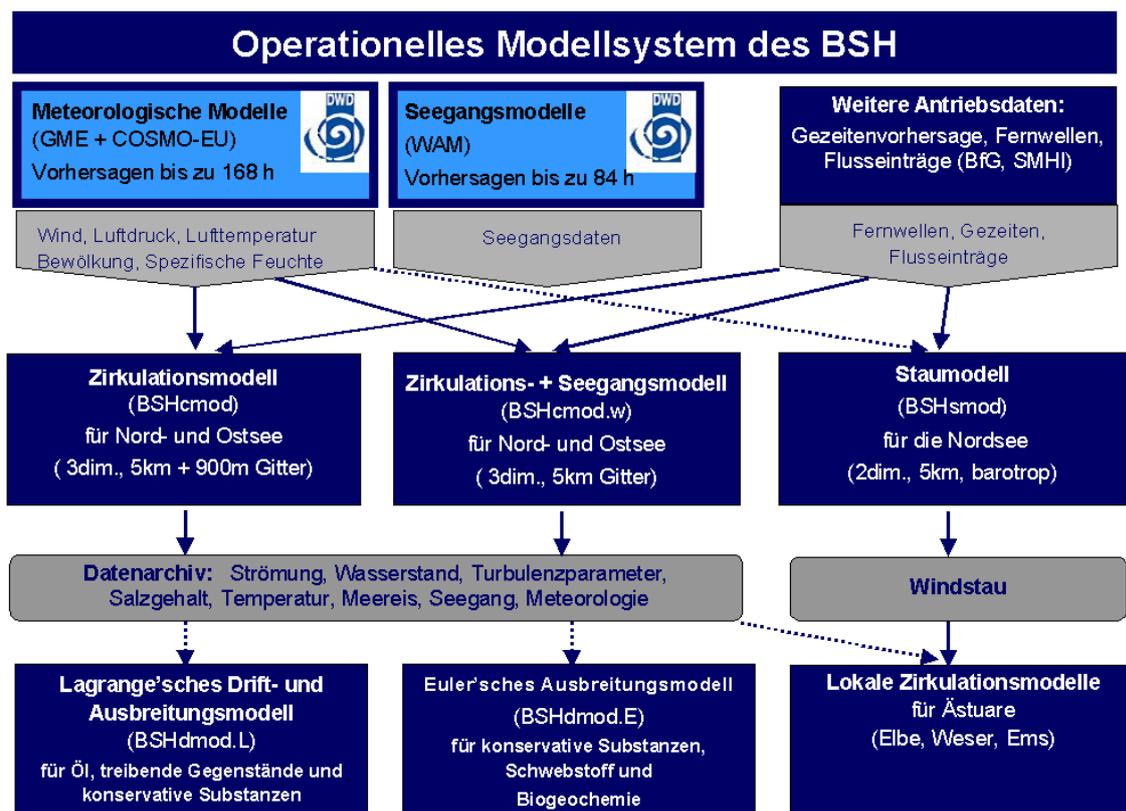
---

#### 1.4.2 OZEANZIRKULATION

Im BSH werden seit vielen Jahren numerische Ozeanmodelle im täglichen Vorhersagebetrieb eingesetzt und (weiter-)entwickelt. Einen Überblick über den Entwicklungsstand des operationellen Vorhersagesystems des BSH zu Projektbeginn gibt [Abbildung 13](#). Im Vorhaben Seegangsmonitor sollte dabei das dreidimensionale Zirkulationsmodell BSHcmod in seiner neuesten Version V4 zum Einsatz kommen. Basierend auf den numerischen Wettervorhersagen des DWD sollte mit dem Modell einmal täglich eine Vorhersage von Wasserstand, Strömung, Temperatur, Salzgehalt und Eisbedeckung für die nächsten 72 Stunden berechnet werden. Dabei wurden zwei Rechengitter unterschiedlicher Auflösung benutzt. Nord- und Ostsee sind dabei komplett mit einem Gitter mit horizontalen Gitter-

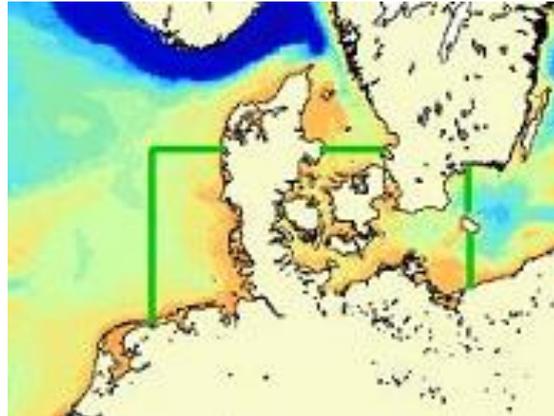
abständen von etwa 5 km überdeckt, während in den den deutschen Küsten vorgelagerten Gewässern mit einer Auflösung von 900 m gerechnet wurde. Eine Dokumentation des Modellsystems findet sich in Kleine, 1994; Dick et al., 2001.

Die Wechselwirkung zwischen Seegang und Strömung wurde detailliert in einer beim BSH durchgeführten Dissertation (Murawski, 2007) theoretisch und numerisch untersucht. Mittels interaktiver Kopplung des BSH-Zirkulationsmodells CMOD (Dick et al., 2001) und des GKSS-Flachwasserseegangmodells "k-Modell" (Schneggenburger et al., 1997) konnte gezeigt werden, dass sich die mittlere Strömung den Veränderungen im Wellenfeld anpasst. Das Modell ist in der Lage, die beobachtete seegangsbedingte Wasserstandserhöhung in der Brandungszone und balancierende küstenparallele Strömungen zu simulieren. Die durch Seegangs-Strömungs-Wechselwirkung hervorgerufenen Effekte können von Bedeutung für den Küstenschutz und für küstennahe Applikationen sein.



**Abbildung 13:** Das Modellsystem des BSH im Überblick. In zentraler Position das bisherige gekoppelte Modellsystem BSHcmod.w

Im k-Modell wird auf die Parametrisierung der nichtlinearen Wellen-Wellen-Wechselwirkungen (Direct Interaction Approximation, DIA) verzichtet, da diese im Flachwasser nur eine untergeordnete Rolle in der Energiebilanz des Seegangsspektrums spielen. Der operationelle Einsatz des bisherigen gekoppelten Modells BSHcmod.w (siehe *Abbildung 14*) wurde bereits vor Projektbeginn eingestellt, da der Rechenaufwand für einen täglichen Routineinsatz zu rechenaufwändig war. Auch war die Qualität der Ergebnisse mit ihrer geringen räumlichen Auflösung wenig zufriedenstellend. Das im Projekt Seegansmonitor zu entwickelnde gekoppelte Modellsystem sollte zwar auf der BSHcmod.w-Entwicklung aufbauen, diese aber vollständig ersetzen.



**Abbildung 14:** Modellgebiet (grün) des hochauflösenden Küsten-Zirkulationsmodells CMOD des BSH

### 1.4.3 FERNERKUNDUNG

Das DLR ist seit mehr als 20 Jahren im Bereich der SAR-Ozeanographie erfolgreich tätig und nimmt im weltweiten Vergleich einen Spitzenplatz ein. Das DLR hat zahlreiche Projekte durchgeführt und war vielfach an nationalen und internationalen Verbundprojekten mit substantiellen Arbeitspaketen beteiligt. Mit seiner Empfangsstation in Neustrelitz gewährleistet das DLR einen lückenlosen End-to-end-Service inklusive Empfang von Fernerkundungssatelliten-Daten, deren Verarbeitung und die Auslieferung der relevanten Produkte in Nahe-Echtzeit.

In einer Reihe von bahnbrechenden Untersuchungen und Pilotprojekten wurden Algorithmen entwickelt, um aus Radar-Satellitendaten meteo-marine Parameter wie das Oberflächenwindfeld, Seegangparameter und Unterwassertopographie unter Verwendung verschiedener Auflösungs- und Überdeckungsstufen abzuleiten. Auf der Skala globaler Modelle sind ASAR-, ASCAT- und Altimeterdaten von ESA und EUMETSAT bereits in NRT verfügbar. Die Methoden werden in zahlreichen, z.T. internationalen Fallstudien mit Modellen, In-situ-Messungen und Ergebnissen anderer Forschergruppen verglichen und validiert.

Aus den C-Band-Satellitendaten der ESA-ENVISAT-ASAR-Daten konnten Wind- und Seegangsfelder mit einer Überdeckung von 400 x 400 km und einer Auflösung von 1 km abgeleitet werden, z.B. mit Hilfe des CWAVE-Algorithmus (Li et al. 2011, Li et al., 2010, Schulz-Stellenfleth et al., 2004, Schulz-Stellenfleth et al., 2007).

Mit dem sich seit 2008 im Umlauf befindenden DLR-Satelliten TerraSAR-X besteht die Möglichkeit, beim Überflug über deutsche Küsten sehr hochaufgelöste SAR-Szenen zu gewinnen, aus denen sich Felder von Seegangparametern für den direkten Vergleich mit der Simulation ableiten ließen.

Für die TerraSAR-X und Tandem-X-Mission wurden X-Band-Algorithmen zur Wind- und Seegangsbestimmung in den Projekten TerraWAM, Deepview und DeMarine-Security entwickelt, die sich zur Implementierung an einer Antennenstation für NRT-Anwendungen eignen. Die abgeleiteten Wind- und Seegangsfelder wurden in ersten Tests genutzt, um hochauflösende Seegangsmodelle der Deutschen Bucht mit Randwerten und Wind-Input zu versorgen und die Modellergebnisse bei einer Auflösung von 500 m zu validieren.

Für den NRT-Betrieb bewährt haben sich TerraSAR-X-Daten im 30 x 100 km überdeckenden Stripmap-Modus oder im 100 x 100 km ScanSAR-Modus. Mit diesen Daten können Wind-, Seegangs-, und Topographiefelder in der erforderlichen Auflösung von wenigen 100 Metern erzeugt werden. Ebenso eignen sich die Daten zur Erstellung von Wasserstandslinien zur Modellvalidierung. Die Fähigkeit zur

NRT-Lieferung der Daten wurde bereits im Rahmen von DeMarine-Security/ShipDetect getestet.

## 1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Wie bereits oben beschrieben wurde, ist neben dem DWD das BSH unmittelbar an TP3 beteiligt, sowie als assoziierte Partner das Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR und das Institut für Küstenforschung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Dabei bestanden die wesentlichen Aufgaben des BSH in der Lieferung von Wasserstands- und Strömungsdaten, der Bereitstellung und Betreuung des Ozean-Zirkulationsmodells HBM sowie dessen Kopplung an das Seegangmodell CWAM. Darüber hinaus wurden durch das BSH Bojendaten zur Verfügung gestellt, welche als wichtige Grundlage für die Validierung des Seegangmodells, als auch für die Validierung der Algorithmen zur Ableitung von Seegangparametern aus TerraSAR-X-Beobachtungen dienten.

Als assoziierter Partner ist das Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) am DLR für die Beschaffung, Aufbereitung und Lieferung von Satelliten-Produkten an den Seegangsmonitor zuständig. Überdies wurden Validierungsarbeiten durch das DLR durchgeführt. Neben dem DLR/IMF ist das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum des DLR in Neustrelitz maßgeblich in die Prozesskette der Datenbeschaffung, -prozessierung und -auslieferung eingebunden.

Die Aufgaben des HZG/IfK liegen hauptsächlich bei der Lieferung, Betreuung und Weiterentwicklung des Seegangmodells, welches die Basis der Seegangsvorhersage bildet.

## 2 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

### 2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES

Die Arbeiten der am TP3 beteiligten Partner verteilten sich auf verschiedene Arbeitspakete (siehe Abschnitt 1.5). Durch regen Austausch zwischen den Arbeitspaketen entwickelte sich eine enge Vernetzung der beteiligten Institutionen, die zukünftigen Kooperationen zu Gute kommen kann.

Einen Schwerpunkt der Arbeiten im TP3 stellte die (Weiter-)Entwicklung des Seegangmodells dar. Diese Aufgabe wurde im Wesentlichen durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter bearbeitet, der beim DWD eingestellt und durch die Zuwendungen des Projektträgers finanziert wurde. Bei den Arbeiten zur Modellkopplung gab es eine enge Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BSH (siehe hierzu Abschlussbericht des BSH). Des Weiteren leistete der assoziierte Partner HZG/IfK wichtige unterstützende Arbeiten bei der Wartung und Weiterentwicklung des Seegangmodells.

Einen weiteren essenziellen Bestandteil des TP3 stellte die Beschaffung, Aufbereitung und Bereitstellung von Satellitendaten durch den assoziierten Partner DLR dar. Durch das DLR/IMF wurden Algorithmen weiterentwickelt, mit denen sich meteo-marine Parameter wie Wind und charakteristische Seegangsrößen aus TerraSAR-X-Beobachtungen ableiten lassen. Dies ist als außerordentlicher wissenschaftlicher Erfolg zu werten und bildet zudem die Grundlage für innovative Produkte, die auch innerhalb des Projektes entwickelt wurden.

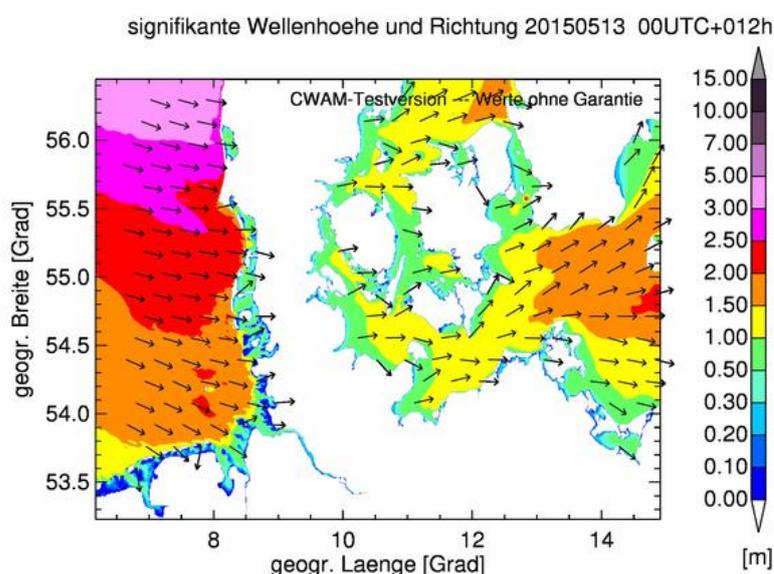
Mit Unterstützung des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR in Neustrelitz wurde eine Prozesskette implementiert, welche vom Empfang der Satellitenbeobachtung, über die Prozessierung und Bestimmung von meteo-marinen Parametern, bis zur Auslieferung an den DWD reicht. Diese ist in Abschnitt 1.3 in *Abbildung 4* schematisch dargestellt.

Mit der Nutzung von TerraSAR-X-Daten und der Implementierung der operationellen Prozesskette wird dem zentralen Anliegen von DeMarine-2, der „Entwicklung neuer operationeller Anwendungen

der Erdbeobachtung ... für die Umweltforschung und –überwachung“, Rechnung getragen. Es muss jedoch noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die operationelle Prozesskette für die Arbeiten im TP3 nur zu einzelnen Tests genutzt und somit immerhin deren Funktionalität gezeigt werden konnte. Aufgrund der niedrigen Einstufung der Priorität bei der Datenbeschaffung (Science AO) war eine regelmäßige prä-operationelle/operationelle Versorgung mit TerraSAR-X-Daten innerhalb des Projektes nicht möglich.

Umfangreiche Arbeiten zur Validierung des Algorithmus zur Bestimmung meteo-mariner Parameter aus TerraSAR-X-Messungen sowie zur Validierung des Seegangmodells wurde in Zusammenarbeit von DLR/IMF und DWD durchgeführt (siehe hierzu Validierungsbericht des TP3). Hierzu wurden auch In-situ-Messungen herangezogen. Diese Validierungsarbeiten trugen maßgeblich zur Verbesserung des oben beschriebenen Algorithmus bei. Aber auch das Seegangmodell konnte auf Grundlage der Validierungsergebnisse verbessert werden.

Des Weiteren wurde eine Prozesskette entwickelt, welche Modellvorhersagen, TerraSAR-X- und In-situ-Messungen zusammenführt und daraus eine Reihe von Produkten erzeugt, die schließlich über unterschiedliche Wege an potenzielle Nutzer ausgeliefert werden. Diese Prozesskette ist schematisch in [Abbildung 20](#) gezeigt. Die Produkte am Ende der Prozesskette stellen das „sichtbare“ Ergebnis des TP3 dar. Die Arbeiten an der Entwicklung der Prozesskette, welche Datenmanagement und grafische Produkterzeugung umfassen, wurden hauptsächlich beim DWD durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter durchgeführt, der durch die Zuwendungen des Projektes finanziert wurde, aber auch durch DWD-Stamppersonal. Im Folgenden werden Produktbeispiele gezeigt (siehe [Abbildungen 15 bis 19](#)). Alle Produkte und Angaben zur Verfügbarkeit sind in [Tabelle 1](#) aufgelistet. Neben Vorhersagen in grafischer bzw. tabellarischer Form für eine Vielzahl von Parametern, welche für einen 48-stündigen Vorhersagezeitraum zweimal täglich aktualisiert werden, wird die Produktpalette erweitert durch NRT-Vergleiche der Vorhersagen mit TerraSAR-X-Beobachtungen und In-situ-Messungen. Dabei stellt der Vergleich von Seegangsvorhersage und TerraSAR-X-Beobachtung ein besonders innovatives Produkt dar. Bietet es doch dem Nutzer die Gelegenheit, sich sehr zeitnah ein Bild der aktuellen Vorhersagegüte zu machen und dabei Gebiete zu betrachten, für die keine In-situ-Messungen zur Verfügung stehen.



**Abbildung 15:** Vorhersagekarte der signifikanten Wellenhöhe und Wellenaufrichtung für das Vorhersagegebiet des CWAM für einen Vorhersagezeitschritt. Weitere Informationen zu diesem Produkt sind [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

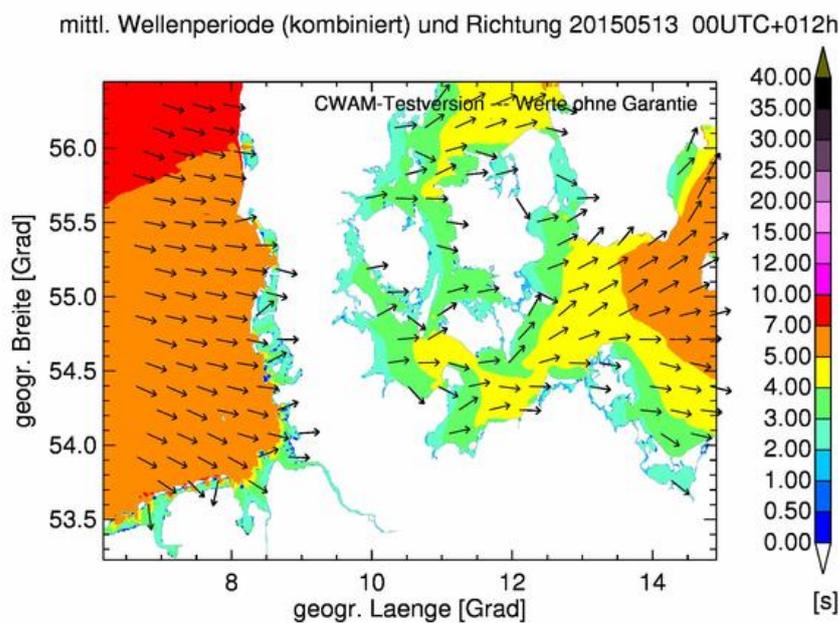


Abbildung 16: Wie Abbildung 15, jedoch für die Vorhersage der mittleren Wellenperiode.

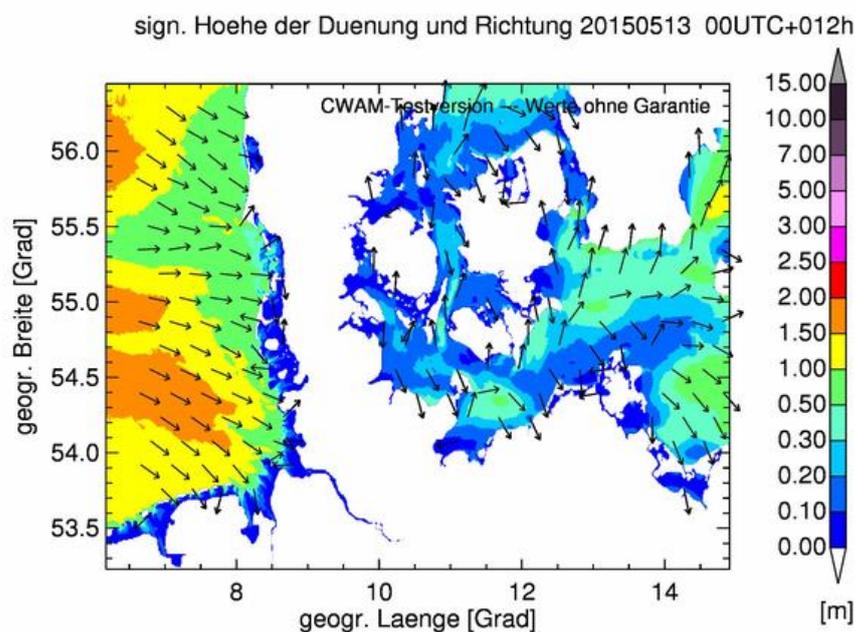


Abbildung 17: Wie Abbildung 15, jedoch für die Vorhersage der signifikanten Höhe der Dünung und die Laufrichtung der Dünungswellen.

10 m Windgeschwindigkeit und Richtung (COSMO EU) 20150513 00UTC+012h

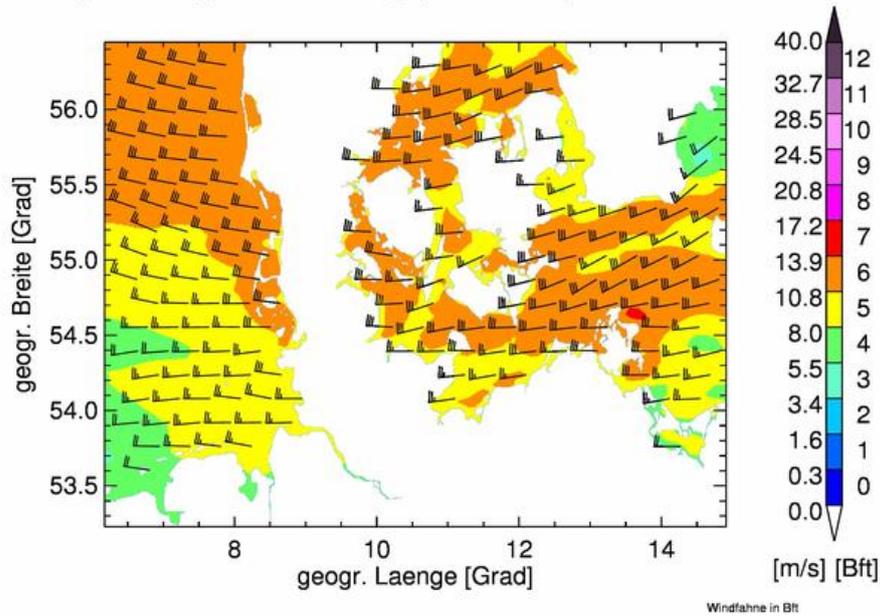


Abbildung 18: Wie Abbildung 15, jedoch für den vorhergesagten Wind in 10 m Höhe.

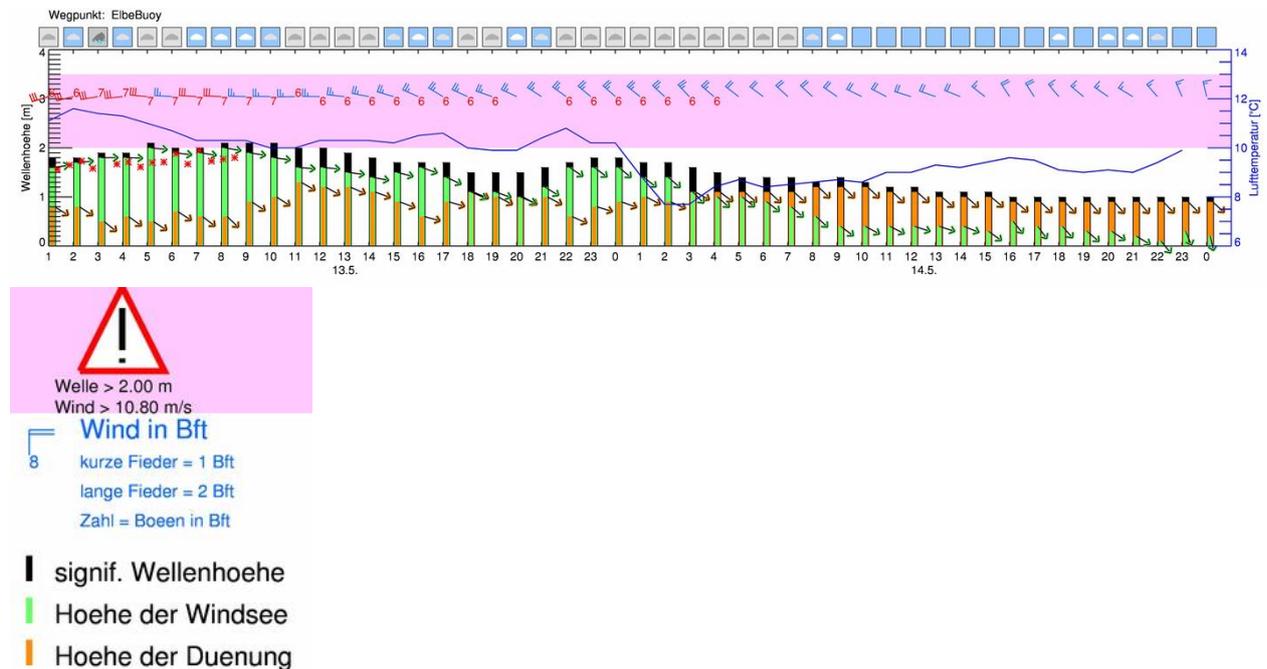


Abbildung 19: Das Meteogramm zeigt die Vorhersage verschiedener Seegangparameter, Wind, Temperatur und Wetter als Zeitreihe für einen Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Außerdem wird bei Überschreitung einer festgelegten Wellenhöhe eine Warnung angezeigt (rosa Fläche). Darüber hinaus enthält das Produkt einen NRT-Vergleich mit der gemessenen signifikanten Wellenhöhe (rote Sternchen). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen.



Wetter- und Seegang am Punkt ElbeBuoy

kritischer Wind = 10.80 m/s, kritische Wellenhoehoe = 2.00 m

ZEIT [UTC]	WIND aus [Bft]	BÖEN [Bft]	HS [m]	DÜN. aus [m]	STROM nach [m/s]	T.LUFT [°C]	T.WASS. [°C]	WETTER
2015 - 5 - 13								
01:00	WSW 6	6	1,8	NW 0,8	WNW 0,1	11	11	
02:00	WSW 6	6	1,8	NW 0,8	ESE 0,3	12	11	
03:00	WSW 6	7	1,9	NW 0,5	ESE 0,6	11	11	
04:00	W 6	7	1,9	NW 0,6	ESE 0,6	11	11	
05:00	W 6	7	2,1	NW 0,5	ESE 0,5	11	11	
06:00	W 5	7	2,0	NW 0,7	E 0,2	11	11	
07:00	W 6	7	2,0	NW 0,6	WNW 0,1	10	11	
08:00	W 6	7	2,1	NW 0,6	WNW 0,4	10	11	
09:00	W 5	7	2,1	NW 0,9	WNW 0,6	10	11	
10:00	W 5	7	2,1	NW 1,0	W 0,6	10	11	
11:00	W 5	6	2,0	WNW 1,3	W 0,5	10	11	
12:00	W 5	6	2,0	WNW 1,2	W 0,4	10	11	
13:00	W 5	6	1,9	WNW 1,2	WNW 0,2	10	11	
14:00	WNW 5	6	1,8	WNW 1,1	ESE 0,1	10	11	
15:00	WNW 5	6	1,7	WNW 0,9	ESE 0,4	10	11	
16:00	WNW 5	6	1,7	WNW 0,6	ESE 0,6	11	11	

Abbildung 20: Vorhersagetabelle für einen Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen.

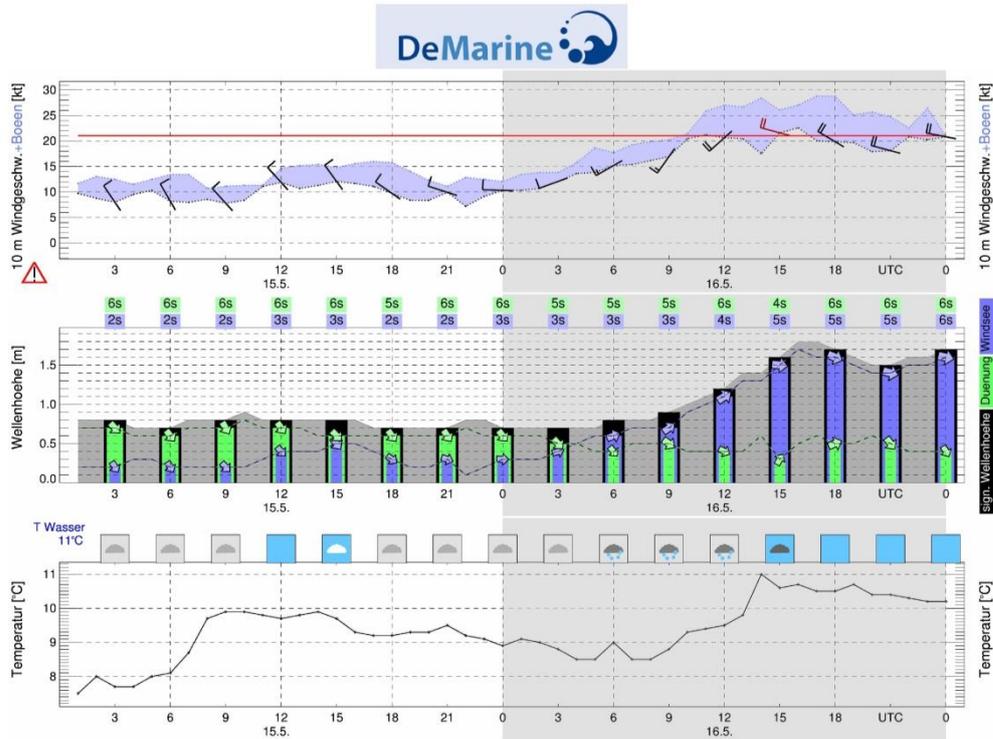
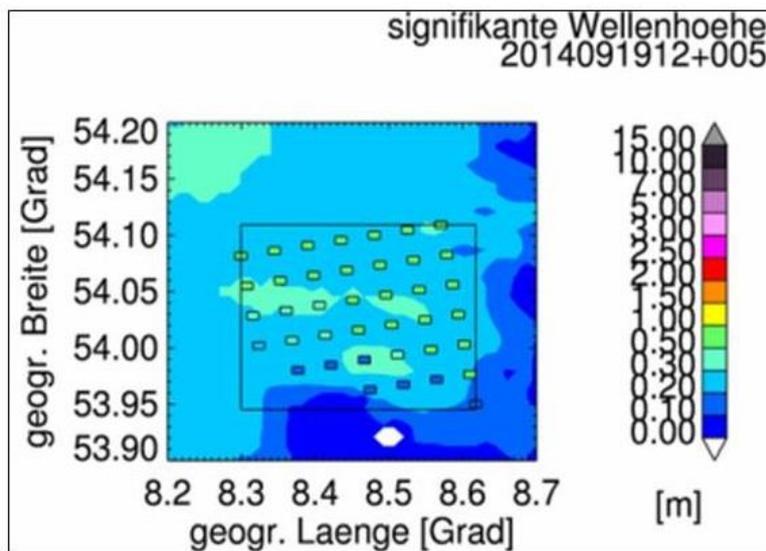


Abbildung 1: Position: ElbeBuoy 54.00°N 8.10°E — 15.5.2015 —

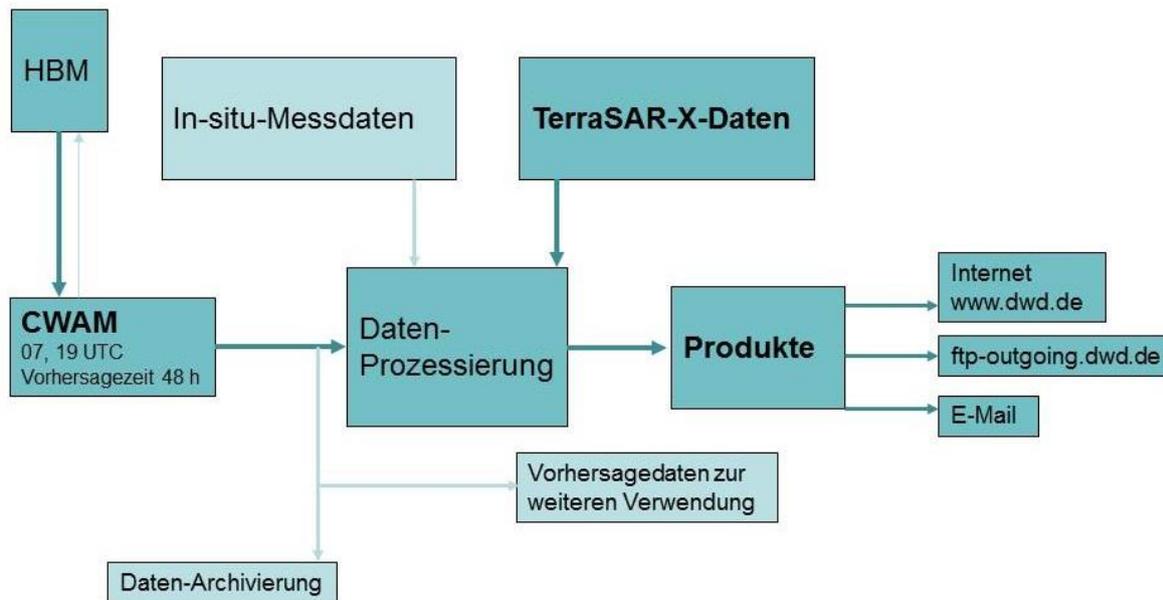
**Abbildung 21:** Meteogramm-Komposition für verschiedene marine und meteorologische Vorhersageparameter an einem Punkt (hier die Position der „Elbe-Boje“). Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen.



**Abbildung 22:** NRT-Validierungsprodukt zeigt die CWAM-vorhergesagte signifikante Wellenhöhe (farbige Kontur-Flächen) für den Zeitpunkt eines TerraSAR-X-Überfluges über die Deutschen Bucht. Die farbigen Rechtecke zeigen die zugehörigen TerraSAR-X-Messungen. Weitere Informationen zu diesem Produkt sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Produkt	Abbildung	Veröffentlichung/Aktualisierung
Vorhersagekarten für folgende Parameter: Höhe, Richtung und Periode von Dünung und Windsee, mittlere Wellenperiode und – richtung, signifikante Wellenhöhe, Wind	<b>Abbildungen 15-18</b>	Zur Demonstration unter <a href="http://www.dwd.de">www.dwd.de</a> bzw. verlinkt über <a href="http://www.demarine.de">www.demarine.de</a> , alle Parameter, alle Vorhersagezeitschritte unter ftp-outgoing.dwd.de, Auslieferung per E-Mail möglich,  Aktualisierung: 2x täglich
Meteo-/ Marinogramm mit NRT-Validierung durch In-situ-Messung	<b>Abbildung 19</b>	Zur Demonstration für eine Position unter <a href="http://www.dwd.de">www.dwd.de</a> bzw. verlinkt über <a href="http://www.demarine.de">www.demarine.de</a> , ftp-outgoing.dwd.de,  Aktualisierung sobald neue In-situ-Messung verfügbar
Tabellarische Vorhersage für verschiedene meteo-marine Parameter	<b>Abbildung 20</b>	Zur Demonstration für eine Position unter <a href="http://www.dwd.de">www.dwd.de</a> bzw. verlinkt über <a href="http://www.demarine.de">www.demarine.de</a> , ftp-outgoing.dwd.de, Auslieferung per E-Mail möglich,  Aktualisierung: 2x täglich
Meteo-/ Marinogramm Zusammenstellung	<b>Abbildung 21</b>	Zur Demonstration für eine Position unter <a href="http://www.dwd.de">www.dwd.de</a> bzw. verlinkt über <a href="http://www.demarine.de">www.demarine.de</a> , ftp-outgoing.dwd.de, Auslieferung per E-Mail möglich,  Aktualisierung: 2x täglich
Vorhersagekarte mit NRT-Validierung durch TerraSAR-X-Messung	<b>Abbildung 22</b>	ftp-outgoing.dwd.de  Aktualisierung: sobald neue TerraSAR-X-Messung verfügbar
GRIB-Dateien für verschiedene Vorhersageparameter	Keine Abbildung	Aktualisierung: 2x täglich  Ab 1.Juli 2015 frei verfügbar über FTP-Server

**Tabelle 1:** Auflistung verschiedener Produkte und Angaben zu deren Verfügbarkeit.



**Abbildung 23:** Flussdiagramm der Prozesskette, an deren Ende die Auslieferung der Produkte steht.

Die vorgestellten Produkte liefern hochaufgelöste Analysen und Vorhersagen von Wetter- und Seegangparametern in Form von Karten, Zeitreihendarstellungen und Tabellen. Sie werden im prä-operationellen Betrieb erzeugt, basieren auf 48-stündigen Vorhersagen, die zweimal täglich aktualisiert und durch aktuelle TerraSAR-X- und In-situ-Messungen zeitnah ergänzt werden. Nutzer ist derzeit bereits der DWD, bei dem die Produkte/Ergebnisse des Projektes als Informationsgrundlage in den operationellen Beratungsdienst einfließen. Mit der Einrichtung der prä-operationellen Prozesskette, an deren Ende die Auslieferung verschiedener Vorhersage- und Analyseprodukte steht, wurden die Ziele des Teilprojektes erreicht.

## 2.2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Zum 1. September 2012 wurde Dr. Jens Kieser vom DWD als wissenschaftlicher Mitarbeiter (Projektangestellter, PA) in Vollzeit für das Projekt DeMarine-2, TP3 eingestellt. Teilprojektleiter (TPL) war zu Projektbeginn zunächst Dr. Thomas Bruns vom DWD, dessen Arbeiten jedoch nicht durch Zuwendungen aus dem Projekt finanziert wurden. Zum 1. Januar 2014 wurde Dr. Peter Hoffmann als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das TP3 durch den DWD eingestellt. Er löste Dr. Kieser ab, der fortan die TP3-Leitung von Dr. Bruns übernahm. Dr. Hoffmann schied zum 1. April 2015 aus dem Projekt aus. Die Arbeiten, welche vom PA durchgeführt und somit über die Zuwendungen durch das Projekt finanziert wurden, sind detailliert in Abschnitt 2.1 beschrieben. Arbeiten durch den Projektpartner BSH wurden ebenfalls über die Zuwendungen durch das Projekt finanziert. Siehe hierzu Abschlussbericht des BSH zu TP3. Arbeiten durch assoziierte Partner wurden in Abschnitt 2.1 ebenfalls dargestellt. Diese wurde jedoch nicht aus Projektmitteln von DeMarine-2 finanziert.

Durch den PA bzw. TPL wurden folgende Reisen unternommen, die durch Reisemittel über das Projekt finanziert wurden:

- Der TPL nahm am „2. Strategieforum Fernerkundung und GMES Thementage“ vom 14.11.2012 bis 15.11.2012 in Düsseldorf teil.
- Teilnahme durch den PA am „13th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecast“ vom 27.10.2013 bis 01.11.2013 in Banff, Kanada. Die Reise diente der Präsentation von Projektergebnissen und dem Erfahrungsaustausch mit führenden internationalen Wissen-

schaftlern auf dem Gebiet der Seegangmodellierung und Fernerkundung.

- Arbeitstreffen zur Abstimmung der Arbeiten in den Arbeitspaketen 3.2 „Fernerkundung“ und 3.5 „Validierung“ zwischen DLR und DWD in Bremen am 11.02.2014. Die Reise wurde durch den PA und den TPL mit dem öffentlichen Personen-Nahverkehr (ÖPNV) durchgeführt. Es fielen keine Übernachtungskosten an. (Weitere zahlreiche Arbeitstreffen fanden beim DWD oder BSH in Hamburg statt und verursachten keine Reisekosten für das Projekt.
- Teilnahme an der WindForce-Messe am 17./18. Juni in Bremen mit der Zielsetzung Kontaktaufnahme und Befragung potentieller Nutzer. Die Reise wurde mit dem ÖPNV durchgeführt. Es fielen keine Übernachtungskosten an.

Die vor Projektbeginn veranschlagten Kosten sowie die tatsächlich entstandenen Kosten sind in *Tabelle 2* aufgelistet. Durch die verspätete Einstellung eines PA und dessen verfrühtem Ausscheiden aus dem Projekt wurden weniger Projektmittel verbraucht, als vor Projektbeginn veranschlagt wurden.

#### Bis zum 31.05.2015 entstandene Gesamtkosten

Position	Veranschlagte Ausgaben (€)	Tatsächliche Ausgaben (€)
0812	176.700,00	166.415,32
0846	7.700,00	2.763,94
<b>Gesamt</b>	<b>184.400,00</b>	<b>169.179,26</b>

**Tabelle 2:** Vor Projektbeginn veranschlagte und im gesamten Verlauf des Projektes entstandene Kosten. Die Positionen entsprechen den Bezeichnungen im Zuwendungsbescheid.

### 2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben wurde, sind die Hauptziele des Teilprojektes erreicht worden. Diese beinhalten eine Verbesserung der Seegangsvorhersage im Bereich der deutschen Küstengewässer und eine nutzergerechte Präsentation der Vorhersageergebnisse, inklusive NRT-Validierung mittels TerraSAR-X-Messungen. Die zugrundeliegende Prozesskette sollte prä-operationalisiert werden.

Um die Projektziele zu erreichen, folgten die Arbeiten weitgehend dem Zeitplan, der im Projektantrag formuliert wurde. *Abbildung 1* zeigt die Zeitplanung mit Meilensteinen. Änderungen bzw. Verzögerungen gab es in den Arbeitspaketen 3.4 „Kopplung“, 3.5 „Validierung“ und 3.6 „Produkte“. Diese Änderungen sind in *Abbildung 1* hervorgehoben.

So verzögerte sich die Validierung von und mit TerraSAR-X-Daten. Wesentlicher Grund hierfür war eine nur sehr eingeschränkte Verfügbarkeit der TerraSAR-X-Daten, welche zu Projektbeginn nicht absehbar war. So konnte die Prozesskette, an deren Ende die NRT-Validierung mittels TerraSAR-X-Messungen steht, für den prä-operationellen Betrieb eingerichtet und getestet werden, womit das Projektziel erreicht wurde. Aufgrund der sehr eingeschränkten Verfügbarkeit der Radar-Satellitendaten konnte die Funktionalität jedoch nicht in einem regelmäßigen prä-operationellen Betrieb getestet werden.

Außerdem kam es zu Verzögerungen bei der Umsetzung der interaktiven Kopplung zwischen See-

gangs- und Ozean-Zirkulationsmodell, welche der Schwerpunkt des Arbeitspaketes 3.4 „Kopplung“ war und im Wesentlichen durch den Projektpartner BSH durchgeführt wurde (siehe auch Abschlussbericht des BSH). Die Kopplung fand stufenweise statt. In einem ersten Schritt wurde die physikalische Kopplung verwirklicht, so dass das gekoppelte System frühzeitig in den prä-operationellen Betrieb gehen konnte. In einem zweiten Schritt wurde daran gearbeitet, die Kopplung auch technisch zu verfeinern und das Modellsystem komplett auf dem Hochleistungsrechner des DWD zu implementieren.

Nach der Umsetzung dieses Arbeitsschrittes wurde die Entwicklung der interaktiven Kopplung in Angriff genommen. Während dieser Arbeiten wurde erkannt, dass sich ein solches System, wegen seines hohen Wartungs- und Betreuungsaufwands, derzeit nicht für einen operationellen Betrieb beim DWD eignet. Man entschied sich, den prä-operationellen Betrieb mit der zweiten Kopplungsstufe zu verwirklichen. Dennoch können auch die Arbeiten, die in Zusammenhang mit der Entwicklung des interaktiv gekoppelten Modellsystems stehen, als notwendig und angemessen betrachtet werden, da die gesammelten Erkenntnisse und durchgeführten Arbeiten für spätere Projekte als wichtige Grundlage dienen werden.

Abschließend ist zu bemerken, dass alle geleisteten Arbeiten notwendig und angemessen waren, um das Gesamtsystem, bestehend aus verbesserter Seegangsvorhersage, Produkten und NRT-Validierung, in die prä-operationelle Phase zu überführen.

## 2.4 VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES

Das gekoppelte Seegangs- und Strömungsmodell wird in absehbarer Zeit in den operationellen Vorhersagedienst beim DWD eingeführt. Die Produkte (Zeitreihen, Tabellen, Karten) wurden so entwickelt, dass sie schon heute in die Prozesskette des aktuellen SVS eingebunden werden können. Erste Nutzer werden bereits mit den entsprechenden Produkten beliefert.

Bei unveränderter Situation bezüglich der Verfügbarkeit der TerraSAR-X-Daten ist eine operationelle Nutzung entsprechender Produkte nicht möglich. Aufgrund ihres großen Nutzens und ihres innovativen Charakters wird die Einbeziehung von hochauflösenden Radar-Satellitenmessungen in die operationelle Produkterzeugung aber weiterhin angestrebt. So bietet die zeitnahe Präsentation hochauflöster Radar-Satellitenprodukte dem Nutzer doch eine exzellente Möglichkeit, sich ein Bild von den aktuellen Bedingungen auf See zu machen und darüber hinaus die Vorhersagen zeitnah zu bewerten. Deshalb soll in absehbarer Zeit die Nutzbarkeit von Sentinel-Messungen geprüft werden.

## 2.5 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Auf dem erwähnten „13th Workshop on Wave Hindcast and Forecasting“ gab es neben dem Vortrag des TPL nur wenige Beiträge zu den Themen „küstennaher Seegang“ und „Wechselwirkungen zwischen Wellen und Strömung“. Gleichwohl wird diesen Themen in der Fachliteratur durchaus viel Aufmerksamkeit gewidmet. Jedoch handelt es sich dabei zumeist um Fallstudien auf Grundlage extrem hochaufgelöster, unstrukturierter Modellgitter zur Untersuchung spezieller Phänomene und zur Planung von Maßnahmen im Küstenschutz. Wegen ihres hohen Rechenzeitbedarfs sind solche Modelle nicht für den operationellen Einsatz geeignet. So sind operationelle Seegangs-Strömungsmodelle noch nicht sehr verbreitet, aber durchaus im Kommen. Z.B. wurde am Woodshole-Institut für Ozeanographie das **Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport-Model (COAWST)** entwickelt, das auch vom CNR-ISMAR (Venedig) für Umwelt-Vorhersagen in der Adria angewendet wird.

## 2.6 VERÖFFENTLICHUNGEN

In Zusammenhang mit den Arbeiten im TP3 gab es die folgenden Veröffentlichungen:

Bruck, M. und S. Lehner (2013): Coastal wave field extraction using TerraSAR-X data, *Journal Appl. Remote Sens.* 7(1), 073694 (Sep 25, 2013).

Kieser, J., Bruns, T., Lindenthal, A., Brüning, T., Janssen, F., Behrens, A., Li, X.-M., Lehner, S. and A. Pleskachevsky (2013): First studies with the high-resolution coupled wave current model CWAM and other aspects of the project sea state monitor. *13th international workshop on wave hindcasting and forecasting - and 4th coastal hazard symposium*, Banff.

Kuzmic, Li, Grisogono, Tomazic und Lehner (2013): TerraSAR-X observations of the Senj bora wind: Early results, *Acta Adriatica*, Volume 54(1), issue June 2013.

Lehner, S., Pleskachevsky, A., Velloto, D., and S. Jacobsen, (2013): Meteo-Marine Parameters and Their Variability Observed by High Resolution Satellite Radar Images. *Journal of Oceanography* 26(2):80–91, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2013.36>.

Li, X.-M. und S. Lehner (2013): Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and TANDEM-X data, In: *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Li, X.-M. und S. Lehner (2013): Observation of TerraSAR-X for Studies on Offshore Wind Turbine Wake in Near and Far Fields, In: *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, VOL. 6, NO. 3, JUNE 2013.

Pleskachevsky, A., Gebhardt, C., Rosenthal, W., Lehner, S., Hoffmann, P., Kieser, J., Bruns, T., Lindenthal, A., Jansen, F. and A. Behrens, (2015): Satellite-Based Radar Measurements for Validation of Highresolution Sea State Forecast Models in the German Bight. *ISRSE-36, The 36th International-Symposium on Remote Sensing of Environment*, 11 – 15 May 2015, Berlin, Germany.

Pleskachevsky, A., Lehner, S., Gebhardt, C., Rosenthal, W., Kieser, J., Bruns, T., Hoffmann, P., Schwarz, E. and D. Krause (2015): "Validation of the High-Resolution Sea State Forecast Model CWAM using Satellite-based Radar Measurements", *14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting - and 5th Coastal Hazard Symposium*, 8 – 13 November 2015, Key West, Florida.

### 3 ERFOLGSKONTROLLBERICHT

#### 3.1 BEITRAG DES ERGEBNISSES ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN

Hinsichtlich des Beitrags der Ergebnisse des Teilprojektes zu den förderpolitischen und übergeordneten Zielen lassen sich folgende Feststellungen treffen:

Die durch das TP3 erreichte Verbesserung der Seegangsvorhersage dient der Sicherung der Seeschifffahrt. Sie dient auch als Planungsinformation für die Errichtung und den Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen. Von verbesserten Seegangsvorhersagen für Küstengewässer profitieren aber auch die am Küstenschutz beteiligten Institutionen, wodurch ein Beitrag zur Vorsorge zur Sicherung der materiellen Lebensgrundlagen der Menschen geleistet wird. **Somit wird der übergeordneten Zielsetzung von DeMarine-2 „Gesellschaftliche Ziele“ (siehe Projektbeschreibung DeMarine-2, Abschnitt 1.3) Rechnung getragen.**

Durch die Weiterentwicklung von Algorithmen zur Ableitung von Wetter- und Seegangsinformationen aus hochaufgelösten Radar-Satellitenmessungen und durch die Weiterentwicklung des Seegangsmodells wurde technologisches Wissen geschaffen. Mit diesem Wissen und seiner innovativen Verknüpfung, auch unter Einbeziehung von In-situ-Messungen, werden Erkenntnisse über den aktuellen und zukünftigen Zustand der Meeresoberfläche gewonnen. Somit wird dem übergeordneten **„Wissenschaftlichen Ziel“ von DeMarine-2 (siehe Projektbeschreibung DeMarine-2, Abschnitt 1.3) Rechnung getragen.**

Die im Projekt entwickelten innovativen Produkte und Dienstleistungen, unter Nutzung verbesserter Seegangsvorhersagen und neuer Fernerkundungsmethoden, sind u.a. ein Ergebnis des Wissenstransfers von Forschungseinrichtungen wie DLR/IMF und HZG/IfK zum operationellen Dienstleister DWD. Diese Produkte und Dienstleistungen können z.B. die maritime Wirtschaft bei der Planung und Ausführung von Arbeiten auf See unterstützen. Damit kann das Projekt zur Schaffung bzw. Sicherung hochwertiger Arbeitsplätze in dieser Branche beitragen, was als übergeordnetes **„Wirtschaftliches Projektziel“ (siehe Projektbeschreibung DeMarine-2, Abschnitt 1.3)** formuliert wurde.

#### 3.2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHES ERGEBNIS, NEBENERGEBNISSE UND GESAMMELTE WESENTLICHE ERFAHRUNGEN

Im TP3 wurden Fernerkundungsdaten der Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X genutzt und Algorithmen entwickelt, mit denen sich aus diesen Fernerkundungsdaten hochaufgelöste Informationen über Seegang und Wind ableiten lassen. Die Algorithmen wurden für den operationellen Betrieb am DLR in Neustrelitz implementiert, so dass die nutzergerecht aufbereiteten Fernerkundungsdaten dem Nutzer zeitnah zur Verfügung stehen. Innerhalb des Projektes wurden Beobachtungsdaten der Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X verwendet, um die Seegangsvorhersage des hochauflösenden Seegangsmodells für die deutschen Küsten zu validieren. Es wurden innovative Produkte entwickelt, die Nutzern von hochaufgelösten Seegangsvorhersagen die Möglichkeit bieten, anhand von Radarmessungen der Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X eine zeitnahe Bewertung der Vorhersagen zu erhalten. Somit erfüllt das TP3 die zentralen Ziele von DeMarine-2: „Entwicklung neuer operationeller Anwendungen der Erdbeobachtung ... für die Umweltforschung und –überwachung“ und Etablierung von TerraSAR-X-Daten als „integraler Bestandteil eines europäischen Erdbeobachtungs-Gesamtsystems“.

### 3.3 FORTSCHREIBUNG DES VERWERTUNGSPLANS

#### 3.3.1 ERFINDUNGEN/SCHUTZRECHTSANMELDUNGEN UND ERTEILTE SCHUTZRECHTE

Fehlanzeige.

#### 3.3.2 WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN NACH PROJEKTENDE

Der DWD hat seine Seegangsvorhersagen seit Mitte des Jahres 2015 frei zugänglich gemacht. Dies betrifft sowohl die Daten des globalen Modells GWAM, als auch die des Regionalmodells EWAM und später auch die des Küstenmodells CWAM. Damit wurde kommerziellen Dienstleistern die Möglichkeit gegeben, auf der Basis der an Satelliten- und Bojenmessungen validierten Vorhersagen eigene Produkte zu vermarkten, die auf den im TP3 entwickelten Prototypen basieren. Dies trägt direkt zur Wirtschaftlichkeit und Sicherheit der Seeschifffahrt und anderer Aktivitäten auf See bei und genügt damit dem gesetzlichen Auftrag des DWD.

#### 3.3.3 WISSENSCHAFTLICHE UND/ODER TECHNISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN

Der von DLR/IMF entwickelte Algorithmus zur Bestimmung von Seegangparametern aus Satellitendaten muss mit jedem neuen Radarinstrument angepasst werden. Dabei kann auf die im TP3 gewonnenen Erfahrungen aufgebaut werden. Insbesondere die Methodik der Erkennung von Schiffen, Sandbänken und anderen Störfaktoren ist im TP3 wesentlich verbessert worden und wird in spätere Projekte begünstigend einfließen.

Im Hinblick auf die Zukunft der Seegangsvorhersage ist zu erwarten, dass die im TP3 erkannten, im Flachwasser aufgetretenen (und gelösten) Probleme die Modellentwickler von HZG/IFK zu weiteren Verbesserungen beflügeln werden.

#### 3.3.4 WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT

Während die Nutzer maritim-meteorologischer Informationen immer höhere Detailgenauigkeit und Zuverlässigkeit nachfragen, werden Beobachtung und Modellierung sich weiterentwickeln müssen. Dies muss aber nicht unbedingt zu höheren räumlichen Auflösungen führen. Vielmehr werden die bestehenden Verfahren das Prinzip der Ensemble-Vorhersage verfolgen müssen, um den Nutzern mit probabilistischen Aussagen Entscheidungshilfen zu geben.

### 3.4 ARBEITEN, DIE ZU KEINER LÖSUNG GEFÜHRT HABEN

Die angestrebte Zwei-Wege-Kopplung von Seegangmodell (CWAM) und ozeanischem Zirkulationsmodell (HBM) hat sich als zu aufwändig für den operationellen Betrieb herausgestellt. Andererseits hat sich gezeigt, dass mit der vereinfachten Ein-Wege-Kopplung, also allein mit Berücksichtigung der Wirkung von Wasserstand und Strömung auf den Seegang, die geforderten wissenschaftlichen Ziele erreicht wurden. Die Arbeiten an dem Kopplungsverfahren haben insofern zu keiner Lösung geführt. Gleichwohl werden die gewonnenen Erfahrungen in Folgeprojekten nutzbar sein.

### 3.5 PRÄSENTATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR MÖGLICHE NUTZER

Die im TP3 entwickelten Produkte sollen täglich aktuell auf der DWD-Website präsentiert werden.

Die möglichen Nutzer sind zu Kommentaren und Verbesserungen eingeladen. Kommerzielle Dienstleister können durch die Darstellung der Produkte zu Eigenentwicklungen angeregt werden.

### 3.6 EINHALTUNG DER AUSGABEN- UND ZEITPLANUNG

Alle Arbeitspakete des TP3 konnten im zeitlichen Rahmen abgeschlossen werden. Die vom Projektträger bereitgestellten Zuwendungen wurden wegen des vorzeitigen Ausscheidens des PA nicht vollständig aufgebraucht. Die Restmittel wurden für die Verlängerung eines anderen TP verwendet.

## 4 LITERATUR

- Behrens, A. and H. Günther (2008): "Operational wave prediction of extreme storms in Northern Europe," *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-008-9298-3.
- Dick, S., E. Kleine, Müller-Navarra, S.H., Klein, H. and H. Komo (2001) : "The Operational Circulation Model of BSH (BSHCMOD), Model description and validation", *Berichte des BSH*, 29.
- Kleine, E. (1994): Das Operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee, Konzeption und Übersicht, *Techn. Ber. d. Bundesamtes f. Seeschifffahrt u. Hydrographie*, 126 S.
- König, Th., S. Lehner, and J. Schulz-Stellenfleth (2007): Global analysis of a 2 year ERS-2 wave mode dataset over the Ocean, in <http://elib.dlr.de/48272/>, Proc. of IGARSS 2007, Barcelona, Spain.
- Komen, G.J., L.Cavaleri, M.Donelan, K.Hasselmann, S.Hasselmann and P.A.E.M.Janssen (1994): "Dynamics and Modelling of Ocean Waves.", Cambridge University Press.
- Lehner, S., A. Pleskachevsky, and M. Bruck (2012): "High resolution satellite measurements of coastal wind fields and sea state", *International Journal of Remote Sensing*, 12/2012; 33(2011). DOI: 10.1080/01431161.2012.685975.
- Li, X.-M., S. Lehner and T. Bruns (2011): Ocean Wave Integral Parameter Measurements Using ENVISAT ASAR Wave Mode Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 155 – 174, DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052364.
- Li, X.-M. Th. König, J. Schulz-Stellenfleth and S. Lehner (2010): "Validation and intercomparison of ocean wave spectra retrieval scheme using ASAR wave mode data", *International Journal of Remote Sensing*, 31: 17, 4969 – 4993, DOI: 10.1080/01431161.2010.485222.
- Li, X.-M. and S. Lehner (2010): „On measurement of storm wave height in the North Atlantic using ENVISAT ASAR and Radar Altimeter Data", *Advances in Space Research*.
- Murawski, J. (2007): Die Wechselwirkung von Seegang und Strömung: Eine theoretische Grundlegung mit Modellanwendungen, Dissertation, Department Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Pleskachevsky, A., S. Lehner, Th. Heege, and C. Mott (2011): "Synergy and fusion of optical and Synthetic Aperture Radar satellite data for underwater topography estimation in coastal areas", *Ocean Dynamics*, 61:2099-2120.
- Schneggenburger, C., H. Günther and W. Rosenthal (1997): "Shallow Water Wave Modelling with Non-linear Dissipation", *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Vol. 49, No.2/3, pp. 431-444.
- Schulz-Stellenfleth, J. and S. Lehner (2004): "Measurement of 2-D Sea Surface Elevation Fields using Complex Synthetic Aperture Radar Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6), 1149-1160.
- Schulz-Stellenfleth, J., Th. König and S. Lehner (2007): "An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data," *J. Geophys. Res.*, 112, DOI: 10.1029/2006JC003970.
- WAMDI group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing (1988): "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model.", *J. Phys. Oceanogr.* 18, pp. 1775-1810.

## 5 DATENQUELLEN

Neben den Beobachtungsdaten der Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X, welche durch das Fernerkundungsdatenzentrum des DLR in Neustrelitz bezogen wurden und welche zentraler Bestandteil des Projektes sind, wurden für die Arbeiten im Projekt weitere Messdaten verwendet. Hierbei handelt es sich um In-situ-Messungen verschiedener Seegangparameter, die zur Validierung von Modellen und Verfahren verwendet wurden. Die entsprechenden Datenquellen sollen an dieser Stelle aufgelistet werden:

Bojen „Helgoland Nord“, „Helgoland Süd“, „Elbe-Boje“ und „Arkona-Boje“ betrieben durch das **BSH**,  
Boje des BSH an der Station FINO1, die im Rahmen des FINO-Projektes betrieben wird,

Bojen an den Messstandorten „Westerland“, „Süderhever“, „Rütergat“ und „Süderpiep“, welche vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (**LKN**) betrieben werden,

Radar-Wellenpegel an der Messstation „Steinplate“ am „Messturm niedersächsisches Wattenmeer“ mit dem Betreiber „Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz“ (**NLWKN**),

Messstation „Bunkerhill“, welche durch **HZG** betrieben wird,

Boje „MeetboeiWE01“ des Betreibers **Deltares**.

Die entsprechenden Daten wurden aus folgenden Quellen bezogen: BSH, FINO-Datenportal des BSH (Das FINO-Forschungsprojekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie durch Projektträger Jülich / Forschungszentrum Jülich.), COSYNA-Datenportal des HZG, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN).

## 6 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>BSH</b>	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
<b>CWAM</b>	Coastal Wave Model, Küsten-Wellenmodell
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>EWAM</b>	European Wave Model, europäisches Wellenmodell
<b>GWAM</b>	Global Wave Model, globales Wellenmodell
<b>HBM</b>	Hiromb Boos Model
<b>HZG</b>	Helmholtz-Zentrum Geesthacht
<b>IfK</b>	Institut für Küstenforschung (HZG)
<b>IMF</b>	Institut für Methodik der Fernerkundung (DLR)
<b>NRT</b>	Near Real Time, Nahe-Echtzeit
<b>NWV</b>	Numerische Wettervorhersagekette
<b>PA</b>	Projektangestellter
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar
<b>SSP</b>	Sea State Processor
<b>SVS</b>	Seegangsvorhersagesystem
<b>TP3</b>	Teilprojekt 3 „Seegangsmonitor“
<b>TPL</b>	Teilprojektleiter
<b>WAM</b>	Wave Model, Wellenmodell