



OpenRAVE

Schlussbericht

FKZ: 03EE3009C

M.Sc. L. Fröhling

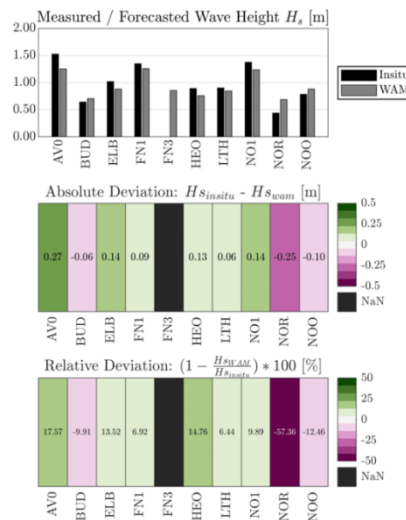
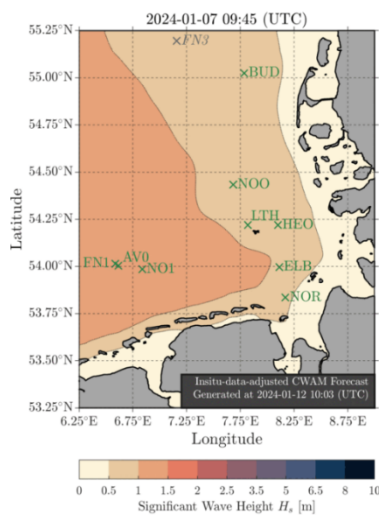
M.Sc. T. Grotebrune

Prof. Dr.-Ing. A. Hildebrandt

Erfassung und Analyse von last-, logistik- und lebenslaufzeit-relevanten Daten der OWEA

September 2025

Teilvorhaben: Entwicklung von Seegangportal-Modulen zur Optimierung der Logistik von Offshore-Einsätzen und zur Empfehlung von Lasteinwirkungen



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EE3009C und unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte des Abschlussberichts liegt bei den jeweils genannten Autoren



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



- Verbundvorhaben: **OpenRAVE | Open Research at Alpha Ventus**
Erfassung und Analyse von last-, logistik- und lebenslaufzeit-relevanten Daten von OWEA;
- Projektkoordination: Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES)
- Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Arndt Hildebrandt
Ludwig-Franzius Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität
30167 Hannover
- Teilvorhaben: Entwicklung von Seegangportal-Modulen zur Optimierung der Logistik von Offshore-Einsätzen und zur Empfehlung von Lasteinwirkungen
- Förderkennzeichen: **03EE3009C**
- Verbundpartner: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Kai Herklotz
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES)
Bernhardt Lange
- Projektlaufzeit: 01.02.2020 – 31.01.2025

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-------------|
| I | KURZDARSTELLUNG..... | 1 |
| I-1 | Aufgabenstellung..... | 1 |
| I-2 | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... | 2 |
| I-3 | Planung und Ablauf des Vorhabens..... | 4 |
| I-4 | Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde..... | 7 |
| I-5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 8 |
| II | EINGEHENDE DARSTELLUNG | 10 |
| II-1 | Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele | 10 |
| II-1.1 | Einleitung..... | 10 |
| II-1.2 | Datengrundlage..... | 11 |
| II-1.3 | Korrelation von Einwirkparametern..... | 18 |
| II-1.4 | Entwicklung des Seegangmoduls..... | 52 |
| II-1.5 | KI-Erweiterung..... | 59 |
| II-1.6 | Zusammenfassung..... | 66 |
| II-2 | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises..... | 68 |
| II-3 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 69 |
| II-4 | Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans..... | 70 |
| II-5 | Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen | 71 |
| II-6 | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses | 72 |
| III | LITERATURVERZEICHNIS | VIII |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 - Struktur des Projektvorhabens | 6 |
| Abbildung 2 - Schematische Darstellung der Verbundpartner (BSH, IWES, LuFI) und ihrer Arbeitspakete | 9 |
| Abbildung 3 – Vom BSH eingesetzte Messinstrumente: Waverider-Boje (Datawell BV), direktionales Radar (RADAC BV), Wellenradar (RADAC BV) und AWAC-Strömungs- und Wellensensor (Nortek AS) | 11 |
| Abbildung 4 - Übersicht der vom BSH bereitgestellten Messdaten nach Standort und eingesetzten Instrumententypen..... | 12 |
| Abbildung 5 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der DWR-Seegangsbojen an verschiedenen Standorten in der Deutschen Bucht..... | 13 |
| Abbildung 6 – Verteilung der Qualitätsstufen (QF1–QF4) der DWR-Messdaten nach der Datenqualitätskontrolle (DQK) des BSH, dargestellt in absoluten Zahlen und relativen Häufigkeiten. | 14 |
| Abbildung 7 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der RADAC-Sensoren installiert an verschiedenen Standorten in der Deutschen Bucht..... | 15 |
| Abbildung 8 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der ADCP an den Standorten AV0, FN1, FN3 und NO1 in der Deutschen Bucht. | 16 |
| Abbildung 9 – Gesamtkorrelation zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe am Standort FINO1 (2007–2020). Auffällige Abweichungen bei Windrichtungen um 300° sind auf Mastabschattung zurückzuführen..... | 19 |
| Abbildung 10 - Vergleich der 40 m-Windmessungen (140° Vane vs. 308° USA) am Standort FN1; deutliche Mastabschattung bei ca. 300° | 19 |
| Abbildung 11 - Vergleich der 40 m-Windgeschwindigkeiten (140° Vane vs. 308° USA) am Standort FN1 (2007–2020); hohe Korrelation, jedoch deutliche Streuung durch Mastabschattungseffekte..... | 20 |
| Abbildung 12 - Richtungsabhängige Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit (WSPD) und signifikanter Wellenhöhe (VHM0) am Standort FINO1 (2012–2019)..... | 21 |
| Abbildung 13 - Wind- und Wellenverteilung an Standort FINO1 zwischen 2012-2019..... | 22 |
| Abbildung 14 Korrelation der Windgeschwindigkeit und (sign.) Wellenhöhe an Standort FN1 und NO1 für 2019 | 26 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 15 -Standortvergleich der saisonalen Korrelation zwischen sig. Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit | 27 |
| Abbildung 16 Abnahme der Windgeschwindigkeit (roter Pfeil) und gleichzeitige Zunahme der sig. Wellenhöhe (blauer Pfeil)..... | 28 |
| Abbildung 17 - Darstellung der Wind-Wellen-Regressionskurven an allen verfügbaren Standorten | 33 |
| Abbildung 18 - Exemplarische Zeitreihe des Tidehubs an Standort FN1; Spektrale Darstellung des Signals mit Indikation der maßgebenden Partialtide-Frequenzen S1, M2 und M4 [eigene Darstellung] | 37 |
| Abbildung 19 - Die Phillipsfunktion (gepunktet), das Pierson-Moskowitz-Spektrum (gestrichelt) und das JONSWAP-Spektrum (gurchgezogen) für eine Peakfrequenz $fp = 0.1 \text{ Hz}$ [aus Malcherek, A. (2018)] | 38 |
| Abbildung 20 - Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe (hier $VHM0 = Hm0$) und signifikanter Wellensteilheit (VSTS) am Standort FN1 für den Zeitraum 2007–2021. Dargestellt sind alle verfügbaren Messwerte, ergänzt um den berechneten Korrelationskoeffizienten. | 42 |
| Abbildung 21 – Links: Monatliche Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe $Hm0$ am Standort FN1 für den Zeitraum 2004–2021. Rechts: Auftretenshäufigkeit der Wellenrichtungen am Standort FN1. Geographische Verordnung zur Verdeutlichung der Richtungsanteile. | 43 |
| Abbildung 22 - FN1 Standortbedingungen in Rosendiagrammen..... | 44 |
| Abbildung 23 - Amplitudenspektrum der Strömungsgeschwindigkeit an drei Tiefen am Standort FN1 mit markierten Haupttidekonstituenten..... | 45 |
| Abbildung 24 - - Ereignis mit tidebedingtem Einfluss auf die Wellensteilheit bei konstanter Wellenrichtung. | 47 |
| Abbildung 25 - Verteilungen der Wellensteilheit für verschiedene Richtungsunterschiede zwischen Strömung und Wellenrichtung am Standort FN1. Höhere Steilheiten treten vor allem bei gegenläufigen Bedingungen auf. | 48 |
| Abbildung 26 - Zeitlich-frequenz aufgelöste Differenz $\Delta S(f,t)$ als Maß für strömungsinduzierte Energieumverteilungen über den Tidezyklus hinweg. | 49 |
| Abbildung 27 - Korrelation der Energieänderung ΔE im Frequenzband 0,05–0,15 Hz mit der effektiven Strömungsgeschwindigkeit und rel. Richtung $\cos\theta$ | 50 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 28 - Vergleich in-situ und Numerik (CWAM, EWAM, CMEMS) an verschiedenen Standorten: Oben Fino 1 (FN1), Mitte Nordergründe (NOR), Unten Helgoland Ost (HEO)..... | 54 |
| Abbildung 29 - Einbindung des halbstündigen Modul-Outputs auf der BSH-Website <i>https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Seegang/seegang_node.html</i> | 57 |
| Abbildung 30 - Modellgrenzen AWPR und verwendeter Bereich | 62 |
| Abbildung 31 - Zell-gemittelte Modell Performance des RF-Modells für den Zeitraum vom 01.01.2016 - 31.12.2023..... | 64 |
| Abbildung 32 - Validierung am Standort NOO | 65 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1 - Beteiligte Verbundpartner..... | 2 |
| Tabelle 2 – Übersicht Windsensoren an FN1 & FN3 | 17 |
| Tabelle 3 - Angabe der Verzögerung und R ² -Score ausgewählter Sturmereignisse | 29 |

I Kurzdarstellung

I-1 Aufgabenstellung

Mit dem Ausbau der Offshore-Windenergie in der Deutschen Bucht und angrenzenden Seegebieten ergeben sich steigende Anforderungen an Planung, Errichtung und Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Durch größere Wassertiefen und zunehmende Küstenentfernungen wird der Einfluss meteorologischer und ozeanographischer Faktoren immer signifikanter. Insbesondere Wind, Wellen und Strömungen bestimmen maßgeblich die Einsatzgrenzen von Arbeitsschiffen und wirken sich auf die Installations- und Wartungslogistik aus. Fehlende oder unzureichend präzise Vorhersagen dieser Prozesse können zu Verzögerungen im Bauablauf, zu erhöhten Kosten und zu einer Reduktion der Betriebssicherheit führen. Studien zeigen, dass fehlerhafte Seegangsvorhersagen zu erheblichen Produktionsausfällen und erhöhten Transportkosten beitragen. Da die Betriebskosten von OWEA zu einem großen Anteil (ca. 25–30 % der Gesamtinvestition) aus Wartungs- und Logistikaufwendungen bestehen, resultiert hieraus ein erhebliches Optimierungspotenzial.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Verbundprojekt *OpenRAVE* das Ziel, eine konsolidierte und qualitätsgesicherte Datengrundlage zu entwickeln, die sowohl für die Projektierung neuer Windparks als auch für den operationellen Betrieb bestehender Anlagen genutzt werden kann. Über das beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) angesiedelte Seegangsportale werden Umweltdaten aus in-situ Messungen, numerischen Modellen und Fernerkundung zusammengeführt und aufbereitet. Auf dieser Basis entstehen Datenprodukte, die eine bessere Planung von logistischen Prozessen auf See, eine realitätsnähere Bewertung von Belastungskombinationen auf Offshore-Strukturen sowie eine Optimierung operativer Einsatzgrenzen ermöglichen. Das Gesamtvorhaben leistet damit einen Beitrag zur Reduzierung von Risiken und Kosten in der Offshore-Logistik und unterstützt den Ausbau der Offshore-Windenergie durch die Erhöhung der Vorhersage- und Planungssicherheit.

Das Teilvorhaben des Ludwig-Franzius-Instituts (LuFI) konzentrierte sich auf die wissenschaftliche Analyse und methodische Weiterentwicklung im Bereich Wind-Wellen-Strömungs-Interaktion. Schwerpunkte waren die Identifikation von Wind-Wellen-Abhängigkeiten, die Analyse des richtungsabhängigen Einflusses von Strömungen auf die Wellenentwicklung sowie die Entwicklung von Methoden zur spektralen Betrachtung des Energiehaushalts. Ergänzend wurden Verknüpfungen zwischen Umweltdaten und generischen Schiffsmodellen hergestellt, um Zeitfenster für Offshore-Operationen prognostizieren zu können. Im Rahmen der Projekterweiterung *OpenRAVE_ML* wurden zudem maschinelle Lernverfahren (z. B. rekurrente neuronale Netze, Ensemble-Methoden) implementiert, um Übertragungsfunktionen zwischen Messstandorten zu entwickeln, flächige Seegangsvorhersagen für die Deutsche Bucht zu generieren und die Genauigkeit bestehender Vorhersagemodelle zu erhöhen. Die entwickelten Module wurden in das Seegangsportale integriert, automatisiert und validiert, sodass eine kontinuierliche Bereitstellung von Übersichtskarten und Entscheidungsgrundlagen für Forschung, Industrie und Verwaltung gewährleistet ist. Damit konnte das Teilvorhaben maßgeblich zur wissenschaftlichen Durchdringung der Wellen-Strömungs-Interaktion beitragen und gleichzeitig praxisrelevante Werkzeuge für die Offshore-Logistik bereitstellen.

I-2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben *OpenRAVE* wurde als Verbundprojekt beantragt und durchgeführt. Die finanzielle Förderung erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Die beteiligten Verbundpartner sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 - Beteiligte Verbundpartner



Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Bernhard-Nocht-Str. 78, 20359 Hamburg, Deutschland
Kai Herklotz



Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES)
Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven, Deutschland
Herr Bernhard Lange



Ludwig-Franzius-Institut
für Wasserbau, Ästuar- und
Küsteningenieurwesen

Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen (LuFI)
Leibniz Universität Hannover
Nienburger Str. 4, 30167 Hannover, Deutschland
Herr Arndt Hildebrandt

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist eine deutsche Bundesbehörde, die Aufgaben in den Bereichen maritime Sicherheit, Umweltschutz, Meeresforschung und Schifffahrt wahrnimmt. Es ist zuständig für die Bereitstellung hydrographischer und meteorologischer Informationen, die Zulassung von Offshore-Anlagen sowie die Kartierung und Überwachung deutscher Seegebiete. Das BSH ist für Ozeanographische Untersuchungen im Offshore-Testfeld „alpha ventus“ und die zentrale Durchführung der Messungen im Rahmen der RAVE-Forschungsprojekte seit 2008 (RAVE - Messserviceprojekt I: 0325026, RAVE - Messserviceprojekt II: 0325026A, RAVE Offshoreservice: 0325026B) verantwortlich.

Das Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) ist eine Forschungseinrichtung, die sich auf die Entwicklung und Optimierung von Technologien zur Nutzung der Windenergie spezialisiert. Es bietet wissenschaftliche Expertise und technische Lösungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Windenergie, von der Materialprüfung über die Konstruktion von Turbinen bis hin zu deren Betriebsoptimierung. Im Rahmen der RAVE-Initiative ist das IWES außerdem für die Organisation der Forschungszusammenarbeit am Testfeld alpha ventus seit 2007 (RAVE I: 0327686, RAVE II: 0327686A, RAVE III: 0327686B, RAVE Reloaded: 0327686C) verantwortlich.

Das Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover besitzt einen langjährigen Forschungshintergrund verschiedener Bereiche des Offshore- und Küsteningenieurwesen. Die meeres technische Abteilung des Antragstellers befasst sich zum einen mit der Analyse von Einwirkungsdaten und zum anderen mit der physikalischen und numerischen Modellierung von Offshore-Strukturen und Schiffbewegungen. Darüber hinaus behandelt die abgeschlossenen Projekte „Schwimmstabilität im Seegang einer neuartigen Offshore-Schwergewichtsgründung“ (FKZ: ZIM, KF 3316902KI4) und das im Jahr 2023 abgeschlossene BMWK-Projekt „AVIMo“ (FKZ 0324350A) das Bewegungsverhalten von Strukturen und Schiffen im Seegang während des Transport- und Einbringungsvorgangs. Ebenfalls relevant für das Verbundprojekt sind die u.a. untersuchten Einwirkungsrandbedingungen durch Wind- und Wellenkorrelation, Wellen-Strömungs-Interaktion und Extremlasten in den Forschungsprojekten Gigawind „life“ (FKZ 0325575A) und „alpha ventus“ (FKZ 0325032A).

I-3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens orientierte sich an den im Antrag definierten Arbeitspaketen und Meilensteinen. Grundlage war eine enge Abstimmung zwischen den beteiligten Projektpartnern, insbesondere zwischen dem BSH als Datenlieferant und dem LuFI als Bearbeiter der Analysen. Die Koordination erfolgte durch regelmäßige Projekttreffen, die – insbesondere in den ersten beiden Projektjahren – aufgrund der COVID-19-Pandemie überwiegend digital abgehalten wurden.

Die Arbeitspakete wurden schrittweise bearbeitet. Nach der Bereitstellung und Qualitätssicherung der Umweltdaten durch das BSH (AP 1 und AP 3) konnten die Analysen zu Wind-Wellen-Korrelationen und zur Wellen-Strömungs-Interaktion (AP 4.1 und AP 4.2) durchgeführt werden. Darauf aufbauend wurden Prognosen für Offshore-Zeitfenster entwickelt (AP 4.3) sowie Routinen zur Implementierung und Automatisierung im Seegangsportale erstellt (AP 4.4). Mit Beginn der Projekterweiterung *OpenRAVE_ML* wurde dieser Ablauf ergänzt durch die Aufbereitung historischer Datensätze (AP 4.5), die Entwicklung und das Training von Machine-Learning-Modellen (AP 4.6) sowie die Validierung dieser Methoden (AP 4.7).

Die Arbeiten wurden überwiegend institutsintern bearbeitet. Ein kontinuierlicher externer Input, etwa aus Industrie-Workshops, war für dieses Projekt nicht vorgesehen und fand entsprechend nur in begrenztem Umfang statt. Stattdessen lag der Fokus auf der systematischen Auswertung vorhandener und neu erhobener Daten sowie auf der methodischen Weiterentwicklung und Validierung der Analyseansätze. Die enge zeitliche Kopplung der Arbeitspakete stellte sicher, dass neue Datengrundlagen unmittelbar in die Auswertungen einfließen konnten und Zwischenergebnisse sukzessive in das Seegangsportale übertragen wurden.

Durch diese eigenständige Bearbeitung wurde eine klare Struktur im Projektablauf erreicht: Beginnend mit der Datenaufnahme, gefolgt von Analysen und methodischen Entwicklungen, bis hin zur Implementierung und Bereitstellung im Seegangsportale. Ergebnisse wurden fortlaufend dokumentiert und in Form von Konferenzbeiträgen und Fachpublikationen veröffentlicht.

Nachfolgend eine Zusammenfassung der fünf Arbeitspakete:

- **AP 1 Messservice (BSH, DNV, UL International):**
Das AP 1 sichert den Betrieb bestehender Messungen im Offshore-Testfeld alpha ventus und unterstützt neue Forschungsprojekte in Offshore-Windparks (OWPs). Es umfasst die Installation und Inbetriebnahme neuer Messstationen in vier weiteren OWPs zur Seegangs-, Strömungs- und Wasserstandsmessung sowie den Austausch von Umweltdaten mit OWP-Betreibern. DNV und UL International agieren dabei als Unterauftragnehmer vom BSH und sind für
- **AP 2 RAVE Forschungsarchiv (BSH):**
Das Forschungsarchiv wird betrieben und weiterentwickelt, um eine effiziente Verwaltung und Bereitstellung von Messdaten zu gewährleisten. Die Datenbankstruktur und Benutzeroberfläche werden modernisiert, neue Funktionen implementiert und IT-Systeme aktualisiert. Ziel ist die Automatisierung interner Prozesse und eine verbesserte Nutzererfahrung.

- **AP 3 Seegangsdatenzentrum (BSH):**

Das Seegangsdatenzentrum wird durch neue Qualitätskontrollen für Langzeitdaten und standardisierte Prüfroutinen erweitert. Zusätzlich werden neue Datenprodukte wie statistische Analysen und Kartenansichten entwickelt. Eine mobile Anwendung für Seegangsinformationen wird evaluiert, und Machine-Learning-Methoden für strömungsdynamische Daten werden erprobt.

- **AP 4 Offshore-Logistik (LuFI):**

Daten aus mehreren Standorten in der Deutschen Bucht werden verknüpft, um Verfügbarkeitskarten für Schiffseinsätze zu erstellen. Diese basieren auf Umweltdaten und Einsatzgrenzen von Arbeitsschiffen und werden als Modul im Seegangsportal integriert.

- **AP 5 Koordination und Öffentlichkeitsarbeit (IWES):**

Dieses AP sorgt für die organisatorische und wissenschaftliche Vernetzung der RAVE-Projekte und unterstützt die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie. Zudem wird die Initiative durch Öffentlichkeitsarbeit sowie internationale Vernetzung gefördert.

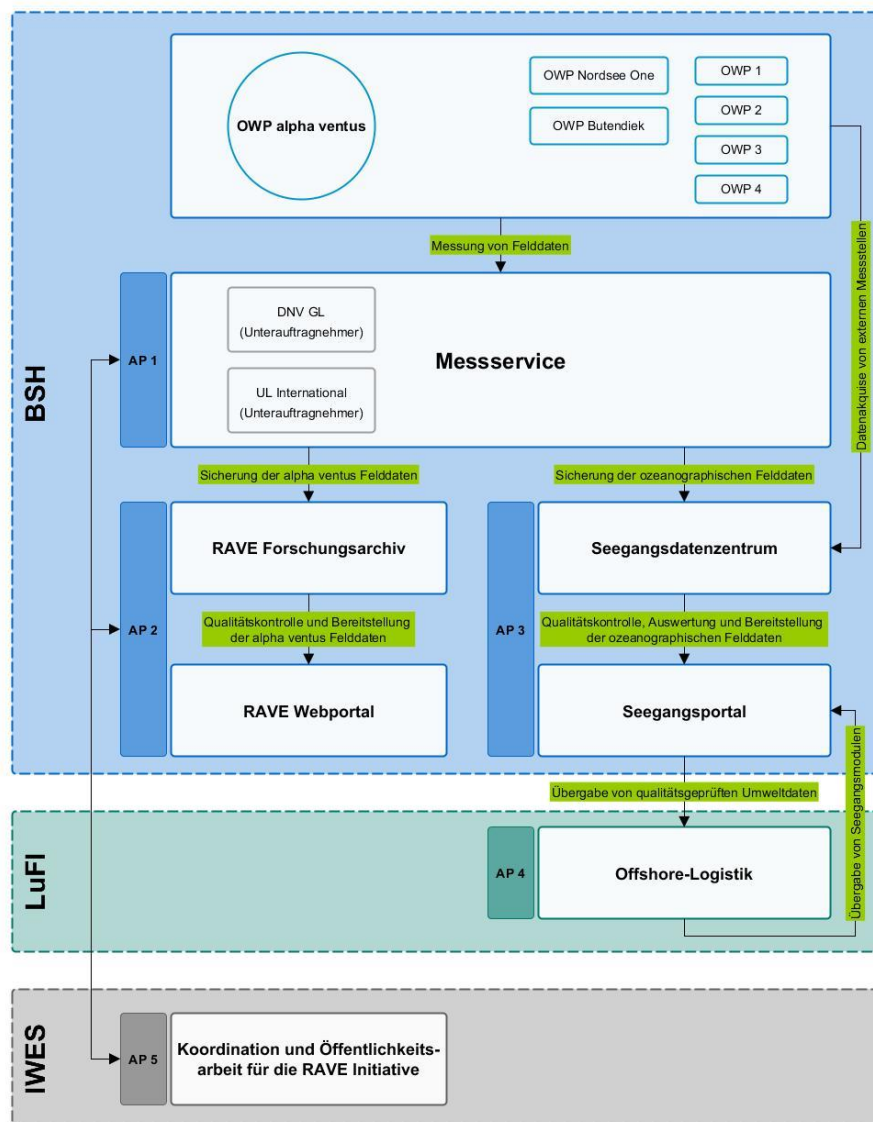


Abbildung 1 - Struktur des Projektvorhabens

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde sich u.a. aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten nach Rücksprache mit dem Projektträger Jülich (PTJ) darauf geeinigt, dass alle Verbundpartner einen eigenen Schlussbericht verfassen. Daher werden in diesem Kapitel und im Bericht generell vor allem die Aufgaben und Ergebnisse des LuFI aus Arbeitspaket 4 detailliert beschrieben.

I-4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt knüpft an den aktuellen Stand der Wissenschaft in den Bereichen Wind-Wellen-Korrelation, Wellen-Strömungs-Interaktion sowie Wellen-Schiff-Interaktion an. Diese Themenbereiche sind essenziell, um die standort- und strukturabhängigen Umweltbedingungen in der Deutschen Bucht präzise zu modellieren und deren Einfluss auf Offshore-Bauwerke und Schiffe zu bewerten. Die Wind-Wellen-Korrelation steht im Mittelpunkt, da Windwellen vor allem durch den Impulsaustausch zwischen Wind und Wasser entstehen, wobei Faktoren wie Fetchlänge, Windgeschwindigkeit und Winddauer eine zentrale Rolle spielen (Cavaleri et al. 2012). Vor Projektbeginn zeigen Studien (Hildebrandt et al. 2019), dass der Richtungsversatz zwischen Wind und Wellen je nach Standort stark variiert, was insbesondere für Offshore-Windparks relevant ist. Vorhandene Daten basieren vornehmlich auf punktuellen Messungen an Stationen wie FINO I und FINO III, während großflächige Interpolationen noch fehlen. Die Wellen-Strömungs-Interaktion bildet einen weiteren wichtigen Schwerpunkt. Maritime Strömungen beeinflussen die Wellenentwicklung und -steilheit erheblich. Je nach Richtung und Geschwindigkeit der Strömungen können diese entweder die Wellenamplitude verstärken oder abschwächen (Handbook of offshore engineering 2010). Frühere Modelle zur Beschreibung der Refraktion und des Doppler-Effekts (Jonsson und Skovgaard 1978; Peregrine 1976) sind theoretisch gut entwickelt, ihre praktische Anwendung auf großflächige Offshore-Bedingungen ist jedoch noch begrenzt. Die Analyse von Zeitfenstern für Schiffeinsätze erfordert daher eine detailliertere Berücksichtigung von Strömungs- und Welleninteraktionen. Ein weiterer zentraler Bereich ist die Wellen-Schiff-Interaktion. Die damaligen Prognosemethoden für die Schiffsstabilität und Bewegung unter Welleneinfluss beruhen auf analytischen und numerischen Verfahren. Analytische Modelle liefern gute Ergebnisse für gleichmäßige Bewegungen wie „Tauchen“ und „Driften“, sind jedoch bei ungleichförmigen Bewegungen wie „Stampfen“ und „Rollen“ weniger präzise, was für den sicheren Versatz von Personal auf Offshore-Anlagen eine zentrale Rolle spielt (Peng et al. 2013). Das Projekt nutzt diesen Stand der Technik, um punktuelle Messungen und bestehende numerische Modelle zu erweitern und großflächig anwendbare Lösungen zu entwickeln. Die bisherige Forschung bildet eine solide Basis für die Erarbeitung neuer Methoden zur Korrelation von Wind-, Wellen- und Strömungsdaten. Ziel ist es, präzisere und umfassendere Modelle zu schaffen, die in der Praxis zur Verbesserung der Planungs- und Betriebsprozesse in der Deutschen Bucht beitragen.

I-5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die RAVE-Forschungsinitiative, zu der auch das Verbundvorhaben *OpenRAVE* gehört, ist über einen Kooperationsvertrag geregelt. Vertragspartner sind unter anderem die Koordinatoren der einzelnen Verbundprojekte. Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist bereits seit den vorangegangenen Messserviceprojekten Vertragspartner und übernahm im Rahmen von *OpenRAVE* die Rolle des Projektkoordinators. Zwischen den beteiligten Partnern des Verbundvorhabens wurde zusätzlich ein eigener Kooperationsvertrag geschlossen, der die Zusammenarbeit regelte. Innerhalb des Verbundvorhabens *OpenRAVE* übernahm das **BSH** die projektbezogene Koordination sowie die Durchführung der Arbeitspakete AP 1 bis AP 3. Hierzu gehörte der Betrieb und die Erweiterung des Monitoringnetzwerks in der Deutschen Bucht sowie die Qualitätssicherung der erhobenen Daten (Seegang, Strömung, Wind, Wasserstand). Damit diese Daten für die wissenschaftliche Analyse zeitnah nutzbar waren, wurde eine direkte Schnittstelle eingerichtet, über die das **LuFI** kontinuierlich Zugriff auf die geprüften Datensätze erhielt.

Das **Fraunhofer IWES** fungierte als Koordinator der übergeordneten RAVE-Forschungsinitiative und übernahm im Projekt die Aufgaben der wissenschaftlichen Vernetzung und Öffentlichkeitsarbeit (AP 5). Hierzu zählten die Organisation und Durchführung der regelmäßigen RAVE-Gremiumstreffen, in deren Rahmen auch eingeladene Gastvorträge stattfanden, sowie die Koordination der jährlichen Workshops. Diese Workshops wurden je nach Rahmenbedingungen in Präsenz, digital oder hybrid durchgeführt und boten Gelegenheit, Zwischenergebnisse vorzustellen und methodische Entwicklungen mit einem erweiterten Fachpublikum zu diskutieren.

Das **Ludwig-Franzius-Institut (LuFI)** war im Projekt für die wissenschaftliche Analyse und Auswertung der Umweltdaten zuständig. Auf Grundlage der vom BSH bereitgestellten Parameter wurden Korrelationen zwischen Wind, Wellen und Strömungen, der Wellen-Strömungs-Interaktion und Übertragungsfunktionen für entwickelt. Die Ergebnisse wurden in Form von Datenprodukten aufbereitet, die in das Seegangportal des BSH integriert wurden. Mit der Projekterweiterung *OpenRAVE_ML* kamen die Entwicklung und Implementierung von Machine-Learning-Methoden hinzu, mit denen flächige Übertragungsfunktionen und Vorhersagemodelle erstellt werden konnten.

Die Zusammenarbeit der Partner war durch eine klare Arbeitsteilung und feste Schnittstellen geprägt: Das BSH stellte die Dateninfrastruktur bereit, das IWES koordinierte und vernetzte die Partner innerhalb der RAVE-Initiative, und das LuFI führte die wissenschaftlichen Analysen durch und entwickelte darauf basierende Module. Diese Struktur stellte sicher, dass die erhobenen Umweltdaten unmittelbar in wissenschaftliche Auswertungen überführt werden konnten. Eine schematische Darstellung der Zusammenarbeit ist in Abbildung 2 dargestellt.

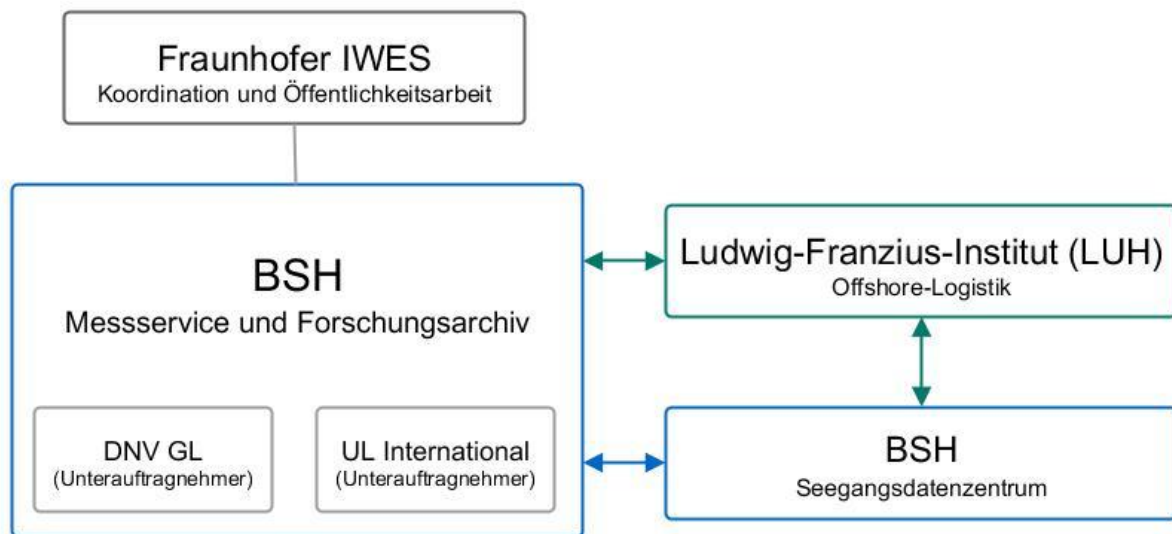


Abbildung 2 - Schematische Darstellung der Verbundpartner (BSH, IWES, LuFI) und ihrer Arbeitspakete

II Eingehende Darstellung

II-1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

II-1.1 Einleitung

Das Teilvorhaben hatte das Ziel, wissenschaftliche Grundlagen und anwendungsorientierte Methoden zur Analyse von Wind-, Wellen- und Strömungsparametern zu entwickeln und diese in Form eines Seegangsportals-Moduls für die Offshore-Praxis nutzbar zu machen. Damit wurde ein Beitrag zur Optimierung der Logistik von Offshore-Einsätzen und zur Empfehlung von Lasteinwirkungen auf Offshore-Strukturen und Schiffe geleistet.

Zentrale Schwerpunkte waren die Identifikation und Quantifizierung von Wind-Wellen-Abhängigkeiten, die Analyse der Wellen-Strömungs-Interaktion, um Einflüsse der Strömung auf das Wellenfeld und die Wellensteilheit zu erfassen. Ergänzend erfolgte die Entwicklung und Bewertung von Korrelationsansätzen zur Beschreibung kombinierter Einwirkungen von Wind, Wellen und Strömung, die als Grundlage für Bemessungs- und Einsatzplanungen dienen. Die Umweltdaten wurden mit einem generischen Schiffsmodell verknüpft, um die Einsatzfähigkeit von Arbeitsschiffen unter realen Seegangsbedingungen prognostizieren zu können. Die Ergebnisse wurden in ein automatisiertes Modul implementiert, das in das Seegangsportale des BSH integriert wurden und flächige Übersichtskarten für die Deutsche Bucht generiert.

Mit der im Projektverlauf erweiterten Zielsetzung wurden zusätzlich KI-gestützte Methoden eingeführt. Ziel war die Entwicklung von flächigen Übertragungsfunktionen und von Maschine-Learning-Modellen (z. B. LSTM, Ensemble-Verfahren), die in der Lage sind, räumlich konsistente Seegangsvorhersagen für die Deutsche Bucht zu erzeugen. Dadurch konnte die Prognosegüte der Modelle verbessert und die Planbarkeit sicherer Offshore-Arbeitsfenster erhöht werden.

Insgesamt verfolgt das Teilvorhaben LuFI die Zielstellung, eine wissenschaftlich fundierte, datenbasierte Entscheidungsgrundlage für Offshore-Betreiber, Logistikdienstleister und Behörden bereitzustellen. Damit werden sowohl die Betriebs- und Wartungskosten reduziert als auch die Sicherheit und Effizienz von Offshore-Operationen gesteigert.

II-1.2 Datengrundlage

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) stellte im Rahmen des Projektes die Schnittstelle zum LuFI dar und war für die Bereitstellung und Übergabe qualitätsgeprüfter Umweltdaten verantwortlich. Grundlage hierfür ist der vom BSH betriebene Messservice in der Deutschen Bucht, der die Installation, den Betrieb und die Wartung unterschiedlicher Messinstrumente umfasst. Hierzu gehören unter anderem Waverider-Bojen der Datawell BV, direktionale und nicht-direktionale Radarsysteme der RADAC BV sowie Ultraschall-Strömungsmesser (ADCP/AWAC) der Nortek AS (vgl. Abbildung 3).

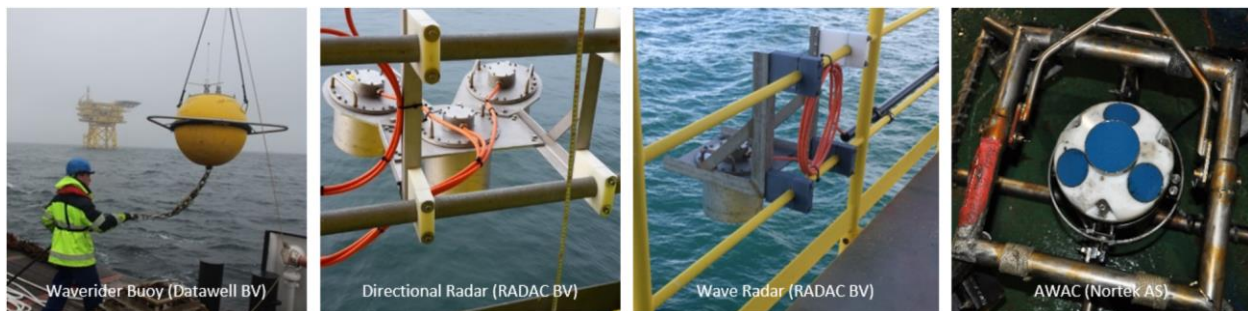


Abbildung 3 – Vom BSH eingesetzte Messinstrumente: Waverider-Boje (Datawell BV), direktionales Radar (RADAC BV), Wellenradar (RADAC BV) und AWAC-Strömungs- und Wellensensor (Nortek AS)

Die durch die Messsysteme erfassten Seegangs- und Strömungsparameter werden an die Serversysteme des BSH übermittelt, wo sie standardisierte Verfahren der Datenqualitätskontrolle (DQK) durchlaufen. Erst nach Abschluss dieser Prozesse erfolgt die Weitergabe der Daten an die Projektpartner. Für eine ausführliche Beschreibung des Messservice sowie der Implementierung der Qualitätssicherung wird auf den Endbericht des BSH im Arbeitspaket 1 (AP1) des Verbundvorhabens verwiesen. Zudem kann die aktuelle Version der Qualitätskontrolle, die vor der Weitergabe der Daten ans LuFI stattfindet, im öffentlich über die BSH-Webpräsenz zugänglichen Dokument „Manual Real-Time Data Quality Control (DQC)“ (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2025) nachvollzogen werden.

Eine Übersicht der Messstandorte in der Deutschen Bucht, für die qualitätsgeprüfte Daten an das LuFI weitergeleitet wurden, ist in Abbildung 4 dargestellt. Hier sei darauf hingewiesen, dass die Standorte z.T. erst während der laufenden Bearbeitungszeit in den Messservice des BSH aufgenommen wurden. Die Markierungen zeigen dort an, welche Sensortypen an den jeweiligen Standorten installiert waren oder sind – zumindest aber im Rahmen des Projektes Daten zur Verfügung gestellt wurden. In den darauffolgenden Tabellen sind die Geräteeigenschaften zusammengefasst, für weiterführende Informationen wird auf den Verbundpartner BSH verwiesen.

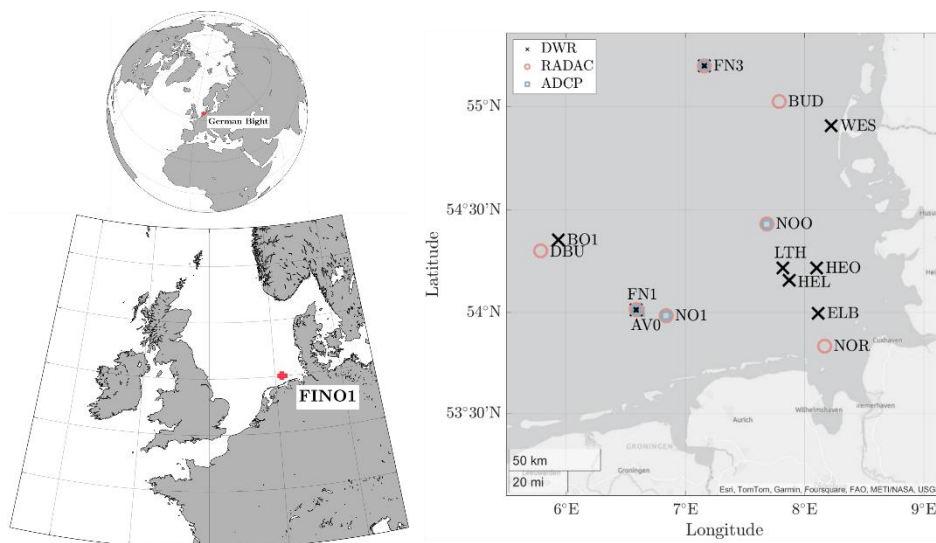


Abbildung 4 - Übersicht der vom BSH bereitgestellten Messdaten nach Standort und eingesetzten Instrumententypen

Wellen | DWR

Die im Projekt eingesetzten Datawell Waverider (DWR-MkIII) erfassen Wellenhöhen und Wellendirektionen mit hoher Genauigkeit und Auflösung. Der Messbereich von ± 20 m ermöglicht die Erfassung auch extremer Seegangsbedingungen, wie sie in der Deutschen Bucht auftreten können. Mit einer Genauigkeit von $< 0,5\%$ des Messwertes nach Kalibrierung bzw. $0,01$ m können sowohl kleine Änderungen als auch große Wellenhöhen zuverlässig aufgezeichnet werden. Die Datensätze bestehen aus 30-minütigen Zeitreihen mit einer Abtastrate von $1,28$ Hz, was einer internationalen Standardkonvention entspricht. Damit werden die relevanten Seegangsfrequenzen im Bereich von etwa $1,6$ s bis 30 s abgedeckt, sodass sowohl kurzperiodische Windsee als auch längerperiodische Dünung erfasst werden. Durch die Richtungsauflösung von $1,4^\circ$ lassen sich zudem auch Mehrfachwellensysteme unterscheiden und Richtungsversätze zwischen Wind und Wellen detailliert nachvollziehen.

Die Verfügbarkeit der Datawell Waverider (DWR)-Daten zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten (vgl. Abbildung 5). An einigen Messstationen, wie z. B. FINO1 und FINO3, liegen über längere Zeiträume kontinuierliche Datenreihen vor, die eine detaillierte Analyse der Seegangsbedingungen ermöglichen. Andere Standorte, wie etwa HEO, NOO oder LTH, weisen hingegen nur zeitlich begrenzte Messphasen auf.

Generell wird sichtbar, dass die Datenverfügbarkeit nicht durchgehend gegeben ist. Messlücken entstehen typischerweise durch technische Ausfälle der Bojen, Wartungsintervalle, widrige Wetterbedingungen oder durch den zeitlich begrenzten Einsatz einzelner Sensoren. Auch längere Stillstandszeiten sind erkennbar, in denen die Standorte nicht instrumentiert waren.

Für die wissenschaftliche Auswertung bedeutet dies, dass die Analyse insbesondere auf jene Standorte gestützt werden musste, an denen eine ausreichende zeitliche Abdeckung vorliegt. Die durchgängige Langzeitreihe von FINO1 bildet hierbei die wichtigste Grundlage, während Daten aus anderen Standorten vor allem zur Ergänzung und für standortbezogene Vergleiche genutzt werden konnten.

Trotz der Einschränkungen liefert der verfügbare DWR-Datensatz in Summe eine sehr umfangreiche Datenbasis (≈ 1 Mio. Datenpunkte), die eine robuste Untersuchung von Seegangscharakteristika in der Deutschen Bucht ermöglicht.

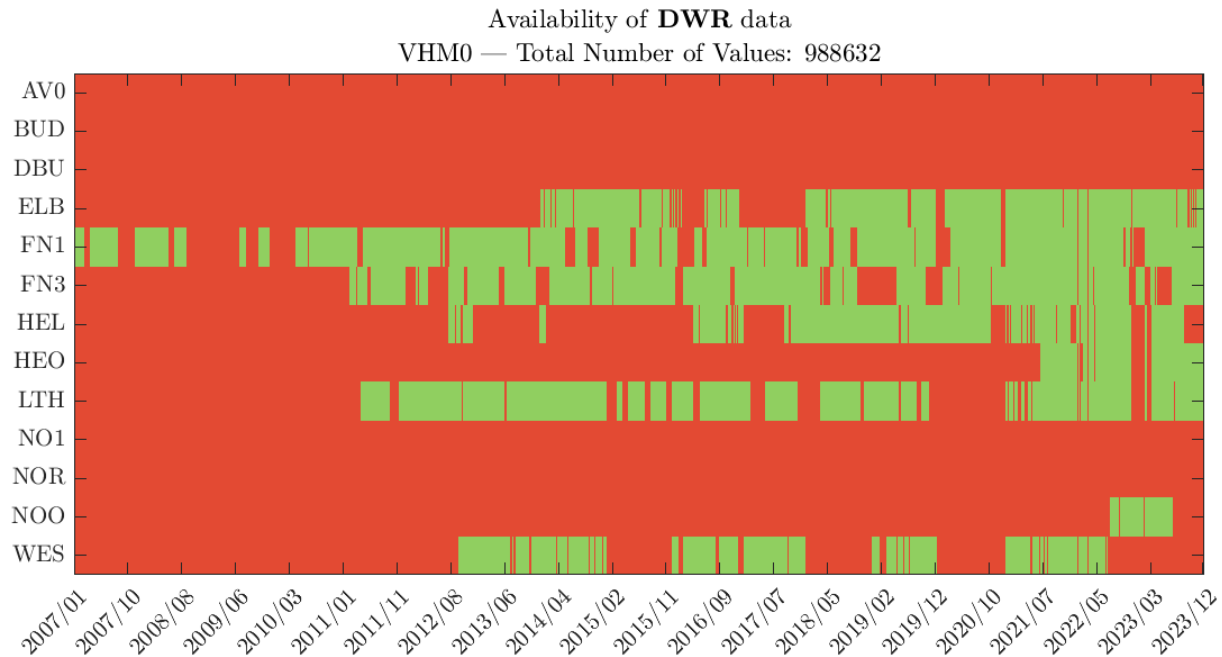


Abbildung 5 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der DWR-Seegangsbojen an verschiedenen Standorten in der Deutschen Bucht.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle in der Abbildung dargestellten Datenpunkte auch in die Analyse eingeflossen sind. Im Rahmen der Qualitätskontrolle des BSH werden sämtliche Messdaten mit Qualitätsflags (QF) versehen, die eine Einordnung hinsichtlich möglicher Fehler oder Unsicherheiten erlauben. Für die Auswertungen wurden ausschließlich Datensätze mit QF = 1 herangezogen, die als verlässlich eingestuft sind. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Verteilung der Datenpunkte, sowohl in absoluten Zahlen als auch in relativen Häufigkeiten.

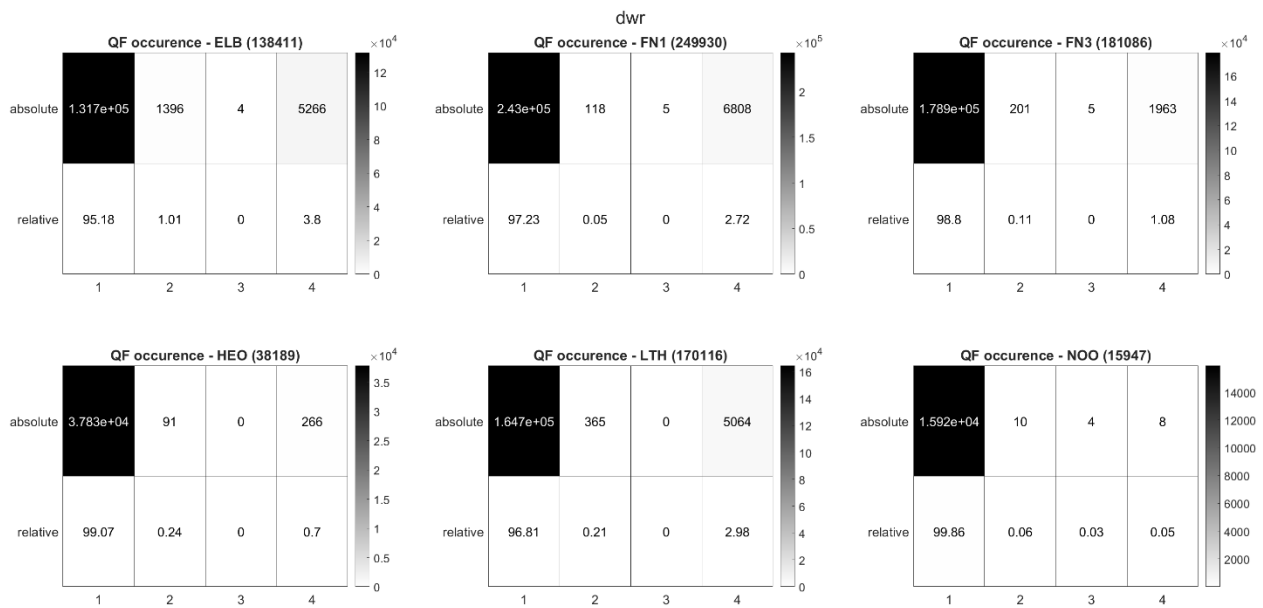


Abbildung 6 – Verteilung der Qualitätsstufen (QF1–QF4) der DWR-Messdaten nach der Datenqualitätskontrolle (DQK) des BSH, dargestellt in absoluten Zahlen und relativen Häufigkeiten.

Wellen | Radac

Die WaveGuide-Sensoren der Firma RADAC erfassen Wellen- und Wasserstandsparameter mithilfe radar-basierter Höhenmessung. Sie verfügen über einen großen Messbereich von 2–75 m für vertikale Bewegungen (Heave), bis 60 m Wellenhöhe und Wellenperioden zwischen 1 s und 100 s. Damit werden sowohl kurzperiodische als auch sehr langperiodische Wellen erfasst. Die Aufzeichnungen erfolgen mit einer hohen zeitlichen Auflösung: Alle 60 Sekunden wird ein Datensatz mit einer Burst-Länge von 1200 s generiert, bei einer Abtastrate von 2,56 Hz (für Höhe) bzw. 5 Hz (für Richtung). Die Genauigkeit beträgt ± 1 cm bzw. 0,01 m für die Wellenhöhe und ± 50 ms bzw. 0,01 s für die Wellenperiode.

Die spezifischen Eigenschaften der Messinstrumente sind öffentlich einsehbar und wurden im Zuge des Projekts über die Website des BSH bereitgestellt. (Moritz, M. (2025))

Die Verfügbarkeit der RADAC WaveGuide-Daten in Abbildung 7 zeigt, dass diese Messgeräte im Vergleich zu den Waverider-Bojen erst später in Betrieb genommen wurden und daher insgesamt kürzere Zeitreihen vorliegen (vgl. Abbildung 7). Ab etwa 2015 sind an einzelnen Standorten kontinuierlichere Datenaufzeichnungen erkennbar, insbesondere in der jüngeren Projektphase ab 2019 bis 2023. In dieser Zeit liefern die Sensoren an Standorten wie NO1, NOO oder NOR weitgehend durchgängige Datenreihen.

Wie auch bei den Bojenmessungen sind die Zeitserien nicht vollständig lückenlos. Unterbrechungen treten durch technische Defekte, Ausfälle der Datenübertragung oder den zeitweiligen Rückbau der Geräte auf. Dennoch wird deutlich, dass die RADAC-Sensoren in den letzten Jahren eine wertvolle Ergänzung zum Monitoringnetzwerk darstellen, da sie hochfrequente Messungen mit kurzer Intervallzeit (60 s) bereitstellen und dadurch auch kurzfristige Veränderungen im Seegang erfassen können.

Insgesamt liegt die Zahl der verfügbaren Werte bei rund 428.000 Datenpunkten. Damit stellen die RADAC-Zeitserien eine wichtige Ergänzung zu den Bojen-Daten dar, auch wenn ihre zeitliche Abdeckung stärker von den jeweiligen Installationszeiträumen der Standorte abhängt.

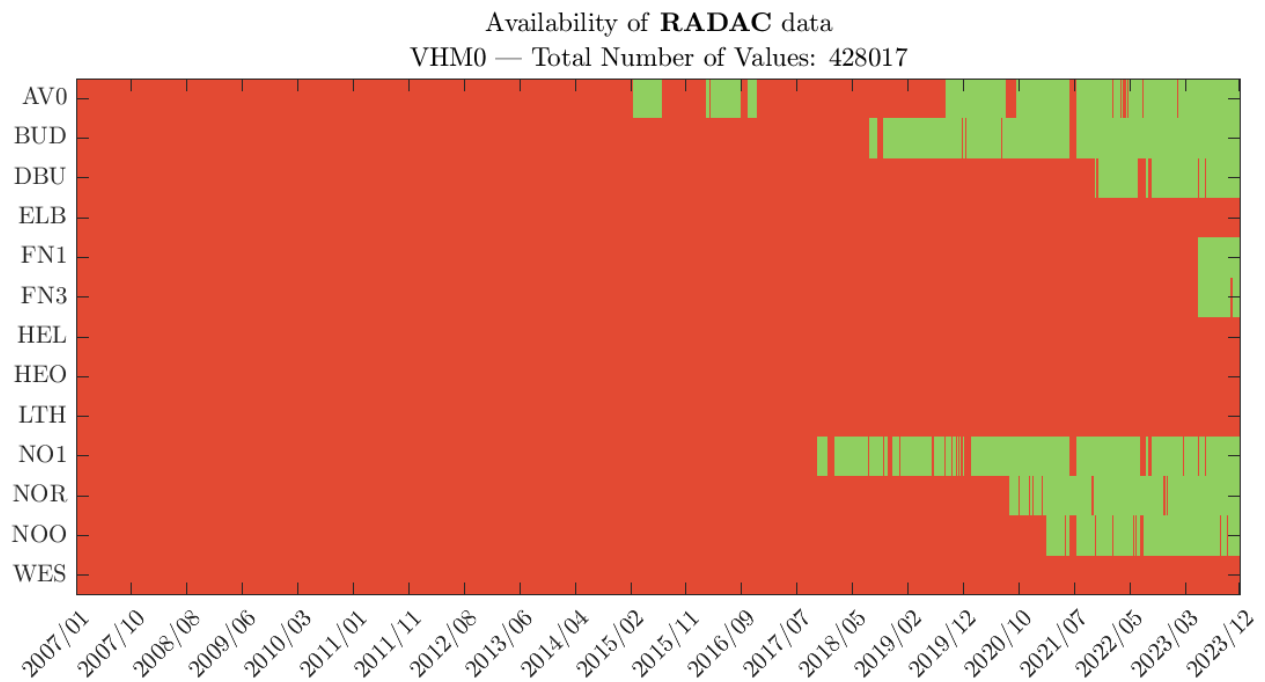


Abbildung 7 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der RADAC-Sensoren installiert an verschiedenen Standorten in der Deutschen Bucht.

Strömung | ADCP

Die im Projekt eingesetzten **Nortek AWAC 600 kHz ADCP** liefern neben Strömungsprofilen auch Informationen zu Wellenparametern. Mit einem Messbereich von ± 15 m in der vertikalen Bewegung und einer Periodenerfassung zwischen 0 s und 50 s decken sie ein breites Spektrum an Seegangsbedingungen ab. Die Aufzeichnung erfolgt in sogenannten „Bursts“ mit 1024 s Dauer bei einer Abtastrate von 1 Hz, sodass sowohl kurzperiodische Windsee als auch langperiodischere Komponenten erfasst werden. Die Messintervalle von einer Stunde (3600 s) ermöglichen eine kontinuierliche Beobachtung, allerdings mit einer geringeren zeitlichen Auflösung im Vergleich zu den Bojenmessungen. Die Genauigkeit liegt bei $< 1\%$ des Messwertes nach Kalibrierung bzw. 0,01 m für die Wellenhöhe. Für die Wellendirektion beträgt die Auflösung 2° mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ$. Damit lassen sich auch kleinere Änderungen in der Ausbreitungsrichtung nachvollziehen.

Die Verfügbarkeit der ADCP-Daten (Acoustic Doppler Current Profiler, AWAC-Systeme) variiert deutlich zwischen den einzelnen Standorten (vgl. Abbildung 8). Während an Stationen wie FN1 und FN3 über mehrere Jahre hinweg weitgehend kontinuierliche Zeitreihen vorliegen, beschränken sich die Messungen an anderen Standorten auf einzelne Zeiträume. Insbesondere in den frühen Projektjahren treten längere Datenlücken auf, da die Systeme zeitweise nicht installiert oder außer Betrieb genommen waren.

Ein typisches Charakteristikum der ADCP-Systeme ist ihre hohe Wartungsintensität. Da es sich um bodenbasierte Installationen (bottom-up) handelt, sind sie anfällig für Sedimentablagerungen und Fouling, was den kontinuierlichen Betrieb einschränken kann. Die Signalqualität nimmt ab, wodurch es zu Messungenauigkeiten kommen kann.

Aus der Übersicht wird deutlich, dass insbesondere die Jahre 2012 bis 2017 eine gute Datenabdeckung

aufweisen, während davor und danach häufiger Unterbrechungen zu verzeichnen sind. Trotz dieser zeitlichen Einschränkungen stellen die ADCP-Daten eine qualitativ hochwertige Grundlage dar, da sie neben vertikal aufgelöste Strömungsprofilen ebenso Wellenparametern liefert.



Abbildung 8 - Zeitliche Verfügbarkeit der in-situ Messdaten der ADCP an den Standorten AV0, FN1, FN3 und NO1 in der Deutschen Bucht.

Die Datenqualitätskontrolle (DQK) für Strömungsdaten beim BSH befindet sich derzeit noch in der Entwicklung. In Abstimmung mit dem LuFI wurde an einem geeigneten Verfahren zur Validierung der Messdaten gearbeitet. Das Vorgehen orientiert sich am bereits etablierten Prozess für Seegangdaten, bei dem Messwerte durch Qualitätsflags (QF) klassifiziert werden. Auch die ADCP-Daten werden künftig mit entsprechenden Flags versehen, sodass eine standardisierte Bewertung der Datenqualität möglich wird.

Da diese Routinen im Projektzeitraum noch nicht vollständig implementiert waren, standen die Strömungsdaten ausschließlich in ihrer ursprünglichen Form zur Verfügung. Für die Bearbeitung des Teilvorhabens wurden daher eigene Verfahren zur Plausibilisierung angewendet. Dazu zählten insbesondere Routinen zur Erkennung und Entfernung ungewöhnlicher Werte, wie etwa Spikes, Messrauschen oder physikalisch nicht plausible Extremwerte (zu hohe oder zu niedrige Geschwindigkeiten).

Wind | Cup Anemometer

Im Rahmen des Projekts standen dem LuFI außerdem Windmessdaten aus der Deutschen Bucht zur Verfügung. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Daten der Forschungsplattformen FINO1 und FINO3, die ebenfalls über das BSH bereitgestellt wurden und mittlerweile über das BSH Insitu Portal (soweit verfügbar) kontinuierlich bereitgestellt werden. Die Forschungsplattformen FINO1 und FINO3 sind mit umfangreicher Messtechnik zur Erfassung meteorologischer Parameter ausgestattet. Beide Standorte verfügen

über einen bis etwa 100 m hohen Messmast, an dem unterschiedliche Sensortypen installiert sind. Damit wird eine kontinuierliche Erfassung von Windgeschwindigkeit, -richtung und Turbulenzgrößen ermöglicht. An beiden Plattformen kommen Schalenanemometer vom Typ *Thies First Class Advanced* zum Einsatz. Diese sind in mehreren Höhen (zwischen 30 m und 100 m) angebracht und dienen als robuste Referenzinstrumente für die Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit. Zur detaillierten Erfassung dreidimensionaler Windvektoren und turbulenter Flüsse sind Ultraschallanemometer installiert. Auf Fino1 werden Geräte des Typs *Gill R3-50* betrieben, während auf Fino3 modernere *Gill Windmaster Pro* zum Einsatz kommen, die durch ihre höhere Abtastrate eine genauere Analyse von Böen und Turbulenzstrukturen ermöglichen. Die Ultraschallanemometer sind ebenfalls in verschiedenen Höhen bis 100 m verteilt. Ergänzend sind Windrichtungsgeber (*Thies Compact*) installiert, die eine kontinuierliche Bestimmung der Windrichtung erlauben. Diese Instrumente sind auf mehreren Höhen angebracht, sodass auch vertikale Gradienten und mögliche Abschattungseffekte durch die Maststruktur erfasst werden können. Alle Sensoren sind beheizt, um Ausfälle durch Vereisung zu vermeiden. Darüber hinaus wurden die Anemometer und Windfahnen an gegenüberliegenden Auslegern montiert. Eine ausführliche Beschreibung der Messmethoden sowie eine detaillierte Datenqualitätskontrolle finden sich im Endbericht des Projekts FINO-Wind (Deutscher Wetterdienst (DWD) & Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 2021). Ergänzend wurden weitere Windmessdaten von einzelnen Heli-Decks verschiedener Offshore-Windenergieanlagen bereitgestellt, die auch in der Untersuchung der Wind-Wellen Korrelation verwendet wurden.

Tabelle 2 – Übersicht Windsensoren an FN1 & FN3

| | SENSORART | TYP / HERSTELLER | HÖHEN [M] |
|--------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|
| FINO1 | Schalenanemometer | Thies First Class Advanced | 33, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 |
| | Ultraschallanemometer | Gill R3-50 | 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 |
| | Windfahne | Thies Compact Wind Direction | 33, 50, 70, 90, 100 |
| FINO3 | Schalenanemometer | Thies First Class Advanced | 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 |
| | Ultraschallanemometer | Gill Windmaster Pro | 50, 60, 80, 100 |
| | Windfahne | Thies Compact | 40, 60, 80, 100 |

II-1.3 Korrelation von Einwirkparametern

II-1.3.1 Wind-Wellen Korrelation

II-1.3.1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die hydrodynamische Kopplung zwischen atmosphärischen und ozeanischen Prozessen ist ein zentraler Einflussfaktor für Planung, Betrieb und Sicherheit im Offshore-Bereich. Insbesondere die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe stellt eine entscheidende Grundlage für die Bewertung von Einsatzbedingungen und strukturellen Belastungen dar. In diesem Kontext ist die signifikante Wellenhöhe H_s eine etablierte Zielgröße zur quantitativen Beschreibung des Seegangs, während die Windgeschwindigkeit u als primäre Antriebsgröße für die Wellenentwicklung fungiert.

Im Rahmen des Verbundprojekts OpenRAVE wurde im zugehörigen Teilvorhaben eine vertiefende Analyse der Wind-Wellen-Korrelation durchgeführt, um eine belastbare Datengrundlage für die Prognose- und Planungsmodelle im Bereich der Offshore-Logistik zu schaffen. Ziel dieses Kapitels ist es, die empirische Kopplung zwischen u und H_s auf Basis realer Messdaten systematisch zu untersuchen, die räumliche Übertragbarkeit zu bewerten und die Relevanz der Ergebnisse für anwendungsorientierte Modelle im Seegangportal darzustellen.

II-1.3.1.2 Einfluss der Mastabschattung auf Windmessungen

Die Gesamtauswertung aller Windrichtungen (Abbildung 9) über den Zeitraum 2007–2020 ergibt eine Korrelation von rund $R^2 = 0,7$ zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe. Auffällig sind jedoch Datenpunkte, bei denen hohe Wellenhöhen mit geringen Windgeschwindigkeiten kombiniert sind. Diese treten insbesondere bei Windrichtungen um 300° auf und lassen sich auf Abschattungseffekte durch den Messturm zurückführen. Das BSH stellt daher zusätzlich mastkorrigierte Daten sowie Messwerte aus der Hauptwindrichtung „vor“ dem Mast bereit. Eine Überprüfung dieser Korrekturen wurde im Rahmen des Projekts durchgeführt. Auf Grundlage dieser Untersuchung wurde entschieden, die Windgeschwindigkeit in 40 m Höhe bei 308° als Referenzgröße zu verwenden, soweit diese Daten in den gewählten Zeiträumen verfügbar sind. Die Daten zeigen eine verbesserte Konsistenz der Korrelation, wodurch die systematischen Verzerrungen durch den Mast abgeschwächt werden.

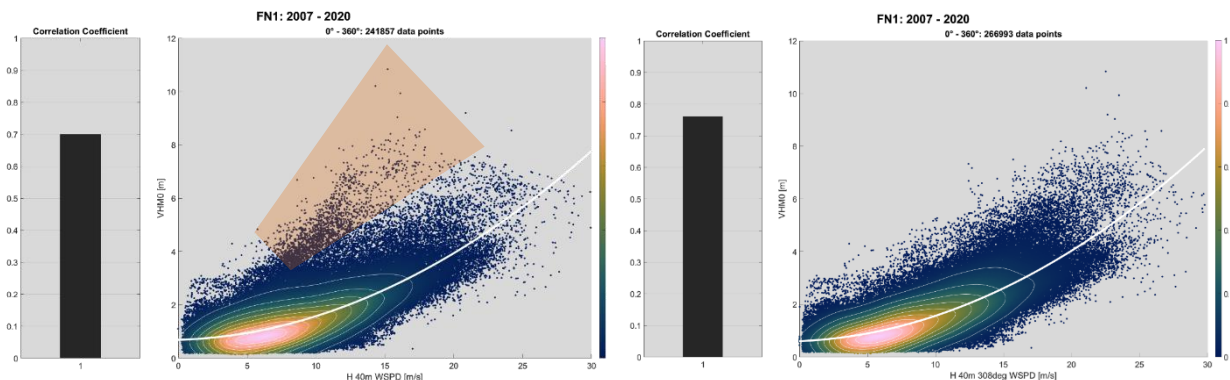


Abbildung 9 – Gesamtkorrelation zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe am Standort FINO1 (2007–2020). Auffällige Abweichungen bei Windrichtungen um 300° sind auf Mastabschattung zurückzuführen.

Die Gegenüberstellung der beiden Sensorpositionen Windfahne (Vane) bei 140° und dem Cup-Anemometer bei 308° verdeutlicht die Richtungsabhängigkeit der gemessenen Windgeschwindigkeiten. In den westlichen Richtungssektoren, die zugleich die Hauptwindrichtungen am Standort FN1 darstellen, erfasst das 308°-USA-Anemometer systematisch höhere Windgeschwindigkeiten als die 140°-Vane-Messung. Dies unterstreicht die Relevanz der Positionierung „vor“ dem Mast, um Abschattungseffekte zu vermeiden.

In östlichen und südöstlichen Sektoren hingegen werden durch die 308°-Messung geringere Geschwindigkeiten registriert, da das Anemometer hier im Nachlauf des Mastes liegt. Die 140°-Vane-Messung erweist sich in diesen Richtungen als konsistenter. Für die weitere Analyse wurde dennoch die 308°-Messung als Referenz gewählt, da sie in den westlichen Hauptwindsektoren die physikalisch plausibleren Ergebnisse liefert und so die Korrelation mit der Wellenhöhe insgesamt verbessert.

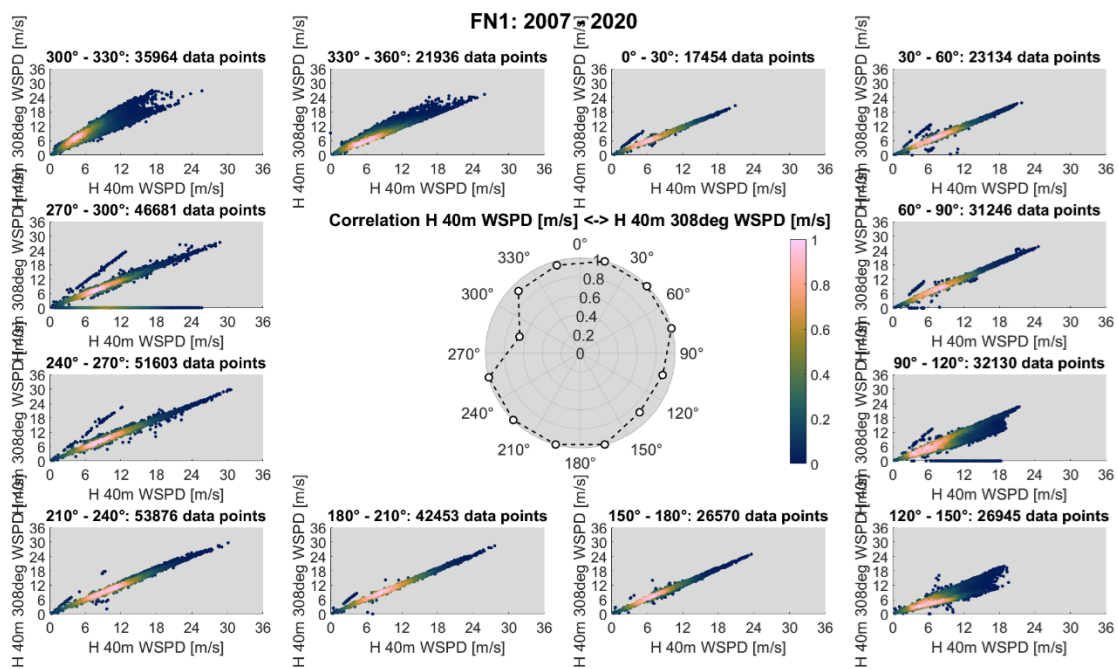


Abbildung 10 - Vergleich der 40 m-Windmessungen (140° Vane vs. 308° USA) am Standort FN1; deutliche Mastabschattung bei ca. 300°

Obwohl beide Sensoren in 40 m Höhe installiert sind, zeigt der direkte Vergleich der Messreihen (Abbildung 11) eine insgesamt deutliche Streuung. Diese Abweichungen entstehen durch die richtungsabhängige Beeinflussung des Mastes.

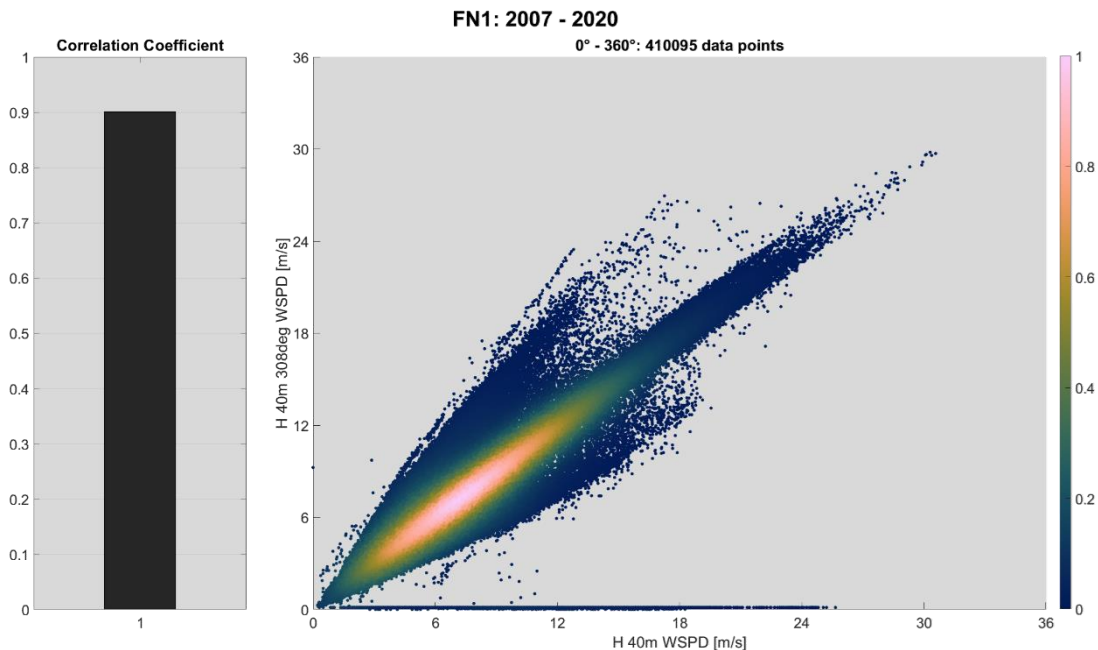


Abbildung 11 - Vergleich der 40 m-Windgeschwindigkeiten (140° Vane vs. 308° USA) am Standort FN1 (2007–2020); hohe Korrelation, jedoch deutliche Streuung durch Mastabschattungseffekte

II-1.3.1.3 Standortkorrelationen

Die Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s (VHM0) von der Windgeschwindigkeit (WSPD) wurde am Standort FINO1 für den Zeitraum 2012–2019 detailliert untersucht. Die Daten wurden in 30°-Richtungssektoren aufgeteilt (Abbildung 12). In den einzelnen Scatterplots ist die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe abgebildet. Die Farbskala zeigt die Datendichte, wobei helle Bereiche eine hohe Informationsdichte und dunklere Bereiche eine geringere Datendichte kennzeichnen. Die weiße Polylinie approximiert die Beziehung zwischen den beiden Parametern. Im Zentrum der Abbildung ist das Bestimmtheitsmaß R^2 in Abhängigkeit von der Windrichtung dargestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Korrelation. Die höchsten Korrelationen treten in den Sektoren 210°–270° sowie 270°–330° auf. Hier liegen die Bestimmtheitsmaße bei $R^2 \approx 0,8 - 0,9$. Diese Richtungssektoren decken sich mit den Hauptwindrichtungen und zeigen eine direkte und robuste Abhängigkeit zwischen Wind und Seegang. In den östlichen Richtungssektoren (30°–120°) ist die Korrelation deutlich schwächer ausgeprägt mit $R^2 < 0,5$. Für mittlere Windgeschwindigkeiten von etwa 10–15 m/s erreichen die signifikanten Wellenhöhen in den hoch korrelierenden Sektoren Werte zwischen 2 und 4 m, während sie in den schwächer korrelierenden Sektoren nur 1–2 m betragen.

Die Windstatistik am Standort FN1 (2012–2019) zeigt (vgl. Abbildung 13), dass die dominanten Windrichtungen im west- bis nordwestlichen Sektor (ca. 240°–300°) auftreten. Diese Richtungen korrespondieren

mit den Bereichen erhöhter Korrelation und führen zu einer konsistenten Kopplung von Wind- und Wellenparametern. Ergänzend verdeutlichen die Wellenrichtungen, dass ein Großteil der Wellen aus etwa 330° N kommt. Dieses System lässt sich überwiegend der Dünung aus dem Nordatlantik zuschreiben. Der zweithäufigste Sektor (250°–270°) stimmt mit der Hauptwindrichtung überein und indiziert eine ausgeprägte Windsee aus west-südwestlicher Richtung.

Die kombinierte Analyse bestätigt somit, dass die stärksten Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe in den Sektoren auftreten, in denen sowohl die Hauptwindrichtungen als auch die dominanten Wellenrichtungen liegen. Eine differenzierte Untersuchung der Anteile von Dünung und Windsee erfolgte im Projekt zusätzlich und wird in einem späteren Kapitel vertieft dargestellt.

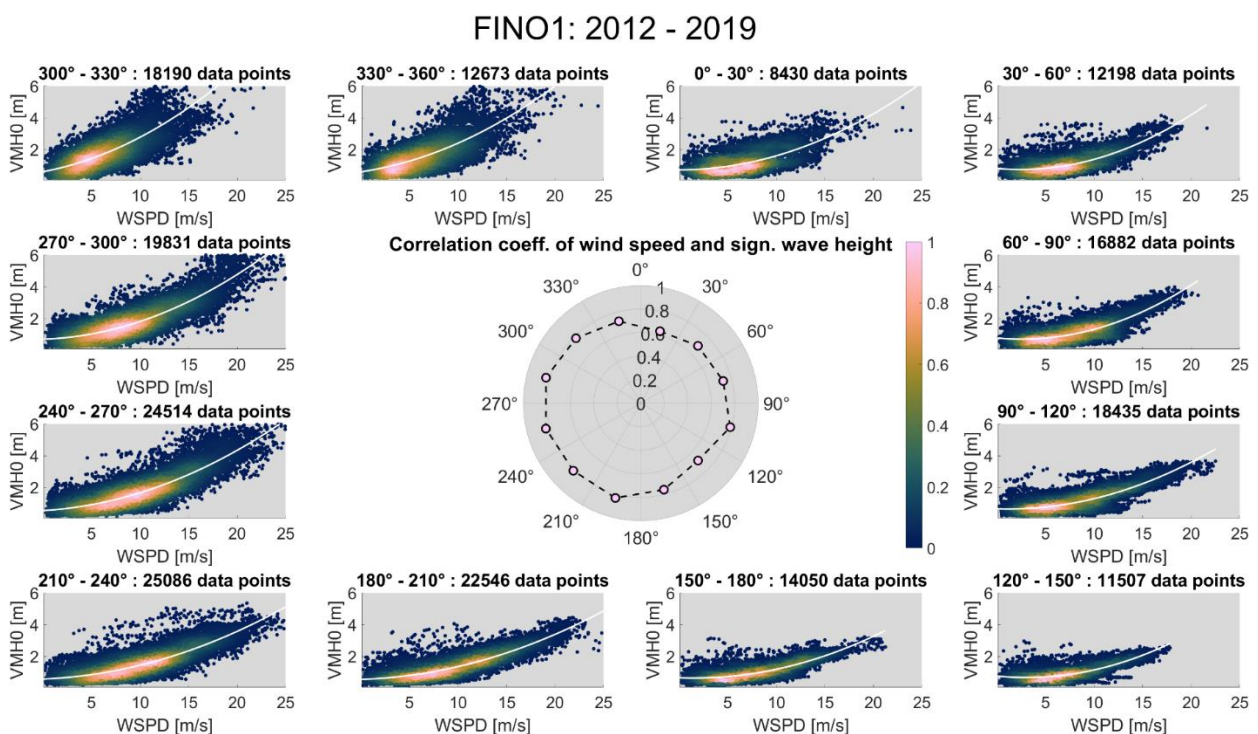


Abbildung 12 - Richtungsabhängige Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit (WSPD) und signifikanter Wellenhöhe (VMH0) am Standort FINO1 (2012–2019)

FINO1: database 2012-2019

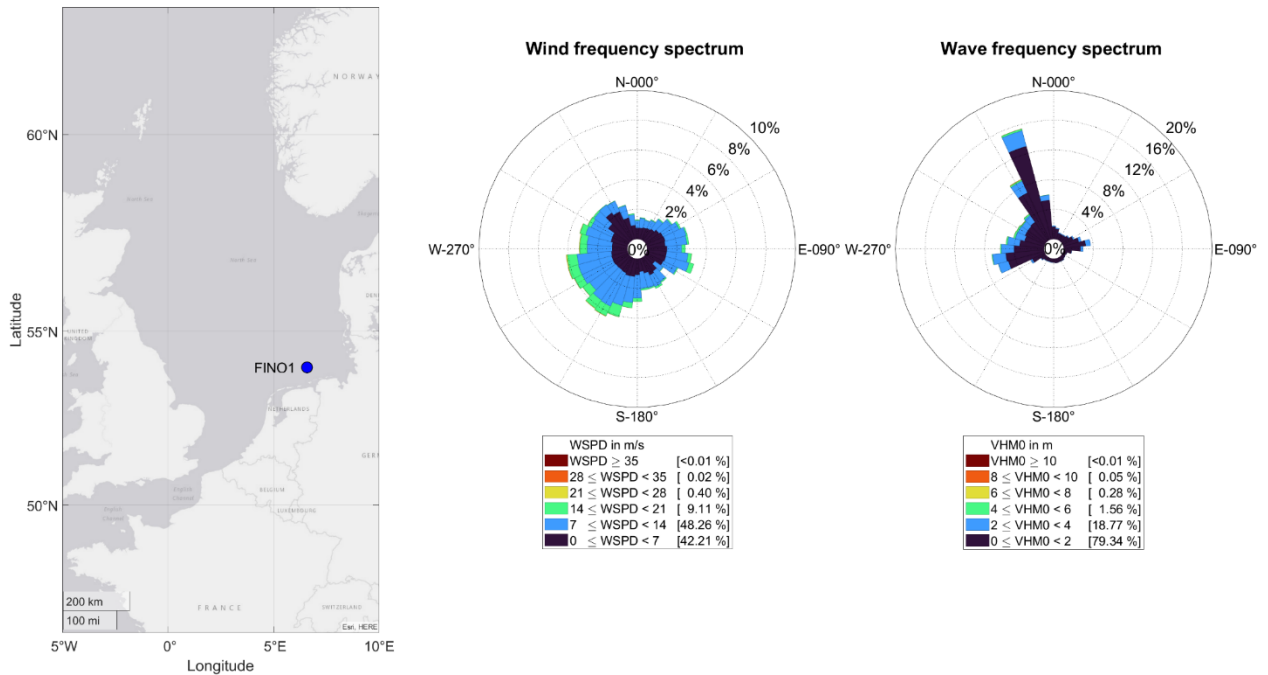


Abbildung 13 - Wind- und Wellenverteilung an Standort FINO1 zwischen 2012-2019

II-1.3.1.4 Standortvergleich in der Deutschen Bucht

Diese Teilanalyse fokussiert sich ausschließlich auf die statistische Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe. Dabei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- die quantitative Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen u (auch WSPD) und H_s an ausgewählten Standorten,
- die Ermittlung der Reaktionsverzögerung zwischen Windspitzen und Seegangsausbildung,
- die saisonale Einordnung der Wind-Wellen-Korrelation im Jahresverlauf,
- sowie eine erste Ableitung von Regressionsansätzen für spätere Modellimplementierungen.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde eine standortbezogene Analyse der Wind-Wellen-Korrelation auf Basis von Messdaten aller verfügbaren Datenpunkte durchgeführt. Es wurden auch spezifische Zeiträume für ausgewählte Vergleichsstandorte untersucht, wie zB FN1 und NO1, die sich durch ihre Positionsnähe für weiterführende Untersuchungen eignen. Die Auswertungen stützen sich im Allgemeinen auf benachbarte Messpunkte in der Deutschen Bucht. Eine Liste der Standorte und deren standortspezifischen Eigenschaften ist im Zuge des Projekts vom BSH aktualisiert worden und öffentlich einsehbar (vgl. Moritz, M. (2025a)). Die Wassertiefen an den Standorten der Seegangsmessstationen in der Deutschen Bucht variieren zwischen 10 m (z. B. Nordergründe (NOR)) und 41 m (BARD Offshore 1 (BO1)). Die jeweils angegebene Tiefe bezieht sich dabei auf die lokale Wassertiefe am Messort.

Für alle Stationen lagen Messdaten der signifikanten Wellenhöhe H_s im 30-Minuten-Intervall vor, welche auf ein einheitliches 10-Minuten-Zeitintervall interpoliert wurden. Die Windgeschwindigkeit u , in standardisierter Parameterkonvektion als WSPD angegeben, wurde bei diesem Vergleich an der FINO1-Plattform über ein Cup-Anemometer in 40m Höhe über LAT gemessen. An den Standorten BUD, HEL, LTH und NO1 liegen vereinzelt Messdaten von den Heli-Decks vor, diese sind ebenfalls in die Analyse eingeflossen. Diese haben jedoch eine wesentlich geringere Datendichte. Zudem bestehen für die fest installierten Messmasten an den Standorten FN1 und FN3 Monitoringverfahren und Korrekturroutinen, die seitens BSH zur Qualitätskontrolle entwickelt wurden (vgl. Endbericht BSH). Dementsprechend dienen die Standorte FN1 und FN3 als zuverlässige Referenz und die übrigen Standorte zum Vergleich.

Die Windgeschwindigkeit wurde auf 10 m Höhe über LAT mittels des logarithmischen Profils normiert:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \rightarrow u^{10} = u_z \cdot \frac{\ln(z_0^{-1} \cdot 10)}{\ln(z_0^{-1} \cdot z)}$$

mit $u(z)$ Windgeschwindigkeit in Höhe z , u_* als Schubspannungsgeschwindigkeit, $\kappa \approx 0,4$ von-Kármán-Konstante und z_0 als Rauigkeitslänge (typisch mit $z_0 \approx 0,0002 \text{ m}$ für mittelstarken Wind – vgl. Smith, S. D. (1988)).

Zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe wurden Scatterplots erstellt und sowohl lineare als auch quadratische Regressionsmodelle angewendet. Zusätzlich erfolgte eine saisonale Untergliederung der Daten in Quartale, um mögliche Variationen in der Wind-Wellen-Kopplung im Jahresverlauf zu identifizieren.

a) Ergebnisse aus Standortvergleich FN1 und NO1

FN1 und AV0 befinden sich in vergleichbarer Wassertiefe (ca. 28–30 m) und in geringem Abstand (~25 km), wodurch sie sich für eine direkte Vergleichsanalyse unter annähernd identischen Umgebungsbedingungen eignen. Aufgrund unvollständiger Winddaten an NO1 wurde auf einen direkten Abgleich der Windmessungen zwischen den Standorten verzichtet; stattdessen erfolgte eine Kopplung der H_s -Werte beider Stationen mit den Winddaten von FN1.

Die statistische Auswertung der Messdaten aus dem Jahr 2019 ergab einen klar ausgeprägten Zusammenhang zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit u in 10 m Höhe und der signifikanten Wellenhöhe H_s . Die zugrundeliegenden Zeitreihen wurden auf ein einheitliches 10-Minuten-Intervall interpoliert, wobei H_s über Boje (FINO1 – „FN1“) bzw. Radarpegel (Nordsee One – „NO1“) und u über Cup-Anemometer in 41 m Höhe (anschließend per logarithmischem Profil auf 10 m normiert) erfasst wurden.

Regressionsanalyse

Für beide Standorte wurde eine nichtlineare Regressionsanalyse durchgeführt, um den funktionalen Zusammenhang $H_s = f(u)$ zu bestimmen. Die beste Anpassung ergab sich für quadratische Polynome, was dem physikalisch begründeten, nichtlinearen Energieeintrag durch Windanregung entspricht. Die Regressionsgleichungen lauten:

$$H_{s_{FN1}} = 0,0059u^2 + 0,0563u + 0,6095$$
$$H_{s_{NO1}} = 0,0064u^2 + 0,0381u + 0,6186$$

Die zugehörigen Bestimmtheitsmaße lagen bei $R^2 > 0,90$ für beide Standorte. Diese hohe Regressionsgüte zeigt, dass der überwiegende Teil der Varianz in der beobachteten Wellenhöhe durch die Windgeschwindigkeit erklärt werden kann – zumindest unter den gegebenen, fetchreichen Offshore-Bedingungen der Deutschen Bucht.

Zur Einordnung: Der quadratische Term αu^2 entspricht dabei dem dominanten Anteil des kinetischen Energieeintrags in das Wellenfeld, da die vom Wind übertragene Leistung proportional zu u^3 ist, der Effekt auf H_s aber nach gängiger Theorie meist mit u^2 korreliert (z. B. nach Snyder et al., 1981; Cavaleri et al., 2012).

Vergleich der Standorte

Trotz unterschiedlicher Messtechnik und geringfügiger Unterschiede in der Wassertiefe zeigten die beiden Standorte nahezu identische Regressionsverläufe. Die Differenz zwischen den Kurven ist im Bereich kleiner bis mittlerer Windgeschwindigkeiten (< 10 m/s) vernachlässigbar. Bei höheren Windgeschwindigkeiten (> 15 m/s) steigt die Kurve für FINO1 etwas steiler an, was möglicherweise auf unterschiedliche fetchbedingte Anfachungsbedingungen oder systematische Unterschiede in der Datenerfassung zurückzuführen ist.

Die Differenz der Regressionskurven beider Standorte kann auch durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$\Delta H_s(u) = H_{s_{FN1}} - H_{s_{NO1}} = -0,0005 \cdot u^2 + 0,0182 \cdot u - 0,0091$$

Diese Differenz bleibt im gesamten untersuchten Wertebereich unter 0,25 m.

Saisonalität und Extremereignisse

Bei quartalsweiser Unterteilung zeigte sich eine signifikante saisonale Abhängigkeit. Im Winterhalbjahr (Q1, Q4) lagen sowohl Windgeschwindigkeit als auch H_s deutlich über dem Jahresmittel; gleichzeitig war die Streuung der Datenpunkte geringer. Im Sommerhalbjahr (Q2, Q3) trat eine stärkere Streuung auf, bei gleichzeitig flacherem Anstieg der Regressionskurven. Dies ist ein Hinweis auf eine geringere Energieübertragung und kürzere Einwirkdauern.

Zur Untersuchung saisonaler Unterschiede in der Kopplung zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe wurden Messdaten des Jahres 2019 für die beiden benachbarten Offshore-Standorte FINO1 und NO1 quartalsweise ausgewertet. Die Analyse basiert auf punktdichten Darstellungen (2D-Histogramme) der gemeinsam auftretenden Wertepaare von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe im 10-Minuten-Intervall. Farbskalen codieren dabei die relative Häufigkeit der Messwerte. Die saisonale Unterteilung ermöglicht eine differenzierte Betrachtung meteorologisch geprägter Muster und deren Einfluss auf die Seegangsbildung.

Über alle Jahreszeiten hinweg ist eine klare positive Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe erkennbar. Mit zunehmendem Wind steigen die beobachteten Wellenhöhen an, wobei sich Lage, Streuung und Ausprägung der Dichtekerne deutlich zwischen den Quartalen unterscheiden.

Im *Winterquartal (Januar–März)* zeigen beide Standorte eine breite Verteilung mit erhöhter Streuung bis in hohe Wertebereiche (Windgeschwindigkeiten > 20 m/s, Wellenhöhen > 6 m). Die Wind-Wellen-Kopplung ist in dieser Periode besonders deutlich ausgeprägt, mit einem ausgeprägten Maximum der Dichte bei mittleren bis hohen Windgeschwindigkeiten.

Das *Frühjahrsquartal (April–Juni)* ist durch eine kompakte Häufung niedriger Windgeschwindigkeiten (< 10 m/s) und geringer Wellenhöhen ($< 1,5$ m) gekennzeichnet. Extremwerte sind nahezu nicht vorhanden. Dies deutet auf eine meteorologisch ruhige Phase mit geringem Energieeintrag hin.

Im *Sommerquartal (Juli–September)* setzt sich das Muster des Frühjahrs weitgehend fort, wobei eine leicht erhöhte Streuung auftritt. Hohe Wind- oder Wellenereignisse bleiben auch in dieser Periode weitgehend aus, was auf eine weiterhin schwache Kopplung und limitierte fetch-abhängige Anfachung hinweist.

Das *Herbstquartal (Oktober–Dezember)* zeigt wiederum eine deutliche Zunahme von Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen. Die Verteilung ähnelt stark dem Winterquartal, wobei an FINO1 zum Teil höhere Wellenhöhen bei gleichen Windgeschwindigkeiten registriert wurden. Dies weist auf eine erneute Zunahme der Sturmaktivität sowie auf eine aktivere Seegangsbildung hin.

Im Vergleich der beiden Standorte zeigen sich konsistente Muster in allen Jahreszeiten. Geringfügige Unterschiede sind insbesondere im Bereich höherer Wellenhöhen feststellbar: FINO1 weist tendenziell etwas höhere Werte auf, was möglicherweise auf fetch-bedingte Unterschiede, Messunsicherheiten oder systematische Abweichungen infolge unterschiedlicher Sensorik zurückzuführen ist.

Insgesamt bestätigt die Auswertung die erwartete saisonale Dynamik: Während Herbst und Winter durch hohe Windintensität und ausgeprägten Seegang geprägt sind, dominieren im Frühjahr und Sommer ruhigere Wetterlagen mit schwächerer Kopplung. Diese Befunde unterstreichen die Bedeutung saisonal adaptierter Modelle zur Vorhersage von Seegangsbedingungen im operationellen Einsatzkontext.

Als herausragendes Extremereignis wurde das **Sturmtief „Benjamin“** im Januar 2019 identifiziert. Am 08.01.2019 wurden an FINO1 eine signifikante Wellenhöhe von 7,99 m und eine Windgeschwindigkeit von 21,88 m/s gemessen. Nordsee One registrierte an diesem Tag eine signifikante Wellenhöhe von max. $H_s = 8,22$ m. Solche Ereignisse markierten den oberen Randbereich der beobachteten Daten und bestätigten die Anwendbarkeit der quadratischen Regressionsform auch unter Extrembedingungen.

Bewertung der Regressionsform

Trotz der hohen Anpassungsgüte wurden auch Exponentialansätze und mehrgliedrige Polynome getestet. Letztere führten jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung der Regressionsgüte und erhöhten zugleich die Gefahr der Überanpassung. Der gewählte quadratische Ansatz erwies sich damit als robuster und zugleich physikalisch interpretierbar.

$$H_s(u) \approx au^2 + bu + c \quad \text{mit } a, b, c \in \mathbb{R}$$

Die Differenzierung der Regressionsfunktion liefert zudem die Sensitivität des Wellenwachstums gegenüber Änderungen der Windgeschwindigkeit:

$$\frac{dH_s}{du} = 2au + b$$

Für FINO1 ergibt sich so für $u = 15 \frac{m}{s}$:

$$\frac{dH_s}{du} = 2 \cdot 0,0059 \cdot 15 + 0,0563 \approx 0,2338 \text{ m/(m/s)}$$

Das bedeutet, dass bei starkem Wind bereits geringe Änderungen der Windgeschwindigkeit einen überproportionalen Einfluss auf H_s haben können – ein Aspekt, der insbesondere für kurzzeitige Fenster in der Einsatzplanung relevant ist.

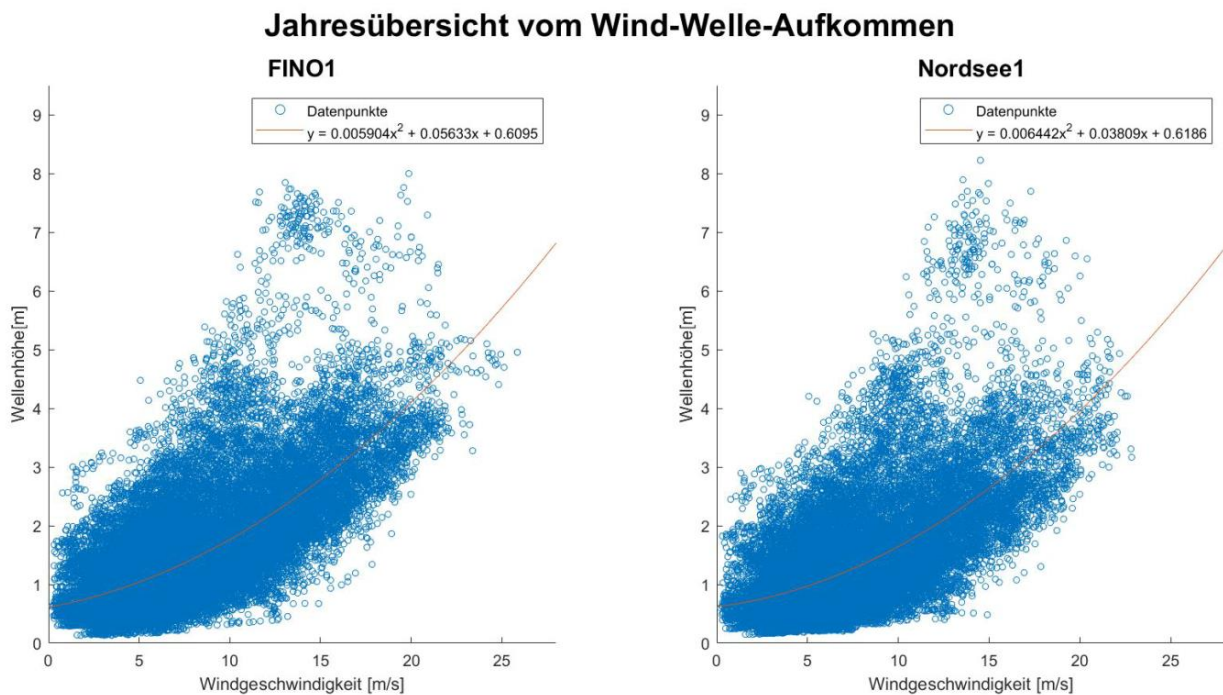


Abbildung 14 Korrelation der Windgeschwindigkeit und (sign.) Wellenhöhe an Standort FN1 und NO1 für 2019

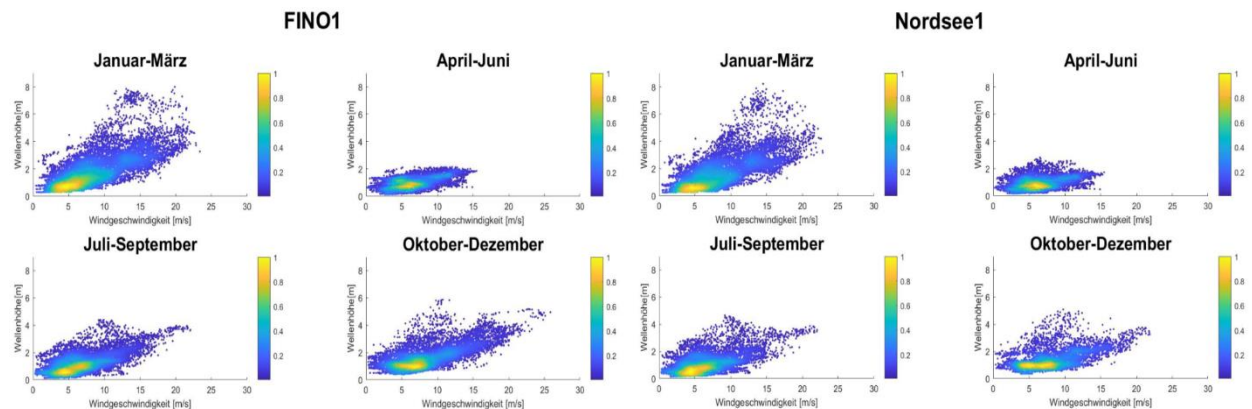


Abbildung 15 - Standortvergleich der saisonalen Korrelation zwischen sig. Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit

Die Ergebnisse zeigen, dass einfache quadratische Regressionsansätze auf Basis von Windgeschwindigkeiten ausreichend präzise Rückschlüsse auf den Seegangszustand zulassen – insbesondere in Phasen stabiler meteorologischer Anregung. Die sehr hohe Korrelation unterstreicht, dass die Windgeschwindigkeit eine dominierende Einflussgröße für H_s darstellt – zumindest in fetchreichen Offshore-Regionen wie der Deutschen Bucht. Die saisonale Varianz legt nahe, dass die Kopplung im Sommerhalbjahr aufgrund geringerer Einwirkdauer und Instabilität der Windfelder schwächer ausgeprägt ist. Zudem kann vermutet werden, dass im Sommer sekundäre Einflüsse wie Strömungen oder Richtungsmissweisung stärker zum Tragen kommen. Diese Aspekte wurden in der vorliegenden Fallstudie jedoch nicht analysiert. Die hohe Übereinstimmung zwischen zwei unterschiedlichen Messsystemen und Standorten deutet darauf hin, dass das entwickelte Regressionsmodell auch auf benachbarte Bereiche übertragbar ist, dies ist eine Voraussetzung für die flächige Anwendung im Rahmen des Seegangsmoduls.

II-1.3.1.5 Reaktionszeit und Dauerabhängigkeit bei Sturmereignissen (2007–2020)

Für die Untersuchung der Reaktionsdynamik des Seegangs auf meteorologische Anregung wurde ein mehrjähriger Datensatz aus stationären Messungen an einem Offshore-Standort in der Deutschen Bucht ausgewertet. Der Fokus lag auf Sturmereignissen mit signifikant erhöhten Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen. Zur Auswahl geeigneter Ereignisse wurden Zeitintervalle identifiziert, in denen die Windgeschwindigkeit über einen definierten Schwellenwert anstieg und gleichzeitig ein ausgeprägtes Maximum der signifikanten Wellenhöhe auftrat.

In einem ersten Schritt wurden Zeitreihen von Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe analysiert. Der Abstand zwischen dem Zeitpunkt des Windmaximums und dem Zeitpunkt des Wellenmaximums wurde als zeitlicher Versatz τ_{lag} definiert. Zur Quantifizierung der Abhängigkeit wurde der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen u und H_s sowohl mit Originaldaten als auch mit zeitsynchronisierten (zeitlich verschobenen) Wellenwerten berechnet.

Ein ergänzender Schwerpunkt lag auf der Dauer der Windanregung. Hierzu wurden pro Ereignis die kumulative Einwirkdauer des Windes über einem Schwellenwert und die Dauer des erhöhten Seegangs betrachtet. Ziel war es, zu analysieren, ob die Stärke der Wind-Wellen-Kopplung eher durch die Windspitze oder durch die Dauer des Ereignisses beeinflusst wird.

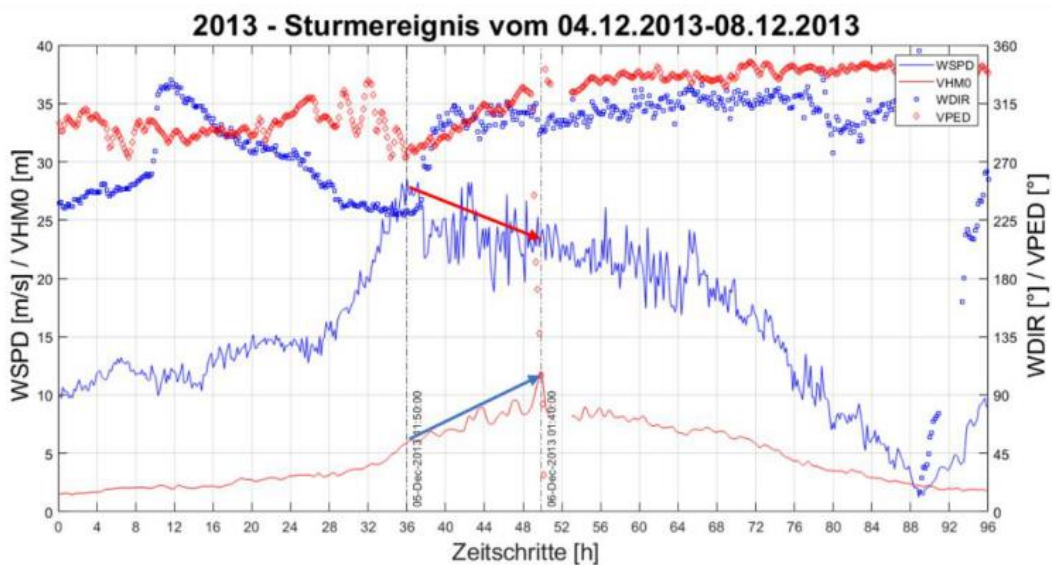


Abbildung 16 Abnahme der Windgeschwindigkeit (roter Pfeil) und gleichzeitige Zunahme der sig. Wellenhöhe (blauer Pfeil)

Die Analyse ergab, dass zwischen dem Windmaximum und dem Maximum der signifikanten Wellenhöhe ein deutlicher zeitlicher Versatz besteht. Die Reaktionszeit des Seegangs lag je nach Ereignis zwischen ca. 1 und 6 Stunden, mit einem Mittelwert von etwa 2 bis 4,5 Stunden.

Die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe war in der Regel moderat bis hoch. Eine systematische Verbesserung der Korrelation wurde festgestellt, wenn der zeitliche Versatz τ_{lag} berücksichtigt wurde. Nach der zeitlichen Synchronisierung der Wellen- zu den Winddaten stieg der Pearson-Korrelationskoeffizient in nahezu allen Fällen an.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Höhe und Dauer des Seegangs weniger stark mit kurzzeitigen Windspitzen, sondern deutlich ausgeprägter mit der Einwirkdauer des Windes korreliert. Ereignisse mit hohen, aber kurzen Windimpulsen führten nur zu temporären Anstiegen der Wellenhöhe. Umgekehrt konnte bei langanhaltendem, mäßig starkem Wind eine kontinuierliche Zunahme und ein längerer Erhalt hoher H_5 -Werte beobachtet werden.

Tabelle 3 - Angabe der Verzögerung und R²-Score ausgewählter Sturmereignisse

| | 17.01.07- 20.01.07 | 15.10.09- 18.10.09 | 11.11.10- 14.11.10 | 27.10.13- 30.10.13 | 04.12.13- 08.12.13 | 28.11.15- 01.12.15 | 25.12.16- 28.12.16 | 28.10.17- 31.10.17 |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Differenz [h] | 02:20 | 03:50 | 02:50 | 00:10 | 12:50 | 09:00h | 07:30 | 05:10 |
| R ₁ | 0.4140 | 0.8147 | 0.7599 | 0.7055 | 0.7953 | 0.5808 | 0.6602 | 0.8661 |

Die Ergebnisse unterstreichen die Trägheit des Seegangssystems in der Reaktion auf atmosphärische Anregung. Der zeitliche Versatz zwischen Wind- und Wellenmaximum ist in der Analyse deutlich erkennbar und bestätigt, dass Seegang nicht unmittelbar, sondern mit Verzögerung auf Windänderungen reagiert. Die Berücksichtigung dieses Effekts ist insbesondere für operationelle Prognosemodelle und logistikbezogene Entscheidungshilfen essenziell.

Die Analyse der Anregungsdauer zeigt, dass nicht die maximale Windgeschwindigkeit allein für die Ausprägung des Seegangs verantwortlich ist, sondern vielmehr die Zeit, über die eine bestimmte Schwelle überschritten wird. Damit rückt die Winddauer als Steuergröße für den Energieeintrag in den Vordergrund. Dies ist insbesondere für die Modellierung des Wachstums von Windsee von Bedeutung.

Für die praktische Anwendung ergibt sich die Notwendigkeit, Prognose- und Bewertungssysteme, um eine Zeitverzögerungskomponente zu erweitern. Die gleichzeitige Auswertung von Winddaten mit Echtzeit-Seegangsinformationen, ohne Berücksichtigung des systematischen Lag, kann zu Fehleinschätzungen führen – insbesondere bei der Planung von Einsatzfenstern für Offshore-Aktivitäten.

II-1.3.1.6 Theoretische Rahmung und Vergleich mit numerischen Verfahren

Die Wind-Wellen-Korrelation lässt sich nicht nur empirisch beobachten, sondern ist auch aus physikalischer Sicht durch fundamentale Prozesse der Energieübertragung erklärbar. Die Anfachung von Windsee ist abhängig von Windgeschwindigkeit, Einwirkdauer und der effektiven Anströmstrecke (Fetch). In realen Offshore-Situationen wird dieser Zusammenhang jedoch zusätzlich durch Strömungsbedingungen, lokale Topografie, atmosphärische Stabilität und Richtungsversatz beeinflusst.

In konventionellen numerischen Seegangsmodellen wie SWAN (Simulating WAVes Nearshore) oder dem operationellen WAM-Modell (WAVE Model) des Deutschen Wetterdienstes werden diese Wechselwirkungen modellhaft beschrieben. Dabei erfolgt die Wellenentwicklung auf Basis spektraler Energieansätze unter Berücksichtigung von Windinput, Dissipation und nichtlinearem Energietransfer. Diese Modelle sind in der Lage, Seegang unter Windanregung realitätsnah zu prognostizieren – setzen dafür jedoch vollständige meteorologische Felder (Windvektor) und im Fall des CWAM-Modells auch Strömungs- und Wasserstandsfelder voraus.

Im Vergleich zur rein datenbasierten Analyse (Fallstudien A & B) ergibt sich damit ein Spannungsverhältnis zwischen modellhaft abgeleiteter Wellenentwicklung und empirisch beobachteter Kopplung:

a) Vergleich mit numerischen Modellen

1. Funktionale Abbildung der H_s Entwicklung

Die empirisch beobachtete quadratische Abhängigkeit von H_s in Funktion der Windgeschwindigkeit entspricht qualitativ der idealisierten Fetch-begrenzten Windseeentwicklung in den numerischen Modellen. Im WAM-Ansatz wird dieser Zusammenhang über parametrisierte Windinput-Formeln abgebildet (z. B. Janssen- oder Komen-Formeln), deren Verhalten bei konstantem Wind über idealisierten Fetchlängen qualitativ vergleichbar ist.

Dennoch zeigen sich Unterschiede: Während die Regressionsmodelle in der datenbasierten Analyse zeitunabhängig sind, modellieren SWAN und WAM den Seegang als dynamisches Gleichgewicht mit transitorischen Anpassungen – insbesondere relevant für Kurzzeitereignisse.

2. Zeitverzögerung des Seegangs

Die in Fallstudie B identifizierten Reaktionszeiten zwischen 2–4,5 h nach Windmaximum sind in numerischen Modellen implizit enthalten, da der Seegang dort kontinuierlich über die Energiebilanzformel entwickelt wird. Allerdings wird der zeitliche Verlauf in Modellen meist nicht explizit als Lag (τ_{lag}) analysiert. Für die Modellvalidierung gegenüber Messdaten ist jedoch gerade dieser Effekt wesentlich, da bei einem fehlenden oder falschen Phasenbezug (z. B. in operationalen Prognosen) Einsatzentscheidungen auf Basis zeitlich unpassender Seegangsprognosen getroffen würden.

3. Räumliche Übertragbarkeit

Die empirische Analyse zeigt eine sehr hohe Standortübereinstimmung der Wind-Wellen-Kopplung, auch bei unterschiedlicher Messtechnik. In numerischen Modellen hängt die räumliche Konsistenz stark von der Auflösung und Qualität der Randbedingungen ab. Besonders in Küstennähe können Bathymetrie und lokale Windfehler zu erheblichen Abweichungen führen. Die Beobachtungen sprechen daher dafür, einfache datengestützte Regressionsansätze als zusätzliches Kontrollinstrument oder als Redundanz in Entscheidungssystemen einzusetzen.

4. Begrenzungen beider Ansätze

Empirische Regressionsmodelle sind nicht in der Lage, Richtungsinformationen, Dopplereffekte durch Strömung, oder Brechprozesse abzubilden. Umgekehrt benötigen numerische Modelle vollständige Eingangsdaten (u. a. Windvektorfeld, Strömung, Tiefe) und sind empfindlich gegenüber Eingabefehlern oder unzureichender Auflösung. Für den operationellen Einsatz bietet sich daher eine Kombination beider Ansätze an: numerische Modelle als flächenhafte Grundlage, ergänzt durch lokal validierte Regressionsansätze und Echtzeitbeobachtungen.

Der Vergleich mit numerischen Verfahren bestätigt die grundsätzliche Validität der empirisch beobachteten Wind-Wellen-Korrelation. Gleichzeitig unterstreicht er die Notwendigkeit, empirische Datenreihen

auch im Modellbetrieb regelmäßig zur Validierung heranzuziehen – insbesondere im Hinblick auf Reaktionszeiten und regional unterschiedliche Anfachungseffekte.

Die Verbindung aus messdatenbasierten und modellgestützten Methoden bietet dabei das größte Potenzial für robuste Entscheidungsgrundlagen in der Offshore-Planung. Die hier vorgestellten empirischen Erkenntnisse können perspektivisch zur Verbesserung der Parametrisierungen in Modellen wie WAM oder SWAN beitragen – etwa durch Ableitung dynamischer Anfachungskriterien oder adaptiver Lag-Parameter.

II-1.3.1.7 Ergebnisse und standortbezogene Unterschiede

Die Analyse der Wind-Wellen-Korrelationen zeigte sowohl übergreifende Muster als auch deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Standort, der Windrichtung und der Dauer atmosphärischer Forcierung. Insgesamt wurde eine nichtlineare, jedoch stabil nachvollziehbare Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe identifiziert.

Für den Großteil der analysierten Zeiträume ergab sich ein typischer Verlauf, bei dem die Wellenhöhe mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt, jedoch ab ca. 15 m/s eine Sättigungstendenz aufweist. Die exponentielle Regressionsform zeigte in den meisten Fällen eine bessere Anpassung als lineare Modelle¹. Dieses Verhalten ist konsistent mit Ergebnissen früherer Studien zur fetchlimitierten Seegangsbildung².

Die stärksten Korrelationen wurden unter folgenden Bedingungen beobachtet:

- westliche und nordwestliche Windrichtungen (Sektoren 240°–330°),
- Einwirkdauern ≥ 180 min,
- schwach moduliertes Strömungsregime (z. B. bei FINO1)³.

Standortspezifische Unterschiede

Die Analyse offenbarte signifikante Unterschiede in der Wind-Wellen-Kopplung zwischen den einzelnen Stationen. So zeigte der Standort FINO1, exponiert in westlicher Offshore-Lage, durchweg hohe Korrelationen zwischen Wind und H_s , insbesondere bei westlichen Windrichtungen. HEO und NOR hingegen wiesen eine deutlich höhere Streuung auf, was teilweise auf lokale Strömungseinflüsse und die geringere Tiefe bzw. komplexe Bathymetrie zurückgeführt werden kann.

Am Standort NOO wurde bei südöstlichen Windrichtungen eine signifikante Unterschätzung der Wellenhöhe im CWAM-Modell festgestellt, während die gemessenen Daten auf ein überproportionales Wachstum bei anhaltender Windpersistenz hinwiesen.

Einfluss der Einwirkdauer und Persistenz

Die Dauer des Windereignisses zeigte einen ausgeprägten Einfluss auf die Höhe der resultierenden Wellen. Bei kurzzeitigen, impulsartigen Ereignissen war das Seegangmaximum häufig deutlich geringer als bei gleichstarker, jedoch langanhaltender Windbelastung. Dieses Verhalten bestätigte sich auch durch die

Verzögerungsanalyse: bei langen Sturmphasen lag die mittlere Verzögerung zwischen Wind- und Wellenmaximum bei ca. 30–40 Minuten, während sie bei kurzzeitigen Ereignissen nur 10–20 Minuten betrug oder kaum systematisch auftrat.

Darüber hinaus wurden bei langanhaltenden Windbedingungen häufiger idealisierte Kopplungsverhältnisse beobachtet, bei denen Windrichtung und Wellenrichtung weitgehend übereinstimmten. Bei unsteady Windfeldern hingegen traten verstärkt Richtungsversätze und abrupte Umstellungen des Wellenfeldes auf.

II-1.3.1.8 Implikation und Anwendung

- Ableitung vereinfachter Übertragungsfunktionen zur Abschätzung der Wellenhöhe aus Windparametern.
- Integration der Ergebnisse in das Seegangsmodul zur Verbesserung flächiger Interpolationen.
- Bedeutung für die Bewertung der Einsatzbedingungen in der Offshore-Logistik sowie zur Kalibrierung numerischer Vorhersagemodelle.

Die im Rahmen der Wind-Wellen-Korrelationsanalyse gewonnenen Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die weiterführende Entwicklung datenbasierter Planungs- und Bewertungsinstrumente im Offshore-Bereich. Die identifizierten Zusammenhänge ermöglichen eine zielgerichtete Prognose von Seegangsparametern auf Basis meteorologischer Eingangsdaten, was sowohl für operationelle Anwendungen als auch für numerische Modellvalidierungen von hoher Relevanz ist.

Anwendung im Seegangsmodul

Die zuvor beschriebenen Regressionsbeziehungen wurden im Rahmen des Projekts in eine algorithmisch nutzbare Form überführt und dienen im Seegangsmodul als Grundlage für die flächige Interpolation von Seegangsrößen in der Deutschen Bucht. Hierbei werden für jeden Sektor und jede Persistenzklasse standortspezifisch ermittelte Übertragungsfunktionen verwendet, die kontinuierlich durch neue Daten aus dem Messnetzwerk aktualisiert werden.

Die ermittelten Korrelationen wurden darüber hinaus genutzt, um dynamische Skalierungsfaktoren zur Korrektur numerischer Vorhersagemodelle (CWAM) abzuleiten. Diese Faktoren werden automatisch berechnet, indem gemessene und modellierte Seegangswerte auf Sektor- und Standortebene verglichen und das Verhältnis in Form von Korrekturmatrizen gespeichert wird. Die daraus resultierenden Übersichtskarten zur aktuellen Seegangsverteilung und deren Abweichung vom Modell sind zentraler Bestandteil der operationellen Oberfläche des Seegangsportals.

Beitrag zur Offshore-Logistikplanung

Die verbesserten Korrelationen zwischen Wind und Seegang ermöglichen eine belastbarere Einschätzung der zu erwartenden hydrodynamischen Bedingungen auf See. Dadurch können Zeitfenster für Einsätze

von Crew Transfer Vessels (CTV) und anderen Arbeitsschiffen präziser abgeschätzt werden, insbesondere bei sich abzeichnenden Wetteränderungen. Der Richtungsversatz von Wind- und Wellenfeldern wurde hierbei als limitierender Faktor für Transferoperationen identifiziert.

Darüber hinaus liefern die analysierten Persistenzeffekte Hinweise auf das „Entkopplungsverhalten“ von Wind und Seegang. In Phasen nachlassender Windgeschwindigkeit bleibt der Seegang durch Trägheit noch längere Zeit erhöht – ein Aspekt, der bei der operativen Entscheidung über Abbruch oder Verschiebung von Einsätzen bislang oft unzureichend berücksichtigt wird.

Wissenschaftlicher Mehrwert und Modellintegration

Die im Projekt gewonnenen Standortmodelle bilden eine empirisch fundierte Basis zur Validierung und Kalibrierung numerischer Seegangmodelle. Die Ergebnisse werden daher auch für die Weiterentwicklung datengetriebener Ansätze (OpenRAVE_ML) genutzt. Perspektivisch soll eine Kombination aus Regressionsansätzen und ML-gestützten Verfahren zu verbesserten Kurzfristprognosen führen, bei denen sowohl Einwirkparameter (Wind, Strömung) als auch lokale Besonderheiten berücksichtigt werden.

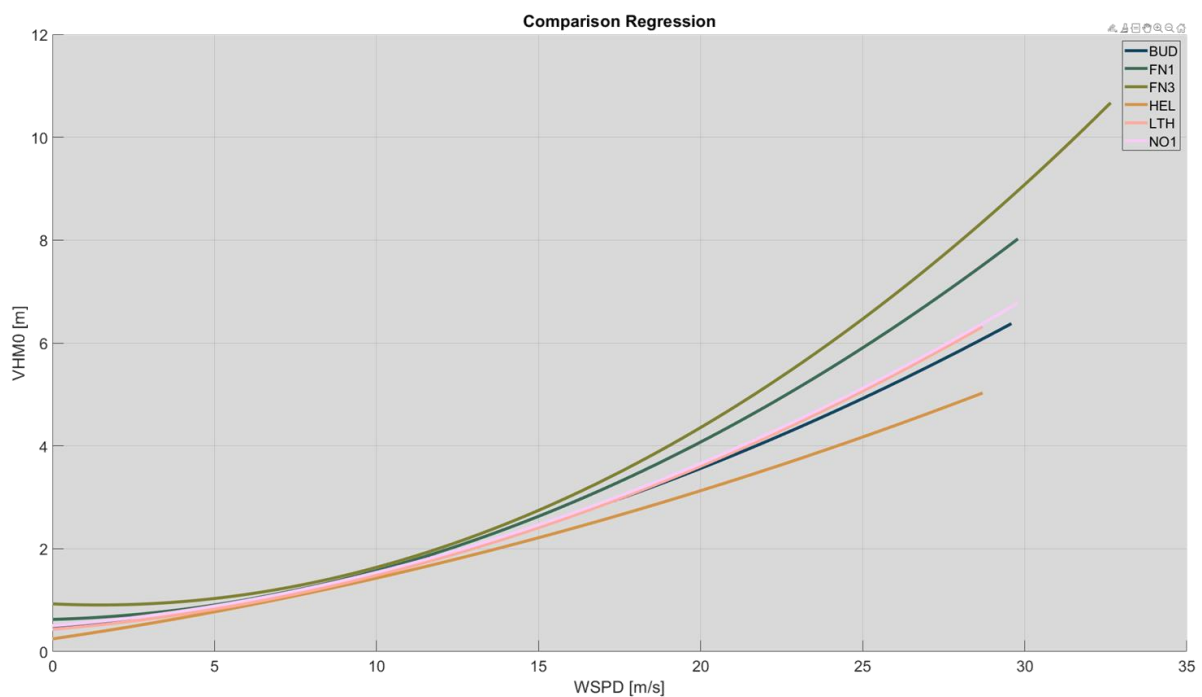


Abbildung 17 - Darstellung der Wind-Wellen-Regressionskurven an allen verfügbaren Standorten

II-1.3.2 Wellen-Strömungs-Interaktion

Im Rahmen des Arbeitspakets 4.2 wurde die Interaktion von Wellen und Strömungen (WCI – wave-current-interaction) unter Nutzung der räumlich differenzierten Messdatengrundlage analysiert. Die durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellten Daten zeichnen sich durch eine außergewöhnlich hohe zeitliche Konsistenz und die räumliche Abdeckung aus, wodurch eine fundierte Analyse der dynamischen Prozesse in der deutschen Nordsee ermöglicht wurde.

Das Verständnis der Wellen–Strömungs-Interaktion ist sowohl aus ingenieurtechnischer als auch aus ozeanographischer Sicht von Bedeutung. Relevanz besteht insbesondere im Hinblick auf die morphodynamische Entwicklung küstennaher Bereiche, die hydrodynamische Belastung auf maritime Infrastrukturen sowie die realitätsnahe Modellierung gekoppelter Strömungs- und Wellenprozesse. Ein häufig beschriebener Effekt tritt bei mitlaufender Strömung auf: Die Wellen erfahren eine Streckung ihrer Wellenlänge bei annähernd konstanter oder abnehmender Wellenhöhe, was zu einer Reduktion der Wellensteilheit führt. Da die Steilheit $S = \frac{H}{\lambda}$ ein sensibler Indikator für die Transformation des Seegangs ist, lassen sich aus ihrer zeitlichen Dynamik Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden hydrodynamischen Größen und deren Wechselwirkungen ziehen.

Die Messung der Wasseroberflächenauslenkung im offenen Gewässer stellt jedoch eine Überlagerung zahlreicher physikalischer Prozesse dar, deren isolierte Betrachtung im natürlichen Systemkontext nur begrenzt möglich ist. Zu den relevanten Einflussgrößen zählen unter anderem lokale Wassertiefenvariationen, Bodenrauigkeit, Änderungen im atmosphärischen Windfeld, die Ausbreitung von Dünung sowie großskalige Transportprozesse wie Tide- und Residualströmungen. Darüber hinaus wirken dichtegetriebene Strömungen infolge thermohaliner Gradienten sowie kleinräumige, hochfrequente Prozesse wie Turbulenz, Wirbelbildung und -ablösung. Diese Vielzahl gleichzeitiger Effekte bedingt eine hohe Komplexität des Gesamtsystems, die eine differenzierte und methodisch kontrollierte Analyse der WCI-Prozesse erfordert.

Trotz dieser systemimmanenten Komplexität lassen sich durch geeignete statistische Auswertungsverfahren – insbesondere der Wellensteilheit über charakteristische Zeitfenster – systematische Modulationen erkennen. Im vorliegenden Datensatz konnten Phasenbeziehungen zwischen signifikanten Steilheitswerten und dem Tidezyklus identifiziert werden, die auf einen strömungsinduzierten Einfluss auf das Seegangsverhalten hinweisen. Dabei zeigt sich eine Richtungsabhängige Modulation der Wellenfelder, insbesondere bei gegenläufigen Strömungsbedingungen markant erhöhte Steilheiten, die in der Folge potenziell zu erhöhten dynamischen Belastungen auf küstennahe Infrastrukturelemente führen. Dies korrespondiert mit bekannten Effekten wie einer erhöhten Impulsübertragung durch steilere Einzelwellen und größeren Druckgradienten.

Im Zentrum der durchgeführten Untersuchungen stand die systematische Analyse der Interaktion zwischen Wellen und Strömungen in der Deutschen Bucht. Ziel war es, den Einfluss strömungsbedingter Modifikationen auf das Seegangsverhalten zu quantifizieren und die resultierenden physikalischen Mechanismen zu identifizieren. Dabei wurde insbesondere die richtungsabhängige Veränderung der Wellensteilheit unter dem Einfluss der dominanten M2-Tide betrachtet. Die resultierenden Erkenntnisse sollen eine

verbesserte Grundlage für numerische Modellierungen sowie für die operative Auslegung von Offshore-Logistikprozessen schaffen.

II-1.3.2.1 Theoretische Hintergründe zur Interaktion zwischen (Tide-)Strömung und Wellen

Ozeanische Gezeiten werden definiert als das periodische Ansteigen (Flut) und Absinken (Ebbe) des Meeresspiegels, das von horizontalen Strömungen begleitet wird und im Wesentlichen durch das Zusammenwirken von Gravitations- und Zentrifugalkräften im System aus Mond, Erde und Sonne erzeugt wird. Diese Kräfte entstehen aus der Gravitationsanziehung von Mond und Sonne sowie aus der Zentrifugalbeschleunigung infolge der Umlaufbewegung der Erde um das Baryzentrum, den gemeinsamen Schwerpunkt der Erde-Mond- bzw. Erde-Sonne-Systeme. Das Zusammenspiel dieser Kräfte führt zu einer Verformung der Ozeanoberfläche, wobei Gezeitenwölbungen auf den der Anziehung zugewandten und abgewandten Seiten der Erde entstehen. Die relativen Größen von Gravitations- und Zentrifugalkomponenten hängen von den Eigenschaften der beteiligten Himmelskörper, etwa ihrer Masse und räumlichen Verteilung, sowie von den Abständen zwischen ihnen ab. Im Mittel sind die Abstände so beschaffen, dass sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Anziehung und Trägheit einstellt, das die Grundlage für die Entstehung astronomischer Gezeiten bildet. Neben der Anziehungskraft des Mondes übt auch die Sonne eine messbare Gezeitenkraft auf die Ozeane der Erde aus. Obwohl die Sonnenmasse etwa 27×10^6 -mal größer ist als die des Mondes, führt ihr deutlich größerer Abstand zur Erde zu einem wesentlich kleineren Gravitationsgradienten. Folglich beträgt der solare Gezeiteffekt etwa die Hälfte der lunaren Tide, bleibt jedoch dynamisch relevant. Er erzeugt die halbtägige solare Partialtide S2, die zu den beobachtbaren Meeresspiegelschwankungen beiträgt.

Die Gezeitenmodulation entsteht aus der Überlagerung der lunaren (M2) und der solaren (S2) Konstante. Diese Interaktionen werden durch die relativen Positionen von Erde, Mond und Sonne bestimmt. Befinden sich diese Himmelskörper in einer Linie – ein Zustand, der in der Astronomie als Syzygie bezeichnet wird –, so verstärken sich die Gravitationskräfte von Mond und Sonne gegenseitig. Syzygie tritt sowohl bei Neumond (Mond zwischen Erde und Sonne) als auch bei Vollmond (Erde zwischen Mond und Sonne) auf. Unter diesen Bedingungen kommt es durch konstruktive Interferenz zwischen M2 und S2 zu den sogenannten Springtiden, die durch besonders ausgeprägte Tidenhübe gekennzeichnet sind.

Im Gegensatz dazu steht die Konstellation bei erstem und letztem Viertel des Mondzyklus, wenn der Mond senkrecht zur Erde-Sonne-Achse steht. Hier wirken die Gravitationskräfte von Mond und Sonne teilweise gegeneinander. Diese Interferenz führt zu Nipptiden, die sich durch geringere Tidenhübe auszeichnen. Diese periodischen Modulationen zwischen S2 und M2 werden als Komposittiden bezeichnet. Mit ihnen sind die stärksten Strömungen während der Springtide und die schwächsten während der Nipptide verknüpft (Neill 2018).

Das Anziehungsgesetz zwischen zwei Körpern wird durch das Newtonsche Gravitationsgesetz beschrieben. Danach üben zwei Körper eine gegenseitige Anziehungskraft aus, die proportional zum Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands ist:

$$F = G \times (m_1 \times m_2) / r^2$$

mit F als Anziehungskraft zwischen den beiden Massen m_1 und m_2 , G als Gravitationskonstante ($6,674 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$) und r als Abstand zwischen den Massenzentren. Im Erde-Mond-System umkreisen beide Körper ihr gemeinsames Baryzentrum, das aufgrund der deutlich größeren Erdmasse etwa 1700 km unterhalb der Erdoberfläche liegt. Diese Umlaufbewegung erzeugt eine nach außen gerichtete Zentrifugalkraft, die im rotierenden Bezugssystem die Gravitationsanziehung zwischen Erde und Mond ausgleicht. Da die Gravitationskraft des Mondes jedoch mit der Entfernung variiert, ist dieses Gleichgewicht nicht an allen Punkten der Erde gleich stark. Aus den Unterschieden zwischen Gravitation und Zentrifugalkraft resultieren die gezeitenbildenden Kräfte, die die Ozeangezeiten antreiben (Neill 2018).

Das sogenannte Gleichgewichtsmodell der Gezeiten betrachtet die Ozeanoberfläche als stationär ellipsoide Deformation unter dem Einfluss von Mond und Sonne. Es erklärt prinzipiell das Auftreten von zwei Hoch- und zwei Niedrigwassern pro Tag, wenn die Erde unter den Gezeitenbergen hindurchrotiert. In der Realität stößt dieses Modell jedoch auf wesentliche Grenzen. Die Gezeitenwelle kann sich nicht beliebig schnell ausbreiten, sondern ihre Geschwindigkeit wird durch die Wassertiefe begrenzt. Sie folgt der Phasengeschwindigkeit langer Flachwasser-Schwerewellen, die sich als

$$c = \sqrt{g \times H}$$

darstellen lässt, wobei g die Erdbeschleunigung und H die Wassertiefe ist. Bei einer mittleren Ozeantiefe von rund 4500 m ergibt sich eine Phasengeschwindigkeit von etwa 200 m/s. Diese Geschwindigkeit ist deutlich geringer als die Rotationsgeschwindigkeit der Erde am Äquator von rund 465 m/s. Dadurch läuft die Gezeitenwelle der astronomischen Anregung hinterher. In seichten Küstenmeeren – wie der Deutschen Bucht mit typischen Tiefen von etwa 30 m – wird dieser Phasenversatz noch verstärkt. Hinzu kommt, dass Landmassen die freie Ausbreitung blockieren oder ablenken und dass das Modell die Erdrotation, insbesondere die Corioliskraft, vernachlässigt.

Die Corioliskraft lenkt bewegte Wassermassen auf der Nordhalbkugel nach rechts ab und bewirkt, dass Gezeitenwellen als sogenannte *Kelvin-Wellen* an Küsten entlanglaufen. Dadurch entstehen *amphidromische Systeme*, in denen die Gezeitenwelle gegen den Uhrzeigersinn rotiert und Knotenpunkte (Amphidromien) mit minimaler Amplitude aufweist. Für die Nordsee bedeutet dies, dass die M2-Gezeitenwelle entlang der Küsten geführt wird und in der Deutschen Bucht durch die flache, eingekerbte Topographie eine deutliche Verstärkung erfährt. In der Deutschen Bucht führen diese Bedingungen zu besonders ausgeprägten Spring-Nipp-Schwankungen, verstärkten Strömungen und asymmetrischen Strömungsprofilen, die durch die Ausbildung von Obertiden (M4, M6) zusätzlich verstärkt werden (Parker 1991; Le Provost 1991; Koch 2024).

Höher Harmonisch Partialtiden

Die Gezeitenbewegung lässt sich im Allgemeinen in eine endliche Anzahl N harmonischer Terme zerlegen, die als Konstituenten bezeichnet werden und nach ihren Perioden und Ursprüngen klassifiziert sind. Für die Deutsche Bucht wird das Gezeitenregime überwiegend durch die lunare halbtägige Hauptkonstituente M2 bestimmt. Diese resultiert aus der Gravitationsanziehung des Mondes und weist eine Periode von rund 12,42 Stunden auf.

Die Dominanz von M2 geht mit der Ausbildung von Obertiden einher, insbesondere M4 und M6, die durch nichtlineare Prozesse entstehen. Dazu gehören Bodenreibung, Flachwassereffekte und advective Terme (Parker, 1991). Diese Obertiden entsprechen Frequenzen, die ganzzahlige Vielfache der primären astronomischen Konstituenten darstellen. Sie werden nicht durch externe Kräfte erzwungen, sondern entstehen intern durch nichtlineare Wechselwirkungen der Tiden.

Wie Studien von Le Provost (1991) zeigen, spielen die Obertiden M4 und M6 eine wesentliche Rolle bei der Verstärkung der Gezeitenasymmetrie und der Erhöhung von Netto-Transporten – insbesondere in seichten, stark reibungsdominierten Küstenmeeren wie der Deutschen Bucht.

Zur Berechnung und Vorhersage der Gezeitenbewegung kann das Signal als Überlagerung einer bestimmten Anzahl harmonischer Terme dargestellt werden. Die zeitliche Variation der Wasserstandshöhe η der n -ten Konstituente lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\eta_n = a_n \cos(\omega_n t - g_n)$$

wobei a_n die Amplitude der n -ten Konstituente, ω_n ihre Kreisfrequenz (z. B. für M2) und g_n den Phasenversatz zu einem Referenzpunkt (z. B. FINO1) bezeichnet.

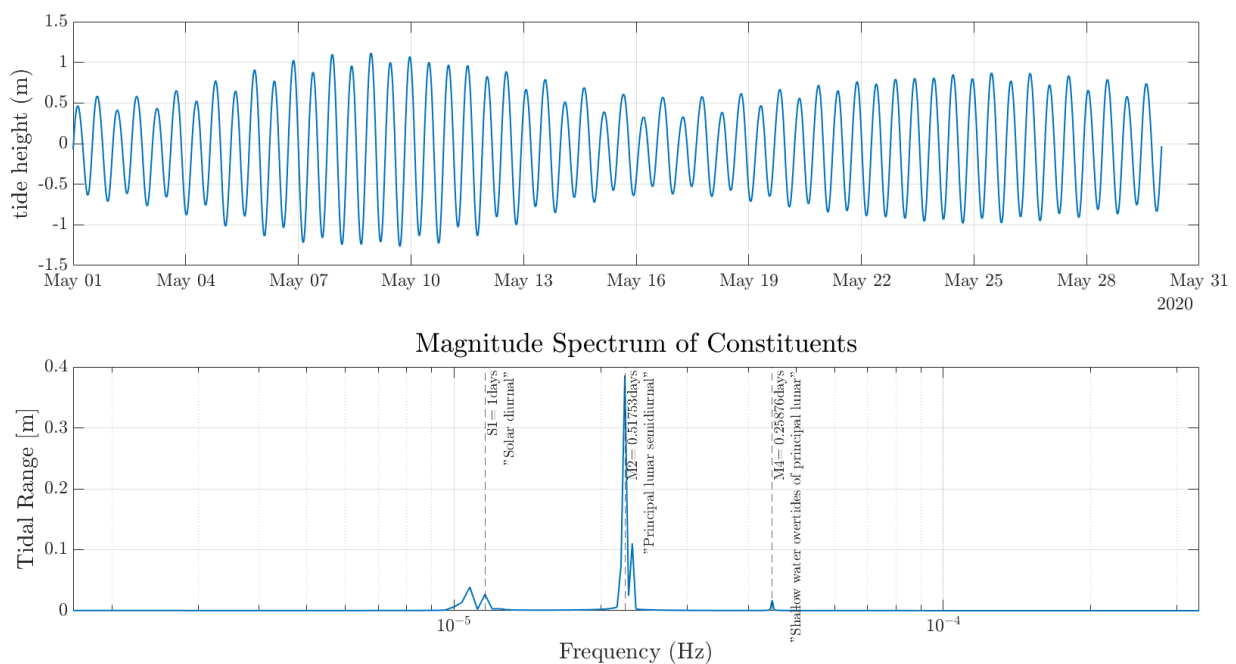


Abbildung 18 - Exemplarische Zeitreihe des Tidehubs an Standort FN1; Spektrale Darstellung des Signals mit Indikation der maßgebenden Partialtide-Frequenzen S1, M2 und M4 [eigene Darstellung]

II-1.3.2.2 Erfassung wesentlicher Wellenparametern

In diesem Abschnitt wird die Herleitung der verwendeten Seegangparameter beschrieben. Seegangparameter sind physikalische Größen, welche den Seegang beschreiben. Diese Parameter werden aus Messungen oder numerischen Modellen berechnet und geben Aufschluss z. B. über Höhe, Periode, Richtung und Energie der Wellen. Bei einer Seegangsanalyse unterscheidet man in der Regel zwischen:

- **Stochastische Seegangsanalyse**
- **Spektrale Seegangsanalyse**

Die verwendeten Parameter zur Beschreibung des Seegangs sind spektrale Seegangparameter. Bei der spektralen Seegangsanalyse wird Seegang als Überlagerung von harmonischen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Richtungen beschrieben (für ergänzte Informationen empfiehlt sich Malcherek, A. (2018)). Dabei wird das Vorgehen an orientiert. Bei der Verwendung von sogenannten *in situ* Messungen sind immer spektrale Parameter gemeint. Bojen erfassen die tatsächliche Wasserspiegelauslenkung, diese zeitlichen Messdaten werden jedoch mittels Fourier Transformation (FFT) in ein Frequenzspektrum übertragen. Dieses Frequenzspektrum spiegelt das Energiedichtespektrum $S(f)$ mit der Einheit $[m^2s]$ wider. Über dieses Energiedichtespektrum werden die benötigten spektralen Parameter berechnet. Analytische Lösungen des Energiedichtespektrums, ohne Messungen, wurden in der Ozeanographie näherungsweise durch die Phillips-, Pierson-Moskowitz- und JONSWAP-Funktion gebildet. Diese Funktionen sind exemplarisch für eine Frequenz von 0,1 Hz dargestellt.

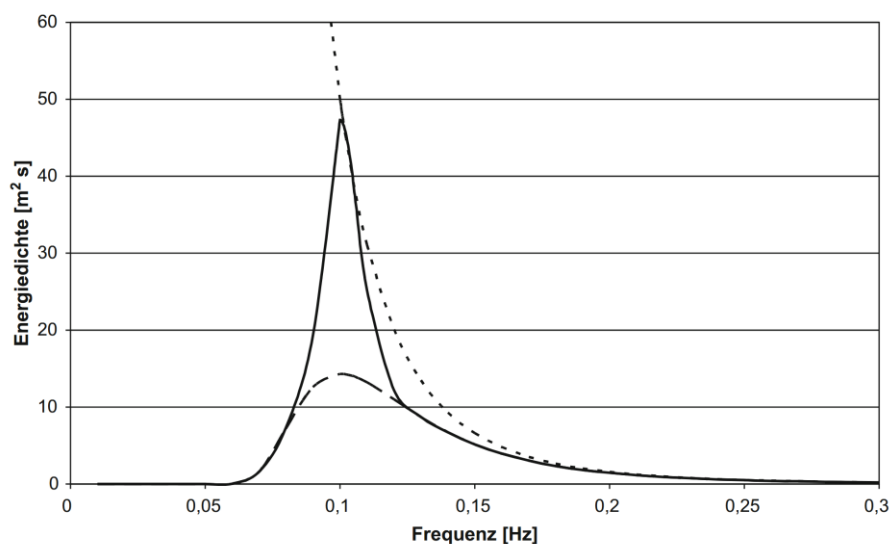


Abbildung 19 - Die Phillipsfunktion (gepunktet), das Pierson-Moskowitz-Spektrum (gestrichelt) und das JONSWAP-Spektrum (gurchgezogen) für eine Peakfrequenz $f_p = 0.1 \text{ Hz}$ [aus Malcherek, A. (2018)]

Dabei stellen die drei Funktionen eine Weiterentwicklung über die Zeit dar. Die Pierson-Moskowitz Funktion wird für voll entwickelten Seegang verwendet. Die in der Nordsee üblicherweise verwendete Funktion ist das Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), definiert für Seegang mit begrenzter Entwicklungszeit oder begrenztem Raum (Hasselmann et al., 1973).

Das JONSWAP Energiedichtespektrum wird wie folgt beschrieben:

$$S(f) = \left(\frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \right) \cdot \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma \exp \left(-\frac{(f-f_p)^2}{(2\sigma^2 f_p^2)} \right)$$

wobei α der sogenannte Phillipsfaktor, g die Gravitationskonstante, f die Frequenz, f_p die Peakfrequenz, γ der Überhöhungsfaktor und σ die Standardabweichung ist. Nach den JONSWAP Messungen ist der Überhöhungsfaktor in der deutschen Nordsee $\gamma = 3,3$ und für die Standardabweichung gilt:

- $\sigma = 0,07$ für $f \leq f_p$
- $\sigma = 0,09$ für $f > f_p$

Das n-te Moment des Energiedichtespektrums berechnet sich über:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df$$

Die signifikante Wellenhöhe H_s spiegelt die mittlere Wellenhöhe des oberen Drittels der höchsten Wellen wider. Über das Energiedichtespektrum lässt sich die spektrale signifikante Wellenhöhe mit dem nullten Moment berechnen:

$$H_s = VHM0 = 4 \sqrt{m_0}; \quad \text{mit } m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$$

Die spektrale Peakperiode T_p beschreibt die Periode der energiereichsten Wellen und wird über den Kehrwert der Peakfrequenz berechnet:

$$T_p = VTPK = \frac{1}{f_p}$$

Eine kurze Peakperiode deutet in der Regel auf lokal erzeugten Windseegang hin, während lange Perioden auf Dünung (engl. swell) hindeuten. Im weiteren Verlauf wird die Peakperiode mit VTPK bezeichnet.

Eine weitere relevante Periodengröße ist die Nullpunktperiode (*zero-crossing period*). Sie leitet sich aus der stochastischen Bewertung des Seegangs auf Basis von Zeitreihenanalysen ab. Dabei werden Wellen als Abschnitte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen der Wasserspiegelauslenkung definiert. Für jeden Nulldurchgang kann die jeweilige Wellenperiode und -länge bestimmt werden. Spektral lässt sich die Nullpunktperiode annähernd durch die Beziehung der Spektralmomente m_0 und m_2 ausdrücken:

$$T_z \approx VTM02 = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

Die spektrale mittlere Wellenrichtung θ_m beschreibt die über das gesamte Energiedichtespektrum gemittelte Wellenrichtung. Das Energiedichtespektrum $S(f, \theta)$ hängt dabei von Frequenz und Richtung ab.

Die Momente ergeben sich zu:

$$m_{1x} = \int S(f, \theta) \cos(\theta) d\theta df$$

$$m_{1y} = \int S(f, \theta) \sin(\theta) d\theta df$$

Daraus folgt für die mittlere Wellenrichtung

$$\theta_m = VMDR = \arctan\left(\frac{m_{1y}}{m_{1x}}\right)$$

Im weiteren Verlauf wird die spektrale mittlere Wellenrichtung mit VMDR bezeichnet.

Die spektrale Peakwellenrichtung θ_p beschreibt die Richtung der energiereichsten Wellen bei der Peakfrequenz f_p , und errechnet sich aus:

$$m_{1x}(f_p) = \int S(f_p, \theta) \cos(\theta) d\theta$$

$$m_{1y}(f_p) = \int S(f_p, \theta) \sin(\theta) d\theta$$

Daraus folgt für die Peakwellenrichtung:

$$\theta_p = VPED = \arctan\left(\frac{m_{1y}(f_p)}{m_{1x}(f_p)}\right)$$

II-1.3.2.3 Methodisches Vorgehen

Die Analyse beruhte auf einem mehrstufigen methodischen Aufbau, der sowohl klassische Zeitreihenstatistiken als auch spektrale Verfahren integriert. Zentrales Analyseinstrument war die signifikante Wellensteilheit, welche als sensitiver Indikator für strömungsinduzierte Modifikationen im Wellenfeld diente. Die Wellensteilheit wurde vorzugsweise unter Verwendung der Nullpunktperiode berechnet, da sich bei alternativen Perioden (z. B. Peakperiode) keine konsistente Abhängigkeit zu Strömungsgrößen herstellen ließ. Die Seegangspanamter werden vom BSH in CMEMS Code angegeben, welche als Standard in der Bearbeitung verwendet wurden. Auf die hier verwendete signifikante Wellensteilheit S_s wird durch VSTS referenziert.

$$S_s = VSTS = H_{m0}/(gT_z^2/2\pi) \quad 1$$

mit H_{m0} als die spektrale signifikante Wellenhöhe, g die Gravitationskonstante und T_z die Nullpunktperiode. Zur Identifikation systemischer Zusammenhänge wurde die Steilheit über tidephasenaufgelöste Zeiträume hinweg ausgewertet. Durch ein geeignetes Filterverfahren wurden die tidebedingten Frequenzanteile extrahiert und deren zeitliche Dynamik analysiert. Ergänzend kamen spektralrichtungsaufgelöste Verfahren zum Einsatz, um insbesondere Doppler-Effekte sowie frequenzspezifische Energieverschiebungen im Zusammenhang mit Strömungseinflüssen zu erfassen.

Ein methodischer Fortschritt bestand in der automatisierten Partitionierung überlagerter Wellensysteme (Windsee vs. Dünung). Hierfür wurde die Maximum-Shannon-Entropy-Methoden (MEM-II nach Christie, 2024) auf Datawell-SPT-Daten angewendet und mit der Systemidentifikation nach Hanson & Phillips (2001) verknüpft. Ziel war eine dynamische Bestimmung der Grenzfrequenz zur präziseren energetischen Trennung beider Seegangskomponenten.

Zur gezielten Analyse der Strömungssituation wurden die zeitspezifischen Datenreihen hinsichtlich potenzieller Überlagerungseffekte untersucht. Grundlage hierfür bildeten vertikale Strömungsprofile (1 m-Bins).

Diese Methodenkombination ermöglichte eine präzise Klassifikation der Strömungssituation und erlaubte eine differenzierte Bewertung des Einflusses der Tidedrömung auf die beobachtete Wellenmodifikation.

II.1.3.2.3.1. Verwendete Daten und Messorte

Die Datengrundlage stützt sich primär auf qualitätsgesicherte in-situ-Messdaten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), insbesondere von der Messstation FINO1. Die hohe Datenverfügbarkeit an diesem Standort erlaubte eine tiefgehende methodische Entwicklung. Weitere Validierungsstandorte wie NOO und FN3 wurden zur Prüfung der Übertragbarkeit einbezogen, wobei sich hierbei standortspezifische Einschränkungen zeigten. Die Messreihen decken einen mehrjährigen Zeitraum ab und umfassen verschiedene meteorologisch-ozeanographische Jahreszeiten. Dadurch konnten sowohl saisonale Einflüsse als auch tidezyklische Modulationen im Seegang erfasst werden. Die zeitliche Auflösung der Seegangs- und Strömungsdaten liegt im Bereich von 30 Minuten, was eine detaillierte Analyse von tidebedingten Effekten ermöglicht.

Die Datenqualität wurde durch standardisierte Routinen zur Plausibilitätsprüfung und automatisierten Qualitätssicherung gewährleistet. Hier sei auf die DQK des Verbundpartners BSH verwiesen, der die Qualitätskontrolle eigens vor Bereitstellung durchführt und mit Qualitätskennzahlen (kurz: qf; quality-flag) versieht. Zusätzlich wurden im Projektverlauf eigene Fehlermeldungs- und Kontrollmechanismen implementiert, die u. a. auf Ausfälle der Datenübertragung oder ungewöhnliche Abweichungen zwischen in-situ-Daten und numerischer Modellvorhersage reagieren.

II-1.3.2.4 Standortbedingungen

Die Auswertung der Messdaten am Standort FN1 für den Zeitraum 2007–2021 zeigt eine klare Korrelation zwischen signifikanter Wellenhöhe (VHM0) und signifikanter Wellensteilheit (VSTS). Mit zunehmender

Steilheit treten systematisch höhere Wellenhöhen auf. Bei größerer Steilheit können daher nur solche Zustände auftreten, in denen auch die Wellenhöhe ansteigt. Die Datenverteilung bestätigt diesen Zusammenhang. Auffällig ist, dass die Streuung der Werte mit zunehmender Steilheit zunimmt. Dies weist darauf hin, dass weitere Prozesse beteiligt sind – beispielsweise unterschiedliche Seegangsanteile oder Strömungseinflüsse. Diese Korrelation belegt damit im ersten Schritt die erwartete Abhängigkeit von Wellenhöhe und Steilheit; eine differenzierte Betrachtung der Einflussfaktoren erfordert zusätzliche spektrale und richtungsaufgelöste Auswertungen

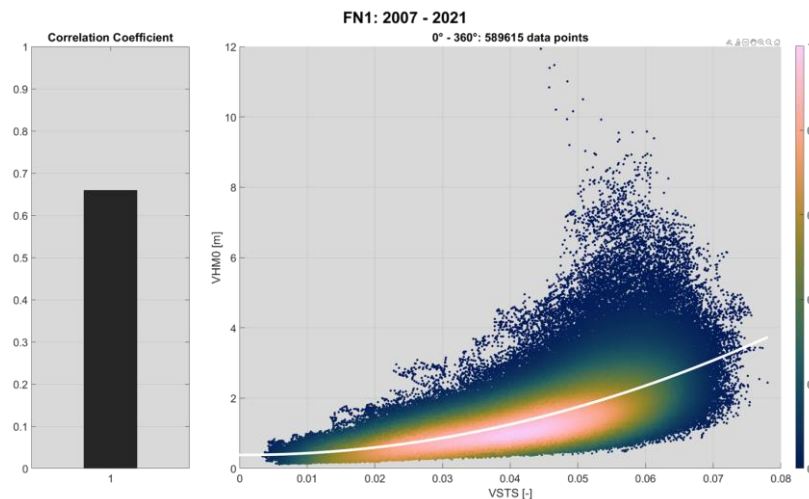


Abbildung 20 - Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe (hier $VHM_0 = H_{m_0}$) und signifikanter Wellensteilheit (VSTS) am Standort FN1 für den Zeitraum 2007–2021. Dargestellt sind alle verfügbaren Messwerte, ergänzt um den berechneten Korrelationskoeffizienten.

Um die Wellenbedingung saisonal einschätzen zu können, wurden die Daten monatlich aufgeteilt. Die nachfolgende Auswertung der monatlichen Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe VHM_0 (H_{m_0}) am Standort FN1 für den Zeitraum 2004–2021 zeigt eine deutliche saisonale Ausprägung. Für jeden Monat wurde ein Mittelwert pro Jahr berechnet, sodass die Boxplots die Verteilung über die gesamte Messreihe abbilden.

Die höchsten Wellenhöhen treten in den Wintermonaten Dezember bis Februar auf, mit Medianwerten oberhalb von 1,5 m und einzelnen Extremwerten über 2,5 m. Im Sommerhalbjahr (Mai bis August) liegen die mittleren Wellenhöhen hingegen deutlich niedriger, mit Medianen um etwa 1 m. Die Übergangsmo-nate (März/April sowie September/Oktobre) zeigen Zwischenwerte, die den saisonalen Wechsel vom winterlich geprägten Seegang zum ruhigeren Sommerzustand abbilden.

Die beobachtete Variabilität entspricht den saisonalen meteorologischen Bedingungen, bei denen in den Wintermonaten durch stärkere Windereignisse ein erhöhter Impulsübertrag vom atmosphärischen System auf die ozeanischen Prozesse erfolgt. Im Sommer schwächt sich dieser durch geringere Windgeschwindigkeiten ab, wodurch im Mittel niedrigere Wellen auftreten.

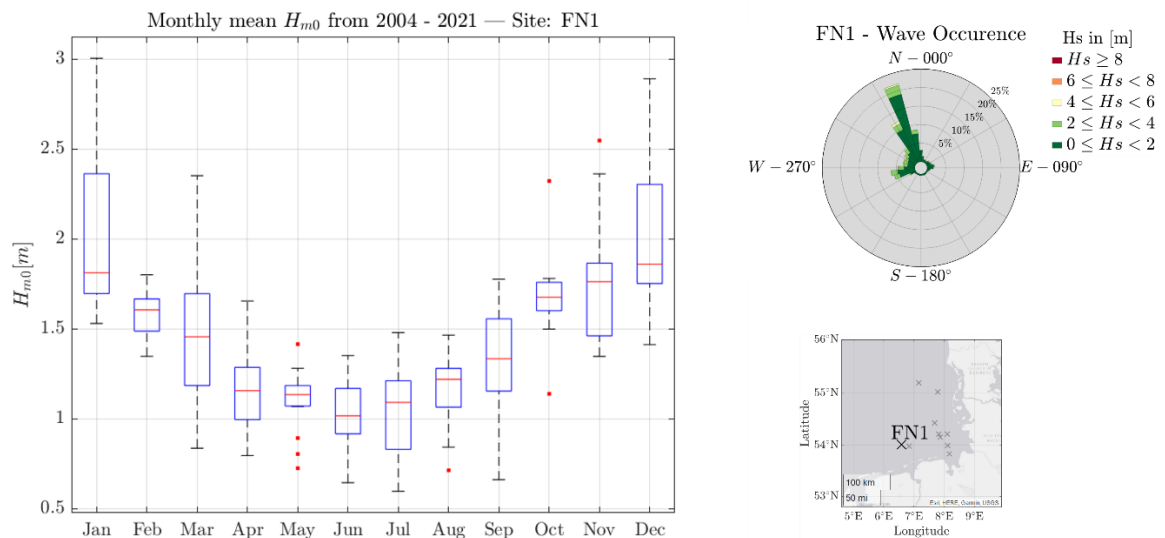


Abbildung 21 – Links: Monatliche Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe H_{m0} am Standort FN1 für den Zeitraum 2004–2021. Rechts: Auftretenshäufigkeit der Wellenrichtungen am Standort FN1. Geographische Verortung zur Verdeutlichung der Richtungsanteile.

Die Richtungsverteilung am Standort FN1 weist ein ausgeprägtes Maximum der Wellen aus nördlichen bis nordwestlichen Richtungen auf. In diesen Sektoren werden die höchsten Auftretenshäufigkeiten verzeichnet, die lokal Werte von über 20 % erreichen. Das Wellenklima an diesem Standort wird somit maßgeblich durch die großräumigen Windverhältnisse der Nordsee geprägt, bei denen West- bis Nordwestlagen dominieren. Wellen aus südlichen und östlichen Richtungen treten hingegen nur in geringem Umfang auf und bleiben jeweils unterhalb von etwa 5 %. Folglich kann den kleinräumigen Windfelder aus diesen Richtungen für die Seegangsbedingungen am Standort FN1 nur eine untergeordnete Bedeutung zugesprochen werden.

Die nachfolgenden Rosendiagramme zeigen die Standortbedingungen zusammengefasst an FN1. Die Strömungen verlaufen überwiegend entlang einer West-Ost-Achse, was auf den dominanten Einfluss der Tide hinweist. Die Wellen treten dagegen hauptsächlich aus nördlichen Richtungen auf und sind somit deutlich von der Strömungsrichtung entkoppelt. Der Wind zeigt ein breiteres Richtungspektrum, mit Häufungen aus westlichen bis südwestlichen Sektoren. Die Wellensteilheit variiert in Abhängigkeit des relativen Winkels zwischen Wellen- und Strömungsrichtung, wobei die höchsten Werte auftreten, wenn sich beide Systeme entgegenlaufen. Dies bestätigt den Zusammenhang zwischen Strömungseinfluss und Transformation des Wellenfeldes.

FN1

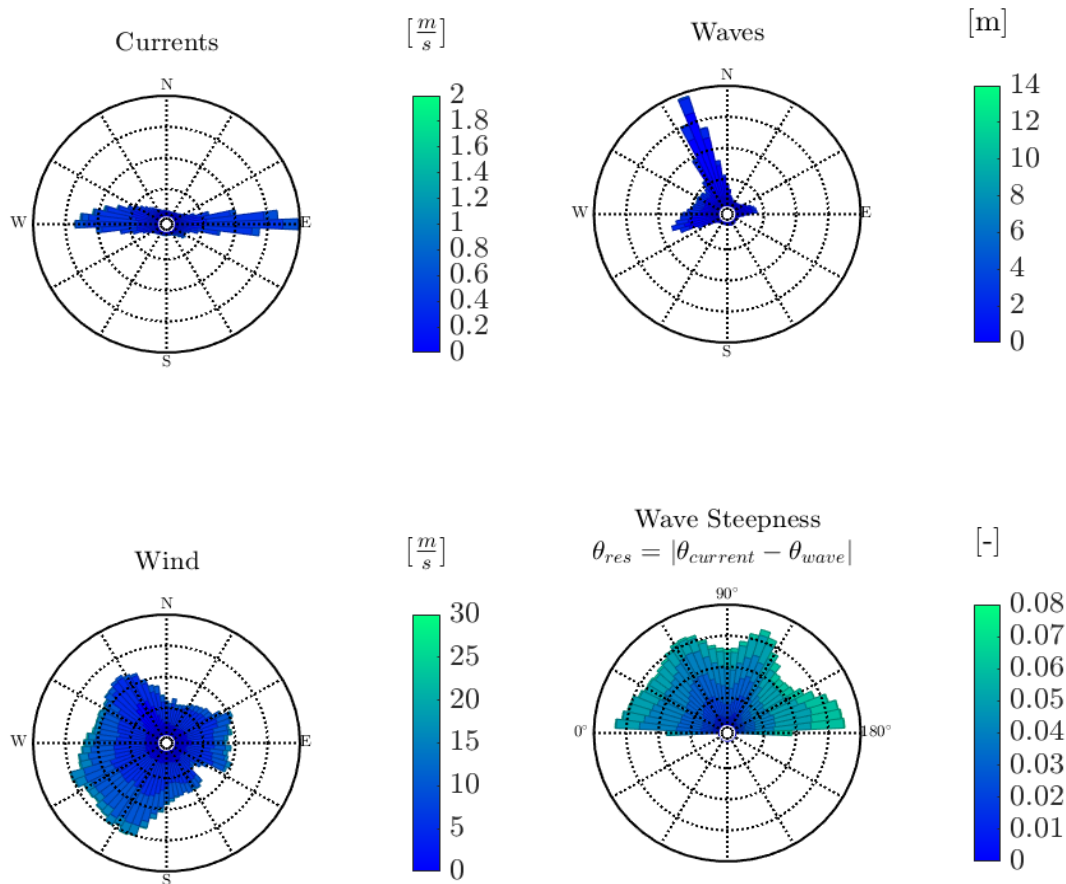


Abbildung 22 - FN1 Standortbedingungen in Rosendiagrammen

II.1.3.2.4.1. Strömungsverhältnisse

Zur Einordnung der Wellen-Strömungs-Interaktion wurde die Strömungsdynamik am Standort FN1 spektral analysiert. Hierfür wurde das Amplitudenspektrum der Strömungsgeschwindigkeit basierend auf ADCP-Messungen zwischen 2019 und 2021 mit insgesamt 40801 Datenpunkte gebildet. Die Beobachtungsdauer ist damit hinreichend groß, um die Tide-Konstituenten ausreichend zu trennen.

Zur Bewertung der Tidensignale in den Strömungsmessungen wurde das Amplitudenspektrum sowohl für signierte Geschwindigkeitskomponenten u , v als auch für die Betragsgeschwindigkeit $|U| = \sqrt{u^2 + v^2}$ berechnet. Die Zeitreihen liegen mit einem konstanten Zeitschritt von 30 min vor; die Frequenzachse wurde in Zyklen pro Tag (1/d) dargestellt, um die Doodson-Konstituenten direkt abbilden zu können [Doodson, 1921]. Vor der Signaltransformation (FFT) wurden ein lineares Detrending, Hann-Fensterung und eine konsistente Amplitudennormierung angewandt. Zur Bündelung der Varianz wurde (u, v) auf ein datengetriebenes Achsensystem (along, across) rotiert. Grundlage ist die Kovarianzmatrix C der zentrierten Komponenten. Der Rotationswinkel α ergibt sich aus der Eigenvektoranalyse:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_{uv}}{C_{uu} - C_{vv}}\right).$$

Die Transformation lautet demnach:

$$\mathbf{along} = (u - \bar{u}) \cos \alpha + (v - \bar{v}) \sin \alpha, \quad \mathbf{across} = -(u - \bar{u}) \sin \alpha + (v - \bar{v}) \cos \alpha.$$

Die along-Komponente repräsentiert die Hauptströmungsrichtung mit größter Varianz/Energie, across den quengerichteten Anteil.

Amplitudenspektrum signierter Komponenten

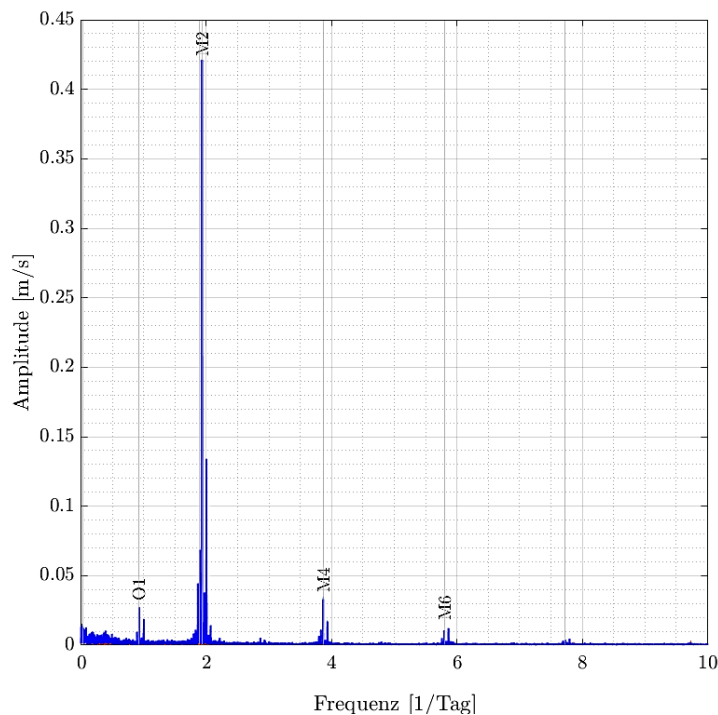


Abbildung 23 - Amplitudenspektrum der Strömungsgeschwindigkeit an drei Tiefen am Standort FN1 mit markierten Haupttidekonstituenten.

Die Zeitreihe wurde mit $f_s = 48 \text{ cpd}$ (30-min Raster) über $T = 850 \text{ d}$ ausgewertet; die spektrale Auflösung ermöglicht eine sichere Trennung nahe beieinanderliegender Tidekomponenten. Die FFT erfolgte mit Hann-Fenster und amplitudenkorrekter Normierung; die Amplituden sind damit in $[\text{m/s}]$ angegeben. Die aus der Kovarianzanalyse bestimmte Hauptströmungsachse liegt bei $\alpha = -84 \text{ deg}$ (entspricht 276 Grad West, da im System 0 Grad Nord, Azimut im Uhrzeigersinn) und stimmt mit der im Richtungs-Rosendiagramm ausgewiesenen Bevorzugung der West–Ost-Achse überein. Die starke Ausprägung der Anisotropie ($\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 19,84$) belegt eine deutlich elliptische, entlang der Hauptachse orientierte Tidenströmung. Im along-Spektrum ist M2 mit hoher Prominenz nachweisbar ($A_{M2} = 0,113 \text{ ms}^{-1}$, $SNR \approx 122$); der Varianzanteil im M2-Band beträgt 63,3 %. Die hohe Kohärenz zwischen along und der Ostkomponente im M2-Band ($|C|^2 = 0,96$) bestätigt die varianzbündelnde Rotation. Da eine signierte Komponente analysiert wurde, erscheint die M2-Grundschiwingung unverzerrt; eine

künstliche Überbetonung höher Harmonischer (wie im Betragsspektrum) tritt nicht auf. Insgesamt bestätigt die Darstellung eine überwiegend semidiurnale, entlang der Hauptströmungsachse organisierte Strömungsvariabilität; nicht-tidale Energieanteile sind im betrachteten Frequenzbereich nachgeordnet.

Damit kann im Weiteren die maßgebende Beeinflussung der M2-Komponente auf die Wellenfeldmodulation angenommen werden.

II.1.3.2.4.2. Modulation des Wellenfeldes

Zur Analyse der strömungsinduzierten Veränderungen im Wellenfeld ist es erforderlich, Zeiträume zu identifizieren, in denen die relevanten Parameter möglichst isoliert betrachtet werden können. Hierfür wurde ein Filterverfahren eingesetzt, das die Daten nach stabilen Wellenbedingungen durchsucht. Ein konstantes Wellenereignis definiert sich demnach, wenn die spektrale Hauptwellenrichtung (VPED) für >24h aus einer konstanten Richtung $\pm 10^\circ$ mit max. 3 Werten außerhalb des Richtungssektors kommt. Da die maßgebliche semidiurnale Tide am Messstandort FN1 zweimal täglich dreht, muss der Einfluss der sich ändernden Strömungsrichtung und -geschwindigkeit berücksichtigt in den Wellenmessungen sichtbar werden. Für die Validierung der Methodik ist eine Eingrenzung auf Zeiträume notwendig, in denen die Anwendung der Potentialtheorie gerechtfertigt ist. Als Kriterium dient hierbei die Bedingung:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \approx 0$$

Liegt keine signifikante Krümmung des Strömungsprofils vor, kann von einem irrotationalen Wellenfeld ausgegangen werden, wodurch die lineare Wellentheorie anwendbar bleibt. Dies ist insbesondere für eine Doppler-Korrektur auf Grundlage der Dispersionsrelation von Bedeutung, da diese nur unter Bedingungen geringer Nichtlinearität und schwacher Stokes-Effekte konsistente Ergebnisse liefert. Die Analyse von ADCP-Zeitreihen mit vertikal aufgelösten Geschwindigkeiten ermöglicht es, die Strömungskrümmung zu bestimmen und damit geeignete Zeiträume für die Anwendung dieser theoretischen Ansätze zu identifizieren. Treten hingegen deutliche Krümmungen auf, ist die Annahme eines potenziellen Wellenfeldes nicht mehr gegeben und die Anwendbarkeit der linearen Theorie eingeschränkt.

Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt ein Ereignis, das die zuvor definierten Kriterien zur Gültigkeit der Potentialtheorie erfüllt. Da bereits die M2-Tide als dominierende Strömungskomponente identifiziert wurde, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Strömung auf die Wellen maßgeblich durch die Tide geprägt ist.

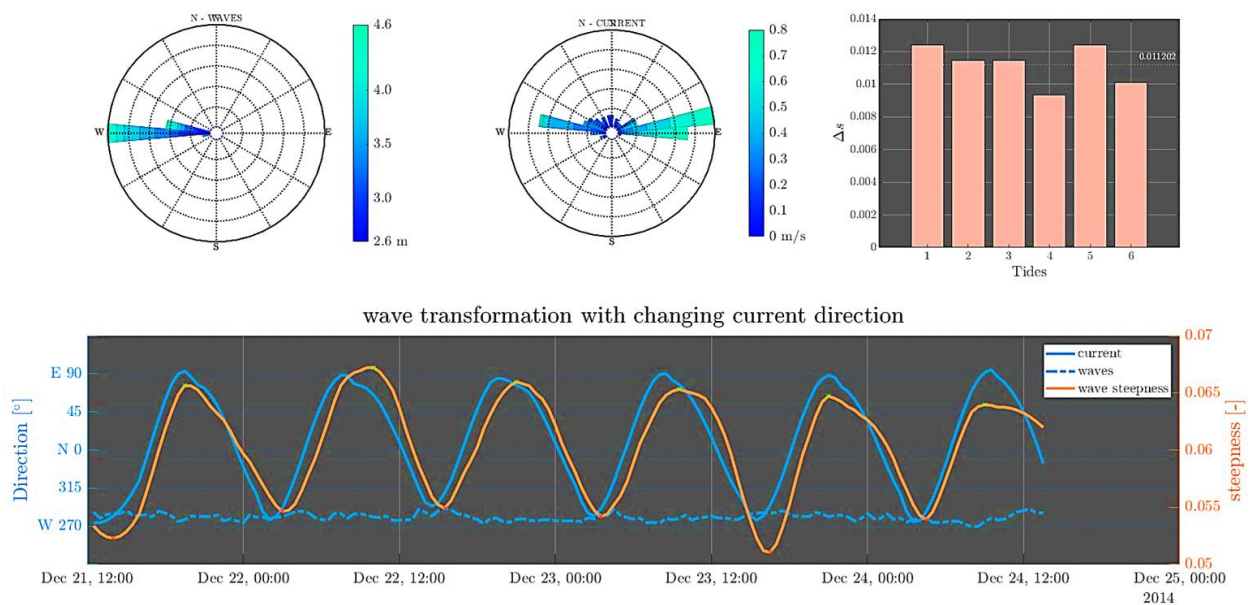


Abbildung 24 - - Ereignis mit tidebedingtem Einfluss auf die Wellensteilheit bei konstanter Wellenrichtung.

Auffällig ist die zeitliche Kopplung der Wellensteilheit mit der Veränderung der Strömungsrichtung bei gleichbleibender Wellenrichtung. Die Wellensteilheit kann hier als Indikator für Transformationseffekte interpretiert werden. Sie zeigt systematische Schwankungen, die mit dem Umschlag der Tidenströmung in Phase verlaufen. Damit wird deutlich, dass die Strömung unmittelbar auf die Ausprägung des Wellenfeldes wirkt.

Die Abbildung veranschaulicht, dass dieser Zusammenhang nicht nur punktuell, sondern über die gesamte Tidephase hinweg erkennbar ist. Die Transformation des Wellenfeldes zeigt sich in einer periodischen Steilheitsmodulation, die sich in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung verstärkt oder abschwächt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Strömung die Wellen vermutlich nicht nur kinematisch (z. B. über Dopplerverschiebungen), sondern auch dynamisch beeinflusst. Somit ist die Wellensteilheit ein geeignetes Maß, um den Strömungseinfluss auf die Wellen sichtbar zu machen und systematisch zu quantifizieren.

Um die Verteilung der Wellensteilheit für unterschiedliche Richtungsunterschiede zwischen Wellen- und Strömungsrichtung am Standort FN1 zu untersuchen, wurden alle Wertepaare in Sektoren der relativen Richtung aufgeteilt. Die in Abbildung 25 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Häufigkeitsverteilungen je nach relativem Winkel deutlich variieren. Die dargestellten Verteilungen der Wellensteilheit zeigen in allen Richtungssektoren grundsätzlich eine annähernd unimodale Form mit einem dominanten Maximum im Bereich von 0,07–0,12. Dies entspricht einer Normalverteilung ähnlichen Häufigkeitsverteilung, weist jedoch systematische Abweichungen auf. Bei geringen Richtungsunterschieden (0–20°) verschiebt sich die Verteilung deutlich zu höheren Steilheitswerten und zeigt eine Rechtslastigkeit, was auf eine überproportionale Häufung hoher Werte hinweist. Im Bereich um 90° bleibt die Verteilung dagegen flacher und näher an einer symmetrischen Normalform, wodurch hier weniger extreme Steilheitswerte auftreten. Für gegenläufige Bedingungen (180°) ist eine weitere deutliche Verschiebung erkennbar: Die

Verteilung streckt sich stärker in den oberen Wertebereich, mit einem markanten Peak nahe 0,12–0,13, was eine Abweichung von einer Normalverteilung darstellt.

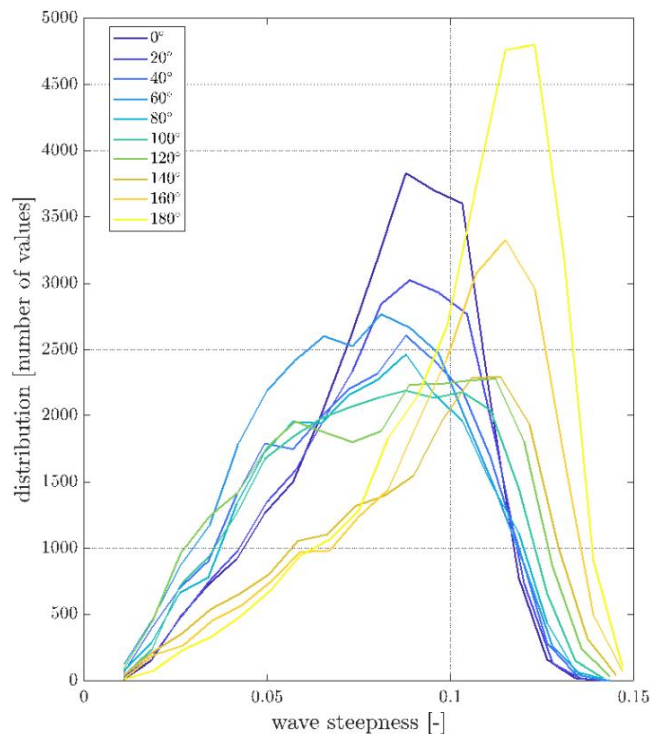


Abbildung 25 - Verteilungen der Wellensteilheit für verschiedene Richtungsunterschiede zwischen Strömung und Wellenrichtung am Standort FN1. Höhere Steilheiten treten vor allem bei gegenläufigen Bedingungen auf.

Die dargestellte Auswertung zeigt, dass die Wellensteilheit im untersuchten Zeitraum systematisch mit der relativen Ausrichtung von Wellen- und Strömungsrichtung variiert. Während die Wellenrichtung weitgehend konstant bleibt, wechselt die Strömung tidebedingt und führt zu einem zyklischen Wechsel zwischen gleich- und gegenläufigen Bedingungen. Dies spiegelt sich in einer periodischen Veränderung der Steilheit wider, die durch Δs als Differenz zwischen lokalen Extremen pro Tide quantifiziert wird.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Variabilität nicht ausschließlich als physikalische Transformation des Wellenfeldes interpretiert werden kann. Ein Anteil der beobachteten Änderung ist auf den Dopplereffekt zurückzuführen, der aus der Messperspektive entsteht: die Frequenzen der Wellen werden durch die Strömung relativ zum Messstandort verschoben. Dadurch verändert sich rechnerisch die abgeleitete Wellensteilheit, ohne dass das Wellenfeld selbst zwingend in dieser Form modifiziert wird.

Die Analyse macht somit deutlich, dass die Trennung zwischen mathematischem Artefakt (Dopplerverschiebung) und realer Modifikation (z. B. Brechungs- oder Dissipationsprozesse) sorgfältig erfolgen muss. Die beobachtete Steilheitsänderung belegt eine starke Abhängigkeit von der relativen Richtung, erlaubt aber allein keine eindeutige Aussage darüber, in welchem Umfang eine tatsächliche Transformation des Wellenfeldes durch die Strömung stattgefunden hat. Hierfür sind ergänzende spektrale und richtungsaufgelöste Analysen erforderlich.

II.1.3.2.4.3. Spektrale Analyse

Zur Quantifizierung der strömungsinduzierten Frequenzverschiebung wurde die effektive Strömungsgeschwindigkeit U_{eff} berechnet. Diese Größe beschreibt den projizierten Einfluss der Strömung auf die beobachtete Wellenfrequenz und ermöglicht die Rückrechnung auf die intrinsische Frequenz f_{intr} . Da Wellenkinematik mit zunehmender Tiefe exponentiell abnimmt, wurde zur Berechnung nur der oberflächennahe Bereich bis zur halben Wellenlänge berücksichtigt. Die horizontale Strömungsgeschwindigkeit wurde dabei richtungsaufgelöst entlang der Wellenausbreitungsrichtung projiziert, wobei der Richtungsunterschied zwischen Welle und Strömung über den Kosinus berücksichtigt wurde. Zusätzlich wurde die Tiefe durch einen orbitalen Gewichtungsfaktor $exp(2kz)$ gewichtet, um der tatsächlichen Energieverteilung im Wasser Rechnung zu tragen. Die so gewichtete Strömungskomponente wurde über den relevanten Tiefenbereich numerisch integriert. Da die Wellenlänge frequenzabhängig ist, wurde diese Berechnung für jede Spektralkomponente separat durchgeführt, sodass sich ein frequenz- und zeitabhängiges $U_{eff}(f, t)$ ergibt. Mit dieser Größe konnte die Dopplerverschiebung der beobachteten Frequenz korrigiert und die intrinsische Frequenz nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$f_{intr}(f, t) = f_{real}(f, t) - k(f) \cdot U_{eff}(f, t)$$

Dies ermöglichte die spektrale Rücktransformation auf ein hypothetisches Wellenfeld ohne Strömungseinfluss und bildete die Grundlage für den Vergleich mit den real gemessenen Spektren.

Die mit den korrigierten Frequenzen abgebildeten Spektren S_{intr} wurden mit den real gemessenen Spektren S_{real} verglichen. Dabei zeigten sich systematische Abweichungen, insbesondere bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und spezifischen Winkelkonfigurationen. Die Differenz $\Delta S = S_{intr} - S_{real}$ wurde sowohl frequenz aufgelöst als auch über Zeitmittel analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen nicht allein durch die Dopplerverschiebung erklärbar sind, sondern auf eine Umverteilung von Energie innerhalb des Spektrums hinweisen.

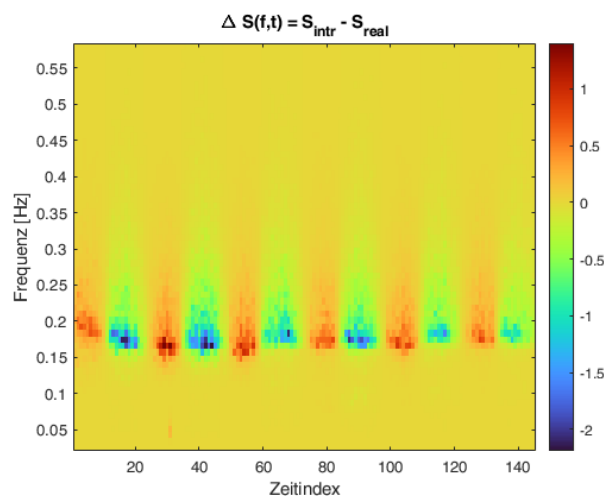


Abbildung 26 - Zeitlich-frequenz aufgelöste Differenz $\Delta S(f,t)$ als Maß für strömungsinduzierte Energieumverteilungen über den Tidezyklus hinweg.

Die Visualisierung in Abbildung 26 zeigt die frequenz- und zeitaufgelöste Differenz zwischen dem strömungskorrigierten Spektrum und dem gemessenen Spektrum. Die dargestellte Größe $\Delta S(f,t)$ erlaubt Rückschlüsse auf spektrale Energieumverteilungen infolge von Strömungseinflüssen. Positive Werte (rot) kennzeichnen Frequenzbereiche, in denen das intrinsische Spektrum im Vergleich zum realen Messwert eine höhere Energiedichte aufweist – ein Hinweis darauf, dass dort im realen Spektrum Energie fehlt, möglicherweise bedingt durch Umverteilung oder Dissipation. Umgekehrt deuten negative Werte (blau) auf Frequenzbereiche hin, in denen die Strömung zu einer Anreicherung von Energie geführt hat. Die wiederkehrenden Muster entlang der Zeitachse spiegeln die Tidezyklen wider. Die Analyse zeigt damit, dass es sich nicht ausschließlich um eine Frequenzverschiebung, sondern um eine richtungs- und geschwindigkeitsabhängige spektrale Umverteilung handelt.

Die Umverteilung pro Frequenzband zeigt eine starke Korrelation zwischen effektiver Strömungsgeschwindigkeit, -richtung und der Energieumverteilung. Bei einer mitlaufenden Strömung ($\cos(\Delta\theta) > 0$) ist ein systemischer Energiezuwachs in dem Frequenzbereich zwischen 0,05 – 0,15 Hz zu sehen.

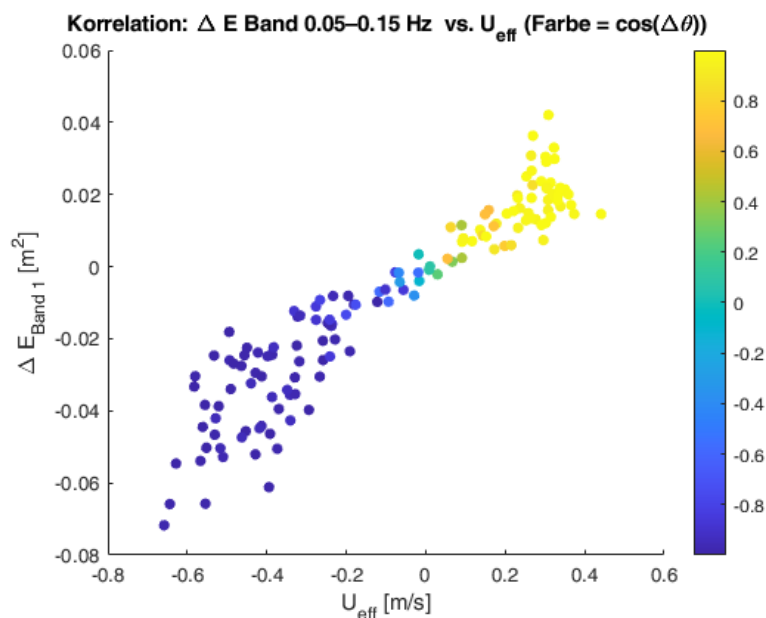


Abbildung 27 - Korrelation der Energieänderung ΔE im Frequenzband 0,05–0,15 Hz mit der effektiven Strömungsgeschwindigkeit und rel. Richtung $\cos(\theta)$

Zur weiterführenden Analyse wurde die Energieänderung innerhalb eines definierten Frequenzbandes 0,05-0,15 Hz mit der effektiven Strömungskomponente U_{eff} korreliert. Die dargestellte Punktwolke zeigt eine deutliche, nahezu lineare Abhängigkeit zwischen U_{eff} und der spektralen Energieänderung ΔE in diesem Band. Dabei ist die Farbskala nach dem Kosinus des Richtungswinkels zwischen Strömung und Welle codiert, um den Richtungsbezug explizit sichtbar zu machen. Es zeigt sich, dass vor allem bei Gegenrichtung (negatives $\cos(\Delta\theta)$, blau) ein Energieeintrag erfolgt, während bei gleichgerichteter Strömung (positive $\cos(\Delta\theta)$, gelb) tendenziell eine Energieabnahme im betrachteten Band vorliegt. Diese systematische Korrelation legt nahe, dass eine richtungs- und geschwindigkeitsabhängige Umverteilung stattfindet, die sich mit einer modellbasierten Korrekturformel beschreiben lassen kann.

II.1.3.2.4.4. Schlussfolgerung und Erreichung der Projektziele

Die im Rahmen der Analyse der Wellen-Strömungs-Interaktion gewonnenen Ergebnisse liefern eine wesentliche Grundlage für die Bewertung richtungsabhängiger Effekte im Seegang. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die relative Orientierung zwischen Strömung und dominanter Wellenrichtung maßgeblich zur Veränderung der Wellensteilheit beiträgt. Daraus lassen sich Indikatoren für Transformationsprozesse ableiten, die zur Verfeinerung numerischer Modelle genutzt werden können. Die identifizierten Zusammenhänge können in algorithmisch nutzbare Form überführt und als Grundlage für Korrekturen im Seegangsmodul dienen. Hierfür bedarf es weiterer Untersuchungen und Sensitivitätsanalysen. Die beobachteten Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Seegangszuständen könnten systematisch erfasst und in Form von Anpassungsfaktoren in die flächenhafte Interpolation eingebunden werden. Ergänzende richtungsabhängige Korrekturterme, die den Einfluss der Tideströmung auf die Wellenfrequenz berücksichtigen, können so berechnet werden.

Die verbesserten Modelle zur Wellen-Strömungs-Interaktion ermöglichen eine präzisere Einschätzung hydrodynamischer Randbedingungen, insbesondere in tidegeprägten Phasen. Für die Einsatzplanung von Arbeitsschiffen lassen sich so realistischere Zeitfenster ableiten, in denen kritische Steilheiten oder instabile Seegangsbedingungen auftreten können. Damit könnte das Risiko fehlerhafter Einschätzungen bei Crew- oder Materialtransfers reduziert.

Wissenschaftlicher Mehrwert und Modellintegration

Die Ergebnisse tragen zur Validierung linearer Wellentheorien im tidegeprägten Küstenraum bei und liefern empirisch abgesicherte Grundlagen für die Kalibrierung numerischer Modelle. In OpenRAVE_ML werden die gewonnenen Korrekturfaktoren mit ML-basierten Verfahren kombiniert, um künftig eine robustere Abbildung des Strömungseinflusses in flächigen Seegangsvorhersagen zu ermöglichen.

II-1.4 Entwicklung des Seegangsmoduls

Im Rahmen des „AP4: Offshore-Logistik“ entwickelte das LuFI ein zentrales Analysewerkzeug zur verbesserten Bewertung von Seegangsbedingungen in der Deutschen Bucht. Das sogenannte Seegangsmodul basiert auf der Assimilation von in-situ Messdaten in numerische Seegangsvorhersagen und ermöglicht dadurch eine deutlich realitätsnähere Beschreibung des aktuellen Seegangs. Die Ergebnisse werden in Form von übersichtlichen, halbstündlich aktualisierten Übersichtskarte auf der Website des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) öffentlich bereitgestellt (BSH, 2025). Die Umsetzung erfolgte vollständig in MATLAB, wobei das Modul automatisiert in einer MATLAB Runtime-Umgebung beim BSH betrieben wird. Der vollständige Quellcode ist im Sinne der Transparenz, Reproduzierbarkeit und Nutzbarkeit unter der GNU General Public License v3.0 (GPL-3.0) veröffentlicht und über folgendes öffentlich zugängliches Repository verfügbar: <https://github.com/LukasFroh/seastateModule>.

Im Rahmen einer Projekterweiterung wurde das bestehende Modul um KI-basierte Ansätze ergänzt, die das Potenzial bieten, die Qualität der flächigen Seegangsinformationen weiter zu verbessern. Mithilfe etablierter Methoden wie Random Forest und XGBoost konnten bereits deutlich genauere Echtzeitmodelle entwickelt werden. Zudem wurden LSTM-basierte Modelle zur Vorhersage der Seegangsverhältnisse auf Basis historischer Messdaten erstellt, die vielversprechende Ergebnisse lieferten. Diese Fortschritte befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium und konnten im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr in die finale, beim BSH veröffentlichte Version des Seegangsmoduls integriert werden.

Die nachfolgenden Abschnitte dokumentieren zunächst die technische Umsetzung des veröffentlichten Moduls und erläutern anschließend die Erweiterungen durch KI-Methoden und deren erzielte Ergebnisse.

II-1.4.1 Daten-Schnittstelle BSH-LuFI

Bei den für den Betrieb des Seegangsmoduls notwendigen Daten handelt es sich zum einen um die in Abschnitt 0 beschriebenen Messdaten an den verschiedenen Standorten in der Deutschen Bucht und zum anderen um flächige numerische Vorhersagedaten. Das Seegangsmodul wurde so entwickelt, dass jeder Input-Datensatz nach entsprechender Aufbereitung als Grundlage verwendet werden kann. Zum Zeitpunkt des Projektabschluss ist bei der Ausführung eine direkte Auswahl zwischen dem europäischen Modell EWAM und dem höher aufgelösten CWAM Modell für deutsche Küstengebiete möglich. Beide Modelle basieren auf dem namensgebenden „Wave Model“ (WAM) (WAMDI Group, 1988) und werden vom Deutschen Wetter Dienst DWD betrieben. Für die Bereitstellung der in-situ als auch der numerischen Daten wurde eine Schnittstelle zwischen dem BSH und dem LuFI geschaffen, mit Hilfe der die täglich neuen Daten automatisiert bereitgestellt werden können. Hierfür wurde der FTP-Server des BSH genutzt. In einem iterativen Prozess wurden Datenformat- und Aufbereitung angepasst, um für beide Seiten ein zuverlässiges und nachvollziehbares Arbeiten zu ermöglichen. Zudem wurden am LuFI Skripte entwickelt, die in den in-situ Daten enthaltenen Informationen des Datenqualitätskontrolle (dqk) zu verarbeiten und nur die zuvor definierten Daten (nur als „good“ gekennzeichnete Daten, fehlerhafte Messungen werden aussortiert, kleine Datenlücken werden interpoliert, der gesamte Zeitraum wird auf einheitliche Zeitschritte gebracht etc) zu verwenden.

II-1.4.2 Motivation und Notwendigkeit des Seegangsmoduls

Eine verlässliche Seegangsprognose ist von zentraler Bedeutung für die Sicherheit und Effizienz zahlreicher maritimer Anwendungen, insbesondere im Bereich der Schifffahrt, des Küstenschutzes und der Offshore-Wirtschaft. Numerische Wellenmodelle wie EWAM, CWAM oder das CMEMS-Reanalysemodell liefern flächendeckende Vorhersagen, die jedoch in ihrer Genauigkeit standort- und bedingungsabhängig variieren. Um die Güte dieser Modelle zu bewerten und Optimierungspotenziale aufzuzeigen, wurde ein Vergleich mit qualitätskontrollierten In-situ-Messungen im Zeitraum von Januar 2021 bis Dezember 2023 durchgeführt. Hierfür wurden die jeweiligen Modellinformationen – basierend auf dem European Forecast Model (EWAM), dem hochaufgelösten Küstenmodell (CWAM) sowie dem Atlantic-European North West Shelf Reanalysis (CEMS) – herangezogen und den nächstgelegenen Knotenpunkten der verfügbaren Messstationen zugeordnet. Um eine einheitliche Vergleichsgrundlage zu schaffen, wurden sowohl die Messdaten als auch die Modellzeitreihen auf eine stündliche zeitliche Auflösung skaliert.

Die Auswertungen zeigen, dass die Modellgüte stark vom geografischen Standort abhängt. Insbesondere bei extremen Seegangbedingungen, wie hohen signifikanten Wellenhöhen oder stürmischem Wetter, unterschätzen die Modelle häufig die tatsächlichen Bedingungen. Diese systematischen Abweichungen unterstreichen die Notwendigkeit einer ergänzenden Methodik, welche die Stärken beider Datenquellen vereint. Der Vergleich zwischen in-situ und Numerik ist in Abbildung 28 beispielhaft für die Standorte FN1, HEO und NOR in Form von Scatter-Abbildungen dargestellt, in denen jede gemessene Wellenhöhe der berechneten Wellenhöhe des jeweiligen Modells in Form einer Markierung dargestellt wird. Die schräg verlaufene weiße Linie kennzeichnet den Referenzfall, für den Modell und Realität zu 100% übereinstimmen würden. Während die numerischen Informationen aller Modelle für den Standort FN1 eine hohe Übereinstimmung (vor allem für geringe Wellenhöhen) vorzeigen, kommt es bei den anderen beiden Standorten zu sehr hohen Abweichungen. Es ist zu erkennen, dass die Numerik den tatsächlich vorkommenden Seegang deutlich überschätzt und nicht belastbar darstellen kann.

Zur Adressierung dieser Problematik wurde das Seegangsmodul entwickelt. Es stellt ein Analyse- und Korrekturwerkzeug dar, das numerische Seegangsprognosen mithilfe von In-situ-Messdaten justiert und somit eine realitätsnähere Darstellung der Seegangsverhältnisse ermöglicht. Die Integration dieses Moduls bietet eine fundierte Grundlage für die Ableitung präziser Seegangsinformationen und bildet damit einen essenziellen Baustein für eine robuste, raumdeckende Seegangsanalyse.

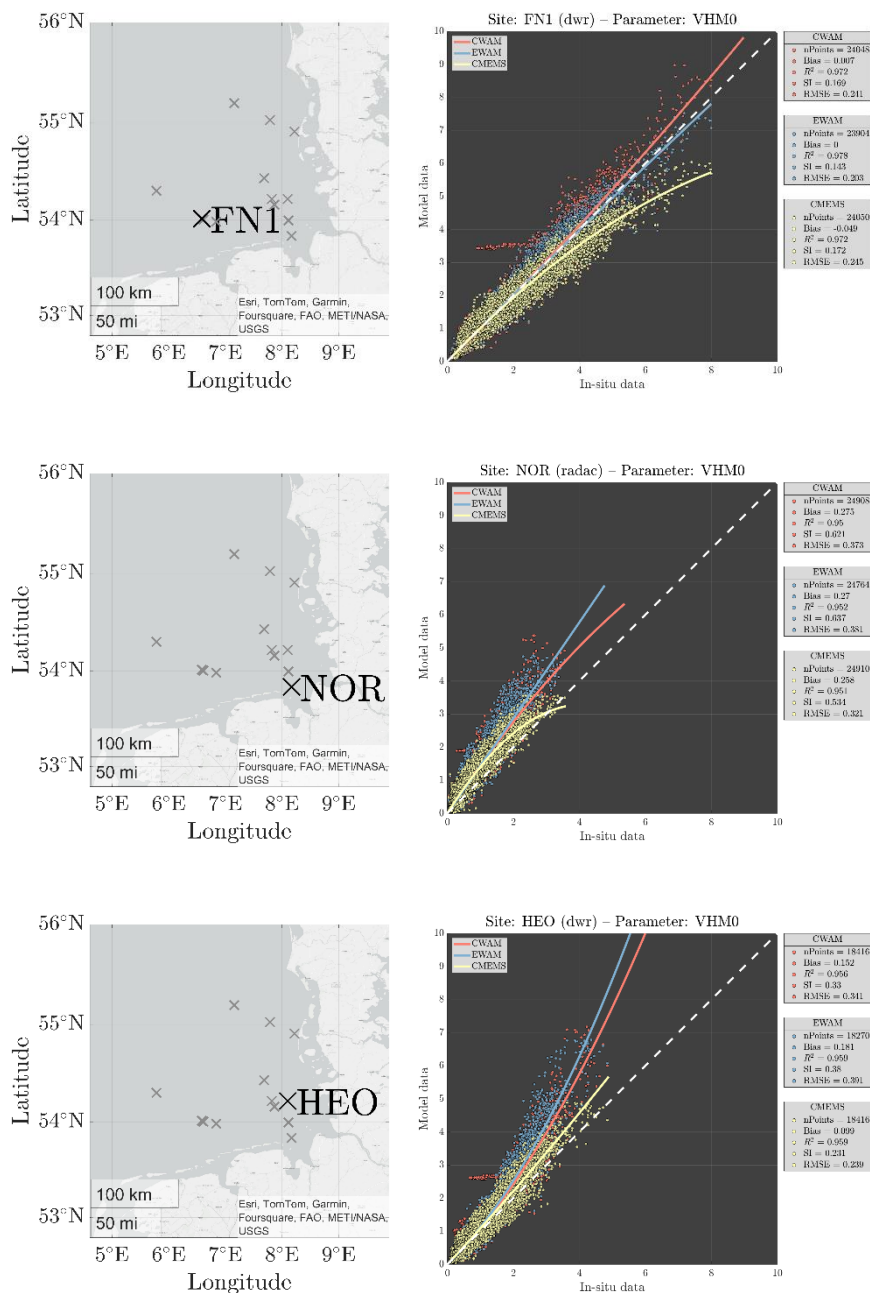


Abbildung 28 - Vergleich in-situ und Numerik (CWAM, EWAM, CMEMS) an verschiedenen Standorten: Oben Fino 1 (FN1), Mitte Nordergründe (NOR), Unten Helgoland Ost (HEO)

II-1.4.3 Systemarchitektur und Funktionsweise

Das entwickelte Seegangsmodul wurde so konzipiert, dass es in der *MATLAB Runtime Environment* des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben werden kann. Dies bedeutet, dass die Ausführung im Hintergrund ohne grafische Benutzeroberfläche (GUI) erfolgt. Sämtliche erforderlichen Eingabeinformationen werden über eine Textdatei (Batch-Datei im *.bat*-Format) bereitgestellt. Für die

Struktur und Detailbeschreibung der Eingabedatei wird auf das zugehörige Repository und die dort hinterlegte Dokumentation verwiesen.

Da das Hauptskript auf die Nutzung in der Runtime-Umgebung ausgelegt ist, wurde zusätzlich ein alternatives Test-Master-Skript erstellt. Dieses befindet sich stets auf dem gleichen Entwicklungsstand wie das Hauptskript, ist jedoch für die Ausführung in der Standard-MATLAB-GUI optimiert. Es diente insbesondere während des kontinuierlichen Entwicklungs- und Validierungsprozesses als nützliches Werkzeug.

Die entwickelte Toolbox kombiniert numerische Vorhersagemodelle mit qualitätskontrollierten In-situ-Messdaten, um eine präzise Darstellung der signifikanten Wellenhöhe zu ermöglichen. Der Ablauf des Tools, der bei jeder halbstündlichen Ausführung durchlaufen wird, gliedert sich wie folgt:

1. Datenbeschaffung

- *Numerische Vorhersagen*: Import der Seegangsprognosen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).
- *In-situ-Messungen*: Einbindung qualitätskontrollierter Echtzeitmessungen von BSH-Messstationen, z. B. Wellenbojen oder Radarstationen.

2. Datenvorverarbeitung

- Integration der *data quality control*-Informationen (DQC) zur Bereinigung der In-situ-Daten, wobei fehlerhafte oder unplausible Werte identifiziert und entfernt werden.
- Anpassung der numerischen Vorhersagen an die Messdaten durch Interpolation und Erstellung einer entsprechenden Anpassungsmatrix.

3. Modellanpassung

- Vergleich der Vorhersagedaten mit den In-situ-Messungen zur Identifikation systematischer Abweichungen.
- Korrektur der Vorhersagen auf Basis der festgestellten Abweichungen zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit.

4. Visualisierung

- Generierung grafischer Darstellungen des angepassten Seegangs in der Deutschen Bucht.
- Visualisierung der Differenzen zwischen numerischer Prognose und gemessenen Daten zur qualitativen Bewertung der Modellanpassung.

5. Ausgabe

- Bereitstellung der modifizierten Seegangsprognosen einschließlich zugehöriger Visualisierungen für weiterführende Analysen oder Anwendungen.

Die Toolbox stellt somit ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, das durch die Kombination von Modellvorhersagen und Echtzeitmessungen eine signifikante Verbesserung der Seegangsprognose ermöglicht.

II-1.4.4 Integration und Visualisierung des Modul-Outputs in den operationellen Web-Auftritt des BSH

Abbildung 29 zeigt einen beispielhaften Output des Seegangsmoduls sowie dessen Einbindung auf der Webpräsenz des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zum Zeitpunkt 26.05.2025, 02:15 UTC. In einem einleitenden Informationstext wird auf das Projekt OpenRAVE unter Angabe der zu-

gehörigen Förderkennzeichen (FKZ) verwiesen. Zusätzlich sind weiterführende Informationen zur Projektdokumentation sowie ein Link zum zugehörigen GitHub-Repository enthalten, das den Quellcode des Moduls bereitstellt. Die Webanwendung bietet eine interaktive Slide-Show, in der die letzten 144 Seegangskarten (entsprechend drei Tagen) angezeigt werden. Diese Karten kombinieren gemessene In-situ-Daten mit numerischen Modellvorhersagen der signifikanten Wellenhöhe. Darüber hinaus stehen die zugehörigen Rohdaten sowohl im MATLAB-Format (.mat) als auch als .csv-Dateien sowie die Visualisierungen im .png-Format zum Download bereit.

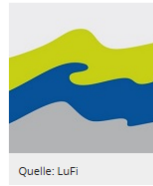
Die dargestellte Visualisierung gliedert sich in vier Teilplots:

- Links befindet sich eine Übersichtskarte der Deutschen Bucht mit eingezeichneten Küstenlinien und Messstationen. Die flächige Verteilung der signifikanten Wellenhöhe wird mittels einer Farbskala dargestellt.
- Rechts oben zeigt ein Balkendiagramm den Vergleich zwischen den gemessenen und den vom Modell berechneten Wellenhöhen an den jeweiligen Messstationen.
- Rechts unten werden die daraus berechneten absoluten und relativen Abweichungen zwischen Messung und Modell visualisiert. Diese werden farblich codiert, um Abweichungen schnell erfassen zu können.
- Liegen für eine Station zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Messdaten vor, wird dies durch das Fehlen farblicher Markierungen (schwarzer Hintergrund) kenntlich gemacht.

Diese Darstellung ermöglicht eine schnelle visuelle Einschätzung der Modellgüte und trägt zur transparenten Bewertung der Prognosequalität bei.

Zur Unterstützung einer fundierten Bewertung der angepassten Seegangsvorhersagen wurden im Seegangsmodul zudem automatische Warnmechanismen implementiert. Diese greifen in Situationen, in denen die Aussagekraft der dargestellten Ergebnisse eingeschränkt sein könnte. Eine Warnmeldung erscheint beispielsweise dann, wenn für bestimmte als essenziell eingestufte In-situ-Messstationen zum aktuellen Zeitpunkt keine Messdaten vorliegen. In einem solchen Fall kann keine valide Anpassung der numerischen Vorhersagen erfolgen, was die Qualität der Gesamtprognose beeinträchtigen kann. Ein weiterer Mechanismus überwacht die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Wellenhöhen. Wird eine definierte Schwelle für die Differenz überschritten, wird ebenfalls ein Hinweis eingeblendet, der auf mögliche Ungenauigkeiten der Prognose hinweist. Die entsprechenden Warnungen werden direkt in der Visualisierung integriert und ermöglichen so eine schnelle Einschätzung der Datenlage durch die Nutzerinnen und Nutzer. Details zur technischen Umsetzung dieser Funktionen sind zugehörigen GitHub-Repository dokumentiert.

Angepasste Seegangsvorhersage in der Deutschen Bucht



Im Rahmen des Forschungsprojekts [OpenRAVE \(FKZ: 03EE3009C\)](#) wurde ein Tool entwickelt, welches die Vorteile der flächigen Verfügbarkeit der numerischen Modelle ([SVS des DWD](#)) mit den in-situ Seegangsmessungen des BSH kombiniert. Die vom DWD berechneten Vorhersagen werden basierend auf den verfügbaren Messdaten angepasst.

Für die Deutsche Bucht stellen wir angepasste Übersichtskarten für den Seegang für die Deutsche Bucht halbstündlich zur Verfügung.

Mehr zur Toolbox und zum Code finden Sie unter [Github](#).

- [Download png](#)
- [Download mat](#)
- [Download csv](#)

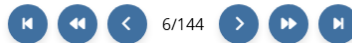
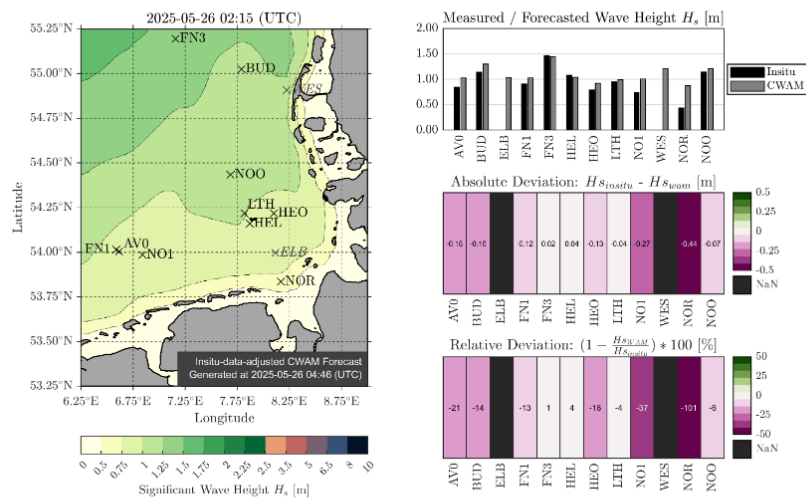


Abbildung 29 - Einbindung des halbstündigen Modul-Outputs auf der BSH-Website https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Seegang/seegang_node.html

II-1.4.5 „Dummy-Modus“ zur Demonstration und Testanwendung des Seegangsmoduls

Um den Zugang zum Seegangsmodul zu erleichtern und eine praxisnahe Demonstration der Funktionalität zu ermöglichen, wurde ein sogenannter Dummy-Modus implementiert. Dieser erlaubt es interessierten Nutzerinnen und Nutzern, das Tool herunterzuladen, auszuführen und alle Hauptfunktionen ohne vorherige Datenbeschaffung oder aufwendige Datenaufbereitung nachzuvollziehen. Im zugehörigen GitHub-Repository steht hierfür ein Dummy-Datensatz zur Verfügung. Dort sind neben einem vollständigen Beispielzeitraum auch eine kompakte ReadMe-Anleitung sowie die notwendige Datenstruktur hinterlegt, die eine reibungslose Ausführung ermöglichen. Das Modul wurde ursprünglich in enger Abstimmung zwischen dem BSH und dem LuFI hinsichtlich Datenformaten und Verzeichnisstruktur entwickelt. Für die reguläre Anwendung ist eine spezifische Ordnerstruktur erforderlich, in der sowohl die numerischen Vorhersagedaten als auch die In-situ-Messdaten in standardisierter Form abgelegt sein müssen. Theoretisch lässt sich das Modul für beliebige Standorte und Datenquellen anwenden. Die dafür notwendige Anpassung und Aufbereitung der Eingangsdaten kann jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden sein.

Der Dummy-Modus schafft hier Abhilfe, indem er eine vollständig lauffähige Beispielkonfiguration bereitstellt, die es ermöglicht, das Modul ohne Vorkenntnisse oder zusätzliche Daten zu testen. Er dient sowohl der Veranschaulichung des Arbeitsablaufs als auch der Erprobung der Funktionen, und stellt damit einen wichtigen Baustein für die Nutzbarkeit und Weiterentwicklung des Tools durch Dritte dar.

II-1.4.6 Tool zur Bewertung der Durchführbarkeit von Offshore-Operationen

Im Rahmen des Projekts wurde neben dem Seegangsmodul ein weiteres Tool zur Bewertung der operativen Durchführbarkeit von Offshore-Arbeitsfahrten, insbesondere von Crew Transfer Vessel (CTV)-Einsätzen im Kontext von Offshore-Windenergieanlagen, entwickelt. Dieses sogenannte Operability Tool wurde unter anderem im Rahmen des RAVE Workshops 2024 (https://rave-offshore.de/files/downloads/konferenz/2024%20Internationaler%20Workshop/RAVE_Workshop_2024_1220_Lukas_Froehling.pdf) einem internationalen Fachpublikum vorgestellt.

Das Tool verknüpft hydrodynamische Schiffsdaten, Informationen zu Fahrstrecken und flächige Seegangsdaten, um auf dieser Basis realitätsnahe Aussagen zur Machbarkeit bestimmter Offshore-Operationen zu treffen. Ziel ist es, fundierte Empfehlungen zur Einsatzplanung und -bewertung für Offshore-Arbeitsschiffe geben zu können. Für eine erfolgreiche Anwendung benötigt das Tool drei zentrale Datensätze:

- Bewegungseigenschaften des Schiffes, insbesondere Response Amplitude Operators (RAOs), Abmessungen, Gewicht und Schwerpunktage
- Streckenverlauf, typischerweise in Form von AIS-Daten, entweder aus historischen Operationen oder für geplante zukünftige Fahrten
- Flächige Seegangsprognosen, z. B. Wellenhöhe, -periode und -richtung, die entweder aus numerischen Vorhersagemodellen oder direkt aus dem Output des Seegangsmoduls stammen können.

Das Tool ermöglicht sowohl rückblickende Analysen historischer Offshore-Einsätze als auch prospektive Bewertungen geplanter Operationen. So lassen sich zum Beispiel Zeiträume mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit für bestimmte Schiff-Strecken-Kombinationen identifizieren. Mithilfe statistischer Auswertungen können Empfehlungen zu optimalen Zeitfenstern gegeben werden, die die Wetterfensteranalyse für Offshore-Logistik erheblich verbessern. Die grafische Aufbereitung erfolgt u. a. über sogenannte "Operability Maps", in denen Zeitfenster farbcodiert in Bezug auf ihre Tauglichkeit für den geplanten Einsatz dargestellt werden. Neben Einzelbewertungen für bestimmte Touren können so auch Langzeitauswertungen zur saisonalen Einsatzplanung durchgeführt werden.

Durch die Kombination mit dem zuvor beschriebenen Seegangsmodul bietet das Operability Tool eine durchgängige Lösung – von der Erfassung und Veredelung von Seegangsdaten bis hin zur einsatzspezifischen Entscheidungsunterstützung. Die Möglichkeit zur Integration historischer Daten, zur Anwendung auf Forecasts sowie zur flexiblen Anbindung an unterschiedliche Schiffstypen und Einsatzprofile macht das Tool zu einem vielseitigen Instrument für die Offshore-Industrie.

Die Vorstellung beim RAVE Workshop 2024 unterstreicht die internationale Relevanz und Innovationshöhe der entwickelten Methodik.

II-1.5 KI-Erweiterung

Im Rahmen der Erweiterung des Forschungsprojekts wurde das ursprüngliche Ziel – die Verbesserung der Seegangsprognose durch Kombination numerischer Modelle mit In-situ-Messdaten – durch den Einsatz moderner Machine-Learning-Methoden weiter vertieft. Ziel der Erweiterung war es, ein datenbasiertes Framework zu entwickeln, das sowohl zeitliche als auch räumliche Zusammenhänge innerhalb des Seegangsverhaltens in der Deutschen Bucht mithilfe künstlicher Intelligenz präzise modellieren kann. Im Zentrum dieser Arbeit standen zwei komplementäre Modellierungsansätze:

1. ein räumliches Modell, das auf Echtzeitdaten weniger repräsentativer In-situ-Standorte basiert und daraus eine flächige Wellenhöhenverteilung generiert,
2. sowie ein zeitliches Vorhersagemodell, das historische Daten nutzt, um zukünftige Zustände an Einzelsensorstandorten vorherzusagen.

Ein vergleichbarer Ansatz wurde von der University of Exeter verfolgt und veröffentlicht (Chen et al., 2023). Die Erkenntnisse aus dieser und weiterer internationaler Forschung flossen in die konzeptionelle und methodische Ausrichtung des hier entwickelten ML-Frameworks ein. In Kombination ermöglichen diese Modelle die Erstellung flächiger Seegangsprognosen auf Basis weniger Eingangsdaten. Damit wird die Grundlage für ein leistungsfähiges, ressourcenschonendes Prognosesystem geschaffen, das insbesondere für kurzfristige Einsatzplanung und operative Entscheidungsfindung im Offshore-Bereich – etwa für Crew-Transfer-Vorgänge – von hoher Relevanz ist.

Trotz vielversprechender Modellierungsergebnisse konnte das übergeordnete Ziel – ein voll integriertes, einsatzbereites Framework zur Ablösung oder Ergänzung des bestehenden Seegangsmoduls auf der BSH-Webplattform – im Rahmen der Projektlaufzeit nicht vollständig realisiert werden. Die zeitlichen und technischen Anforderungen für die vollständige Implementierung, Integration und Validierung im operativen Betrieb erwiesen sich als umfangreich. Nichtsdestotrotz werden in diesem Kapitel die entwickelten Modellarchitekturen, Zwischenergebnisse, Evaluierungen und das Zukunftspotenzial des verfolgten Ansatzes detailliert vorgestellt. Die Projektergebnisse bieten eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie eine mögliche spätere Integration in operative Systeme.

II-1.5.1 Flächiges Modell auf Basis numerischer Trainingsdaten

II-1.5.1.1 Stand der Forschung

In Diesem Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand im Bereich des Machine Learning (ML) mit Fokus auf die Vorhersage von Umweltdaten. Ergänzend wird ein Vergleich zwischen Entscheidungsbäumen, Random Forest und Gradient Boosting Methoden (GBM) dargestellt. Die Literaturrecherche erfolgte auf Grundlage der Schlagwörter *ensemble learning*, *sea state*, *machine learning*, *random forest*, *gradient boosting*, *decision tree*, *environmental data* und *spatial prediction* und beschränkte sich auf Veröffentlichungen der letzten vier Jahre. Ziel ist die Identifikation vergleichbarer Forschungsarbeiten, die als Referenz für die eigene Untersuchung herangezogen werden können.

Eine zentrale Grundlage bildet die Arbeit von Chen et al. (2021). Dort wurde ein Random-Forest-Modell entwickelt, das auf SWAN-Daten trainiert wurde und zur räumlichen Gegenwartsvorhersage der signifikanten Wellenhöhe (Hs), der mittleren Wellenrichtung (mDir), der Nullpunktperiode (Tz) sowie der Peakwellenperiode (Tp) in der Küstenregion um Cornwall (UK) eingesetzt wurde. Ziel war es, eine Alternative zu SWAN zu schaffen, die sowohl eine höhere Prognosegüte als auch geringere Rechenzeiten bietet. Die Autoren erreichten eine etwa 100-fache Reduktion der Berechnungszeit im Vergleich zum SWAN-Modell. Auf ungesesehenen Testdaten lagen die erzielten R²-Scores bei Hs = 0,9575, Tp = 0,9398 und mDir = 0,8171. Im Vergleich mit in-situ-Messungen ergaben sich Verbesserungen gegenüber SWAN für alle Parameter außer der mittleren Wellenrichtung, da hierfür keine Messdaten vorlagen. Die R²-Scores gegenüber den in-situ-Daten betragen Hs = 0,9067 und Tp = 0,5558. In einer Folgestudie erweiterten Chen et al. (2023) den Ansatz um ein „attention-based long short-term memory“ (LSTM) Modell zur lokalen Vorhersage. Dieses wurde anschließend für die Generierung räumlicher Vorhersagen genutzt. Die Vorhersagegüte nahm dabei ab: Für Hs lagen die R²-Scores im Zeithorizont 0–12 h zwischen 0,77 und 0,698, während für Tz und mDir Werte zwischen 0,115 und –1,02 erzielt wurden.

Zhan et al. (2022) entwickelten ein Modell zur Vorhersage der maximalen Wellenhöhe (hmax) im Südchinesischen Meer. Grundlage waren meteorologische Daten des „European Centre for Medium-Range Weather Forecasts“ (ECMWF). Zum Einsatz kamen Ensemble-Methoden wie Random Forest, XGBoost, LightGBM und AdaBoost in Form eines Stacking-Modells. Beim Vergleich der Basismodelle erreichten Random Forest, XGBoost und LightGBM jeweils maximale R²-Scores von 0,899. Höhere Werte wurden mit AdaBoost (R² = 0,92) und insbesondere dem Stacking-Ansatz (R² = 0,961) erzielt.

Tarwidi et al. (2023) untersuchten den Wellenaufbau an einem steilen Strand und verglichen vier Verfahren: Random Forest (RF), XGBoost, Multiple lineare Regression (MLR) und Support Vector Regression (SVR). Eingangsgrößen waren sowohl morphologische Strandparameter (z. B. Steilheit) als auch Wellencharakteristika. Auf ungesesehenen Testdaten erreichten MLR und SVR R²-Scores von 0,729 bzw. 0,705. Deutlich bessere Ergebnisse erzielten RF und XGBoost mit R²-Werten von 0,977 und 0,987. XGBoost wurde dabei als bestes Modell benannt, zudem hoben die Autoren den Vorteil geringerer Berechnungskosten im Vergleich zu numerischen Modellen hervor.

Ahmed (2024) verglich Random Forest und XGBoost hinsichtlich der Vorhersage des Oberflächenkrümmungsindex (als Maß für die Beschaffenheit von Straßenbelägen) unter Berücksichtigung von Dicke, Alter, Belastung und Umwelteinflüssen. Die Leistungsbewertung erfolgte anhand von R², RMSE und MAE. Random Forest erzielte Werte von 0,8 / 0,9 / 0,59, während XGBoost in allen Metriken überlegen war mit 0,9 / 0,64 / 0,41. Damit erklärte XGBoost einen höheren Varianzanteil und lieferte Vorhersagen näher an den Messwerten.

Kim und Lee (2023) entwickelten ein Modell zur Gegenwartsvorhersage von Hs und Wellenperiode (T) nahe der ostkoreanischen Küste. Verwendet wurden Messungen einer Tiefseeboje. Verglichen wurden Lineare Regression (LR), Support Vector Regression (SVR) und XGBoost. Für Hs lagen die RMSE-Werte bei 0,272 (LR), 0,212 (SVR) und 0,197 (XGBoost), für T bei 0,795 (LR), 0,715 (SVR) und 0,661 (XGBoost). In beiden Fällen erzielte XGBoost die besten Ergebnisse.

Einen systematischen Überblick geben Pourzangbar et al. (2023), die über 200 Publikationen zur Anwendung von ML im maritimen Bereich auswerten. Sie stellten eine deutliche Zunahme der ML-Anwendungen in den letzten Jahren fest. Besonders robuste Ergebnisse erzielten integrierte Verfahren wie ICEEMDAN-ELM. Gradient Boosting Machines wie XGBoost wurden hingegen vergleichsweise selten eingesetzt. Zur Vorhersage von Hs dominierten künstliche neuronale Netze (ANN) und SVR, wobei SVR in vielen Fällen bessere Resultate lieferte als ANN. Die Autoren betonen die Schwierigkeit einer allgemeinen Modellwahl und folgern, dass ML-Ansätze in der Praxis meist über ein iteratives Verfahren von Versuch und Annäherung („trial-and-error“) bestimmt werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass Ensemble-Methoden – insbesondere XGBoost – in verschiedenen Anwendungsfeldern eine hohe Prognosegüte erreichen und klassische Verfahren regelmäßig übertreffen. Gleichzeitig ist die Eignung stark von der spezifischen Problemstellung abhängig, sodass keine universell überlegene Modellklasse identifiziert werden kann.

II-1.5.1.2 Random Forest und XGBoost

Für die flächige Modellierung des Seegangs in der Deutschen Bucht wurden zwei bewährte Machine-Learning-Ansätze getestet und miteinander verglichen: Random Forest und XGBoost (Extreme Gradient Boosting). Beide Ansätze basieren auf Entscheidungsbäumen, unterscheiden sich jedoch in ihrer Trainingsmethodik. Der Random-Forest-Algorithmus erzeugt eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen auf Basis zufälliger Teilmengen der Trainingsdaten und aggregiert deren Ergebnisse. Die robuste Vorhersageleistung ergibt sich aus der Ensemble-Bildung vieler unabhängiger Modelle, wodurch Überanpassung reduziert wird.

XGBoost verfolgt einen gradientenbasierten Boosting-Ansatz, bei dem Bäume iterativ trainiert werden. Jeder neue Baum versucht, die Fehler der vorherigen Bäume zu korrigieren. Dadurch kann XGBoost häufig eine höhere Modellgüte bei gleichzeitig höherer Rechenintensität erzielen. Zudem ist XGBoost besser in der Lage, komplexe, nichtlineare Zusammenhänge zu modellieren, was insbesondere bei geophysikalischen Prozessen von Vorteil sein kann.

II-1.5.1.3 Datengrundlage

Als Datengrundlage für das Training des flächigen ML-Modells wurde der hochaufgelöste numerische Reanalyse-Datensatz Atlantic-European North West Shelf-Wave Physics Reanalysis (AWPR) verwendet (European Union-Copernicus Marine Service, 2020). Die Originaldaten wurden auf das Gebiet der Deutschen Bucht beschränkt, mit den geographischen Grenzen der Breite (Latitude) von 53.81° N bis 55.24° N und der Länge (Longitude) von 5.03° E bis 8.24° E. Innerhalb dieses Gebiets wurden für jeden Zeitschritt drei relevante Parameter aus dem AWPR-Modell extrahiert:

- Signifikante Wellenhöhe (VHM0)
- Peak-Wellenperiode (VTPK)
- Wellenrichtung (VPED)

Eine Übersicht über die ursprünglichen Modellgrenzen des AWPR-Datensatzes sowie die für die Entwicklung der ML-Modelle verwendeten reduzierten Bereiche ist in Abbildung 30 dargestellt. Im Rahmen der Modellierung wurden zwei unterschiedliche Gebietsausprägungen definiert, die als „Reduced Model v1“ (V1) und „Reduced Model v2“ (V2) bezeichnet werden. Das Modell V1 umfasst neben den Offshore-Bereichen auch die angrenzenden Küstenlinien der umliegenden Staaten. Da an Gitterpunkten hinter der Küstenlinie naturgemäß keine Seegangsdaten vorliegen – diese Gebiete liegen an Land und werden im AWPR-Datensatz mit "not-a-number" (NaN)-Werten gekennzeichnet – entsteht ein lückenhafter Datensatz. Solche Lücken können sich im Trainingsprozess negativ auf die Modellqualität auswirken und zu Verzerrungen in der Vorhersagegenauigkeit führen. Um die Vorteile eines strukturierten Gitters weiterhin nutzen zu können und gleichzeitig die Modellgüte zu optimieren, wurde als Alternative das Modell V2 definiert. Dieses umfasst ausschließlich maritime Gitterpunkte und schließt sämtliche küstennahe Landflächen aus. Dadurch stehen vollständige, lückenfreie Datensätze ohne NaN-Werte zur Verfügung, was zu einer signifikanten Verbesserung der Modellleistung führt. Da der Schwerpunkt des entwickelten Modells ohnehin auf den offshore-relevanten Bereichen der Deutschen Bucht liegt und nicht primär auf den küstennahen Zonen, wurde dieser Trade-off zugunsten einer höheren Datenqualität und besseren Modellperformance in Kauf genommen.

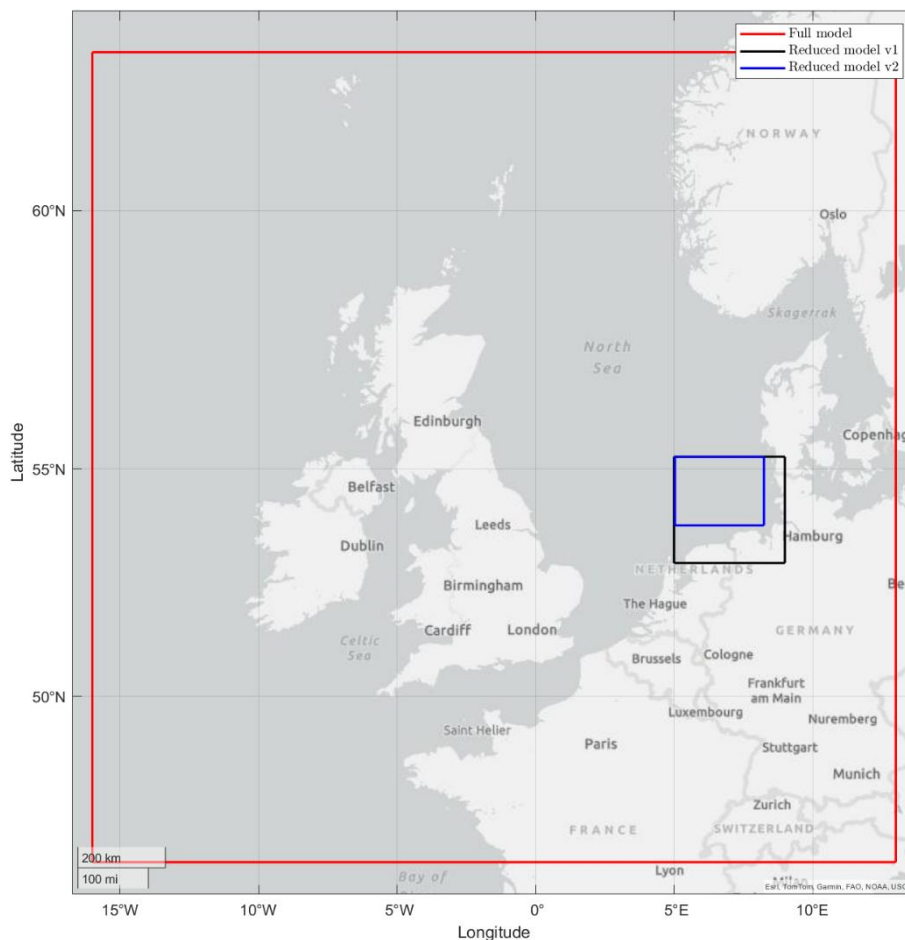


Abbildung 30 - Modellgrenzen AWPR und verwendeter Bereich

II-1.5.1.4 Methodik

Das flächige Modell wurde so trainiert, dass es auf Basis der genannten Parameter von ausgewählten Einzelstandorten (Inputpunkte) in der Deutschen Bucht die Seegangparameter für jeden Gitterpunkt im gesamten Gebiet vorhersagen kann. Die Zahl der Input-Standorte (Mess-Standorte) wurde variiert, um die Modellstabilität bei unterschiedlich dichter Eingangsdatenlage zu testen. Zur Performancebewertung wurden die Vorhersagen des Modells mit den tatsächlichen numerischen Werten der Gitterpunkte im Testdatensatz verglichen. Verwendet wurden hierbei die Metriken R^2 & RMSE. Der R^2 -Score berechnet den Anteil der Varianz in den Daten, der durch das Modell abgebildet wird. Dabei sind y_i die tatsächlichen Werte, \hat{y} der Durchschnitt der tatsächlichen Werte, \hat{y}_i die Vorhersagen und n die Anzahl der Vorhersagen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Der Root Mean Squared Error (RMSE) ist die Quadratwurzel des Mean Squared Error:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Die Performance wurde zellweise (cell-averaged) über den gesamten Testzeitraum berechnet. Die besten Modelle erzielten folgende mittlere Gütemaße:

- VHM0: R^2 bis zu 0.99, RMSE von 0.08
- VTPK: R^2 bis zu 0.80, RMSE von 0.9
- VPED: R^2 bis zu 0.81, RMSE von 31.13

Für das Training wurden jeweils ganze Kalenderjahre verwendet. Es zeigte sich, dass bereits wenige Jahre an Trainingsdaten ausreichen, um gute Ergebnisse zu erzielen. Die Testdaten deckten Zeiträume von einem bis sieben Jahren ab und wurden vom Modell nicht zuvor gesehen. Die Modellperformance ist für den Auswertungszeitraum von Januar 2016 bis Dezember 2023 beispielhaft in Abbildung 31 für die Metrik R^2 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Parameter der signifikanten Wellenhöhe (VHM0) am besten durch das Modell rekonstruiert werden kann. Die zell-gemittelten R^2 werden in der Abbildung farblich hervorgehoben. Grün bedeutet dabei eine gute und rot eine schlechte Modell-Performance. Für dieses Modell wurden die durch die Markierungen „x“ gekennzeichneten Standorte FN1, FN3 und LTH als Input-Standorte verwendet. Die erhöhte Modellperformance in unmittelbarer Nähe der Input-Standorte FN1, FN3 und LTH ist darauf zurückzuführen, dass das ML-Modell dort direkt mit tatsächlichen Eingabewerten (z. B. Wellenhöhe, -periode und -richtung) versorgt wird. In diesen Regionen liegen also konkrete Informationen über den Seegangszustand vor, was zu einer sehr präzisen Rekonstruktion der flächigen Seegangsdynamik führt. Mit zunehmender Entfernung zu diesen Standorten muss das Modell hingegen Interpolationen bzw. generalisierte Zusammenhänge nutzen, um die Seegangparameter vorherzusagen.

Die Vorhersagen beruhen dann nicht mehr auf direkten Beobachtungen, sondern auf den gelernten Korrelationen zwischen den in-situ-Inputs und den räumlichen Mustern im Trainingsdatensatz. Dies führt naturgemäß zu einem Qualitätsabfall, insbesondere in komplexen oder dynamischen Randbereichen des Modellgebiets, wo die physikalischen Seegangsprozesse nicht mehr hinreichend durch die wenigen verfügbaren Eingabepunkte abgebildet werden können. Am westlichen Rand hingegen, wo keine direkten in-situ Informationen mehr vorliegen, muss das Modell ausschließlich auf die im Training erlernten räumlichen Zusammenhänge zurückgreifen. Da sich die dortigen Seegangsmuster durch küstenferne Dynamiken unterscheiden können, die nicht direkt von den zentralen Standorten abgeleitet werden können, nimmt die Modellgüte sichtbar ab. Dies zeigt exemplarisch die raumabhängige Limitierung von gitterbasierten Modellen und unterstreicht die Relevanz einer strategisch optimierten Standortwahl für Input-Daten bei flächigen ML-Anwendungen im marinen Kontext.

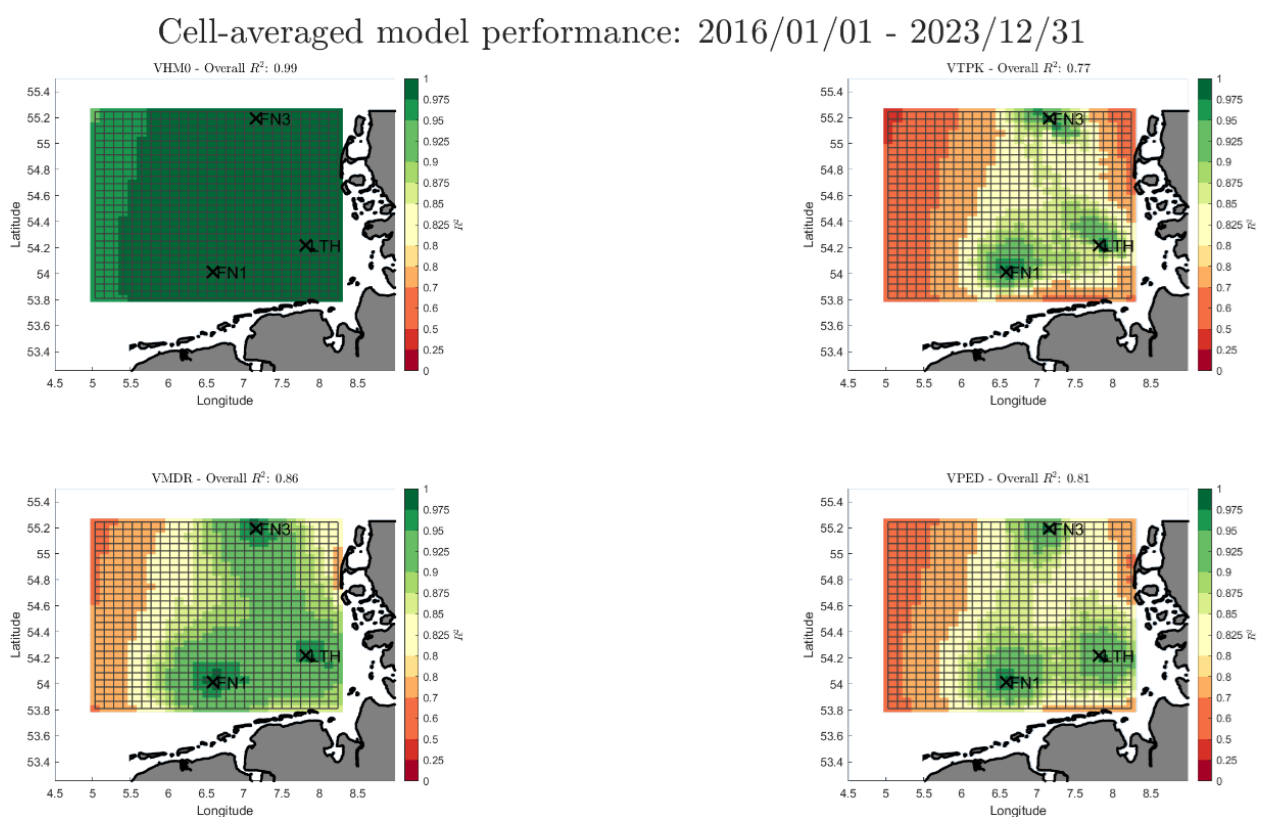


Abbildung 31 - Zell-gemittelte Modell Performance des RF-Modells für den Zeitraum vom 01.01.2016 - 31.12.2023

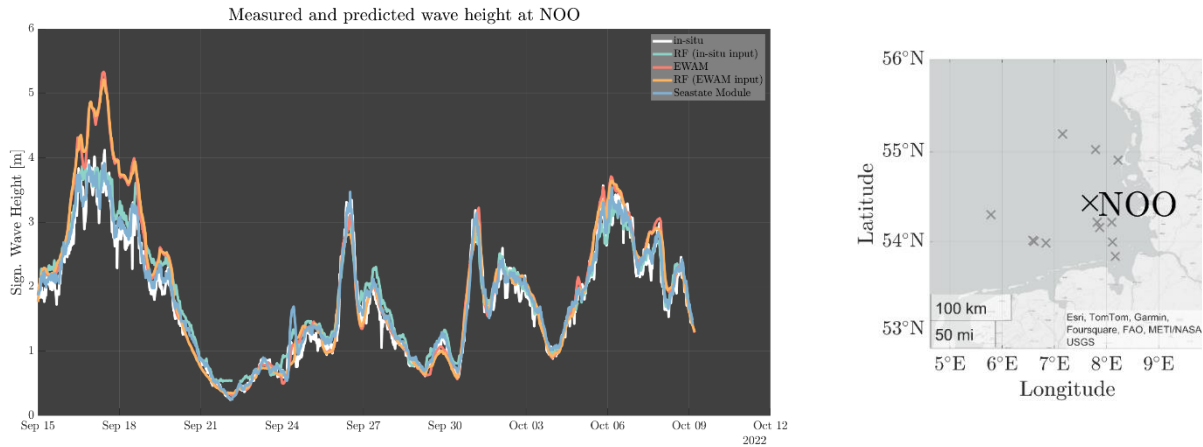


Abbildung 32 - Validierung am Standort NOO

II-1.6 Zusammenfassung

Arbeitspaket 4.1 – Wind-Wellen-Korrelation

Ziel war die Identifikation von Abhängigkeiten zwischen Wind- und Wellenparametern an den Messstandorten in der Deutschen Bucht. Untersucht wurden insbesondere Richtungsabhängigkeiten sowie die Reaktionszeit des Seegangs auf Veränderungen in Windrichtung und -geschwindigkeit. Es konnten signifikante Korrelationen nachgewiesen und standortspezifische Unterschiede aufgezeigt werden. Ergänzend wurden Kenngrößen zur Beschreibung des Windenergieeintrags identifiziert, die als Grundlage für die Modellierung der Seegangsreaktion dienen. Die Ergebnisse fließen in die im Seegangsportal bereitgestellten Übersichtskarten ein und unterstützen die Planung von Offshore-Arbeiten sowie die Ableitung von Lastannahmen.

Arbeitspaket 4.2 – Analyse der Wellen-Strömungs-Interaktion

Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Seegang und Strömung auf Basis hochaufgelöster Zeitreihenmessungen. Durch die Berechnung der intrinsischen Wellenfrequenz und den Vergleich mit gemessenen Spektren konnte eine systematische, strömungsinduzierte Umverteilung der Wellenenergie identifiziert werden. In Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und -richtung wurden spektrale Verschiebungen und mögliche Dissipationseffekte quantifiziert. Die Ergebnisse liefern wichtige Grundlagen zur Korrektur numerischer Seegangsvorhersagen und verbessern das physikalische Verständnis von hydrodynamischen Belastungen bei komplexen Umweltbedingungen.

Arbeitspaket 4.3 – Optimierung von Offshore-Zeitfenstern

Ziel war die Prognose nutzbarer Zeitfenster für Offshore-Arbeiten durch die Verknüpfung meteorologisch-ozeanographischer Bedingungen mit Einsatzgrenzen generischer Schiffsmodelle. In Zusammenarbeit mit dem Projekt AVIMo wurden erste Schnittstellen zu Schiffsmodellen geschaffen. Es wurde ein Tool zur Quantifizierung vertikaler Beschleunigungen entwickelt, das operative Einsatzgrenzen präziser beschreibt. Die Ergebnisse sind noch nicht abschließend validiert, tragen jedoch potenziell zur verbesserten Prognosefähigkeit für O&M-Logistik bei.

Arbeitspaket 4.4 – Implementierung und Automatisierung

Die entwickelten Methoden aus AP 4.1–4.3 wurden in automatisierte Routinen überführt und in das Seegangsportal implementiert. Ein in MATLAB entwickeltes Tool erstellt halbstündlich aktualisierte Übersichtskarten, die auf der Webseite des BSH veröffentlicht werden. Zusätzlich stehen Quellcode, Dokumentation und Beispielanwendungen über ein öffentliches GitHub-Repository zur Verfügung. Die Automatisierung ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung der Seegangsbedingungen in Echtzeit und schafft so eine breite Nutzbarkeit für Wissenschaft, Wirtschaft und Behörden.

Arbeitspaket 4.5 – Datensammlung und -vorbereitung (Erweiterung)

Zur Vorbereitung von Machine-Learning-Methoden wurde die automatisierte Aufbereitung historischer und aktueller MetOcean-Daten realisiert. Hierfür wurden Skripte zur Datenbereinigung, Formatierung und Normalisierung entwickelt. Ergänzend wurden Fehlerprüfungen zur Verfügbarkeit und Plausibilität

integriert und in den laufenden Betrieb übernommen. Diese standardisierte Vorverarbeitung bildet eine zentrale Grundlage für robuste ML-Modelle und wird auch in Folgeprojekten genutzt.

Arbeitspaket 4.6 – Entwicklung von Machine-Learning-Modellen (Erweiterung)

Aufbauend auf den aufbereiteten Daten wurden ML-Modelle zur flächenhaften Seegangsvorhersage entwickelt. Dabei kamen Ensemble-Methoden wie Random Forest und XGBoost zum Einsatz, die für die signifikante Wellenhöhe hohe Vorhersagegüten (R^2 bis 0,99) erreichten. Ergänzend wurde ein Neural-Architecture-Search-Ansatz zur sequenziellen Vorhersage über 3–12 Stunden erfolgreich getestet. Die Modelle sind unabhängig vom CWAM und werden im geplanten Nachfolgeprojekt *finalRAVE* weiter operationalisiert.

Arbeitspaket 4.7 – Validierung und Implementierung von ML-Modulen (Erweiterung)

Die trainierten Modelle wurden anhand unabhängiger Messdaten und numerischer Simulationen validiert. Die Ergebnisse bestätigten eine robuste Modellgüte, insbesondere für die Vorhersage signifikanter Wellenhöhen. Eine vollständige Integration in das Live-System war projektbedingt nicht möglich, ist jedoch für *finalRAVE* vorgesehen.

II-2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Teilvorhaben angefallenen Projektkosten setzten sich im Wesentlichen aus Personalkosten zusammen. Der überwiegende Anteil entfiel auf wissenschaftliche Mitarbeiterstellen (E13) sowie unterstützende Tätigkeiten wissenschaftlicher Hilfskräfte. Hierdurch konnten die Analyse- und Entwicklungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Seegangportal-Module, einschließlich der Implementierung von Machine-Learning-Methoden, kontinuierlich vorangetrieben werden. Weitere direkte Kosten ergaben sich aus Dienstreisen im Rahmen der projektinternen Koordination und der Teilnahme an Fachkonferenzen. Die Reisen dienten dem Austausch mit den Projektpartnern, insbesondere dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), sowie der Präsentation von Zwischenergebnissen im nationalen und internationalen Rahmen. Die tatsächlichen Reisekosten blieben im Vergleich zur ursprünglichen Planung gering und machten nur einen Bruchteil der Gesamtausgaben aus. Investitions- und Sachmittel spielten im Projekt eine untergeordnete Rolle. Die notwendige Hard- und Softwareausstattung (PCs, MATLAB- und Programmierlizenzen) war institutsseitig vorhanden, sodass keine zusätzlichen Anschaffungen erforderlich waren. Auch externe Auftragsvergaben wurden nicht veranlasst.

II-3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die zur Realisierung des Vorhabens eingesetzten Ressourcen waren in Umfang und Art angemessen. Die wissenschaftlichen Arbeiten, insbesondere die Entwicklung und Implementierung der Seegangportal-Module sowie die weiterführenden Analysen zur Wellen-Strömungs-Interaktion, hätten ohne die gewährte Förderung nicht durch das Ludwig-Franzius-Institut durchgeführt werden können. Angesichts der wachsenden Relevanz der Offshore-Windenergie und des damit verbundenen Kostendrucks auf Betreiber und Logistikdienstleister war die Durchführung der Arbeiten notwendig, um einen Beitrag zu den Ausbauzielen der Branche zu leisten. Die eingesetzten Mittel wurden überwiegend für wissenschaftliches Personal verwendet und stellten somit die Grundlage für die kontinuierliche Bearbeitung der Fragestellungen dar. Investitionsmittel für zusätzliche Geräte oder Messtechnik waren nicht erforderlich, da die notwendige Infrastruktur institutsseitig vorhanden war. Die für das Projekt vorgesehenen Reisemittel wurden zweckgebunden eingesetzt, insbesondere für Projekttreffen mit den Partnerinstitutionen sowie für die Präsentation von Zwischenergebnissen auf Fachveranstaltungen. Damit waren die eingesetzten Ressourcen sowohl notwendig für die Erreichung der Projektziele als auch in ihrem Umfang angemessen.

II-4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Projekt entwickelten Methoden und Werkzeuge leisten einen Beitrag zur Verbesserung der logistischen Planung von Offshore-Einsätzen und zur Reduzierung wetterbedingter Unsicherheiten. Ziel war es, Entscheidungsgrundlagen zu schaffen, mit denen Arbeitszeitfenster verlässlicher bestimmt und die Auswirkungen unvorhergesehener Wartezeiten verringert werden können. Die Verknüpfung von in-situ-Messungen mit numerischen Vorhersagen und ergänzenden Analyseverfahren ermöglicht eine präzisere Einschätzung von Seegangsbedingungen. Dies kann dazu beitragen, Zeitfenster für Offshore-Arbeiten besser abzuschätzen und somit Verzögerungen und zusätzliche Kosten zu reduzieren. Auch die Analyse von Wellen-Strömungs-Interaktionen sowie erste Anwendungen von Machine-Learning-Ansätzen eröffnen Perspektiven für eine differenziertere Betrachtung komplexer Umwelteinflüsse. Für die Praxis ergibt sich daraus ein Nutzen in Form von besser abgestützten Planungsentscheidungen und einer potenziell effizienteren Ressourcennutzung. Vor dem Hintergrund des geplanten Ausbaus der Offshore-Windenergie ist davon auszugehen, dass der Bedarf an verlässlichen Datenprodukten weiter zunehmen wird. Über die Anbindung an das Seegangsportale des BSH wird eine Grundlage geschaffen, die auch über die Projektlaufzeit hinaus Anwendung finden kann.

II-5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf der Projektbearbeitung konnten verschiedene wissenschaftliche Arbeiten identifiziert werden, die unmittelbar mit den Themen Seegangsvorhersage, Wellenprognose und der Nutzung von Reanalyse- sowie Assimilationsmethoden in Verbindung stehen. Im Bereich der datengetriebenen Methoden ist insbesondere die Anwendung rekurrenter neuronaler Netze hervorzuheben. Bethel, Sun, Dong und Wang (2022) zeigen, dass Long Short-Term Memory Netzwerke (LSTM) geeignet sind, signifikante Wellenhöhen während extremer Wetterereignisse im karibischen Raum vorherzusagen. Ergänzend demonstrieren Minuzzi und Farina (2022), dass LSTM-basierte Ansätze in Kombination mit Reanalyse- und Bojendaten eine vielversprechende Alternative zu rein numerischen Prognosemodellen darstellen können.

Neben derartigen ML-Methoden haben sich auch Ensemble-basierte Assimilationsverfahren als relevanter Fortschritt erwiesen. Houghton, Hegermiller, Teicheira und Smit (2022) zeigen die operationelle Assimilation spektraler Wellenbeobachtungen aus einem Sensornetzwerk, wodurch die Vorhersagequalität regional verbessert werden konnte. Wang und Pan (2021) demonstrieren, dass eine phasenaufgelöste Wellenvorhersage durch den kombinierten Einsatz von Ensemble-Methoden und Datenassimilation möglich ist.

Zusammenfassend zeigen diese Arbeiten, dass sowohl ML-basierte Vorhersagemodelle als auch Ensemble-Assimilationsmethoden zunehmend in der Seegangs- und Wellenforschung eingesetzt werden. Die erzielten Fortschritte belegen die Aktualität des Themas und unterstreichen die Relevanz der im Projekt verfolgten Ansätze im internationalen Forschungskontext.

II-6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Projekts wurden bereits in unterschiedlichen Formaten vorgestellt und sollen weiterhin in wissenschaftliche und praxisnahe Veröffentlichungen überführt werden. Erste Zwischenergebnisse wurden auf einschlägigen Fachkonferenzen präsentiert, u. a. auf den RAVE-Workshops (2022 in digitaler Form, 2024 in Berlin) sowie auf der International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2022). Thematisch standen hier insbesondere die Entwicklung und Validierung des Seegangsmoduls sowie die Analyse der Wellen-Strömungs-Interaktion im Vordergrund. Darüber hinaus sind mehrere Veröffentlichungen in international anerkannten, begutachteten Fachzeitschriften vorgesehen. Als Zieljournals werden u. a. *Ocean Engineering*, *Coastal Engineering* sowie *Marine Structures* angestrebt. Parallel hierzu werden Beiträge auf internationalen Konferenzen wie ISOPE und OMAE vorbereitet, um die Projektergebnisse einem breiteren Fachpublikum zugänglich zu machen.

Neben den Beiträgen in Fachjournals und auf Konferenzen werden die Projektergebnisse auch im Rahmen von Dissertationen aufgearbeitet. Eine der Dissertationen befasst sich mit der Integration numerischer Modelle in die Analyse und Vorhersage von Seegangsbedingungen. Die zweite Dissertation untersucht die tideinduzierte Wellenfeldmodulation und entwickelt Korrekturterme zur realitätsnahen Abbildung der Wellenenergie. Beide Arbeiten leisten damit einen eigenständigen Beitrag zur wissenschaftlichen Aufbereitung und Verwertung der Projektergebnisse.

Ergänzend zur wissenschaftlichen Veröffentlichung werden auch praxisorientierte Ergebnisse zugänglich gemacht. Seit Dezember 2024 ist das Seegangsmodul beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) implementiert und liefert halbstündlich aktualisierte Seegangs-Übersichtskarten der Deutschen Bucht. Die Visualisierungen und Rohdaten sind über die BSH-Webseite verfügbar. Darüber hinaus wurde das Modul als Open-Source-Software unter GNU General Public License auf GitHub veröffentlicht und enthält Dokumentationen sowie Beispieldaten, die eine Weiterverwendung in Forschung und Praxis ermöglichen.

III Literaturverzeichnis

Bethel, B. J., Sun, W., Dong, C., & Wang, D. (2022). Forecasting hurricane-forced significant wave heights using a long short-term memory network in the Caribbean Sea. *Ocean Science*, 18(2), 419–436. <https://doi.org/10.5194/os-18-419-2022>

BSH. (2025). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Verfügbar 7. April 2025 unter https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Seegang/seegang_node.html

Cavaleri, L., Fox-Kemper, B., & Hemer, M. (2012). *Wind–waves in the coupled climate system*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(11), 1651–1661. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00170.1>

Chen, J., Ashton, I. G. C., Steele, E. C. C., & Pillai, A. C. (2023). A Real-Time Spatiotemporal Machine Learning Framework for the Prediction of Nearshore Wave Conditions. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2 (1), e220033. <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0033.1>

Chen, J., Pillai, A. C., Johanning, L., & Ashton, I. (2021). Using machine learning to derive spatial wave data: A case study for a marine energy site. *Environmental Modelling & Software*, 142, 105066. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105066>

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>

Handbook of offshore engineering (2010). Amsterdam, London: Elsevier (Elsevier Ocean Engineering Series).

Hildebrandt, Arndt; Schmidt, Boso; Marx, Steffen (2019): Wind-wave misalignment and a combination method for direction-dependent extreme incidents. In: *Ocean Engineering* 180, S. 10–22. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.034.

Houghton, I. A., Hegermiller, C., Teicheira, C., & Smit, P. B. (2022). Operational Assimilation of Spectral Wave Data From the Sofar Spotter Network. *Geophysical Research Letters*, 49(15). <https://doi.org/10.1029/2022gl098973>

Jonsson, Ivar G.; Skovgaard, Ove (1978): WAVE REFRACTION ACROSS A SHEARING CURRENT. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* (16), S. 41. DOI: 10.9753/icce.v16.41.

Malcherek, A. (2018). *Gezeiten Und Wellen: In Küsteningenieurwesen und Ozeanographie* (2nd ed.). Springer Vieweg.

Minuzzi, F. C., & Farina, L. (2023). A deep learning approach to predict significant wave height using long short-term memory. *Ocean Modelling*, 181, 102151. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102151>

Moritz, M. (2025). BSH station and sensor list in situ Surface Waves. Retrieved from https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Seegang/_Anlagen/Downloads/BSH_sea_state_station_and_sensor_list_en.pdf?_blob=publicationFile&v=5

Peng, Wei; Lee, Kwang-Ho; Shin, Seung-Ho; Mizutani, Norimi (2013): Numerical simulation of interactions between water waves and inclined-moored submerged floating breakwaters. In: *Coastal Engineering* 82, S. 76–87. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.07.002.

Peregrine, D. H. (1976): Interaction of Water Waves and Currents. In: *Advances in Applied Mechanics* Volume 16, Bd. 16: Elsevier (Advances in Applied Mechanics), S. 9–117

Pourzangbar, A., Jalali, M., & Brocchini, M. (2023). Machine learning application in modelling marine and coastal phenomena: a critical review. *Front. Environ. Eng.*, 2. <https://doi.org/10.3389/fenv.2023.1235557>

Smith, S. D. (1988) Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C12), 15467–15472. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15467>

Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliott, J. A., & Long, R. B. (1981). *Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves*. *Journal of Fluid Mechanics*, 102, 1–59. <https://doi.org/10.1017/S0022112081002528>

Tarwidi, D., Pudjaprasetya, S. R., Adytia, D., & Apri, M. (2023). An optimized XGBoost-based machine learning method for predicting wave run-up on a sloping beach. *MethodsX*, 10, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102119>

Zhan, Y., Zhang, H., Li, J., & Li, G. (2022). Prediction Method for Ocean Wave Height Based on Stacking Ensemble Learning Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (8), 1150. <https://doi.org/10.3390/jmse10081150>