

**„Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen  
durch Öl mit biogenen Bindern“**

---



**Abschlussbericht**

zu dem vom BMWI geförderten Teilprojekt

Chemische Charakteristika von Öl, biogenen Bindern  
und Abbaureaktionen sowie ökologischer Nutzen

Darstellung der Verdriftung von Ölbindern in der Ostsee  
mit einem realitätsnahen numerischen Modell

**Förderkennzeichen:** 03SX308A

**Bewilligungszeitraum:** 01.07.2011 – 30.06.2014

**Autoren:** Dipl.-Chem. Janne Hähnel  
Dr. Torsten Seifert  
Prof. Detlef Schulz-Bull

**Zuwendungsempfänger:** Institut für Ostseeforschung Warnemünde

Warnemünde, den 10.1. 2015

## Inhaltsverzeichnis

Kapitel I .....	3
1. Aufgabenstellung .....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde .....	3
3. Planung und Ablauf des Projektes .....	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
Kapitel II .....	6
1. Ergebnisbericht „Chemische Charakteristika von Öl, biogenen Bindern und Abbaureaktionen sowie ökologischer Nutzen“ .....	6
2. Ergebnisbericht “Darstellung der Verdriftung von Ölbindern in der Ostsee mit einem realitätsnahen numerischen Modell“.....	14
2.1. Modellkonfiguration und Modellanpassung.....	14
2.2. Modellexperimente mit realistischen Windlagen.....	16
2.3 Charakteristik der Windbedingungen.....	18
2.4 Klassifikation der modellierten Ausbreitungsmuster von Ölbindern.....	21
2.5 Zusammenfassung .....	33
3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	34
4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	34
5. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	34
6. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	34
7. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	34
Schrifttum .....	35
Anlage .....	37
Erfolgskontrollbericht.....	37
1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen .....	37
2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	37
3. Fortschreibung des Verwertungsplanes .....	37
3.1 Erfindungen und Schutzrechte.....	37
3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	37
3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten.....	37
3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	38
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	38
5. Präsentationsmöglichkeiten.....	38
6. Ausgaben- und Zeitplanung .....	38

## **1. Aufgabenstellung - Kurzfassung**

Die Aufgabenstellung des Teilvorhabens umfasste hauptsächlich Studien zur stofflichen Veränderung des Öls im Rahmen eines BioBind-Einsatzes. Neben der Auswahl und chemischen Charakterisierung verschiedener Ölsorten gehörte die chemisch-analytische Bestimmung repräsentativer Schadstoffgruppen zum Aufgabenfeld. Anhand der Abnahme dieser Schadstoffgruppen sollte die Effektivität der Binder und der ölabbauenden Mikroorganismen im Labor sowie im Feldversuch unter variablen Bedingungen bestimmt werden. Als meereswissenschaftliches Forschungsinstitut sollte das IOW die Leitung und Organisation von Versuchen in der Ostsee (Schiffsexpeditionen) übernehmen. Ein weiteres Aufgabenfeld stellte die Modellierung der Binderverdriftung unter verschiedenen meteorologischen Einflüssen mithilfe eines an die speziellen Bedingungen im Rahmen von BioBind angepassten Zirkulationsmodells der Ostsee dar.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde**

Die Aufgabenstellung wurde durch interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den anderen BioBind-Projektpartnern bearbeitet. Am IOW waren verschiedene Mitarbeiter der Grundausstattung aus den Sektionen Meereschemie, Biologische Meereskunde, Marine Geologie und Physikalische Ozeanographie/Modellierung an dem Projekt BioBind beteiligt. Diese unterstützten die im BioBind-Vorhaben angestellten Wissenschaftler und Techniker. Während der Bearbeitungszeit nutzten die Mitarbeiter die Geräte, Labore und Infrastrukturen des IOW. Für die Freilandexperimente wurden das IOW-eigene Forschungsschiff Elisabeth Mann Borgese und das IOW-Arbeitsboot Klaashahn von allen beteiligten Projektmitarbeitern genutzt. Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Modellierung der Binderverdriftungen war das am IOW vorhandene auf dem modularen Ozeanmodell MOM-5 basierende Ostseemodell. Dieses Modell konnte während der Projektlaufzeit gemäß der speziellen Fragestellung und Anforderungen weiterentwickelt werden. Die Modellsimulationen für die Verdriftung der Ölbinder unter verschiedenen Wetterbedingungen wurden auf den Parallelrechnern im Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) als Rechenzeitprojekt mvk00036 durchgeführt. Die Vorbereitung und Auswertung der Modellexperimente erfolgte auf Arbeitsplatzrechnern und Arbeitsgruppenservern im IOW.

## **3. Planung und Ablauf des Projektes**

Der Ablauf des Teilvorhabens entsprach im Wesentlichen der im Teilantrag ausgeführten Planung. Im Rahmen des Teilvorhabens sollten zunächst vorbereitende Maßnahmen wie Rechercharbeiten und Anpassungen bestehender Methoden an die spezielle Fragestellung im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt werden. Danach sollten konkrete Untersuchungen zunächst im Labormaßstab und darauffolgend im Freiland durchgeführt werden. Des Weiteren umfasste die Planung den Einsatz eines Modells zur Driftvorhersage der Binder (Forschungsmodell) sowie die Organisation von Schiffsexpeditionen.

Die ersten Monate der Projektlaufzeit widmeten sich der theoretischen Überlegungen zu den Anforderungen der Binder (Anforderungskatalog), der Literaturrecherche, der Anpassung einer geeigneten chemisch-analytischen Methode zur Behandlung und Messung der im Projekt anfallenden Proben und Fragestellungen sowie der Auswahl, Beschaffung und Charakterisierung geeigneter Ölsorten. Es folgten Versuche zum mikrobiellen Ölabbau sowie zu den Adsorptions- und Desorptionseigenschaften der Binder im Labormaßstab. Darüberhinaus wurden erste Untersuchungen hinsichtlich einer toxikologischen Bewertung der Binder durchgeführt. Aufbauend auf die Ergebnisse aus den Laborversuchen wurde der Versuchsmaßstab vergrößert und verschiedene Experimente in Rundtanks (sogenannten Mesokosmen) durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Parameter gewählt, um den Informationsgewinn aus diesen Experimenten möglichst breit aufzustellen. Die Mesokosmenexperimente wurden im Juli und September 2013 sowie im Februar 2014 durchgeführt. Basierend auf allen erzielten Ergebnissen konnte eine abschließende ökotoxikologische Bewertung des Systems BioBind durchgeführt werden. Zusätzlich wurde bereits im Anfangsstadium des Projektes mit der Anpassung eines Modells zur Driftvorhersage der Binder bei verschiedenen hydrodynamischen Randbedingungen begonnen. Für die Anwendung im Projekt musste das vorliegende Modul für die Driftmodellierung in wesentlichen Punkten korrigiert und für die Aufgabenstellung angepasst werden. Bis zum Ende des Projektes konnte die Verdriftung der Binder unter verschiedenen Szenarien modelliert und dargestellt werden. Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden drei Schiffsexpeditionen vom IOW beantragt und unter dessen Leitung (mit Ausnahme der zweiten Expedition) durchgeführt. Die Freilandversuche im Rahmen der Schiffsexpeditionen fanden mit der Genehmigung des StALU Mittelres Mecklenburg in einem definierten Gebiet vor Kühlungsborn im Juli und November 2013 sowie im Juni 2014 statt.

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Ein Großteil der im Teilvorhaben durchgeführten Experimente, Probenbehandlungen und Messungen konnte aufbauend auf am IOW etablierte Methoden und Arbeitsvorschriften entwickelt und angepasst werden. Die Arbeit von Herrn Dr. Krawi, die sich mit den Eigenschaften unterschiedlicher synthetischer und nativer Ölbindematerialien beim Einsatz in Seewasser beschäftigte, lieferte dabei wichtige Ergebnisse (Krawi 2006). Bei der Auswahl geeigneter, repräsentativer Schadstoffgruppen sowie bei der Anpassung der bestehenden Methoden erfolgte die Orientierung an einschlägiger Fachliteratur und Standardmethoden (Wang, Fingas et al. 1994; Wang, Fingas et al. 1994; ASTM 2007; Speight 2007). Endgültige Arbeitsanweisungen zu den einzelnen Experimenten und Methoden wurden basierend auf den Ergebnissen aus Versuchsreihen erstellt. Der Übergang vom Labormaßstab in die großmaßstäblichen Mesokosmenexperimente erforderte ein erneutes Literaturstudium (Aldrett, Bonner et al. 1997; Dutta and Harayama 2000; Suni, Kosunen et al. 2004; Venosa and Holder 2007). Um die besonderen Bedingungen in der Ostsee zu berücksichtigen, wurde auf Erkenntnisse, die im Rahmen des Monitoring-Programms am IOW erlangt wurden, zurückgegriffen (Nausch and Nehring 1996; Nausch, Feistel et al. 2011). Aufgrund der speziellen Probenahmetechnik im Rahmen der Mesokosmenexperimente wurde der Kontakt zu verschiedenen Laborausrüstern hergestellt, sodass ein geeignetes Konstrukt entwickelt werden konnte, das den Anforderungen weitestgehend entsprach. Das für die Driftmodellierung verwendete Ostseemodell beruht auf der Version 5 des Modular Ocean Model MOM (Griffies 2007). Es ist ein state-of-the-art Modell, das weltweit für globale und regionale Aufgabenstellungen angewendet wird (Seifert 2009, Radtke 2012, Griffies, Treguier 2013).

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Enge Kooperation bestand mit den anderen Teilvorhaben des BioBind-Verbundes (Partner des Kooperationsvertrages). Besonders intensiv wurde mit den Arbeitsgruppen der Universität Leipzig (Dr. König und Dr. Safonova) und der Technischen Universität Dresden (Dr. Tech und Herr Unbehaun) zusammengearbeitet. Gemeinsame Experimente mit den Partnern der Universität Leipzig führten nicht nur zu einem intensiven Probenaustausch sondern auch zu einem Gastaufenthalt in den Laborräumen der Universität Leipzig zum Aufarbeiten gemeinsamer Proben. Ein reger Informationsaustausch sowie eine intensive Zusammenarbeit bezüglich der Planung der Mesokosmenexperimente erfolgten mit der Projektkoordination bzw. den Projektpartnern der Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau.

Vereinzelte analytische Untersuchungen wurden an der Universität Rostock durchgeführt.

## Kapitel II

### 1. Ergebnisbericht „Chemische Charakteristika von Öl, biogenen Bindern und Abbaureaktionen sowie ökologischer Nutzen“

Basierend auf einer ausführlichen Literaturrecherche zum Thema „Zusammensetzung von Ölsorten und Ölprodukten“ wurden drei Ölsorten ausgewählt, die im Untersuchungsgebiet Ostsee relevant sind. Bei den ausgewählten Ölsorten handelt es sich um extraleichtes Heizöl (Diesel), schweres Heizöl und Rohöl (Russian Export Blended). Charakteristische physikalische Eigenschaften der Öle sind bekannt (z. B. Viskosität, Siedebereich) und konnten zu einer ersten Klassifizierung herangezogen werden. Eine detaillierte chemische Klassifizierung erfolgte am IOW bzw. an der Universität Rostock. Alle drei Ölsorten wurden den Projektpartnern der anderen Teilvorhaben in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt.

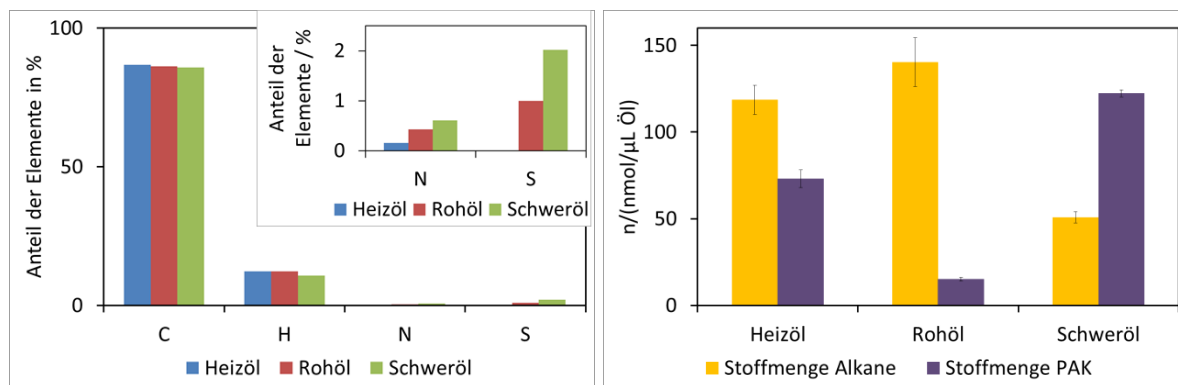
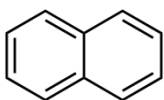
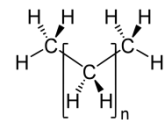


Abb. 1.1: Chemische Charakterisierung der drei ausgewählten Ölsorten (Heizöl, Rohöl, Schweröl).

Die am IOW vorhandenen Erfahrungen bezüglich des Ökosystems Ostsee konnten die Arbeiten zur Erstellung des Anforderungskatalogs für die zu entwickelnden Binder bereichern und ergänzen. Es wurden Qualitätskriterien und Anforderungen formuliert, die von den im Projekt entwickelten Bindern erfüllt werden sollten. Diese Kriterien und Anforderungen lieferten während der gesamten Projektlaufzeit eine Leitlinie hinsichtlich der Binderentwicklung und -optimierung.

Die Ölauswahl und Klassifizierung sowie die Formulierung der Anforderungen an die Ölbinder entsprachen den vorgegebenen Zielen des Arbeitspaketes 5.1.

Um die Bindereigenschaften und die Effizienz der ölabbauenden Mikroorganismen bestimmen zu können, wurden analytische Nachweismethoden ausgewählt, angepasst und validiert. Als nachzuweisende Parameter wurde das Öl als Gesamtmatrix bestimmt sowie zwei in der Ölanalytik etablierte Schadstoffgruppen, die (linearen) Alkane sowie die von der United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA, Umweltbehörde der USA) in die Liste der prioritären Schadstoffe aufgenommenen 16 polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK).

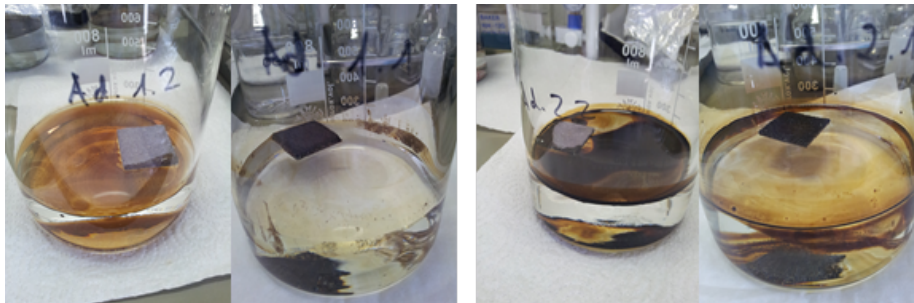


Diese Liste der üblichen PAK wurde durch acht weitere polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe ergänzt, bei denen es sich um Verbindungen handelt, die an ihrer Grundstruktur zusätzlich eine Kohlenstoffkette variabler Länge aufweisen – sogenannte alkylierte PAKs.

Diese Verbindungen sind vor allem bezüglich des mikrobiellen Ölabbau von Interesse und wurden daher in die Liste der Zielsubstanzen aufgenommen.

Die analytischen Nachweismethoden wurden schrittweise (Extraktion, Elution, Messung) für Alkane und PAK validiert. Die Validierungsparameter (Wiederfindungsraten, Reproduzierbarkeit, Nachweisgrenzen, Linearität) entsprachen den Anforderungen in vollem Umfang. Die Quantifizierung erfolgt mittels interner Standards, deren Eignung (Wiederfindungsraten) ebenfalls im Vorfeld zufriedenstellend bestätigt werden konnte.

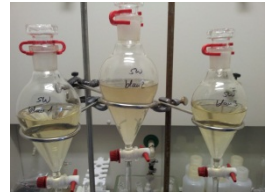
Anhand verschiedener Experimente konnten die zufriedenstellenden Absorptions- und Desorptionseigenschaften der Ölbinder ermittelt werden. Die Absorptionseigenschaften wurden im Labor bei unterschiedlichen Ölfilmschichtdicken (Rohöl, 0,3 mm und 0,03 mm – Werte orientieren sich an VPS-Tabelle), mit Bindern im Überschuss und mit einer Binderbelegung von  $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$  durchgeführt. Werden die Ölbinder mit einer Belegung von  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$  eingesetzt, verbleibt bei einer Ölfilmschichtdicke von 0,3 mm nach einer Inkubationszeit von 90 min lediglich ein Ölanteil von  $< 1 \%$  in der Wasserphase bzw. an der Behälterwand. Die Binder nehmen unter diesen Bedingungen also nahezu das gesamte Öl auf. In dem Forschungsvorhaben BioBind musste oftmals ein Kompromiss gefunden werden, um den Anforderungen verschiedener Projektpartner gerecht zu werden. Daher wurde die optimale Binderbelegung auf  $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$  festgelegt. Bei dieser Binderbelegung verbleibt bei einer Ölfilmschichtdicke von 0,3 mm nach einer Inkubationszeit von 60 min ein Ölanteil von 15,5 % im Wasser bzw. an der Behälterwand. Bei einer Ölfilmschichtdicke von 0,03 mm liegt die nicht aufgenommene Ölmenge entsprechend bei 18,5 %. Bei allen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Werte der im Wasser bzw. an der Behälterwand verbleibenden Alkane und PAK mit den Werten für das Gesamtöl im Wesentlichen übereinstimmen. Das heißt, dass die Binder in der Lage sind, auch die zum Teil im Wasser löslichen und toxischen Ölbestandteile aufzunehmen.



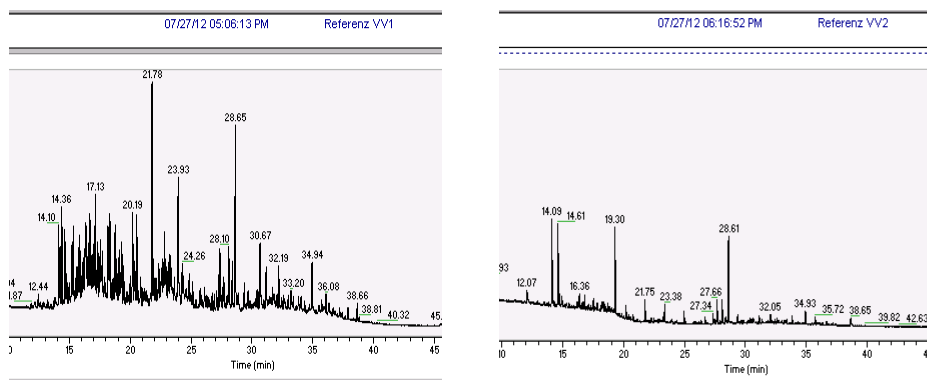
**Abbildung 1.2:** Adsorptionsuntersuchungen mit  $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$  Binderbelegung und einer Ölfilmschichtdicke von 0,03 mm (links) und 0,3 mm (rechts), jeweils direkt nach der Binderzugabe und nach einer Stunde Versuchslaufzeit.

Für die Untersuchungen bezüglich der Desorptionseigenschaften der Ölbinder wurden diese mit Öl getränkt und in ein mit Wasser gefülltes Becherglas gegeben. Die Inkubationszeit der Untersuchungen betrug 1 h, 15 h, 24 h, 10 Tage und 20 Tage. Innerhalb von 24 Stunden geben die mit Öl getränkten Binder weniger als 0,2 % der ursprünglich eingesetzten Ölmenge an die Wasserphase bzw. die Behälterwand ab. Nach 10 Tagen liegt der Wert bei 2,7 %, nach 20 Tagen bei 4,3 %. Der von den Bindern desorbierte Ölanteil liegt also auch nach 20 Tagen starker mechanischer Belastung unterhalb von 5 % und ist somit vollends zufriedenstellend. Die Desorption der Alkane und PAK nahm ebenfalls entlang der Zeitreihe zu, lag jedoch nach 20 Tagen bei lediglich 0,3 % für die Summe der Alkane und bei 2,7 % für die Summe der 24 ermittelten PAK. Das heißt, dass auch die ausgewählten Schadstoffgruppen von den Ölbindern dauerhaft gebunden werden und nicht ohne weiteres an die Wasserphase bzw. die Umgebung (z.B. feste Flächen wie die Behälterwand im Versuch oder Felsoberflächen im Freiland) abgegeben werden.

Mit den erläuterten Experimenten konnten die zu diesem Zeitpunkt im Projekt entwickelten Ölbinder detaillierter charakterisiert und ihre Eignung für nachfolgende Untersuchungen bestätigt werden. Somit wurden die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes 5.2.1 in vollem Umfang erreicht. Für die Bearbeitung des Arbeitspaketes wurden entgegen der ursprünglichen Planung die ersten 19 Projektmonate in Anspruch genommen. Die planmäßige Durchführung der übrigen Arbeitspakete sowie der Zeitplan des Projektes wurden dadurch nicht negativ beeinflusst.



Um die toxikologischen Eigenschaften der Ölbinder zu erfassen, wurden Elutionsversuche mit unterschiedlichen Bindertypen in Salzwasser (deionisiertes Wasser mit Natriumchlorid, S = 10 g/kg) über einen Zeitraum von vier Wochen durchgeführt. Darüber hinaus wurden auch die den Bindern in unterschiedlichen Gewichtsanteilen zugesetzten Additive in Lösungsmittel aufgenommen und analysiert. Die Analysen der extrahierten Eluate zeigten, dass bei der Verwendung beider Additive keines der beiden in die Wasserphase übertritt. Eine Schwermetallanalyse konnte belegen, dass die Elemente Blei und Cadmium in den Eluaten nicht nachweisbar waren. Die Konzentrationen an Kupfer und Zink lagen unterhalb des kritischen Bereiches und sind somit nicht gefährdend für das Ökosystem Ostsee. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass der Fertigungsprozess bzw. das beim Fertigen verwendete Prozesswasser, das über mehrere Fertigungszyklen im Kreislauf geführt wird, eine Quelle für das Eintragen von Fremdstoffen darstellt. Je nach Inhaltsstoffen können über das Prozesswasser lediglich (toxikologisch unbedenkliche) Naturstoffe oder auch Schadstoffe auf die Binder gebracht werden. Dieser Punkt muss bei der Binderfertigung demnach sensibel behandelt und dementsprechend verantwortungsbewusst berücksichtigt werden.



**Abbildung 1.3:** Ausschnitt aus zwei Chromatogrammen (10 min – 45 min). Der Einfluss durch den Kontakt mit Prozesswasser während der Fertigung wird durch die gesteigerte Anzahl von detektierten Verbindungen im linken Chromatogramm deutlich. Der Binder, dessen Eluat im rechten Chromatogramm analysiert wurde, wurde unter Verwendung von frischem Prozesswasser gefertigt.

Eine gesetzlich vorgeschriebene Zertifizierung/Zulassung für (biogene) Ölbindematerialien existiert derzeit nicht. Bei der arbeitsmedizinischen Bewertung und umwelttechnischen Prüfung gemäß der Empfehlung der Ölbinderrichtlinie (16.06.1998) durch das Materialprüfungsamt Dortmund und das Institut für Umwelthygiene und Toxikologie in Gelsenkirchen sollte lediglich der Wert für den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) im Bindereluat eine kritische Größe darstellen. Derzeit werden für Bindemittel, die in chemisch veränderter Form in den Handel kommen sollen, TOC-Grenzwerte gemäß den Zuordnungskriterien für Deponieklassen angewendet. Da die Eignung dieser Anwendung



sowie die Ölbinderrichtlinie aktuell diskutiert und überarbeitet werden, konnte bislang keine abschließende Zertifizierung der Binder durchgeführt werden. Nach dem aktuellen Kenntnisstand ist ein Einsatz der im Forschungsvorhaben BioBind entwickelten Ölbinder jedoch aus toxikologischer Sicht unbedenklich.

Die oben erläuterten Elutionsversuche sowie die daraus resultierenden Ergebnisse entsprechen den in Arbeitspaket 5.2.2 formulierten Anforderungen. Die Ergebnisse konnten in kürzerer Zeit als ursprünglich geplant erzielt werden.

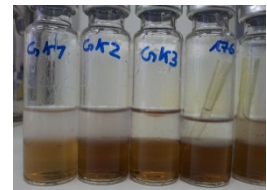
Die Projektpartner der Universität Leipzig konnten diverse öltolerierende Mikroorganismenkulturen (Reinkulturen) aus verschiedenen Ostseewasserproben isolieren. Nach mehreren Voruntersuchungen, bei denen zahlreiche Auswahlkriterien angewendet wurden, konnten 19 Bakterienstämme ausgewählt werden, deren Ölabbauleistungen (Rohöl) näher untersucht wurden. In Zusammenarbeit mit der Sektion Biologische Meereskunde am IOW war es möglich, die genannten 19 Bakterienstämme taxonomisch zu klassifizieren. Es handelt sich bei allen ausgewählten Stämmen um Rhodococcus-Arten.



Bei einem Ölanteil von 0,5 Vol-% konnte nach einer Inkubationszeit von zwei Wochen kein signifikanter PAK-Abbau nachgewiesen werden. Der Alkanabbau variierte von 0 % bis 93 % und lag bei sechs Stämmen über 80 %. In folgenden Experimenten konnte gezeigt werden, dass das verwendete Medium, in dem die Versuche

durchgeführt werden, einen bedeutenden Einfluss auf die Abbauraten der Bakterienstämme hat. Je mehr Nährstoffe und Spurenelemente zur Verfügung stehen, desto besser ist der Ölabbau. So konnte in einem nährstoffreichen Medium nach 45 Tagen für ausgewählte Stämme ein PAK-Abbau von ca. 50 % nachgewiesen werden. Auch die zugegebene Ölmenge beeinflusst anscheinend die Abbauleistung der untersuchten Bakterienstämme. Je mehr Öl zugesetzt wird, desto geringer ist die Abbauleistung der eingesetzten Mikroorganismen. Dies deutet auf einen toxikologischen Grenzwert hin, bei dessen Überschreiten die Mikroorganismen nicht mehr in der Lage sind, das toxische Rohöl abzubauen.

In einem Großversuchsansatz wurden alle 19 Bakterienstämme miteinander und mit sich selbst kombiniert und für zwei Wochen mit einem Ölanteil von 0,2 Vol-% inkubiert. Aus diesem Versuchsansatz wurden ausgewählte Bakterienkombinationen hinsichtlich des Alkan- und PAK-Abbaus untersucht. Der Alkanabbau, der in 37 Proben (alle Kulturen in Kombination mit sich selbst, eine ausgewählte Kultur jeweils



in Kombination mit allen anderen Kulturen) untersucht wurde, lag zwischen 74 und 97 % und lag bei 60 % der Proben über 90 %. Ein PAK-Abbau konnte für diese Proben jedoch nicht signifikant nachgewiesen werden. Aus dem Versuchsansatz wurden basierend auf den Ergebnissen der fluorimetrischen Analyse der Projektpartner aus Leipzig weitere zehn Proben ausgewählt, die hinsichtlich des PAK-Abbaus untersucht wurden. Dabei zeigten vier Proben keinen signifikanten PAK-Abbau, in den verbleibenden sechs Proben konnte ein PAK-Abbau zwischen 17 % und 33 % nachgewiesen werden. Als Fazit konnte aus diesem Großversuch herausgearbeitet werden, dass der Alkanabbau bei allen Reinkulturen und Zweier-Konsortien zufriedenstellend war, wohingegen der PAK-Abbau lediglich bei ausgewählten Bakterienkombinationen stattgefunden hat. Es ist demnach sinnvoll, mit Mikroorganismen-Konsortien zu arbeiten, da beim Einsatz der Reinkulturen kein PAK-Abbau nachgewiesen werden konnte.

Weitere Versuchsreihen hatten zwei Zielstellungen. Zum einen galt es, das effektivste Bakterienkonsortium zu finden. Zum anderen sollte die effektivste Kombination aus einem

Bakterienkonsortium und einer öltolerierenden Alge detektiert werden. Dazu wurde mit einem Ölanteil von 0,5 Vol-% gearbeitet. Bei einer Inkubationszeit von zwei Wochen konnte ein Abbau des Gesamtöls von 7 % - 14 % für fünf Dreierkonsortien nachgewiesen werden. Die Kombination mit einer öltolerierenden Alge brachte keine Steigerung des Ölabbaus. In allen Proben wurde ein Alkanabbau von 100 % erreicht. Die Zeitreihenanalyse für zwei ausgewählte Dreierbakterienkonsortien zeigt, dass bereits nach einem Tag Inkubationszeit 7 % bzw. 19 % der Alkane abgebaut worden sind. Der vollständige Alkanabbau konnte in diesen Proben nach vier Tagen erreicht werden. Ein PAK-Abbau konnte lediglich in vier von zwölf Proben nachgewiesen werden; dort lag er zwischen 5 % und 15 %.

Basierend auf den erläuterten Experimenten konnten die effektivsten Bakterienkulturen ausgewählt werden. Unter Laborbedingungen konnte nachgewiesen werden, dass der Alkanabbau bereits nach wenigen Tagen vollständig abgeschlossen ist, während der PAK-Abbau mit geringerer Ölmenge, nährstoffreicherem Medium und längerer Inkubationszeit ansteigt. Die Maximalwerte betragen dabei 50 %. Bezogen auf das Gesamtöl konnte nach zwei Wochen Inkubationszeit ein Masseverlust von etwa 10 % ermittelt werden, der ausschließlich auf die mikrobielle Aktivität zurückzuführen ist. Die Kombination aus Bakterien und Algen zeigte in den erläuterten Experimenten keine signifikante Abbausteigerung. Der Einsatz von Algen dient primär der Sicherung der Sauerstoffversorgung und gewinnt vermutlich dann an Bedeutung, wenn die Mikroorganismengemeinschaften auf den Ölbindern immobilisiert und im Freiland eingesetzt werden.

Die Identifizierung der geeigneten biologischen Gemeinschaften und deren Leistungsfähigkeit entsprach den formulierten Zielen der Arbeitspakete 5.3.1 und 5.3.2. Diese wurden in vollem Umfang erreicht.

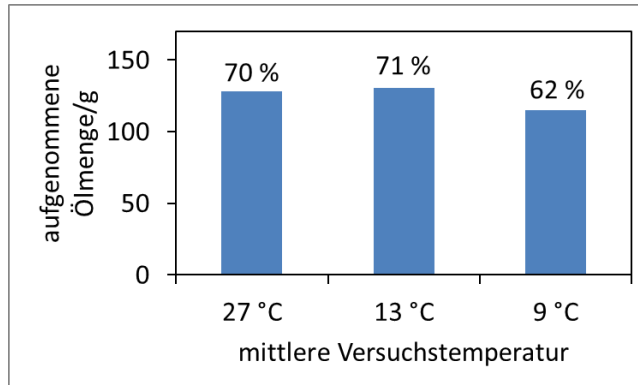
Um Freilandbedingungen zu simulieren, wurden drei Experimentreihen in Rundtanks, sogenannten Mesokosmen, durchgeführt. Die Tanks haben eine Höhe und einen Durchmesser von etwa 1 m und wurden jeweils mit ca. 300 L Ostseewasser befüllt. In den Mesokosmen wurde mit einer Ölfilmschichtdicke von 0,3 mm (Rohöl) und einer Binderbelegung von 0,1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> gearbeitet. Um den saisonalen Einfluss zu erfassen, wurden Mesokosmenexperimente im Juli und September 2013 sowie im Februar 2014 durchgeführt. Die mittleren Temperaturen über den gesamten Versuchszeitraum betragen jeweils 27 °C, 13 °C bzw. 9 °C. Im Rahmen dieser Experimente konnten detaillierte Informationen zur Funktionalität und zu den Eigenschaften der Binder im Meerwasser sowie zur Leistungsfähigkeit der Mikroorganismengemeinschaften bei nahezu realistischen Umweltbedingungen gewonnen werden. Dabei wurden Binder, auf denen Mikroorganismen mittels verschiedener Techniken immobilisiert wurden, eingesetzt. Es wurden zwei Immobilisierungsverfahren unterschieden: lange und kurze Immobilisierung (siehe dazu Teilbericht der Universität Leipzig).



Anhand von Nährstoffuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass in den Tanks eine hohe mikrobielle Aktivität herrschte, jedoch keine nitrifizierenden Bakterien aktiv waren. Eine ausreichende Sauerstoffversorgung konnte mittels überwachender Messungen und einer dementsprechend regulierten Pumpenleistung gewährleistet werden.

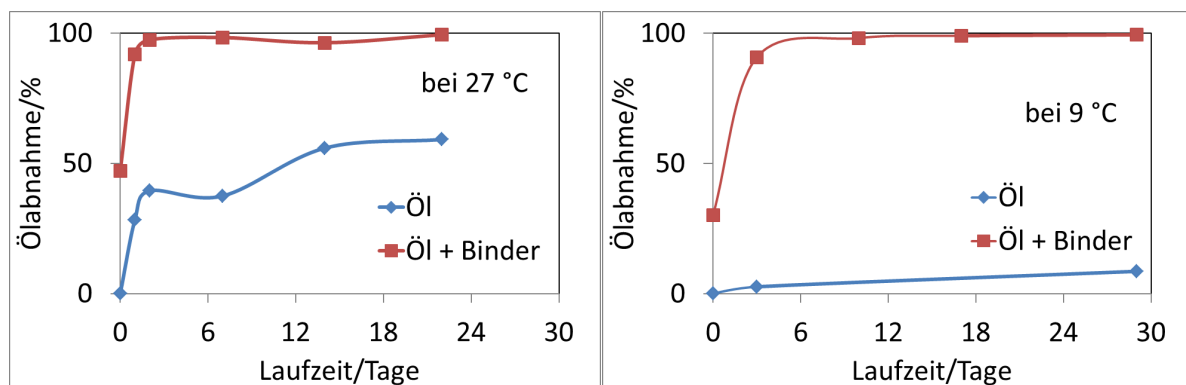
Im Rahmen der Mesokosmenexperimente konnte gezeigt werden, dass die Ölaufnahmeeffizienz der Binder temperaturabhängig ist (Abbildung 4). Dazu wurden dem System einzelne Binder entnommen und extrahiert. Bei einer mittleren Versuchstemperatur von 27 °C betrug die Ölaufnahme 4,0 g ± 0,1 g pro Binder. In den Tanks wurden zum Erreichen der vorgegebenen Binderbelegung 32 Binder eingesetzt, sodass insgesamt 128 g Öl durch die Binder aufgenommen wurden. Das entspricht 70 % des ursprünglich

zugegebenen Öls. Bei einer Versuchstemperatur von 13 °C erfolgte eine Ölaufnahme von 4,1 g ± 0,03 g pro Binder. Das entspricht insgesamt einer Menge von 131 g Öl pro Tank und somit 71 % der ursprünglichen Ölmenge. Bei einer Versuchstemperatur von 9 °C lag die Ölaufnahme bei 3,6 g ± 0,7 g pro Binder. Das entspricht insgesamt einer Menge von 115 g Öl pro Tank und somit 62 % des ursprünglich zugegebenen Öls.



**Abbildung 1.4:** Die in den drei Mesokosmenexperimenten insgesamt aufgenommene Ölmenge. Über den Säulen ist der prozentuale Anteil bezogen auf die ursprünglich zugegebene Ölmenge angegeben.

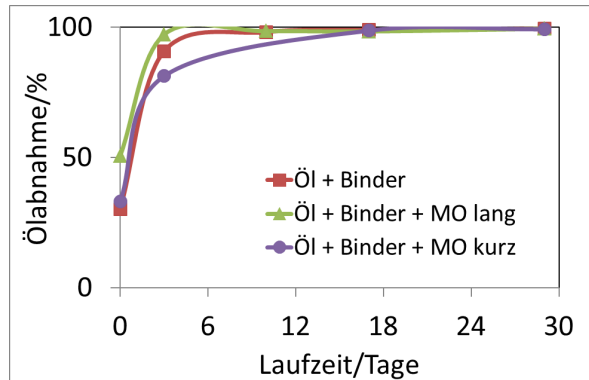
Neben der Ölaufnahme durch die Binder wird die Ölabbau in den Mesokosmen zusätzlich durch Verdampfungs- und Adsorptionseffekte (z. B. an der Behälterwand, am Pumpenkabel, etc.) sowie durch den mikrobiellen Abbau durch die natürlich im Ostseewasser vorkommende Gemeinschaft beeinflusst. All diese Effekte müssen berücksichtigt werden, wenn die in der Wasserphase verbleibende Ölmenge diskutiert wird. Dennoch gibt dieser Parameter Auskunft über die Ölaufnahmegeschwindigkeit der Binder, die mit sinkender Temperatur abnimmt (Abbildung 5). Bei wärmeren Temperaturen wird bereits einen Tag nach dem Bindereinsatz eine Ölabbau von 90 % erreicht, wohingegen dieser Wert bei kälteren Temperaturen erst nach drei Tagen erreicht wird. Beide Grafiken in Abbildung 5 zeigen jedoch, dass nach zwei bzw. fünf Tagen in beiden Experimenten eine nahezu vollständige Ölabbau in der Wasserphase nachgewiesen werden konnte.



**Abbildung 1.5:** Die Ölabbau in der Wasserphase (beeinflusst durch die Ölaufnahme durch die Binder, Verdampfungs- und Adsorptionseffekte sowie den mikrobiellen Abbau durch natürlich vorkommende Gemeinschaften im Ostseewasser) bei 27 °C (links) und bei 9 °C (rechts) in zwei verschiedenen Mesokosmen.

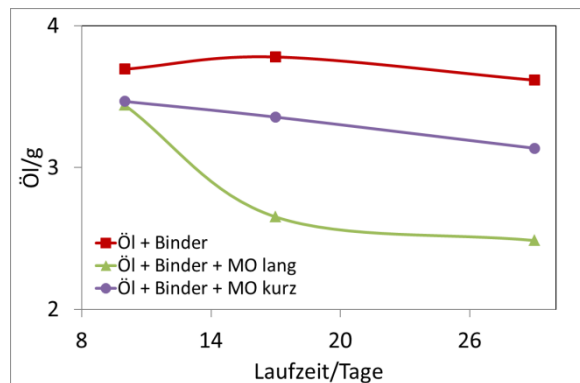
In den Mesokosmenexperimenten wurden zusätzlich Binder eingesetzt, auf denen im Vorfeld Mikroorganismen mit unterschiedlichen Verfahren immobilisiert worden sind. Die unterschiedlichen Immobilisierungsverfahren werden hier mit „lang“ und „kurz“ gekennzeichnet. Für detailliertere Informationen kann der Teilbericht der Universität Leipzig

herangezogen werden. Während das lange Immobilisierungsverfahren die Ölaufnahme der Binder scheinbar kaum beeinflusst, wird in Abbildung 6 deutlich, dass das kurze Immobilisierungsverfahren die Ölaufnahme der Binder geringfügig verlangsamt. Dennoch zeigen alle drei Bindertypen zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich der Ölaufnahme.



**Abbildung 1.6:** Die Ölabnahme in der Wasserphase bei 9 °C in drei verschiedenen Mesokosmen, in denen jeweils eine definierte Menge Öl sowie ein Bindertyp eingesetzt wurden.

Die Abbauleistung der eingesetzten ölabbauenden Mikroorganismenkonsortien wurde anhand von Binderextraktionen ermittelt. Während die Ölmenge auf den unbehandelten Bindern nahezu gleich bleibt (Abbildung 7, rote Kurve), ist auf den Bindern, die kurz mit Mikroorganismen behandelt wurden eine leichte Ölabnahme um etwa 10 % zu erkennen (lila Kurve). Sehr deutlich ist die Ölabnahme auf den Bindern, die lang mit Mikroorganismen behandelt wurden (grüne Kurve). Hier beträgt die Ölabnahme zum Ende der Versuchslaufzeit etwa 28 %. Die Ölverluste auf den behandelten Bindern sind ausschließlich auf mikrobielle Abbaueffekte durch die aufgebrauchten Mikroorganismenkonsortien zurückzuführen.



**Abbildung 1.7:** Die Ölmenge auf den unterschiedlichen Bindertypen bei 9 °C in drei verschiedenen Mesokosmen, in denen jeweils eine definierte Menge Öl sowie ein Bindertyp eingesetzt wurden.

Im Rahmen der Mesokosmenexperimente konnte gezeigt werden, dass die Ölbinder in einem Temperaturbereich von 9 °C bis 27 °C zwischen 62 % und 70 % des Öls dauerhaft und schnell binden. Die Ölaufnahmegeschwindigkeit der Binder ist abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Immobilisierungsverfahren. Im Idealfall ist die im Wasserkörper verbleibende Ölmenge bereits nach einem Tag kleiner 10 % der ursprünglich vorhandenen Ölmenge. Bei allen untersuchten Szenarien ist die zurückbleibende Ölmenge jedoch spätestens nach drei Tagen kleiner 20 % und erreicht spätestens nach zehn Tagen einen Wert kleiner 5 %. Auf den behandelten Bindern konnte bei 9 °C ein mikrobieller

Ölabbau nachgewiesen werden, der je nach Immobilisierungsverfahren zwischen 10 % und 28 % liegt.

Die erläuterten Mesokosmenexperimente stellten großmaßstäbliche Versuche dar, in denen die Umweltbedingungen so realistisch wie möglich simuliert wurden. Dabei konnten in Langzeitversuchen (jeweils etwa vier Wochen) die Leistungsfähigkeit der ausgewählten Mikroorganismengemeinschaften sowie die Funktionalität und die Eigenschaften der Ölbinder im Meerwasser bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen untersucht werden. Somit wurden die Ziele der Arbeitspakete 5.3.3, 5.4.1 und 5.4.2 in vollem Umfang erreicht.

Bei einer ökotoxikologischen Bewertung werden die Auswirkungen von Stoffen auf die belebte Umwelt anhand von definierten Kriterien bewertet. Für das System BioBind sollen im Rahmen einer ökotoxikologischen Bewertung zwei konkrete Fragen beantwortet werden: 1. Stellt das System eine zusätzliche Belastung für die marine Umwelt dar? 2. Welchen Nutzen bringt ein BioBind-Einsatz? Zur Beantwortung dieser Fragen werden die Ergebnisse der bereits erläuterten Experimente herangezogen und wissenschaftlich bewertet.

Es wurde bereits ausgeführt, dass derzeit keine gesetzlich vorgeschriebene Zertifizierung/Zulassung für (biogene) Ölbindematerialien existiert. Basierend auf den Ergebnissen erster toxikologischer Untersuchungen (siehe oben) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das System BioBind keine zusätzliche Belastung für die marine Umwelt darstellt.

Der Einsatz des Systems BioBind konnte mit Öl lediglich im Mesokosmos getestet werden. Die flugzeuggestützte Ausbringung sowie die seeseitige Bergung der Binder wurden im Freiland durchgeführt und lieferten zufriedenstellende Ergebnisse. Die Ausbringung der Binder ist schnell und präzise, bei der Bergung wird ein zufriedenstellender Anteil der ausgebrachten Binder aufgenommen und aus der marinen Umwelt entfernt. Für detailliertere Informationen können die entsprechenden Teilberichte herangezogen werden. Befinden sich die mit Mikroorganismen behandelten Ölbinder in einem System aus Seewasser und Öl (Rohöl), ist in Abhängigkeit von der Temperatur und der Behandlungsart der Binder nach 1-3 Tagen weniger als 10 % der ursprünglich vorhandenen Ölmenge in der Wasserphase nachweisbar. Ähnlich verhalten sich die zum Teil wasserlöslichen und toxischen Verbindungsklasse der (linearen) Alkane und PAK. Es konnte gezeigt werden, dass die genannten Verbindungsklassen durch das Einsetzen von Ölbindern ebenfalls schnell und dauerhaft aus der Wasserphase entfernt werden können. Je nach Temperatur werden 62 % bis 70 % des Öls dauerhaft von den Ölbindern gebunden. Von den Bindern absorbiertes Öl kann durch das immobilisierte Mikroorganismenkonsortium abgebaut werden. Dabei beträgt die Abbaurate je nach Immobilisierungsverfahren zwischen 10 % und 28 % in 30 Tagen. Der Einsatz von Ölbindern führt demnach zu einer dauerhaften Entfernung von Öl aus dem marinen System. Auf den im System verbleibenden Ölbindern findet ein mikrobieller Ölabbau statt.

Ein BioBind-Einsatz ist daher aus ökotoxikologischer unbedenklich und empfehlenswert, da er einen (im Mesokosmos) nachweisbaren Nutzen für das marine Ökosystem mit sich bringt. Anhand der während der Projektlaufzeit durchgeführten Experimente konnte eine ökotoxikologische Bewertung durchgeführt werden. Somit wurde das in Arbeitspaket 5.6 formulierte Ziel in vollem Umfang erreicht.

## 2. Ergebnisbericht “Darstellung der Verdriftung von Ölbindern in der Ostsee mit einem realitätsnahen numerischen Modell“

### 2.1. Modellkonfiguration und Modellanpassung

Das Ziel dieses Teilprojektes bestand darin, mit einem realitätsnahen numerischen Modell abzuschätzen, welche Ausbreitungswege ausgebrachte Ölbindern unter realistischen Windlagen und den entsprechenden Strömungsbedingungen nehmen können. Dabei ist insbesondere die Frage von Bedeutung wann und wo die Drifter an die umgebenden Küstenabschnitte treffen.

Für diese Fragestellung wurde ein am IOW betriebenes Ostseemodell erweitert, dass auf dem Modular Ocean Model (MOM) beruht (Griffies 2007). Die Konfiguration des numerischen Modells und die Modellerweiterungen wurden bereits im Zwischenbericht vom Juli 2013 ausführlich dargelegt und werden hier nur kurz für das Verständnis der Modellexperimente referiert.

Das Modell umfasst die gesamte Ostsee bis zum Übergang in den Skagerrak bei 8.25° Ost mit einer räumlichen Auflösung von 1 geografischen Minute in der Breite und 2 Minuten in der Länge, d.h. ca. die Gitterzellen haben eine horizontale Kantenlänge von ca. 1 Seemeile bzw. 2 km. Dabei werden Wassertiefen bis 27 m mit Schichten von je 1.5 m aufgelöst, darunter streckt sich das vertikale Gitter bis zu 5 m-Schichten bis zu einer Gesamttiefe von 268 m, die ausreicht, um alle tiefen Becken der Ostsee vollständig abzubilden, mit Ausnahme des kleinen Landsorttiefs, das bis 459 m reicht, wobei jedoch nur ca. 10 km<sup>3</sup> vom Modell ausgeschlossen werden. Die oberste Wasserschicht ist 2.6 m dick, damit Wasserstandsschwankungen und saisonale Eisbedeckung bis zu dieser Höhe abgebildet werden können. Der oberste Bezugswert für die Strömung im Modell liegt dabei in 1.5 m Tiefe und repräsentiert die gesamte oberste Wasserschicht.

Für die Darstellung der Verdriftung von Ölbindern, die auf der Meeresoberfläche schwimmen, wurde eine MOM-Komponente in Betrieb genommen, die jedoch fehlerhaft und für die Aufgabenstellung zu erweitern war. Die beiden wesentlichen Modellerweiterungen waren (1) die Stokesdrift und (2) eine direkte Verdriftung mit dem Wind.

Die sogenannte Stokesdrift beschreibt den Versatz, den ein in den Wasserkörper eingebettetes Teilchen in Laufrichtung der Oberflächenwellen erfährt, weil die Orbitalbewegung für realistischen Seegang, im Gegensatz zu idealen Sinuswellen, weder kreisförmig noch geschlossen ist. Die Stokesdrift kann nach (Webb und Fox-Kemper 2011) aus dem 3. Moment des Wellenspektrums berechnet werden. Die Autoren zeigen, dass die Stokesdrift für realistischen Seegang näherungsweise aus der einfachen Formel für monochromatische Sinuswellen berechnet werden kann

$$\vec{u}_s = \vec{e}_w \alpha_s H_{sig}^2 \omega_p^3 / 8g. \quad (2.1)$$

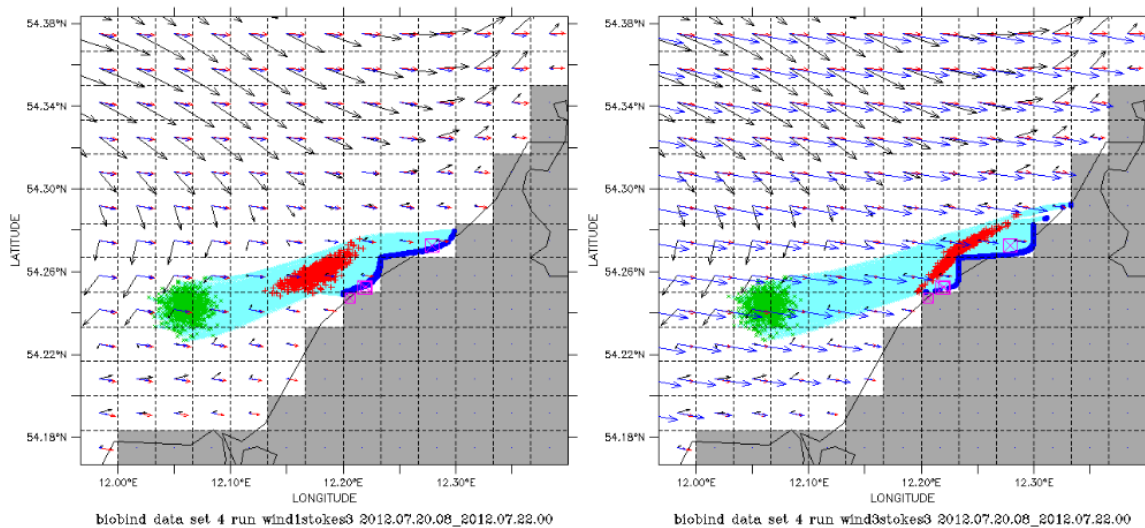
Dabei ist  $H_{sig}$  die signifikante Wellenhöhe und  $\omega_p$  die Peak-Frequenz des Wellenspektrums. Die Ausbreitungsrichtung der Wellen wird durch den Einheitsvektor  $\vec{e}_w$  beschrieben,  $g$  ist die Erdbeschleunigung und der Parameter  $\alpha_s$  liegt für das fetch-limitierte JONSWAP-Spektrum bei 3.2 und für das Pierson-Moskowitz-Spektrum, das voll ausgereiften Seegang auf offener See beschreibt, bei 4.3. In den Modellexperimenten wird  $\alpha_s=1-4$  als Parameter für die Anpassung an den Feldversuch mit Ölbindern vom Juli 2012 benutzt. In den Modellsimulationen beträgt der Beitrag der Stokesdrift im Mittel 3-10 [cm/s.]



Die Modellsimulationen des Feldversuches haben gezeigt, dass die beobachteten Fundorte der ausgebrachten Ölbinder an der Küste von Fischland nur erreicht werden, wenn außer dem Versatz durch Strömung und Seegang auch eine direkte Drift mit dem Wind angenommen wird. Für diese Winddrift wurde der einfache Ansatz nach (Wezell 2007) gewählt

$$\vec{u}_w = c_w \vec{\tau}_w. \quad (10)$$

Dabei ist  $\vec{u}_w$  der Vektor, der durch den Wind induzierten Drift,  $\vec{\tau}_w$  bezeichnet den auf die Drifter ausgeübten Windschub, d.h. die Windkraft pro Flächeneinheit in  $[N/m^2]$ , und  $c_w$  ist eine Kopplungskonstante, die den Windschub in die Driftgeschwindigkeit transformiert. Nach (Wezell 2007) gilt für rechteckige Driftkörper der Tabellenwert  $c_w = 0.9[(m/s)/(N/m^2)]$ . Im Modell wird dieser Parameter jedoch, wie auch der Korrekturfaktor zur Stokesdrift  $\alpha_s$ , zur Anpassung an die beobachteten Driftwege benutzt. Da in der Größenordnung gilt  $|\tau| \sim 10^{-3}|u^2|$ , liefert eine Windgeschwindigkeit von  $1 [m/s]$  eine zusätzliche Driftgeschwindigkeit von ca.  $1 [cm/s]$ .



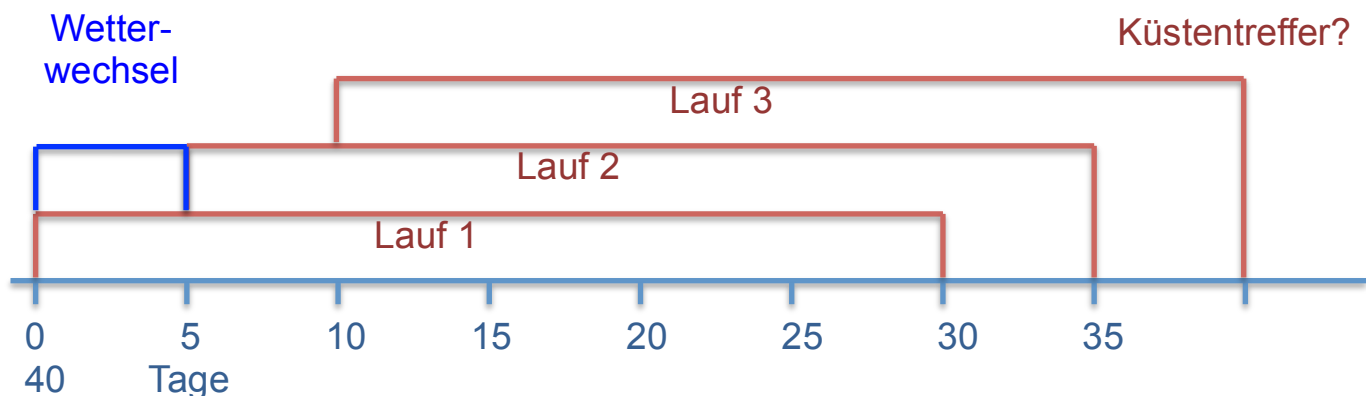
**Abbildung 2.1:** Modellsimulationen zur Anpassung an das Feldexperiment im Juli 2012. Die Drifter bewegen sich innerhalb von 24 Stunden auf den hellblauen Bahnen von den grünen Startpositionen zu den blauen Endpositionen. Rote Symbole zeigen den Stand nach 8 Stunden und violette Symbole die Fundorte an der Küste von Fischland. In der rechten Abb. ist die Winddrift um den Faktor 3 verstärkt. Schwarze, blaue und rote Pfeile zeigen die mittlere Drift durch Strömung, Wind und Wellen (die beiden letzteren sind in der Abb. um den Faktor 3 überhöht gezeichnet).

Bei dem Feldversuch am 20. Juli 2012 wurden vor Warnemünde an der in Abbildung 2.1 grün gekennzeichneten Position Ölbinder ausgebracht, die bei  $7m/s$  Wind aus westlicher Richtung ( $263 Grad$ ) nach ca. 8 Stunden zu 75% an der Küste von Fischland wieder gefunden wurden (violette Symbole). Die Modellsimulationen zur Anpassung der Parameter  $\alpha_s$  und  $c_w$  für die Stokes- und die Winddrift zeigen, dass die Fundpositionen nur erreicht werden, wenn beide Komponenten aktiv sind. Das Modell erlaubt ein Ein- und Ausschalten der Driftkomponenten mit vorgegebenen Parametern  $\alpha_s$  und  $c_w$ . Die über die Modellzeit von 16 Stunden gemittelten Vektoren für die Strömung (schwarz), den Windeffekt (blau) und die Stokesdrift (rot) zeigen auf, dass nur die beiden letzteren Driftbeiträge starke, auf die Küste zu gerichtete Komponenten aufweisen können. Die Strömung muss in den Modellzellen längs der Küste „ausweichen“, um die Randbedingung zu erfüllen, dass die Strömung direkt an der Küste Null ist. Diese Bedingung gilt auch für die Wind- und die Stokesdrift. Dementsprechend nimmt die Driftgeschwindigkeit in den der Küste vorgelagerten

Modellzellen asymptotisch auf Null ab. Teilchen, die sich in diesen Zellen bewegen, werden also stark abgebremst und können die Küstenlinie deshalb nie ganz erreichen. Dies ist eine Beschränkung des Modells, bzgl. des tatsächlichen Anspülens auf Land, die dadurch umgangen wird, dass Küstentreffer registriert werden, wenn die Drifter einen Mindestabstand zur Küste unterschreiten (siehe unten). Zur besseren Erkennbarkeit sind Wind- und Stokesdrift in Abbildung 2.1 um den Faktor 3 überhöht gezeichnet. Damit wird deutlich, dass beide Beiträge im Mittel von gleicher Größenordnung sind, wenn man die einfache Winddrift mit der Stokesdrift für  $\alpha_s = 3$  vergleicht (Modellexperiment *wind1stokes3* im linken Teilbild). Dabei erreichen die Ölbinder aber nach 8 Stunden (rote Positionen) noch nicht die Küstenzellen. Das ist erst der Fall, wenn die Winddrift dreifach verstärkt wird (Modellexperiment *wind3stokes3* im rechten Teilbild). Dieser Befund ist jedoch nur auf einen Feldversuch gestützt, der sowohl räumlich (Driftdistanz ca. 10 km) als auch zeitlich (8 Stunden Laufzeit) relativ kleinskalig ist. Da die gesteigerte Winddrift für höhere Windgeschwindigkeiten zu langen Driftwegen führen kann, bei geringen Windstärken jedoch die Anlandungswahrscheinlichkeit erhöht (siehe Abbildung 2.1), werden für die unterschiedlichen Windlagen im Folgenden beide Modellvarianten betrachtet. Die Differenzen ergeben eine grobe Abschätzung für die Zuverlässigkeit der aus den Modellexperimenten abgeleiteten Aussagen.

## 2.2. Modellexperimente mit realistischen Windlagen

Für die Darstellung der möglichen Ausbreitungsmuster von Ölbindern unter verschiedenen realistischen Wetterbedingungen wird das in Abbildung 2.2 skizzierte Konzept gewählt.



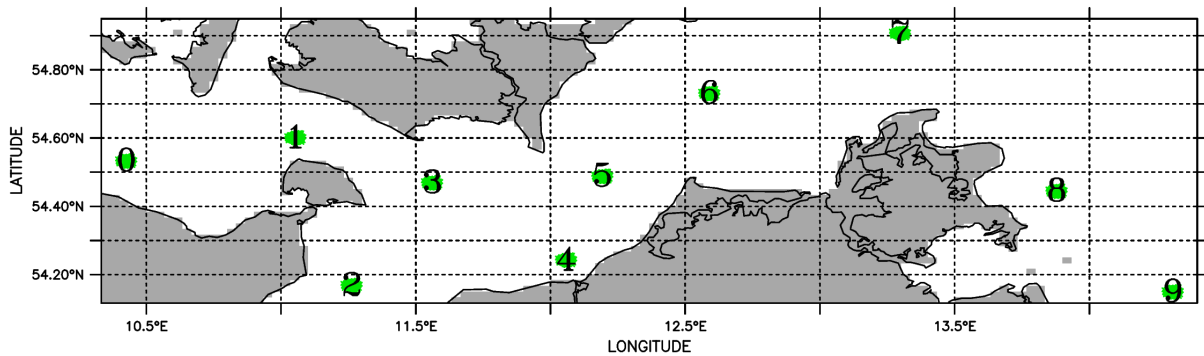
**Abbildung 2.2:** Zeitlicher Verlauf der Modellexperimente. Mit dem Versatz von 5 Tagen werden unterschiedliche Wetterlagen erfasst. Die 30-tägige Simulationsperiode liefert Aussagen über mögliche Driftwege von Ölbindern, die nicht vorher an die Küste gespült wurden.

Mit einer Serie von Modellexperimenten, die jeweils um 5 Tage versetzt starten und 30 Tage umfassen, werden deutlich unterschiedliche Wetterlagen erfasst (siehe Abbildung 2.4). Dabei ergeben sich im Laufe des Modelljahres 30. Juni 2012 bis 30. Juni 2013 (Starttermine) 74 verschiedene Ausbreitungsmuster, die zumindest eine grobe Klassifikation bzgl. der antreibenden Windlagen erlauben. Außerdem wird dabei der sogenannte Jahresgang durch die Modellexperimente abgedeckt, das ist die saisonale Variation der Windstärke, die im Sommerhalbjahr im Mittel  $4-6 \text{ m/s}$  beträgt, während im Herbst und Winter  $7-8 \text{ m/s}$  und besonders häufig Starkwind mit mehr als  $10 \text{ m/s}$  auftreten (siehe auch Abbildung 2.6).

Mit einem zeitlichen Versatz von je 5 oder 10 Tagen ist die typische Andauer der Großwetterlagen über Europa erfasst. Nach (Gerstengarbe und Werner 2005) haben 60-70% der häufigen Wetterlagen eine Andauer von bis zu 5 Tagen und nur in 5% aller Fälle



halten sie 10 Tage oder länger an. 5-10 Tage entsprechen auch dem Zeitraum für die relativ sichere Schwimmfähigkeit der Ölbinder, siehe Abschlussbericht der TU Dresden (Unbehaun u.a. 2014). Die Ausdehnung der Simulationen auf 30 Tage dient der Langzeitprognose der Verbreitung von Bindern, die über diesen Zeitraum möglichenfalls schwimmfähig und in offener See bleiben. Jedes Modellexperiment liefert eine Zeitreihe von 30 Tagen für insgesamt 10000 Ölbinder, wovon je 1000 an den in Abbildung 2.3 dargestellten Positionen gestartet werden. Die Ölbinder werden dabei als Teilchen betrachtet, die sich entsprechend der Vektorsumme aus Strömungsgeschwindigkeit, Wind- und Stokesdrift bewegen. Dabei werden die Vektorkomponenten von den Gitterpunkten des Modells auf die aktuelle Position der Drifter interpoliert und die Bahnkurve mithilfe eines Runge-Kutta-Verfahrens 2. Ordnung berechnet. Dementsprechend beträgt die zeitliche Auflösung der Bahnpunkte 2 Modellzeitschritte bzw. 8 Minuten.



Biobind initial drifter positions

**Abbildung 2.3:** Startpositionen der Modellexperimente, siehe auch Tabelle 2.1. An jedem Ort werden zu Beginn je 1000 Ölbinder gestartet, die zufällig mit einer Gaußverteilung über die grün markierten Bereiche verteilt sind.

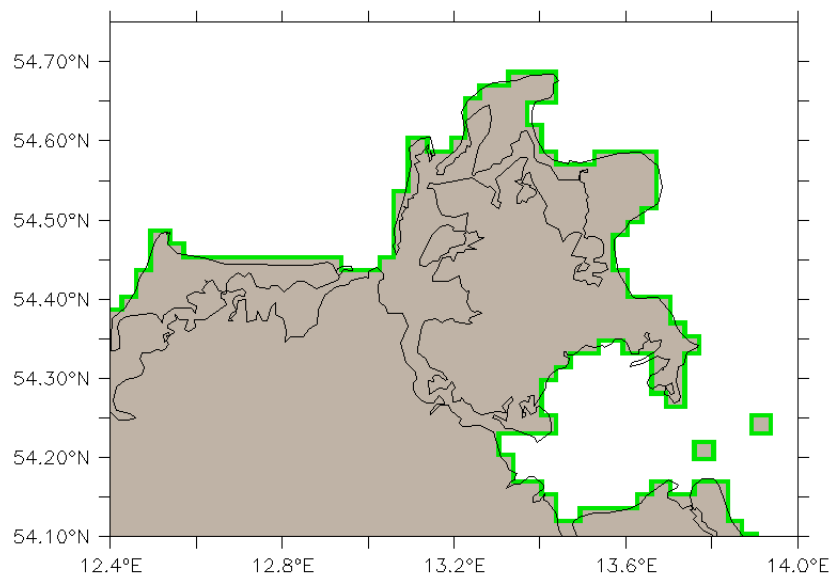
Die Auswahl der Startpositionen erfolgte unter den Gesichtspunkten, einerseits mögliche Ereignisorte zu erfassen und gleichzeitig typische Seegebiete zu überdecken. So liegen die Positionen 1, 3, 5, 6 und 7 im Hauptschiffahrtsweg, der durch die naheliegenden Küsten bis zur 6 eine kanalartige Strömung aufweist, insbesondere während stärkerer Einströme und Ausströme. Die Position 7 hat schon die Charakteristik des offenen Arkonabeckens. Die Startpunkte 8 und 9 liegen in der Zufahrt zum Hafen Stettin und sind bei nordöstlichen Windrichtungen als küstennah zu betrachten, liegen unter südwestlichen Winden aber eher in der offenen See. Die Positionen 0 und 4 sind küstennahe Stationen am Südrand der Kieler bzw. der Mecklenburger Bucht und die 2 liegt in der Lübecker Bucht, die oft vom großräumigen Ein- bzw. Ausstrom „abgeschattet“ ist, d.h. eine eigene, relativ schwache Zirkulation aufweist.

**Tabelle 2.1:** Geografische Charakteristika der für die Modellexperimente ausgewählten Einsatzorte für die Ausbringung von Ölbindern, siehe auch Abbildung 2.3. Neben den Koordinaten sind auch das Seegebiet, der Abstand zur nächstliegenden Küste und die Richtung des auflandigen Windes angegeben.

Ort	Länge	Breite	Küste (km)	Windrichtung	Lage
0	10.426173	54.533792	11	NNO	Kieler Bucht
1	11.053902	54.601687	7	NNW	Fehmarnbelt West
2	11.262813	54.169048	12	O	Fehmarnbelt Ost
3	11.561550	54.469870	15	SSO	Lübecker Bucht
4	12.058799	54.243291	7	N	Warnemünde

5	12.193070	54.488908	17	SO, NW	Kadetrinne
6	12.590282	54.731878	23	SE	Darßer Schwelle
7	13.297709	54.908095	27	NNW	Arkonasee
8	13.878902	54.445508	13	NO	östlich Rügen
9	14.310035	54.150214	21	NO	Pommernbucht

Mit der vorgestellten Modellkonfiguration wurden je 74 Datensätze für einfache und verstärkte Winddrift berechnet (Experimente *wind1stokes3* und *wind1stokes3*), die jeweils Zeitreihen über 30 Tage für die 1000 Ölbinder enthalten, die von jeder der 10 Positionen gestartet werden. Die Erstauswertung dieser Daten zeigte, dass sich bei ablandigem Wind viele Ölbinder wieder aus Küstenzellen ablösen, wenn sie durch die Komponenten der Wind- und Stokesdrift seewärts beschleunigt werden. Dadurch treten in den Simulationen größere Driftdistanzen und ein mehrfaches Anlanden der Ölbinder auf. Für eine eindeutige Aussage über die Anlandungswahrscheinlichkeit in den ersten Tagen nach dem Einsatz, die ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens ist, wurden die Datensätze nachbearbeitet, indem die Zeitreihe der Positionen für jeden Drifter abgebrochen wird, wenn erstmals ein Mindestabstand zur Küste unterschritten wird. Dafür wurde die Landmaske des Modells in dreifach erhöhter Auflösung gerastert, d.h. mit ca. 660 m Gitterweite. Auf dieser Basis können alle verfeinerten Küstenzellen ermittelt werden, so wie in Abbildung 2.4 im Detail dargestellt. Für Ölbinder, die in eine solche Küstenzelle eintreten, werden alle nachfolgenden Positionen konstant gesetzt. Die Statistik der Küstentreffer wird dann durch Auszählen der abgebrochenen Zeitreihen ermittelt.

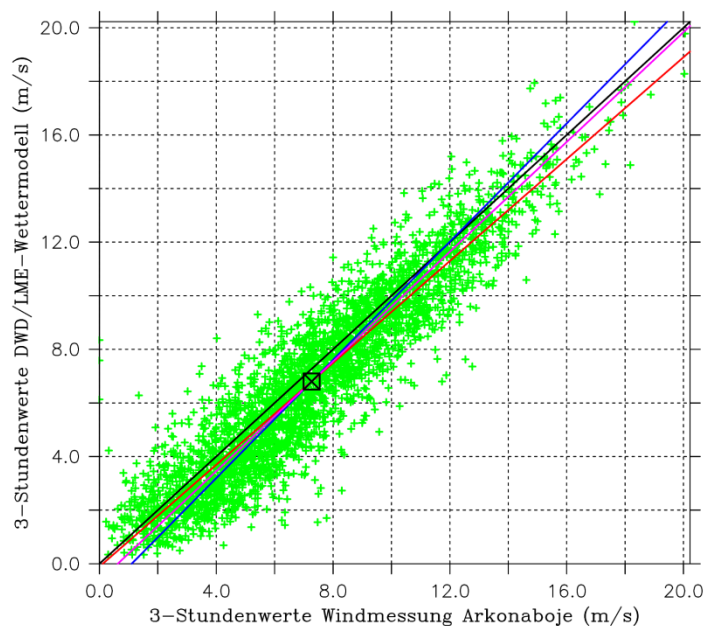


**Abbildung 2.4:** Modelllandmaske für Darß und Rügen (grau) und dreifach verfeinertes Raster der Küstenzellen. Die Inseln Oie und Ruden entsprechen einer Gitterzelle des 1-Seemeilen-Modells.

### 2.3 Charakteristik der Windbedingungen

Eine Voraussetzung für das Verständnis der mit dem numerischen Modell simulierten Verteilungsmuster der Ölbinder und insbesondere für eine grobe Klassifikation der Modellexperimente ist die Analyse der unterschiedlichen Antriebsbedingungen während der um jeweils 5 Tage versetzten Zeitscheiben. Wie die Anpassung des Modells an den Feldversuch gezeigt hat, ist die direkte Verdriftung der Ölbinder mit dem Wind, insbesondere in Küstennähe, die bestimmende Komponente. Das lokale Windfeld bestimmt außerdem die

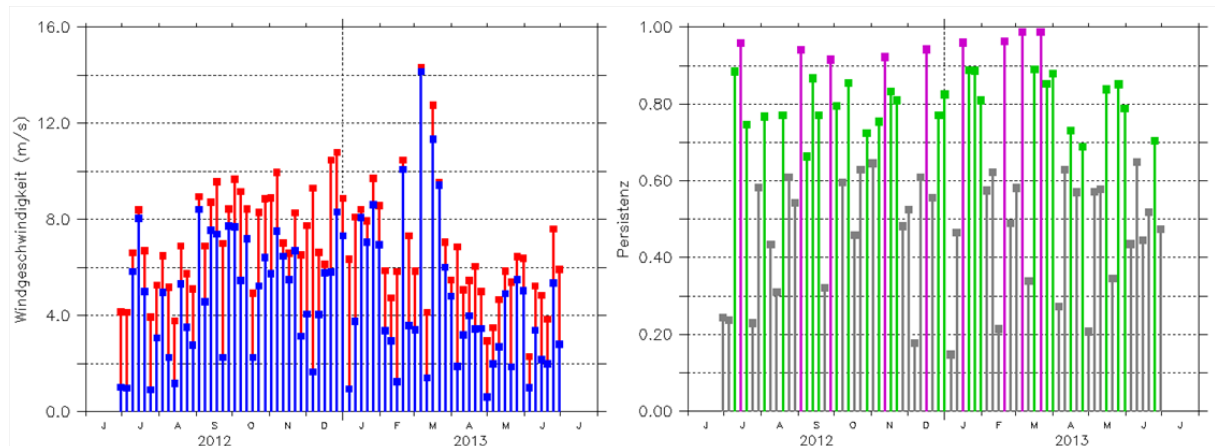
Strömungsmuster an der Meeresoberfläche mit. In unseren Breiten läuft die Strömung in erster Näherung ca. 45 Grad rechts zum Wind. Wenn der Wind küstenparallel läuft, werden Küstenstrahlströme angeregt, die mit Aufquellen oder Absinken von Wassermassen verbunden sind. Dem ist eine großräumige Grundströmung überlagert, die je nach der Wasserstandsdifferenz zwischen Kattegat und mittlerer Ostsee, einen Ausstrom oder einen Einstrom durch die dänischen Wasserstraßen induziert. Die Strahlströme und beckenweite Wirbel, die insbesondere bei der Umstellung zwischen Ausstrom und Einstrom auftreten, werden vom Modellraster mit ca. 2 km näherungsweise aufgelöst. Die räumliche Skale dieser Strukturen im Strömungsfeld ist durch den baroklinen Rossbyradius bestimmt (Fennel u.a. 1991). Dessen Werte betragen in der südwestlichen Ostsee je nach Jahreszeit und Schichtung 1-4 km. Deshalb werden die simulierten Ausbreitungsmuster nach Stärke, Richtung und Persistenz des mittleren Windes während der Modellzeiträume klassifiziert. Unter Persistenz wird dabei die Richtungskonstanz des Windes verstanden, die durch das Verhältnis 0-1 zwischen dem Betrag des mittleren Windvektors und dem Mittelwert der absoluten Windgeschwindigkeit ausgedrückt werden kann. Zur Veranschaulichung sei bemerkt, dass ein konstanter Wind, der gleichmäßig über einen Winkelbereich von 90 Grad variiert, eine Persistenz von 0.9 aufweist. Für einen Winkelbereich von 180 Grad ergibt sich eine geringere Persistenz von ca. 0.65. Ein richtungskonstanter Wind hat offensichtlich eine Persistenz von Eins und der Wert Null entspricht umlaufenden Winden, die den gesamten 360-Grad-Bereich überdecken.



**Abbildung 2.5:** Vergleich der dreistündlichen Vorhersage der Windgeschwindigkeit im DWD-Wettermodell mit den Messungen an der Station Arkonaboje. Das Bündel der Regressionsgraden verläuft nahezu parallel zur schwarzen Linie ( $x = y$ ). Der Anstieg beträgt 1.03, wobei die Modellwerte im Mittel 0.5 m/s kleiner sind und eine Standardabweichung von 1.3 m/s aufweisen. Die Korrelation beträgt 93%.

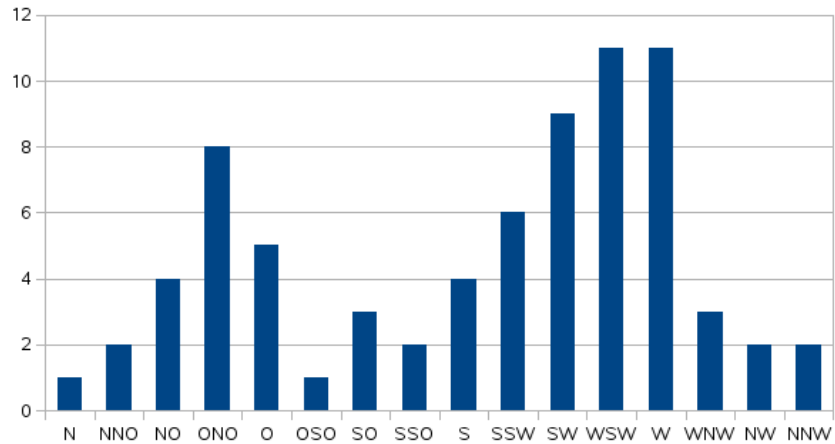
Zur Charakterisierung der Windbedingungen während der Modellexperimente, wird der Wind aus dem hochauflösenden Wettermodell COSMO/EU des Deutschen Wetterdienstes an der Position der Arkonaboje (13°52' Ost, 54°53' Nord) verwendet, der auch für die Simulationen genutzt wird. Der Vergleich in Abbildung 2.5 zeigt, dass das DWD-Modell sehr gut mit den Messungen an der Arkonaboje übereinstimmt, die die tatsächlichen Windbedingungen auf offener See widerspiegeln. Zu beachten ist dabei, dass die Messungen an einem Punkt aufgenommen werden, während das hochauflösende Wettermodell Gitterzellen von ca. 7 km

Kantenlänge repräsentiert. Da die Wetterdaten die ganze Ostsee umfassen, können damit auch die oben angegebenen mittleren saisonalen Windstärken abgeschätzt werden.



**Abb. 2.6:** Charakteristik der Windbedingungen in den ersten 5 Tagen der Modellexperimente. Das linke Teilbild zeigt die mittlere absolute (rot) und vektorielle (blau) Windgeschwindigkeit und das rechte Teilbild die Persistenz der Windrichtung. Persistente Windlagen über 0.65 bzw. über 0.9 sind grün und violett hervorgehoben.

Für die Modellexperimente wurden aus den DWD-Werten an der Position der Arkonaboje die in Abbildung 2.6 dargestellten 5-Tage-Mittelwerte berechnet, die die Windbedingungen für die ersten 5 Tage einer jeden Simulationsperiode beschreiben. Die Persistenz der Windrichtung in diesen Zeitabschnitten ist im rechten Teilbild dargestellt, mit Hervorhebung der persistenten Windlagen, die Werte von 0.9 (violett) oder 0.65 (grün) übersteigen. Der Vergleich mit den absoluten (rot) und vektoriellen (blau) Mittelwerten im linken Teilbild zeigt, dass persistente Windlagen in der Regel mit höheren Windgeschwindigkeiten über ca. 8 m/s verbunden sind. Vereinzelt treten solche Ereignisse auch im Sommerhalbjahr auf, gehäuft aber im Herbst und Winter. Der Jahrgang wird deutlicher erkennbar, wenn die Mittelwerte für die vollen Simulationsperioden betrachtet werden, die um 5 Tage versetzte Monatsmittel darstellen. Dabei wird ersichtlich, dass bzgl. der absoluten Windstärke das Winterhalbjahr von September bis März reicht mit absoluten Mittelwerten von 7-9 m/s. Die Persistenz der Windrichtung ist für längere Bezugszeiträume deutlich geringer. Nur 14 der 30-Tage-Perioden weisen Werte über 0.65 auf, vor allem im August-September 2012 und im März 2013. Diese Abbildung und ähnliche für 10 und 20-tägige Perioden, sind im digitalen Anhang enthalten. Zur Referenz für die einzelnen Modellexperimente werden die charakteristischen Mittelwerte für die Windanregung tabellarisch im digitalen Anhang angegeben.



**Abbildung 2.7:** Richtung des mittleren Windvektors in den ersten 5-Tage-Perioden der Modellexperimente. Zur Bewertung der Verteilungsmuster von Ölbindern werden folgende Richtungssektoren betrachtet: NO=Nordost=NO-O (17 Fälle), SO=Südost=OSO-S (10), SW=Südwest=SSW-W (37) und NW=Nordwest=WNW-NNO (10).

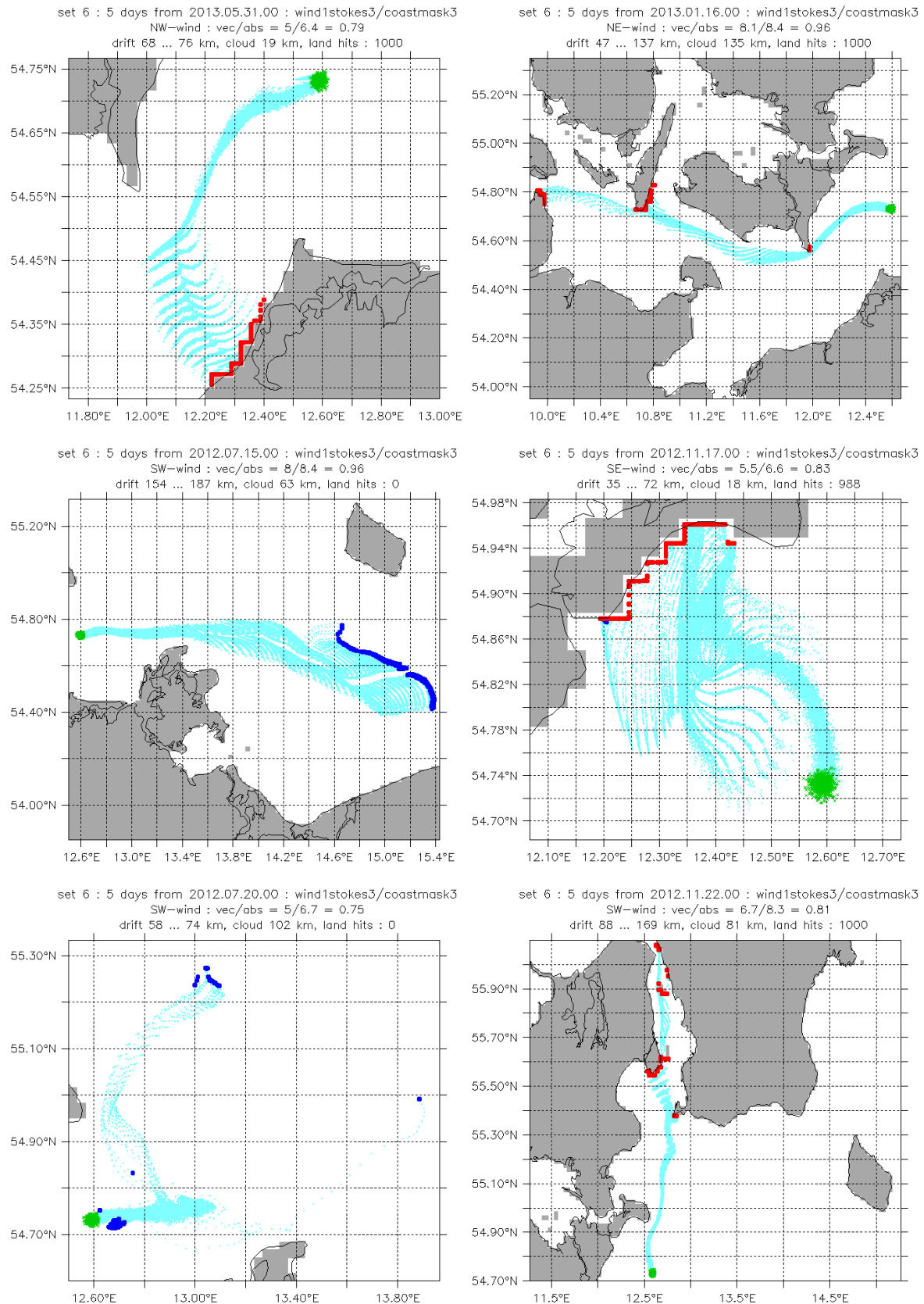
Die Richtungsverteilung des Windes in den 5-Tage-Perioden am Beginn der Modellexperimente ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Es zeigt sich das bekannte Bild der Präferenz von westlichen Windrichtungen, insbesondere Südsüdwest bis West, das die Anfangsperiode in der Hälfte aller Fälle bestimmt. Die 17 Windlagen aus Nordost bis Ost entsprechen der durchschnittlichen Häufigkeit für diesen Richtungssektor. Jeweils 10 der restlichen Experimente sind durch Wind aus Ostsüdost bis Süd bzw. Westnordwest bis Nordnordost bestimmt und werden im Folgenden als Nordwest- bzw. Südostlagen bezeichnet. Für längere Modelllaufzeiten bleibt die Richtungsverteilung des Windes ähnlich, wobei die Häufigkeit von SW-Lagen bis zu 44 für 30 Tage zunimmt und sich in den anderen drei Richtungssektoren um je 2-3 Fälle verringert.

## 2.4 Klassifikation der modellierten Ausbreitungsmuster von Ölbindern

Die 74 Modellexperimente decken, wie oben beschrieben, den Jahrgang der Windstärke ab und erfassen in 5-30 Tagesperioden verschiedene Windlagen. Mit der Unterteilung in 4 Richtungssektoren ergeben sich dabei jedoch (mit Ausnahme der 37 SW-Lagen) nur relativ kleine Stichproben von 10-17 Fällen, siehe Abbildung 2.7. Deshalb werden zur generellen Beschreibung der simulierten Verteilungsmuster alle verfügbaren Modelldaten herangezogen und durch geeignete statistische Kennzahlen beschrieben. Zur Veranschaulichung werden nur ausgewählte Einzelfälle gezeigt. Die vollständigen Datensätze und ihre Visualisierungen sind im digitalen Anhang zusammen gestellt.

Als Beispiele für die Vielzahl der Ausbreitungsmuster zeigt Abbildung 2.8 einige Fälle für die Position 6, die im Hauptschiffahrtsweg auf der Darßer Schwelle liegt. Die oberen 4 Teilbilder entsprechen den 4 Richtungssektoren für die Windanregung, d.h. NW, NO, SW und SO. Dabei wurden vergleichbare mittlere Windstärken von 5-8 m/s mit möglichst hoher Persistenz ausgewählt. Blaue Punkte zeigen die Drifterpositionen nach 5 Modelltagen an, wenn sie noch frei auf der Meeresoberfläche schwimmen. Rote Symbole kennzeichnen die Zellen der dreifach verfeinerten Landmaske, wo Drifter festgelegt sind, d.h. die Küstenabschnitte, wo Ölbinder angespült werden können. Die hellblauen Punkte verdeutlichen, wie sich die Driftwege im Abstand von je 2 Stunden vom Einsatzort (grün) aus entwickeln. Dabei wird ersichtlich, dass sich die Drifter im Modell teilweise über größere Strecken als kompakte „Wolke“ bewegen, dann aber auch weit auseinander gezogen

werden. Dabei können sich einzelne Teilchen oder Gruppen abspalten, wie z.B. im unteren linken Teilbild, das ein spezielles Muster für die häufig auftretende SW-Windlage zeigt. Deshalb werden für die zurückgelegten Driftwege die Perzentile für 5%, 25%, 50%, 75% und 95% berechnet. In den Abbildungen sind die 5%- und 95%-Perzentile angegeben, die die Ausbreitung der Hauptmenge (90%) der Ölbinder charakterisieren. Der Median, d.h. das 50%-Perzentil, ist der mittlere Driftweg (siehe Tabellen im digitalen Anhang). Die Perzentile werden aus der Rangfolge der größensortierten Messwerte bestimmt. Sie sind ein geeignetes statistisches Maß zur Beschreibung kleiner Stichproben, insbesondere wenn keine Annahme über die zugrunde liegende Wahrscheinlichkeitsverteilung gemacht werden kann. Arithmetischer Mittelwert und Standardverteilung beziehen sich z.B. immer auf eine Gaussverteilung.



**Abbildung 2.8:** Ausgewählte Fälle der Verdriftung von Ölbändern nach 5 Modelltagen von der Position 6 auf der Darßer Schwellen (grün). Blaue und rote Symbole zeigen Drifter, die frei an der Meeresoberfläche schwimmen bzw. an Land festgelegt sind. Die hellblauen Punkte deuten die Driftwege im Abstand von je 2 Stunden an. Die oberen 4 Teilbilder entsprechen den 4 Richtungssektoren des Windes aus NW, NO, SW und SO, die beiden unteren zeigen 2 spezielle Fälle für SW-Wind.



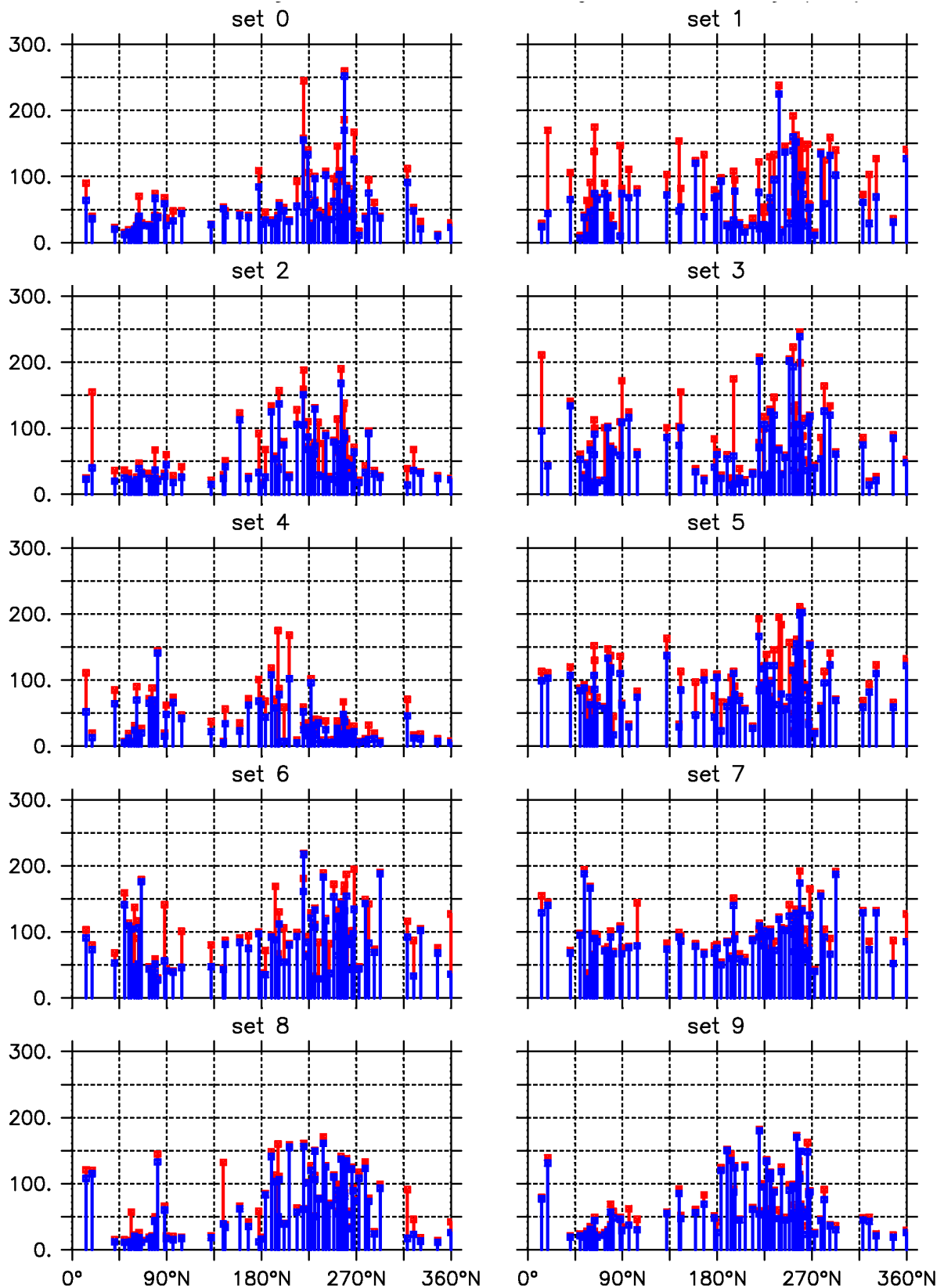
Die Ausdehnung der Drifterwolke (cloud) wird als Luftlinie zwischen der minimalen und der maximalen geografischen Länge und Breite der am weitesten entfernten Teilchen berechnet (auf einer kugelförmigen Erde mit dem Radius  $6371\text{ km}$ ). Da auch die an Land liegenden Ölbinder berücksichtigt werden, gibt diese Größe für eine kompakte Wolke eine Abschätzung für die Länge des betroffenen Küstenabschnitts an, wie in den Fällen NW und SO in Abbildung 2.8. Dagegen entspricht die Erstreckung der Drifterwolke der maximalen Driftdistanz, wenn längs des Weges mehrere Küstenbereiche getroffen werden, wie z.B. im Fall des NO-Windes (rechts oben). Zu bemerken ist, dass in vielen Fällen die 1000 Testteilchen bereits nach 5 Tagen an der Küste festliegen (siehe auch das Teilbild rechts unten und Tabelle 2.5). Für frei schwimmende Drifter charakterisiert die Ausdehnung den Grad der Dispersion bzw. das Zerfallen der Wolke, siehe Teilbilder links Mitte und unten. Bei den Entfernungsskalen ist zu beachten, dass die Teilbilder unterschiedlich große Gebiete erfassen, um eine möglichst detaillierte Darstellung der einzelnen Muster zu erreichen.

Die ausgewählten Beispiele in Abbildung 2.8 zeigen weiterhin, dass die Driftwege und die betroffenen Küstenabschnitte oft nicht in Richtung des mittleren Windes verlaufen. So gehen die Strömung und der lokale Wind in den ersten 2 Tagen des Modellexperiments vom *2013.05.31.00* (Teilbild links oben) in der Kadetrinne nach SW und transportieren die Ölbinder bis auf Höhe von Gedser Rev. Dann erst dreht der lokale Wind auf NW und treibt die Drifter als aufgefächerte Wolke über ca. 19 km an die Küste von Fischland. Diese Entwicklung wird ersichtlich in den Animationen der Drifterausbreitung, die jeden Teilschritt zeigen und deshalb im digitalen Anhang enthalten sind. Die langgestreckten Driftwege in den Modellexperimenten *2012.11.22.00* und *2013.01.16.00* für SW- bzw. NO-Wind, die ca.  $45\text{ Grad}$  zur mittleren Windrichtung verlaufen, sind durch den kanalartigen Ausstrom durch den Öresund bzw. den Fehmarnbelt bedingt. Die SW-Lage, die am *2012.07.15.00* beginnt (Teilbild Mitte links), ist durch die Strombänder bestimmt, die längs Rügen und (später) längs der polnischen Küste verlaufen, wo die Ölbinder im Modell bei einfacher Winddrift nach 16-17 Tagen anlanden. Mit verstärkter Winddrift (*wind3stokes3*) treiben die Ölbinder im Modell bis zur kurischen Nehrung (siehe Anhang). Das Beispiel für SO-Wind (Teilbild Mitte rechts) entspricht der Erwartung, dass die Ölbinder an die gegenüberliegende Küste getrieben werden. Die ersten Treffer erfolgen dabei schon nach 2 Modelltagen, aufgrund einer lokalen Zirkulationszelle ist die Mehrzahl der Drifter aber erst nach 5 Tagen angelandet. Das erklärt auch die relativ langen Driftwege im Vergleich zum direkten Küstenabstand von ca.  $40\text{ km}$ . Das Teilbild unten rechts zeigt eine über ca. 8 Modelltage andauernde lokale Zirkulation der Drifterwolke im Experiment *2012.07.20.00* unter SW-Wind und die Abspaltung einer Gruppe von 21 Driftern. Dies ist ein seltener Spezialfall, der zwar vorkommen kann, in der statistischen Beschreibung durch die 5%- und 95%-Perzentile aber nicht ins Gewicht fällt, weil erst 4 Ereignisse die 5%-Schranke überschreiten bezogen auf die 74 Zeitscheiben der Modellexperimente. Im Hinblick auf die 1000 Testteilchen je Einsatzort, sind die 21 abgelösten Drifter nicht im 90%-Driftbereich von  $58\text{-}74\text{ km}$  enthalten, da das 5%-Perzentil dem Ort des 50. Testteilchens entspricht.

Eine Gesamtübersicht über die potentielle Ausbreitung der Ölbinder nach 5 Modelltagen stellt die Abbildung 2.9 dar, wo die 5%- (blau) und die 95%-Perzentile (rot) der Driftdistanz (in km) über der mittleren Windrichtung aufgetragen sind. Die Driftdistanz ist dabei der stückweise aufsummierte Weg zwischen dem Ausgangspunkt der Ölbinder und der nach 5 Modelltagen erreichten Endposition. Die vier Richtungssektoren entsprechen den folgenden Gradbereichen: NO: $34\text{-}101^\circ$ , SO: $101\text{-}191^\circ$ , SW: $191\text{-}281^\circ$ , NW: $>281^\circ$  (gerundet). Dabei werden insbesondere die Unterschiede für NO- und SW-Lagen deutlich. Die Positionen 0, 2,



8 und 9 liegen unter NO-Wind küstennah, so dass die 95%- Driftwege in der Regel unter 50 km betragen.



**Abbildung 2.9:** 5%-Perzentile (blau) und 95%-Perzentile (rot) der Driftdistanzen (km) der Ölbinder nach 5 Modelltagen über der mittleren Windrichtung (N=0°, O=90°, S=180°, W=270°); „set“ bezeichnet die Einsatzorte, siehe [Abb. 2.3](#).

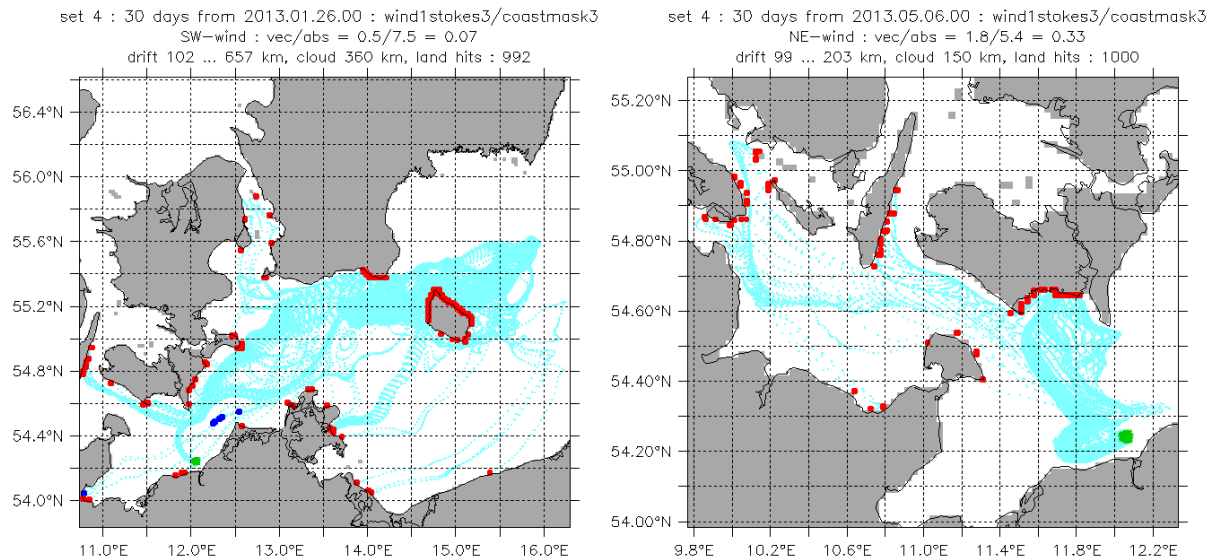
Die 5%-Driftdistanzen liegen in der gleichen Größenordnung, d.h. die Ölbinder werden sich von diesen Positionen unter NO-Wind als geschlossene Wolke verbreiten. Das gilt für Position 9 in der Oderbucht für alle Windrichtungen, wo die Drifterwolke maximal eine Ausdehnung von 50 km erreicht. Von den anderen Positionen treten unter NO-Wind Driftwege von 50-150 km auf. Das gilt m.E. auch für die sehr küstennahe Position 4 vor Warnemünde, wobei sich die Ölbinder über einen Bereich von bis zu 90 km verteilen können. Driftwege von 50-150 km sind typisch für SW-Wind. Dabei werden Ölbinder von der Position 1 im Fehmarnbelt durch die kanalartige Strömung oft weit auseinandergezogen, während sich von den Positionen 7 bis 9 die Drifter überwiegend als Wolke in die offenen Becken ausbreiten. Das gilt auch für 10-Tage-Perioden (Anhang). Ausnahme ist die Position 4, von der die Ölbinder unter SW-Wind zum großen Teil an die nahe gelegene Küste getrieben werden. Die Driftdistanzen sind auch bei SO- und NW-Lagen meist relativ gering und liegen oft unterhalb von 50-100 km, weil insbesondere NW-Wind die Ölbinder rasch an die benachbarten Küsten treibt. In Einzelfällen verdriften die Ölbinder innerhalb von 5 Tagen mehr als 200 km weit, was einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 0.5 m/s entspricht. Da die Strömungsgeschwindigkeit im Modell in den offenen Becken 0.1-0.3 m/s beträgt, ist in diesen Fällen der Versatz durch den Wind ein gleichwertige Driftkomponente. Der Windeinfluss überwiegt oberhalb von ca. 7 m/s, insbesondere bei verstärkter Winddrift (*wind3stokes3*).

**Tabelle 2.2:** Erstreckung der Driftwege in den 74 Zeitscheiben der Modellexperimente *wind1stokes3*.

Einsatzort	Perzentile der modellierten Driftwege (km)					
	5%	25%	Median	75%	95%	Maximum
0	20	40	50	110	600	820
1	20	40	100	150	400	850
2	20	30	60	150	330	810
3	20	40	90	200	720	860
4	10	20	30	70	200	660
5	30	70	120	260	600	830
6	40	80	150	380	720	810
7	60	100	160	330	690	790
8	20	40	150	360	710	760
9	20	50	100	230	670	810

Die Länge der Driftwege über die vollen 30-Tage-Perioden der Modellexperimente *wind1stokes3* ist in Tabelle 2.2 durch die 5-95% Perzentile charakterisiert. Bemessungsgröße ist der längste Driftweg (95%) in den einzelnen Simulationen. Damit wird eine Gruppierung der potentiellen Verdriftung von den untersuchten Einsatzorten deutlich. Von den Stationen 0-3, die in den kleinen Buchten der inneren Beltsee liegen (siehe Abbildung 2.3), werden die Ölbinder in der Hälfte aller Fälle (25-75% Perzentile) über 40-150(200) km verfrachtet. Dagegen beträgt die Verdriftung von den Positionen 5-7, im Bereich zwischen Kadetrinne, Darßer Schwelle und Arkonasee, 70-380 km. Das ist dadurch begründet, dass diese Positionen bzgl. der Hauptwindrichtungen SW und NO relativ weit von den angrenzenden Küsten entfernt liegen und in der Regel von einem kanalartigen Stromband erfasst werden, das bei oberflächennahem Einstrom bei SW-Wind in die Arkonasee führt. Auch von den Positionen 8 und 9 werden ähnlich ausgedehnte Driftwege erreicht, wenn die Ausbreitung in Richtung der offenen Arkonasee erfolgt. Bei Wind aus NO und SO ist die Drift durch die naheliegenden Küsten von Rügen und Usedom auf 20-50 km begrenzt (siehe Abbildung 2.3). Die Station 4 vor Warnemünde nimmt aufgrund ihrer Küstennähe eine Sonderrolle ein. In 75% aller Modellexperimente liegt die Verdriftung bei 10-70 km und die Ölbinder werden innerhalb von 4 Tagen vollständig angelandet (siehe

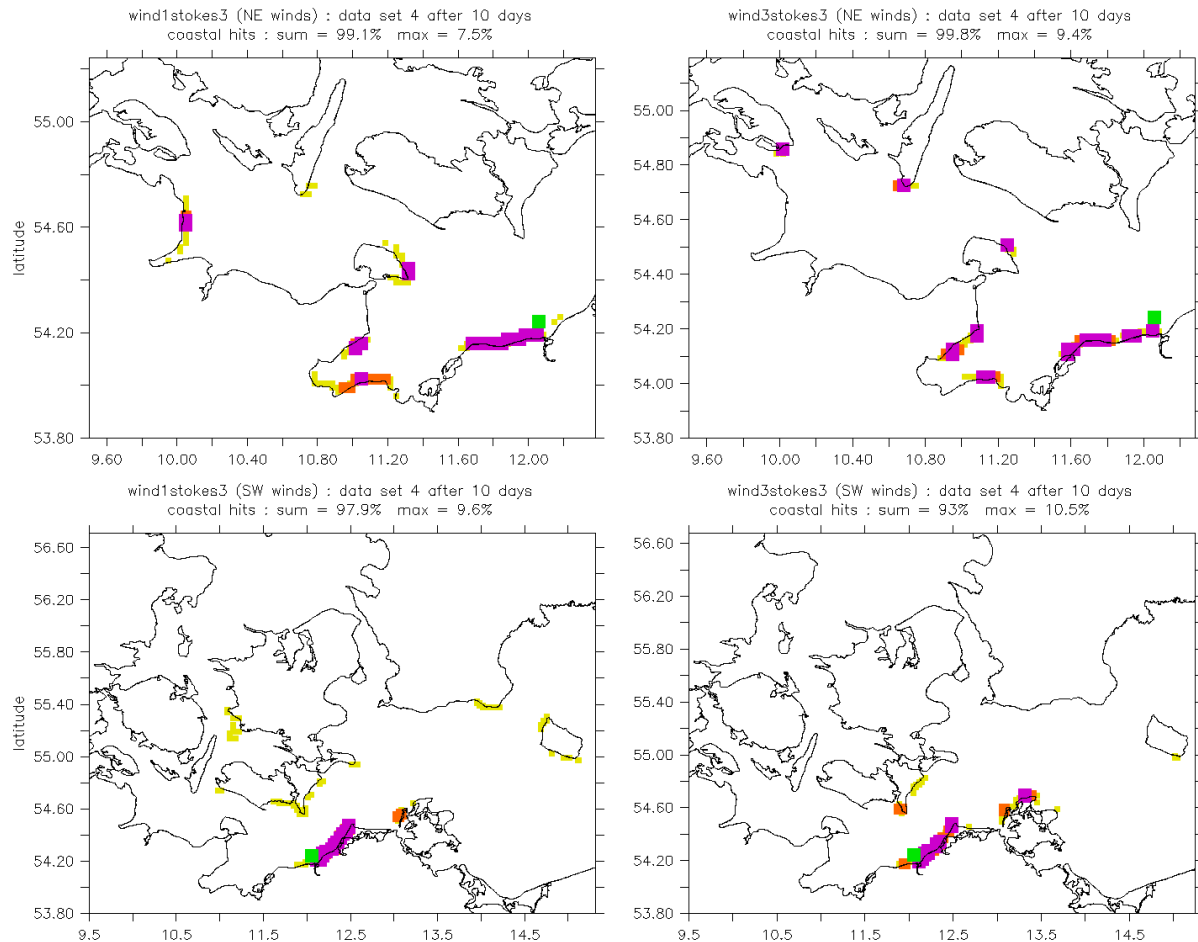
Tabelle 2.2 und Abbildung 2.11). Nur in 4 Fällen sagt das Modell für Position 4 Driftwege über 200 km voraus. Dabei werden die Ölbinder zu Beginn von südlichen Winden seewärts getrieben, von Einstrom oder Ausstrom erfasst und über große Küstenbereiche verteilt, siehe die beiden ausgewählten Beispiele in Abbildung 2.10. Solche Ereignisse sind jedoch Extremfälle mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit von  $\leq 5\%$ . Auch Anlandungen auf Bornholm oder an der schwedischen Küste haben eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit. Die typischen Küstenabschnitte, die von Ölbindern von der Position 4 getroffen werden, liegen längs Fischland und vor Warnemünde, auf den gegenüber liegenden dänischen Inseln und sporadisch in der Lübecker und Kieler Bucht, siehe Abbildung 2.11. Eine vollständige Übersicht über die Küstenbereiche, wo Ölbinder angespült werden können, ist, nach Windrichtungen gruppiert, im digitalen Anhang gegeben. Dabei werden die Modellexperimente mit einfacher und mit verstärkter Winddrift (*wind3stokes3*) gegenübergestellt. Die Verteilungsmuster sind in der Regel sehr ähnlich, weil infolge des Zusammenspiels von wechselnden Richtungen in Strömung und Wind keine proportionale Verlängerung der Driftwege eintritt, die dem Verstärkungsfaktor 3 für die Winddrift entspricht. In vielen Fällen beträgt die Erweiterung der Ausbreitungsmuster ca. +50 bis +100 km. Für Einzelheiten wird auf die Abbildungen und Tabellen im Anhang verwiesen.



**Abbildung 2.10:** Modellvorhersagen für eine extreme Verteilung der Ölbinder von Position 4 (grün) unter mittleren Winden aus SW (links) und NO (rechts).

Da die überwiegende Anzahl von Anlandungen, wie unten noch gezeigt wird, innerhalb der ersten 5-10 Tage nach Ausbringung der Ölbinder erfolgt, werden für die Klassifikation der Ausbreitungsmuster nach der Windrichtung nur diejenigen Experimente in Betracht gezogen, wo in den ersten 10 Tagen die mittlere Windrichtung im gleichen Sektor liegt. Das reduziert die Anzahl der Modellexperimente für NO, SO, SW und NW Windlagen zwar auf 10, 4, 30 und 4 Fälle, dafür entsprechen die simulierten Verteilungsmuster nach 5 und 10 Tagen jedoch vergleichbaren mittleren Windbedingungen. Dabei werden, insbesondere für Winde aus SO und NW, auch Fälle berücksichtigt, die große Richtungsschwankungen (Persistenz  $< 0.65$ ) aufweisen. Das bedeutet, dass wegen der starken Variationen in der Windanregung und in Rücksicht auf die teils sehr kleinen Stichproben, die Ergebnisse der vorliegenden numerischen Modellierung nur als Tendenzangabe gewertet werden können. Die Verteilungsmuster in Abbildung 2.11 und in den Anhängen erscheinen jedoch soweit realistisch, dass auf der Grundlage der hier dargestellten Resultate zumindest eine

Abschätzung der zu erwartenden Ausbreitung der Ölbinder und der möglichen Anlandung gegeben ist. Die mit den Simulationen dargestellten Sonderfälle zeigen auf, dass erhebliche Abweichungen von den typischen Mustern auftreten können, die vor allem durch die lokalen Strömungs- und Wetterbedingungen geprägt sind. Deshalb wird im Einsatzfall eine luftgestützte Beobachtung und eine möglichst hoch auflösende operationelle Modellierung notwendig sein.



**Abbildung 2.11:** Potentielle Anlandungsbereiche für Ölbinder, die auf der Position 4 vor Warnemünde (grünes Symbol) ausgebracht werden unter NO-Wind (oben) oder SW-Wind (unten). Gelbe, orange und violette Symbole zeigen Küstenzellen, in denen <1%, bis 2% oder >2% Ölbinder auf Land treffen. Die linken Teilbilder sind mit einfacher (*wind1stokes3*) und die rechten mit verstärkter (*wind3stokes3*) Winddrift berechnet worden.

Abschließend werden die Modellexperimente hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit und der Zeitdauer bis zur Anlandung von Ölbindern von den angenommenen Einsatzorten ausgewertet. Die der Abbildung 2.11 entsprechenden Anhänge geben eine vollständige Übersicht, welche Küstenabschnitte in Abhängigkeit von der mittleren Windrichtung betroffen sein können. Da das Driftmodul des Modells es zulässt, dass sich Testteilchen, deren Geschwindigkeit in Küstennähe asymptotisch gegen Null geht, bei ablandigem Wind und entsprechender Laufrichtung des Seegangs, d.h. der Stokesdrift, teils mehrfach wieder von der Küste ablösen, ergeben die Zeitreihen für die Drifterpositionen keine eindeutige Statistik für Anlandungen. Das wurde mit der oben beschriebenen Nachbearbeitung behoben, durch die alle Drifter beim erstmaligen Eintreten in eine Küstenzelle der dreifach verfeinerten Landmaske (Abbildung 2.4) fixiert werden. Damit ist es möglich, die Küstentreffer im Modell mit einer räumlichen Auflösung von ca. 600 m zu ermitteln. Die Eintreffzeiten werden mit dem doppelten Zeitschritt des Modells, d.h. 8 Minuten, aufgelöst, weil das Runge-Kutta-

Verfahren zur Berechnung der Trajektorien zwei Iterationen benötigt. Außerdem trägt jedes Testteilchen eine Identifikationsnummer, die es erlaubt, den Einsatzort zuzuordnen. Auf Basis dieser Daten kann ausgezählt werden, wie viele Ölbinder in einem Modellexperiment von welcher Position, wann und wo auf die Küste treffen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2.3 bis 2.5 zusammengestellt.

**Tabelle 2.3:** Wahrscheinlichkeit der Anlandung von Ölbindern von den Einsatzorten 0-9 nach 5, 10 und 30 Modelltagen. Die Prozentwerte entsprechen der Anzahl von je 74 Modellexperimenten, die keine, mittlere oder vollständige Anlandung ergaben.

Anlandungswahrscheinlichkeiten (%)						
Einsatzort	wind1stokes3			wind3stokes3		
	nach 5 Modelltagen					
	Landtreffer					
	<50	50 – 950	>950	<50	50 – 950	>950
0	15	11	74	9	7	84
1	8	24	68	7	5	88
2	14	14	72	7	12	81
3	11	25	64	4	12	84
4	4	10	86	4	7	89
5	24	30	46	20	16	64
6	43	18	39	28	15	57
7	62	11	27	41	5	54
8	54	10	36	36	7	57
9	45	9	46	31	11	58
nach 10 Modelltagen						
0	4	8	88	0	3	97
1	3	8	89	1	3	96
2	3	6	91	3	5	92
3	4	16	80	1	4	95
4	0	5	95	3	2	95
5	7	20	73	7	11	82
6	16	19	65	7	16	77
7	19	20	61	12	10	78
8	28	10	62	20	3	77
9	26	8	66	15	8	77
nach 30 Modelltagen						
0	0	3	97	0	0	100
1	0	4	96	0	0	100
2	0	4	96	0	3	97
3	1	7	92	0	1	99
4	0	1	99	0	0	100
5	0	5	95	0	3	97
6	4	10	86	0	4	96
7	3	15	82	0	3	97
8	7	7	86	1	2	97
9	4	10	86	0	3	97

Die Wahrscheinlichkeit für die Anlandung von Ölbändern ist in Tabelle 2.3 dargestellt. Die Prozentwerte entsprechen den Anteilen von je 74 Modellexperimenten, in denen von einem der Einsatzorte 0-9 nur eine unwesentliche Anzahl von Testteilchen (<50) an Land fixiert werden oder fast alle (>950). Diese Grenzwerte entsprechen den Perzentilen 5% und 95%. Der Bereich 50-950 bezeichnet teilweise Anlandungen. Diese Statistik wurde für 5, 10 und 30 Modelltage erhoben. In der Zusammenschau zeigt sich eine ähnliche Gruppierung der Einsatzorte, wie oben für die Driftwege diskutiert. Die Ölbänder von den Positionen 0-3 in der inneren Beltsee sind in 64-74% der Fälle bereits nach 5 Modelltagen vollständig an der Küste abgesetzt. Eine freie Bewegung der Drifterwolke ist nur in 8-15% zu verzeichnen. Die Station 4 vor Warnemünde hat die höchste Anlandungswahrscheinlichkeit von 86%. Die längsten Verweilzeiten in offener See zeigen Ölbänder, die an Station 7, d.h. im Eingangsbereich der offenen Arkonasee, ausgebracht werden (siehe auch Tabelle 2.5). In nur 38% der Modellexperimente ergeben sich nach 5 Tagen teilweise oder vollständige Anlandungen. Die Positionen 6, 8 und 8 zeigen ein ähnliches Verhalten mit höheren Wahrscheinlichkeiten für Küstentreffer von 46-57%. Der Einsatzort 5 in der Kadettrinne nimmt eine Zwischenstellung ein: Während in 24% der Experimente de facto keine Anlandung auftritt, sind die Drifter bei 46% nach 5 Tagen fast alle an Land. Die Gruppierung der Positionen 0-3 und 6-9 mit den Spezialfällen 4 und 5 ist auch nach 10 Modelltagen gut zu erkennen: Die Experimente ohne Anlandung reduzieren sich auf 3-4% bzw. 16-28%, während vollständiges Anspülen in 88-91% bzw. 61-66% auftritt. Von der Position 3 am Ausgang des Fehmarnbelts bleibt in 16% der Fälle auch nach 10 Tagen ein Teil der Drifter aktiv. Das ist vergleichbar mit den Stationen 5-8, ansonsten treten teilweise Anlandungen nur mit 5-8% auf. Nach den vollen Simulationsperioden von 30 Tagen, sind die Ölbänder im Modell größtenteils vollständig an Land gespült worden. Gemessen am 5%-Perzentil zeigen nur die Stationen 3 und 5, vor allem aber 6-9 in signifikantem Ausmaß teilweise Anlandungsereignisse.

Die verstärkte Winddrift in den Modellexperimenten *wind3stokes3* (rechter Tabellenteil 2.3) bewirkt eine erhöhte Anlandungswahrscheinlichkeit, wie schon die Simulationen zur Anpassung des Modells an den Feldversuch im Juli 2012 gezeigt haben. Die Ölbänder von den Stationen 0-4 sind nach 5 Modelltagen in 81-89% aller Fälle vollständig an der Küste fixiert und von den Stationen 6-9 gibt es nur in 28-41% eine freie Bewegung der Drifterwolke. Diese Ereignisse reduzieren sich auf 12-20% für die Stationen 7-9 nach 10 Modelltagen und nach den vollen Simulationsperioden gibt es nur noch einige Ausnahmefälle, in denen die Ölbänder nicht vollständig an Land fixiert sind.

Ein Versuch, die Anlandungswahrscheinlichkeit für die 4 ausgewählten Richtungssektoren des mittleren Windes zu klassifizieren ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Dafür wurden die Modellexperimente *wind1stokes3* nach 5 Modelltagen für alle 74 Windlagen ausgezählt, wobei hohe und geringe Richtungspersistenz mit dem Schwellwert 0.65 unterschieden sind (Anzahlen vor und nach dem Pluszeichen). Zur Bewertung der fettgedruckten Anzahlen von Ereignissen ist die unterschiedliche Häufigkeit der Windlagen zu berücksichtigen. NW- und SO-Wind treten im Durchschnitt im Vergleich zu NO- und SW-Wind im Verhältnis von 1:2:4 auf, d.h. die mittlere Häufigkeit beträgt ca. 13%, 25% und 50%, siehe oben Punkt 2.3. Dabei sollten NW- und SO-Wind mit mindestens 2 Fällen vertreten sein um Abweichungen von ( $\pm 1$ ) zuzulassen. Deshalb können Stichproben, die weniger als 16 Modellexperimente umfassen, nicht in Betracht gezogen werden. Dementsprechend sind in der Tabelle 2.4 nur diejenigen Ereignisse rot und blau hervorgehoben, bei denen eine Windrichtung über- oder unterproportional häufig aufgetreten ist, d.h. die Anzahl der modellierten Ereignisse weicht um mehr als 1/4 von der mittleren Verteilung ab. Für eine Stichprobe von 32 bedeutet das für

NW- und SO-Wind ( $4\pm 1$ ), für NO-Wind ( $8\pm 2$ ) und für SW-Wind ( $16\pm 4$ ) als Grenzen für die „natürliche“ Häufigkeit der Windlagen. Eine klare Richtungspräferenz ergibt sich damit nur für die fast vollständige Anlandung von Öbindern von den Einsatzorten 6-9 in der Arkonasee unter NO-Wind, der eine entsprechend ausgeprägte freie Drift unter SW-Wind gegenübersteht. In beiden Fällen überwiegen auch die Windlagen mit hoher Richtungspersistenz. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei der Station 8, die nahe an der Küste von Rügen liegt. Hier sind 60% der 27 Anlandungsereignisse mit NO-Wind verbunden und der Rest mit NW- oder SO-Lagen. Der Einzelfall unter persistentem SW-Wind im Experiment, das am 27.12.2012 gestartet wurde, führt zu einer vollständigen Anlandung an der Südwestküste von Bornholm (siehe Anhang). Auch für die Station 9 in der Pommerschen Bucht wird bei SO-Wind nur einmal eine Anlandung an der Greifswalder Oie und der Küste von Rügen gefunden. Dafür treten Anlandungen von der Station 6 unter SO-Wind und von den Einsatzorten 8 und 9 unter NW-Wind mit leicht erhöhter Wahrscheinlichkeit auf. Da diese Richtungen an den Präferenzsektor NO anschließen, ist für die Anlandung von Station 6 die Ostkomponente des Windes bestimmend und für die Stationen 8 und 9 die Nordkomponente, die jeweils auf die nahen Küsten gerichtet sind. Aus demselben Grund sind die Fälle von freier Drift über 5 Modelltage für NO-Wind deutlich unterrepräsentiert.

**Tabelle 2.4:** Anlandungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der mittleren Windrichtung nach 5 Modelltagen (*wind1stokes3*). Die Zahlen vor und nach den Pluszeichen geben an, wie viele Windlagen mit hoher oder niedriger Persistenz (Schranke 0.65) aufgetreten sind. Windlagen mit über- bzw. unterproportionalen Häufigkeiten sind rot bzw. blau gekennzeichnet. Stichproben  $\geq 16$  sind durch Fettdruck hervorgehoben. Die Gesamtzahl der Fälle beträgt jeweils 74 Modellexperimente. Die Einsatzorte in der inneren Beltsee und in der offenen Arkonasee sind gelb bzw. blau hinterlegt.

Ort	angelandete Ölbinder														
	< 5 %					5 ... 95 %					> 95 %				
	alle	NO	SO	SW	NW	alle	NO	SO	SW	NW	alle	NO	SO	SW	NW
0	11	0+1	0+2	2+5	0+1	8	0+1	0+1	3+2	0+1	55	11+4	2+5	17+8	1+7
1	6	1+0	0+1	2+2	0+0	18	2+3	0+2	4+4	0+3	50	8+3	2+5	16+9	1+6
2	10	0+1	0+2	3+3	0+1	11	1+0	0+2	4+3	0+1	53	10+5	2+4	15+9	1+7
3	8	2+0	0+0	4+2	0+0	19	1+2	0+1	7+5	0+3	47	8+4	2+7	11+8	1+6
4	3	1+0	0+2	0+0	0+0	7	1+1	0+2	2+0	0/1	64	9+5	2+4	20+15	1+8
5	18	2+0	0+1	6+7	0+2	22	2+4	1+5	5+2	0+3	34	7+2	1+2	11+6	1+4
6	32	1+1	0+3	14+10	0+3	13	0+1	0+1	3+4	0+4	29	10+4	2+4	5+1	1+2
7	46	3+4	1+7	11+13	0+7	8	2+0	0+0	3+2	0+1	20	6+2	1+1	8+0	1+1
8	40	0+0	2+1	20+14	0+3	7	0+1	0+3	1+1	0+1	27	11+5	0+4	1+0	1+5
9	33	0+1	2+6	9+11	0+4	7	1+1	0+1	3+1	0+0	34	10+4	0+1	10+3	1+5

Aufgrund der in allen Richtungen umgebenden Küsten, sind die Anlandungsereignisse für die Stationen in der inneren Beltsee (gelb unterlegt) annähernd so verteilt, wie die mittleren Windrichtungen. Für partielle Anlandungen gibt es nur 3 kleine, im o.g. Sinne signifikante Stichproben, die nur eine Tendenzaussage für die Stationen 3 und 5 gestatten. Auch hier wird die erhöhte Anlandungswahrscheinlichkeit bei SO- bzw. SW-Wind durch die naheliegenden Küsten der dänischen Inseln bestimmt. Die verringerte Wahrscheinlichkeit von Position 5 bei SW-Wind ist dadurch begründet, dass die Ölbinder dann mit dem oberflächennahen Einstrom in die Arkonasee getragen werden.

Die Zeitdauern bis zum ersten Eintreffen von Öbindern an benachbarten Küsten bzw. bis zur vollständigen Anlandung sind in Tabelle 2.5 zusammen gestellt. Dafür werden wieder Perzentile von 5-95% bezogen auf alle 74 Zeitscheiben je Modellversion angegeben. Von



den Einsatzorten 0-4 werden die ersten Treffer nach 5-13 Stunden registriert. Das entspricht mit den Küstenabständen aus Tabelle 2.1 maximalen Driftgeschwindigkeiten von ca. 0.3-0.5 m/s, die mit dem beobachteten Wert von 0.35 m/s im Feldversuch bei 7 m/s Wind gut übereinstimmen. Der Median liegt bei 1-2 Tagen. In Einzelfällen werden 4-7 Tage freie Drift vorhergesagt (95%-Perzentil). Der untere Tabellenteil zeigt, dass für die Stationen 0-4 eine vollständige Anlandung innerhalb von 12-24 Stunden möglich ist. Angaben >30 bedeuten, dass auch nach der vollen Simulationsperiode noch freie Drifter vorliegen. Beim Feldversuch wurde ein Großteil der vor Warnemünde ausgebrachten Ölbinder nach 8 Stunden in ca. 10 km Entfernung auf Fischland gefunden. Das entspricht den Modellexperimenten *wind3stokes3* mit erhöhter Winddrift. Diese verstärkt, wie oben gezeigt, die Anlandungswahrscheinlichkeit und verkürzt gleichzeitig die Driftzeiten. Das trifft insbesondere für die Stationen 5-9 zu, wo alle Ölbinder in der Hälfte der Fälle nach 4-6 Tagen an der Küste fixiert sind, während das bei einfacher Winddrift 7-10 Tage dauert. Für die Absicherung, dass diese Modellvariante die realistischeren Resultate liefert, wären weitere Feldversuche notwendig, die weiter in der offenen See liegen, um längere Driftzeiten zu ermöglichen. Das ist jedoch wegen des logistischen Aufwandes und der potentiellen Gefährdungen auf den Schifffahrtswegen nicht zu realisieren. Deshalb werden die hier diskutierten Driftwege und die Driftzeiten aus den Modellversionen *wind1stokes3* und *wind3stokes3* als realitätsnahe Abschätzungen für den zu erwartenden Bereich an Raum- und Zeitskalen für die Ausbreitung von Ölbindern betrachtet.

**Tabelle 2.5:** Modellzeit in Tagen bis zur Anlandung des ersten und letzten Ölbinders von den Einsatzorten, siehe Abbildung 2.3. Die Perzentile beziehen sich auf alle 74 Zeitscheiben der Modellexperimente.

Ort	Modelltage bis zur Anlandung des ersten Ölbinders									
	wind1stokes3					wind3stokes3				
	5%	25%	50%	75%	95%	5%	25%	50%	75%	95%
0	0.5	1.1	1.8	3.1	7.2	0.3	0.6	1.1	1.9	4.5
1	0.3	0.7	1.3	2.3	4.2	0.2	0.4	0.8	1.6	2.7
2	0.6	1.0	2.0	2.9	5.2	0.3	0.6	1.2	2.0	3.5
3	0.4	1.0	1.6	2.6	6.3	0.2	0.5	1.2	2.2	4.4
4	0.2	0.4	1.1	1.9	3.5	0.1	0.3	0.8	1.7	3.2
5	0.9	1.5	2.9	4.2	8.5	0.3	1.0	1.8	3.7	8.9
6	1.0	2.0	3.5	6.1	12.1	0.4	1.3	3.2	4.4	8.4
7	1.3	3.3	5.6	7.8	13.8	0.8	2.3	4.0	6.1	9.9
8	0.4	1.4	5.0	9.6	27.1	0.2	0.8	3.4	6.4	17.5
9	0.7	1.5	3.6	6.7	15.3	0.4	0.8	2.7	5.0	11.9
Ort	Modelltage bis zur Anlandung des letzten Ölbinders									
	5%	25%	50%	75%	95%	5%	25%	50%	75%	95%
	0	0.8	1.5	3.0	7.6	>30.0	0.4	0.9	1.5	3.4
1	0.9	1.8	4.3	9.2	>30.0	0.3	0.8	2.4	4.5	13.4
2	1.0	1.8	3.8	6.7	>30.0	0.5	1.1	2.0	4.1	>30.0
3	0.9	1.9	3.8	11.9	>30.0	0.4	0.8	2.0	4.7	>30.0
4	0.5	1.0	2.9	5.2	>30.0	0.2	0.5	1.5	3.8	>30.0
5	1.3	2.6	6.9	19.7	>30.0	0.7	1.6	4.1	10.0	29.8
6	1.3	4.6	9.2	26.2	>30.0	1.0	2.7	5.7	14.3	>30.0
7	2.0	4.7	9.9	>30.0	>30.0	0.8	2.7	5.5	12.2	>30.0
8	0.7	3.6	8.0	27.6	>30.0	0.5	1.5	4.5	11.5	>30.0
9	1.1	2.6	6.8	17.3	>30.0	0.5	1.2	4.2	10.4	>30.0



## 2.5 Zusammenfassung

In der Übersicht über alle Modellexperimente zeigen die 10 untersuchten potentiellen Einsatzorte für Ölbinder charakteristische Ausbreitungsmuster, die im Wesentlichen von der Richtung des lokalen Windes abhängen. Die Wahrscheinlichkeit und die Zeitdauer bis zur Anlandung der Ölbinder sind vor allem durch die Nähe der benachbarten Küsten bestimmt. Das erklärt die Gruppierung in die Stationen 0-4 in der inneren Beltsee, wo die kleinen Becken ca. 40-60 km weit sind, so dass die Anlandung in der Regel innerhalb der ersten 5 Modelltage erfolgt. Demgegenüber weisen die Einsatzorte 6-9, die am Rand der offenen Arkonasee liegen, eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für längere Driftwege und Driftdauern auf. Dieser Fall kann jedoch auch für die Stationen in der Beltsee auftreten, insbesondere für Station 5 im Übergangsbereich, wenn die Ölbinder durch die kanalartige Strömung erfasst werden, die den Wasseraustausch durch den Fehmarnbelt und über die Darßer Schwelle vermittelt. Dabei kann, in Abhängigkeit von der Vorgeschichte, ein Einstrom oder Ausstrom vorliegen, der durch den großräumigen Wasserstandsunterschied zwischen der Ostsee und dem Kattegat getrieben wird und deshalb nicht immer zum momentanen lokalen Wind „passt“, so dass sich in Einzelfällen ganz „untypische“ Verteilungen ergeben können. Das gilt auch für die beckenweiten Zirkulationszellen, die sich in der Beltsee insbesondere bei der Umstellung zwischen Einstrom und Ausstrom ausbilden. Außerdem hat die Auswertung der Modellexperimente gezeigt, dass aufgrund der hohen natürlichen Fluktuation im Wettergeschehen der mittlere Wind über 5 Modelltage nur mit Einschränkungen repräsentativ ist. Da Windlagen mit einer relativ hohen Persistenz  $>0.65$  Richtungsabweichungen bis zu 180 Grad zulassen, kann ein anfänglich ablandiger Wind Ölbinder von einer küstennahen Station seewärts treiben, so dass, trotz nachfolgend andauerndem auflandigem Wind, die Drifterwolke weit auseinander gezogen wird und Anlandungen auch an entfernten Küstenabschnitten erfolgen. Aufgrund solcher Ereignisse ergeben sich die in Abbildung 2.11 beispielhaft gezeigten Anlandungsbereiche, die außerhalb des Beckens des Einsatzortes liegen. Die einfache Faustregel, dass die Ölbinder vor allem auf die Küstenabschnitte treffen, auf die der Wind sie zutreibt, weil die Stokesdrift und die explizite Winddrift stets in diese Richtung wirken, gilt nur bei einigen Einsatzorten für bestimmte Windlagen, z.B. für Station 2 in der Lübecker Bucht und Station 8 vor Rügen bei NE-Wind oder für die Stationen 1 und 3 im Fehmarnbelt bei SW-Wind. Im Regelfall ergibt das Zusammenspiel von Wind und Strömung Anlandungsbereiche, die an allen umgebenden Küsten der Becken liegen. Das gilt auch für das Arkonabecken. Die Anlandungsbilder in der Anlage geben eine auf Modellexperimente gestützte Übersicht, welche Küstenabschnitte in Anhängigkeit von der mittleren Windrichtung betroffen sein können. Dieser Katalog an Möglichkeiten, kann jedoch nur eine Orientierung geben, da er auf relativ kleinen Stichproben beruht, vor allem für Windrichtungen aus SO und NW. Die Unsicherheit der Modellanpassung an einen kleinskaligen Feldversuch wurde bereits oben erwähnt. Außerdem kann das Modellraster von ca. 2 km die starke topografische Gliederung des Seegebietes und feinere Strukturen in der Wasserbewegung nur begrenzt wiedergeben. Aus diesen Gründen und wegen der hohen Variabilität der Wetter- und damit auch der Strömungsbedingungen wird im Einsatzfall eine luftgestützte Aufklärung und eine möglichst hochauflösende operationelle Modellierung zur Verfolgung und Wiederaufnahme der Ölbinder unverzichtbar sein.

### 3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position (ca. 70 %) des Teilvorhabens waren die Personalausgaben.

### 4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele notwendig. Die Arbeitspläne konnten im Wesentlichen eingehalten werden (siehe II.1). Die geleistete Arbeit war den Erfordernissen angemessen und die erzielten Resultate entsprachen den Projektzielen und konnten publiziert werden.

### 5. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in dem Teilprojekt erzielten Ergebnisse können als Grundlage für weitere Untersuchungen verwendet werden. Von Interesse wäre dabei zum Beispiel ein Freilandexperiment mit Ölausbringung. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt sind die Einzelkomponenten „Ölbinder“ und „ölabbauende Mikroorganismen“ des Systems BioBind hinreichend charakterisiert und können in Abhängigkeit der Nachfrage eingesetzt und genutzt werden. Eine nachfrageorientierte Optimierung dieser Einzelkomponenten ist basierend auf den bislang durchgeführten Untersuchungen ohne Weiteres möglich.

### 6. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Von anderen Stellen sind keine relevanten Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

### 7. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

#### Artikel in rezensierten Zeitschriften:

Hähnel, J., Jeschek, J., Schulz-Bull, D. E. Quantitative determination of microbial oil degradation and of oil absorption by a new oil-binding system in a Baltic Sea mesocosm experiment, *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2014  
- accepted -

#### Geplante Veröffentlichungen:

- Ergebnisse zu den Binderuntersuchungen
- Ergebnisse zu den mikrobiellen Ölabbauuntersuchungen
- Ergebnisse der Driftmodellierung

#### Konferenzbeiträge/Präsentationen:

Rubarth, J. Analytische Bestimmung und Bioabbaubarkeit von charakteristischen Ölbestandteilen; oral presentation; 1<sup>st</sup> BioBind Workshop, Rostock, Germany, 19 April 2012

Rubarth, J., Safonova, E., König, S., Schulz-Bull, D. E. Biodegradation of a crude oil by an identified bacterial consortium isolated from the Western Baltic Sea; poster presentation; 23<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC Europe), Glasgow, Scotland, 12-16 May 2013

Rubarth, J. Qualitative und quantitative Ölanalytik im Rahmen von „BioBind“; 2<sup>nd</sup> BioBind Workshop, Barth, Germany, 29 August 2013

Seifert, T. Modellierung der Ausbreitung von driftenden Ölbindern in der Ostsee, 2. BioBind Workshop, Barth, Germany, 29 August 2013

Hähnel, J., Jeschek, J., Schulz-Bull, D. E. Quantitative determination of microbial oil degradation and of oil absorption by a new oil-binding system in a Baltic Sea mesocosm experiment; oral presentation; International Oil Spill Conference, Savannah, Georgia, 5-8 May 2014

Hähnel, J., Jeschek, J., Schulz-Bull, D. E. Oil spill combating – chemical characterization of crude oils and microbial degradation in the marine environment; poster presentation; BioBind Final Workshop, Rostock, Germany, 27-28 May 2014

Seifert, T. Darstellung der Verdriftung von Ölbindern mit einem realitätsnahen numerischen Modell, BioBind Final Workshop, Rostock, Germany, 27-28 May 2014

## Schrifttum

Ergebnisbericht „Chemische Charakteristika von Öl, biogenen Bindern und Abbaureaktionen sowie ökologischer Nutzen“

Aldrett, S., J. S. Bonner, et al. (1997). "Microbial degradation of crude oil in marine environments tested in a flask experiment." *Water Research* **31**(11): 2840-2848.

ASTM (2007). Standard Test Method for Determination of Parent and Alkyl Polycyclic Aromatics in Sediment Pore Water Using Solid-Phase Microextraction and Gas Chromatography/Mass Spectrometry in Selected Ion Monitoring Mode. **D7363-07**.

Dutta, T. K. and S. Harayama (2000). "Fate of crude oil by the combination of photooxidation and biodegradation." *Environmental Science and Technology* **34**: 1500-1505.

Krawi, H. (2006). Bekämpfung von Ölhavarien im Meerwasser mit passiven Bindern. Math.-Naturwiss. Fak. Rostock, Universität Rostock.

Nausch, G., R. Feistel, et al. (2011). "Marine Science Report." **86**: 84-97.

Nausch, G. and D. Nehring (1996). "Baltic Proper, Hydrochemistry. In: Third Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea." *Baltic Sea Environment Proceedings* **64B**: 80-85.

Speight, J. G. (2007). *The chemistry and technology of Petroleum*, Taylor and Francis Group, LLC.

Suni, S., A.-L. Kosunen, et al. (2004). "Use of a by-product of peat excavation, cotton grass fibre, as a sorbent for oil-spills." *Marine Pollution Bulletin* **49**(11-12): 916-921.

Venosa, A. D. and E. L. Holder (2007). "Biodegradability of dispersed crude oil at two different temperatures." *Marine Pollution Bulletin* **54**: 545-553.

Wang, Z., M. Fingas, et al. (1994). "Fractionation of a light crude oil and identification and quantitation of aliphatic, aromatic, and biomarker compounds by GC-FID and GC-MS, Part I." *Journal of Chromatographic Science* **32**: 361-366.

Wang, Z., M. Fingas, et al. (1994). "Fractionation of a light crude oil and identification and quantitation of aliphatic, aromatic, and biomarker compounds by GC-FID and GC-MS, Part II." *Journal of Chromatographic Science* **32**: 367-382.

Ergebnisbericht "Darstellung der Verdriftung von Ölbindern in der Ostsee mit einem realitätsnahen numerischen Modell"

Fennel, W., Seifert, T., Kayser, B. (1991). Rossby radii and phase speeds in the Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, **11**: 23-36.

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2005). Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, 6. Verbesserte Auflage, Potsdam Institute für Climate Impact Research (PIK), Report No. **100**, 148 Seiten.

Griffies, S. M. (2007). Elements of mom4p1, NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA, 346 pp, 2007.

Griffies, S. M., Treguier, A. M., 2013. Ocean Circulation Models and Modeling. In Ocean Circulation and Climate: A 21st Century Perspective, Second Edition, Elsevier, International Geophysics, **103**: 521-551.

Radtke, H., Neumann, T., Voss, M., Fennel, W. (2012). Modeling pathways of riverine nitrogen and phosphorus in the Baltic Sea. Journal of Geophysical Research, **117**, C09024, doi: 10.1029/2012JC008119.

Seifert, T., Fennel, W., Kurths, C. (2009). High resolution model studies of sedimentary material in the south-western Baltic. Journal of Marine Systems, **75**: 382-396.

Webb, A., Fox-Kemper, B., (2011): Wave spectral moments and Stokes drift estimation. Ocean Modelling, **40**: 273-288.

Wezell, O.W. (Hrsg.): Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, 32. Auflage, Stuttgart 2007, Teubner Verlag.

## **Anlage**

### **Erfolgskontrollbericht**

#### **1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen**

#### **2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

Im Rahmen des Teilvorhabens wurde ein neu entwickelter Bindertyp unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie Temperatur, Ölfilmschichtdicke, Dosierung, etc. charakterisiert, sodass es nach Abschluss des Gesamtvorhabens möglich ist, den Ölbinder anwenderorientiert anzupassen und einzusetzen. Eine dementsprechende Charakterisierung erfolgte ebenfalls hinsichtlich aus der Ostsee isolierter, ölabbauender Mikroorganismen. Die Organismen wurden klassifiziert und ihre Fähigkeit, Gesamtöl sowie darin vorliegende spezifische toxische Verbindungen unter verschiedenen, definierten Bedingungen abzubauen, quantifiziert.

Die beschriebenen charakterisierenden Untersuchungen sowie die daraus resultierenden Ergebnisse konnten für eine erste ökotoxikologische Bewertung des Systems BioBind herangezogen werden. Das System wird als toxikologisch unbedenklich eingestuft und hat nach bisherigem Erkenntnisstand einen deutlichen Nutzen für das marine Ökosystem.

Die Modellsimulationen zeigen, dass mit einem numerischen Zirkulationsmodell die Verdriftung von Ölbindern auf der Meeresoberfläche realitätsnah wiedergegeben wird. Die Serie der Modellexperimente mit realistischen Wetterbedingungen bietet einen Katalog von möglichen Ausbreitungsmustern, die nach 4 Hauptwindrichtungen klassifiziert werden können. Aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität der Windbedingungen und der Strömungsmuster ist eine operative Modellierung zur Vorhersage der Ausbreitung von Ölbindern im Einsatzfall notwendig.

#### **3. Fortschreibung des Verwertungsplanes**

##### **3.1 Erfindungen und Schutzrechte**

Im Rahmen des Teilvorhabens hat es keine Anmeldung von Schutzrechten oder Patenten gegeben. Es sind auch für die Zukunft keine Anmeldungen zu erwarten.

##### **3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die im Rahmen des Teilvorhabens erzielten Ergebnisse dienen der technisch-chemischen Beratung zur Ölhavariabekämpfung. Anhand der oben genannten Resultate ist eine Bewertung der ökologischen Folgen sowie die Schadensabschätzung bei Ölhavarien möglich.

Bei weiteren anwenderorientierten Optimierungen des gesamten Systems BioBind oder Teilkomponenten daraus können die im Teilvorhaben entwickelten und etablierten Untersuchungs- und Bewertungsmethoden angewendet werden.

##### **3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten**

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen und den dabei erzielten Ergebnissen konnte ein vertieftes Verständnis bezüglich der Wirkungsweise der

entwickelten Binder sowie der Ölabbaufähigkeit natürlich vorkommender Mikroorganismen erlangt werden. Einige Ergebnisse wurden bereits auf internationalen Konferenzen präsentiert. Weitere Veröffentlichungen in internationalen begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften sind geplant.

Die vollständige Serie der Modellexperimente zur Verdriftung von Ölbindern in der südwestlichen Ostsee wird den potentiellen Anwendern des Systems als digitaler Anhang zum Abschlussbericht dieses Teilprojektes zur Verfügung gestellt. Damit ist eine Orientierung über mögliche Ausbreitungsmuster und die potentielle Anlandung von Ölbindern unter realistischen Wetterbedingungen möglich.

Somit werden die erzielten Ergebnisse der wissenschaftlichen Gemeinschaft präsentiert und zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

### **3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die im Teilvorhaben erzielten Ergebnisse können im Rahmen des entwickelten Gesamtsystems den regionalen und nationalen Behörden zur Verfügung gestellt werden, um in Zukunft bei Havariemanagementmaßnahmen berücksichtigt zu werden. Sie dienen als Voraussetzung dafür, dass auch in Zukunft die ökologische Funktion der marinen Ökosysteme erhalten und die Gebiete und angrenzenden Küstengewässer für die lokale Bevölkerung ökonomisch nutzbar bleiben.

### **4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Die vorliegenden Arbeiten konnten alle zu einem Ergebnis geführt werden, sodass keine Arbeiten vorliegen, die zu keiner Lösung geführt haben.

### **5. Präsentationsmöglichkeiten**

Die im Teilvorhaben erzielten Ergebnisse konnten bereits in vielfältiger Weise auf internationalen Kongressen und nationalen Anwenderworkshops präsentiert werden. Dadurch erfolgte auf internationaler Ebene die Präsentation vor der wissenschaftlichen Gemeinschaft, wohingegen sich die Zielgruppe auf nationaler Ebene aus Wissenschaftlern und potentiellen Anwendern zusammensetzte. Es wurde bereits Interesse bekundet, die während der Projektlaufzeit gewonnene Expertise in Beratergremien oder ähnlichem zu nutzen.

### **6. Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Zeitplanung des Teilprojektvorhabens konnte eingehalten werden. Ebenso wurde auch der vorgesehene Kostenplan eingehalten.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <b>BIOBIND- TP IOW : “Chemische Charakteristika von Öl, biogenen Bindern und Abbaureaktionen sowie ökologischer Nutzen sowie Darstellung der Verdriftung von Ölbindern in der Ostsee mit einem realitätsnahen numerischen Modell“</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Prof. Dr. Detlef Schulz-Bull, Dr. Torsten Seifert, Dipl. Chem. Janne Hähnel	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2014
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Fachzeitschriften
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Seestraße 15, 18119 Rostock, Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03SX308A
	11. Seitenzahl 38
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie PtJ Zimmerstr. 26-27 10969 Berlin	13. Literaturangaben 19
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 18
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung	
<p><i>Die Untersuchungen des Teilvorhabens IOW umfassten hauptsächlich Studien zur stofflichen Veränderung des Öls im Rahmen der BioBind-Einsätze. Neben der Auswahl und chemischen Charakterisierung verschiedener Ölsorten gehörte die chemisch-analytische Bestimmung repräsentativer Schadstoffgruppen zum Aufgabenfeld. Anhand der Abnahme dieser Schadstoffgruppen wurden die Effektivität der Binder und der ölabbauenden Mikroorganismen im Labor sowie im Feldversuch unter variablen Bedingungen bestimmt. Als meereswissenschaftliches Forschungsinstitut hat das IOW die Leitung und Organisation von Versuchen in der Ostsee (Schiffsexpeditionen) übernommen. Ein weiteres Aufgabenfeld stellte die Modellierung der Binderverdriftung unter verschiedenen meteorologischen Einflüssen mithilfe eines an die speziellen Bedingungen im Rahmen von BioBind angepassten Zirkulationsmodells der Ostsee dar. Basierend auf einer ausführlichen Literaturrecherche zum Thema „Zusammensetzung von Ölsorten und Ölprodukten“ wurden drei Ölsorten ausgewählt die im Untersuchungsgebiet Ostsee relevant sind.</i></p> <p><i>Um die Bindereigenschaften und die Effizienz der ölabbauenden Mikroorganismen bestimmen zu können, wurden analytische Nachweismethoden validiert. Anhand verschiedener Experimente konnten die zufriedenstellenden Absorptions- und Desorptionseigenschaften der Ölbinder ermittelt werden. Die Absorptionseigenschaften wurden im Labor bei unterschiedlichen Ölfilmschichtdicken (Rohöl, 0,3 mm und 0,03 mm -Werte orientieren sich an VPS-Tabelle), mit Bindern im Überschuss und mit einer Binderbelegung von 0,1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> durchgeführt. Mit den Experimenten konnten die im Projekt entwickelten Ölbinder detaillierter charakterisiert und ihre Eignung für nachfolgende Untersuchungen bestätigt werden.</i></p> <p><i>Basierend auf Experimenten konnten die effektivsten Bakterienkulturen (s. Projektpartner Univ. Leipzig) für Abbauersuche ausgewählt werden. Bei einem Ölanteil von 0,5 Vol-% konnte nach einer Inkubationszeit von zwei Wochen kein signifikanter PAK-Abbau nachgewiesen werden. Der Alkanabbau variierte von 0 % bis 93 % und lag bei sechs Stämmen über 80 %. Unter</i></p>	

\*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

*Laborbedingungen konnte nachgewiesen werden, dass der Alkanabbau bereits nach wenigen Tagen vollständig abgeschlossen ist, während der PAK-Abbau mit geringerer Ölmenge, nährstoffreicherem Medium und längerer Inkubationszeit ansteigt.*

*Um Freilandbedingungen zu simulieren, wurden drei Experimentreihen in Rundtanks, sogenannten Mesokosmen, durchgeführt. Die Tanks haben eine Höhe und einen Durchmesser von etwa 1 m und wurden jeweils mit ca. 300 L Ostseewasser befüllt. In den Mesokosmen wurde mit einer Ölfilmschichtdicke von 0,3 mm (Rohöl) und einer Binderbelegung von 0,1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> gearbeitet. Im Rahmen der Mesokosmenexperimente konnte gezeigt werden, dass die Ölaufnahmeeffizienz der Binder temperaturabhängig ist. Die Abbauleistung der eingesetzten ölabbauenden Mikroorganismenkonsortien wurde anhand von Binderextraktionen ermittelt. Während die Ölmenge auf den unbehandelten Bindern nahezu gleich bleibt, ist auf den Bindern, die kurz mit Mikroorganismen behandelt wurden eine leichte Ölabbahme um etwa 10 % zu erkennen. Die Ölverluste auf den behandelten Bindern sind ausschließlich auf mikrobielle Abbaueffekte durch die aufgebrachten Mikroorganismenkonsortien zurückzuführen. Bei den Mesokosmenexperimente konnte gezeigt werden, dass die Ölbinder in einem Temperaturbereich von 9 °C bis 27 °C zwischen 62 % und 70 % des Öls dauerhaft und schnell binden. Die Ölaufnahmegeschwindigkeit der Binder ist abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Immobilisierungsverfahren.*

*Ein weiteres Ziel dieses Teilprojektes bestand darin, mit einem realitätsnahen numerischen Modell abzuschätzen, welche Ausbreitungswege ausgebrachte Ölbinder unter realistischen Windlagen und den entsprechenden Strömungsbedingungen nehmen können. Dabei ist insbesondere die Frage von Bedeutung wann und wo die Drifter an die umgebenden Küstenabschnitte treffen. Für diese Fragestellung wurde ein am IOW betriebenes Ostseemodell erweitert, dass auf dem Modular Ocean Model (MOM) beruht.*

*In der Übersicht über alle Modellexperimente zeigen die 10 untersuchten potentiellen Einsatzorte für Ölbinder charakteristische Ausbreitungsmuster, die im Wesentlichen von der Richtung des lokalen Windes abhängen. Die Wahrscheinlichkeit und die Zeitdauer bis zur Anlandung der Ölbinder sind vor allem durch die Nähe der benachbarten Küsten bestimmt. Das erklärt die Gruppierung in der inneren Beltsee, wo die kleinen Becken ca. 40-60 km weit sind, so dass die Anlandung in der Regel innerhalb der ersten 5 Modelltage erfolgt. Demgegenüber weisen die Einsatzorte, die am Rand der offenen Arkonasee liegen eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für längere Driftwege und Driftdauern auf. Aus diesen Gründen und wegen der hohen Variabilität der Wetter- und damit auch der Strömungsbedingungen wird im Einsatzfall eine luftgestützte Aufklärung und eine möglichst hochauflösende operationelle Modellierung zur Verfolgung und Wiederaufnahme der Ölbinder unverzichtbar sein.*

19. Schlagwörter

Öl, chemische Zusammensetzung, Havarie, Meereschemie, Ostsee

20. Verlag

21. Preis

\*<sup>1</sup>) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.



## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title  BIOBIND- project partner Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW): Chemical characteristics of oil, biogenic binders and oil degradation by microorganism. Modelling the drift of binders in coastal Baltic Sea regions.	
4. author(s) (family name, first name(s))  Prof. Dr. Detlef Schulz-Bull, Dr. Torsten Seifert and cand. Chem. Janne Hähnel	5. end of project 30.06.2014
	6. publication date intended
	7. form of publication scientific journals
8. performing organization(s) (name, address)  Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW) Seestraße 15 D- 18119 Rostock-Warnemünde	9. originator's report no.
	10. reference no. 03SX308A
	11. no. of pages 38
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie PTJ Zimmerstr. 26-27 10969 Berlin	13. no. of references 19
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 18
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract  The IOW group studied the composition of crude oils, the microbial degradation reactions during the mesocosm experiments and the effects of binders on desorption/adsorption processes. The second task was to predict the drift of binders by numerical modeling in the coastal Baltic Sea. The IOW planned and managed the expeditions with the RV Elisabeth Mann Borgese to the Baltic Sea. The cruises were used to undertake the mesocosm studies and to perform the binder sampling technique.  Gas chromatography with mass spectrometry was used to analyze alkanes and polyaromatic hydrocarbons in oil samples and the changes during laboratory experiments. The uptake of the selected crude oil by binders was studied and quantified. The development of the binders by the project partner University Dresden was assisted by chemical determinations. Chemical measurements helped to identify the best biological culture to degrade crude oils. Alkane degradation was up to 93%. The results of mesocosm experiments on board RV E. Mann Borgese were in the same range as the laboratory studies: (1) adsorption by the binders was most important and up to 70% with one day, (2) the added microbial community degraded up to 10% of the crude oil and (3) both reactions are affected by environmental conditions, like temperature and nutrient availability.  The parameters wind, wind direction and current direction were used to run the numerical models to predict the drift direction of the binders. Within 5 days all of the theoretical yielded binders reached the coast.	
19. keywords chemical composition, oil spill, case of average, marine chemistry, Baltic Sea	
20. publisher	21. price