

PLAWES AP 3:

Numerische Simulation der Mikroplastik(MP)-Ausbreitung und des MP-Transports im Gezeitenbereich der Weser

Gholamreza Shiravani^{1,2}, Andreas Wurpts²

¹Gholamreza.Shiravani@nlwkn.niedersachsen.de

²NLWKN-Forschungsstelle Küste (FSK), Jahnstr. 1, 26506 Norden

Der hier beschriebene Modellansatz behandelt den Teil der Weser, der durch die Gezeiten beeinflusst ist. Hierzu zählt der Mündungsbereich in die Nordsee und der sich in Richtung Binnenland anschließende Tidefluss bis zum Weserwehr in Bremen (Weser-km 120 – 0 in Abb. 1). Stromauf dieses Wehrs gibt es keinen Gezeiteneinfluss und die Strömung ist immer nach seewärts gerichtet.

Die Gezeitenausbreitung (Ebbe und Flut) sorgt dafür, dass die Tideströmung sich etwa alle sechs Stunden umkehrt. Hierdurch ist im Gezeitenbereich eine andere Modellbildung erforderlich als im Binnenbereich (sog. alluvialer Bereich). Auch der Mündungsbereich weist Besonderheiten auf, die eine spezielle Modellformulierung erfordern: Große Teile des Mündungstrichters der Weser sind Wattflächen (ab Weser-km 65), d.h. diese fallen zweimal täglich trocken und werden weder überflutet. Außerdem mischt sich im Mündungstrichter (Ästuar) das Süßwasser aus dem Binnenland in das Salzwasser der Nordsee ein.

Da Süßwasser leichter als Salzwasser ist, finden im Ästuar Schichtungsphänomene statt (Salzgehalt an der Oberfläche geringer als an der Sohle), die im Zusammenwirken mit der Gezeitenströmung komplizierte Strömungsmuster zur Folge haben: Die Flutströmung beginnt in der Außenweser sohnah etwa eineinhalb Stunden eher als an der Oberfläche. Die Ebbe fließt an der Oberfläche etwa in dieser Größenordnung länger als an der Sohle.

Dies hat Auswirkungen auf den Transport von gelösten und suspendierten (d.h. als feinste Partikel im Wasser verteilten) Stoffen. Da suspendierte Stoffe eine Sink- oder Aufschwimmgeschwindigkeit haben, sobald sich ihre Dichte von der des umgebenden Wassers unterscheidet, werden diese tendenziell stärker an der Sohle (bei Absinken) oder der Oberfläche (Aufschwimmen) transportiert. Auch die Dichte des Wassers, von der das Absinken oder Aufschwimmen der Partikel ebenfalls abhängt, ist aufgrund der stetigen Einmischung des Süßwassers nicht überall gleich, sondern nimmt zur See hin zu.

Die beschriebenen Strömungsmechanismen sorgen dafür, dass Ästuare wie die Weser im Bereich der Mündung feinste Sedimente verstärkt ansammeln. Dies äußert sich u.a. in deutlich trüberem

Wasser (der Bereich wird auch als Trübungszone bezeichnet, Abb. 6) und schlickigen Sedimenten am Ufer.

Mikroplastikpartikel werden in diesem Bereich entweder als Einzelpartikel im Wasser suspendiert oder aber an Sedimentpartikel gebunden (und mit diesen suspendiert) transportiert. Die große Menge an Feinsediment in der Trübungszone begünstigt zudem die Bildung von (Fein-) Sedimentzusammenballungen (Aggregate, s.a. Abb. 6), die größer als die einzelnen Sedimentpartikel sind, jedoch eine sehr viel geringere Dichte bei gleichzeitig erheblich vergrößerter Oberfläche als die Einzelbestandteile aufweisen. Die zweite relevante Transportform von Mikroplastik im Ästuar besteht daher in gebundener Form an die Feinsedimente, wobei das MP in diesem Fall die Transporteigenschaften der Sedimentaggregate annimmt. Dies wird u.a. durch die deutlich höheren Messwerte von Mikroplastik an Sedimenten im Bereich der Trübungszone deutlich.

Das für den Gezeitenbereich entwickelte Computermodell muss daher die Gezeitenströmung berücksichtigen können wie auch die Dichteschichtungen, die sich auf die Strömungen auswirken. Da das MP stark mit den Feinsedimenten wechselwirkt, muss auch das Sediment der Sohle und im Wasserkörper in der Modellierung berücksichtigt werden. Aufgrund der sich ständig ändernden Strömungsgeschwindigkeit, -richtung und Wasserstand muss die alles transportierende Strömung durch physikalische Bewegungsgleichungen beschrieben werden, die man letztlich auf das zweite Newtonsche Gesetz zurückführen kann. Der Wasserkörper muss hierzu in feste Abschnitte eingeteilt werden, innerhalb derer man jeweils eindeutige Eigenschaften der zu berechnenden Größen annimmt. Diese Einteilung wird Diskretisierung genannt und hat letztlich eine Gitterstruktur zur Folge, innerhalb der jede Zelle mit ihren Nachbarn Energie (Strömungsimpuls, Temperatur), Masse (Wasserfluss) und im Wasser gelöste oder suspendierte Stoffe (Salz, Sediment, MP) austauscht. Neben der Einhaltung der physikalischen Regeln der Bewegungsgleichung wird hierbei dafür gesorgt, dass die Massen konstant bleiben (die zu- und Abflüsse jeder Zelle sind exakt ausgeglichen mit dem Inhalt der Zelle). MP gelangt in dieses System über die offenen Ränder des Modellgebiets hinein (d.h. konkret mit dem Zufluss der Weser aus dem Binnenland, den seitlichen Zuflüssen aus Nebenflüssen, Kläranlagen etc. und über den Rand zur offenen See. Man spricht in diesem Fall von punktuellen MP-Quellen im Gegensatz zu einer weiteren, als diffus bezeichneten MP-Quelle: Ein weiterer für das MP offener Rand des Modellgebiets ist die Wasseroberfläche, durch die mit dem Wind über Land transportiertes MP in das Wasser gelangt und von dort weitertransportiert wird.

Das an der Forschungsstelle Küste im PLAWES-Projekt entwickelte MP-Transportmodell (FSK-MPTM; **FSK-Mikroplastik Transport Model**) wurde durch Erweiterung bestehender dreidimensionaler Modellierungswerkzeuge realisiert und durchgeführt. Das Modellsystem besteht aus zwei Teilen; (i) Die hydrodynamische Berechnung ermittelt die Strömung und alle mit ihr wechselwirkenden Größen wie Sediment, Salzgehalt und Temperatur. Das eigentliche MP-Transport- und Gewässergütemodell berechnet Parameter wie z.B. MP-Konzentrationen für alle berücksichtigten Kunststoffsorten (Polymerarten) und deren Größenklassen. Außerdem wird die

Wechselwirkung zwischen MP und Feinsediment sowie die Auswirkungen des sogenannten Biofouling, d.h. des Bewuchses der MP-Partikel mit einzelnen Algenarten, auf den MP-Transport modelliert. Das Modell berücksichtigt zur Beschreibung des MP unterschiedliche Polymersorten, die durch die ihre entsprechende Dichte Berücksichtigung finden und jeweils mehrere Größenklassen der Partikelabmessungen.

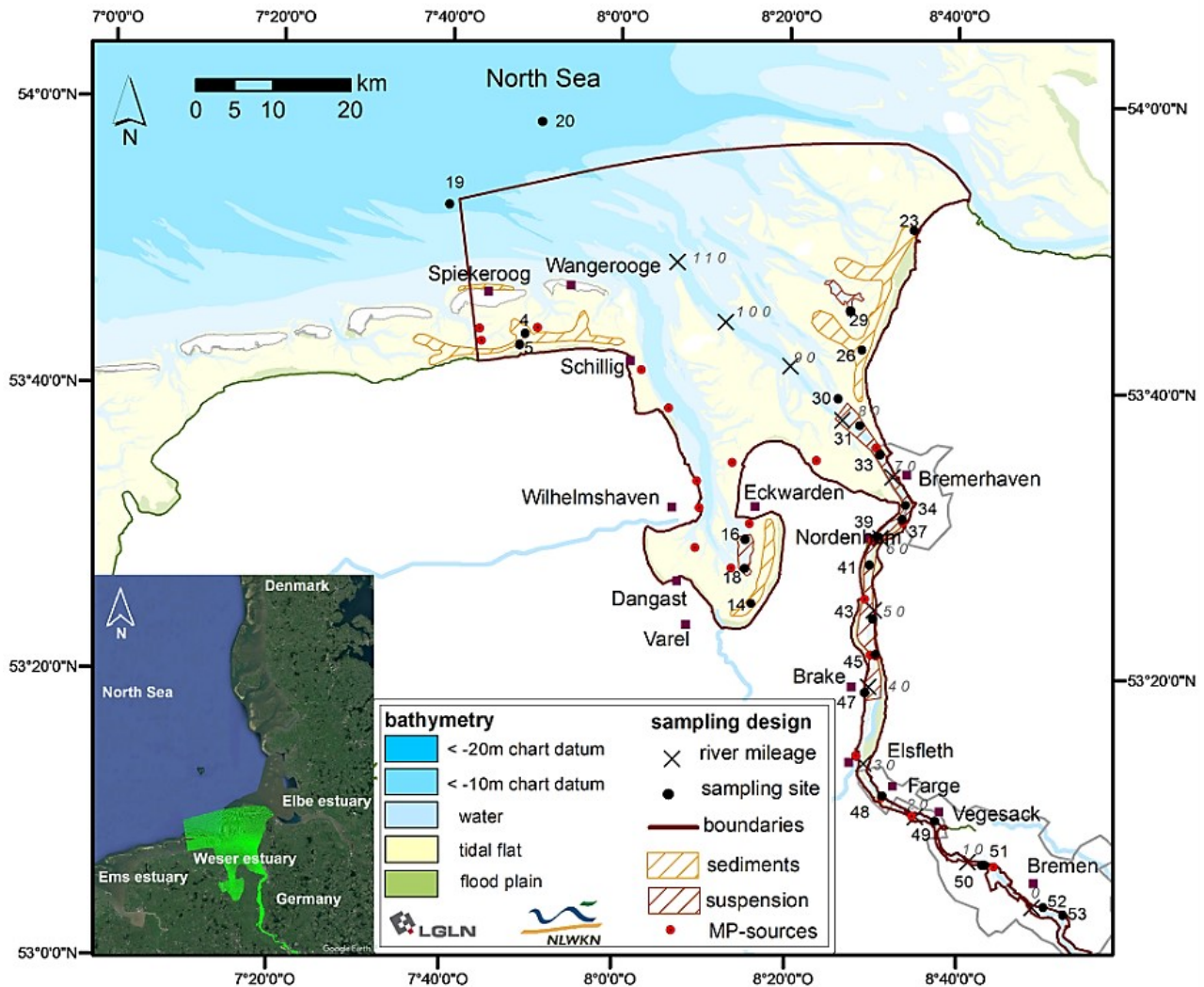


Abb. 1 Einzugsgebiet Tideweser, MP-Messstationen und punktförmige MP-Quelle

Zur Vorbereitung der Naturmessungen, mit deren Ergebnissen die Modellergebnisse später abgeglichen wurden, sind auch besonders wichtige Messstationen für die MP-Probenahmen mit Hilfe des Modells ermittelt worden. Abb. 1 zeigt das Gebiet der Tideweser und die Messstationen sowie die zu berücksichtigen punktförmigen MP-Quellen, die Kläranlagen sind.

Die Abb. 2 und 3 geben einen Eindruck von dem Berechnungsgitter. Abb. 2 zeigt die Gitterzellen in der Draufsicht. Da die Schichtungseffekte auch Unterschiede über die Wassertiefe bewirken, ist als dritte räumliche Dimension die Wassertiefe in zehn vertikal übereinander angeordnete Schichten aufgeteilt (Abb. 3).

Das horizontale Gitter (Abb. 2) bedeckt die Fläche des gesamten Gebiets der Tideweser durch 68216 Rechenzellen mit variierenden Zellgrößen (sog. Modellauflösung) von 20 m im Ästuar bis 400 m in der Außenweser. Da außerdem die MP-Partikel entweder leichter als Wasser sind (z.B. Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)) oder schwerer, wurden die Rechenzellen in der Nähe der Wasseroberfläche und der Sohle verfeinert, damit die entsprechende Änderung der berechneten MP-Konzentration von Zelle zu Zelle dort jeweils mit höherer Auflösung modelliert werden kann. Auch muss das Modell solches MP berücksichtigen können, das schon mit dem/in das Sediment am Boden gesunken ist und durch die Strömung wieder aufgewirbelt wird (Resuspension). Da innerhalb einer Rechenzelle stets überall der gleiche Zahlenwert angenommen werden muss, können Bereiche, in denen sich die Werte über kürzere Distanzen verändern nur durch entsprechend kleinere Zellen gut abgebildet werden.

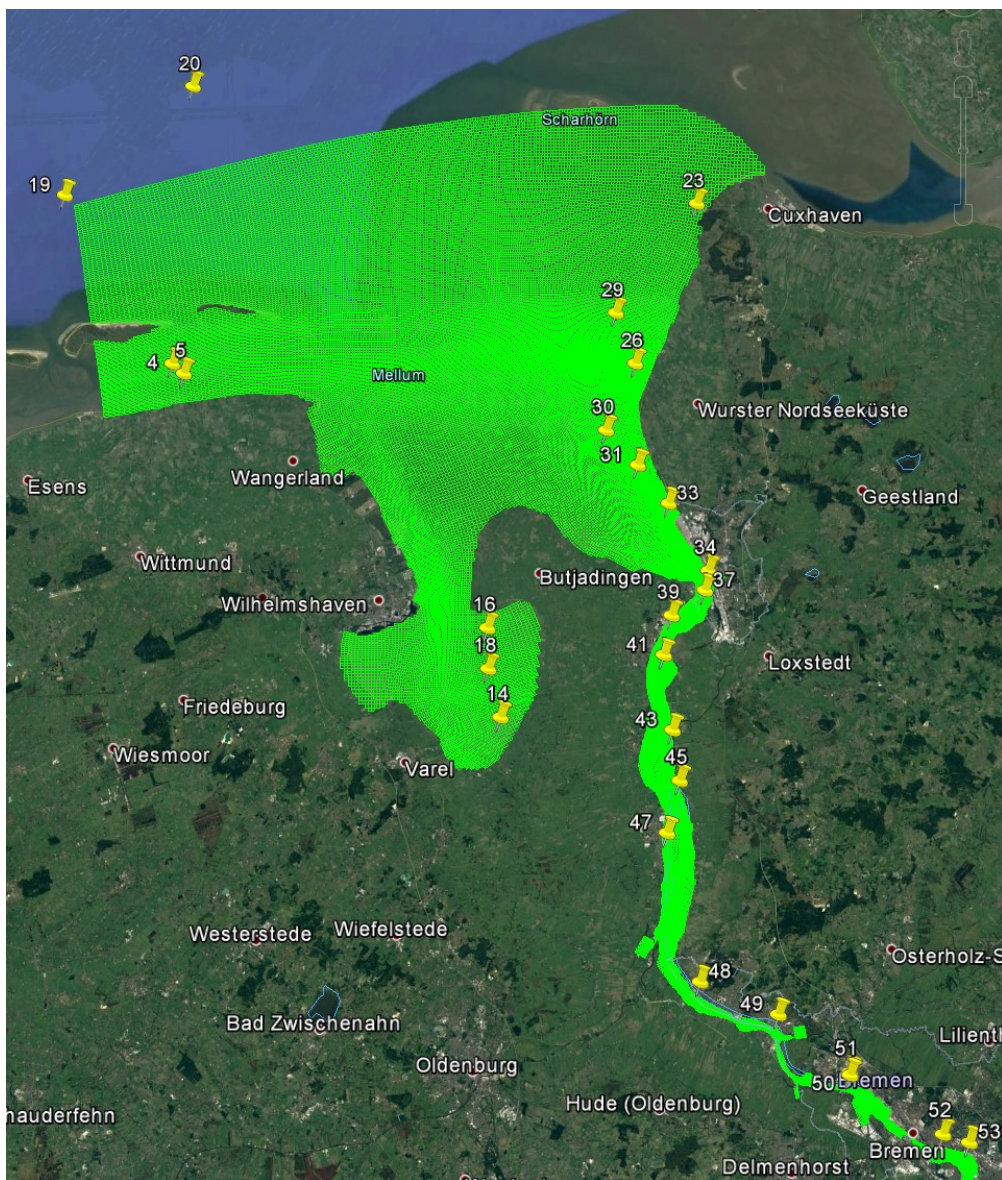


Abb. 2 Modellgebiet im Satellitenbild (Google Earth) überlagert mit der Draufsicht des Rechengitters. Die Größe der einzelnen Gitterzellen reicht von 20-400 m, so dass diese in der Übersicht nicht erkennbar sind. Die gelben Stecknadeln markieren Punkte im Modellgebiet, an denen Wasser- und Sedimentproben genommen wurden.

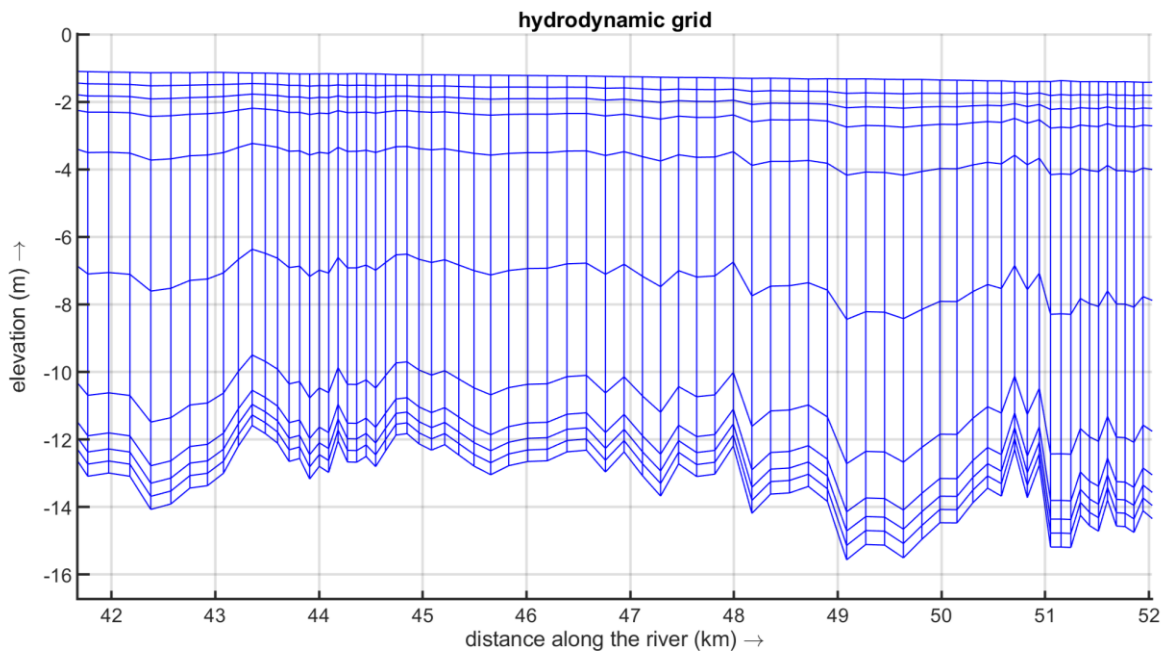


Abb. 3 Diskretisierung des Rechengitters über die Wassertiefe entlang eines Schnitts in Längsrichtung in der Flussmitte. Man erkennt jeweils zehn Rechenzellen übereinander. An der Oberfläche und der Sohle sind die Zellen kleiner, um dort Änderungen von Zelle zu Zelle besser abbilden zu können.

Die in der Modellrechnung angenommene Sinkgeschwindigkeit des MP spielt eine entscheidende Rolle beim Transport und der Ausbreitung des MP der unterschiedlichen MP-Polymersorten. Für die Mikroorganismen im Wasser stellt die MP-Oberfläche einen guten Lebensraum dar, was insbesondere für aufschwimmendes MP gilt, dass stärker dem Sonnenlicht ausgesetzt ist. Durch Bewuchs mit Mikroorganismen (Biofouling, insbes. durch bestimmte Algenarten) werden auch aufschwimmende MP mit der Zeit schwerer und sinken dann ab. Dieser komplexe Mechanismus ist im Modell unter Einbeziehung von Parameter wie der Wassertemperatur, der Konzentration von Mikroorganismen, deren Wachstumsrate und der Wahrscheinlichkeit eines Zusammentreffens mit MP-Partikeln berücksichtigt. Abb. 4 zeigt ein Beispiel des Aufwuchses von Mikroorganismen auf MP-Partikeln, die während der ersten PLAWES-Messkampagne gefunden wurden.

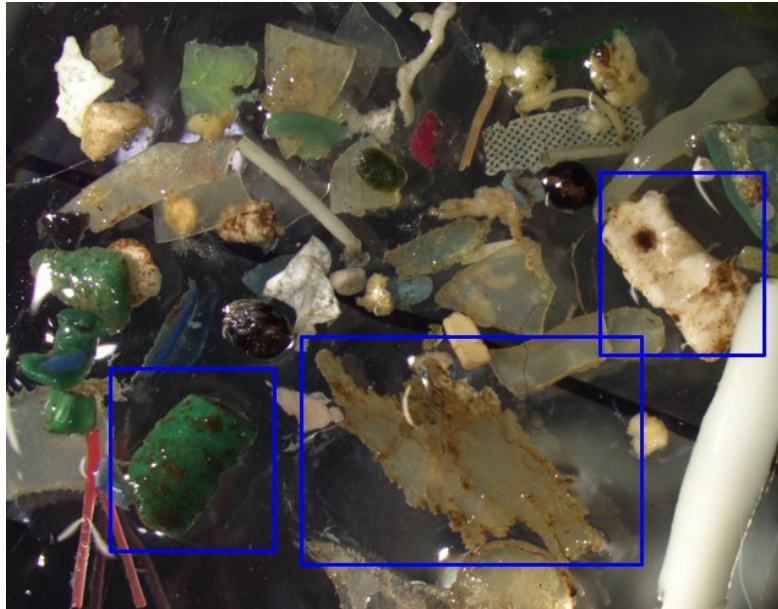


Abb. 4 Mikroorganismenaufwuchs auf MP bzw. „Biofouling“ (Photo von Lisa Roscher, AWI).

Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf das Absinkverhalten der MP-Partikel ist die Wechselwirkung mit dem Feinsediment (hierzu zählt man Sedimentpartikel kleiner als $<63 \mu\text{m}$). Abb. 5 zeigt schematisch, wie sehr kleine MP-Partikel in Feinsediment-Aggregate eingebunden werden und dann die Sinkgeschwindigkeit der Sedimentaggregate annehmen, die mehrfach größer als die der freien MP-Partikel ist. Entsprechend wird im Modell die Sinkgeschwindigkeit der MP-Partikel angepasst, wenn die MP-Partikelgröße klein ist und die Sedimente Aggregate bilden.

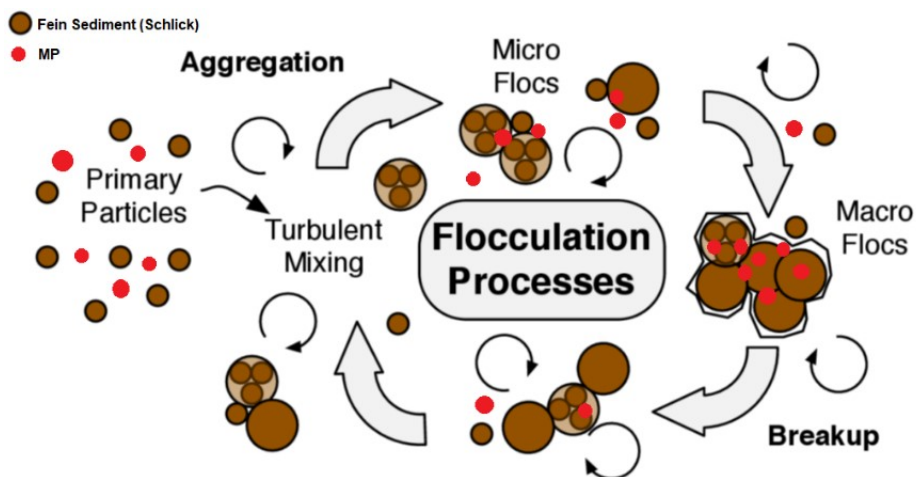


Abb. 5 Prinzipskizze zur Aggregatbildung von Feinsedimenten unter Einbeziehung von MP (modifizierte Abb. von Kuprenas, 2018).

Abb. 6 zeigt die Modellergebnisse für die Verteilung der Feinsedimentkonzentration im Modellgebiet. Deutlich erkennbar ist die Trübungszone, die als Folge der Dichteunterschiede zwischen Süß- und Salzwasser besteht. Die in diesem Bereich gemessenen MP-Konzentrationen bestätigen den Zusammenhang zwischen dem beschleunigten Absinken des MP in diesem Bereich im Vergleich zu anderen Messstellen außerhalb der Trübungszone.

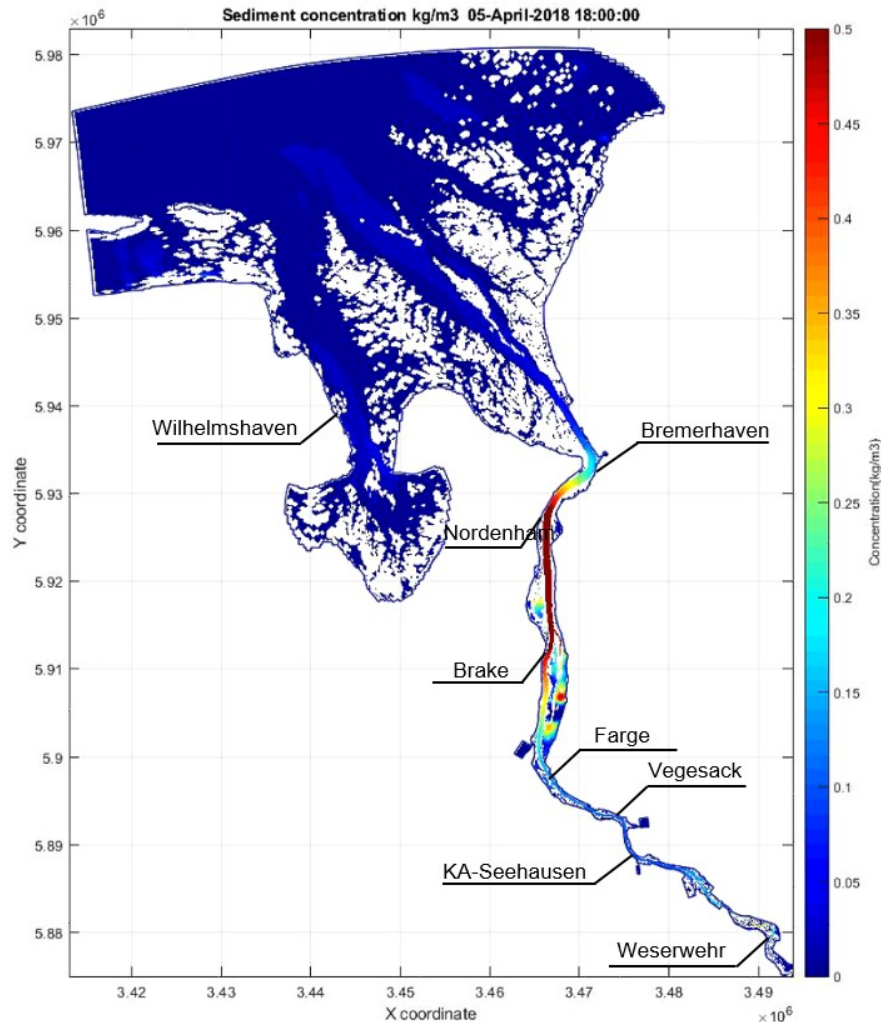


Abb. 6 Beispielhaftes Modellergebnis für die Konzentration von Feinsediment im Wasser. Gelbe und rote Werte zeigen besonders „trübes“ Wasser. In diesen Bereichen werden feine MP-Partikel häufiger mit in die Sedimentaggregate eingebunden und nehmen dann deren Transportverhalten an. Der rot-gelbe Bereich wird auch als Trübungszone des Ästuars bezeichnet.

Abb. 7 und Abb. 8 zeigen beispielhaft Modellergebnisse für eine Polymersorte (Polyethylen, PE) als Massenkonzentration (d.h. Masse des Polymers in kg bezogen auf die Masse an umgebenden Wasser in kg). Da MP mengenmäßig sehr gering vorkommt im Vergleich zum Wasser, sind die Werte extrem gering, was aber natürlich nichts über die von dem MP ausgehende Gefährdung aussagt. Abb. 7 zeigt die flächige Verteilung im Modellgebiet für die Wasseroberfläche. Der dreidimensionale Berechnungsansatz erlaubt ebenso die Darstellung jeder anderen Schicht oder auch die Ermittlung eines Mittelwertes oder der Gesamtmenge. Es wird deutlich, dass die PE-Größenklasse $<500 \mu\text{m}$ eine deutlich stärkere Verteilung über die Trübungszone hinaus nach seewärts hat als die gröberen Partikel $>500 \mu\text{m}$. Dies ist eines der Ergebnisse der Modellierungen, dass gröbere Partikel schwerer die Trübungszone überwinden können und entsprechend dort angesammelt und auch in die Sedimente eingelagert werden, während die feinsten Anteile leicht die Trübungszone überwinden und ins Meer hinaustransportiert werden.

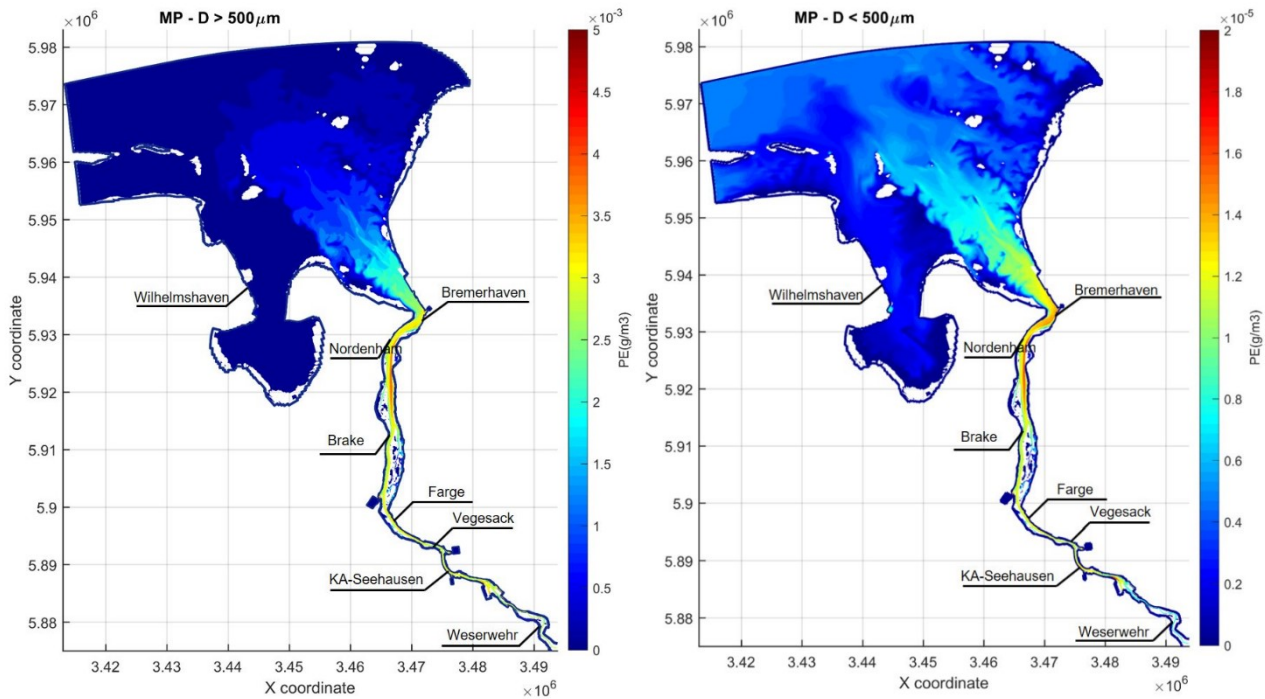


Abb. 7 Beispielhaftes Modellergebnis für die räumliche Verteilung einer MP-Polymersorte (Polyethylen, PE, links für MP-Partikelgrößen größer 500 μm und rechts $<500 \mu\text{m}$). Besonders hohe Werte existieren im Fluss und hier in der Trübungszone.

Abbildung 8 verdeutlicht, dass eine charakteristische Verteilung des MP (hier wiederum beispielhaft für PE) über die Wassertiefe existiert. Grundsätzlich findet sich mehr PE in Sohlnähe (und auch im Sediment, hier nicht dargestellt) als an der Oberfläche. Zudem erkennt man, dass seewärts der Trübungszone (ab etwa Bremerhaven) die Konzentration der größeren PE-Partikel deutlich abnimmt, weil diese die Trübungszone nicht so leicht überwinden können wie die feineren Partikel der Klasse $>500 \mu\text{m}$.

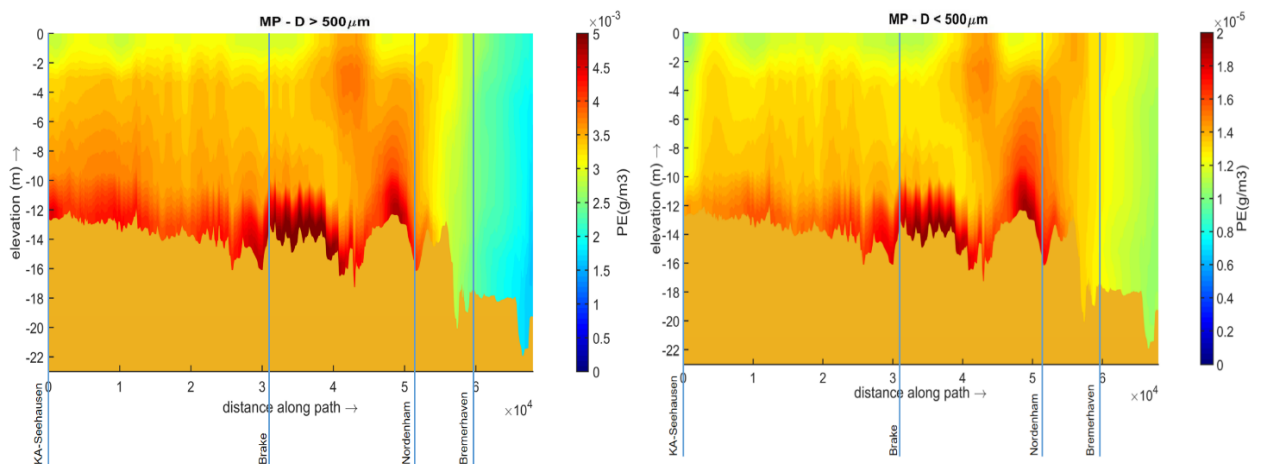


Abb. 8 Beispielhafte Darstellung von Modellergebnissen für die PE-Konzentration in der Wassersäule (links: PE $>500 \mu\text{m}$ und rechts PE $<500 \mu\text{m}$).