

BERICHT

Federmodellierung der Bohrungen

Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Kunde: ONE-Dyas B.V.

Referenz: BG6396IBRP2010071009

Status: Finale/2.0

Datum: 7.10.2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 Nr.353818

EX AMERSFOORT

Industry & Buildings

Handelsregisternummer: 56515154

+31 88 348 20 00+31 **TFEW**

33 463 36

52info@rhdhv.comroyalhaskoningdhv.com

Titeldokument: Federmodellierung der Bohrungen

Untertitel: Federmodellierung der Bohrungen

Referenz: BG6396IBRP2010071009

Status: 2.0/Final

Datum: 7.10.2020

Projektname: Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Projekt-Nummer: BG6396-105

KLASSIFIZIERUNG

PROJEKTBEZOGEN

Dieser Text wurde aus dem Niederländischen übersetzt. Soweit es Widersprüche zum Originaltext gibt, ist der Originaltext führend.

Sofern nicht anders mit dem Auftraggeber vereinbart, darf nichts aus diesem Dokument vervielfältigt oder veröffentlicht werden oder für einen anderen Zweck als den, für den es erstellt wurde, verwendet werden. HaskoningDHV Nederland B.V. übernimmt keinerlei Verantwortung oder Haftung für dieses Dokument, außer gegenüber dem Auftraggeber. Hinweis: Dieses Dokument enthält persönliche Daten von Mitarbeitern von HaskoningDHV Nederland B.V. und muss vor der Veröffentlichung oder einer anderen Form der Weitergabe anonymisiert werden.

1 Inhalt

<u>1</u>	<u>Einführung</u>	5
<u>1.1</u>	<u>Hintergrund</u>	5
<u>1.1.1</u>	<u>Allgemein</u>	5
<u>1.1.2</u>	<u>Umgebung</u>	5
<u>1.1.3</u>	<u>Bohrvorgang</u>	6
<u>1.2</u>	<u>Methodik</u>	7
<u>1.3</u>	<u>Leseanleitung</u>	7
<u>2</u>	<u>Projektbeschreibung</u>	8
<u>2.1</u>	<u>Einführung</u>	8
<u>2.2</u>	<u>Bohrungsort</u>	8
<u>2.3</u>	<u>Ausführung der Bohrung</u>	9
<u>2.4</u>	<u>Bestimmen von Quelltermen</u>	10
<u>2.5</u>	<u>Naturschutzgebiete in der Umgebung von N05-A</u>	12
<u>3</u>	<u>Historische Daten</u>	14
<u>3.1</u>	<u>Einführung</u>	14
<u>3.2</u>	<u>Durchflussbedingungen</u>	14
<u>3.3</u>	<u>Wasserstand</u>	17
<u>3.4</u>	<u>Wind</u>	19
<u>3.5</u>	<u>Wellenbedingungen</u>	21
<u>3.6</u>	<u>Sediment auf dem Meeresboden</u>	22
<u>3.7</u>	<u>Natürliche Bohrspülungskonzentration</u>	23
<u>3.8</u>	<u>Auswahl des Szenarios</u>	26
<u>4</u>	<u>Entwurf und Validierung des numerischen Modells</u>	29
<u>4.1</u>	<u>Einführung</u>	29
<u>4.2</u>	<u>Verwendete Software</u>	29
<u>4.3</u>	<u>Modellschema</u>	29
<u>4.3.1</u>	<u>Original ZUNO-Modell</u>	29
<u>4.3.2</u>	<u>Anpassungen an das Modell</u>	29
<u>4.3.3</u>	<u>Modellierung von Bohrspülung und gelösten Stoffen</u>	31
<u>5</u>	<u>Ausbreitung von Bohrspülung und Tracer um N05-A</u>	33
<u>5.1</u>	<u>Allgemein</u>	33
<u>5.2</u>	<u>März-Szenario</u>	33
<u>5.2.1</u>	<u>Baryt und Bentonit in Bohrspülung</u>	33
<u>5.2.2</u>	<u>Gelöste Substanzen in der Bohrspülung</u>	40

<u>5.3</u>	<u>Zusammenfassung der Ergebnisse für die drei Szenarien</u>	47
<u>5.3.1</u>	<u>Baryt und Bentonit in der Bohrspülung</u>	47
<u>5.3.2</u>	<u>Gelöste Substanzen in der Bohrspülung</u>	48
<u>6</u>	<u>Diskussion</u>	50
<u>6.1</u>	<u>Vergleich der Szenarien</u>	50
<u>6.2</u>	<u>Relevanz der Ergebnisse in Bezug auf natürliche Prozesse</u>	51
<u>6.3</u>	<u>Unwägbarkeiten</u>	51
<u>6.4</u>	<u>Batch-Bohren versus Serienbohren</u>	52
<u>7</u>	<u>Schlussfolgerungen und Empfehlungen</u>	56
<u>7.1</u>	<u>Schlussfolgerungen</u>	56
<u>7.2</u>	<u>Empfehlungen</u>	57
<u>8</u>	<u>Referenzen</u>	58

Anhänge

Entwurf des numerischen Modells

<u>A1</u>	<u>Entwurf des numerischen Modells</u>
<u>A1.1</u>	<u>Modell-domäne und Berechnungsgitter</u>
<u>A1.2</u>	<u>Bathymetrie</u>
<u>A1.3</u>	<u>Zeitschritt</u>
<u>A1.4</u>	<u>Beobachtungspunkte</u>
<u>A1.4.1</u>	<u>Zur Validierung</u>
<u>A1.5</u>	<u>Anfangsbedingungen</u>
<u>A1.6</u>	<u>Bodenrauhigkeit</u>
<u>A1.7</u>	<u>Wirbelviskosität und Diffusivität</u>
<u>A1.7.1</u>	<u>Viskosität</u>
<u>A1.7.2</u>	<u>Diffusivität</u>
<u>A1.8</u>	<u>Salinität und Temperatur</u>
<u>A1.9</u>	<u>Randbedingungen</u>
<u>A1.10</u>	<u>Modelldurchführung</u>
<u>A1.11</u>	<u>Andere Modelleinstellungen und Eingabeparameter</u>
<u>A1.12</u>	<u>Wellenmodell</u>
<u>A1.12.1</u>	<u>Berechnungsgitter und Boden</u>
<u>A1.12.2</u>	<u>Randbedingungen</u>
<u>A1.12.3</u>	<u>SWAN-Einstellungen</u>

A1.12.4 Validierung des Wellenmodells

A1.13 Einleiten von Bohrspülung

A1.13.1 Standort

A1.13.2 Höhe

A1.13.3 Quellterme

A1.14 Vergleich der Hydrodynamik des modifizierten und des ursprünglichen ZUNO-Modells

Modellergebnisse für N05-A

A2 Modellergebnisse für N05-A

A2.1 März-Szenario

A2.2 Oktober-Szenario

A2.2.1 Allgemein

A2.2.2 Bohrspülung

A2.2.3 Tracer

A2.3 November-Szenario

A2.3.1 Bohrspülung

A2.3.2 Tracer

1 Einführung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Allgemein

Im Auftrag von ONE-Dyas hat Royal HaskoningDHV einen Umweltverträglichkeitsbericht (Environmental Impact Report, EIR) für die Erschließung des Gasfeldes N05-A und die Exploration und Produktion der *Prospektionsgebiete* um N05-A erstellt. Beim Bohren der Gasbohrungen fallen Bohrklein und Bohrspülung an. Bohrklein mit ölbasierter Bohrspülung wird per Schiff zu einem Aufbereiter an Land transportiert. In der MER werden zwei Alternativen für das Bohrklein mit wasserbasierter Bohrspülung betrachtet. Bei der Variante "Abtransport von Bohrklein und Bohrspülung" werden Bohrklein und Bohrspülung auf Wasserbasis ebenfalls per Schiff zu einem Aufbereiter an Land transportiert. Dies hat keine Auswirkungen auf das Wasser und wird in dieser Studie nicht weiter betrachtet. Bei der Variante "Freisetzung von Bohrklein und Bohrspülung" werden Bohrklein und Bohrspülung auf Wasserbasis von der Bohrplattform über ein Rohr unter der Wasseroberfläche ins Meer abgeleitet. Dies führt zu erhöhten Konzentrationen von Feinsedimenten und zu mehr Ablagerungen von Feinsedimenten in der Nähe der Plattform. Eine quantitative Untermauerung dieser Auswirkungen mittels Feder- und Sedimentationsmodellierung ist aufgrund der Naturwerte im Gebiet, einschließlich der Natura 2000-Gebiete, erwünscht.

Daher wurde diese Feder- und Sedimentationsstudie als Teil der UVP durchgeführt. Ziel dieser Feder- und Sedimentationsberechnung ist es, die Ausbreitung von Bohrklein und die Sedimentation von Baryt und Bentonit, die aus dem Bohrklein stammen, während des Bohrens der Grube in der Variante "Ableitung von Bohrklein und Bohrspänen" zu ermitteln, um die Auswirkungen auf die Umgebung und die nahegelegenen Naturgebiete, wie z.B. die Natura 2000-Gebiete, zu bestimmen. In diesem Bericht liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung der Konzentrationen und der Sedimentation, die sich aus den Bohraktivitäten ergeben; die Bewertung dieser Auswirkungen erfolgt in der Naturbeurteilung (Anhang M9 in Teil 2: Umweltauswirkungen).

Dieser Bericht betrachtet nur die Bohrspülung, bestehend aus Baryt, Bentonit und gelösten Stoffen. Die Verteilung und Sedimentation des Bohrkleins wird in einem weiteren Bericht von Royal HaskoningDHV behandelt. [1].

1.1.2 Umgebung

Die Plattform N05-A soll etwa zwanzig Kilometer nördlich von Schiermonnikoog in der Nordsee in einer Wassertiefe von etwa 25 Metern errichtet werden. Die deutsche Grenze verläuft in einer Entfernung von etwa fünfhundert Metern von der Plattform. In der Nähe der Plattform befinden sich mehrere schützenswerte Naturgebiete (u. a. Natura 2000), sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland. Diese Gebiete sind die Nordseeküstenzone, Borkum-Riffgrund, Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer, die Borkum-Steine und das Austernbank-Restaurierungsprojekt (Abbildung 1-1).

Dieser Bereich der Nordsee ist durch eine Gezeitenströmung in ost-westlicher Richtung, dominante Winde aus Südwest und windgetriebene Wellen gekennzeichnet. Die obere Schicht des Meeresbodens besteht hauptsächlich aus feinem Sand und ist relativ flach ohne große Bodenunebenheiten. Eine genauere Beschreibung dieser natürlichen Bedingungen und der steuernden (natürlichen) Prozesse für die Ausbreitung von Bohrspülung erfolgt in Kapitel 3.

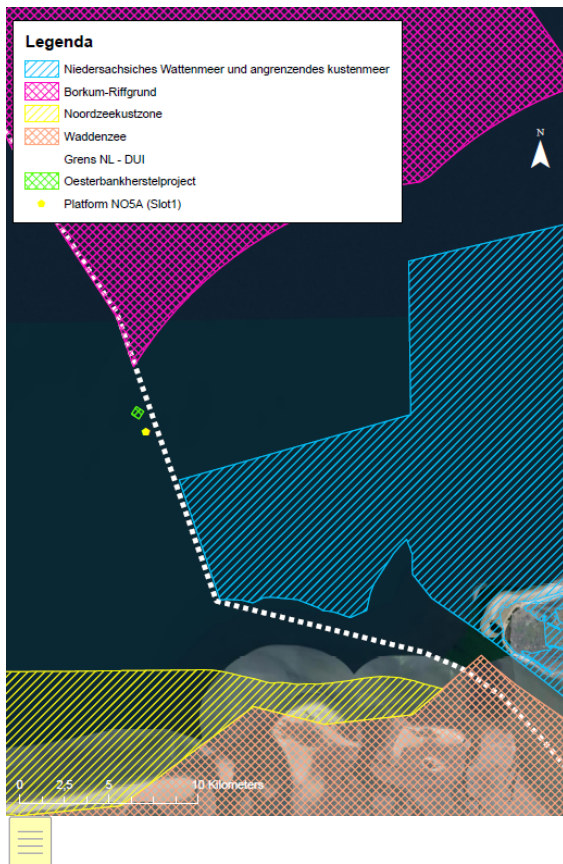


Abbildung 1- 1: Karte mit den Naturschutzgebieten rund um den Standort der Plattform

Bohrvorgang

Auf der Förderplattform N05-A wird Platz für zwölf Gasbohrungen und zwölf Abzweigleitungen (*Sidetracks*) sein. Die zwölf Bohrlöcher werden mit einer selbsthebenden Plattform gebohrt, die vorübergehend auf dem Plattformstandort platziert wird. Das Bohren erfolgt per Bohrspülung. Diese Flüssigkeit transportiert das zerkleinerte Gestein aus dem Bohrloch (das "Bohrklein") an die Oberfläche. Gleichzeitig schmiert und kühlt die Flüssigkeit die Bohrkronen und stabilisiert das Bohrloch.

ONE-Dyas verwendet so weit wie möglich Bohrspülung auf Wasserbasis ("WBM"¹). Für bestimmte Abschnitte des Bohrlochs kann es jedoch erforderlich sein, eine ölbasierte Bohrspülung ("OBM"²) zu verwenden. WBM darf (unter Auflagen) von der Plattform in die Nordsee eingeleitet werden. In dieser Studie wird eine Vorhersage über die Ausbreitung und Sedimentation von WBM nach der Einleitung in die Nordsee gemacht.

Im MER werden zwei Bohrvarianten betrachtet, die Variante "Serienbohrung" und die Variante "Batch-Bohrung". Diese Studie wurde für die Variante "Serienbohren" durchgeführt. Bei der Variante "Serienbohrung" werden alle Bohrungen nacheinander durchgeführt und die Bohrspülung wird für jeden Bohrabschnitt gewechselt. In Kapitel 7 wird der Unterschied in der Federmodellierung für die Batch- und die Serienbohrvariante diskutiert.

In Kapitel 2 wird der Bohrprozess genauer beschrieben und die Menge des abzuführenden WBMs quantifiziert.

¹ Wasserbasierte Bohrspülung (WBM) ist eine Mischung aus Wasser und Ton (Bentonit). Diesem Gemisch werden mit zunehmender Tiefe Zusatzstoffe wie Stärke, Schwerspat, Kalk, Salz und Schmiermittel zugesetzt.

² Oil Based Mud (OBM) kann zusätzlich zu den gleichen Komponenten wie WBM bis zu 75 % Mineralöl enthalten.

1.2 Methodik

In dieser Studie wird die Verteilung und Sedimentation von Bohrspülung, bestehend aus Baryt, Bentonit und gelösten Stoffen, mit Hilfe des numerischen Modells Delft3D vorhergesagt. In diesem Modell werden die hydrodynamischen Prozesse in der Nordsee, wie Wellen, Gezeiten- und Windströmung, für verschiedene Zeiträume berechnet.

In der Delft3D-Modellberechnung wird die Bohrspülung am Standort der Plattform ins Meer abgelassen, wonach sie von der Strömung weiter transportiert wird. Dadurch entsteht eine so genannte Feder: eine Wolke erhöhter Sedimentkonzentrationen im Wasser, die sich in Richtung der Strömung ausdehnt und mit den Gezeiten um den Standort der Plattform rotiert. Aus dieser Feder setzen sich Sedimentpartikel auf den Boden ab, wo sie unter geeigneten Bedingungen sedimentieren können. Je schwerer ein Teilchen ist, desto leichter sinkt es. Hohe Wellen oder starke Strömungen können ebenfalls dazu führen, dass Partikel erodieren und in die Suspension kommen.

Abhängig von den Bedingungen (Wind, Wellen, Strömungen) variieren die Form und die Konzentrationen innerhalb der Feder sowie das Ausmaß der Sedimentation:

- Je stärker die Strömung ist, desto weiter wird das Sediment transportiert und desto größer ist die Feder. Die Konzentrationen innerhalb der Feder sind in diesem Fall geringer. Unter diesen Bedingungen tritt relativ wenig Sedimentation auf. Das Material kann sogar erneut erodieren und sich möglicherweise mit vorhandenem Bodenmaterial vermischen, das in die Suspension kommt. Dies wiederum führt zu höheren Konzentrationen. Aufgrund der breiten, aber dünnen Feder und der Ablagerung wird diese Situation auch mit einem Pfannkuchen assoziiert.
- Bei ruhigen Bedingungen, z. B. im Bereich von Wendepunkten, bleibt die Feder näher am Standort der Plattform, was zu einer relativ kleinen Feder mit relativ hohen Konzentrationen führt. Das Baryt und Bentonit kann nun leichter absinken und sedimentieren, was zu einer relativ dicken Baryt- und Bentonitschicht auf dem Meeresboden in der Nähe des Plattformstandorts führt. Aufgrund der kleinen, kompakten und daher hohen Konzentrationen und der dicken Sedimentationsschicht wird diese Situation manchmal mit einem Stück Torte im Gegensatz zu einem Pfannkuchen assoziiert.

Die Bohrspülung ist feinkörnig, bleibt lange Zeit in der Suspension und sinkt allmählich zu Boden. Die gelösten Stoffe in der Bohrspülung sinken nicht zu Boden, sondern bleiben in Lösung und werden durch die Strömung und diffuse Prozesse wie Wellen und Turbulenzen dispergiert.

Die Federmodellierung wird für drei Szenarien durchgeführt, um den Bereich möglicher Konzentrationen und Ablagerungen von Bohrspülung zu zeigen (der Pfannkuchen gegenüber dem Stück Torte). Hier werden die Szenarien so gewählt, dass sie unterschiedliche Strömungs- und Wellenbedingungen beinhalten. Die Szenarien sollen nicht dazu dienen, geeignete oder weniger geeignete Zeiträume im Jahr für Bohrungen auszuwählen, sondern einen Einblick in die Auswirkungen der Feder zu geben. Die Wahl der drei Zeiträume basiert auf historischen Daten aus Hydrodynamik und Wind in der Nordsee aus dem Jahr 2015 und wird in Kapitel 3 beschrieben. Die Tatsache, dass die Aktivität erst nach 2020 tatsächlich stattfinden wird, wird voraussichtlich nicht zu signifikant anderen Bedingungen führen.

1.3 Leseanleitung

Kapitel 2 enthält eine Beschreibung des Projekts. Kapitel 3 beschreibt die historischen Daten, aus denen die Szenarien ausgewählt wurden. In Kapitel 4 wird das numerische Modell besprochen. In Abschnitt 5 werden die Ergebnisse des numerischen Modells für die Ausbreitung von Bohrspülung und zugehörigen gelösten Feststoffen vorgestellt. Schließlich enthält Kapitel 6 eine Diskussion der Ergebnisse und Kapitel 7 präsentiert die Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

2 Projektbeschreibung

2.1 Einführung

In diesem Kapitel wird das Projekt N05-A beschrieben: der Standort der Plattform, die Durchführung der Bohrung, die Ermittlung der abzuleitenden Mengen an Bohrspülung und gelösten Stoffen sowie eine Beschreibung der Umgebung der Plattform N05-A.

2.2 Bohrungsort

Der Standort der Plattform ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Plattform N05-A befindet sich zwanzig Kilometer nördlich von Schiermonnikoog und ist auf einer Wassertiefe von etwa 25 Metern gegründet.



Abbildung 2- 23: Standort der Plattform N05-A

Die von ONE-Dyas bereitgestellten Koordinaten des Plattformstandorts sind im Koordinatensystem ED50 angegeben [1]. Da das Delft3D-Modell das Koordinatensystem RD New verwendet, werden die Koordinaten in dieses umgerechnet, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2- 12: Koordinaten der Plattform N05-A

PLATTFORM	KOORDINATENSYSTEM	BREITENGRAD (=Y)	LÄNGENGRAD (= X)
N05-A	ED50	53° 41' 32"	006° 21' 23"
	RD NEU	634407 M	218947 M

2.3 Ausführung der Bohrung

Die Erdgasbohrungen werden mit einer selbsthebenden Bohrplattform gebohrt. Diese Plattform wird vorübergehend an der Plattformposition platziert. Das Bohren erfolgt kontinuierlich (24 Stunden am Tag, 7 Tage die Woche). Insgesamt ist auf der N05-A-Plattform Platz für zwölf Bohrungen und 12 Side-Tracks zur Erschließung des Feldes N05-A und angrenzender Schürfstellen.

Tiefbohrungen im niederländischen Sektor der Nordsee werden fast immer mit einer selbstfahrenden Bohranlage durchgeführt, siehe Abbildung 2-2. Eine typische Bohrinself besteht aus einem Bohrturm, mit dem die Bohrung durchgeführt wird, und verschiedenen Hilfseinrichtungen. Die Bohrplattform wird von Schleppern mit angehobenen Beinen zum Standort der Plattform transportiert. Dort wird die Bohranlage durch Absenken der Beine auf dem Meeresboden installiert. Die Beine der Plattform drücken sich dann fest in den Meeresboden. Wenn die Bohrplattform stabil ist, wird sie auf etwa dreißig Meter über dem Wasserspiegel aufgebockt. Anschließend wird der Bohrturm über der genauen Stelle der zu bohrenden Grube ausgefahren.

Bevor mit der eigentlichen Bohrung der Grube begonnen werden kann, muss am Standort der Grube eine Leitung installiert werden. Es handelt sich um ein schweres Metallrohr mit einem Durchmesser von etwa achtzig Zentimetern. Dieses Rohr bildet die Verbindung zwischen dem Plattformboden und dem Bohrloch. Die Bohrung wird innerhalb des Leiters durchgeführt. Der Leiter sorgt auch für die Stabilität des flachen Bohrlochs und verhindert das Eindringen von Grund- und Meerwasser. Das Bohren erfolgt mit einem Bohrer, der das Gestein im Untergrund zu einem feinen Pulver zermahlt. Der Meißel ist an der Unterseite einer Reihe von rotierenden Bohrgestängen befestigt. Die Antriebseinheit für diese Rohre befindet sich im Bohrturm auf der Plattform. Mit dem Fortschreiten der Bohrung werden neue Segmente in die Reihe der Bohrgestänge im Bohrturm eingefügt.



Abbildung 2- 45: Selbsthebende Bohranlage am Standort der Plattform N07-04A (2018). Die Bohranlage befindet sich auf der rechten Seite der Plattform. (© Foto & Video Honey)

Beim Bohren wird eine Bohrspülung verwendet. Diese Flüssigkeit wird verwendet, um zerkleinertes Gestein aus dem Bohrloch (das "Bohrklein") an die Oberfläche zu befördern. Gleichzeitig schmiert und kühlt die Flüssigkeit die Bohrkronen und stabilisiert das Bohrloch.

Auf der Bohrplattform wird das Bohrklein aus der Bohrspülung ausgesiebt. Der Bohrspülung wird dann mehrmals wiederverwendet. WBM kann (unter bestimmten Bedingungen) von der Plattform in die Nordsee abgelassen werden. Ölhaltiges verbrauchtes OBM darf nicht auf See entsorgt werden und wird daher als Abfall per Schiff zum Festland transportiert.

Nach der Fertigstellung des Bohrlochs wird der Bohrturm zum nächsten Bohrlochstandort verschoben, wonach ein neues Bohrloch gebohrt wird. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass die zwölf Bohrungen und die zwölf Side-Tracks seriell gebohrt werden und dass die Bohrung jeder Bohrung etwa drei Monate dauert.

Eine weitere mögliche Methode ist das Batch-Bohren: Die Bohrungen werden nicht nacheinander durchgeführt, sondern es werden jeweils die entsprechenden Abschnitte der verschiedenen Bohrungen durchgeführt. Also zuerst Abschnitt 1 von Grube 1, dann Abschnitt 1 von Grube 2, Abschnitt 1 von Grube 3, dann Abschnitt 2 von Grube 1, dann Abschnitt 2 von Grube 2, und so weiter. Der Vorteil des Batch-Bohrens ist, dass die Spülung des betreffenden Abschnitts teilweise wiederverwendet werden kann und nicht abgeleitet werden muss. Der Nachteil ist, dass die eigentliche Förderung von Erdgas erst später beginnen kann, da alle Bohrungen nahezu gleichzeitig fertiggestellt werden. Eine Abschätzung des Einflusses der Anwendung von Batch-Bohrungen anstelle von Serienbohrungen auf die Ergebnisse dieser Studie wird in Kapitel 6.4 diskutiert.

2.4 Bestimmen von Quelltermen

Eine Grube wird in fünf Bohrab schnitten gebohrt. Im Durchschnitt hat eine Grube eine Tiefe von ca. 5,5 km. Diese Studie geht davon aus, dass die ersten vier Abschnitte mit WBM und der letzte mit OBM gebohrt werden. Die Bohrspülung aus den mit WBM gebohrten Abschnitten wird von der Plattform aus auf See abgelassen. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der Abfluss in einer Tiefe von etwa zehn Metern unter dem mittleren Wasserspiegel erfolgt. Die Bohrspülung des letzten Abschnitts (mit OBM) wird nicht abgelassen, sondern per Schiff transportiert und an Land aufbereitet.

Beim Bohren werden drei Arten von Material ins Meer eingeleitet:

1 Bohrklein

2 Bohrspülung:

2.1 Baryt und Bentonit (Tonlösung)

2.2 In der Bohrspülung gelöste Stoffe

Die Quellterme des Baryts, Bentonits und der in der Bohrspülung gelösten Stoffe wurden auf der Grundlage der gelieferten Informationen anhand einer Explorationsbohrung (N05-01) ermittelt. Der Quellterm gibt an, wie viel Material pro Zeiteinheit für die Bohrung einer Grube ausgetragen wird, wobei eine Serienbohrung der Grube angenommen wird. Dieser Quellterm ist unabhängig von dem Zeitraum des Jahres, in dem der Prozess erfolgt. Der Quellterm wird im numerischen Modell hinzugefügt. Die Mengen der Bohrspülung sind für eine durchschnittliche Bohrung mit einer Länge von fünfeinhalb Kilometern berechnet. In der Realität variiert die Menge der Bohrspülung pro Grube und kann je nach Länge der Grube höher oder niedriger sein.

Die mittleren Korngrößen der Bohrspülung betragen 0,015 mm und 0,030 mm für Baryt bzw. Bentonit.

Eine Schätzung der Dauer des Bohrens und Entleerens pro Abschnitt wird von ONE-Dyas bereitgestellt, siehe Abbildung 2-3. Zwischen den fünf Entladeperioden der verschiedenen Abschnitte gibt es Pausen. Die Gesamtdauer der ersten vier Entladeperioden mit den vier Zwischenperioden umfasst 30,5 Tage, also einen Monat. Für die Federmodellberechnungen ist dies der wichtigste Monat, da in diesem Monat die Entladungen von WBM stattfinden. Vor der Bohrung des Abschnitts 1 und nach dem Intervall 4 werden insgesamt ca. zwei Monate benötigt, um u. a. die Bohrung vorzubereiten, vor der Bohrung des Abschnitts 5 die Bohrung fertigzustellen, Perforationen vorzunehmen und die Bohrung zu testen.

Tijdschatting lozing	
	Dagen
36" sectie lozing WBM	1
Tussenperiode 1	2.5
24" sectie lozing WBM	1.5
Tussenperiode 2	5
16" sectie lozing WBM	4.5
Tussenperiode 3	4
12 1/4" sectie lozing WBM	8
Tussenperiode 4	4
8 1/2" sectie geen lozing OBM	6

Abbildung 2- 67: Beispiel für eine mögliche Dauer der verschiedenen Bohr- und Zwischenperioden, einschließlich der Perioden mit Entladung von WBM (gelb schattiert)

Der Quellterm pro Abschnitt wird auf Basis der von ONE-Dyas gelieferten Menge an ausgetragenen Material in Tonnen und der Austragsdauer pro Abschnitt ermittelt, siehe Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5. Die Quellterme für Abschnitt 5 wurden nicht ermittelt, da dieser Abschnitt mit OBM gebohrt wird und das Bohrgut an Land abgeleitet wird.

Component	Gemodelleerde lozing per sectie				
	1	2	3	4	5
Modder/vloeistof naam	Pre-Hydrated Bentonite WBM (PHB)	PHB en KCl Polymer WBM	KCl Polymer WBM	Salt Saturated WBM	Low Toxicity OBM
Baryet (ton)	50	100	145	470	-
Bentoniet (ton)	40	70	25		-

Abbildung 2- 89: Bestimmung der Quellterme von Baryt und Bentonit in der Bohrspülung.

In der Bohrspülung befinden sich insgesamt 14 verschiedene gelöste Stoffe. Die Menge jeder gelösten Substanz variiert pro Abschnitt, wie in Abbildung 2-5 sehen ist. Für Abschnitt 5 wurden keine Quellterme berechnet, da die Bohrspülung für Abschnitt 5 nicht eingeleitet und nicht modelliert wird.

Toegevoegde stoffen	Gemodelleerde lozing per sectie				
	1	2	3	4	5
Vloeistofverliesverlager (ton)				2.8	-
Verzadigd monocarbonzuur, calciumzout (ton)	0.5	2	2	2.5	-
Calcium hydroxide (ton)			2	0.75	-
Magnesium oxide (ton)				2.5	-
Potassium chloride (ton)	160	110	110		-
Natriumcarbonaat (ton)	1.1	1.1	0.5	0.7	-
Sodium chloride (ton)				220	-
Natrium carboxymethylcellulose (ton)		7.5	6	7.5	-
Saccharose (ton)	0.2	0.1	0.1	0.1	-

Niet-PLONOR chemicalien	Gemodelleerde lozing per sectie				
	1	2	3	4	5
Corrosieremmer (ton)				1.8	-
Antischuim (ton)		0.15	0.15		-
Stof 1: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α-butyl-ω-hydroxy (ton)		32	20		-
Potassium hydroxide (ton)				0.3	-
Stof 2: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α-butyl-ω-hydroxy (ton)				8	-

Abbildung 2- 1011: Quellterme der gelösten Stoffe in der Bohrspülung.

2.5 Naturschutzgebiete in der Umgebung von N05-A

Der Austritt von Bohrspülung kann zu erhöhten Konzentrationen von Sedimenten in der Wassersäule und zu zusätzlicher Sedimentation in der Nähe der Plattform führen. Sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland finden sich hier mehrere Naturschutzgebiete, darunter auch Natura 2000-Gebiete. Dies betrifft die folgenden Bereiche (siehe Abbildung 1-1):

- Küstengebiet der Nordsee
- Borkum Riffgrund
- Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer
- Austernbank-Restaurierungsprojekt

Das Natura 2000-Gebiet der Nordseeküstenzone umfasst die Küstengewässer der Nordsee. Das Gebiet beginnt an der nordholländischen Küste nördlich von Bergen und setzt sich entlang der gesamten Wattenmeerküste bis zur Ems fort. Die Strände und Vorgebirge der Nordseeküste sind eine wichtige Sandquelle für die Inseln. Die Küstenzone der Nordsee, die Inseln und das Wattenmeer unterliegen vielen Wechselwirkungen von Sedimentations- und Erosionsprozessen mit Dünen, Rinnen, Salzwiesen, Wattflächen und Untiefen.

Das Natura 2000-Gebiet Borkum-Riffgrund liegt im Norden der ostfriesischen Watteninseln Borkum und Juist. Das Gebiet grenzt an die Wirtschaftszone (AWZ) der Niederlande und im Süden an die deutsche 12-Meilen-Zone. Das Gebiet zeichnet sich durch die Vielfalt des Meeresbodens aus, der hauptsächlich aus grobem Sand, Kies und Steinen und in einigen Bereichen aus Torf besteht. Die Strömungen in der südöstlichen Nordsee werden durch die Gezeiten- und Windeinflüsse verursacht, die manchmal sehr stark sein können und daher einen großen Einfluss auf die Morphologie haben.

Das Niedersächsische Wattenmeer und angrenzende Küstenmeer besteht aus dem westlichen Teil des deutschen Wattenmeeres. Im Gegensatz zur Situation in den Niederlanden wird nicht zwischen dem Gebiet nördlich der Watteninseln und dem Gebiet südlich davon unterschieden. Im Natura 2000-Gebiet Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer, vor der Mündung der Ems in die offene Nordsee, liegt das rund zehntausend Hektar große Naturschutzgebiet Borkum Riff. Die ständige Vermischung von Ems- und Nordseewasser in diesem Teil des Meeres führt zur Bildung von lokalen Temperatur- und Salzgradienten, was eine erhöhte Planktonproduktion zur Folge hat. Dies lockt unzählige Fische und damit auch Seevögel an.

Das niederländische ökologisch wertvolle Gebiet Borkumse Stenen liegt nördlich von Schiermonnikoog. Auf der Südseite grenzt das Borkumse Stenen an das niederländische Natura 2000-Gebiet Nordseeküste und auf der Ostseite an das deutsche Natura 2000-Gebiet Borkum-Riffgrund. Auf einem Teil des Meeresbodens liegen Kies und Steine, und Teile des Meeresbodens bestehen aus sandigen Canyons, was eine hohe Artenvielfalt gewährleistet. Ein Teil der Borkumse Stenen, auf denen auch die Plattform platziert werden soll, liegt innerhalb der ausgewiesenen Zone für die Sandgewinnung.

Im Bereich der Borkumse Stenen startete 2018 ein Naturschutzprojekt zur Wiederherstellung der flachen Austernriffe (*Ostrea edulis*) in der Nordsee. Auf einem Hektar wurden künstliche Riffe auf den Boden gelegt, sechstausend Kilo Austern im Wasser verteilt und leere Muschelschalen als Siedlungsplatz für Austernlarven deponiert. Flache Austernriffe waren im 19. Jahrhundert in der Nordsee reichlich vorhanden, aber Überfischung und Krankheiten haben dazu geführt, dass diese praktisch verschwunden sind. Die Riffe bildeten einen wichtigen Lebensraum für andere Tierarten und dienten als Kinderstube für Fische und Hummer.

Eine detaillierte Beschreibung der Naturgebiete finden Sie in der Naturprüfung (Anhang M9 in Teil 2: Umweltauswirkungen).

3 Historische Daten

3.1 Einführung

Dieses Kapitel beschreibt die historischen Daten zu Strömungen, Wellen und Wind in der Nordsee. Auf der Grundlage einer Analyse dieser Daten wurden drei Szenarien ausgewählt (drei Zeiträume von 2 bis 3 Monaten im Jahr 2015), die eine Bandbreite der möglichen Ausbreitung der Bohrspülung und der gelösten Stoffe ergeben.

3.2 Durchflussbedingungen

Es gibt zwei Hauptmechanismen, die die Strömung in der Nordsee antreiben: die Gezeiten und der Wind.

Der Unterschied im Wasserstand zwischen Ebbe und Flut beträgt etwa drei Meter. Dieser Unterschied im Wasserstand in Raum und Zeit erzeugt Gezeitenströmungen. Der Gezeitenstrom dreht sich alle sechs Stunden, von Ebbe zu Flut und umgekehrt. Die Flut fließt nach Osten, und die Ebbe fließt nach Westen. Infolge der großräumigen Strömungszirkulation in der Nordsee ist der Gezeitenstrom nach Osten etwas stärker als der Ebbstrom nach Westen.

Die Gezeiten in der Nordsee werden von den Gezeiten im Atlantik abgeleitet, da die Nordsee zu klein ist, um ihre eigenen Gezeiten zu erzeugen. Gezeitenwellen gelangen über den Ärmelkanal und den Eingang zwischen Schottland und Norwegen in die Nordsee. Diese Gezeitenwellen bewegen sich aufgrund des Coriolis-Effekts gegen den Uhrzeigersinn. Die Abbildung 3-1 zeigt den großräumigen Verlauf der Flutwelle entlang der niederländischen Küste. Die Flutwelle und damit die großräumige Strömung verläuft vom Süden der Niederlande, entlang der niederländischen Küste nach Norden in Richtung Dänemark. Nördlich der Watteninseln ist die Gezeitenströmung von Südwesten nach Nordosten gerichtet.

Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 zeigen ein typisches Strömungsmuster zu den Zeitpunkten drei Stunden vor Hochwasser und drei Stunden nach Hochwasser. Nördlich von Schiermonnikoog fließt die Strömung mit 0-1,0 m/s bei steigender Flut hauptsächlich von Ost nach Nordost. Um die Watteninseln herum und südlich von ihnen herrscht eine starke Strömung von 2-3 m/s, die nach Süden in Richtung Wattenmeer und Emsmündung führt. Bei ablaufender Flut geht die Strömung in die entgegengesetzte Richtung.

Neben der gezeitenbedingten Strömung gibt es auch eine windbedingte Strömung. Der Wind in der Nähe der Wasseroberfläche erzeugt eine Strömung in Windrichtung. Dies gilt insbesondere für den oberen Teil der Wassersäule. Die jährlichen Durchflussmengen am Standort der Bohrplattform sind in Abbildung 3-4. Dies zeigt die starke Ost-West-Gezeitenströmung. Die Tagesspitzen der Gezeitenströmung liegen bei etwa 0,5 m/s in der Mitte der Wassersäule.

Die maximale 1/Jahr-Fließgeschwindigkeit, ermittelt auf der Grundlage von Modellierungen [3] und durch eine Kombination von Gezeiten und Wind verursacht wird, liegt in der Größenordnung von max. 1 m/s nahe der Wasseroberfläche, max. 0,9 m/s in der Mitte der Wassersäule und max. 0,74 m/s in der Nähe des Meeresbodens.



Abbildung 3- 1213: Verlauf der Flutwelle durch die Nordsee (Quelle: Ecomare)

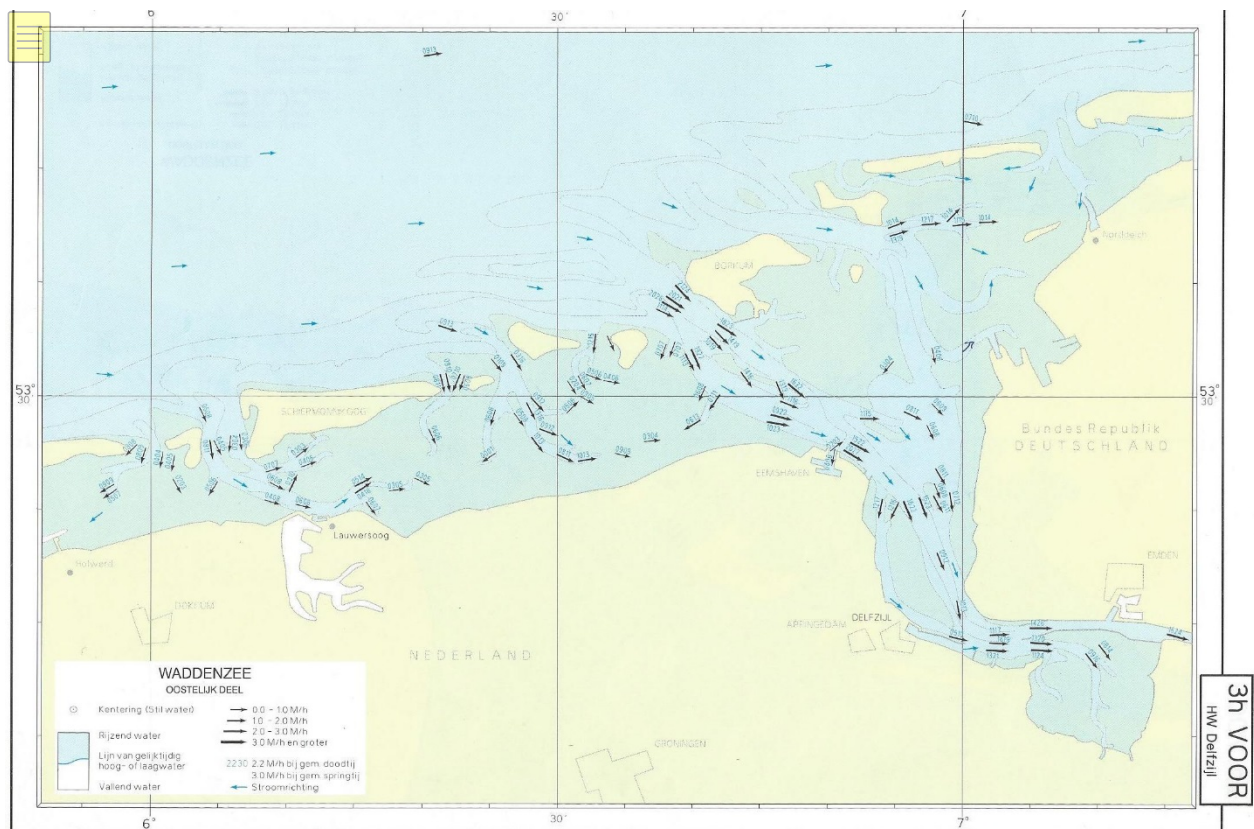


Abbildung 3- 1415: Typisches Strömungsbild 3 Stunden vor dem Hochwasserscheitel (Quelle: Flussatlas)

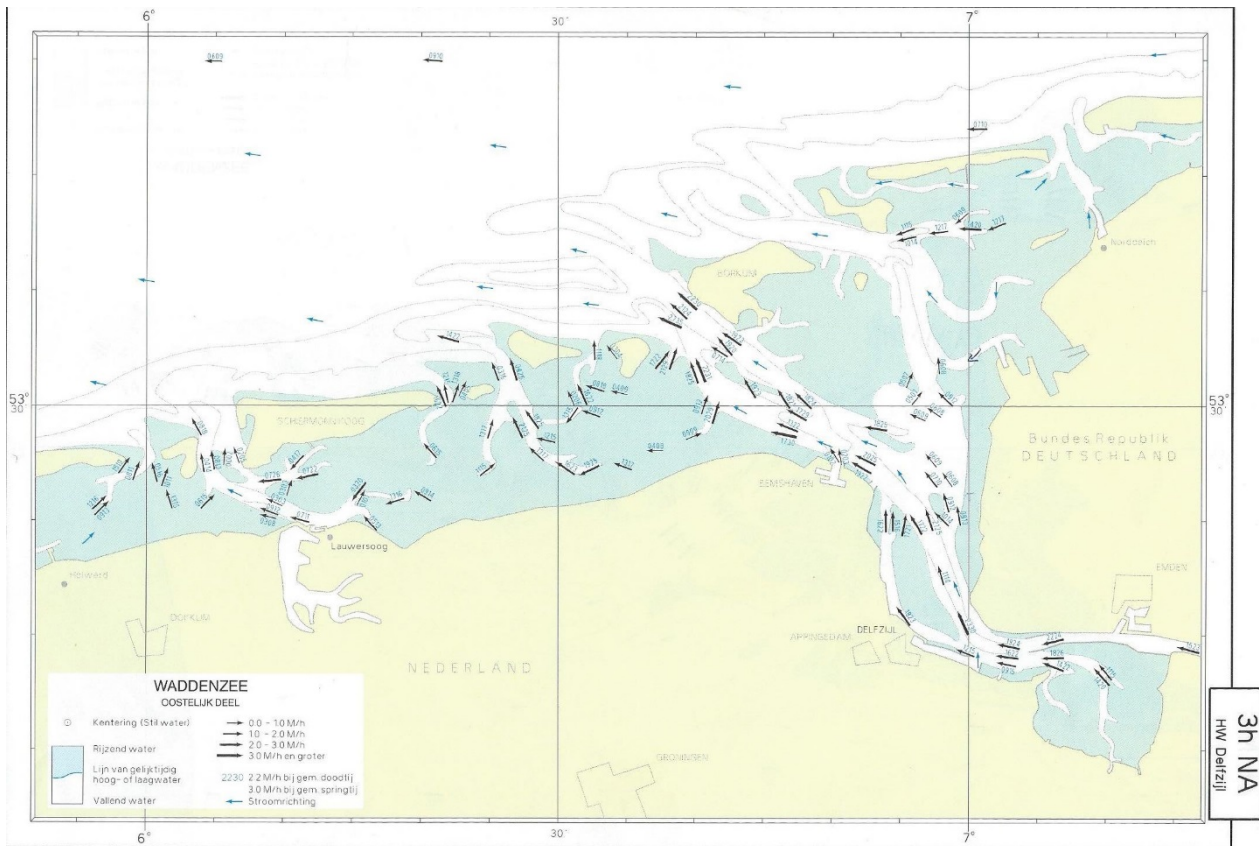


Abbildung 3- 1617: Typisches Strömungsbild 3 Stunden nach dem Hochwasserscheitel (Quelle: Flussatlas)

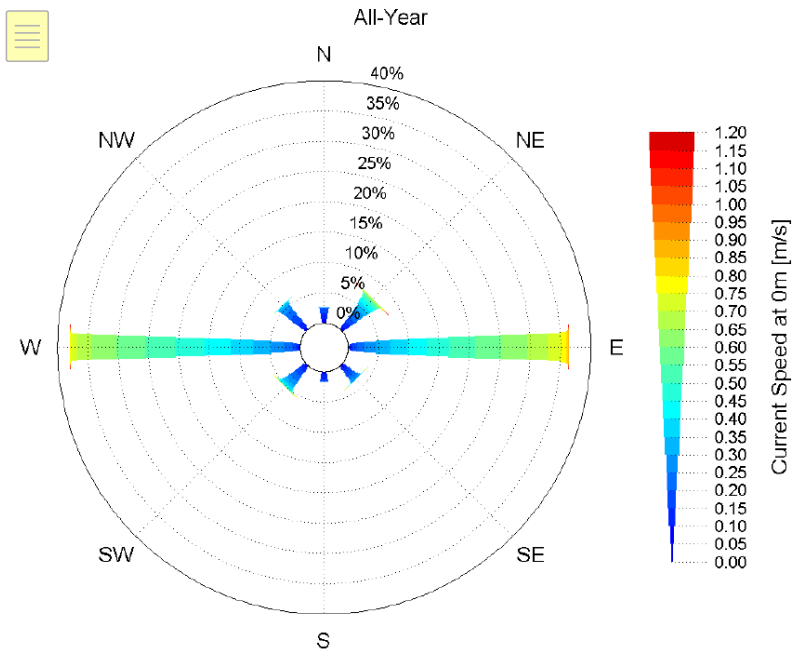


Abbildung 3- 1819: Jährlicher Durchflussanstieg in der Nähe des Plattformstandorts (Quelle: [4])

3.3 Wasserstand

Gezeitenbedingte Wasserstandsschwankungen sind der wichtigste "Motor" für die Strömung um den Standort der Plattform, mit einem Ebbe- und Flut-Zyklus zweimal am Tag. Zu den Schwankungen des Gezeitenwasserspiegels kommt eine Schwankung des Wasserspiegels durch Wind und Stürme hinzu. Ein Sturm geht oft mit einem Tiefdruckgebiet und einem vorübergehenden, lokalen Anstieg des Wasserspiegels einher. Der Wind kann den Wasserstand je nach Windrichtung entweder anheben oder absenken.

Die Wasserstandsschwankung für das Jahr 2015 in der Nähe des Plattformstandorts ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Hierfür wurden Messdaten der nordöstlich von Schiermonnikoog gelegenen Messplattform Huibertgat verwendet. Diese Abbildung zeigt, dass es während eines Tages zwei Fluten und zwei Ebben gibt. Alle vierzehn Tage gibt es eine Springflut (Sonne, Mond und Erde befinden sich auf einer Linie und die Gezeitenkräfte von Sonne und Mond verstärken sich gegenseitig): die Gezeitenstärke ist am größten. Zwischen zwei Perioden der Springflut liegt die Nippflut (die Gezeitenkräfte von Sonne und Mond stehen senkrecht) und die Gezeitenstärke ist minimal.

Die höchsten Wasserstände treten im Herbst und Winter auf, mit Wasserstandsspitzen von etwa 2,50 m+NAP.

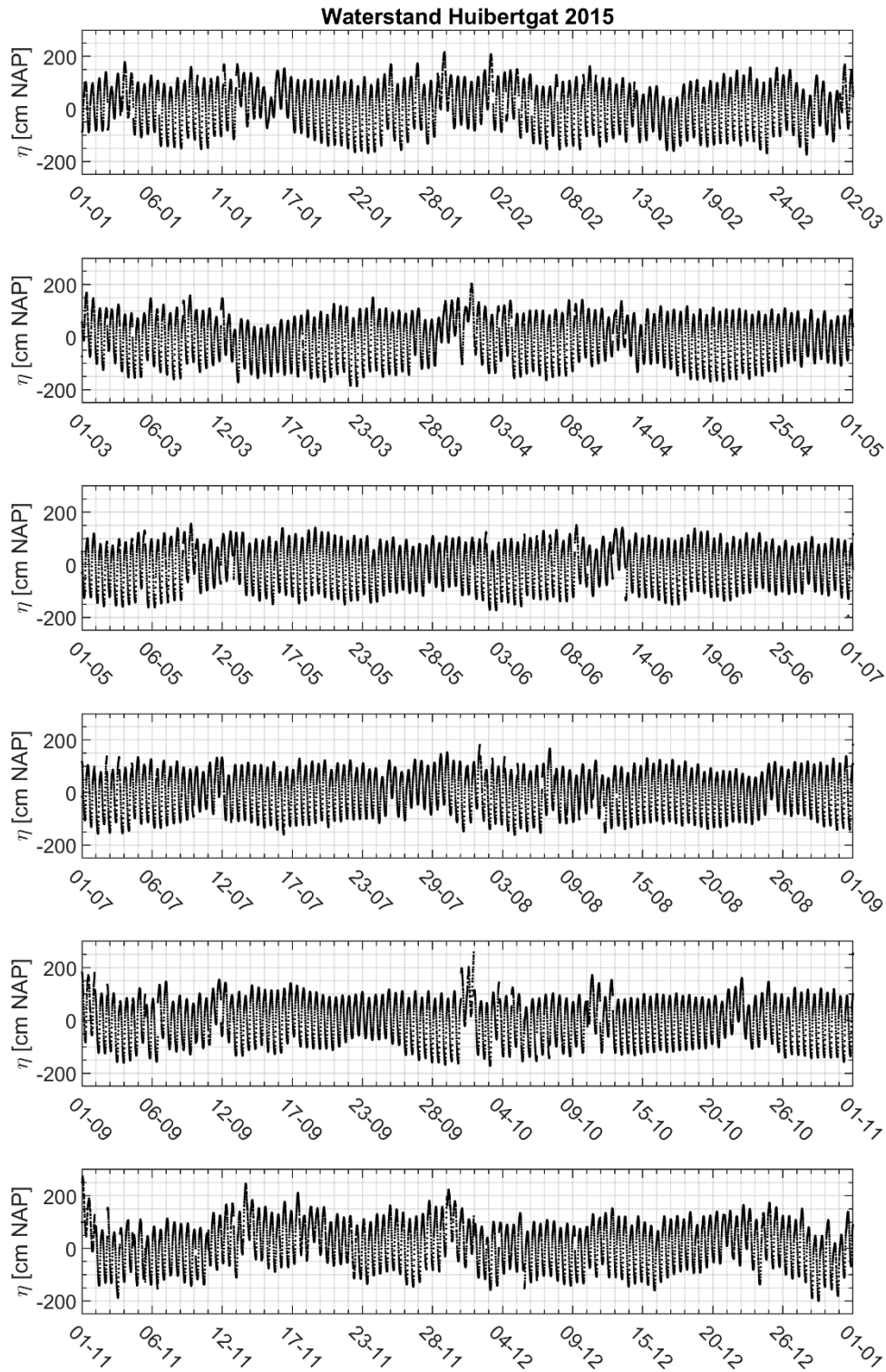


Abbildung 3- 20: Wasserstand am Huibertgat für das Jahr 2015

Basierend auf den Messdaten der Messtation Huibertgat zwischen 2000 und 2019 wurden die astronomischen Wasserstände ermittelt, siehe Tabelle 3-1.

Tabelle 3- 34: Astronomische Wasserstände am Huibertgat

	HÖHE [M MSL]
HAT (HÖCHSTE ASTRONOMISCHE FLUT)	3,15
MHWS (MITTLERE HOCHWASSERFLUT)	1,34
MHHW (MITTLERES HOHES HOCHWASSER)	1,09
MHW (MITTLERES HOCHWASSER)	0,88
MHWN (MITTLERES HOCHWASSERNIPPFLUT)	0,82
MSL (MITTELBEREICH = NAP)	0,00
MLWN (MITTLERE NIEDRIGWASSERNIPPFLUT)	-0,74
MLW (MITTLERES NIEDRIGWASSER)	-0,91
MLLW (MITTLERES NIEDRIGES NIEDRIGWASSER)	-1,12
MLWS (MITTLERE NIEDRIGWASSERFLUT)	-1,39
LAT (NIEDRIGSTE ASTRONOMISCHE FLUT)	-2,63

3.4 Wind

In Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 sind die Windstatistiken für den Zeitraum 2000-2019 an der Messtation Huibertgat [5] anhand von Windrosen (Abbildung 3-6) und monatlichen Statistiken (Abbildung 3-7) dargestellt. Die vorherrschende Windrichtung ist das ganze Jahr über aus Südwest, aber das variiert in den verschiedenen Jahreszeiten. Die meisten Windgeschwindigkeiten über 15 m/s kommen aus dem Süden, Südwesten oder Südosten.

Basierend auf einer Extremwertanalyse der Winddaten für die Jahre 2000-2019 wurde die einjährig höchste Windgeschwindigkeit ermittelt: Diese beträgt 21,26 m/s. Das bedeutet, dass diese Windgeschwindigkeit im Durchschnitt einmal pro Jahr überschritten wird. Diese Windgeschwindigkeit ist vergleichbar mit der 1/Jahres-Windgeschwindigkeit von 22,0 m/s, die in [6] und die 1/Jahres-Windgeschwindigkeit, die in [4].

Die Abbildung 3-7 zeigt die durchschnittlichen und maximalen Windbedingungen pro Monat. Sie zeigt, dass die höchsten Windgeschwindigkeiten im Herbst und Winter auftreten.

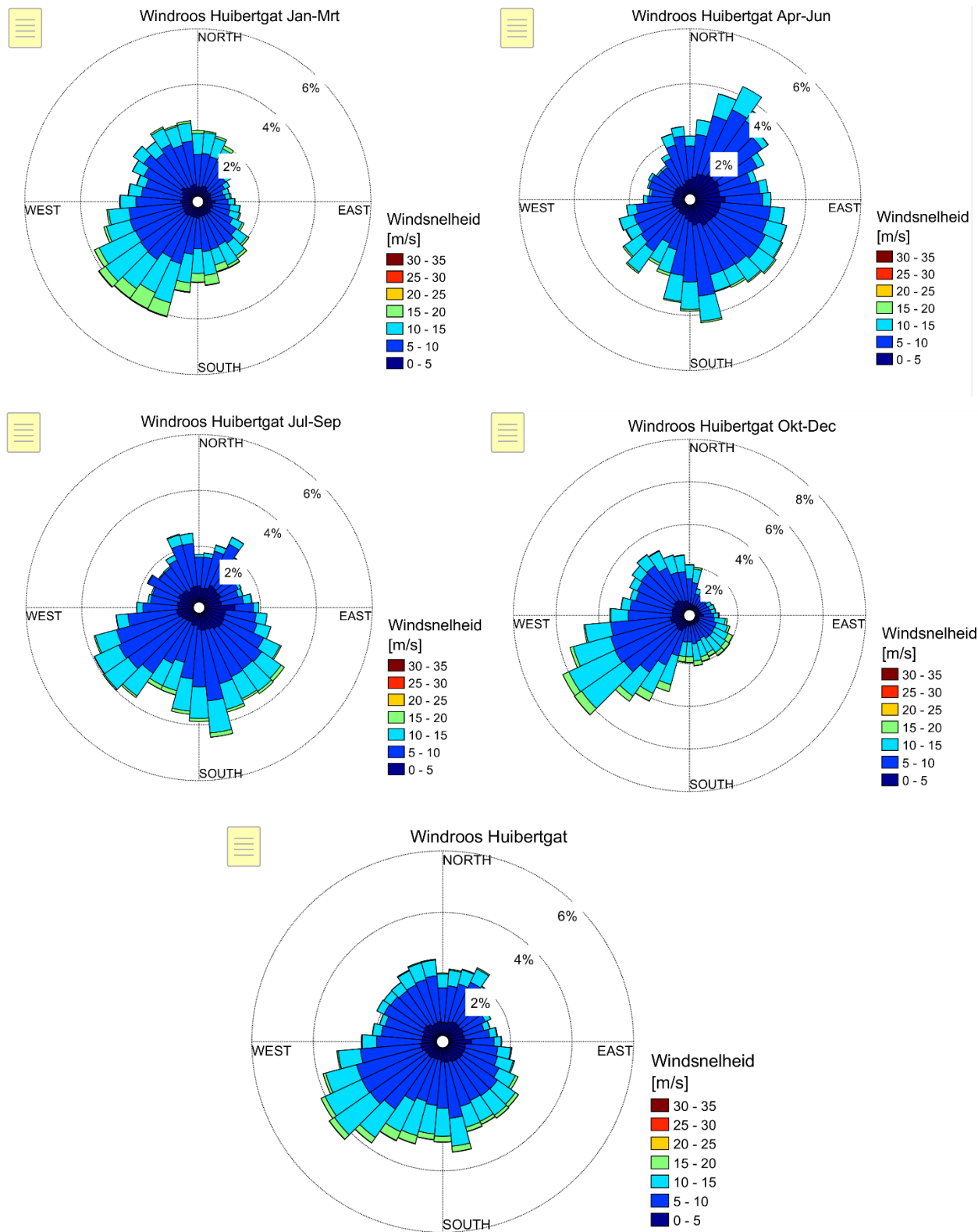


Abbildung 3- 21: Windrosen am Huibertgat für die vier Jahreszeiten und das ganze Jahr (für die Jahre 2000 - 2019). Die Richtung gibt an, woher der Wind kommt.

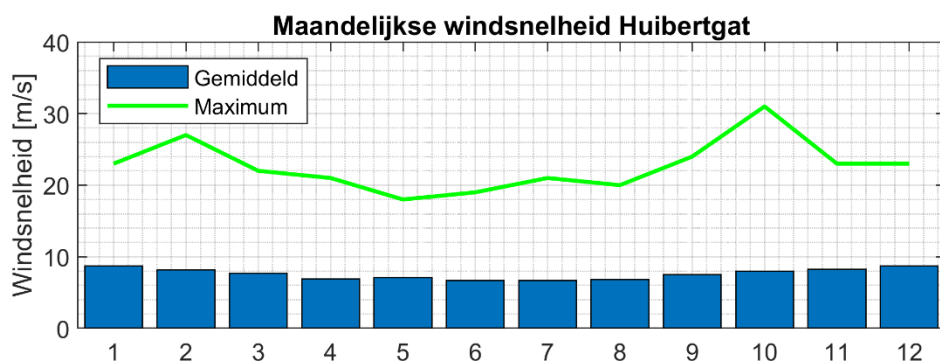


Abbildung 3- 2223: Variation der mittleren und maximalen monatlichen Windgeschwindigkeit am Huibertgat für die Jahre 2000 - 2019

Die Windgeschwindigkeit am Huibertgat [5] im Jahr 2015 ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Für die ersten 2,5 Monate des Jahres 2015 sind für diese Wetterstation keine Daten verfügbar. Daher werden diese Monate nicht in den Modellszenarien verwendet. Dies ist jedoch kein Problem, da statistisch (für Daten zwischen 2000 und 2019) mindestens gleich hohe Windgeschwindigkeiten im Herbst auftreten, siehe auch Abbildung 3-7. Das sehen wir auch hier: Im November und Dezember 2015 waren die Windgeschwindigkeiten ebenfalls relativ hoch.

Die typische Windgeschwindigkeit im Rest des Jahres 2015 liegt unter 10 m/s, mit einigen Spitzenwerten zwischen 15 und 20 m/s. Dies stimmt auch mit den Mehrjahresdaten überein, siehe Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7. Im März kam es zu einem starken Sturm mit einer Windgeschwindigkeit von ca. 23 m/s. Dies macht ihn zu einem etwas schwereren Sturm als den 1/Jahr-Sturm.

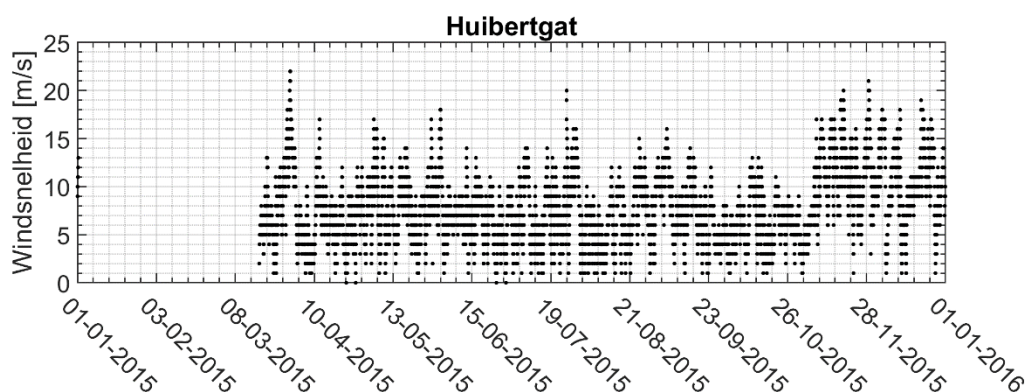


Abbildung 3- 24: Windgeschwindigkeit für das Jahr 2015 am Huibertgat

3.5 Wellenbedingungen

Die Wellendaten wurden aus einer Datenbank einer Metocean-Studie vor der Küste Hollands abgerufen [7] am Standort der Bohrplattform. Eine Zeitreihe der Wellenbedingungen ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Die signifikante Wellenhöhe und die Wellenrichtung werden angezeigt. Die signifikante Wellenhöhe ist die durchschnittliche Höhe der höchsten 33 % der gemessenen Wellen und stellt somit eine statistische Annäherung dar. Die Abbildung zeigt deutlich, dass die höchsten Wellen während der Herbst- und Winterperiode auftreten.

Basierend auf einer Extremwertanalyse für den Zeitraum 1979 - 2019 wurde die 1/Jahr auftretende Wellenhöhe ermittelt. Das sind 5,93 m. Diese Wellenhöhe wird im Jahr 2015 mehrfach überschritten. Die

Höhepunkte, die die 1-Jahres-Wellenhöhe überschreiten, fallen mit hohen Windgeschwindigkeitsspitzen zusammen, darunter der Höhepunkt im März und die Höhepunkte im November/Dezember. Unter [4] wird eine 1/Jahr signifikante Wellenhöhe in der Nähe der Plattform von 6,5 m dargestellt, die in der gleichen Größenordnung liegt wie die oben genannte Wellenhöhe.

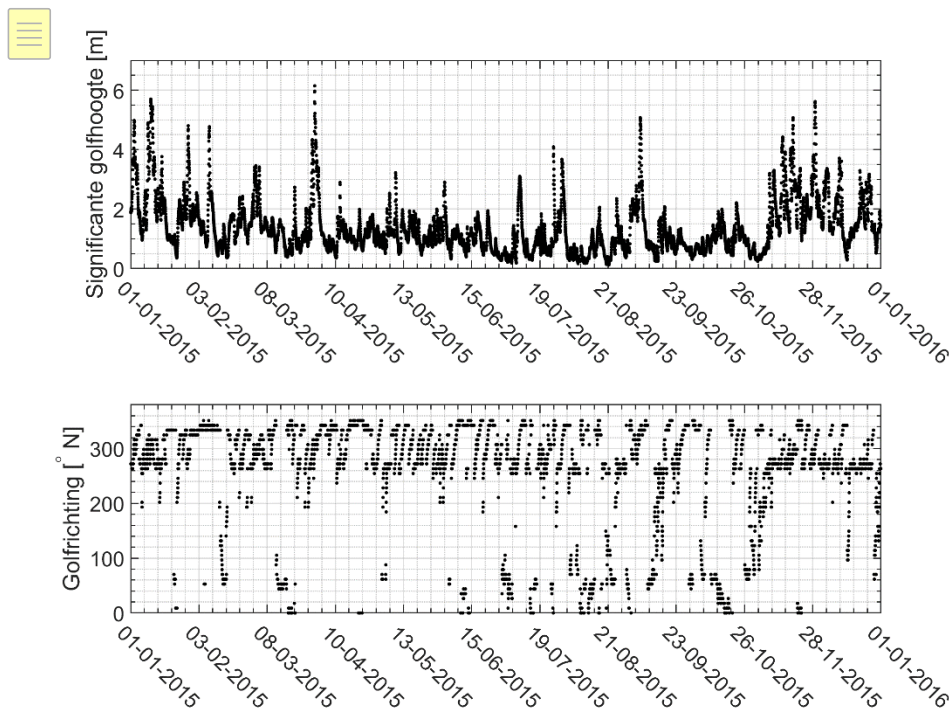


Abbildung 3- 2526: Signifikante Wellenhöhe und Richtung für das Jahr 2015

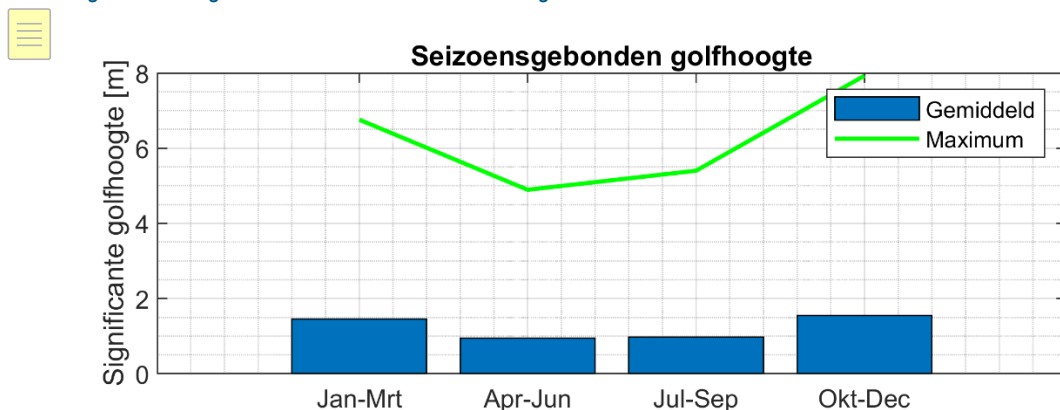


Abbildung 3- 27: Variation der minimalen, durchschnittlichen und maximalen signifikanten Wellenhöhen nach Jahreszeit über den Zeitraum 2000 - 2018

3.6 Sediment auf dem Meeresboden

Das Forschungsbüro GEOxyz [8] beschreibt die Eigenschaften des Meeresbodens und der Oberflächensedimente in der Nähe der Plattform: Der Meeresboden in der Nähe der Plattform besteht aus feinem Sand mit Muschelresten. Dieser Sand hat Korndurchmesser in der Größenordnung von 200-500 μm (0,2-0,5 mm). Außerdem sind Tonfragmente zu finden, die bis zu 50 cm über den restlichen Meeresboden herausragen. Das lokale Vorhandensein von grobem Sand und Kies führt auch zu Schwankungen der Meeresbodenhöhe in der weiten Umgebung der Plattform. Ansonsten ist der

Meeresboden in der Nähe des Plattformstandorts fast flach und weist keine offensichtlichen Wellen- und Strömungsrücken, Dünen oder größere Kuheln auf.

Das Fehlen offensichtlicher Wellen- und Strömungskämme auf dem sandigen Meeresboden ist ein Hinweis darauf, dass relativ wenig Sedimenttransport stattfindet und der lokale Meeresboden daher nicht sehr dynamisch ist. Sandkörner von 200 µm beginnen sich bei Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,2 m/s zu bewegen. Da in der Mitte der Wassersäule bereits unter Tagesbedingungen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu ca. 0,5 m/s auftreten, ist es wahrscheinlich, dass das natürliche Sediment in der Nähe der Plattform zumindest während eines Teils des Ebbe-Flut-Zyklus in Bewegung ist. Bei der Gezeitenwende sinkt dieses Sediment zurück auf den Meeresboden und verbleibt dort für mehrere Stunden, bis die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Meeresbodens wieder über ca. 0,2 m/s liegt. Der feinere Teil des natürlichen Sediments am Meeresboden ist mobiler als der gröbere Teil des Sediments und wird daher häufiger und über größere Entfernungen transportiert.

3.7 Natürliche Bohrspülungskonzentration

Die natürliche Konzentration von Schlick an der Wasseroberfläche in der Küstenzone ist in Abbildung 3-11 dargestellt. Sie zeigt einen starken Gradienten der Schlickkonzentration entlang der Küste, mit Schlickkonzentrationen von 5-30 mg/l innerhalb einer Entfernung von fünfzig Kilometern von den Watteninseln. Die Schlickkonzentration am Standort der Plattform beträgt im Jahresmittel etwa 10-20 mg/l in der Nähe der Wasseroberfläche. Näher am Meeresboden kann die Schlickkonzentration etwas höher sein, aber da der lokale Meeresboden aus sandigem Material besteht, ist es unwahrscheinlich, dass die Schlickkonzentrationen in der Nähe des Meeresbodens viel höher sind.

Diese jährlichen Durchschnittskonzentrationen sagen jedoch nichts über die Schwankungen der Schlickkonzentration im Jahresverlauf aus. In den Wintermonaten sind die durchschnittlichen Schlickkonzentrationen im Allgemeinen höher als im Sommer, mit durchschnittlichen Schlickkonzentrationen an der Plattformstelle von etwa 10 mg/l im Sommer und etwa 20 mg/l im Winter (Abbildung 3-12). Darüber hinaus variieren die Schlickkonzentrationen infolge von Stürmen (Abbildung 3-13). Während und unmittelbar nach einem Sturm sind die Schlickkonzentrationen viel höher (typischerweise etwa 20 mg/l am Standort der Plattform) als nach einer ruhigen Periode (typischerweise etwa 2 mg/l).

Zusätzlich zu diesen jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen ist es wahrscheinlich, dass die Schlickkonzentration auch mit den Gezeiten variiert: Der Ebbstrom bringt schlickreiches Wasser aus dem Wattenmeer und der Emsmündung, während der Flutstrom aus dem Westen relativ schlickarmes Wasser mitbringt.

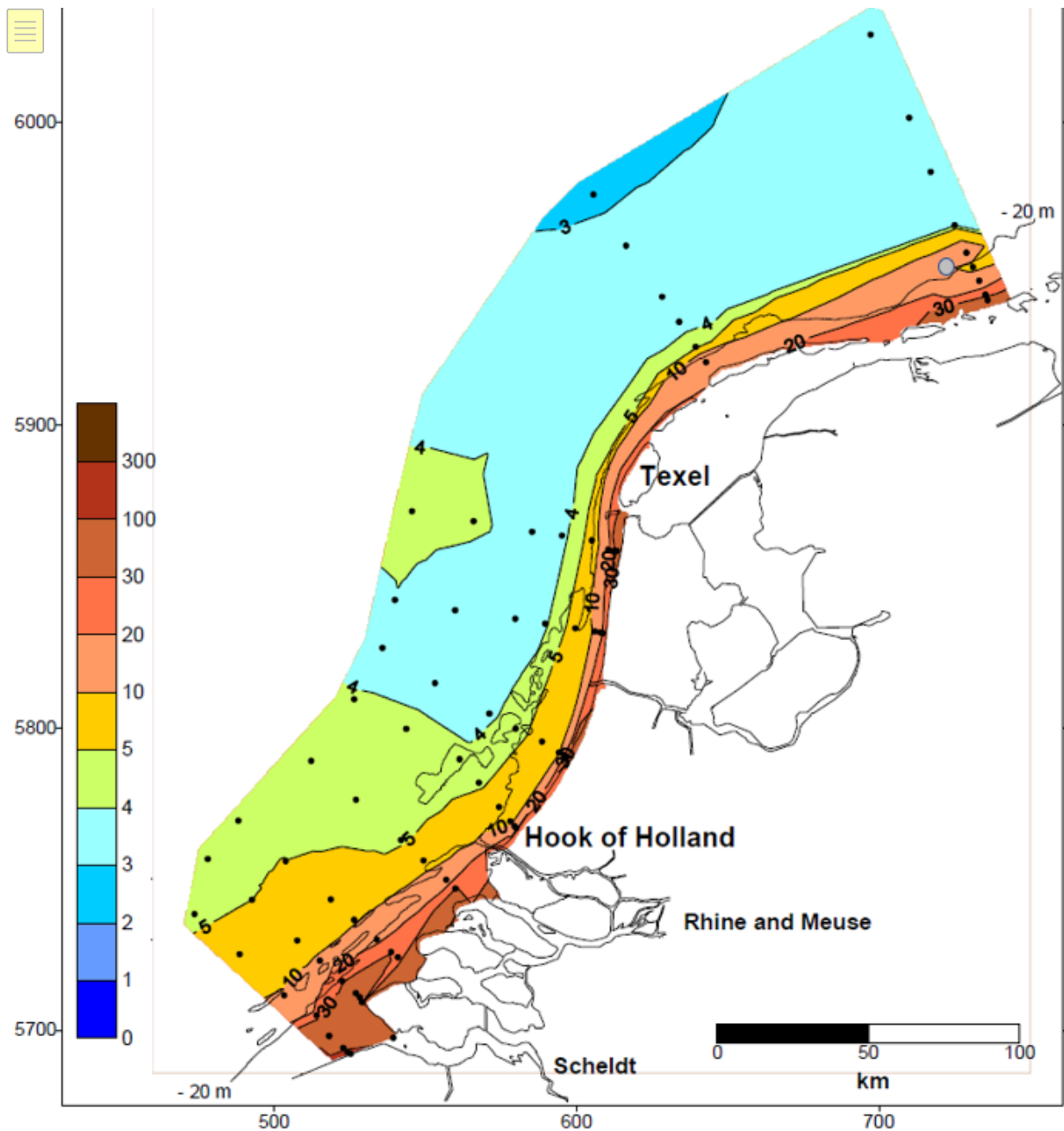


Abbildung 3- 2829: Gemessene Jahresmittelwerte der Schlickkonzentration an der Wasseroberfläche in mg/l [9]. Der Standort der Plattform wird mit einem grauen Punkt dargestellt.

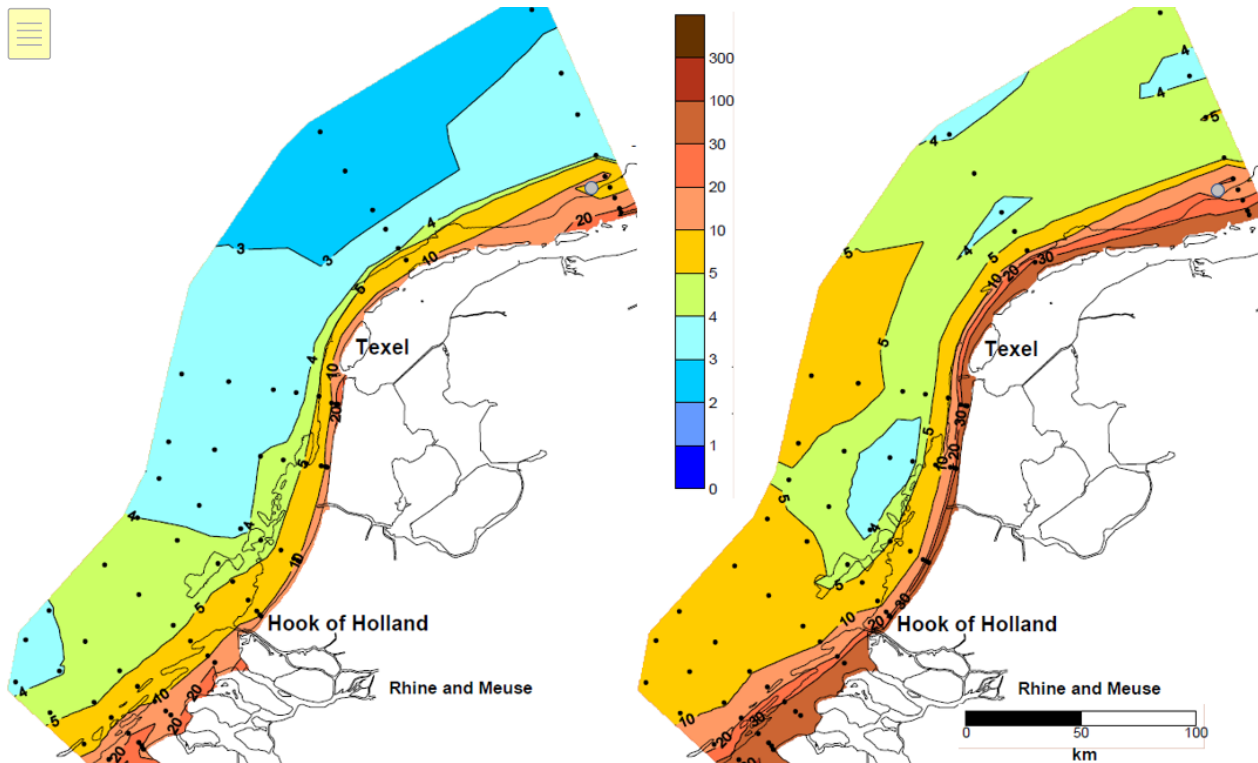


Abbildung 3- 3031: Durchschnittlich gemessene Schlickkonzentration an der Wasseroberfläche im Sommer (links) und Winter (rechts) in mg/l [10]. Der Standort der Plattform wird mit einem grauen Punkt angezeigt.

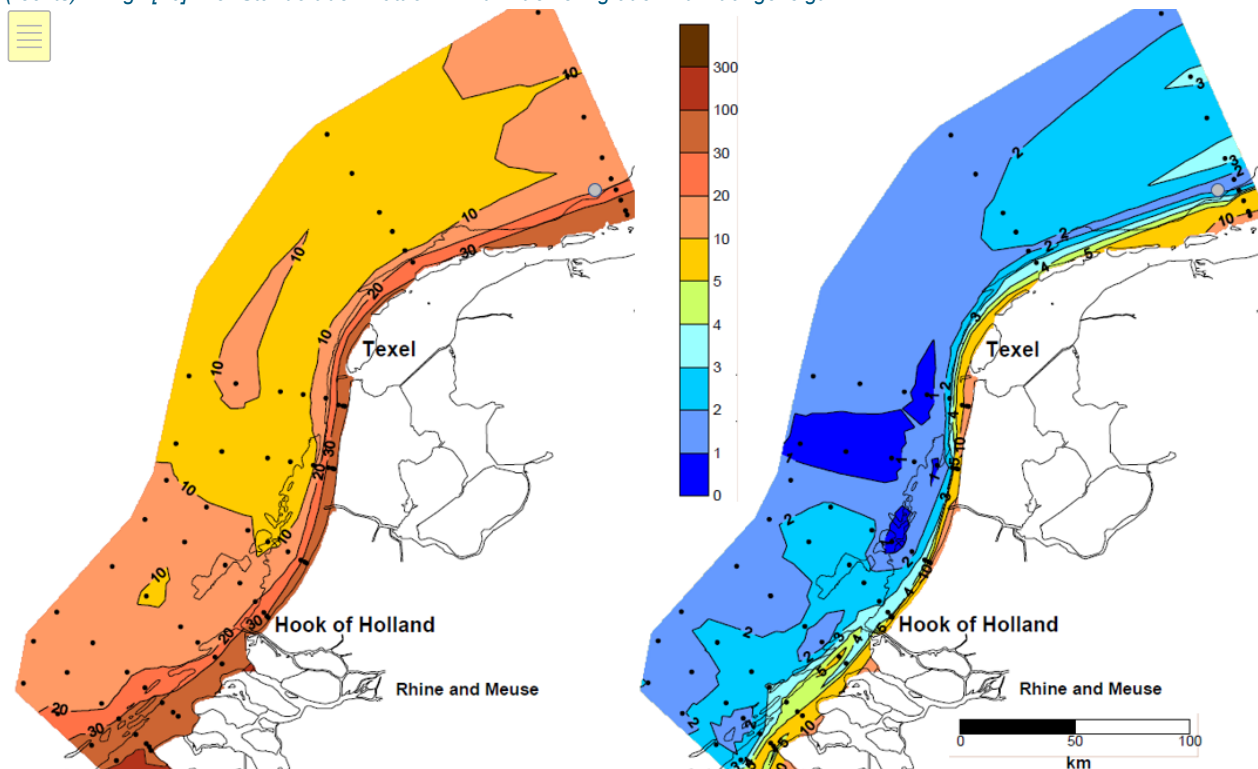


Abbildung 3- 3233: Typisch gemessene Schlickkonzentration an der Wasseroberfläche nach stürmischem Wetter (links) und während einer ruhigen Periode (rechts) in mg/l [10]. Der Standort der Plattform wird mit einem grauen Punkt angezeigt.

3.8 Auswahl des Szenarios

Die Federmodellierung wird für drei Szenarien durchgeführt, um den Bereich möglicher Konzentrationen und Ablagerungen der Bohrspülung zu bestimmen. Dies liegt daran, dass sich die Bohrspülung und die gelösten Stoffe unter verschiedenen Bedingungen unterschiedlich ausbreiten.

Wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, hängen die Form und die Konzentrationen innerhalb der Feder sowie der Umfang der Sedimentation von den Bedingungen (Wind, Wellen, Strömungen) ab:

- Je stärker die Strömung ist, desto weiter wird das Sediment transportiert und desto größer ist die Feder. Die Konzentrationen innerhalb der Feder sind in diesem Fall geringer. Unter diesen Bedingungen findet relativ wenig Sedimentation statt, Material kann sogar erodieren und suspendiert werden, was zu höheren Konzentrationen führt.
- Bei Windstille bleibt die Feder näher am Standort der Plattform. Das Material kann nun leichter absinken und sedimentieren, es befindet sich eine dickere Sedimentschicht auf dem Boden in der Nähe der Plattformposition.

Diese beiden Extreme können als der Unterschied zwischen einem Pfannkuchen und einem kleinen Stück Torte dargestellt werden.

Um diese Extreme zu bestimmen, wurden drei Szenarien definiert.

Die Szenarien, in denen sich die Wind-, Wellen- und Strömungsbedingungen voneinander unterscheiden, sind in Abbildung 3-14, Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 und wie folgt dargestellt:

- **März-Szenario:** eine Periode mit einem schweren Sturm. Die Entladung findet während des Sturms statt.

Der Entladungszeitraum ist von Mitte März bis Mitte April, und die Modellberechnung läuft zwei Monate lang bis Mitte Juni. Die Besonderheit dieses Szenarios besteht darin, dass am 31. März ein Sturm auftrat, bei dem sowohl die 1/Jahres-Windbedingung als auch die 1/Jahres-Wellenbedingung erreicht wurden. Während des Sturms kommt der Wind aus dem Westen. Vor und nach dem Sturm ist es relativ ruhig. Während der Sturmperiode wird erwartet, dass die Konzentrationen und die Sedimentation einen "Pfannkuchen" bilden, und während der ruhigen Tage vor und nach dem Sturm wird erwartet, dass die Konzentrationen und die Sedimentation ein „Stück Torte“ bilden.

- **Oktober-Szenario:** eine sehr ruhige Periode, gefolgt von einer Periode mit höheren Wellen. Die Entladung findet während der sehr ruhigen Periode statt.

Der Entladezeitraum ist von Anfang Oktober bis Ende Oktober, und die Modellberechnung läuft dann zwei Monate lang bis Ende Dezember. Charakteristisch für dieses Szenario ist, dass die Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen im Monat Oktober niedrig waren, so dass Konzentrationen und Sedimentation als „Tortenstück“ zu erwarten sind. Der Wind kommt zeitweise aus östlicher Richtung. In den Monaten November und Dezember nehmen die Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen zu, der Wind kommt dann hauptsächlich aus dem Westen.

- **November-Szenario:** eine Periode mit abwechselnd hohen Wellen. Die Entladung findet während einer Periode mit niedrigen bis ziemlich hohen Wellen statt.

Der Entladezeitraum ist von Anfang November bis Ende November, und die Modellberechnung läuft einen weiteren Monat bis Ende Dezember. Charakteristisch für dieses Szenario ist, dass im November mehrere Spitzen in der Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit auftreten, wobei der Wind hauptsächlich aus Südwest kommt. Infolgedessen wird erwartet, dass die Konzentrationen und die Sedimentation einen "Pfannkuchen" bilden, insbesondere in Richtung Nordosten.

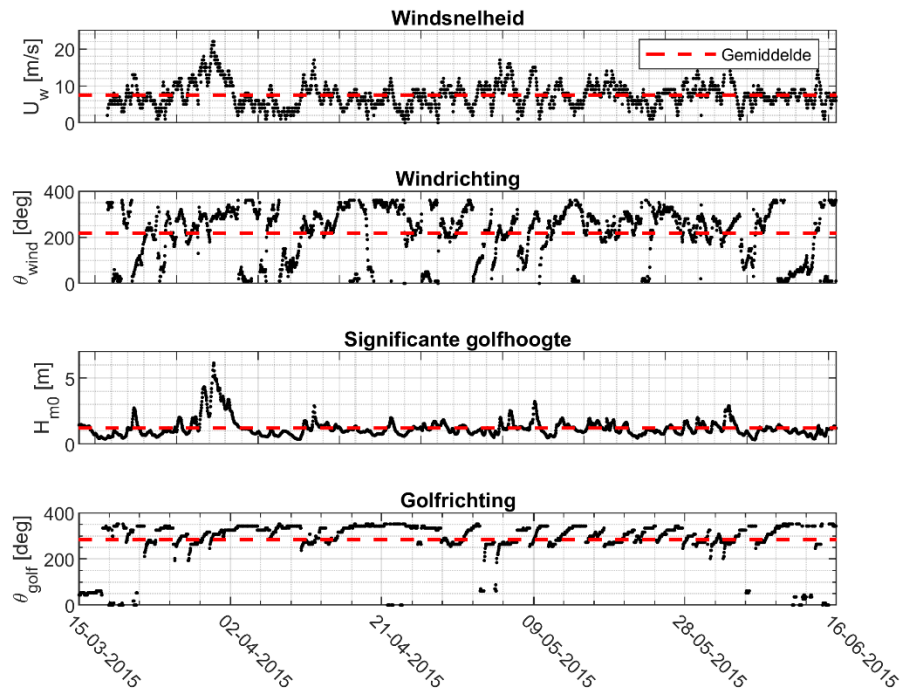


Abbildung 3- 3435: Bedingungen für März-Szenario. Der Durchschnittswert wird zu Informationszwecken angezeigt. Die Wind- und Wellenrichtung gibt an, woher sie kommt.

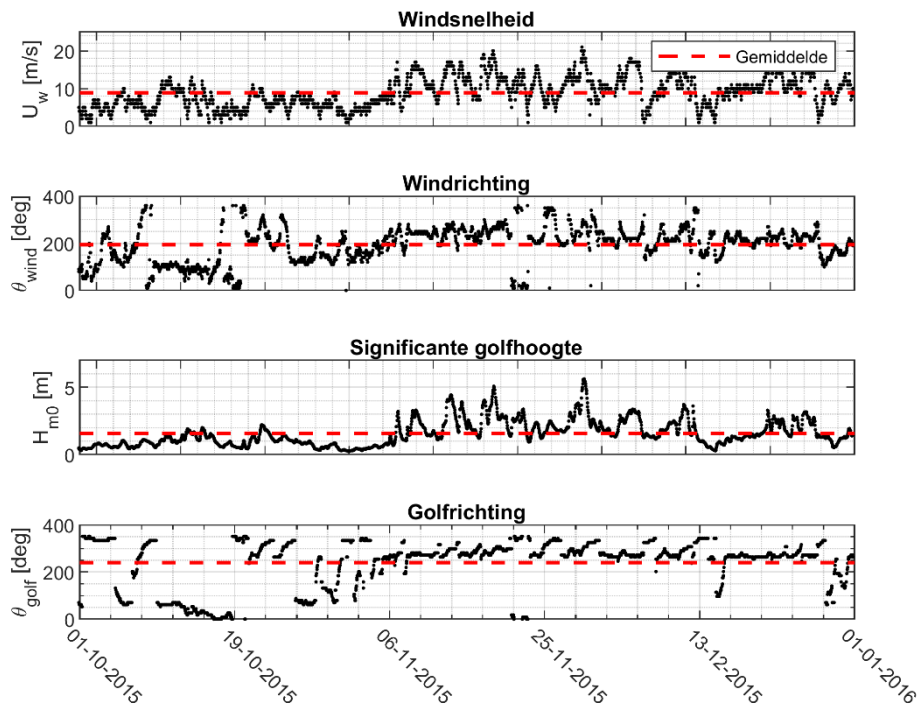


Abbildung 3- 36: Bedingungen für das Oktober-Szenario. Die Durchschnittswerte werden zu Informationszwecken angezeigt. Die Wind- und Wellenrichtung gibt an, woher sie kommt.

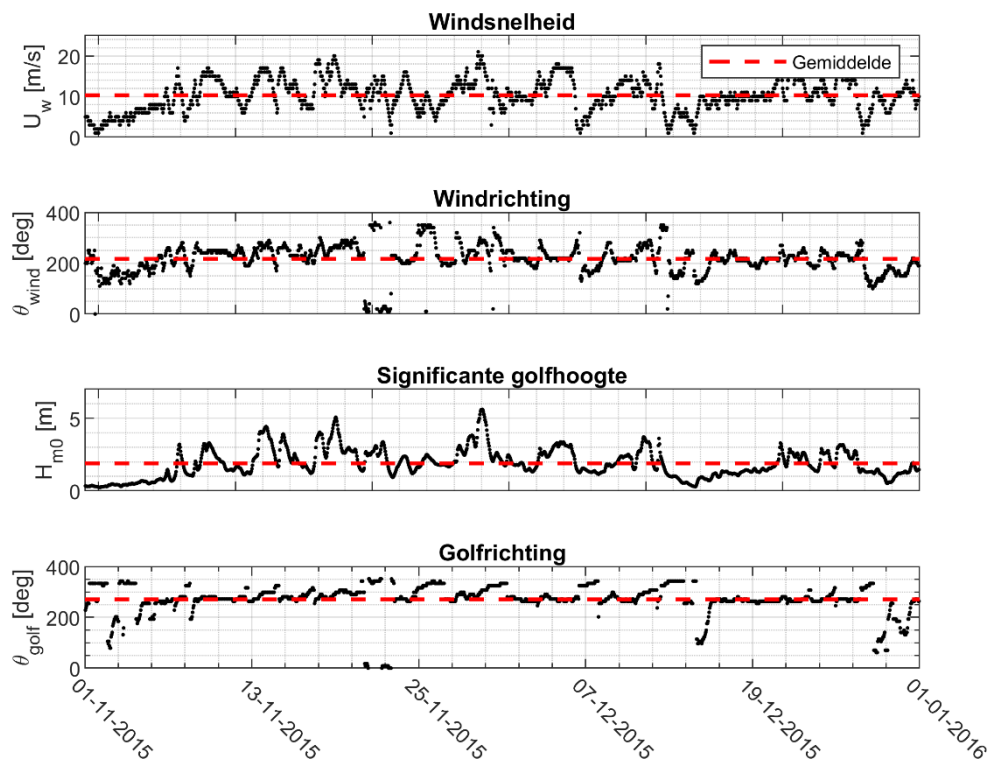


Abbildung 3- 3738: Bedingungen für November-Szenario. Die Durchschnittswerte werden zu Informationszwecken angezeigt. Die Wind- und Wellenrichtung gibt an, woher sie kommt.

4 Entwurf und Validierung des numerischen Modells

4.1 Einführung

In diesem Kapitel wird der Aufbau des numerischen Modells besprochen. In dieser Studie wird ein bestehendes, vollständig kalibriertes und validiertes Delft3D-Modell der Nordsee verwendet und an die spezifischen Anforderungen des Modells angepasst. Das Modell und seine Modifikationen werden hier kurz besprochen, eine ausführlichere Beschreibung finden Sie in Anhang A1.

4.2 Verwendete Software

Für die Federn- und Sedimentationsmodellierung wurde die Modellsoftware Delft3D verwendet. Diese Software wurde von Deltares entwickelt und wird weltweit zur Modellierung von Strömung, Sedimenttransport und Morphologie von Küsten und Flüssen eingesetzt. Delft3D wird auch häufig für Federnstudien verwendet, einschließlich BaggerFedernstudien. Die Modellierungssoftware Delft3D kann verschiedene Arten von Sediment sowie gelöste Substanzen ("Tracer") modellieren. Für diese Studie wurde die Version 4.01.00 verwendet.

4.3 Modellschema

4.3.1 Original ZUNO-Modell

Ein kalibriertes und validiertes Modellschema für die Nordsee ist für Delft3D verfügbar: das Modellschema Südliche Nordsee (ZUNO). Dieses Modell deckt einen großen Teil der Nordsee ab, einschließlich des Wattengebiets. Das ZUNO-Modell ist ein 3-dimensionales Modell mit zwölf Schichten in der Tiefe. Das ZUNO-Modell wird im Koordinatensystem RD New aufgebaut, die vertikale Bezugsebene ist NAP.

Die folgenden Prozesse werden im ZUNO-Modell simuliert:

- Gezeitenstrom
- Durchflussmengen aus Flüssen
- Atmosphärischer Druck
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Wolkendecke
- Dichtestrom durch variierenden Salzgehalt und Temperatur

Als Grundlage für die Modellschematisierung in dieser Studie wurde das bestehende ZUNO-Modell, das von Deltares geliefert wurde, verwendet. Dies ist Version 3 des ZUNO-Modells (Delft3D-FLOW_North Sea-ZUNO-DD_j03-j15_v03) mit entsprechenden Randbedingungen für die Jahre 2012-2015.

4.3.2 Anpassungen an das Modell

Anschließend wurde das ZUNO-Modell für diese Studie angepasst. Eine detaillierte Beschreibung der Änderungen und der Validierung der Änderungen finden Sie in Anhang A1. Die wichtigsten Änderungen werden im Folgenden kurz erwähnt.

Eine der Änderungen ist eine Verfeinerung des Rechengitters in der Nähe der Rampenposition, was dazu führt, dass die Rechengitterzellen in der Nähe der Rampenposition eine Länge von etwa 100 m haben.

Zusätzlich wurde die Modellierung von Wellen hinzugefügt, so dass die Auswirkung von Wellen auf die Strömung und die Absenkung von Baryt und Bentonit einbezogen wird. Die Wellen werden gleichzeitig mit der Strömung modelliert (Delft3D-Wave online: eine Kopplung von SWAN mit Delft3D-Flow). Der Aufbau des Wellenmodells und die Ergebnisse verschiedener Empfindlichkeitssimulationen werden in Anhang A1.12 diskutiert.

Es wurden auch zusätzliche Modellausgangspunkte hinzugefügt, u. a. entlang der empfindlichen Wildtierbereiche, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben. Dazu wurde der Punkt im Bereich mit der kürzesten Entfernung zur Plattform N05-A gewählt. Außerdem wurde ein Modellausstiegspunkt in der Nähe des Rottumerplaats hinzugefügt. Die entsprechenden Stellen sind in Tabelle 4-1 und Abbildung 4-1 dargestellt.

Tabelle 4- 56: Standorte der Beobachtungspunkte in empfindlichen Gebieten

STANDORT	X [M]	Y [M]
AUSTERNBANK- RESTAURIERUNGSPROJEKT	218544	635612
KÜSTENGEBIET DER NORDSEE	218833	621022
ROTTUMERPLAAT	225000	619000
BORKUM RIFFGRUND	218280	638061
NIEDERSÄCHSICHES WATTENMEER UND ANGRENZENDES KÜSTENMEER	220839	631705



Abbildung 4- 3940: Standorte der Beobachtungspunkte in der Nähe der empfindlichen Gebiete. Der Standort der Plattform ist durch einen gelben Punkt gekennzeichnet.

Um zu überprüfen, ob das modifizierte Modell wahrheitsgemäße Strömungsergebnisse liefert, wurden die Ergebnisse des modifizierten Modells mit den Ergebnissen des ursprünglichen, kalibrierten und validierten ZUNO-Modells verglichen. Dabei wurde die vom modifizierten Modell vorhergesagte Strömung mit der vom ursprünglichen ZUNO-Modell vorhergesagten Strömung verglichen, so dass die berechnete Strömung um das Projektgebiet in der modifizierten Modellschematisierung der Strömung im ursprünglichen Modell so ähnlich wie möglich ist. Es wird davon ausgegangen, dass das ursprüngliche ZUNO-Modell gut kalibriert und validiert ist. Im Vergleich werden die Ergebnisse des ursprünglichen ZUNO-Modells für das Jahr 2015 mit denen des modifizierten ZUNO-Modells verglichen, bei dem nur Strömung und Wind und damit keine Wellen berücksichtigt werden. Die Wellen wurden separat validiert.

4.3.3 Modellierung von Bohrspülung und gelösten Stoffen

Zusätzlich zu den oben genannten Modifikationen im Modell wurden die Austräge von Baryt, Bentonit und gelösten Stoffen in das Modell aufgenommen. Die Mengen an ausgetretener Bohrspülung und gelösten Stoffen wurden als Quellterme in das Modell am Standort der Plattform N05-A eingefügt. Es wurde angenommen, dass der Abfluss bei zu zehn Fuß unter der mittleren Oberfläche stattfindet.

Zur Modellierung von Baryt und Bentonit wurden zwei getrennte Sedimentfraktionen verwendet: eine für Baryt (Korngröße 0,015 mm) und eine für Bentonit (Korngröße 0,030 mm). Diese Sedimentpartikel werden unter dem Einfluss von Strömungen, Wellen und Turbulenzen vertikal über die Wassersäule und horizontal über die Nordsee verteilt. Die Partikel können sich auch absetzen, sedimentieren und erodieren.

Die gelösten Stoffe wurden als vier Tracer-Fraktionen modelliert: eine Fraktion für jeden Bohrabschnitt mit *WBM*. Der Unterschied zu Baryt und Bentonit ist, dass sich diese Partikel nicht absetzen, sedimentieren oder erodieren. Sie sind jedoch in der Wassersäule verteilt und verteilen sich horizontal über die Nordsee. Die Menge des im Modell ausgetragenen Tracers ist die Summe aller gelösten Stoffe und variiert pro Bohrungsabschnitt.

Ausgehend von den Mengen an gelösten Stoffen in der Bohrspülung, die je nach Bohrabschnitt variieren (siehe Abschnitt 2.4), wurden die modellierten Konzentrationen der vier Fraktionen in der Nordsee nach Durchführung der Modellrechnung in Konzentrationen gelöster Stoffe in der Nordsee umgerechnet. Dies hat den Vorteil, dass nur noch vier statt vierzehn Brüche modelliert werden müssen, was eine deutliche Einsparung an Rechenzeit bedeutet.

Die Abbildung 4-2 zeigt die Zeitreihen der Abflüsse von Baryt, Bentonit und der vier Tracer-Fraktionen, die die gelösten Stoffe darstellen. Während jeder der vier Austragsperioden werden Baryt, Bentonit und eine der Fraktionen ausgetragen. Während der Intervalle und nach den vier Entladeperioden wird nichts entladen.

Bei der Modellierung wurden nur der Baryt, Bentonit und die gelösten Stoffe modelliert. Daher wurden die natürlichen Hintergrundkonzentrationen von Sediment und anderen Substanzen nicht modelliert. Die Ergebnisse zeigen also den hinzugefügten Wert der Lösung von Bohrspülung zu den Hintergrundwerten.

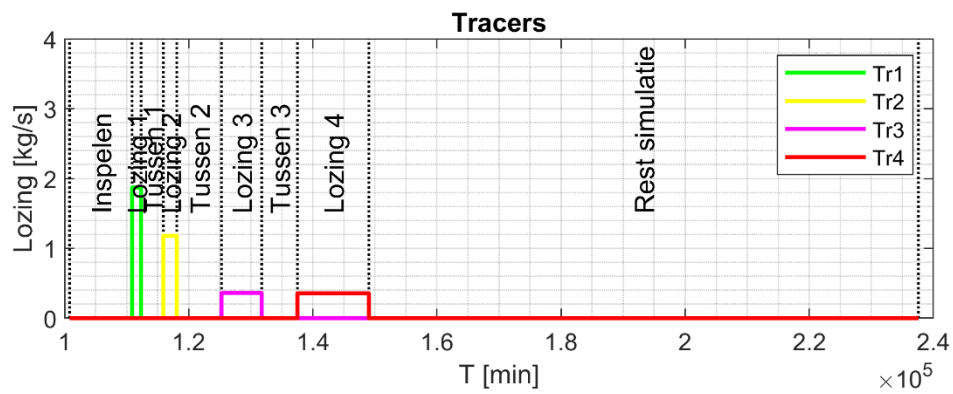
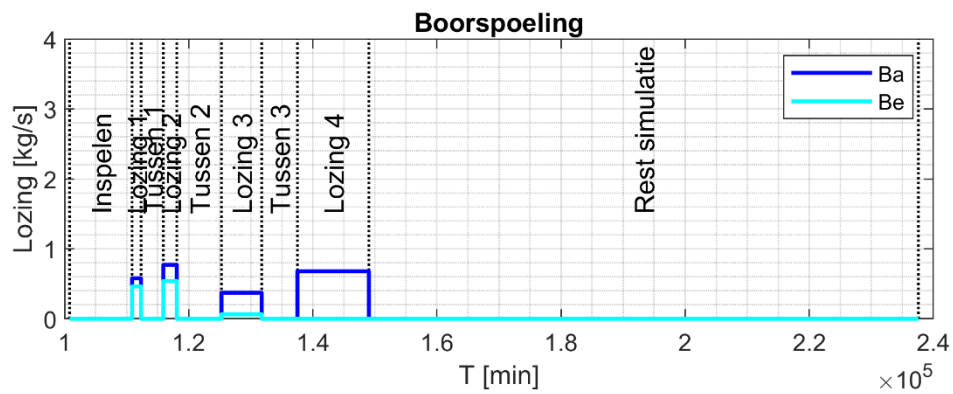


Abbildung 4- 41: Zeitreihen der Quellterme, wie sie im Modell vorgegeben sind.

5 Ausbreitung von Bohrspülung und Tracer um N05-A

5.1 Allgemein

Dieses Kapitel beschreibt die Modellergebnisse für die verschiedenen Szenarien. Die Auswahl der Szenarien wird in Abschnitt 3.8 beschrieben. Der Zweck der Szenarien ist es, einen Bereich der Federausbreitung und Sedimentation zu analysieren, indem verschiedene mögliche Bedingungen wie Wellenhöhen und Windrichtung modelliert werden.

Die drei Szenarien sind (siehe Abschnitt 3.8):

- **März-Szenario:** eine Periode mit einem schweren Sturm. Die Entladung findet während des Sturms statt.
- **Oktober-Szenario:** eine sehr ruhige Periode, gefolgt von einer Periode mit höheren Wellen. Die Entladung findet während der sehr ruhigen Periode statt.
- **November-Szenario:** eine Periode mit abwechselnd hohen Wellen. Die Entladung findet während einer Periode mit niedrigen bis ziemlich hohen Wellen statt.

Für jedes Szenario sind die folgenden Abbildungen mit Ergebnissen enthalten:

- Maximale Konzentration über die gesamte Wassersäule während des Szenarios. Die Konzentrationen von Baryt und Bentonit werden für die Bohrspülung zusammengefasst. Neben der maximalen Konzentration wird auch der maximale Beitrag zur Hintergrundkonzentration des Feinsediments in der Nordsee angezeigt. Es wurde eine Hintergrundkonzentration von 15 mg/l angenommen (siehe Abbildung 3-11).
- Maximale Sedimentationsdicke des Baryts und Bentonits während des Szenarios. Tracer setzen sich nicht ab, daher wird für die Tracer keine Abbildung der Sedimentation gezeigt.
- Zeitreihen der Konzentrationen und Sedimentation an den empfindlichen Standorten und am Plattformstandort. Die Konzentrationen stellen den Maximalwert über die gesamte Wassersäule dar. Baryt und Bentonit werden wieder zusammen genommen.

In Abschnitt 5.2 werden die Ergebnisse des März-Szenarios im Detail diskutiert. Abschnitt 5.3 enthält eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse für die Szenarien Oktober und November, die in Anhang A2 zu finden sind.

5.2 März-Szenario

5.2.1 Baryt und Bentonit in der Bohrspülung

Maximale Konzentration der Bohrspülung während der Simulation

Die maximale Konzentration der Bohrspülung während der gesamten Simulation und über die gesamte Tiefe ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Die Abbildung zeigt die deutsch-niederländische Grenze und die verschiedenen empfindlichen Stellen (weiße Quadrate). Der höchste Maximalwert wird um den Plattformstandort herum gesehen, mit ziemlich symmetrischen Federn in Richtung Osten und Westen des Plattformstandortes. Die Gesamtlänge der Feder mit einer maximalen Konzentration von mehr als 0,5 mg/l beträgt etwa 10 km und die Breite etwa 4 km.

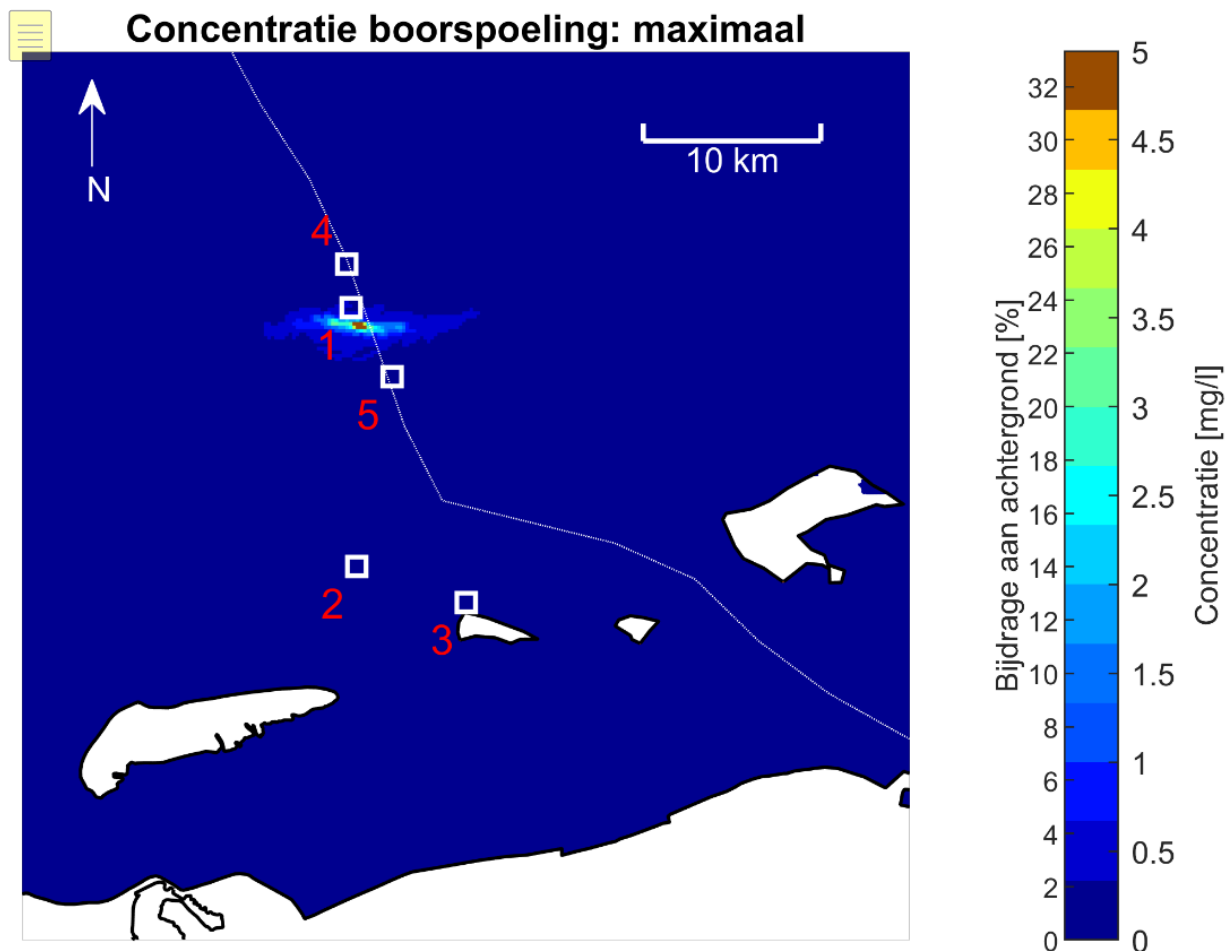


Abbildung 5- 4243: Maximale Konzentration von Bohrspölung und maximaler Beitrag relativ zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l über die gesamte Wassersäule während des März-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Maximale Sedimentation der Bohrspölung während der Simulation

Die Sedimentation infolge des Austritts von Bohrspölung während des März-Szenarios ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Die maximale Sedimentation durch die Bohrspölung, unmittelbar um die Plattform herum, beträgt ca. 0,015 mm und nimmt allmählich in alle Richtungen ab. Wie die maximale Konzentration hat auch die Sedimentation eine Ost-West-Orientierung.

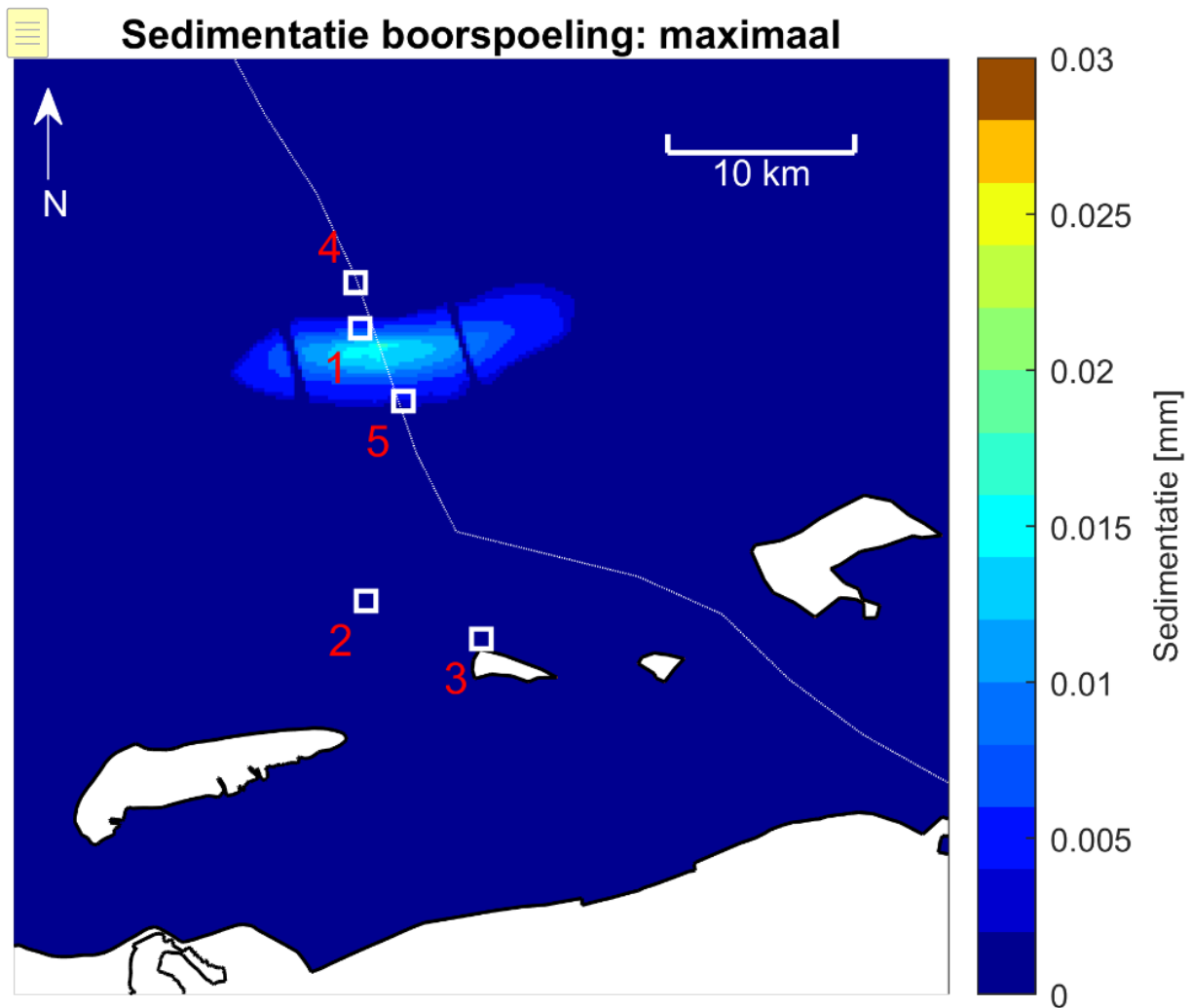


Abbildung 5- 44: Maximale Sedimentation der Bohrspülung während des März-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die Variation der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke durch die Bohrspülung über die Zeit an den folgenden Stellen:

1. Austernbank-Restaurierungsprojekt
2. Küstengebiet der Nordsee
3. Rottumerplaat
4. Borkum Riffgrund
5. Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer

Das Abflussmuster ist deutlich an der Konzentration der Bohrspülung in der Nähe des Austernbank-Restaurationsprojekts zu erkennen, da sich diese Stelle in der Nähe der Plattform befindet. Die Konzentrationen von Bohrspülung in der Küstenzone der Nordsee und im Rottumerplaat sind zu vernachlässigen.

An den Stellen rund um die Plattform zeigt das Sedimentationsmuster der Abbildung 5-4 den Sturm von Ende März (ca. 500 Stunden), zu erkennen an der Abnahme der Sedimentationsdicke, d.h. Erosion von Baryt und Bentonit vom Meeresboden durch die hohen Wellen. Nach dem Sturm nimmt die Sedimentationsdicke wieder zu. Bitte beachten Sie, dass eine Sedimentationsdicke von 0,005 mm fast einem Tonpartikel entspricht, also sehr wenig ist.

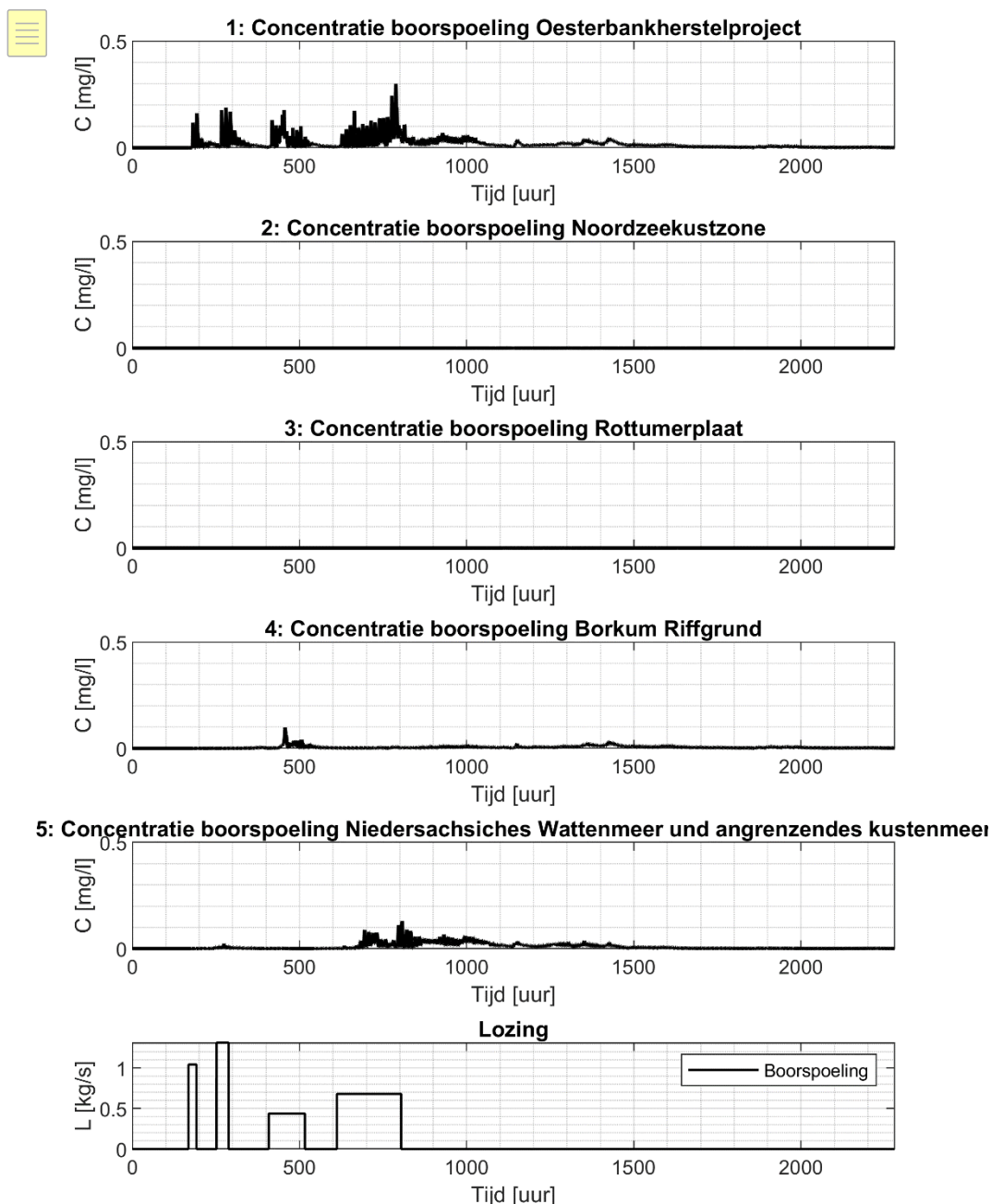


Abbildung 5- 45: Maximale Konzentration der Bohrspülung über der Wassersäule während des März-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Einleitungsterme sind in der unteren Grafik dargestellt

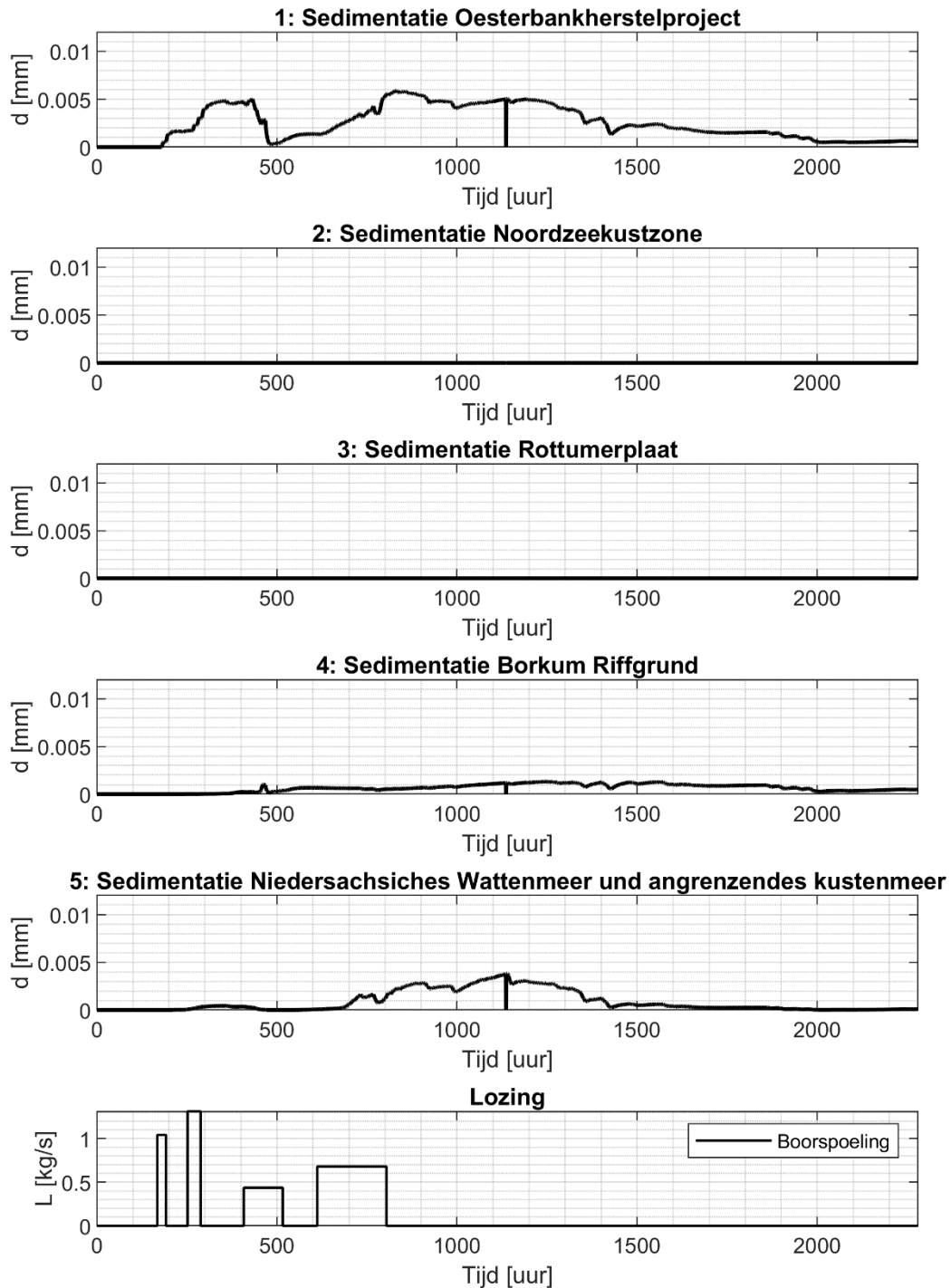


Abbildung 5- 46: Sedimentation während des März-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Einleitungsterme sind in der unteren Grafik dargestellt

Die Abbildung 5-5 zeigt den Verlauf der Konzentration von Bohrspülung und Sedimentation in der Nähe der Plattform. Die Konzentrationen geben die maximale Konzentration über der Wassersäule an. Die Lösung im Laufe der Zeit wurde zur Veranschaulichung hinzugefügt.

In der Nähe der Plattform sind die Konzentrationen von Bohrspülung und Sedimentation als Folge der Bohrspülung höher (ca. 8 mg/l). Das Entladungsmuster ist in der Konzentrationskurve deutlich zu erkennen. Auch hier ist der Sturm Ende März (ca. 500 Stunden) an der Verringerung der Sedimentationsdicke zu erkennen, d.h. an der Erosion der Bohrspülung vom Meeresboden. Die maximale Sedimentation im März-Szenario beträgt ca. 0,015 mm am Standort der Plattform.

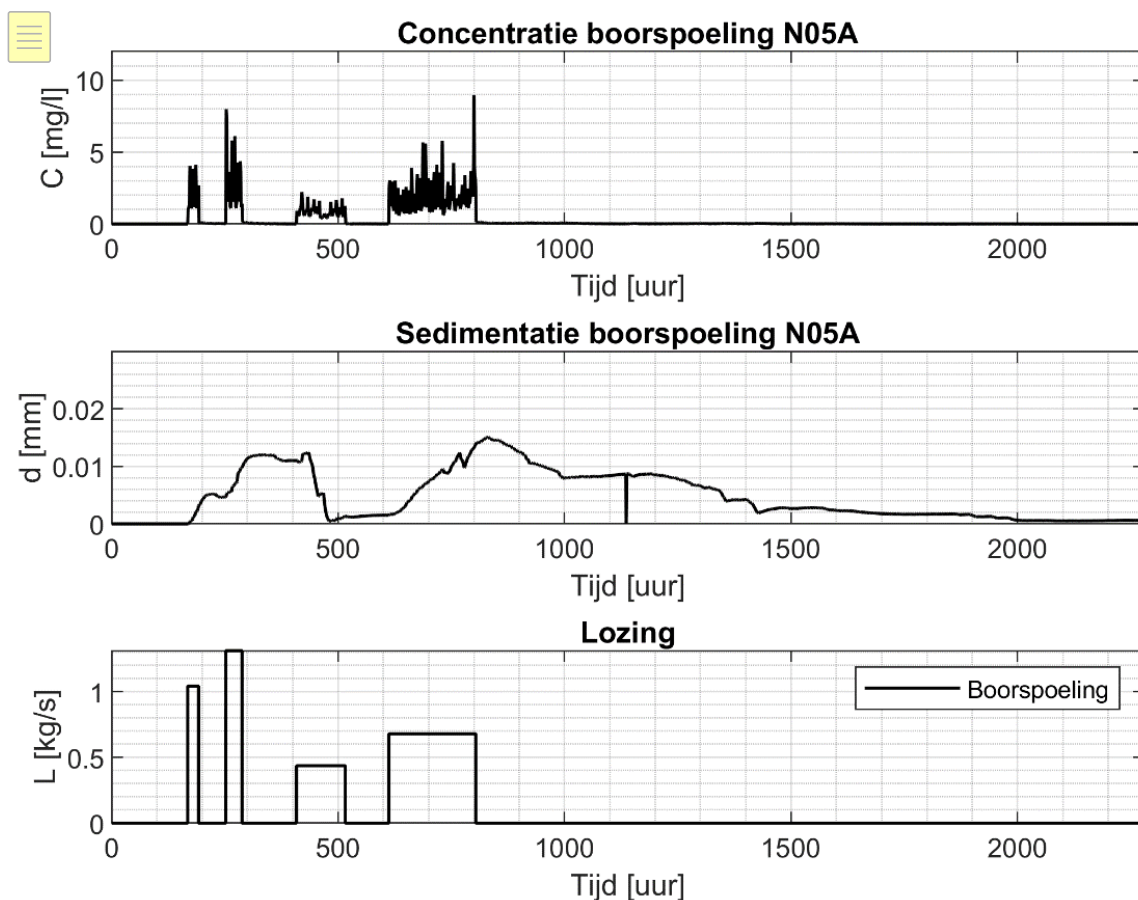


Abbildung 5- 4748: Zeitliche Veränderung der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke am Standort der Plattform N05-A. Die Konzentration gibt die maximale Konzentration über der Wassersäule an.

Die Abbildung 5-6 zeigt die Strömungsverhältnisse und die Wellenhöhe an der Plattform während der Simulation. Zum Zeitpunkt des Sturms (nach etwa 500 Stunden) ist das typische Gezeitenmuster gestört. Dies zeigt sich im Wasserstand, in der Strömungsgeschwindigkeit und in der Richtung. Auch die Bodenschubspannung wird erhöht. Die Abbildung 5-7 zeigt eine Strömungsrose am Standort der Plattform. Diese Rose zeigt die vorherrschenden Strömungsrichtungen an. Es ist klar, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Südwesten kommen. Dies entspricht dem Muster der großräumigen Gezeitenwelle in der Nordsee und erklärt, warum die dominante Richtung der Feder in Richtung Nordosten verläuft.

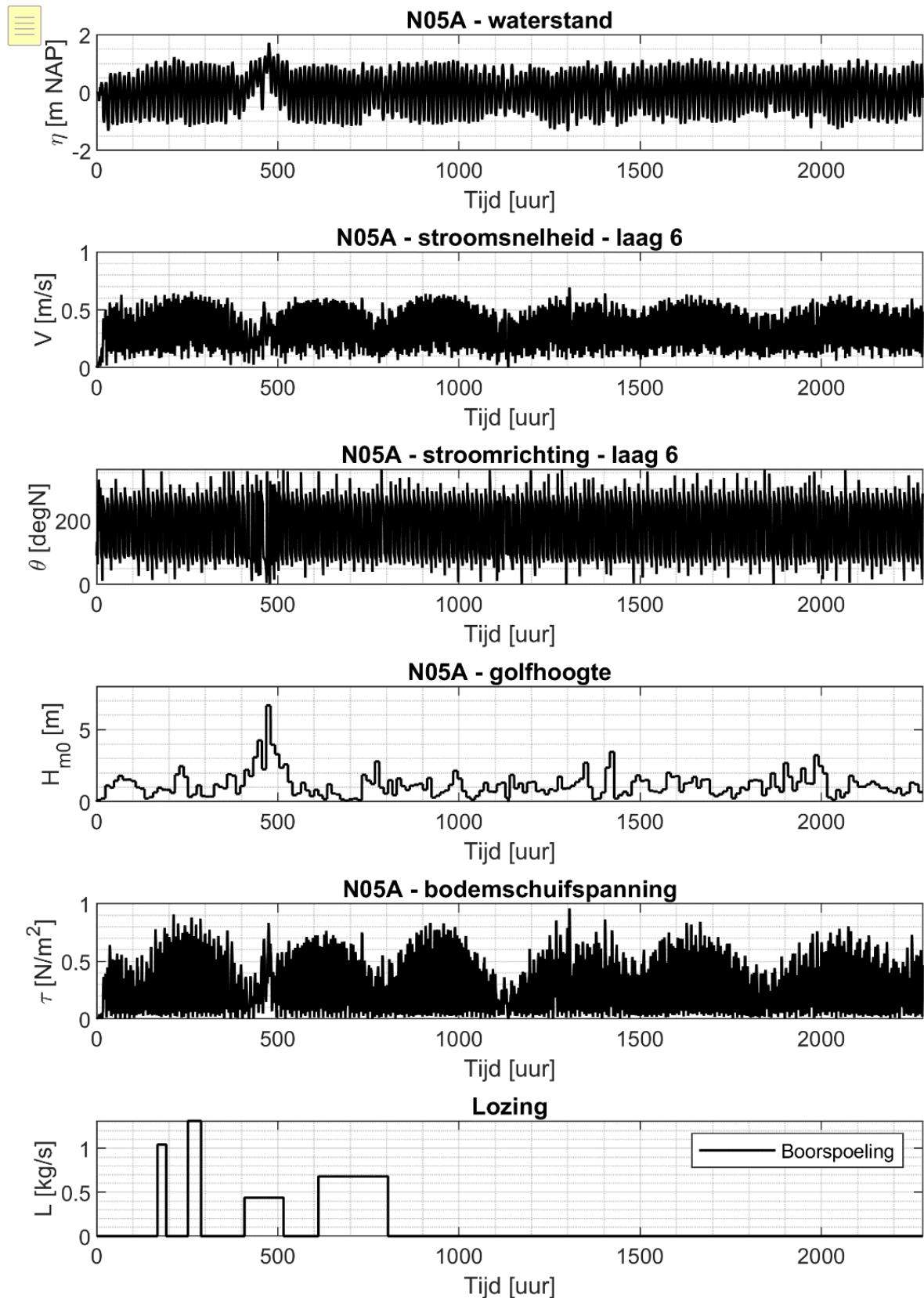


Abbildung 5- 49: Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Wellenhöhe und Bodenschubspannung am Plattformstandort N05- A

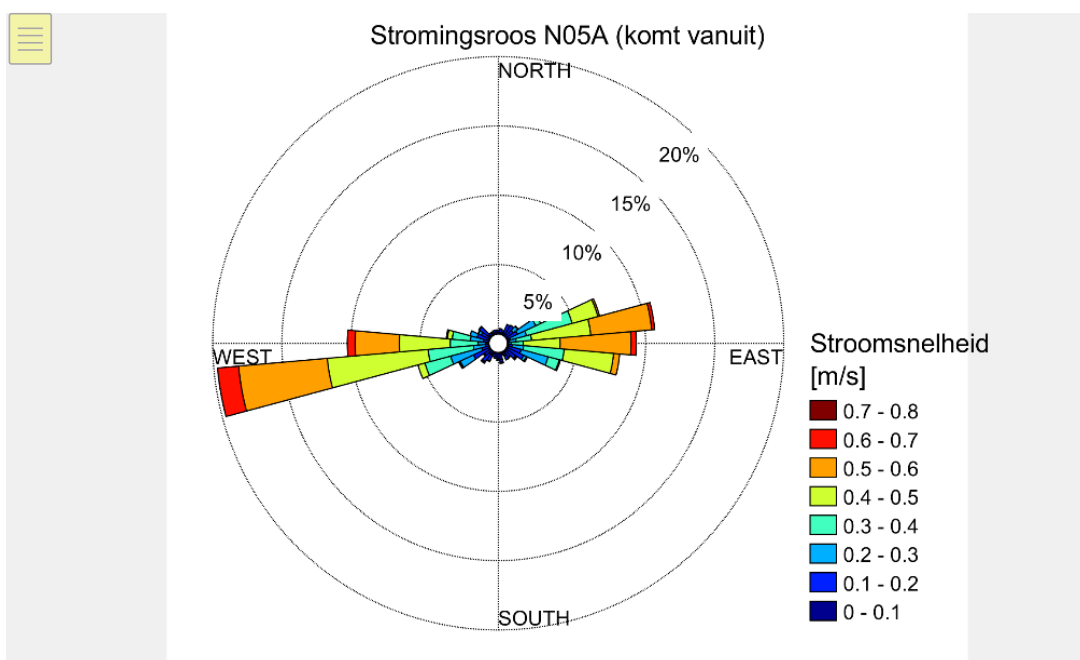


Abbildung 5- 50: Durchflussanstieg an der Plattform N05-A während des März-Szenarios. Die Richtung gibt den Ursprung der Strömung im Modell an.

5.2.2 Gelöste Substanzen in der Bohrspülung

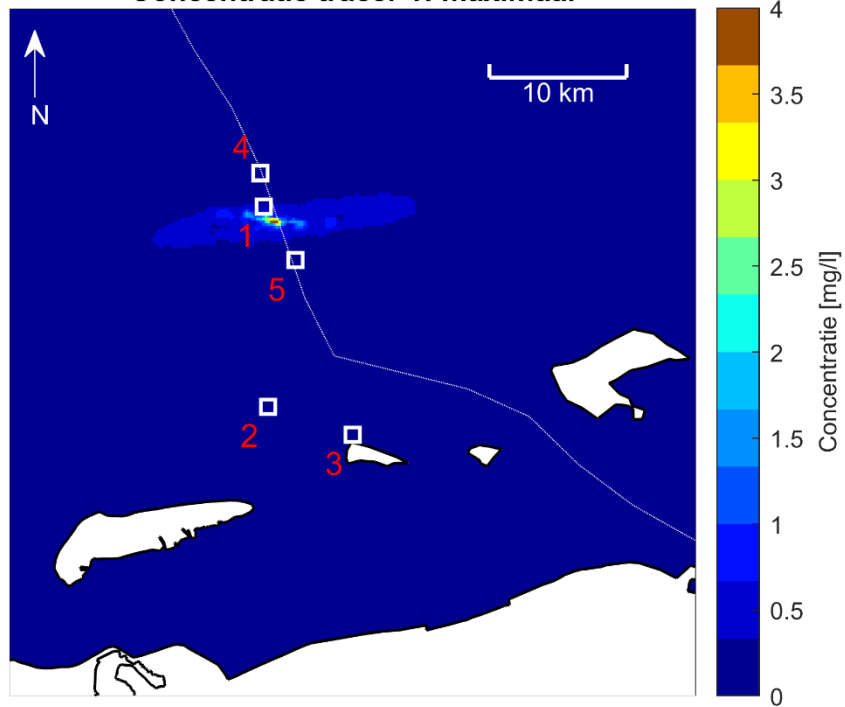
Maximale Konzentration während der Simulation

In den Modellrechnungen wurden fiktive Tracerkonzentrationen in der Nordsee ermittelt, die später in diesem Kapitel in die einzelnen vierzehn gelösten Stoffe umgerechnet wurden (siehe Abschnitt 4.3.3). Für jeden der vier Bohrabchnitte wurde ein eigener Tracer verwendet. Die Menge der ausgetragenen Tracer ist gleich die Summe der gelösten Stoffe und variiert pro Abschnitt und Tracer.

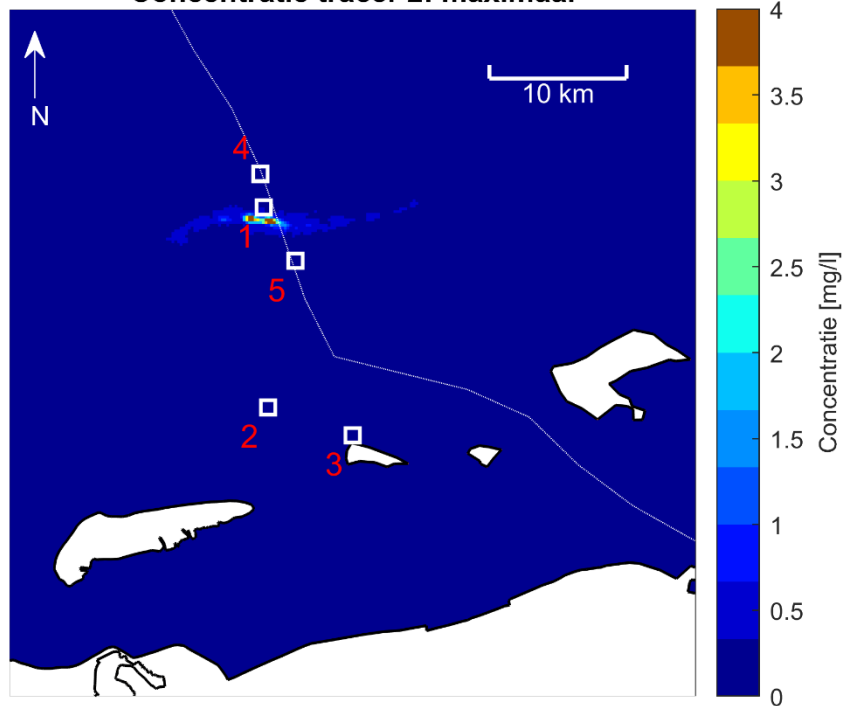
Die Abbildung 5-8 zeigt die maximale Konzentration der vier Tracer während des März-Szenarios über die gesamte Wassersäule. Die Konzentrationen von Tracer 1 und Tracer 2 sind höher als bei Tracer 3 und Tracer 4, da auch die Abflussbedingungen größer sind. Die Konzentrationen für Tracer 4 sind höher als für Tracer 3, da dieser über einen längeren Zeitraum gelöst wird. Tracer 1, 2 und 3 werden vor oder während des Sturms gelöst, Tracer 4 wird nach dem Sturm gelöst.



Concentratie tracer 1: maximaal



Concentratie tracer 2: maximaal



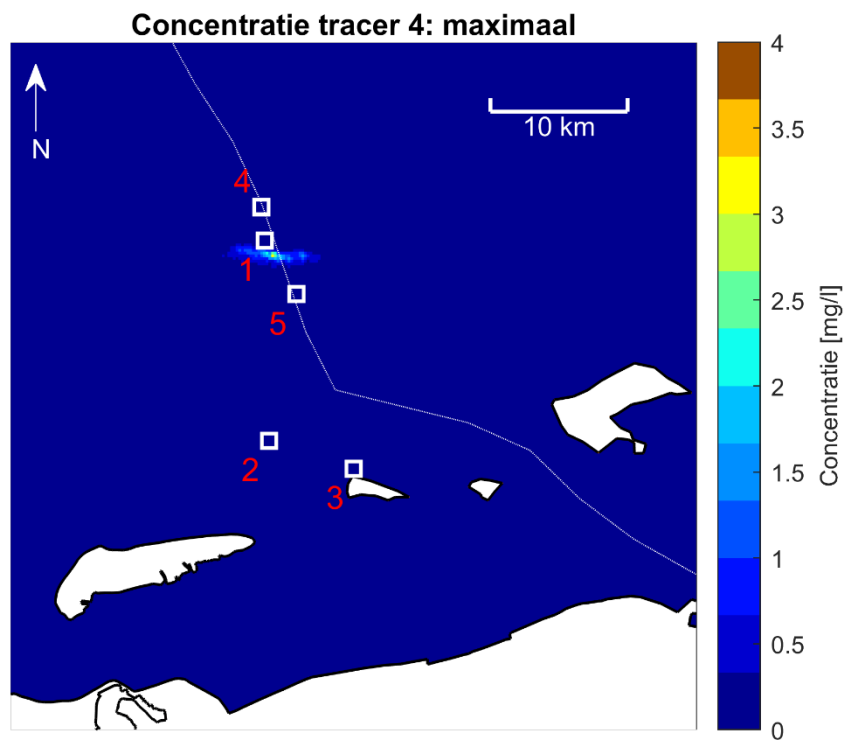
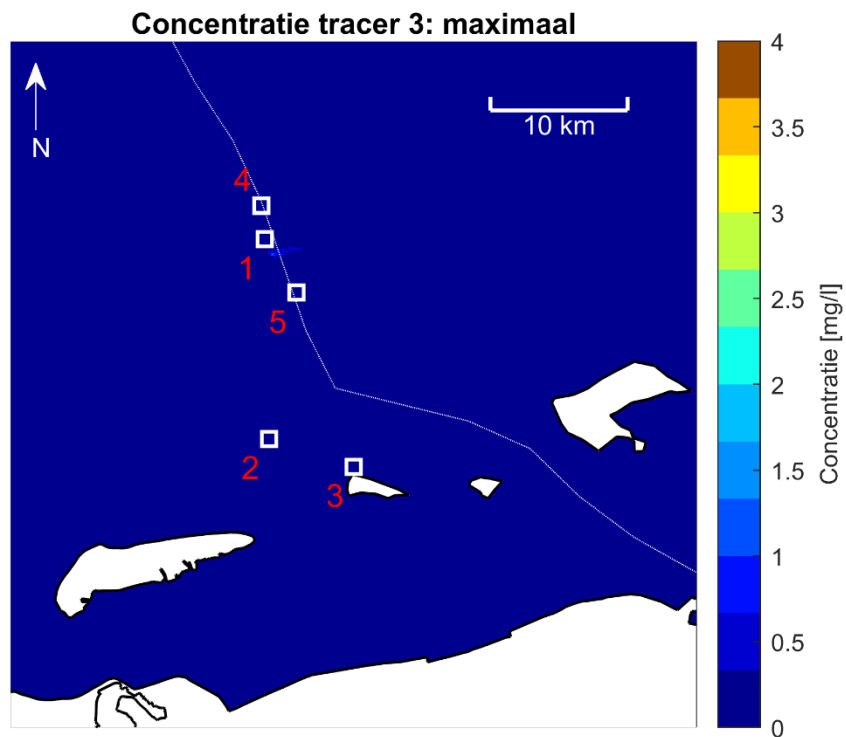


Abbildung 5- 51: Maximale Konzentration der Tracer während des März-Szenarios über die gesamte Wassersäule. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordseeküstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Abbildung 5-12 bis Abbildung 5-14 zeigen den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Tracer an den empfindlichen Stellen.

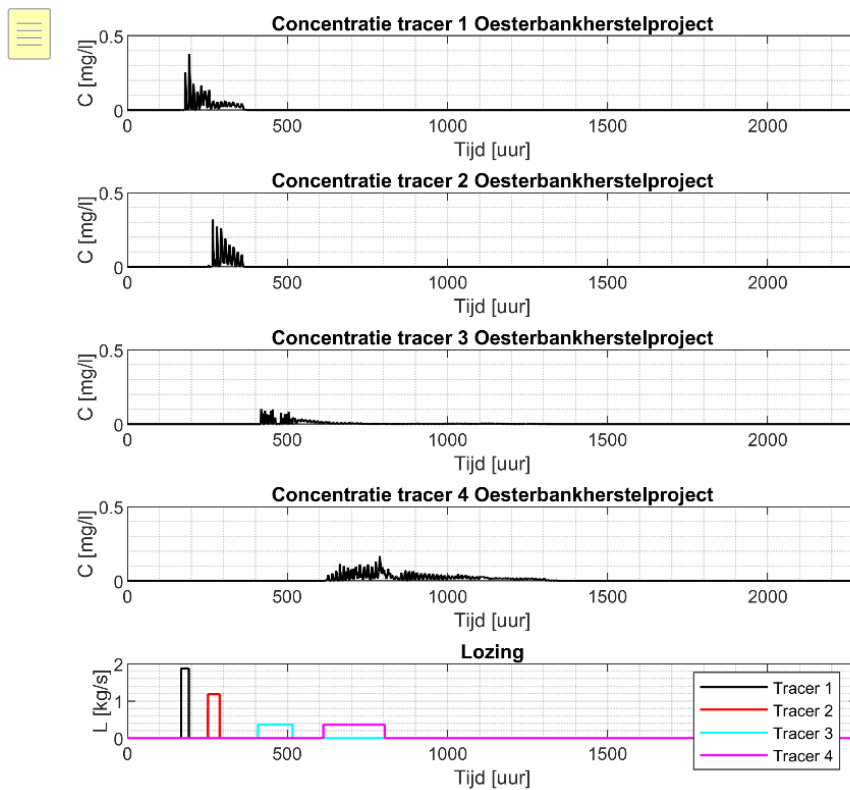


Abbildung 5- 52 Zeitliche Veränderung der Tracerkonzentration am Standort des Austernbank-Restaurationsprojekts. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

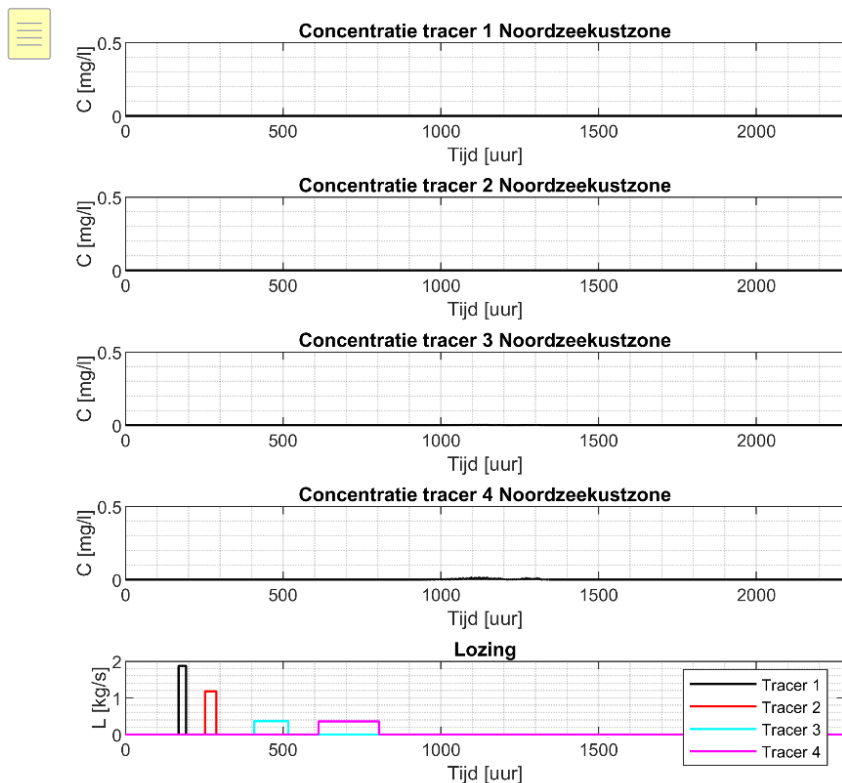


Abbildung 5- 53: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration in der Küstenzone der Nordsee. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

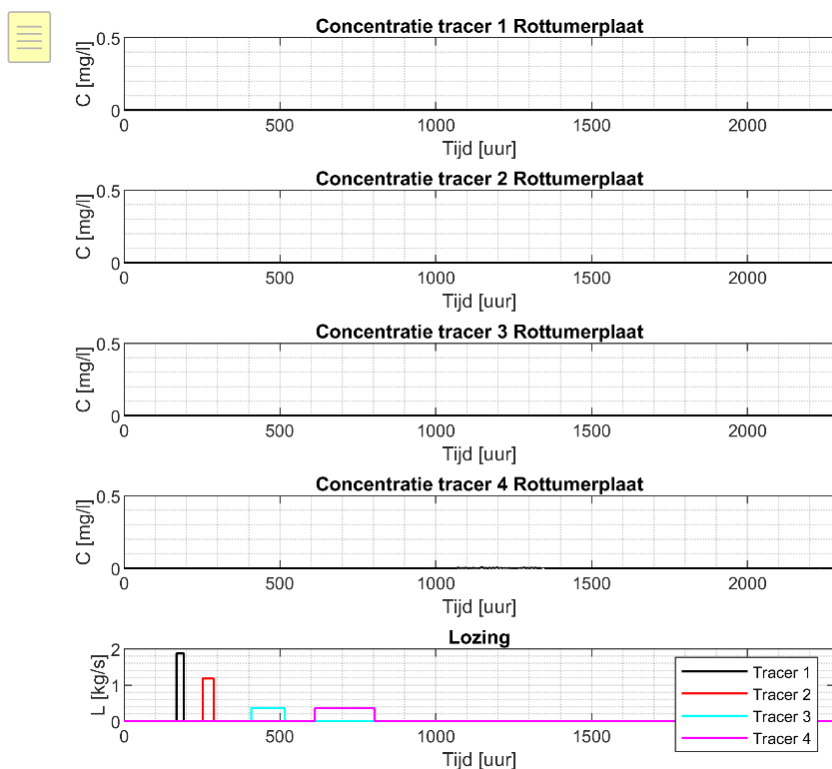


Abbildung 5- 54: Zeitliche Variation der Tracerkonzentration am Standort Rottumerplaat. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

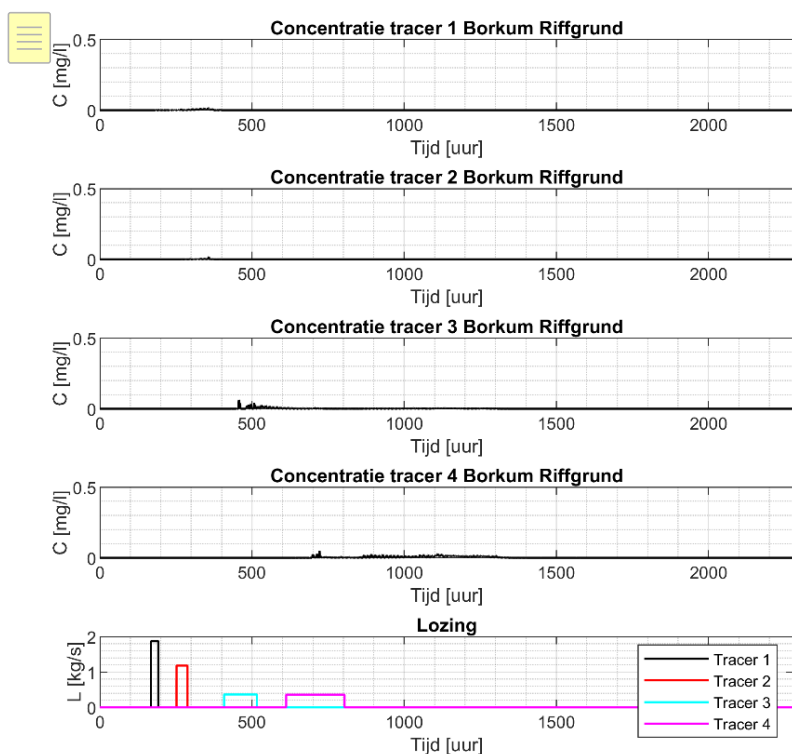


Abbildung 5- 5556: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Borkum Riffgrund. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

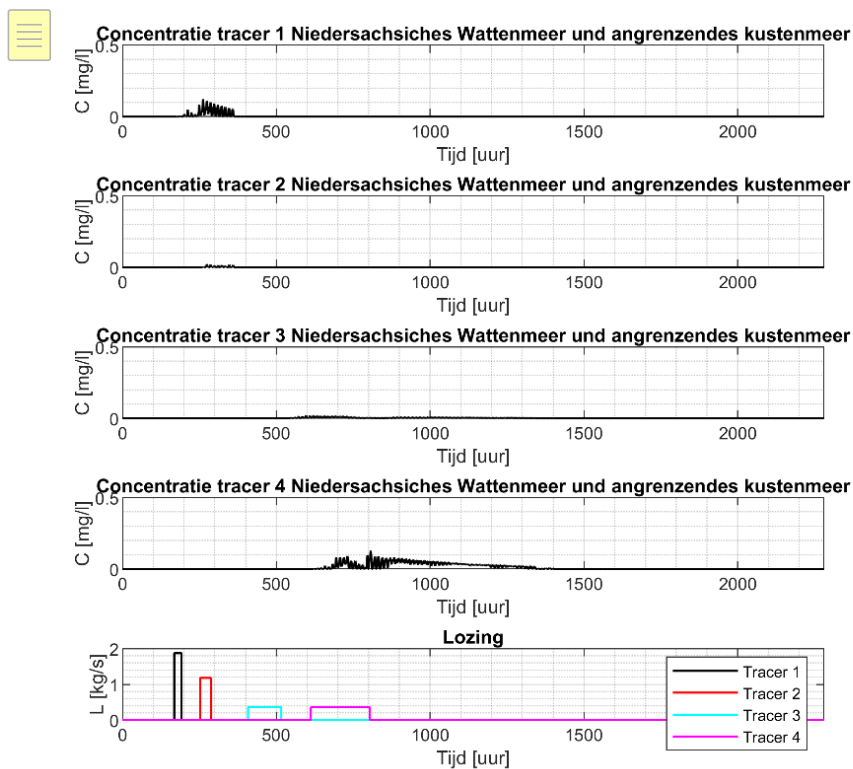


Abbildung 5- 57: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration an der Stelle des Niedersächsisches Wattenmeeres und angrenzenden Küstenmeeres. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

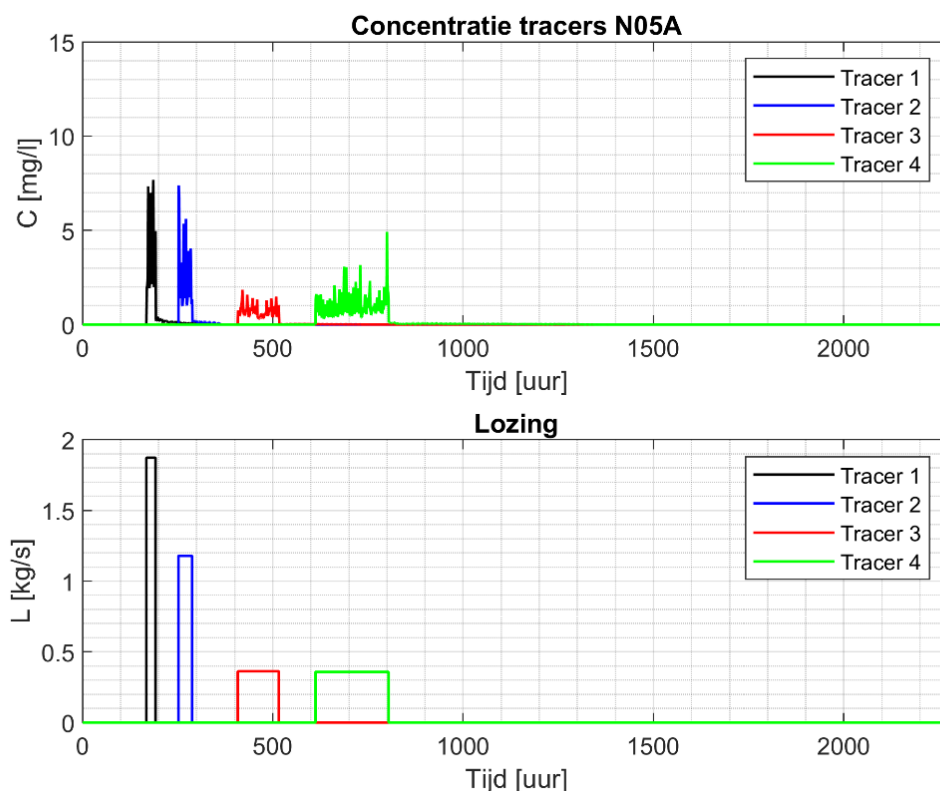


Abbildung 5- 5859: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort der Plattform. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

Umrechnung von Tracern in Konzentrationen von gelösten Substanzen

Die modellierten Tracer sind eine Ansammlung von gelösten Substanzen. Pro Abschnitt wird ein separater Tracer aus den gelösten Substanzen in unterschiedlichen Mengen zusammengesetzt. In jedem Abschnitt hat eine bestimmte gelöste Substanz einen anderen Anteil am Tracer dieses Abschnitts. Hier werden die berechneten Konzentrationen der vier Tracer auf die einzelnen gelösten Substanzen zurückgeführt, basierend auf dem Anteil der jeweiligen gelösten Substanz im Tracer. Zum Beispiel beträgt der Anteil von Kaliumchlorid während Bohrabschnitt 1 (und damit in Tracer 1) fast 99%, während er im vierten Bohrabschnitt 0% beträgt. Die maximale Konzentration über die gesamte Wassersäule für jeden gelösten Stoff ist für jeden Bohrungsabschnitt in der Tabelle 5-1 angegeben.

Tabelle 5- 78: Maximale Konzentration der gelösten Stoffe über alle Bohrschnitte und die gesamte Wassersäule



Maximale concentratie opgeloste stoffen over de gehele waterkolom [mg/l]: alle secties - scenario Maart						
	Oesterbankherstel project	Noordzeekustzone	Rottumerplaat	Borkum Riffgrund	Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes kustenmeer	N05A
Vloeistofverliesvertrager	1.9E-03	1.8E-04	1.1E-04	5.8E-04	1.1E-01	5.6E-02
Verzadigd monocarbonzuur, calciumzout	4.2E-03	1.6E-04	1.0E-04	8.9E-04	3.9E-03	9.7E-02
Calcium hydroxide	1.4E-03	4.9E-05	3.0E-05	8.9E-04	9.3E-04	2.6E-02
Magnesium oxide	1.7E-03	1.6E-04	1.0E-04	5.2E-04	9.3E-04	5.0E-02
Potassium chloride	3.7E-01	1.8E-03	1.1E-03	4.9E-02	4.6E-03	7.6E+00
Natriumcarbonaat	2.6E-03	4.6E-05	2.8E-05	2.2E-04	4.6E-03	5.3E-02
Sodium chloride	1.5E-01	1.4E-02	8.9E-03	4.6E-02	4.1E-03	4.4E+00
Natrium carboxymethylcellulose	1.6E-02	4.9E-04	3.0E-04	2.7E-03	1.3E-01	3.6E-01
Saccharose	4.7E-04	6.5E-06	4.0E-06	4.5E-05	0.0E+00	9.5E-03
Corosieremmer	1.2E-03	1.2E-04	7.3E-05	3.7E-04	2.5E-01	3.6E-02
Antischuim	3.1E-04	2.4E-06	1.5E-06	6.7E-05	2.9E-01	7.2E-03
Stof 1: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α -butyl- ω -hydroxy	6.7E-02	3.2E-04	2.0E-04	8.9E-03	1.4E-03	1.5E+00
Potassium hydroxide	2.0E-04	2.0E-05	1.2E-05	6.2E-05	1.3E-03	6.0E-03
Stof 2: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α -butyl- ω -hydroxy	5.4E-03	5.2E-04	3.2E-04	1.7E-03	1.3E-03	1.6E-01

5.3 Übersicht der Ergebnisse für die drei Szenarien

5.3.1 Baryt und Bentonit in der Bohrspülung

In Abbildung 5-15, Abbildung 5-16 und Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse für die drei Szenarien in Bezug auf Baryt und Bentonit angegeben: die maximale Konzentration von Baryt + Bentonit über die gesamte Wassersäule und die maximale Sedimentation an den entsprechenden Stellen. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse für Oktober-Szenario und November-Szenario finden Sie in Anhang A2.

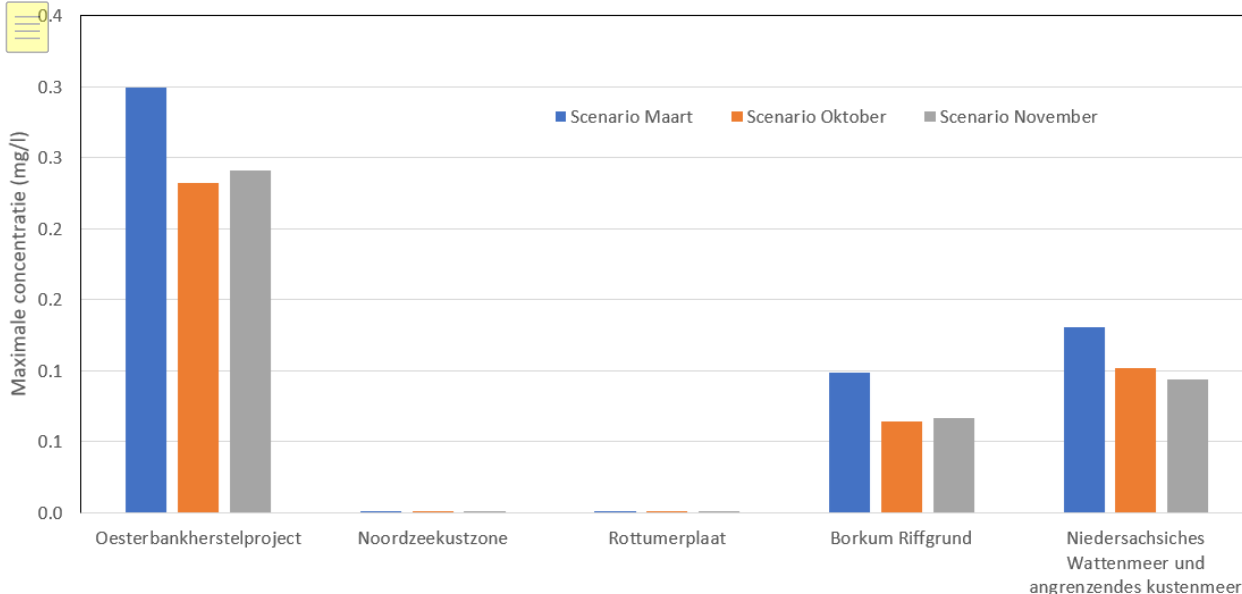


Abbildung 5- 60: Maximale Konzentration der Bohrspülung (Baryt + Bentonit) in den drei Szenarien

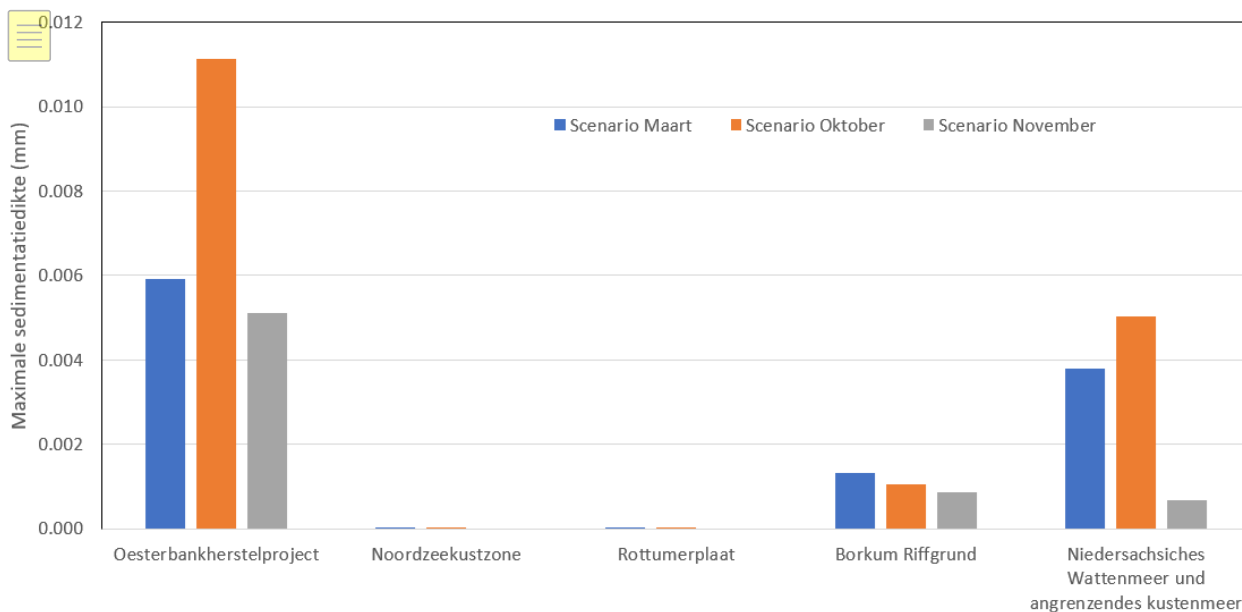


Abbildung 5- 6162: Maximale Sedimentationsdicke der Bohrspülung (Baryt + Bentonit) in den drei Szenarien.

Tabelle 5- 9: Maximale Konzentration der Bohrspülung über die gesamte Wassersäule und maximale Sedimentation über die drei Szenarien.

	Maximale over de drie scenario's	
	Max concentratie spoeling [mg/l]	Max sedimentatie spoeling [mm]
Oesterbankherstelproject	3.0E-01	1.1E-02
Noordzeekustzone	4.0E-04	1.8E-05
Rottumerplaat	6.4E-04	3.6E-06
Borkum Riffgrund	9.8E-02	1.3E-03
Niedersachsiches Wattenmeer und angrenzendes kustenmeer	1.3E-01	5.0E-03
N05-A	1.2E+01	2.8E-02

5.3.2 Gelöste Substanzen in der Bohrspülung

Die Tabelle 5-3 zeigt die maximalen Konzentrationen der gelösten Stoffe, wie sie in den drei Szenarien berechnet wurden. Dies sind die maximalen Konzentrationen der gelösten Stoffe über die gesamte Wassersäule und alle vier Bohrungsabschnitte. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der Szenarien Oktober und November finden Sie in Anhang A2.

Tabelle 5- 10: Maximale Konzentration in der Wassersäule für alle gelösten Stoffe in den drei Szenarien.



Maximale concentratie opgeloste stoffen over de gehele waterkolom [mg/l]: alle secties - alle scenario's

	<i>Oesterbankherstel project</i>	<i>Noordzeekustzone</i>	<i>Rottumerplaat</i>	<i>Borkum Riffgrund</i>	<i>Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes kustenmeer</i>	<i>N05A</i>
Vloeistofverliesvertrager	2.1E-03	1.8E-04	1.1E-04	7.2E-04	1.4E-03	5.6E-02
Verzadigd monocarbonzuur, calciumzout	5.0E-03	2.4E-04	2.1E-04	8.9E-04	1.5E-03	9.7E-02
Calcium hydroxide	2.5E-03	2.4E-04	2.1E-04	8.9E-04	1.3E-03	2.7E-02
Magnesium oxide	1.8E-03	1.6E-04	1.0E-04	6.4E-04	1.3E-03	5.0E-02
Potassium chloride	4.6E-01	1.3E-02	1.2E-02	1.1E-01	1.2E-01	1.5E+01
Natriumcarbonaat	3.1E-03	7.1E-05	6.7E-05	7.7E-04	8.3E-04	1.0E-01
Sodium chloride	1.6E-01	1.4E-02	8.9E-03	5.6E-02	1.1E-01	4.4E+00
Natrium carboxymethylcellulose	1.9E-02	7.2E-04	6.4E-04	2.7E-03	5.5E-03	3.6E-01
Saccharose	5.7E-04	1.3E-05	1.2E-05	1.4E-04	1.5E-04	1.9E-02
Corosieremmer	1.3E-03	1.2E-04	7.3E-05	4.6E-04	9.3E-04	3.6E-02
Antischuim	3.8E-04	1.8E-05	1.6E-05	6.7E-05	1.1E-04	7.2E-03
Stof 1: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α- butyl-ω-hydroxy	8.0E-02	2.4E-03	2.1E-03	8.9E-03	2.3E-02	1.5E+00
Potassium hydroxide	2.2E-04	2.0E-05	1.2E-05	7.7E-05	1.5E-04	6.0E-03
Stof 2: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α- butyl-ω-hydroxy	5.9E-03	5.2E-04	3.2E-04	2.1E-03	4.1E-03	1.6E-01

6 Diskussion

Vergleich der Szenarien

Es wurden insgesamt drei Szenarien simuliert, in denen sich die Strömungs- und Wellenbedingungen unterscheiden. Damit wird deutlich, wie groß die Bandbreite in der Federausbreitung und Sedimentation durch das Lösen von Bohrspülung sein kann. Das März-Szenario beinhaltet eine ruhige Periode mit einem großen Sturm am Ende. Das Oktober-Szenario beinhaltet einen sehr ruhigen Monat, gefolgt von einer Periode mit durchschnittlichen Wellen. Im November-Szenario treten während des gesamten Zeitraums durchschnittliche Wellen auf.

Konzentrationen der Bohrspülung

Jedes Szenario beinhaltet die Bohrung einer Gasbohrung, wenn diese seriell gebohrt wird. Vergleicht man die maximalen Konzentrationen der Bohrspülung innerhalb der Zeiträume der drei Szenarien, so fällt folgendes auf:

- Die maximale Konzentration in den empfindlichen Gebieten ist im Allgemeinen während des März-Szenarios am höchsten. Nur am Standort Rottumerplaat ist die maximale Konzentration im Oktober-Szenario am höchsten;
- Die Größe der Feder für eine Bohrspülung ist für die drei Szenarien sehr ähnlich.

Dies kann wie folgt erklärt werden. Die vierte Lösungsperiode hat einen relativ hohen Einleitungsterm über einen langen Zeitraum und fällt mit der Nipptide während des März-Szenarios nach dem Sturm von Ende März zusammen, also während einer ruhigen Gezeitenperiode. Das ausgetragene Material bleibt dann in der Nähe des Plattformstandortes und verursacht dort höhere Konzentrationen. Auch bei den gelösten Stoffen sind die Konzentrationen in den empfindlichen Gebieten im Allgemeinen im März-Szenario am höchsten.

Die Modellergebnisse zeigen, dass die maximalen Konzentrationen über der Wassersäule von Baryt und Bentonit aus der Bohrspülung relativ gering sind. Die Konzentration der Bohrspülung liegt an den verschiedenen empfindlichen Stellen unter 0,5 mg/l und am Standort der Plattform um 10 mg/l. Außerdem fällt die Konzentration schnell ab, sowohl in der Zeit nach der Lösung der Bohrung als auch mit der Entfernung vom Standort der Plattform. Dies gilt für das Bohren von jeweils einer Gasbohrung. Da die Konzentrationen schnell abnehmen, werden die Konzentrationen auch bei Serienbohrungen relativ niedrig bleiben, da die Konzentrationen nach jeder Zwischenperiode (und damit dem Beginn der nächsten Bohrung) bereits deutlich gesunken sind. In Abschnitt 6.4 werden die Auswirkungen des Batch-Bohrens besprochen.

Sedimentation

Die Sedimentation durch Bohrspülung ist an allen Standorten außer Borkum Riffgrund während des Oktober-Szenarios am größten. Bei Borkum Riffgrund ist die Sedimentation während des März-Szenarios am größten, aber der Unterschied zum Oktober-Szenario ist gering. Das Oktober-Szenario hat eine lange, ruhige Periode, in der Material gut absinken kann und somit eine größere Sedimentation stattfindet.

Die Sedimentationsmuster zeigen deutlich den Einfluss von mehrtägigen und extremen Strömungs- und Wellenbedingungen, deutlicher als bei den Konzentrationen. Die Konzentrationen hängen von den Gezeiten ab: Die Konzentration schwankt stark zwischen Nipptiden und den Springtiden der Ebbe- und

Flutströmung. Die Sedimentation hingegen ist ein langsamerer Prozess, während die Erosion bei Sturm stattfindet.

6.2 Relevanz der Ergebnisse in Bezug auf natürliche Prozesse

Die natürliche Hintergrundkonzentration von Schlick liegt in der Größenordnung von 5 - 20 mg/l um den Standort der Plattform (siehe Abschnitt 3.7). Näher am Meeresboden und in Richtung der Watteninseln ist die Schlickkonzentration im Allgemeinen höher, und weiter von der Küste entfernt ist die Schlickkonzentration etwas niedriger.

Für das Austernbank-Restaurierungsprojekt beträgt die maximale Erhöhung der Bohrspülungskonzentration durch die Einleitung des Bentonits und Baryts ca. 0,3 mg/l (siehe Abschnitt 5.3). Unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration von 5-20 mg/l bedeutet dies für das Austernbank-Restaurierungsprojekt eine temporäre maximale Erhöhung von 1,5 - 6 %. Die anderen empfindlichen Standorte sind weiter entfernt und weisen maximale Erhöhungen der Schlickkonzentration in der Größenordnung von 1 % oder weniger auf.

Am Standort der Plattform ist der absolute und relative Anstieg der Bohrspülungskonzentration deutlich größer: ein temporärer maximaler Anstieg von ca. 12 mg/l. Dies entspricht einem temporären Anstieg von 60 - 240% für den Standort der Plattform. Dies entspricht einer temporären Erhöhung von 60 - 240% für den Plattformstandort.

Die vorhergesagte Sedimentationsdicke von Bentonit und Baryt beträgt bis zu 30 µm, die in der Nähe des Plattformstandortes auftritt. Dies ist eine sehr dünne Schicht von weniger als der Dicke eines feinen Sandkorns. An den empfindlichen Stellen ist die maximale Sedimentationsdicke noch geringer. Auch wenn es keine Messungen der Dynamik des natürlichen Sediments auf dem Meeresboden gibt und das Sediment am Standort der Plattform relativ stabil zu sein scheint (siehe Abschnitt 3.6), ist es wahrscheinlich, dass die natürliche Dynamik des natürlichen Sediments auf dem Meeresboden um ein Vielfaches größer als 30 µm ist.

Natürliche Wellen- und Strömungskämme auf sandigen Meeresböden haben typischerweise eine Höhe von wenigen Zentimetern, was bedeutet, dass die obersten paar Zentimeter des Meeresbodens während der Spitzen der Gezeitenströmung und während Sturmperioden in Bewegung sind. Die maximale Akkretion von 30 µm ist weniger als 1% dieser natürlichen (temporären) Dynamik des Meeresbodens.

6.3 Unwägbarkeiten

Modellberechnungen, wie sie in dieser Studie angewendet werden, unterliegen Unsicherheiten und natürlichen Schwankungen. Eine der Unwägbarkeiten ist die natürliche Variation der bestimmenden Prozesse wie Strömungen, Wellen und Wind. Diese können bis zu einem gewissen Grad vorhergesagt werden. Historische Messdaten und Statistiken geben eine Vorstellung von der Intensität der zu erwartenden Prozesse. Dabei sind jeder Tag und jeder Sturm anders. Diese Variation in den Steuerungsprozessen führt zu einer Unsicherheit in den vorhergesagten Konzentrationen von Bohrspülung und gelösten Stoffen sowie in der vorhergesagten Sedimentation.

Eine Vorhersage des relativen Anstiegs der Bohrspülungskonzentration unterliegt auch den natürlichen Schwankungen der Hintergrundkonzentrationen und der Sedimentation, siehe auch Abschnitt 6.2. Die Schwankung des relativen Anstiegs der Konzentrationen und der Sedimentation als Folge von

Bohrvorgängen stellt daher ebenfalls eine Unsicherheit dar, die bei der Folgenabschätzung von Bohrvorgängen berücksichtigt werden muss.

Außerdem ist ein Modell wie Delft3D eine Vereinfachung der Realität. So wird z. B. ein Rechengitter verwendet, um die Anzahl der Berechnungspunkte, in denen die Lenkvorgänge und die Verteilung des Feinmaterials berechnet werden, auf eine überschaubare Anzahl zu reduzieren. Dies kann auf Kosten des Detaillierungsgrades gehen: Die räumliche Variation der Sedimentkonzentration und der Sedimentdicke innerhalb der Zellen des Berechnungsgitters bleibt unbekannt. Außerdem werden Prozesse, die auf einer kleineren Skala als der Größe der Rechengitterzellen auftreten (z. B. Turbulenzen), nicht genau berechnet. Daher liegt die Unsicherheitsspanne bei Berechnungen des Sedimenttransports typischerweise in der Größenordnung von -50 bis +100 %, was bedeutet, dass Konzentrationen und Sedimentation halb so groß bis doppelt so groß sein können.

Außerdem wurden so viele relevante Prozesse wie möglich in die Modellierung einbezogen, z. B. Salzgehalt, Temperatur, ein Wärmemodell und Wellen. Chemische Prozesse, wie z.B. Reaktionen zwischen den gelösten Stoffen, wurden jedoch nicht berücksichtigt. Die Konzentrationen der gelösten Stoffe, die nach der Einleitung mit den anderen gelösten Stoffen oder mit dem Meerwasser reagieren, können daher in der Realität abweichen und sich auch im Laufe der Zeit durch die chemischen Reaktionen verändern.

In Anbetracht der Unsicherheiten bezüglich der natürlichen Variation der Strömungs-, Wellen- und Windverhältnisse, der Unsicherheiten in der Modellierung und der Vereinfachungen in der Modellierung wird für Sedimenttransportberechnungen in der Regel ein Unsicherheitsfaktor von 2 angesetzt. Das bedeutet, dass die tatsächlichen Konzentrationen und Sedimentationsdicken in einer Größenordnung von der Hälfte bis zum Zweifachen der berechneten Konzentrationen und Sedimentationsdicken liegen. Angesichts der sehr geringen vorhergesagten Sedimentationsdicken würde selbst eine Verdoppelung dieser vorhergesagten Sedimentationsdicke immer noch eine sehr geringe Sedimentationsdicke bedeuten. Für das Projekt zur Wiederherstellung der Austernbänke würde die maximale Erhöhung der Schlickkonzentration dann zwischen 0,15 und 0,6 mg/l liegen.

6.4 Batch-Bohren versus Serienbohren

Wie bereits erwähnt, kann das Bohren der Gruben auf zwei Arten durchgeführt werden:

- Bei der Variante "**Serienbohrung**" werden alle Bohrungen nacheinander abgeteuft und die Bohrspülung wird für jeden Abschnitt gewechselt. Die überflüssige Flüssigkeit aus dem vorherigen Abschnitt wird in der Regel eingeleitet, wenn es sich um Bohrspülung auf Wasserbasis handelt. Ölbasierte Bohrspülung wird entsorgt. Diese Methode wurde verwendet, um die Quellterme für die Einleitungen in dieser Studie zu bestimmen;
- Bei der Variante "**Batch-Bohrung**" werden die Bohrungen nicht nacheinander abgeteuft, sondern es werden jeweils die entsprechenden Abschnitte einer Anzahl von Bohrungen abgeteuft. Also, zuerst Abschnitt 1 von Grube 1, dann Abschnitt 1 von Grube 2, Abschnitt 1 von Grube 3, dann Abschnitt 2 von Grube 1, dann Abschnitt 2 von Grube 2, und so weiter. Beim Batch-Bohren kann ein Teil der wasserbasierten Bohrspülung aus dem jeweiligen Abschnitt für den gleichen Abschnitt in der nächsten Bohrung wiederverwendet werden. Im Durchschnitt wird in allen Abschnitten 20 % weniger Bohrspülung eingeleitet als bei der Variante "Serienbohrung". Es ist zu beachten, dass beim Batch-Bohren eher eine ölbasierte Bohrspülung verwendet wird als beim

Serienbohren. Dies führt zu einer Reduzierung der abzugebenden Menge an wasserbasierter Bohrspülung. Für die Zwecke dieser Studie wurde angenommen, dass ab dem 4. Abschnitt eine ölasierte Bohrspülung verwendet wird. Es ist auch möglich, dass im 3. Abschnitt eine ölasierte Bohrspülung und im 4. Abschnitt wieder eine wasserbasierte Bohrspülung verwendet wird. Dies führt zu einer anderen Reduzierung des eingeleiteten Bohrkleins, aber nicht zu einer anderen Schlussfolgerung als unten beschrieben.

Das Projekt N05-A geht davon aus, dass beim Batch-Bohren nicht alle zwölf Bohrungen auf einmal gebohrt werden, sondern dass dies in Gruppen von jeweils vier Bohrungen geschieht. Das Batch-Bohren hat vor allem für die Abschnitte mit großem Durchmesser Vorteile, die mit wasserbasierter Bohrspülung gebohrt werden, d. h. die ersten drei Abschnitte. Für Abschnitt 1 führt das Batch-Bohren nicht zu einer Reduzierung des Abflusses, da keine Bohrspülung wiederverwendet wird. Für die Abschnitte 2 und 3 wurde angenommen, dass für jede nachfolgende Bohrung einer Grube die Hälfte der Bohrspülung wiederverwendet werden kann. Anstelle von vier Einheiten an Bohrspülung werden nur 2,5 Einheiten an Bohrspülung benötigt. Bei Serienbohrungen werden für Abschnitt 1 viermal 90 Tonnen Baryt und Bentonit benötigt, für die Abschnitte 2 und 3 viermal 170 Tonnen. Das Batch-Bohren führt zu einer Reduzierung der Einleitungen in den Abschnitten 2 und 3 um 255 Tonnen, siehe

Tabelle 6-1 . Es ist zu beachten, dass bei der Batch-Bohrung davon ausgegangen wird, dass ab Abschnitt 4 OBM verwendet wird.

Tabelle 6- 1112: Reduzierung des Baryt- und Bentonitverbrauchs durch die Anwendung von Batch-Bohrungen bei vier Bohrungen.

Abschnitt	Bohrspülung (Baryt + Bentonit) vier Bohrlöcher [Tonnen].		Reduktion des Austrags [t].
	Serienbohrung	Batch-Bohrung	
1	4 * 90 = 360	4 * 90 = 360	0
2	4 * 170 = 680	2,5 * 170 = 425	255
3	4 * 170 = 680	2,5 * 170 = 425	255
4	4*470 = 1880	-	1880

Die Federnmodellierung ist von einer einzigen vollständigen Bohrung ausgegangen, ohne Wiederverwendung der Bohrspülung in einem anderen Bohrloch. Daher können die Ergebnisse der Federnmodellierung für eine einzelne Bohrung als konservativ angesehen werden und eine Überschätzung ergeben, wenn in der Realität Batch-Bohrungen mit mehreren Gruben durchgeführt werden.

Andererseits nimmt die Sedimentationsdicke bei Mehrfachbohrungen, sowohl bei Serien- als auch bei Batch-Bohrungen, leicht zu. Dies liegt daran, dass die Bohrspülung über einen längeren Zeitraum, von mehreren Monaten bis zu mehreren Jahren, eingeleitet wird. Dies bedeutet nicht automatisch, dass die maximale Sedimentationsdicke um den Faktor gleich der Anzahl der Bohrungen zunimmt, so dass z.B. bei vier Bohrungen die maximale Sedimentationsdicke nicht um das Vierfache zunimmt, da bei Stürmen auch zwischen den Bohrungen Erosion auftritt. Die Konzentrationen der Bohrspülung werden bei mehreren Bohrungen kaum ansteigen, da die Modellrechnungen zeigen, dass die Konzentrationen nach der Einleitung schnell abnehmen und in den Intervallen, in denen die Bohrausrüstung zum nächsten Bohrloch transportiert wird, oft auf nahezu 0 mg/l sinken.

Die Modellberechnungen zeigen auch, dass die Sedimentation und Resuspension von abgelagerter Baryt und Bentonit ein langsamerer Prozess ist und dass es etwa einen Monat dauert, bis abgelagerter Baryt und abgelagerter Bentonit in der Nähe der Plattformposition resuspendieren und weiter dispergiert werden. Dieser Monat ist kürzer als die Dauer der Bohrung einer Grube. Das bedeutet, dass bei der Abteufung mehrerer Gruben, unabhängig von ihrer Anzahl, die maximale Ablagerungsdicke ungefähr mit dem 1-fachen der berechneten maximalen Ablagerungsdicke für eine Grube angenommen werden kann.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde die Dispersion von Tonpartikeln und gelösten Substanzen aus der Bohrspülung modelliert. Basierend auf der Modellierung wurden die Konzentrationen und die Sedimentation aufgrund der Einleitung von wasserbasierter Bohrspülung am und um den Plattformstandort ermittelt. Das Hauptaugenmerk lag auf den maximalen Konzentrationen und der Sedimentation während der Bohrperiode sowie auf der Variation der Konzentrationen und der Sedimentation an bestimmten Stellen.

Die Tabelle 7-1 fasst die maximale Erhöhung der Bohrspülungskonzentration durch den Bohrspülung und die maximale Sedimentationsdicke der Bohrspülung zusammen. Nach den Modellberechnungen beträgt der maximale Anstieg der Schlickkonzentration am Austernbank-Restaurierungsprojekt etwa 0,3 mg/l. Der maximale Anstieg der Konzentrationen an den anderen empfindlichen Standorten ist geringer. Bezogen auf eine Hintergrundkonzentration von 5 - 20 mg/l erhöht sich die Konzentration am Austernbank-Restaurierungsprojekt um ca. 1,5 - 6%. Die relativen Erhöhungen an den anderen empfindlichen Standorten sind in der Tabelle 7-1 dargestellt. Da die Konzentration der Bohrspülung nach der Einleitungsperiode schnell abfällt, ist der Anstieg der maximalen Konzentration bei mehreren Bohrungen sehr begrenzt.

Tabelle 7- 1314: Maximale zusätzliche Schlickkonzentration. Anstieg in Hinblick auf die Hintergrundkonzentration und maximale Sedimentation

Standort	Max. Konzentration der Bohrspülung [mg/l]	Max. Anstieg über die Hintergrundkonzentration von 5-20 mg/l [%].	Maximale Sedimentation [mm]
Austernbank-Restaurierungsprojekt	0,30	1,5 – 6,0	1,1E-2
Küstengebiet der Nordsee	< 0,01	< 0,1	1,8E-5
Rottumerplaat	< 0,01	< 0,1	3,6E-6
Borkum Riffgrund	0,10	0,5 – 2,0	1,3E-3
Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer	0,13	0,7 – 2,6	5,0E-3
N05-A	12,0	60 - 240	2,8E-2

Die zusätzliche Sedimentation von aus der Bohrspülung ist ebenfalls in der obigen Tabelle aufgeführt. Beim Austernbank-Restaurierungsprojekt sind dies in einem der drei Modellszenarien höchstens 0,01 mm; in den beiden anderen Szenarien beträgt die Sedimentation etwa die Hälfte. An den anderen empfindlichen Stellen sind die Sedimentationsdicken noch geringer und selbst an der Plattformstelle ist die Sedimentationsdicke sehr gering. Die Ablagerung von Bohrspülung ist im Vergleich zur natürlichen Dynamik des Meeresbodens am Plattformstandort sehr gering. Bei mehreren Bohrungen wird die maximale Sedimentationsdicke der Bohrspülung kaum zunehmen, unabhängig von der Anzahl der Bohrungen.

Die maximalen Konzentrationen der gelösten Stoffe am Standort der Plattform sind in der Tabelle 7-2 dargestellt. Diese maximalen Konzentrationen treten in der Regel nur für einen kurzen Zeitraum auf. Die Konzentrationen der gelösten Stoffe nehmen nach der Einleitungsperiode schnell ab und nehmen mit der Entfernung vom Standort der Plattform stark ab, da die gelösten Stoffe über die Wassersäule und über eine größere Fläche verteilt werden. Bei mehreren Bohrungen steigen die maximalen Konzentrationen also nur um einen Bruchteil.

Tabelle 7- 15: Maximale Konzentration der gelösten Stoffe am Plattformstandort

Stoff	Maximale Konzentration [mg/l]
Flüssigkeitsverlustsenker	5,6E-2
Gesättigte Monocarbonsäure, Calciumsalz	9,7E-2
Calciumhydroxid	2,7E-2
Magnesiumoxid	5,0E-2
Kaliumchlorid	1,5E1
Natriumcarbonat	1,0E-1
Natriumchlorid	4,4E0
Natrium-Carboxymethylcellulose	3,6E-1
Saccharose	1,9E-2
Korrosionsinhibitor	3,6E-2
Entschäumer	7,2E-3
Substanz 1: Poly (-oxy-1.,2-Ethanediy), α -Butyl- ω -Hydroxyd	1,5E0
Kaliumhydroxid	6,0E-3
Substanz 2: Poly (-oxy-1.,2-Ethanediy), α -Butyl- ω -Hydroxyd (Tonne)	1,6E-1

Die Modellrechnungen zeigen, dass die Ausbreitung hauptsächlich in nordöstlich-südwestlicher Richtung erfolgt. Die Verbreitung in nördlicher und südlicher Richtung ist relativ gering. Dies ist hauptsächlich auf die Gezeiten zurückzuführen, wobei der vorherrschende Wind aus Südwest teilweise dafür verantwortlich ist.

7.2 Empfehlungen

Diese Modellierungsstudie hat ein Bild von der Dispersion und Sedimentation von Bohrspülung nach der Einleitung von der Bohrplattform geliefert.

Ein wichtiger nächster Schritt ist die Bestimmung der Auswirkungen der Bohrspülung und der gelösten Stoffe auf die verschiedenen Funktionen der Nordsee, einschließlich der Natur. Was sind zum Beispiel die kritischen Konzentrationen und wie lange können diese kritischen Konzentrationen überschritten werden, bevor es zu einer signifikanten negativen Auswirkung auf Flora und Fauna kommt? Die Modellergebnisse dieser Studie können als Input für eine solche Analyse dienen.

Bei den Modellsimulationen wurde ein möglichst detaillierter Ansatz mit möglichst vielen relevanten Prozessen und einer möglichst detaillierten Nachbildung der Einleitungen gewählt. Nur wenn der vorhergesagte Anstieg der Konzentrationen und/oder der Sedimentation zu einer möglichen Überschreitung der kritischen Werte führt oder der relative Anstieg der Konzentrationen und/oder der Sedimentation als zu groß angesehen wird, wird eine weitere Detaillierung der Modellsimulationen und eine Sensitivitätsanalyse empfohlen.

Angesichts der Variation der Wellen-, Wind- und Strömungsbedingungen in den drei Modellszenarien hat die Modellierung zusätzlicher Szenarien wenig Mehrwert.

Bei der Modellierung wurden keine chemischen Reaktionen des Bentonits, Baryts oder gelöster Stoffe berücksichtigt. Wenn die Möglichkeit besteht, dass bestimmte chemische Reaktionen zu höheren Konzentrationen oder Sedimentationsdicken führen könnten, dann können die chemischen Reaktionen in einem Nachbearbeitungsschritt in die Vorhersage der Konzentrationen und Sedimentationsdicken einbezogen werden.

8 Referenzen

- [1] HaskoningDHV, „Morfodynamiek nabij platform N05-A,” 2020.
- [2] Oranje-Nassau Energie, „Proposed anchor plan Jack-up Rig at NL C.S. 'NO5A' Platform,” 2018.
- [3] Fugro, „Metoccean criteria for the N05A platform,” Fugro, Amsterdam, 2019.
- [4] Fugro, „Metoccean Criteria for the N05A Platform - Final Report,” 2019.
- [5] Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, „Winddata Huibertgat,” 2019.
- [6] „KNMI-HYDRA project - Phase report 7: Estimation of extreme return levels of windspeed,” 2003.
- [7] RVO, „Metoccean Study - Hollandse Kust (noord) Wind Farm Zone,” DHI, RVO, 2019. [Online]. Available: <https://www.metoccean-on-demand.com/#!/main>. [Geopend 2019].
- [8] GEO XYZ Offshore, „Survey Report - N5A Platform Area,” 2019.
- [9] RIKZ, „Variability of near-surface total suspended matter concentrations in the Dutch coastal zone of the North Sea,” Rapport RIKZ/OS/2001.150X., 2001.
- [10] RIKZ, „Atlas of near-surface total suspended matter concentrations in the Dutch coastal zone of the North Sea,” Report RIKZ/2002.059, 2002.
- [11] Arcadis, „Milieueffectrapportage RCR Project Proefboring ten behoeve van gaswinning ten noorden van Schiermonnikoog,” 2014.
- [12] Xodus Group, „Cuttings Dispersion Modelling - ParTrack: Diamant Z1 Exploration Well,” 2017.

Anhang A1

Entwurf des numerischen Modells

A1 Entwurf des numerischen Modells

A1.1 Modell-Domäne und Berechnungsgitter

Das ZUNO-Modell wird im Koordinatensystem RD New aufgebaut. Das Berechnungsgitter der ursprünglichen ZUNO-Modellschematisierung ist in Abbildung 8-1 dargestellt. Es wird die Methode der 'Domain Decomposition' verwendet und das Rechengitter besteht aus drei Teilen: einem groben Rechengitter (coarse), einem mittleren Rechengitter (inter) und einem feinen Gitter (fine). Die Plattform N05- liegt im mittleren Raster, die Rechengitterzellen sind hier etwa 1 km groß. Dies ist zu groß für eine detaillierte Modellierung der Strömung und Ausbreitung der Bohrspülung in der Nähe der Bohrlöcher.

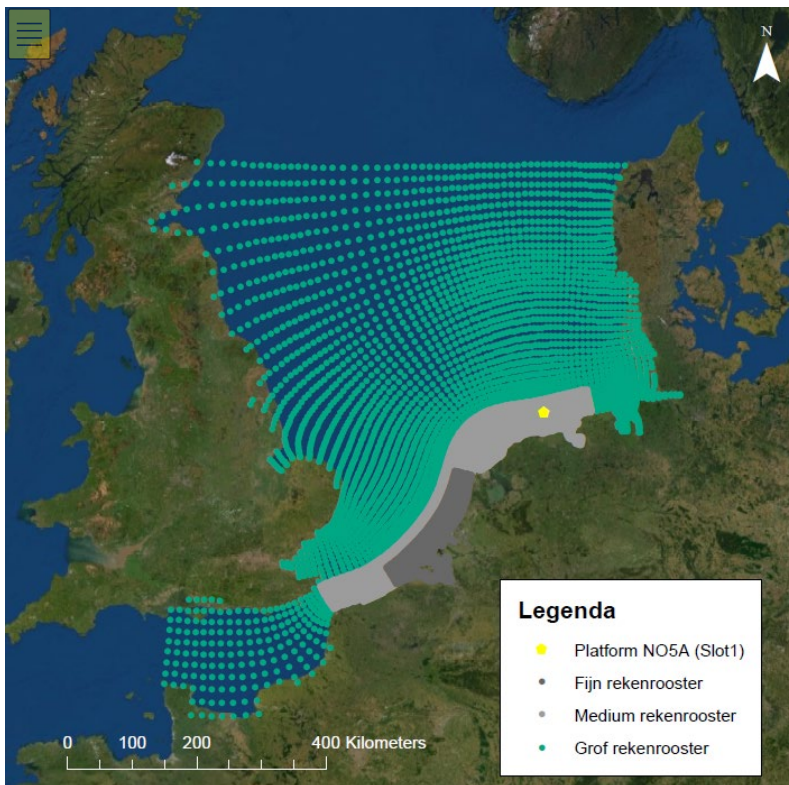


Abbildung 8- 6364: Ursprüngliches Berechnungsgitter des ZUNO-Modells

Deshalb wird das Rechengitter lokal verfeinert, und zwar durch zwei zusätzliche Rechengitter. Die Rechengitterzellen jedes zusätzlichen Rechengitters sind um den Faktor 3 kleiner als die des größeren Gitters. Das resultierende Berechnungsgitter ist in Abbildung 8-2 dargestellt, dieses Gitter besteht aus fünf Bereichen (coarse, fine, interex, nest1 en nest2).

Bei der Erstellung der Domänen wurden die folgenden Schritte befolgt:

- Ein Teil des mittleren Rechengitters wurde ausgeschnitten (dieses angepasste Gitter wird im Folgenden als interex bezeichnet)
- Darin wird ein feineres Rechengitter mit dreimal so vielen Zellen ausgelegt, aus dem ebenfalls ein Stück ausgeschnitten wird (nest1)

- Darin liegt das feinste Rechengitter, mit wiederum dreimal so vielen Zellen (nest2)

Der Rand von nest2 ist mindestens 3,5 km vom Standort der Plattform entfernt. Der genaue Abstand auf verschiedenen Seiten variiert, da der Standort der Plattform nicht in der Mitte einer ursprünglichen Berechnungsgitterzelle liegt. Der Rand von nest1 ist mindestens 11,5 km vom Standort der Plattform entfernt.

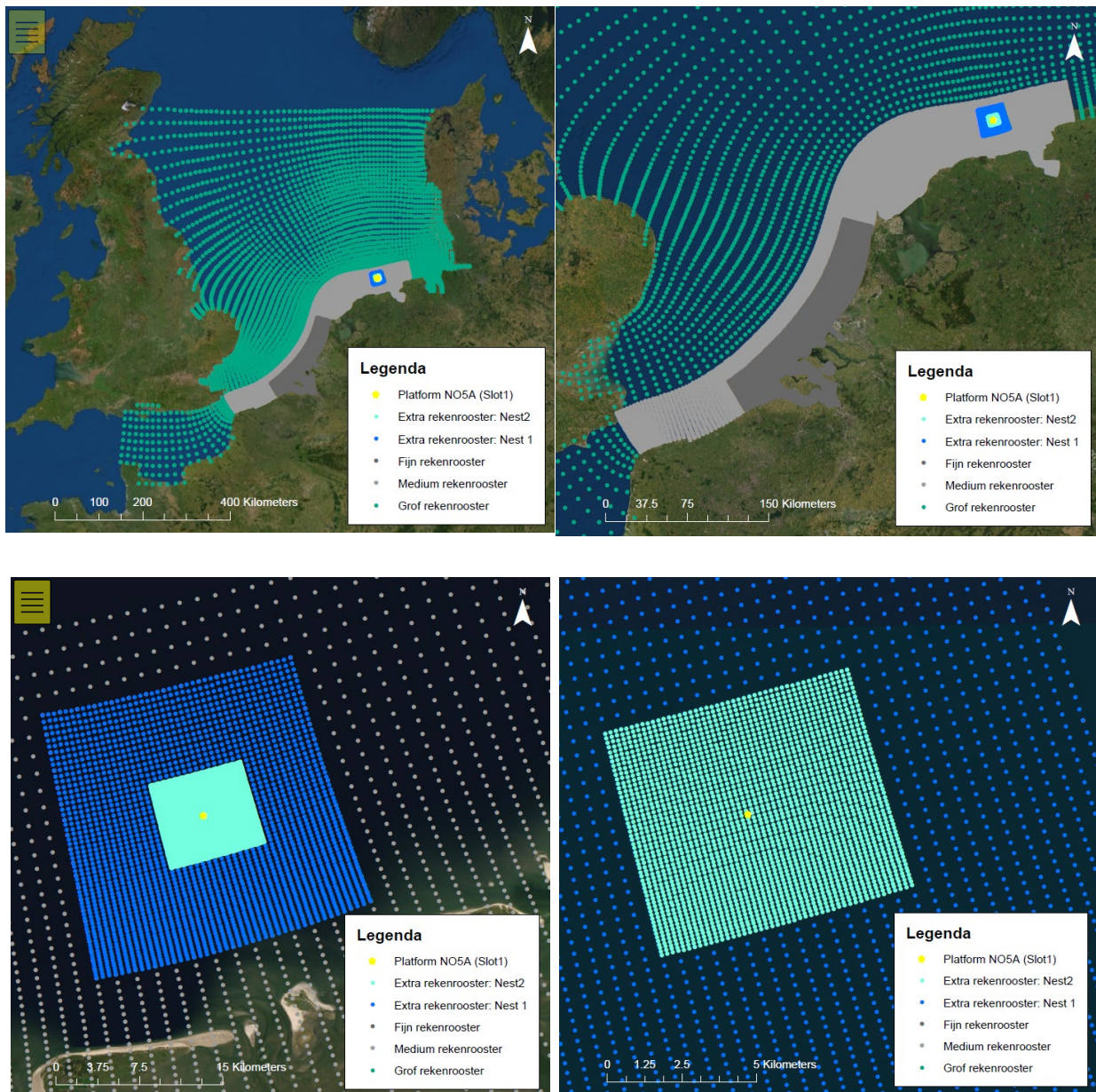


Abbildung 8- 6566: Benutzerdefiniertes Berechnungsgitter.

Die Modellschematisierung ist ein 3D-Modell mit zwölf Schichten über der Wassersäule. Die Verteilung der Wassertiefen über die verschiedenen Schichten ist wie folgt: 4%, 5,6%, 7,8%, 10,8% 10,9%, 10,9%, 10,9%, 10,8%, 7,8%, 5,6% und 4%. Die Schichtdicke variiert also mit der Wassertiefe.

A1.2 Bathymetrie

Das vertikale Referenzniveau ist NAP. Die Bathymetrie des ursprünglichen ZUNO-Modells ist in Abbildung 8-3 dargestellt. Diese Bathymetrie wurde auch in dieser Studie verwendet und wurde zu diesem Zweck auf den verfeinerten Berechnungsrastern interpoliert (siehe Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5):

- Interex: Die Werte in der dep-Datei des ursprünglichen Zwischenberechnungsgitters werden innerhalb der Ausdehnung von nest1 auf -999,999 (NoData) gesetzt.
- Nest1: Die Werte in der dep-Datei des ursprünglichen Zwischenrechengitters werden auf das Rechengitter von nest1 interpoliert.
- Nest2: Die Werte in der dep-Datei des ursprünglichen Rechengitters werden auf das Rechengitter von nest2 interpoliert.

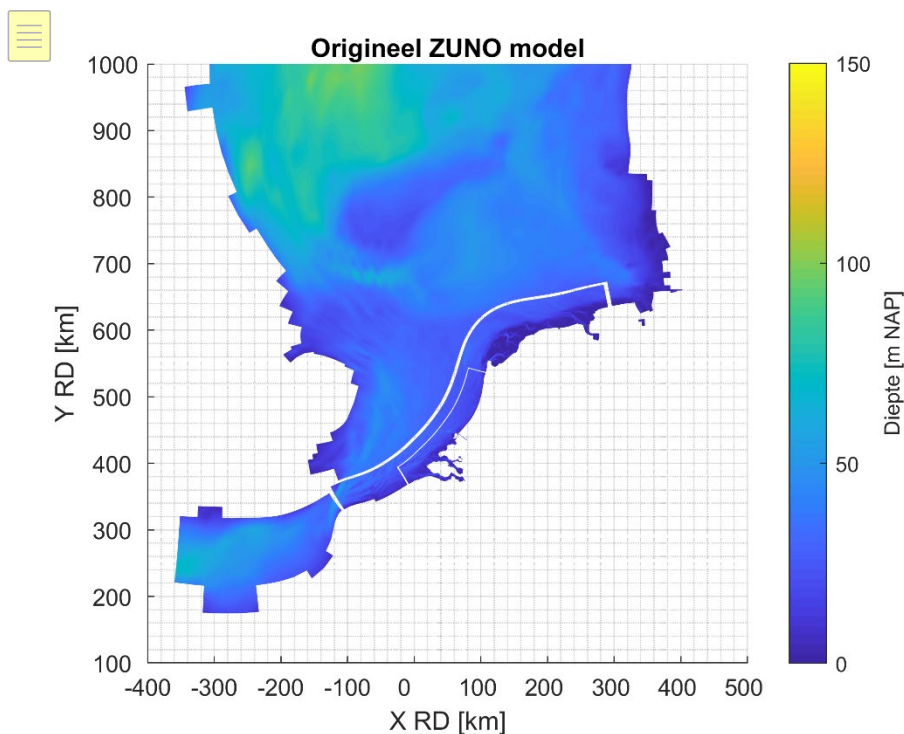


Abbildung 8- 67: Bathymetrie des ursprünglichen ZUNO-Modells

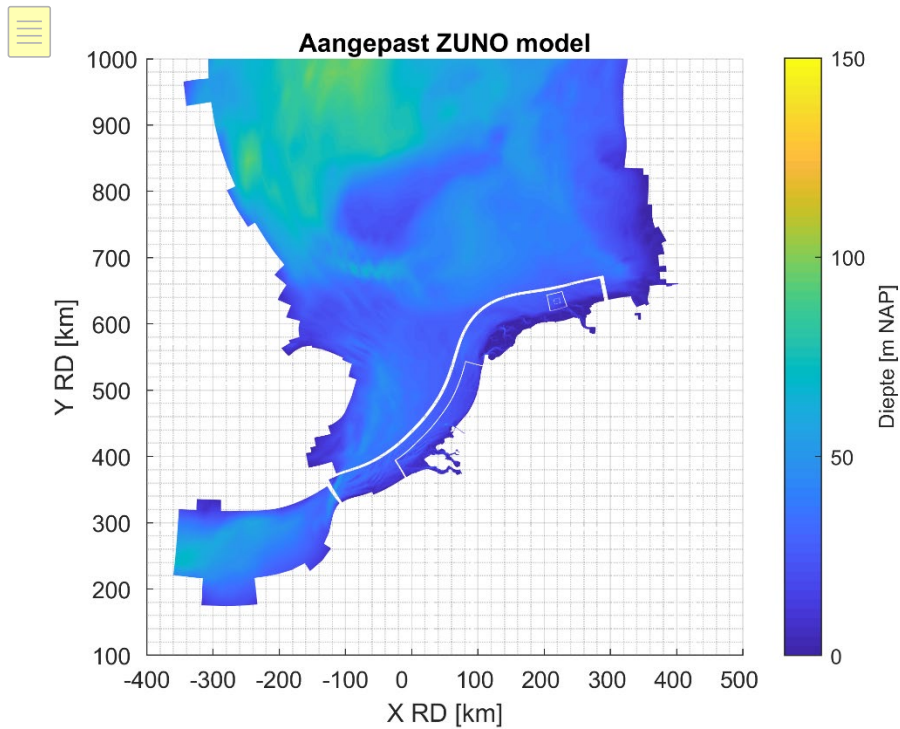


Abbildung 8- 6869: Bathymetrie des modifizierten ZUNO-Modells

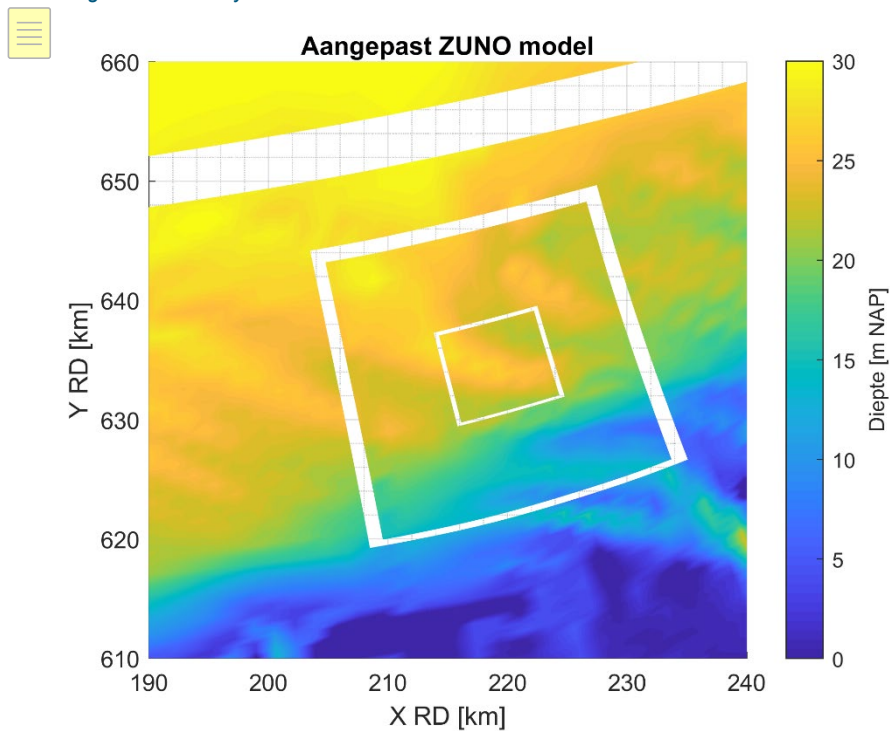


Abbildung 8- 7071: Bathymetrie des modifizierten ZUNO-Modells um Nest2 und Nest1

A1.3. Zeitschritt

Im modifizierten Modell erwies sich ein Zeitschritt von 1 Minute, statt der 4 Minuten wie im ursprünglichen ZUNO-Modell, als am besten geeignet. Ein Grund für diese Reduzierung des Zeitschritts im Vergleich zum Originalmodell ist die lokale Verfeinerung des Rechengitters.

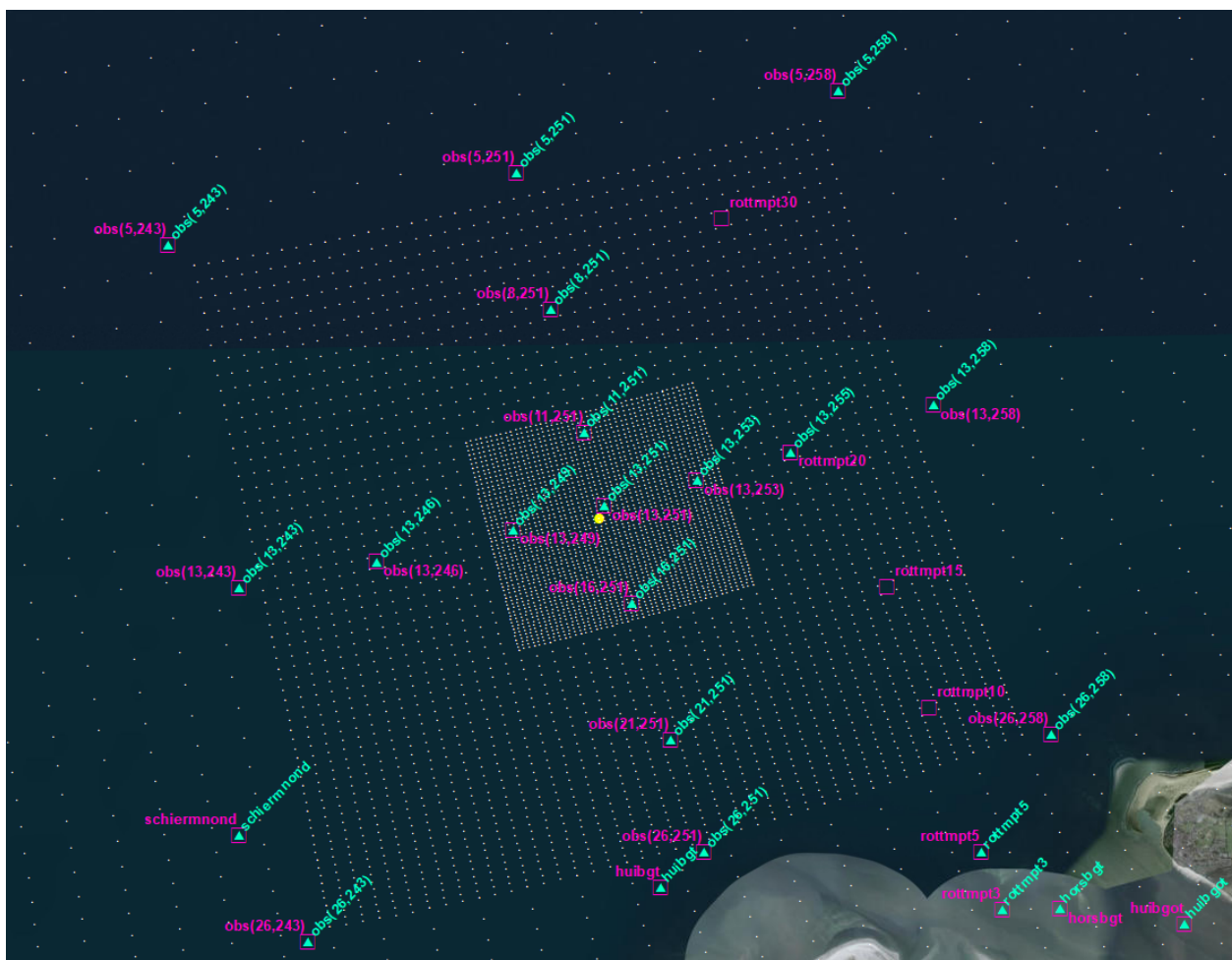
A1.4 Beobachtungspunkte

A1.4.1 Zur Validierung

Im ursprünglichen ZUNO-Modell gibt es mehrere Beobachtungspunkte. Auf diese Punkte werden Zeitreihen der Output-Parameter geschrieben. Um das modifizierte Modell richtig mit dem ursprünglichen ZUNO-Modell zu vergleichen, werden zusätzliche Beobachtungspunkte hinzugefügt. Diese Beobachtungspunkte sind nach den Indizes der Berechnungsgitterzellen des ursprünglichen Interkalibrierungsgitters benannt. Um die Kante mit dem nest1-Rechengitter werden 8 Beobachtungspunkte hinzugefügt, im nest1-Rechengitter vier und im nest2-Rechengitter 5. Die m- und n-Koordinaten der Beobachtungspunkte sind in Tabelle 8-1 und die räumliche Verteilung der Beobachtungspunkte in Abbildung 8-6 dargestellt.

Tabelle 8- 16: Standorte der Beobachtungspunkte

Original ZUNO-Modell		Modifiziertes ZUNO-Modell					
Inter		Interex		Nest1		Nest2	
Name	Indizes (m,n)	Name	Indizes	Name	Indizes	Name	Indizes
Obs(5,243)	5, 243	Obs(5,243)	5, 243				
Obs(5,251)	5, 251	Obs(5,251)	5, 251				
Obs(5,258)	5, 258	Obs(5,258)	5, 258				
Obs(13,243)	13, 243	Obs(13,243)	13, 243				
Obs(13,258)	13, 258	Obs(13,258)	13, 258				
Obs(26,243)	26, 243	Obs(26,243)	26, 243				
Obs(26,251)	26, 251	Obs(26,251)	26, 251				
Obs(26,258)	26, 258	Obs(26,258)	26, 258				
Obs(8,251)	8, 251			Obs(8,251)	9, 24		
Obs(13,246)	13, 246			Obs(13,246)	24,9		
Rottmpt20	13, 255			Obs(13,255)	24, 36		
Obs(21,251)	21, 251			Obs(21,251)	48,24		
Obs(13,249)	13, 249					Obs(13,249)	6, 24
Obs(13,251)	13, 251					Obs(13,251)	24, 6
Obs(13,253)	13, 253					Obs(13,253)	24, 24
Obs(16,251)	16, 251					Obs(16,251)	24, 42
Obs(11,251)	11, 251					Obs(11,251)	51, 24



A1.5 Anfangsbedingungen

Im ursprünglichen ZUNO-Modell werden so genannte Restart-Dateien verwendet: Diese Dateien enthalten räumlich variierende Anfangsbedingungen. Diese werden pro Berechnungsraster erstellt (drei Berechnungsraster im Originalmodell) und können daher nicht einfach für das modifizierte Modell verwendet werden. Darüber hinaus werden im angepassten Modell zusätzliche Stoffe modelliert, nämlich der Baryt, der Bentonit und die gelösten Stoffe. In den ursprünglichen Restart-Dateien des ursprünglichen ZUNO-Modells wurden für diese zusätzlichen Stoffe keine Anfangsbedingungen definiert.

Daher wurden die ursprünglichen Restart-Dateien modifiziert: die zusätzlichen Stoffe (Baryt, Bentonit und gelöste Stoffe) wurden hinzugefügt und neue Restart-Dateien für das modifizierte Berechnungsgitter mittels Interpolation erstellt.

Es wurde eine Simulation für das gesamte Jahr 2015 mit den angepassten Restart-Dateien gestartet. Die Restart-Dateien für jedes der drei Szenarien wurden aus den Ergebnissen dieser einjährigen Simulation abgeleitet, da sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr 2015 beginnen.

A.1.6 Bodenrauigkeit

Die Bodenrauigkeit bestimmt, wie viel Widerstand die Strömung in Bodennähe erfährt. Die Bodenrauigkeit wird nach der Fließformel berechnet, wobei der Manning-Koeffizient n angegeben werden muss. Um das Untersuchungsgebiet herum hat n (im bestehenden ZUNO-Modell) einen konstanten Wert von $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$ in beiden Richtungen. Für das modifizierte Rechengitter, sowohl das interex-, nest1- als auch nest2-Rechengitter, wurde der gleiche Wert für n angenommen, siehe Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8.

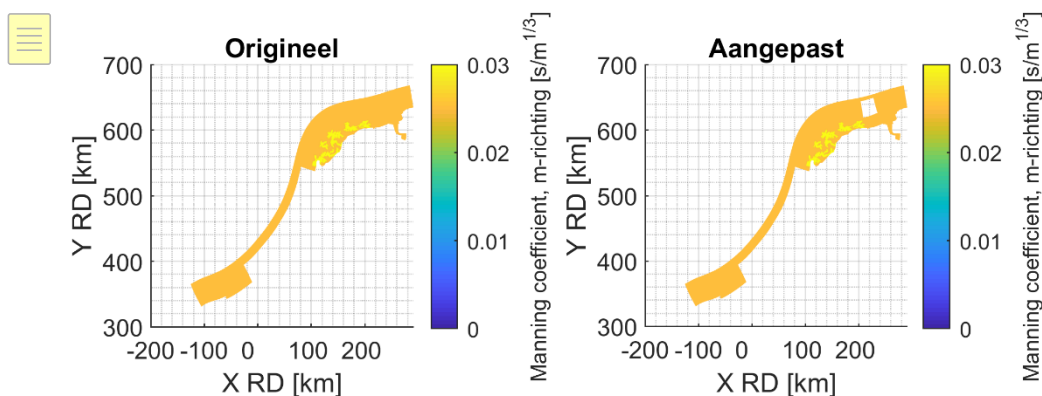


Abbildung 8- 73: Manning-Koeffizient in m-Richtung für das ursprüngliche und modifizierte Rechengitter

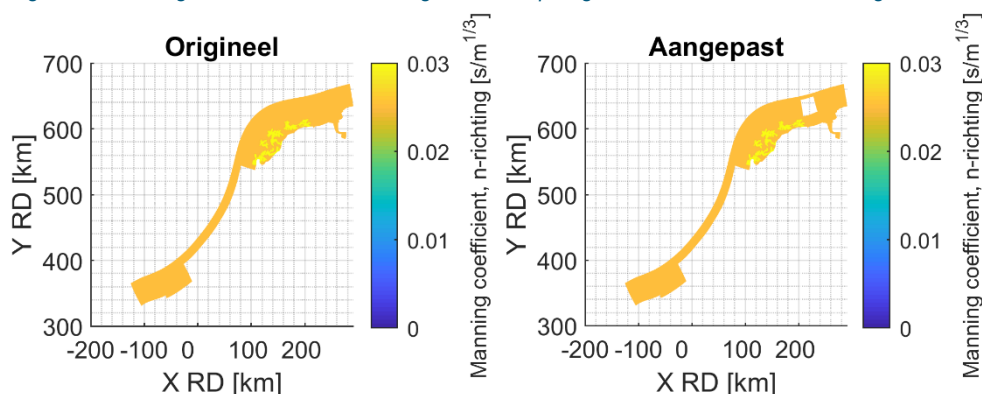


Abbildung 8- 74: Manning-Koeffizient in n-Richtung für das ursprüngliche und modifizierte Rechengitter

A1.7 Wirbelviskosität und Diffusivität

A1.7.1 Viskosität

Beschreibung der Testfälle

Turbulenzen und andere kleinskalige Strömungszirkulationen, die kleiner als die Größe einer Rechengitterzelle sind und somit nicht numerisch mit den Strömungsgleichungen gelöst werden, werden in Delft3D über den Parameter 'Wirbelviskosität' berücksichtigt. Im ursprünglichen ZUNO-Modell wurden Viskositäten von 5, 2,5 und 1,25 m^2/s für das grobe, mittlere bzw. feine Rechengitter verwendet. Diese Viskositäten sind also mit der Größe der Rechengitterzellen skaliert. An den Übergängen zwischen den verschiedenen Rechengittern wird jedoch eine höhere Viskosität von 1000 m^2/s verwendet, um numerische Instabilität zu vermeiden. Dadurch wird sichergestellt, dass der Übergang des Flusses von einem Berechnungsgitter zum anderen einen fließenden Verlauf hat.

Um einen fließenden Übergang zwischen den verfeinerten Zusatzrechengittern und dem ursprünglichen Rechengitter zu erhalten, müssen an diesen Rändern höhere Werte für die Viskosität verwendet werden. Außerdem muss eine Auswahl für eine Viskosität im Rest des zusätzlichen Berechnungsgitters getroffen werden. Das Ziel dieser Wahl ist es, den Fluss im modifizierten ZUNO-Modell so ähnlich wie möglich zum ursprünglichen ZUNO-Modell zu bekommen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene räumliche Konfigurationen der Viskosität für das modifizierte Modell getestet. Diese sind in der Tabelle 8-2 aufgelistet und in Abbildung 8-9, Abbildung 8-11, und Abbildung 8-12 dargestellt. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Konfigurationen und die Wahl einer von ihnen werden im Folgenden diskutiert.

Tabelle 8- 17: Wirbelviskositätswerte für verschiedene Testsimulationen

Version		Wirbelviskosität [m^2/s]				
		Grob	Fein	Medium	Nest1	Nest2
Edy v4	Äußere Kante	-	1000	1000	250	250
	Mitte	5	1.25	2.5	10	10
	Innere Kante	250	-	250	250	-
Edy v5	Äußere Kante	-	1000	1000	10	10
	Mitte	5	1.25	2.5	10	10
	Innere Kante	250	-	2.5	10	-
Edy v6	Äußere Kante	-	1000	1000	250	250
	Mitte	5	1.25	2.5	10	10
	Innere Kante	250	-	1000	1000	-
Edy v7	Äußere Kante	-	1000	1000	2.5	2.5
	Mitte	5	1.25	2.5	2.5	2.5
	Innere Kante	250	-	2.5	2.5	-
Edy v8	Äußere Kante	-	1000	1000	250	250
	Mitte	5	1.25	2.5	1.25	0.625
	Innere Kante	250	-	1000	1000	-

Edy v9	Äußere Kante	-	1000	1000	250	250
	Mitte	5	1.25	2.5	1.25	0.625
	Innere Kante	250	-	1000 (doppelt)	1000 (doppelt)	-

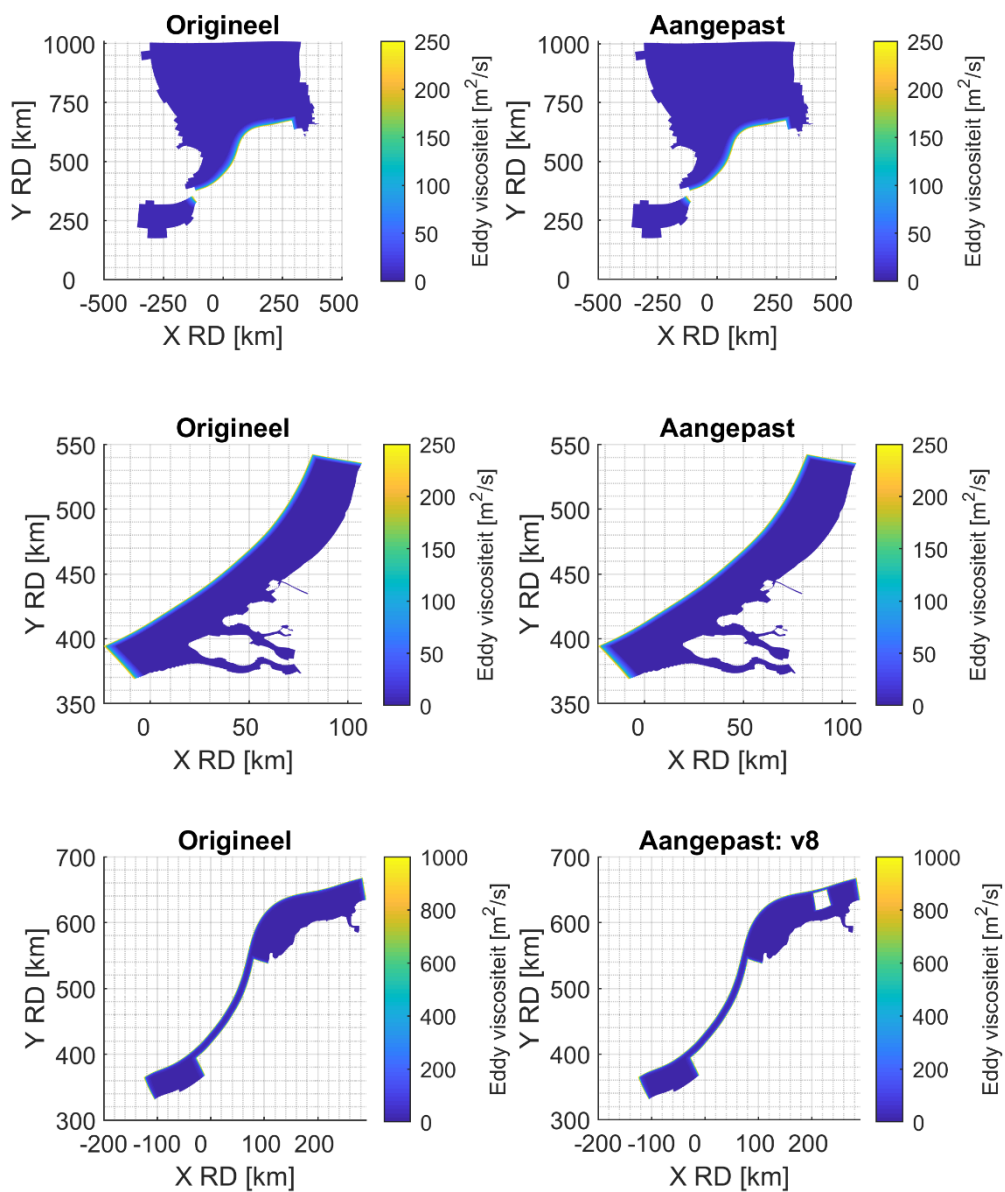


Abbildung 8- 7576: Wirbelviscositeit des groben, mittleren und feinen Rechengitters (sowohl des ursprünglichen als auch des modifizierten ZUNO-Modells)

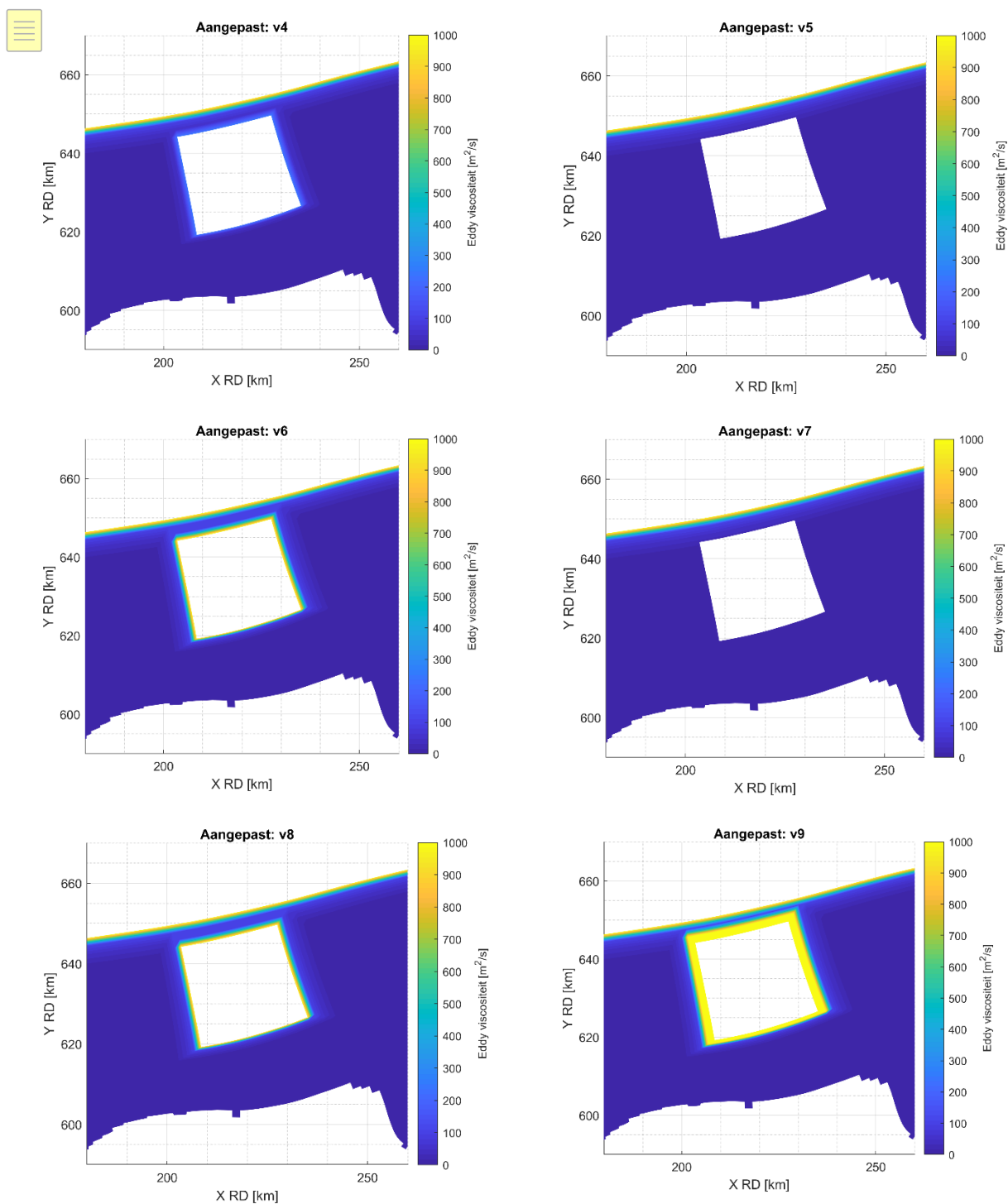


Abbildung 8- 7778: Wirbelviskosität des Medium-Rechengitters um die geschachtelten Rechengitter

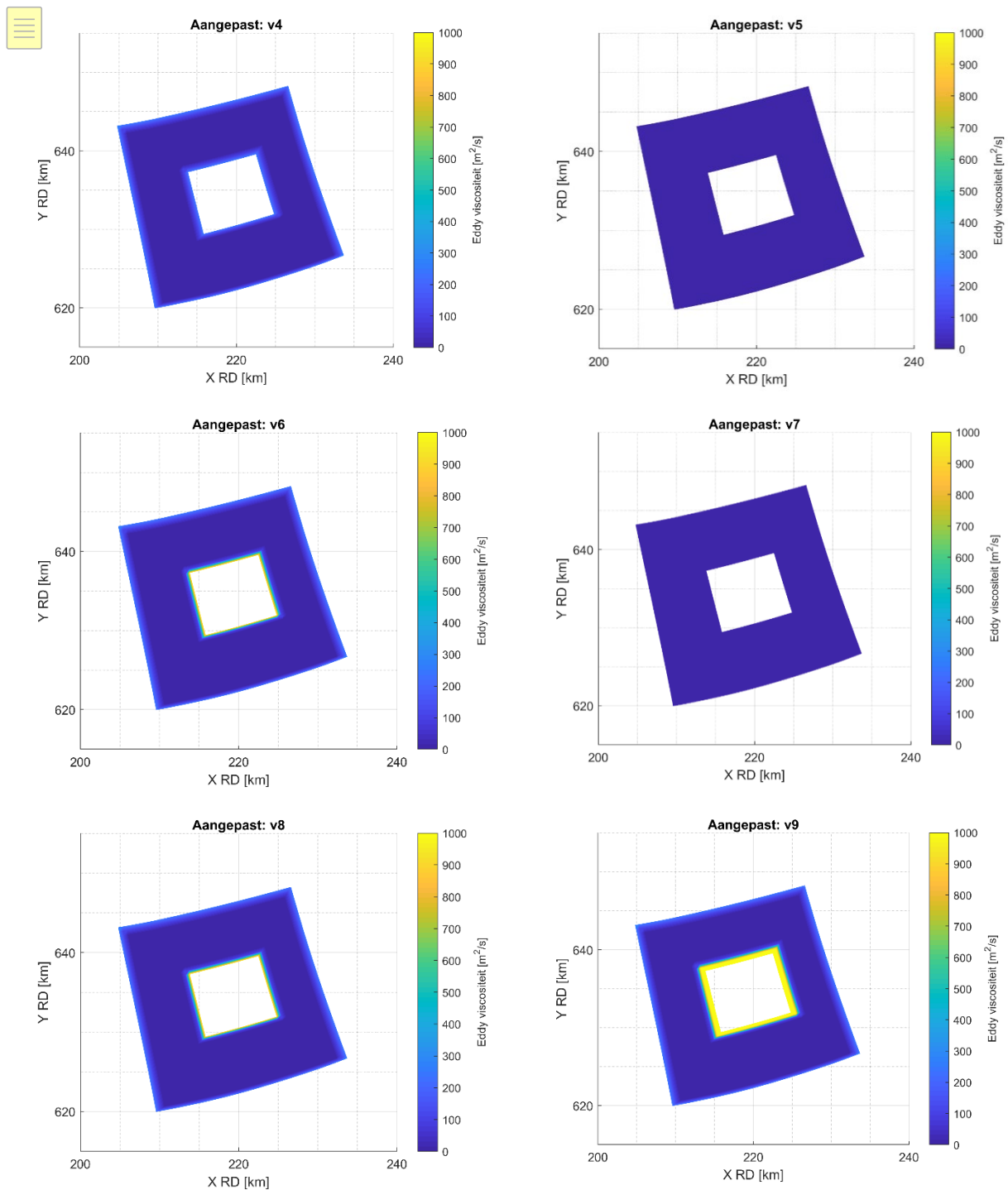


Abbildung 8-79: Wirbelviskosität von nest1

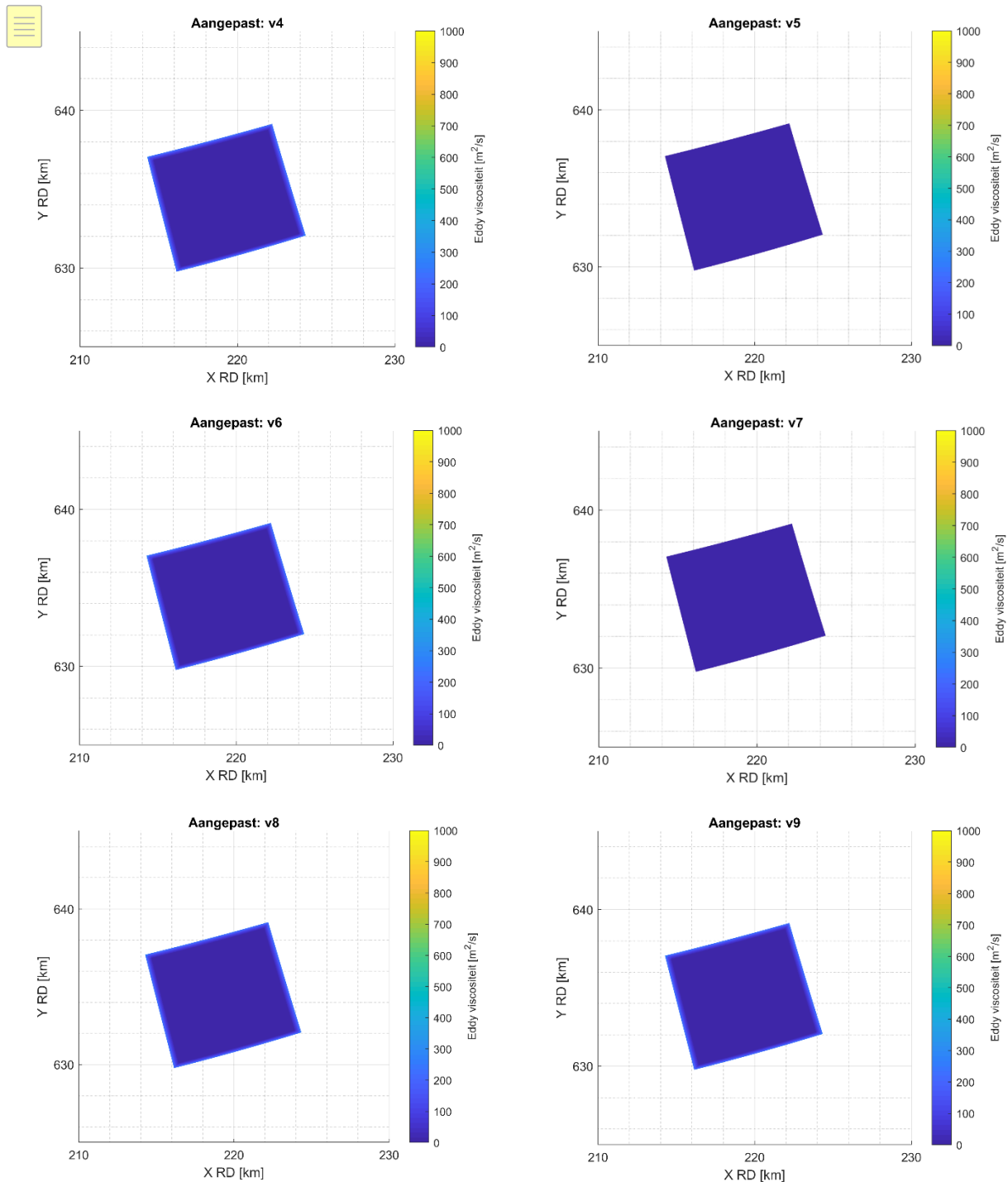


Abbildung 8- 80: Wirbelviskosität von nest2

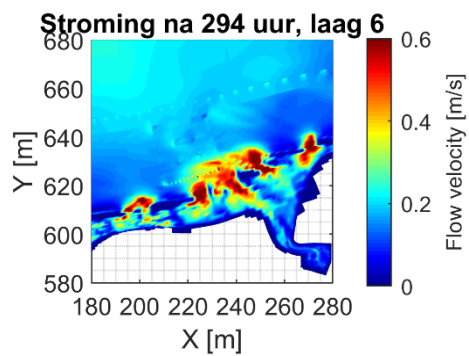
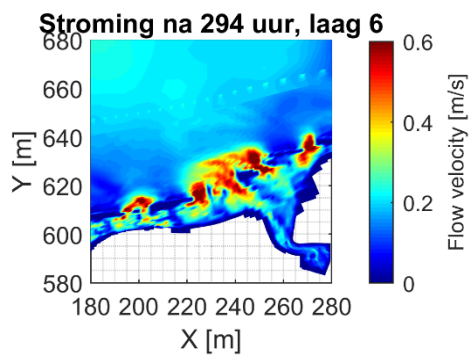
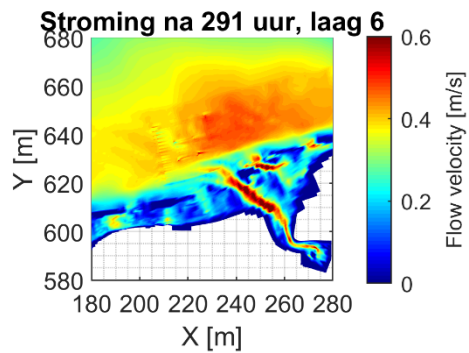
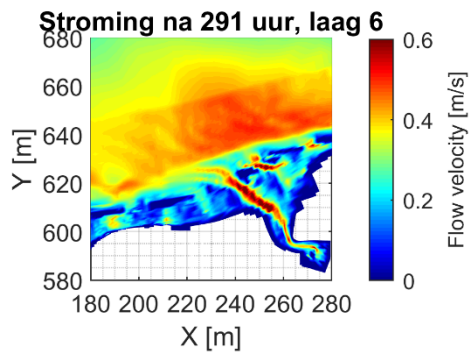
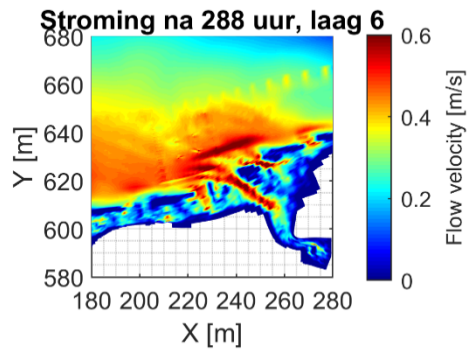
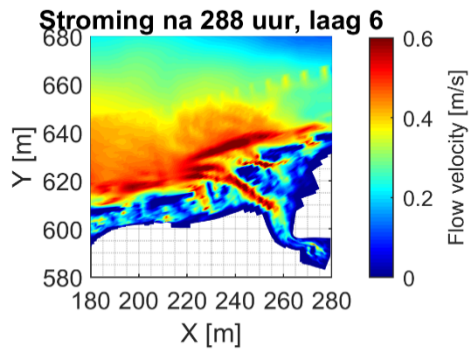
Ergebnisse und Wahl des Viskositätswertes

Es wurden räumliche Abbildungen der Strömung für die verschiedenen Optionen der Wirbelviskositätskonfiguration erstellt. Diese sind in Abbildung 8-13, Abbildung 8-14, Abbildung 8-17, Abbildung 8-18 und Abbildung 8-18 zu vier Zeitpunkten für die Schicht auf halber Höhe der Wassersäule (Schicht 6) dargestellt:

- Nach 288 Stunden: steigendes Wasser

- Nach 291 Stunden: Hochwasser
- Nach 294 Stunden: sinkendes Wasser
- Nach 297 Stunden: Niedrigwasser

Edy v7



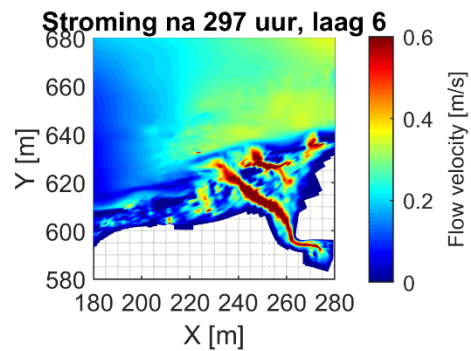
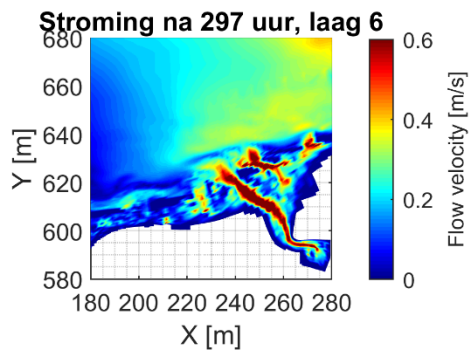
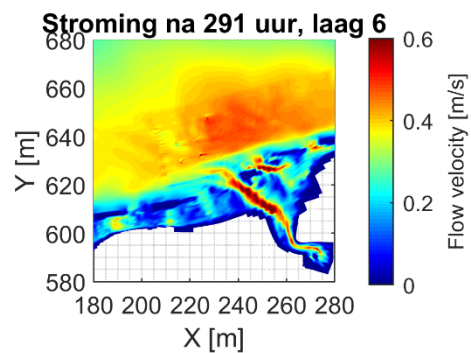
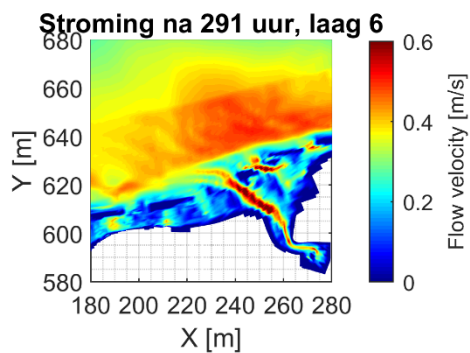
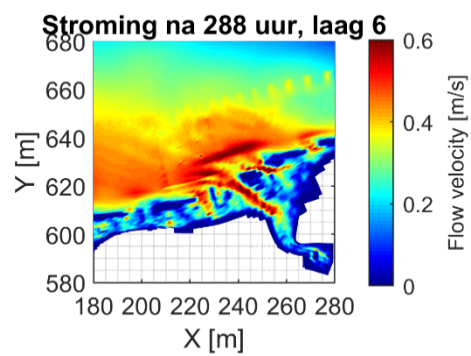
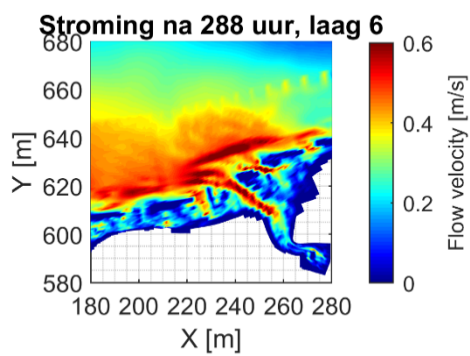


Abbildung 8 -8182: Stroming für die Konfiguration Edy v7. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts das verfeinerte Modell.
Edy v5



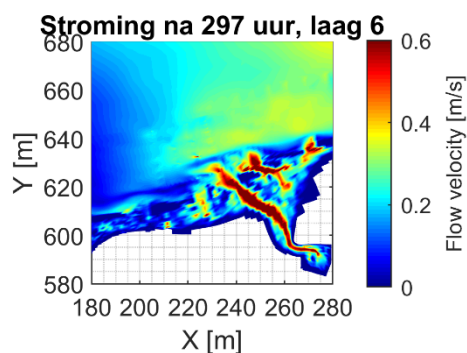
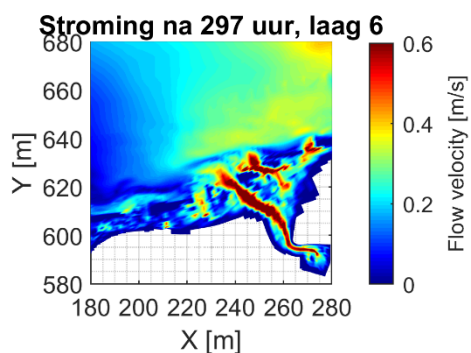
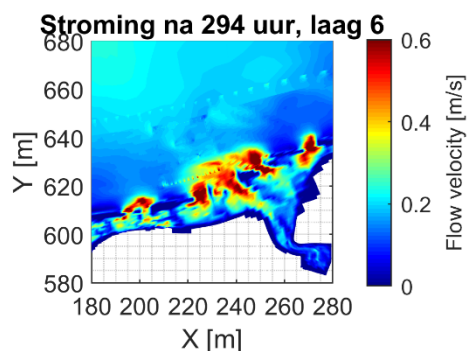
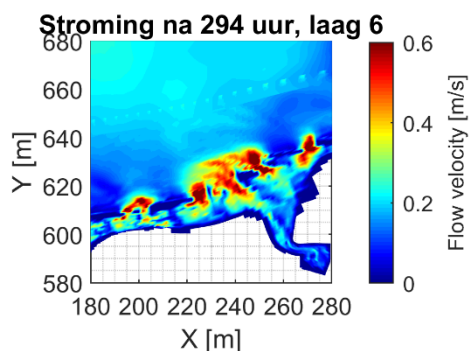
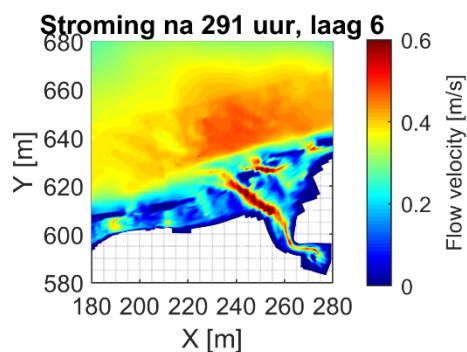
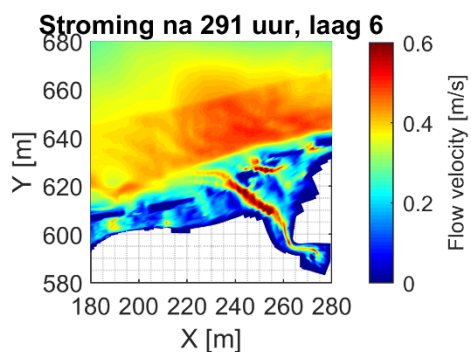
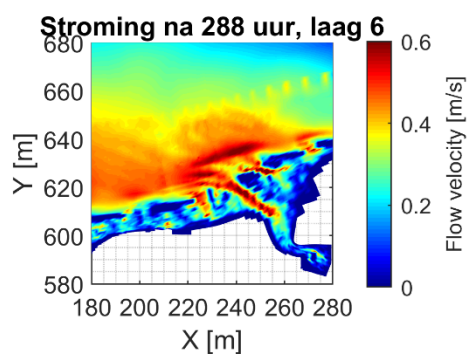
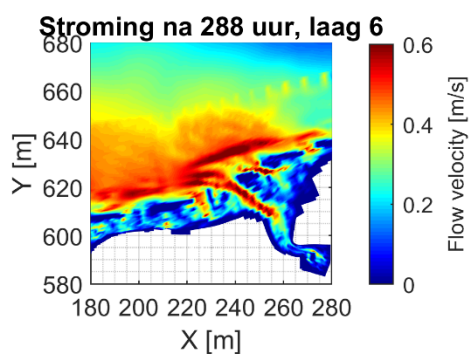


Abbildung 8- 8384: Strömung für die Konfiguration Edy v5. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts ist das verfeinerte Modell.
Edy v4



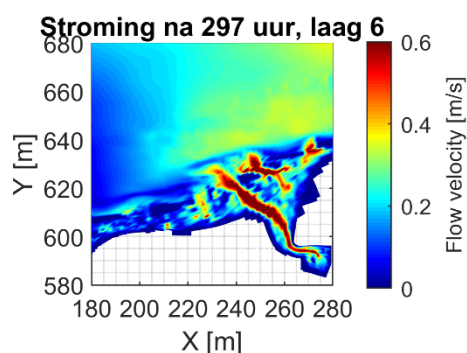
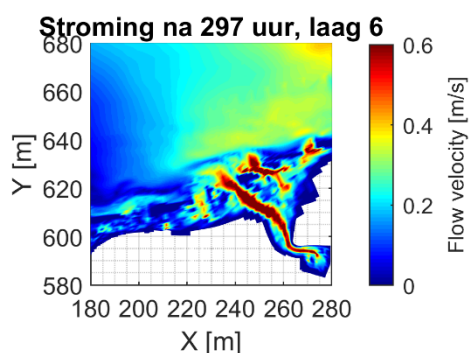
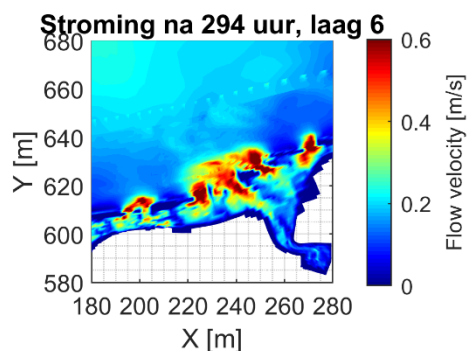
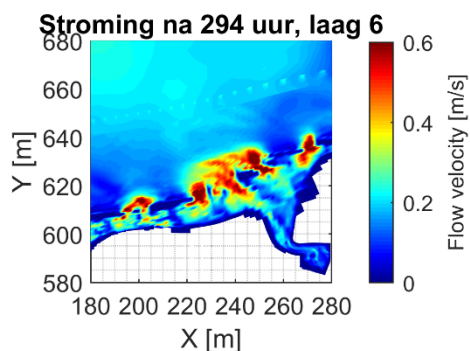
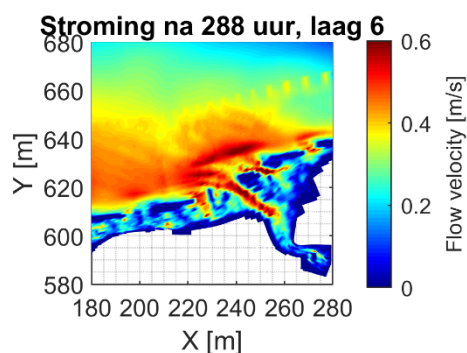
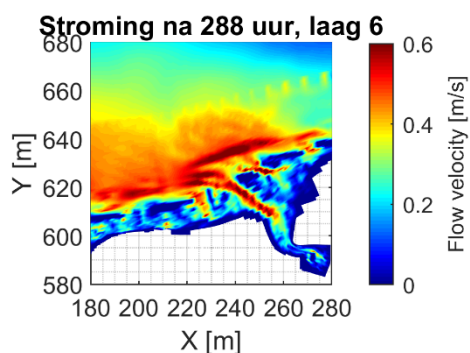


Abbildung 8- 8586: Strömung für die Konfiguration Edy v4. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts ist das verfeinerte Modell.

Edy v6



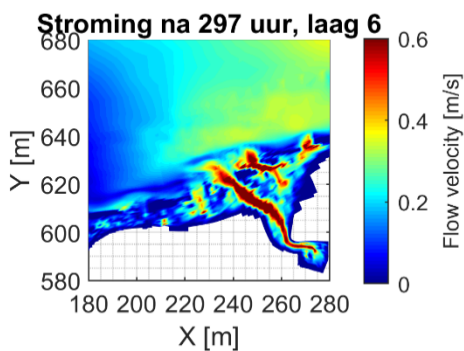
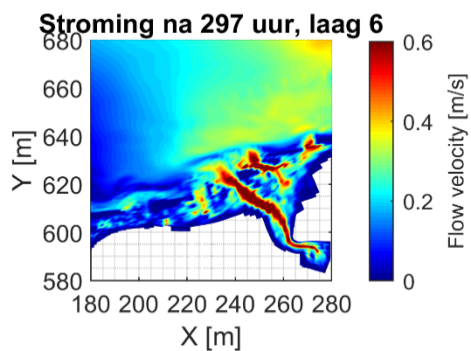
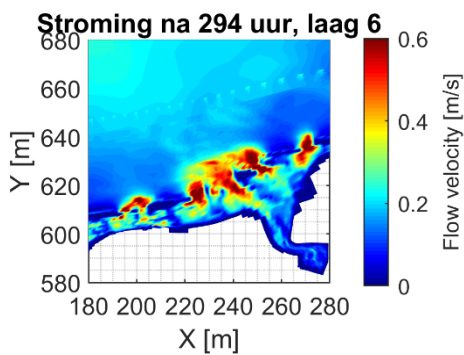
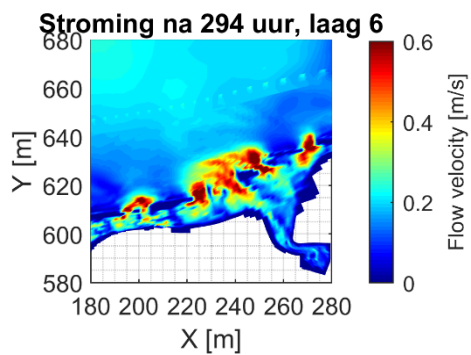
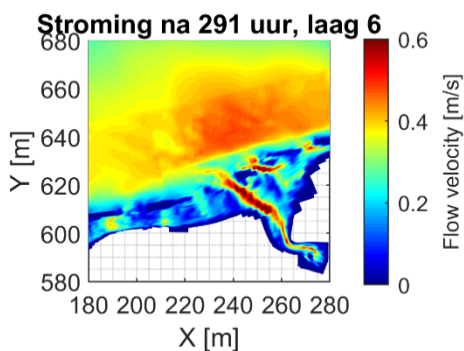
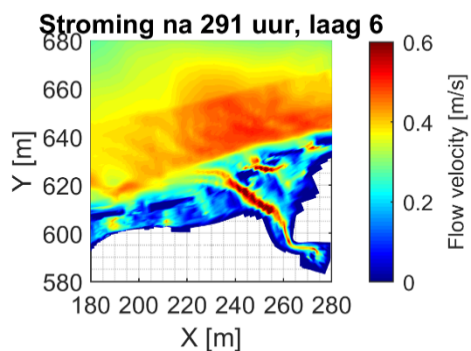
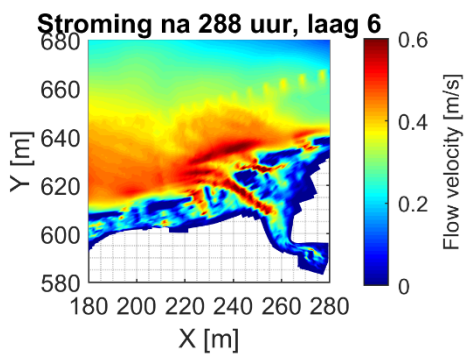
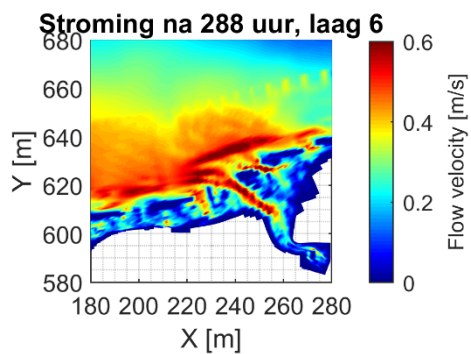


Abbildung 8- 87: Strömung für die Konfiguration Edy v6. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts ist das verfeinerte Modell.
Edy v8



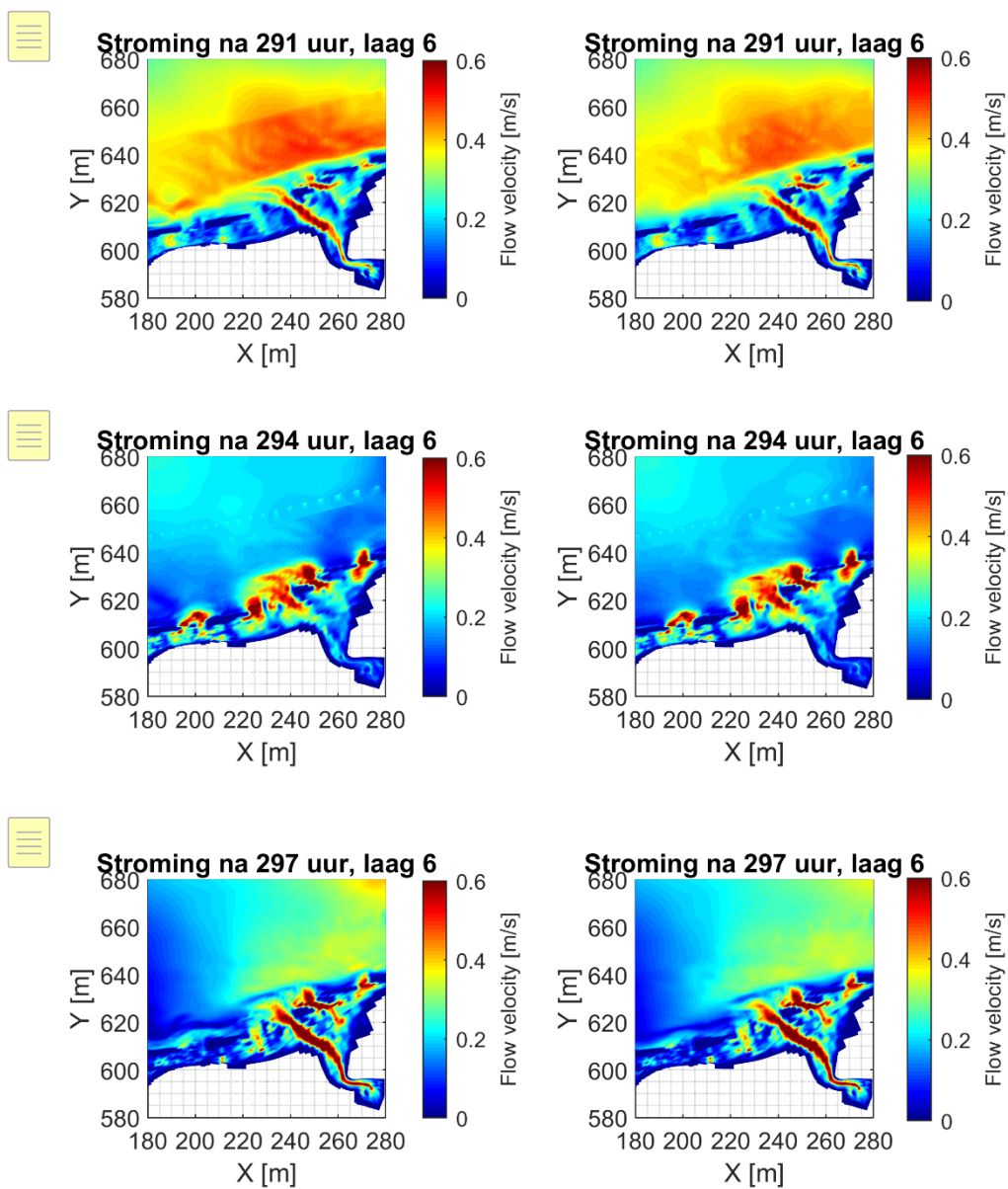
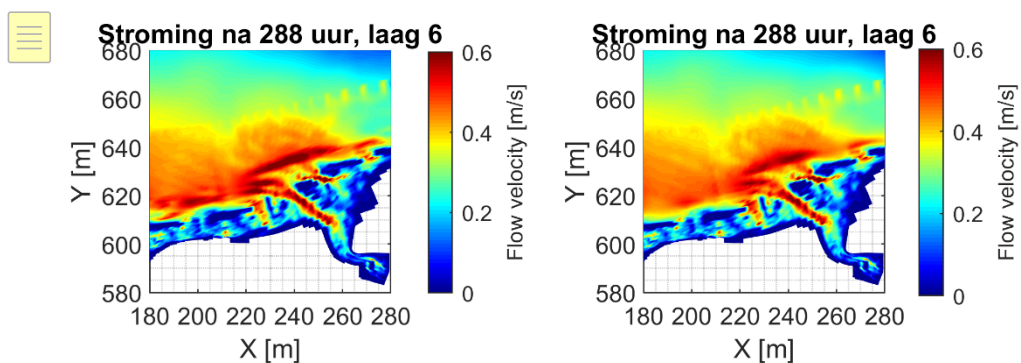


Abbildung 8- 88: Strömung für die Konfiguration Edy v8. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts ist das verfeinerte Modell.
Edy v9



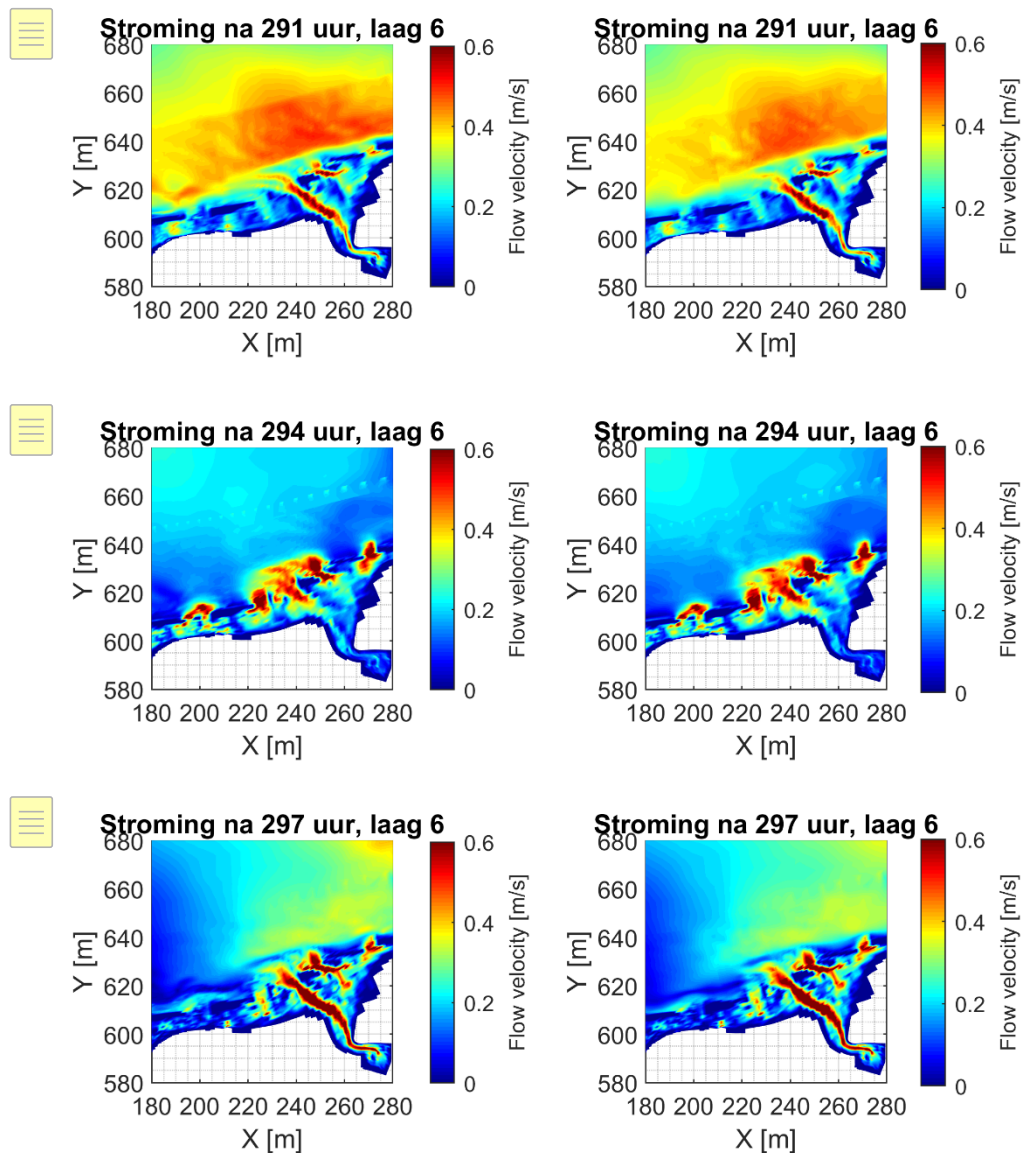


Abbildung 8- 89: Strömung für die Konfiguration Edy v9. Links ist das ursprüngliche Modell, rechts ist das verfeinerte Modell.

Aus den räumlichen Strömungsbildern lässt sich folgendes ableiten:

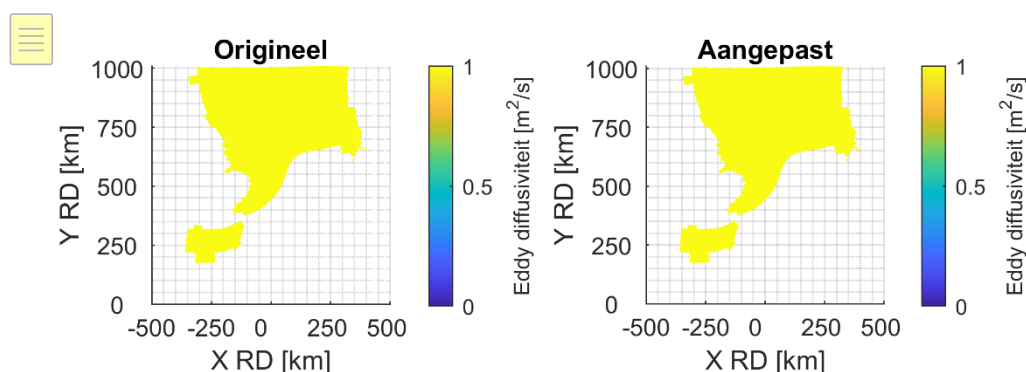
- Bei den Simulationen mit Edy Version 5 und 7 spiegeln sich die Kanten und Scheitelpunkte der verschachtelten Rechengitter deutlich im Strömungsbild wider, wobei hier unwahrscheinliche lokale Strömungsmuster auftreten.
- Dies verbessert sich bei der Simulation mit Edy Version 4, wo die Kante im Strömungsbild leicht sichtbar ist.
- Die Simulationen mit Edy Version 6, 8 und 9 ergeben sehr ähnliche Strömungsbilder, bei denen die Kanten der verschachtelten Rechengitter nicht oder kaum reflektiert werden.

Am Ende wurde die Simulation mit Edy Version 8 als die beste ausgewählt, und zwar aus den folgenden Gründen:

- In der Simulation Edy Version 6 wurde eine Wirbelviskosität von $10 \text{ m}^2/\text{s}$ innerhalb der geschachtelten Rechengitter verwendet. Dies ist im extremen Minimum für solche kleinen Rechengitterzellen, zumal die Wirbelviskosität im ursprünglichen ZUNO-Modell mit der Rechengitterzellengröße skaliert ist ($2,5 \text{ m}^2/\text{s}$ im mittleren Rechengitter, $1,25 \text{ m}^2/\text{s}$ im feinen Rechengitter).
- Bei der Simulation mit Edy Version 8 wurde ebenfalls eine skalierte Viskosität innerhalb der verschachtelten Rechengitter verwendet: $1,25$ und $0,625 \text{ m}^2/\text{s}$ für nest1 bzw. nest2. Dies entspricht dem Ansatz, der im ursprünglichen ZUNO-Modell verwendet wurde.
- Bei der Simulation mit Edy Version 9 wurde eine doppelte Viskositätsrand von $1000 \text{ m}^2/\text{s}$ an den Übergängen zwischen den geschachtelten Rechengittern verwendet. Dies verbessert die Ergebnisse nicht wesentlich und ist daher überflüssig.

A1.7.2 Diffusivität

Die Wirbeldiffusivität ist ein Maß für die Durchmischung. Im ursprünglichen ZUNO-Modell wurde für alle Berechnungsgitter eine konstante Wirbeldiffusivität von $1 \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet. Dies wurde für das modifizierte Rechengitter übernommen (siehe Abbildung 8-19 und Abbildung 8-20).



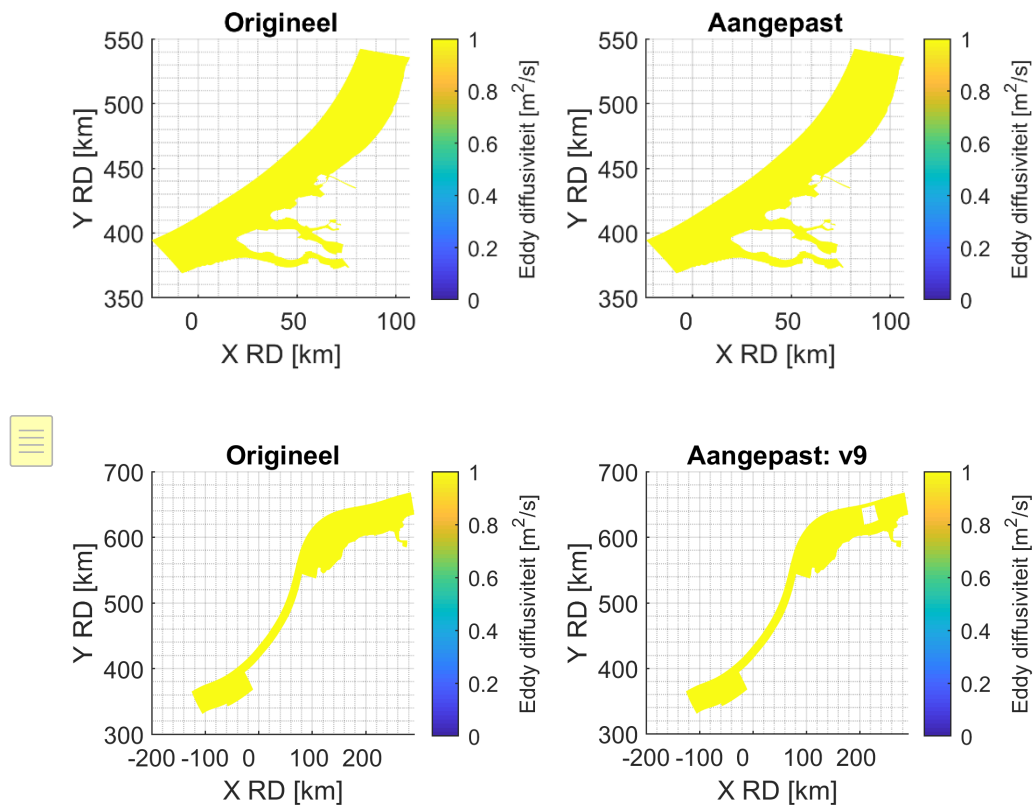
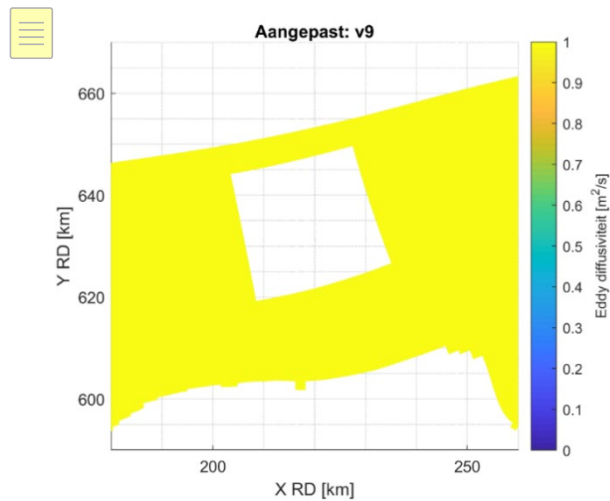


Abbildung 8- 9091: Wirbeldiffusiviteit des groben, mittleren und feinen Rechengitters



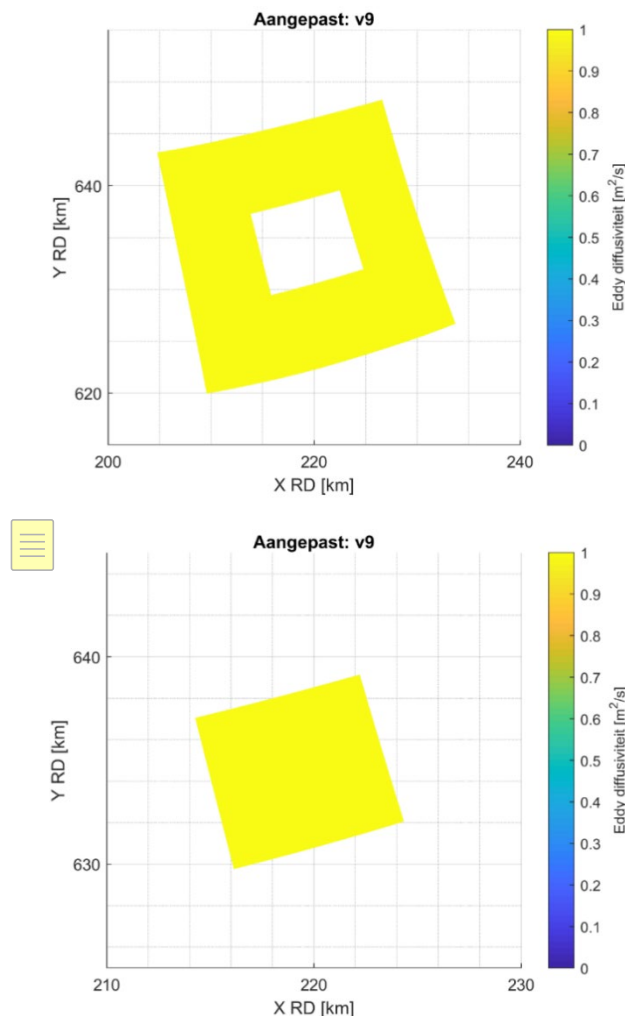


Abbildung 8- 9293: Wirbeldiffusivität um die verschachtelten Rechengitter

A1.8 Salinität und Temperatur

Um die räumliche Verteilung von Salzgehalt und Wassertemperatur des Wassers korrekt zu simulieren, wurden die Restart-Dateien für Salzgehalt und Temperatur aus dem ursprünglichen ZUNO-Modell auf das modifizierte Berechnungsgitter interpoliert, siehe Abschnitt A1.5. Dadurch wird sichergestellt, dass die simulierten Salinitäten und Temperaturen in guter Übereinstimmung mit dem ursprünglichen ZUNO-Modell sind, siehe Abbildung 8-21 und Abbildung 8-22. Es wird deutlich, dass nach einem Tag die Salinitäten und Temperaturen an den gezeigten Stellen weniger als 1 % voneinander abweichen, so dass das modifizierte ZUNO-Modell bei Verwendung der interpolierten Restart-Dateien kaum Einspielzeit für Salinität und Temperatur benötigt.

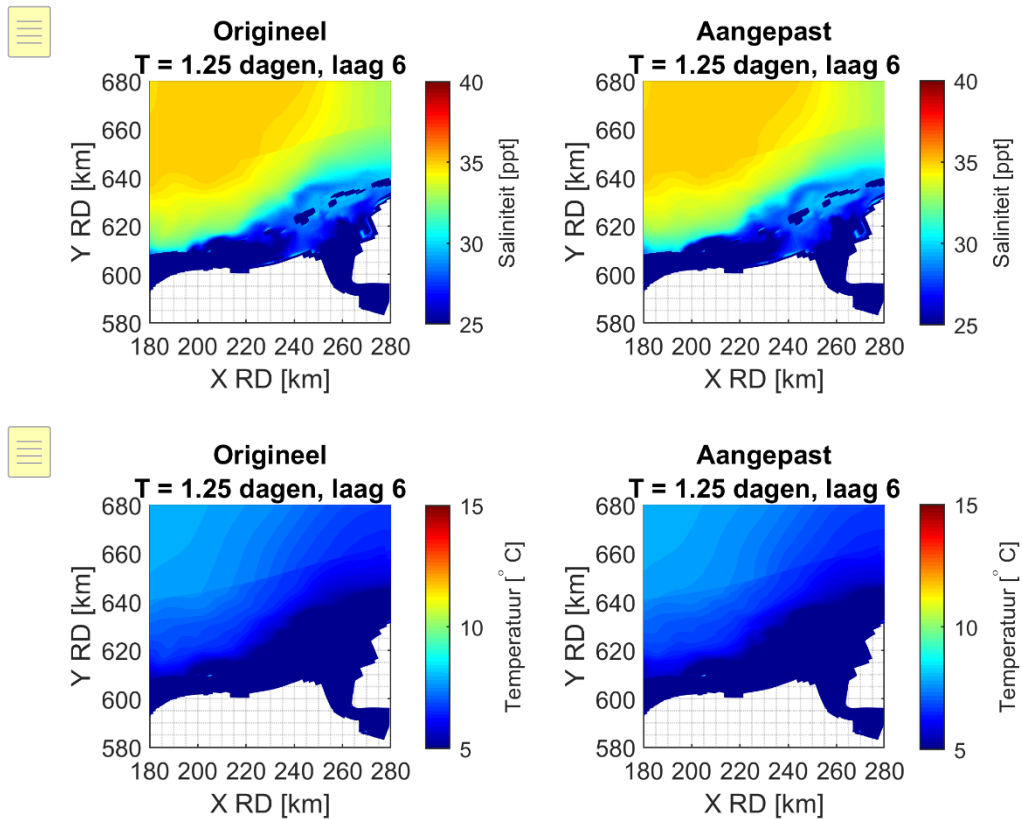


Abbildung 8- 9495: Vergleich des Salzgehalts und der Wassertemperatur zwischen dem ursprünglichen und dem modifizierten ZUNO-Modell nach etwa einem Tag der Simulation (Anfang Januar 2015)

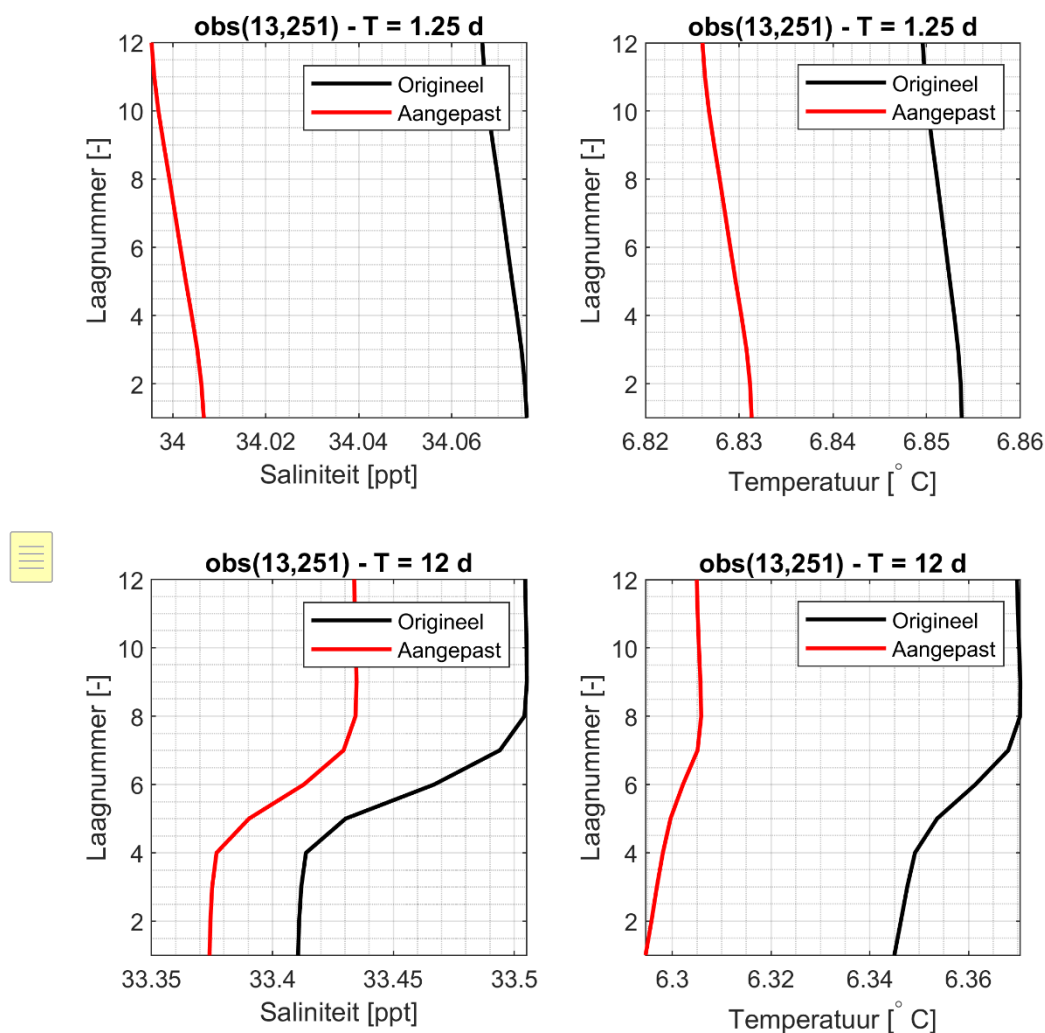


Abbildung 8- 9697: Vergleich von Salzgehalt und Wassertemperatur zwischen dem ursprünglichen und dem modifizierten ZUNO-Modell am Standort der Plattform über der Tiefe, Anfang Januar 2015. Schicht 1 befindet sich in der Nähe der Wasseroberfläche, Schicht 12 in der Nähe des Bodens.

A1.9 Randbedingungen

Die hydraulischen Randbedingungen des Modells für das Jahr 2015 wurden mit dem ZUNO-Modell geliefert. Diese werden auch in dem modifizierten ZUNO-Modell verwendet. Für die folgenden Parameter sind Randbedingungen vorhanden:

- Gezeiten
- Durchflussmengen aus Flüssen (mit Salzgehalt und Temperatur)
- Atmosphärischer Druck
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Bewölkung

Zusätzlich zu den hydrodynamischen Prozessen simuliert das Modell den Salzgehalt und die Temperatur des Wassers (und damit seine Dichte) und ein Wärmemodell wird verwendet, um den Austausch zwischen der Atmosphäre und dem Wasser zu simulieren.

A1.10 Modelldurchführung

Die Ergebnisse des Strömungsmodells wurden in einstündigen Intervallen ausgeschrieben.

A.1.11 Andere Modelleinstellungen und Eingabeparameter

Die übrigen Modelleinstellungen und Eingabeparameter des ursprünglichen ZUNO-Modells werden beibehalten.

A.1.12 Wellenmodell

A.1.12.1 Berechnungsgitter und Boden

Während in Delft3D-Flow die verschiedenen Gitter aneinander liegen müssen, benötigt SWAN ein überlappendes Berechnungsgitter. Daher werden die drei Gitter des ursprünglichen ZUNO-Modells mit der Auflösung des mittleren Rechengitters zusammengeführt, siehe Abbildung 8-23. Um die Inseln herum wurde eine Reihe von Rechengitterzellen modifiziert, da SWAN keine Rechengitterzellen akzeptiert, in denen nicht vier verschiedene Winkel unterschieden werden können. Der Boden des ursprünglichen ZUNO-Modells wird auf das zusammengeführte SWAN-Gitter interpoliert, siehe Abbildung 8-24.

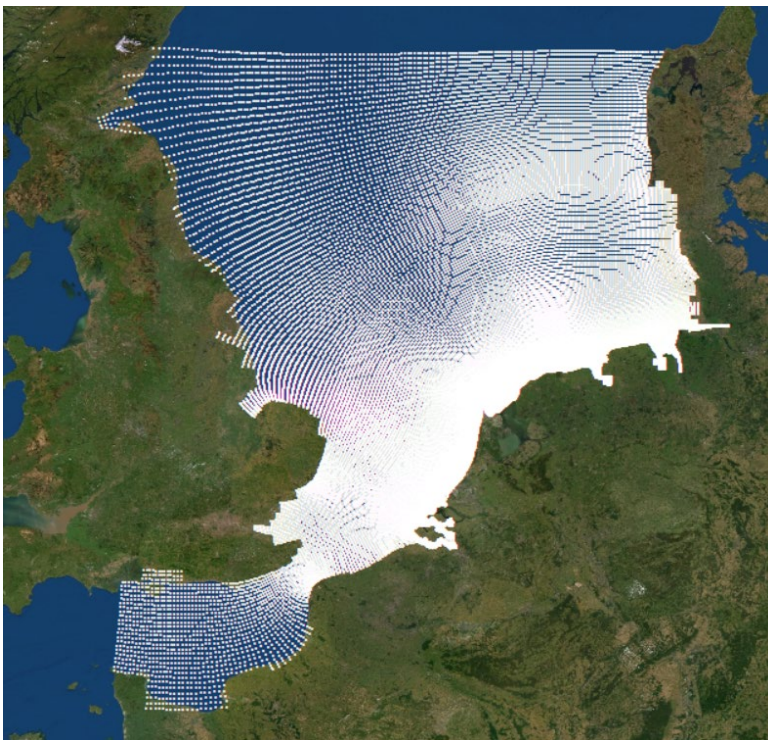


Abbildung 8- 9899: Berechnungsgitter des SWAN-Modells

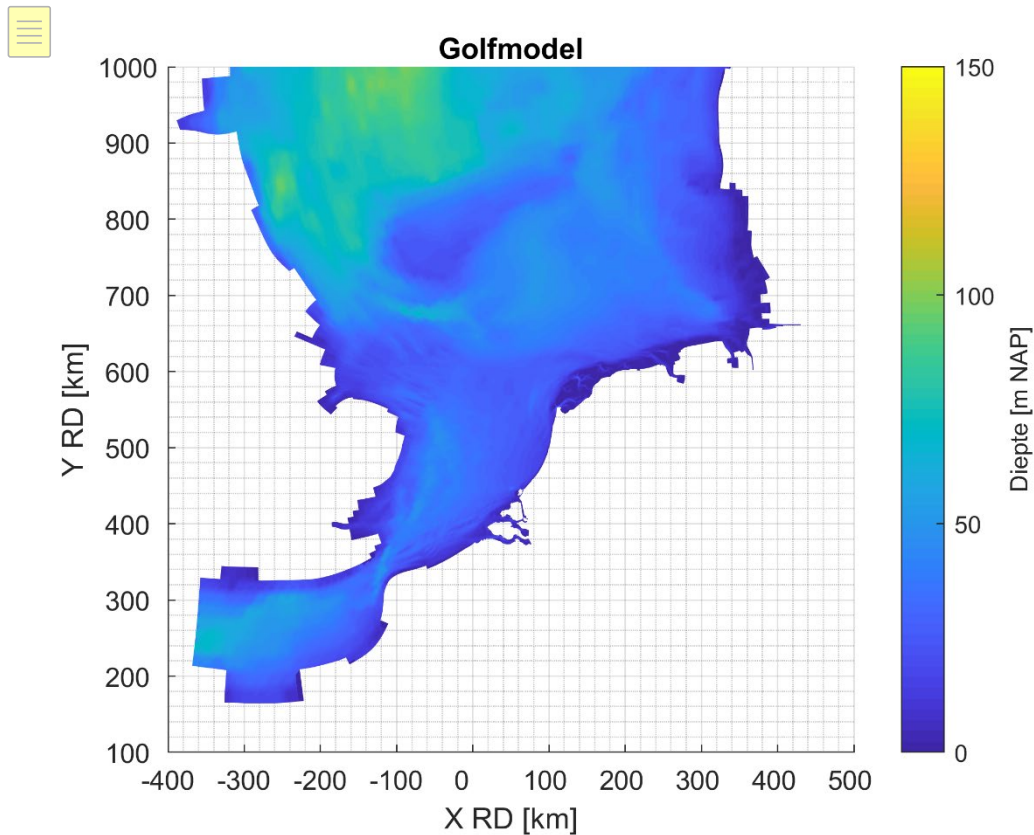


Abbildung 8- 100101: Bathymetrie des SWAN-Modells

A1.12.2 Randbedingungen

Wellenrandbedingung

Die Randbedingungen für das Wellenmodell wurden aus NOAA-Daten abgeleitet. Zu diesem Zweck wurde ein Punkt aus dem NOAA-Globalmodell mit einer Auflösung von 30 m mit den Koordinaten (LAT/LON) 57.00, 3.50 (WGS84) extrahiert. Zu diesem Zeitpunkt sind Zeitreihen der Wellenhöhe, -periode und -richtung bis Ende 2017 verfügbar, siehe Abbildung 8-25.

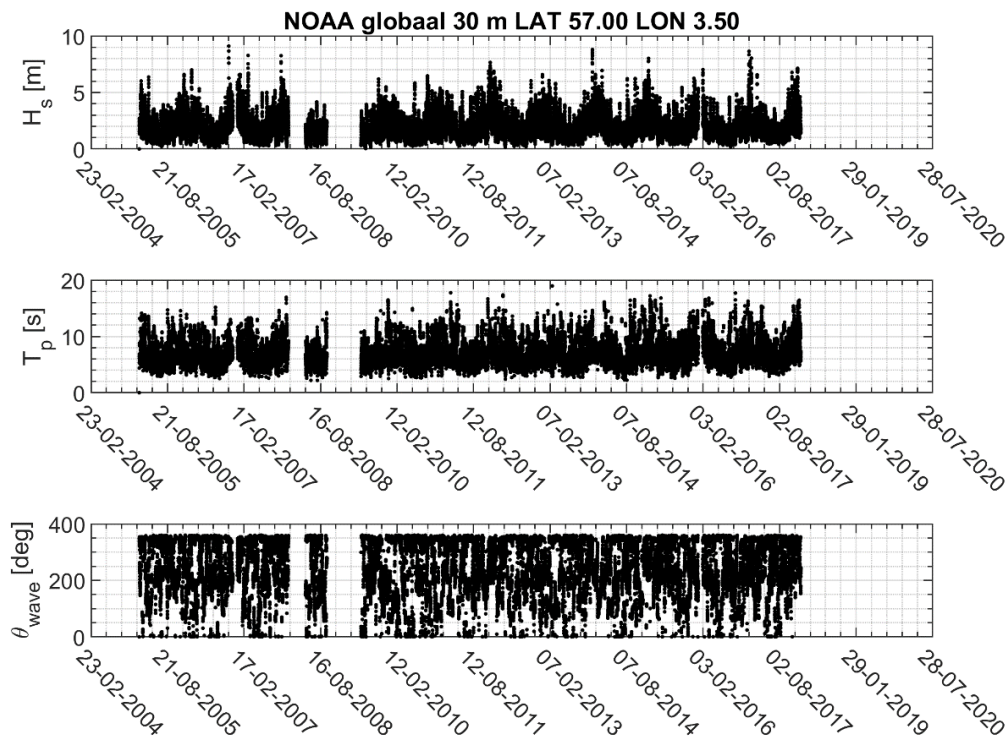


Abbildung 8 -102103: Signifikante Wellenhöhe, Spitzenperiode und Richtung für den Zeitraum 2005 - 2017

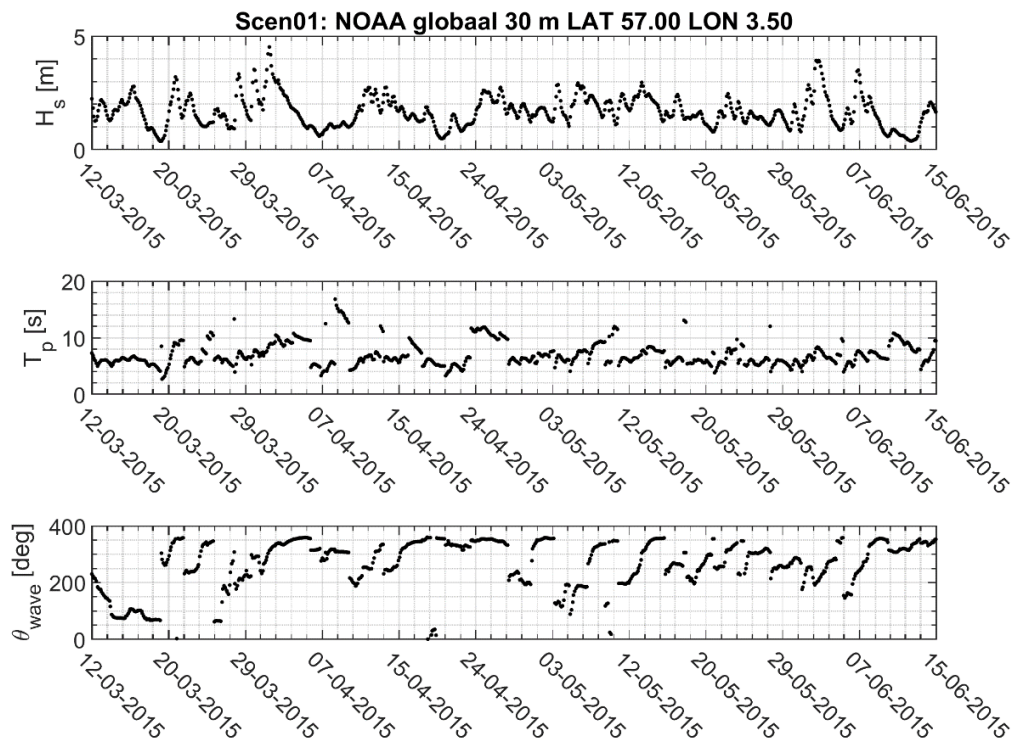


Abbildung 8- 104105: Signifikante Wellenhöhe, Spitzenperiode und Richtung während des März-Szenarios

Für jedes Szenario wurden die durchschnittliche signifikante Wellenhöhe, die Spitzenperiode und die Wellenrichtung ermittelt, siehe Abbildung 8-26 und Tabelle 8-3. Diese Werte wurden während der gesamten Simulation als konstante Randbedingungen festgelegt. Sie wurden dann auf den nördlichen Rand des Wellenmodells gelegt. Am westlichen Rand wurden keine Randbedingungen festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass Wellen aus dieser Richtung kaum bis zum Ort des Interesses vordringen.

Tabelle 8- 18: Signifikante Wellenhöhe, Spitzenperiode und Richtung, die als konstante Randbedingung für die drei Szenarien verwendet wurden.

Szenario	Hs [m]	Tp[s]	Richtung [Grad Nord, kommend von]
1	1.69	7.04	266
2	2.29	7.90	224
3	2.70	8.38	240

Wind

Das ursprüngliche ZUNO-Modell enthält räumlich und zeitlich variierende Windfelder für den gesamten Modellbereich. Diese werden im SWAN-Modell auferlegt und bewirken, dass sich die auferlegten Wellenrandbedingungen zur Küste hin ändern.

A1.12.3 SWAN-Einstellungen

Im gekoppelten SWAN/Delft3D-Flow-Modell (Version 40.72ABCDE) wurden die folgenden Einstellungen verwendet:

- Die Wellen werden alle 12 Stunden neu berechnet. Das bedeutet, dass alle 12 Stunden die Kopplung zwischen SWAN und Delft3D-Flow vorgenommen wird;
- 144 Richtungen im Richtungsraum (jeder Richtungsbin deckt also 2,5 Grad ab);
- 48 Frequenzbins, mit einer minimalen und maximalen Frequenz von 0,05 und 2 Hz;
- Die Ergebnisse des FLOW-Modells werden nicht für die Berechnung der Wellen verwendet;
- Konstante Randbedingungen entlang des nördlichen Randes;
- Mindesttiefe für die Berechnung der Wellen von 0,05 m;
- Prozesse: tiefeninduziertes Brechen, nichtlineare Triaden-Interaktionen, Bodenreibung, Wellenwachstum durch Wind und White-Capping.

Die obigen Einstellungen sind lediglich die Standardeinstellungen, wenn SWAN in Kombination mit Delft3D verwendet wird. Der Einfluss einer Reihe von Einstellungen, wie z. B. die Anzahl der Richtungen, wurde getestet:

- Die Anzahl der Richtungsbins: Es wurde ein Test mit 200 statt 144 Richtungsbins durchgeführt (cal1);
- Die minimale Frequenz: Es wurde ein Test mit einer minimalen Frequenz von 0,01 statt 0,05 Hz durchgeführt (cal2).
- Die Anzahl der Frequenzbins: Es wurde ein Test mit 55 statt 48 Frequenzen durchgeführt (cal3);
- Die Kopplungsfrequenz: Es wurde ein Test mit einer Kopplung zwischen Delft3D und SWAN alle 6 Stunden durchgeführt (cal4);

In Abbildung 8-27 und Abbildung 8-28 ist der Vergleich zwischen den Wellendaten und diesen Kalibrierungssimulationen dargestellt. „Modell“ bezieht sich auf den endgültigen Satz von Einstellungen wie oben erwähnt, cal1 bis cal4 auf die verschiedenen Kalibrierungssimulationen. Es ist kaum ein

Unterschied in den Ergebnissen zwischen den verschiedenen Simulationen zu erkennen. Mit dem Kopplungsintervall von 6 Stunden anstelle von 12 Stunden folgt das Modell den Daten etwas besser, was aber keine signifikante Verbesserung zur Folge hat. Außerdem ist dieses Kopplungsintervall in Kombination mit Sedimentberechnungen rechnerisch nicht machbar.

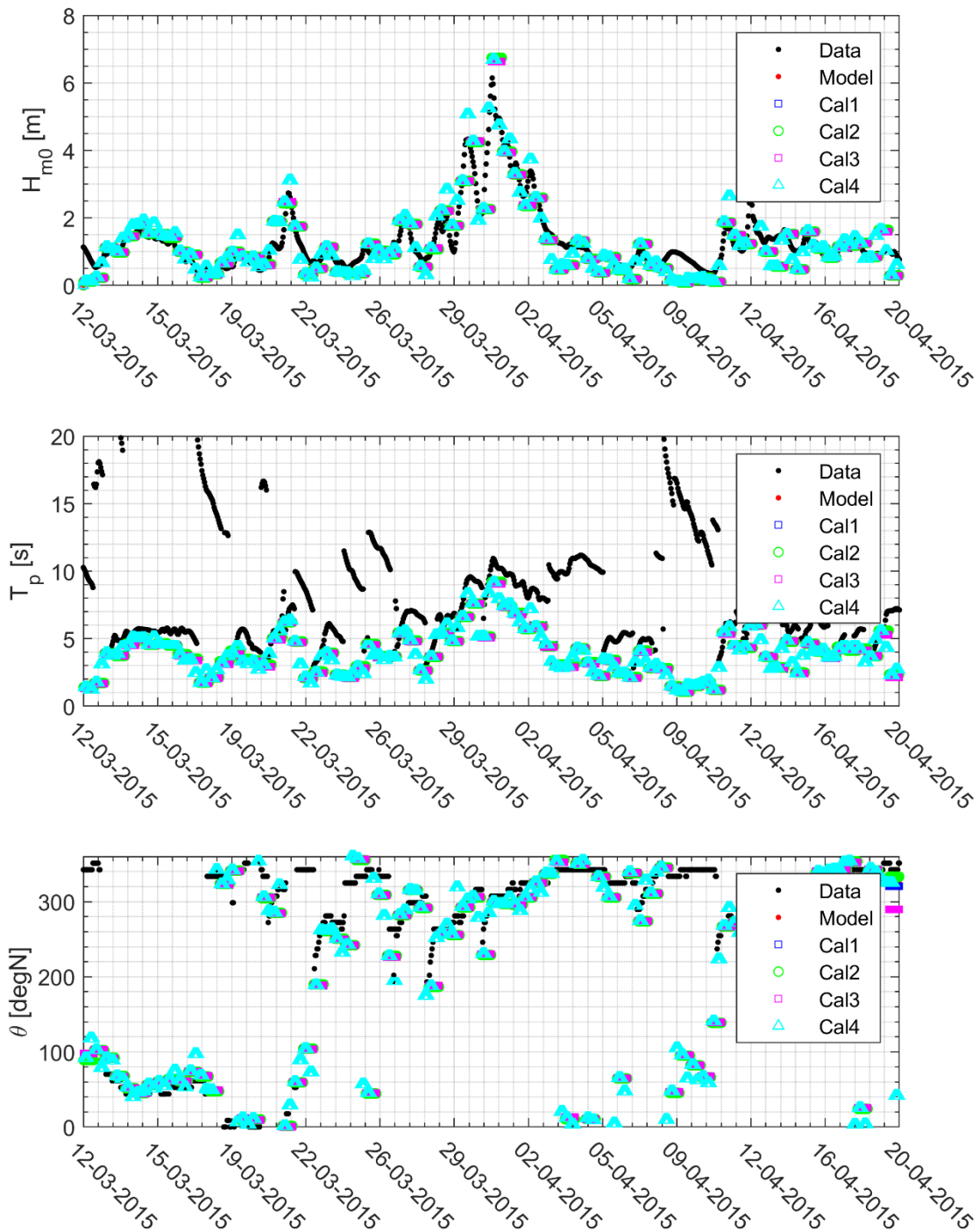


Abbildung 8- 106107: Vergleich der signifikanten Wellenhöhe, Spitzenperiode und Wellenrichtung zwischen den Wellendaten und dem Wellenmodell. Modell: Wellenmodell mit den verwendeten endgültigen Einstellungen.

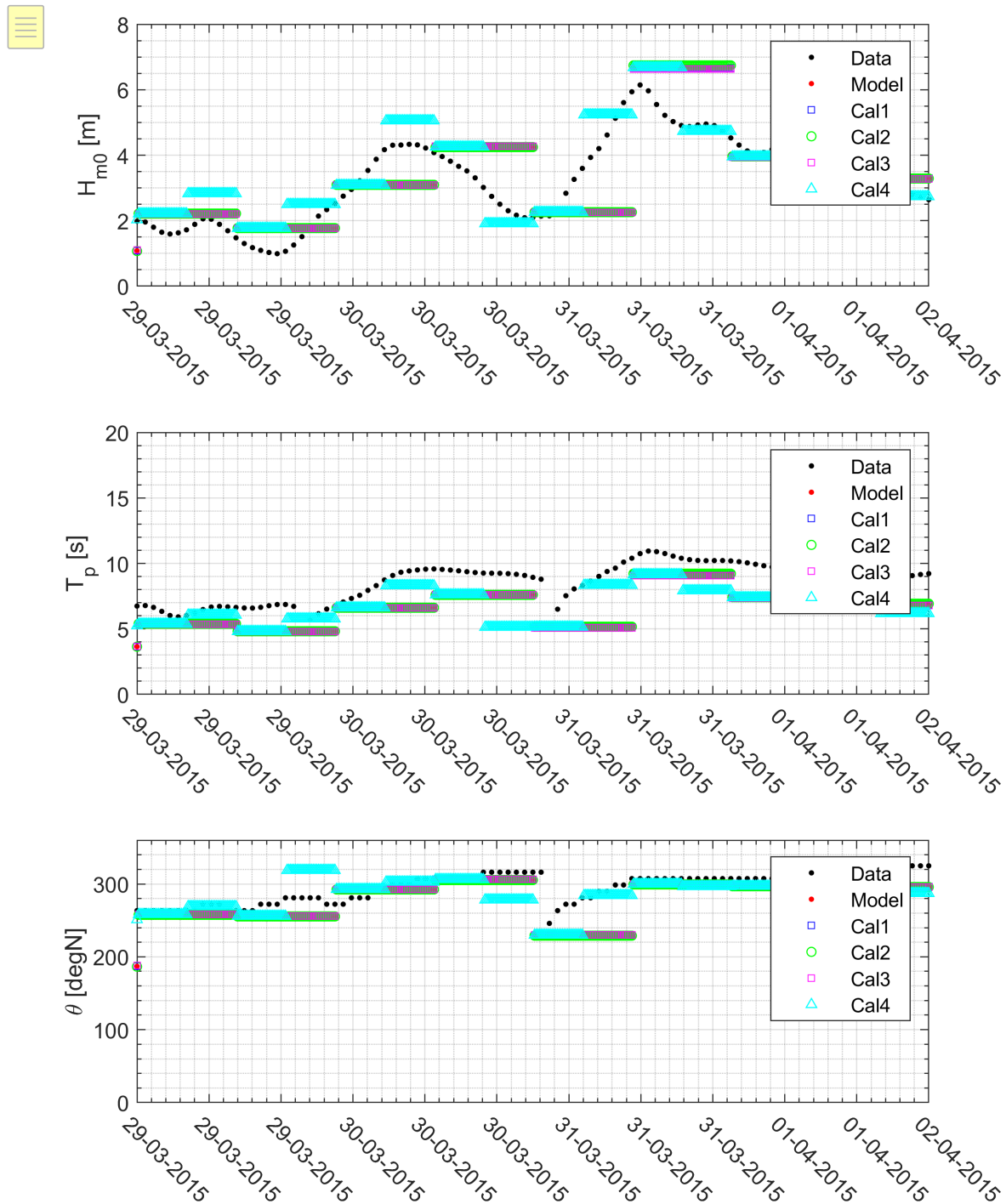


Abb. 8- 108: Vergleich der signifikanten Wellenhöhe, Spitzenperiode und Wellenrichtung zwischen den Wellendaten und dem Wellenmodell (vergrößert). Modell: Wellenmodell mit den zuletzt verwendeten Einstellungen.

A1.12.4 Validierung des Wellenmodells

Am Standort der Plattform wurden die gemessene und modellierte Wellenhöhe, -periode und -richtung verglichen, siehe Abbildung 8-29. Am nördlichen Rand des Modells wurden konstante Randbedingungen festgelegt, dann erzeugten räumlich und zeitlich variierende Windgeschwindigkeiten die Wellen im Bereich.

Die simulierte signifikante Wellenhöhe stimmt gut mit den Daten überein: der allgemeine Verlauf, aber auch die einzelnen Spitzen der Wellenhöhe werden gut simuliert. Da die Kopplung zwischen dem Wellenmodell und dem Strömungsmodell einmal alle 12 Stunden erfolgt, sind die modellierten Wellenhöhen über diese 12 Stunden konstant, während die gemessenen Wellenhöhen stärker variieren. Die Fluktuation in der Wellenhöhe wird bei diesem Simulationsintervall jedoch gut berücksichtigt, die Kopplung zwischen den beiden Modellen muss nicht öfter vorgenommen werden. Dies ist auch aus Sicht der Simulationszeit nicht wünschenswert.

Die Spitzenzeit wird adäquat wiedergegeben, auch wenn die Wellenperioden manchmal etwas unterschätzt werden. In den Daten sehen wir jedoch große Sprünge in der Spitzenperiode für niedrige Wellen: Dies kann durch die Tatsache verursacht werden, dass die Wellenenergie gering ist und es schwierig ist, eine klare Spitze im Wellenspektrum zu identifizieren. In den Zeiträumen, in denen keine Sprünge in den Daten zu erkennen sind, stimmt die simulierte Spitzenzeit gut mit den Daten überein.

Die Richtung stimmt gut mit der gemessenen Richtung überein, es sollte beachtet werden, dass eine Richtung von 0 Grad gleich einer Richtung von 360 Grad ist.

Die in der Abbildung 8-29 gezeigten Ergebnisse variieren bei verschiedenen Modelleinstellungen nur geringfügig, wie in Anhang A1.14 gezeigt wird.

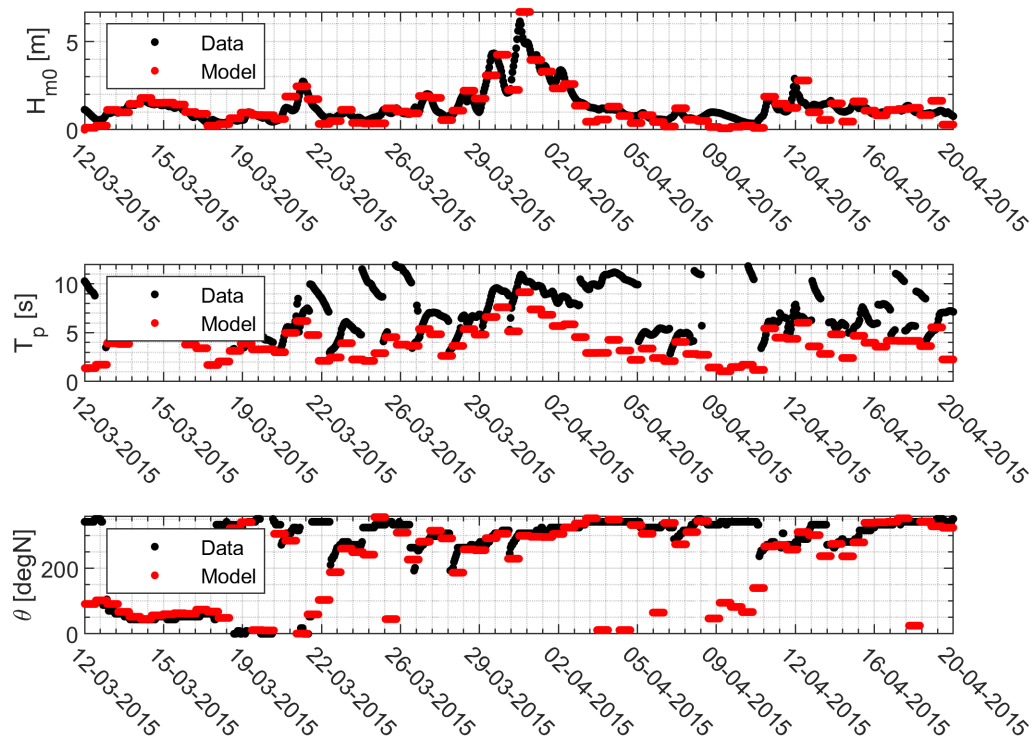


Abbildung 8- 109: Vergleich der gemessenen (schwarz) und modellierten (rot) signifikanten Wellenhöhe, Spitzenperiode und Richtung während des Zeitraums Mitte März - Mitte April 2015.

A1.13 Einleitung von Bohrspülung

A1.13.1 Standort

Die Mengen der Bohrspülung und der gelösten Stoffe werden als Quellterme am Standort der Plattform N05-A in das Modell eingesetzt. Für einen Quellterm kann nur eine Gitterzelle angegeben werden, so dass die Lage im Modell etwas von der tatsächlichen Lage abweicht (etwa eine halbe Gitterzelle). Der Quellterm wird im Rechengitter nest2 bei Zellennummer 26, 23 für die Plattform N05-A hinzugefügt, siehe Abbildung 8-30. Der Abfluss für die Plattform N05-A Süd wird auf der Gitterzelle 38, 24 hinzugefügt.

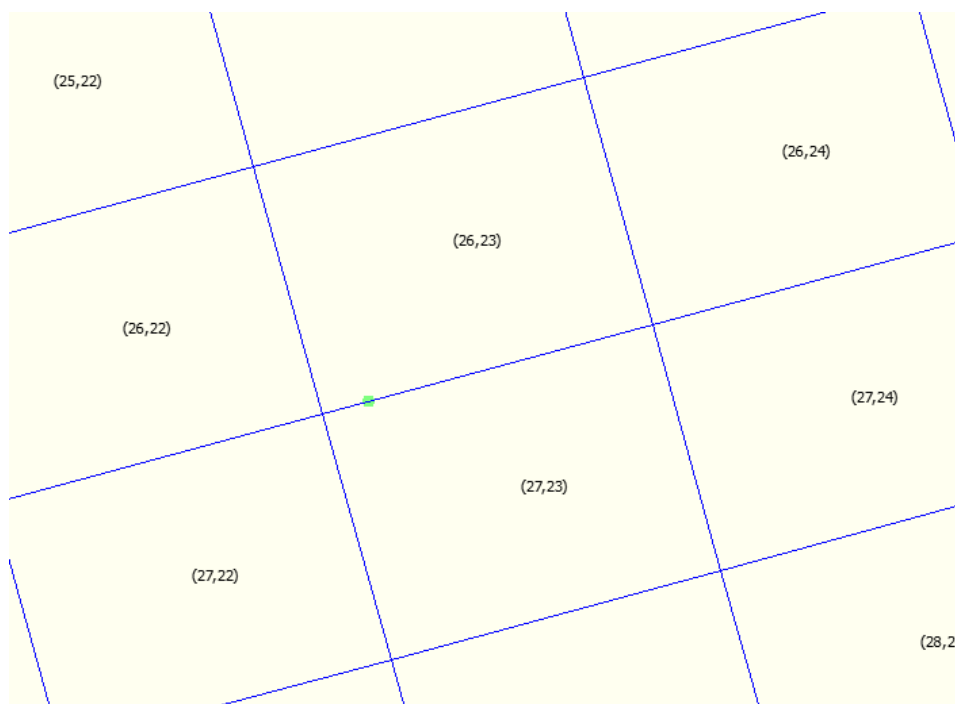


Abbildung 8- 110111: Lage der Plattform N05-A innerhalb von nest2

A1.13.2 Höhe

Es wird angenommen, dass der Abfluss 10 m unter der mittleren Meeresoberfläche stattfindet. Die Tiefe am Ort der Entladung beträgt 26,2 m. Das bedeutet, dass die Entladung in Schicht 5 stattfindet, siehe Tabelle 8-4. Die gleiche Einflusssschicht wird für den Standort N05-A Süd verwendet.

Tabelle 8- 19: Schichtnummer der Einleitung. Die Wassertiefe am Standort der Plattform beträgt 26,2 m.

Schichtnummer	Tiefenabschnitt [%]	Höhe der Schicht [m]	Höhe der oberen Schicht im Verhältnis zur Oberfläche [m]	Höhe untere Schicht im Verhältnis zur Oberfläche [m]	Einleitung
1 (Oberfläche)	4	1,05	0	1,05	
2	5,6	1,47	1,05	2,52	
3	7,8	2,04	2,52	4,56	
4	10,8	2,83	4,56	7,39	
5	10,9	2,86	7,39	10,24	X
6	10,9	2,86	10,24	13,10	
7	10,9	2,86	13,10	15,96	
8	10,9	2,86	15,96	18,81	
9	10,8	2,83	18,81	21,64	
10	7,8	2,04	21,64	23,68	
11	5,6	1,47	23,68	25,15	
12 (unten)	4	1,05	25,15	26,20	

A1.13.3 Quellterme

Die verschiedenen Fraktionen in der Bohrspülung werden getrennt modelliert (siehe Tabelle 8-5):

- Der Baryt und Bentonit aus der Bohrspülung werden als feines, kohäsives Sediment modelliert, mit entsprechenden Korngrößen von 0,015 und 0,030 mm und zugehörigen Fallgeschwindigkeiten von 1,4E-4 und 5,7E-4 m/s.
- Die gelösten Stoffe in der Bohrspülung werden als Tracer in das Modell eingegeben. Für jeden Bohrabschnitt wird ein eigener Tracer verwendet. Ein Tracer hat keinen Einfluss auf die Strömung, kann aber während einer Simulation verfolgt werden.

Tabelle 8- 20: Merkmale der Quellterme

Komponente		Korngröße [mm]	Fallgeschwindigkeit [m/s]
Bohrspülung (kohäsiv)	Baryt	0.015	1,4 E-4
	Bentonit	0.030	5,7 E-4
Gelöste Stoffe	Tracer 1	-	-
	Tracer 2	-	-
	Tracer 3	-	-
	Tracer 4	-	-

Weitere Einstellungen, die für die Modellierung von kohäsiven Sedimenten verwendet wurden, sind in Tabelle 8-6 aufgeführt. Bei der Modellierung wird nur die Bohrspülung modelliert, d. h. ohne Hintergrundkonzentrationen von Sediment und anderen Stoffen.

Tabelle 8- 21: Verwendete Einstellungen für die Modellierung von kohäsiven Sedimenten

Parameter	Wert
Kritische Schubspannung für Sedimentation	1000 N/m ²
Kritische Schubspannung für Erosion	0,3 N/m ²
Erosionsparameter	1*10 ⁻⁴ kg/m ² /s
Anfängliche Sedimentdicke	0 m

Die Quellterme für die verschiedenen Komponenten sind in Tabelle 8-7 aufgeführt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Quellterme und der Verlauf der Quellterme über die Zeit für die verschiedenen Szenarien gleich sind, dass aber die Bedingungen (Wind, Wellen usw.) für jedes Szenario unterschiedlich sind.

Tabelle 8- 22: Quellterme für die verschiedenen Komponenten und Szenarien

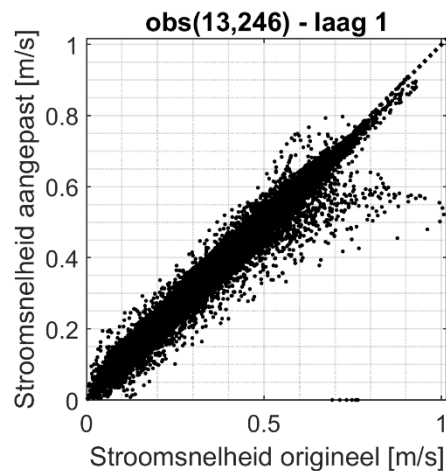
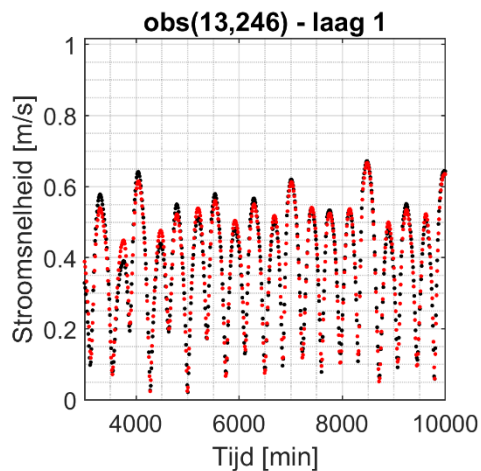
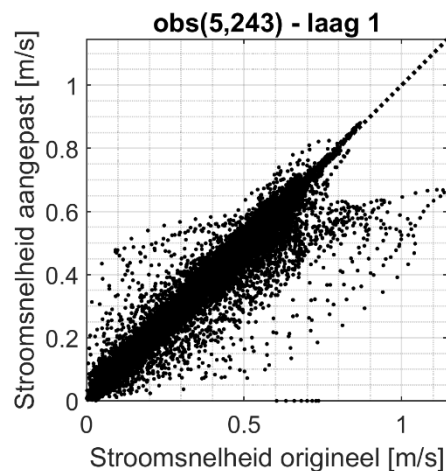
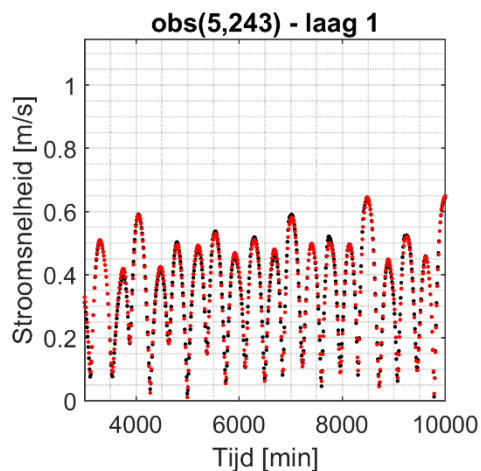
Komponente		Quellterme [kg/s]			
		1	2	3	4
Bohrspülung	Baryt	0.58	0.77	0.37	0.68
	Bentonit	0.46	0.54	0.06	0
Tracer	Tracer 1	1.87	0	0	0
	Tracer 2	0	1.18	0	0
	Tracer 3	0	0	0.36	0
	Tracer 4	0	0	0	0.36

A1.14 Vergleich der Hydrodynamik des modifizierten und des ursprünglichen ZUNO-Modells

Für die Beobachtungspunkte obs(13, 251), obs(5, 243), obs(26, 258), obs(13,246) und obs(13, 255) ist in Abbildung 8-31 bis Abbildung 8-38 ein Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung zwischen dem modifizierten ZUNO-Modell und dem ursprünglichen ZUNO-Modell dargestellt. Diese Standorte finden Sie in Abbildung 4-1. Dies wurde für Schicht 1 (nahe der Oberfläche), Schicht 6 (auf halber Höhe der Wassersäule) und Schicht 12 (nahe dem Boden) durchgeführt. Die Durchflussrichtung wird in Grad relativ zum Norden angegeben, wobei eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn positiv ist. Die ersten 50 Stunden (3000 Minuten) sind in dieser Analyse nicht enthalten, da das modifizierte ZUNO-Modell damit herumspielt.

Speziell bei den Streudiagrammen ist zu beachten, dass ein Winkel von 360° gleich einem Winkel von 0° ist. Somit stimmen die Daten in der linken oberen Ecke des Diagramms mit den Daten in der linken unteren Ecke überein. Dasselbe gilt für die rechte obere und die rechte untere Ecke.

Im Allgemeinen stimmen die Ergebnisse des verschachtelten Modells gut mit dem ursprünglichen Modell überein. Beide Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen werden durch das modifizierte ZUNO-Modell gut simuliert. Die Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund von Gezeiten und des Windes liegen im Allgemeinen zwischen 0 und 0,8 m/s in der Mitte der Wassersäule und zwischen 0 und 1,0 m/s in der Nähe der Oberfläche. In Bodennähe liegen die Geschwindigkeiten zwischen 0 und 0,6 m/s. Dies entspricht den Strömungsgeschwindigkeiten, wie in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 und wurde auch in [4] dargestellt.



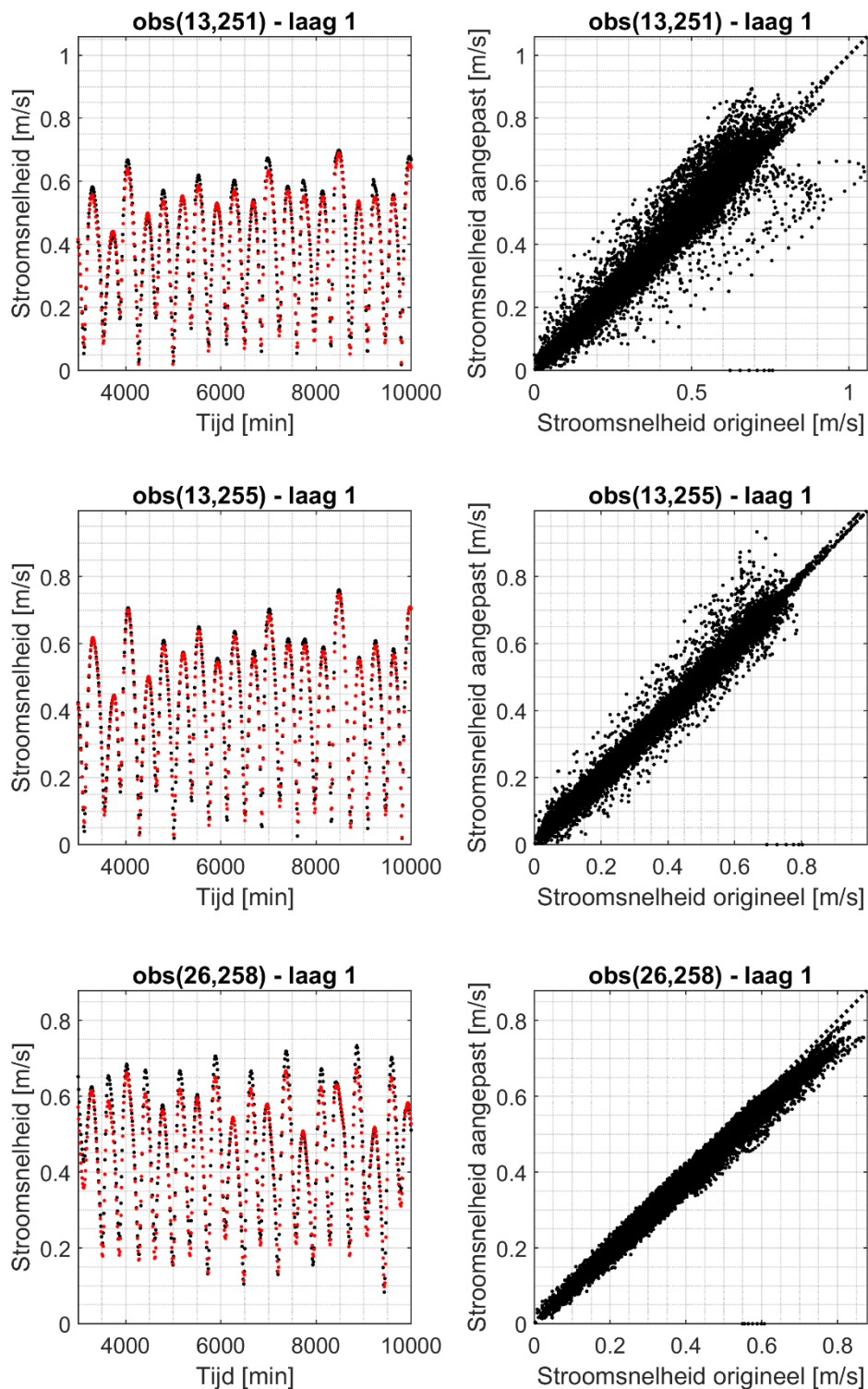
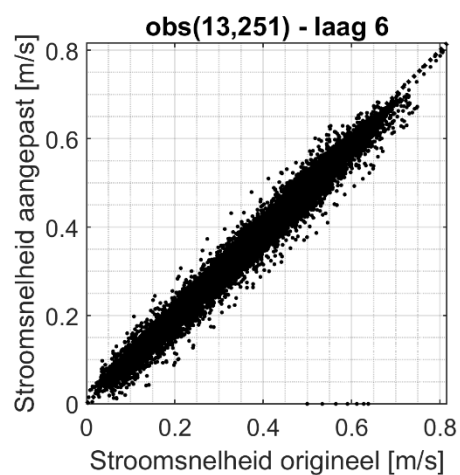
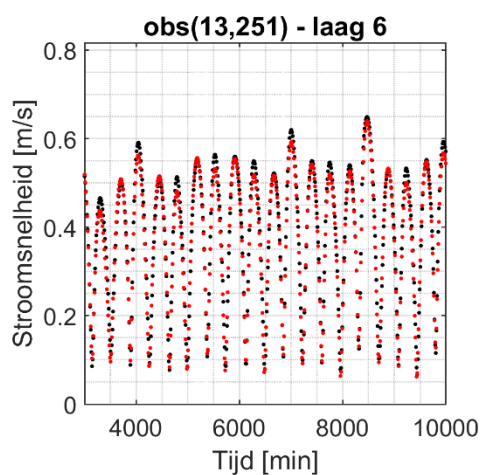
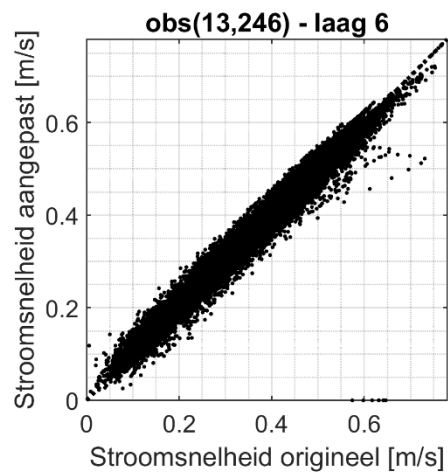
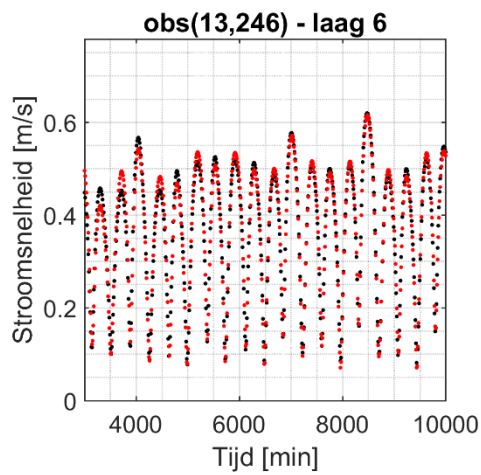
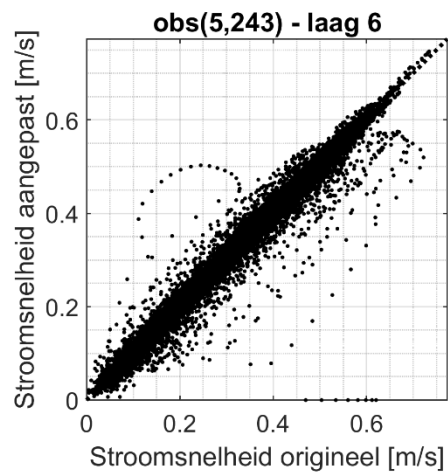
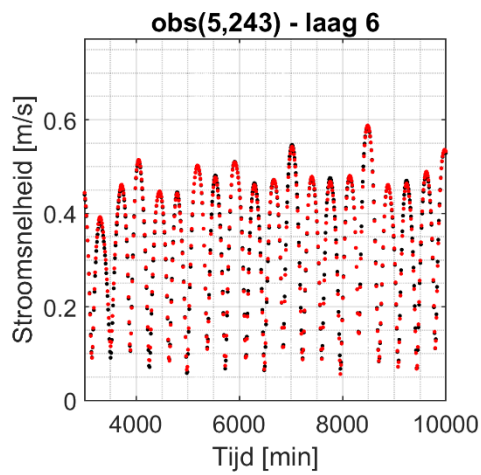


Abbildung 8- 112113: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter, nahe der Oberfläche. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: modifiziertes Modell), rechts ein Streudiagramm.



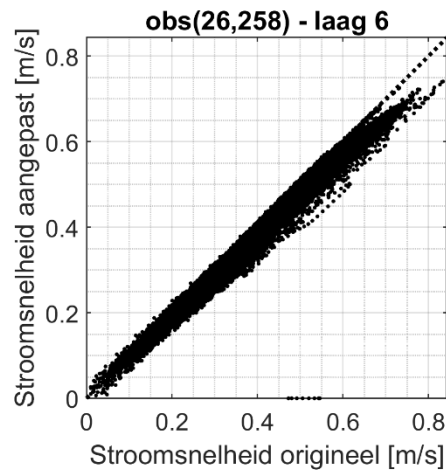
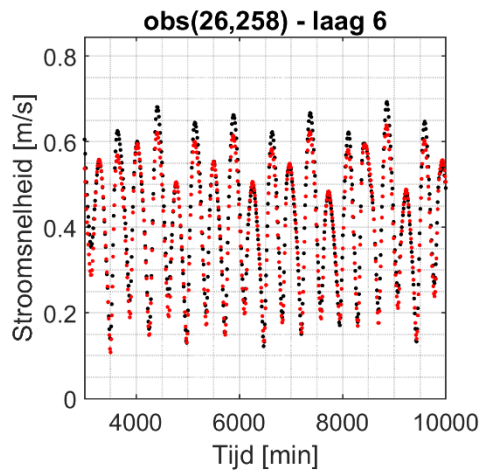
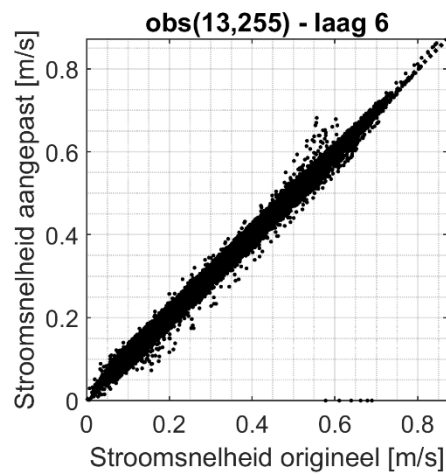
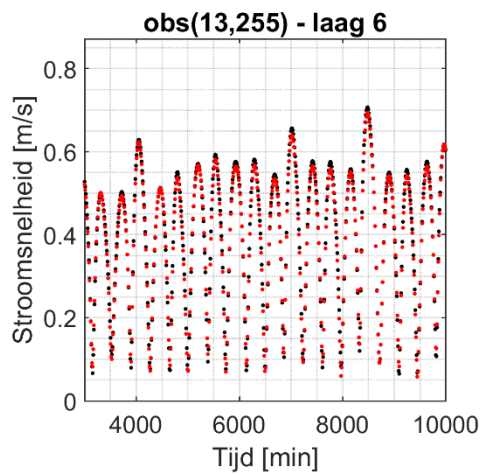
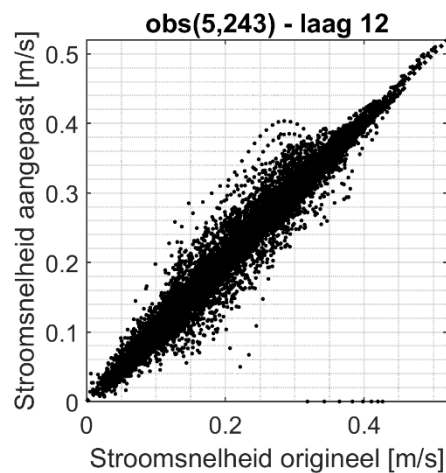
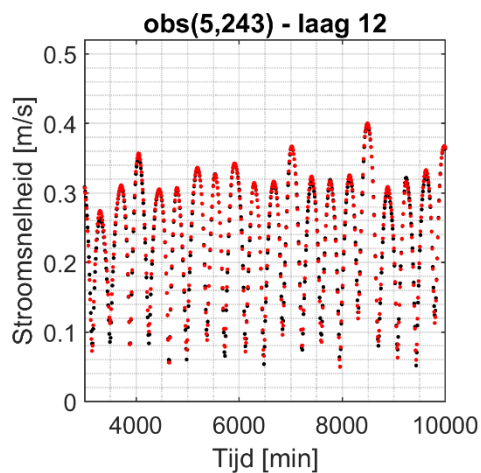
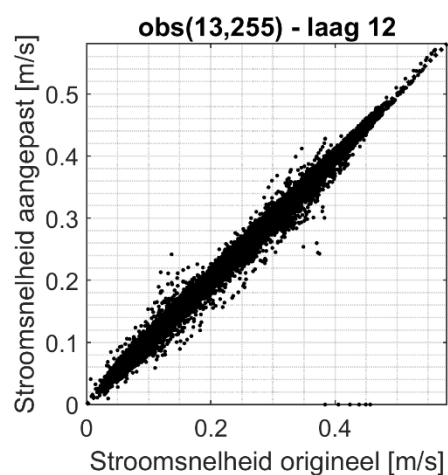
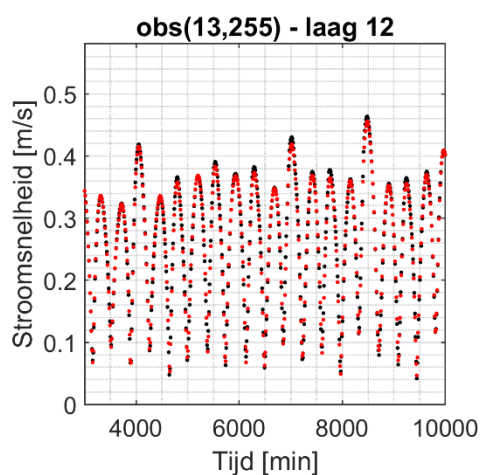
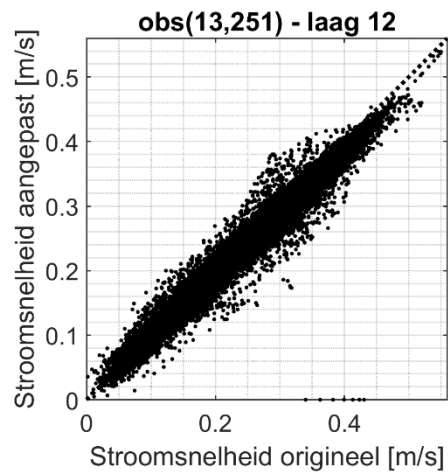
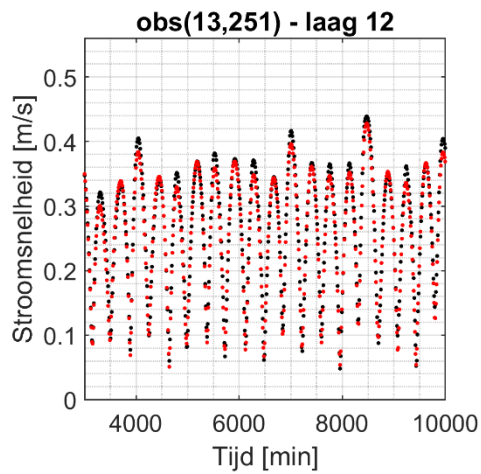
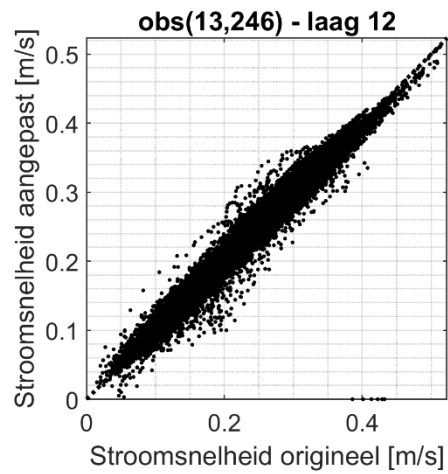
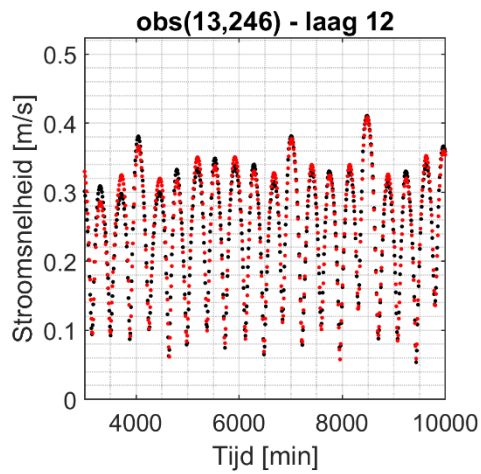


Abbildung 8- 114115: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Berechnungsgitter herum, auf halber Höhe der Wassersäule. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: angepasstes Modell), rechts ein Streudiagramm.





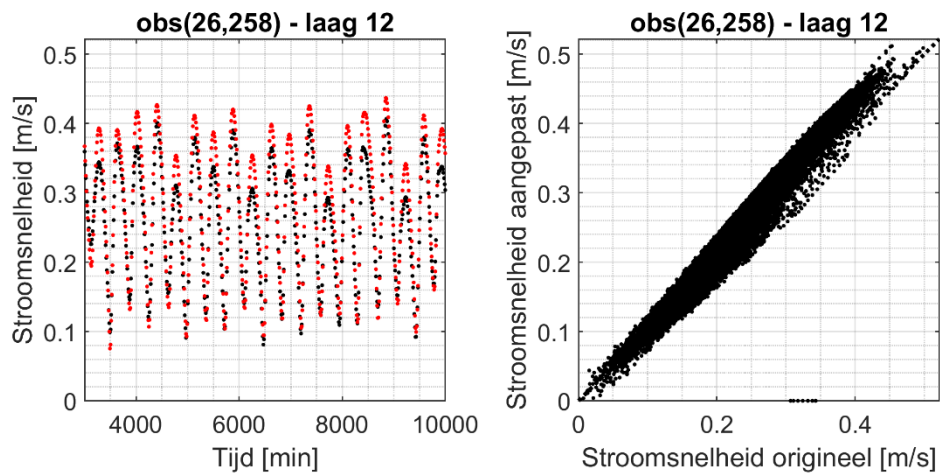
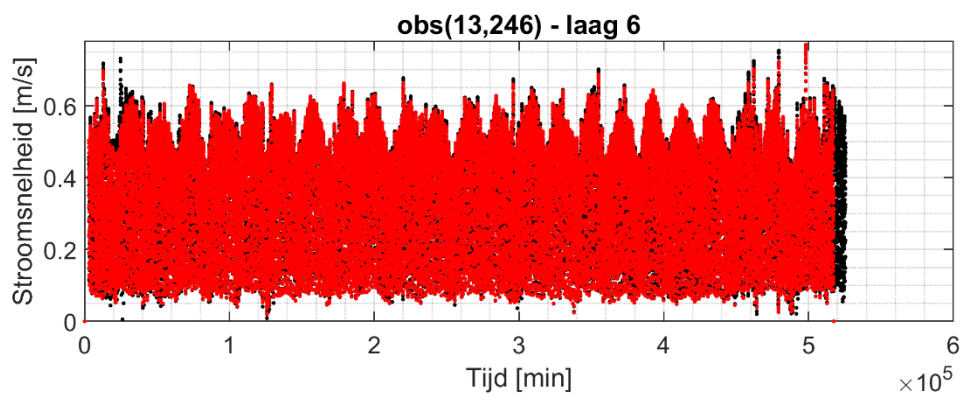
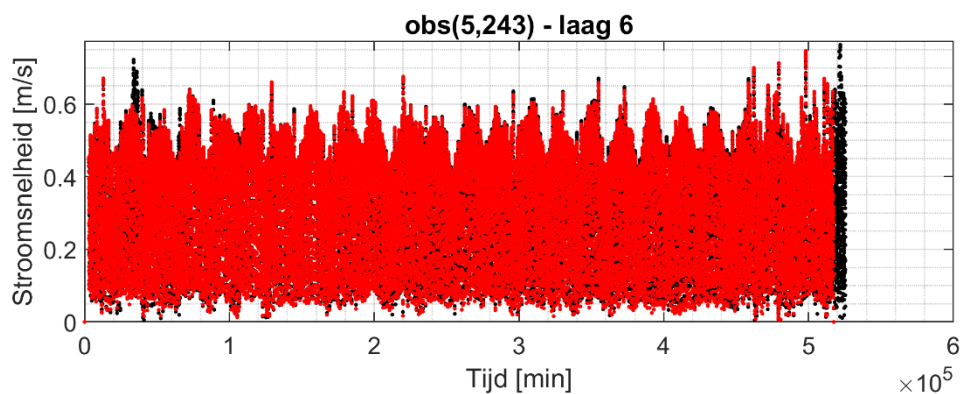


Abbildung 8- 116: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem angepassten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter herum, nahe dem Boden. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: modifiziertes Modell), rechts ein Streudiagramm.



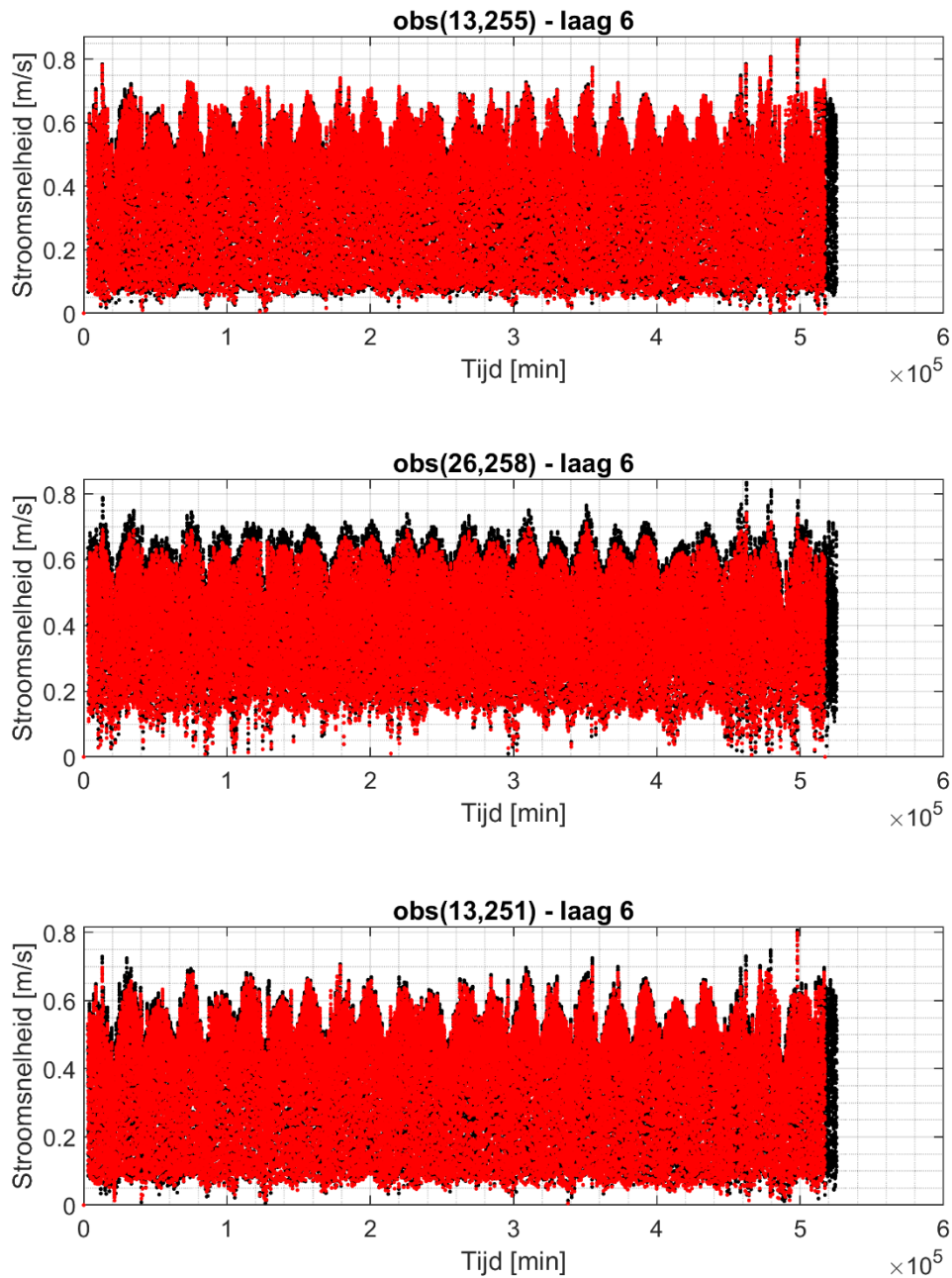
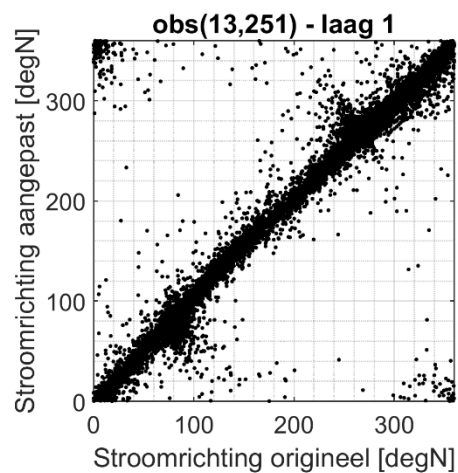
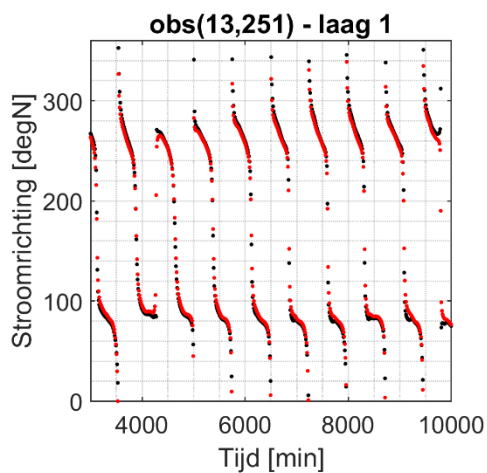
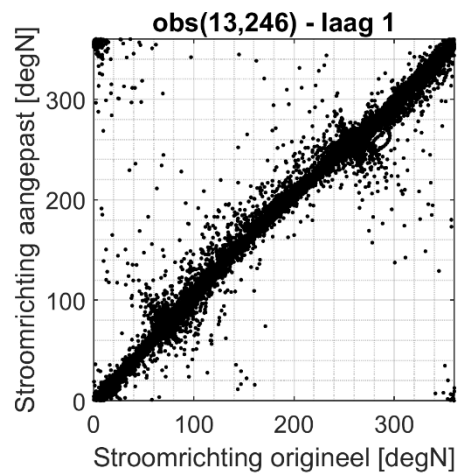
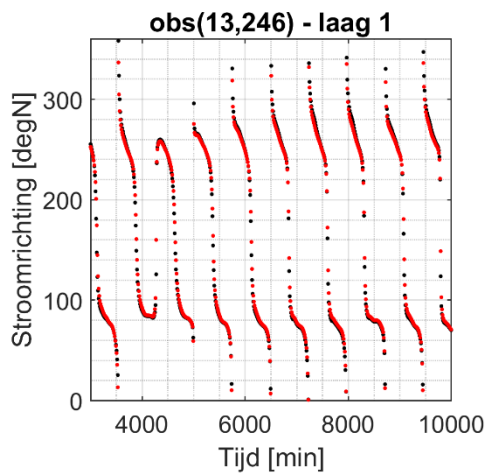
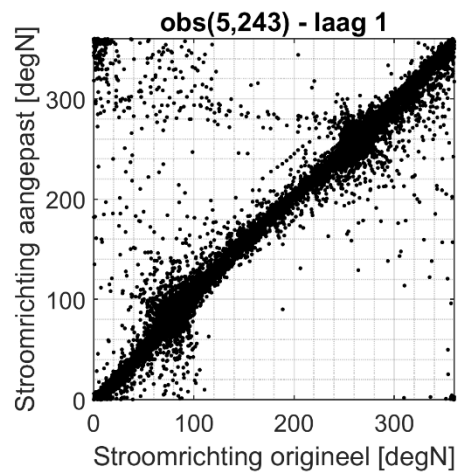
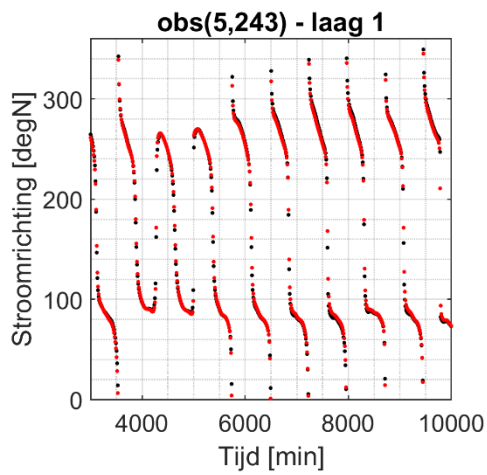


Abbildung 8- 117118: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter im Jahr 2015 (schwarz: ursprüngliches Modell, rot: modifiziertes Modell).



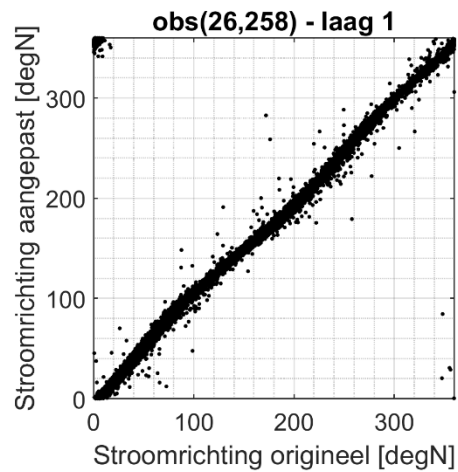
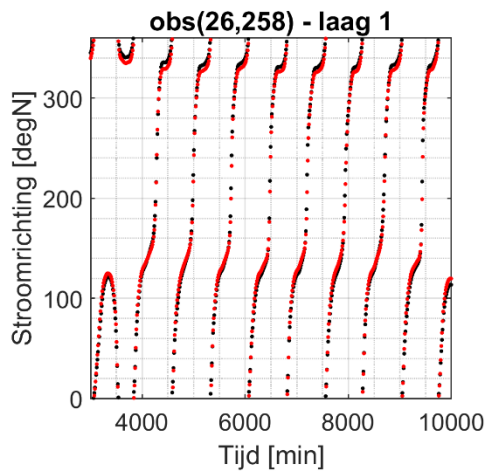
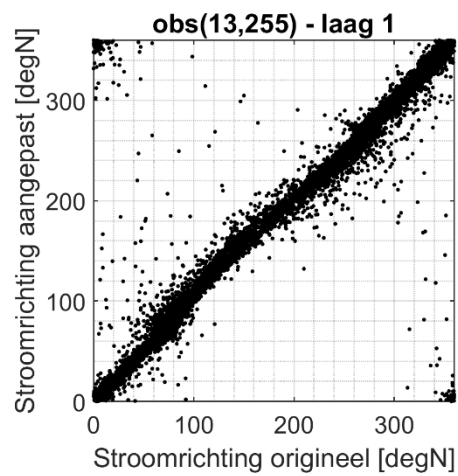
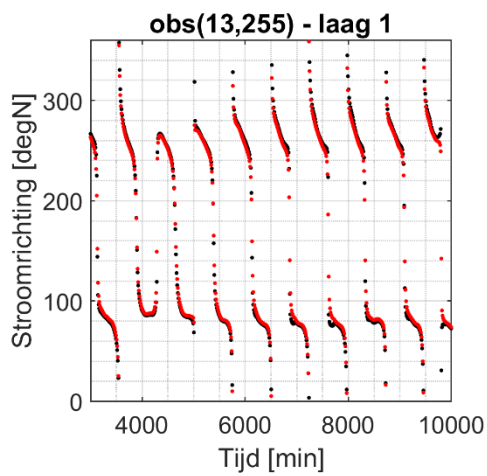
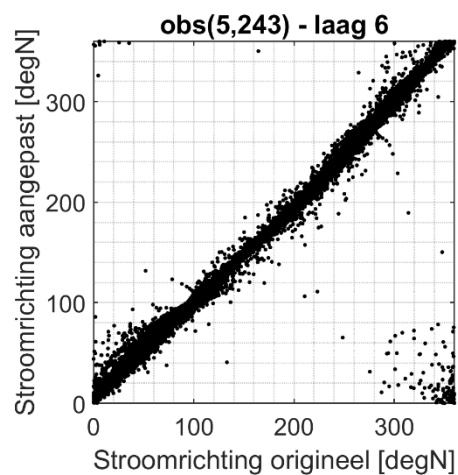
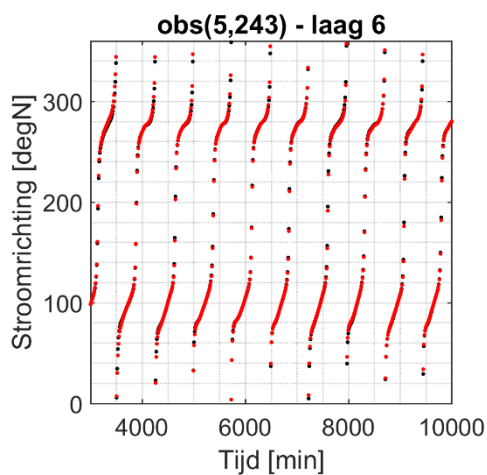
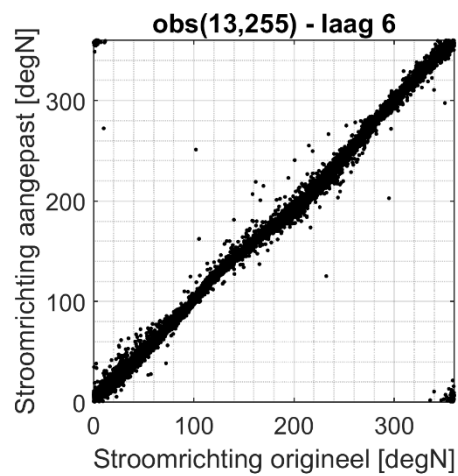
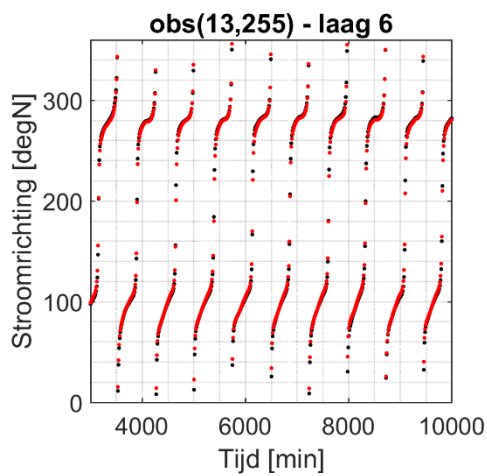
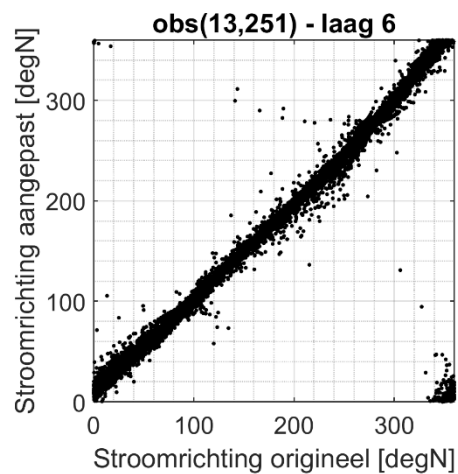
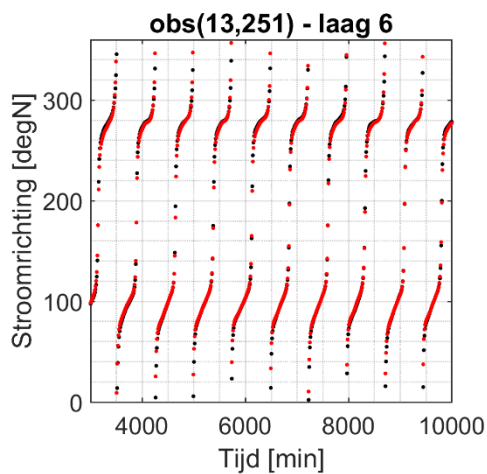
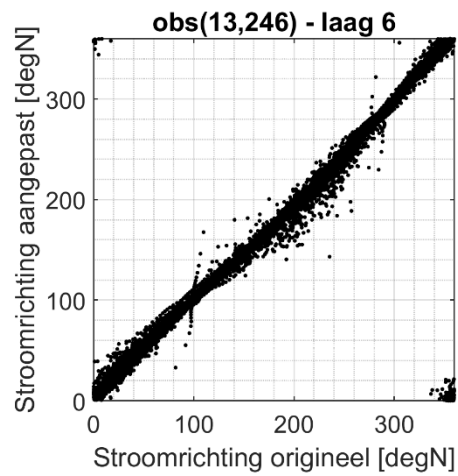
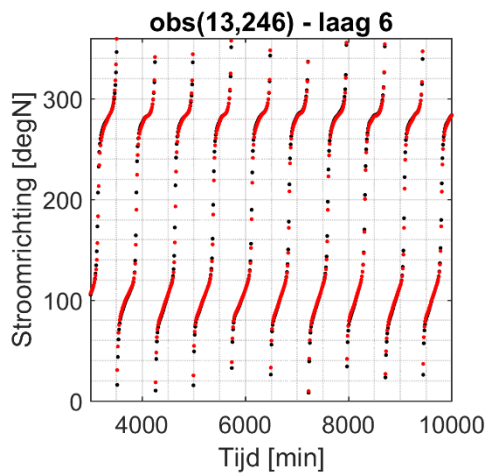


Abbildung 8 -119: Vergleich der Strömungsrichtung zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter, nahe der Oberfläche. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: modifiziertes Modell), rechts ein Streudiagramm.





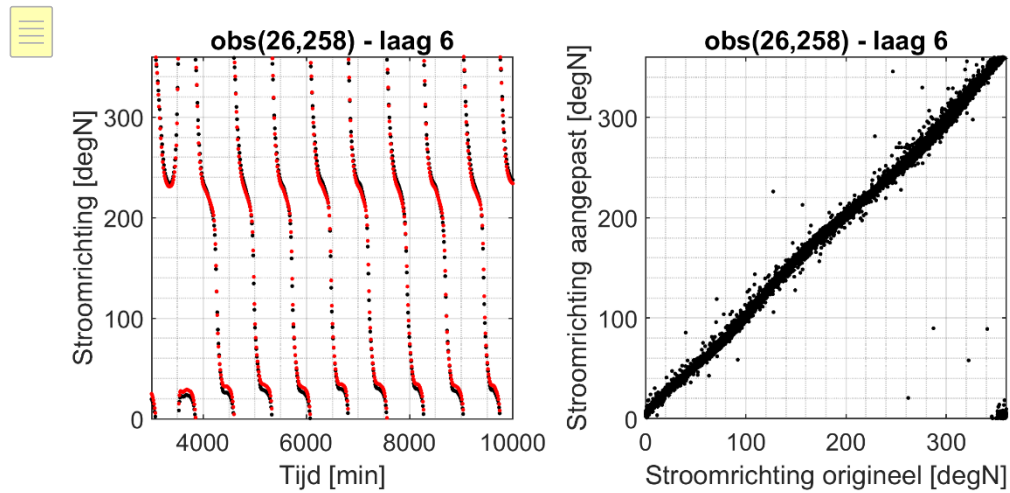
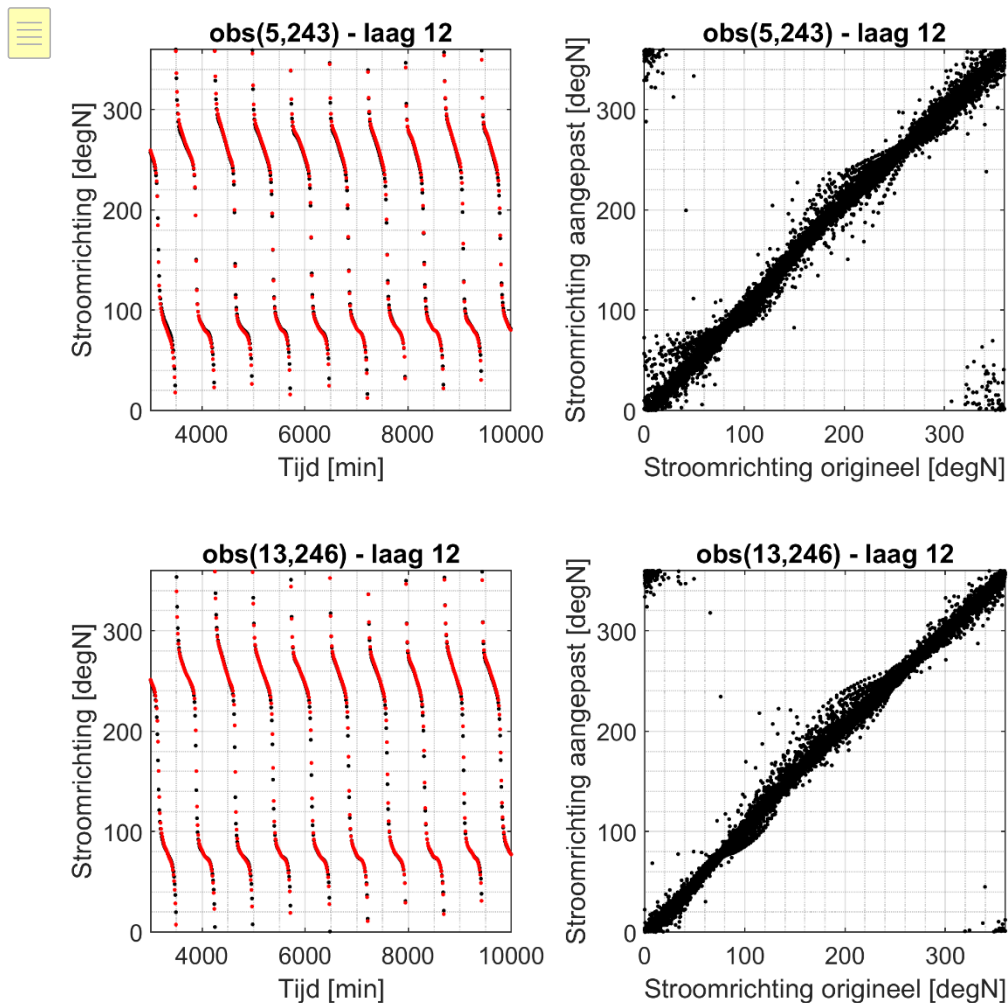


Abbildung 8- 120: Vergleich der Strömungsrichtung zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter herum, auf halber Höhe der Wassersäule. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: modifiziertes Modell), rechts ein Streudiagramm.



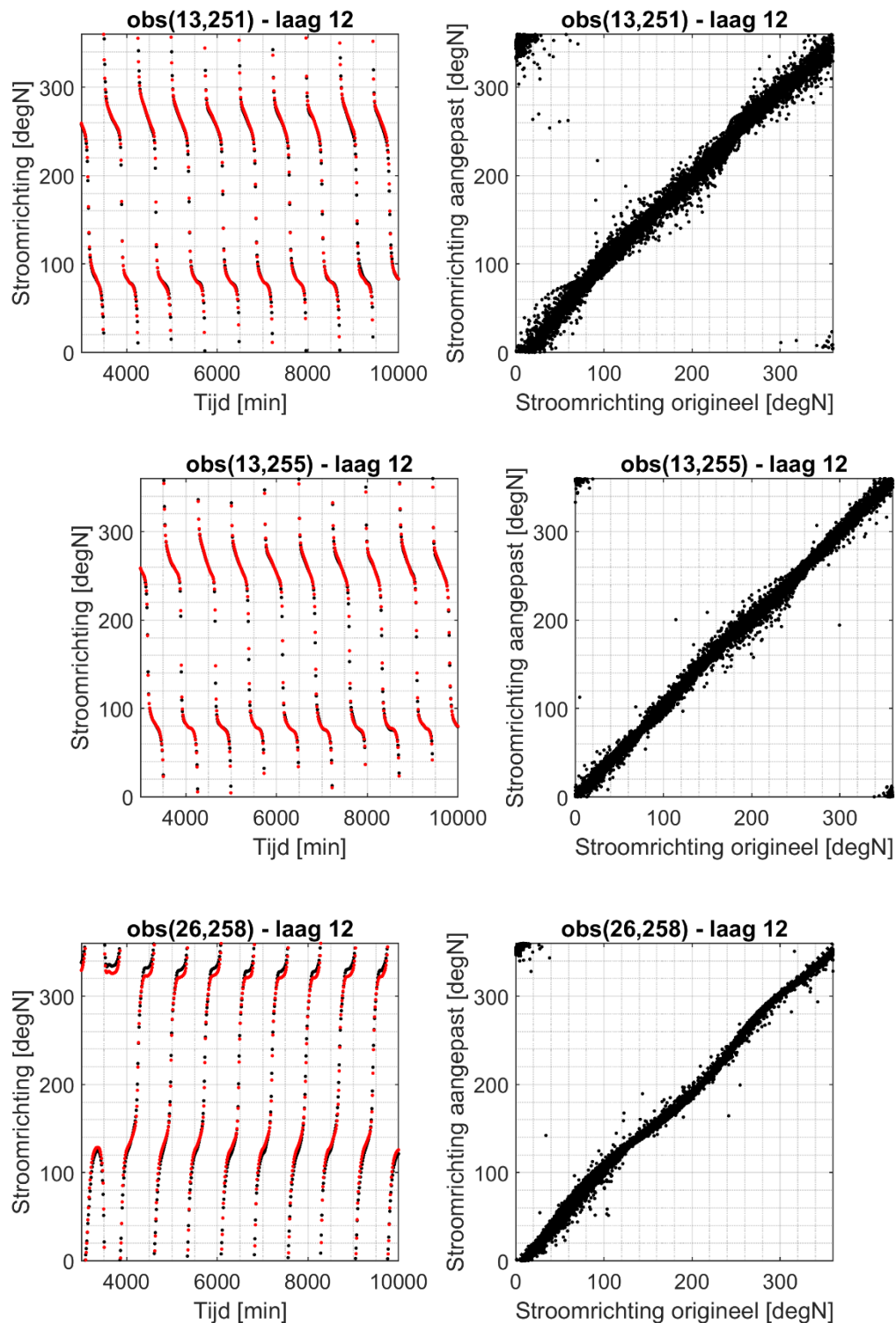
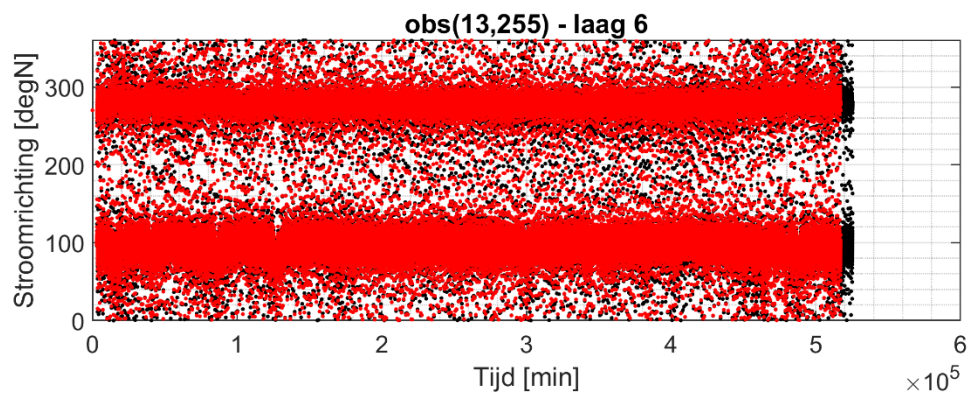
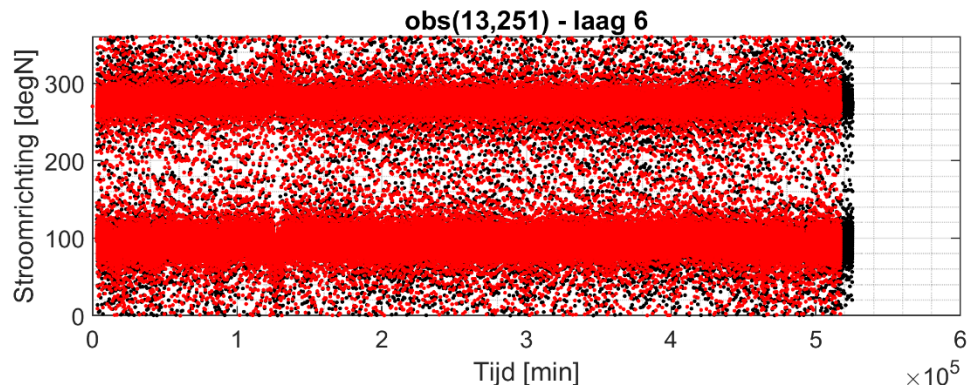
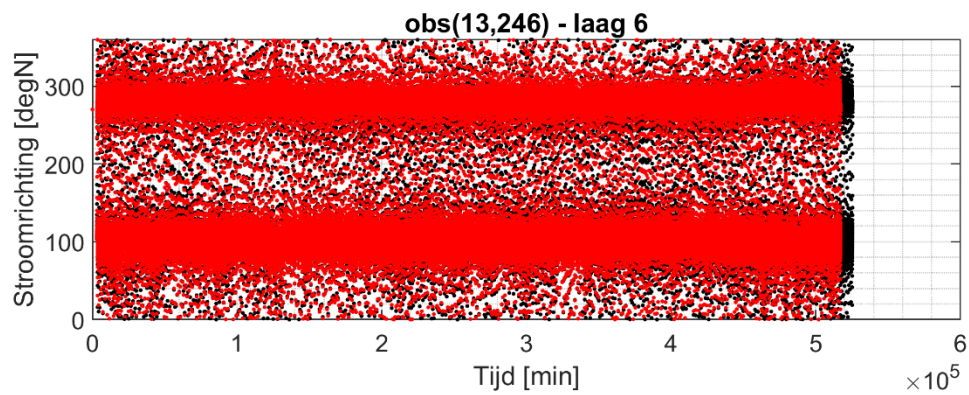
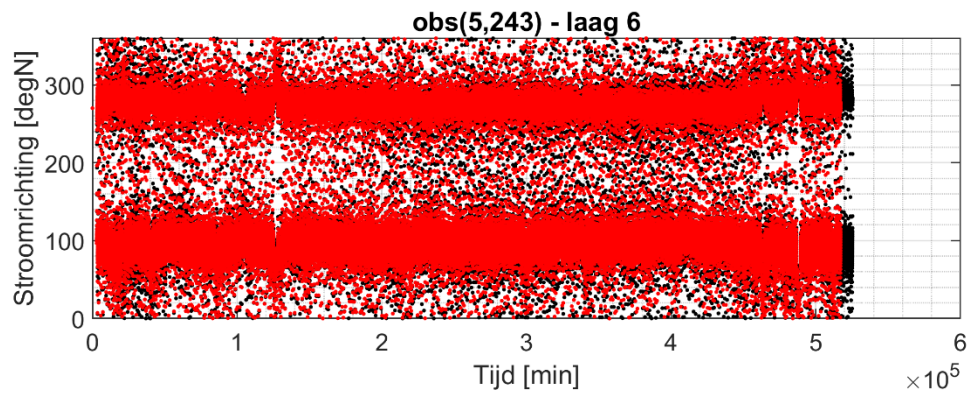


Abbildung 8- 121: Vergleich der Strömungsrichtung zwischen dem modifizierten und dem originalen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die geschachtelten Rechengitter herum, in Bodennähe. Links ist ein zeitlicher Vergleich während der ersten ca. 7 Tage (schwarz: Originalmodell, rot: modifiziertes Modell), rechts ein Streudiagramm.



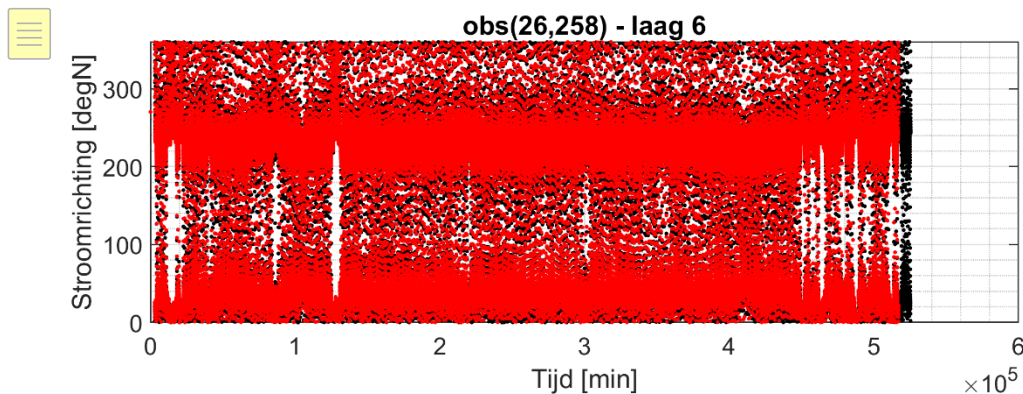


Abbildung 8- 122: Vergleich der Strömungsrichtung zwischen dem modifizierten und dem ursprünglichen ZUNO-Modell an verschiedenen Punkten um die verschachtelten Rechengitter im Jahr 2015 (schwarz: ursprüngliches Modell, rot: modifiziertes Modell).

Der Vergleich wurde auf verschiedene Weisen dargestellt:

- Eine Zeitreihe der ersten 10000 min (ca. 7 Tage) ist sowohl für die Strömungsgeschwindigkeit als auch für die Strömungsrichtung dargestellt. Dies ermöglicht den Vergleich des detaillierten Verlaufs von Geschwindigkeit und Richtung. Zusätzlich wird eine Zeitreihe über das ganze Jahr dargestellt, um großflächige Unterschiede zu sehen.
- Zusätzlich wird ein Streudiagramm angezeigt: Dieses vergleicht die Ergebnisse für das ursprüngliche Modell mit denen für das modifizierte Modell. Die 1-zu-1-Linie wird durch gestrichelte Linien dargestellt. Wenn die Ergebnisse genau auf dieser Linie liegen, bedeutet dies, dass das angepasste und das ursprüngliche Modell genau die gleichen Ergebnisse liefern. Die Streudiagramme enthalten Daten aus dem gesamten Jahr 2015.

Speziell bei den Streudiagrammen ist zu beachten, dass ein Winkel von 360° gleich einem Winkel von 0° ist. Die Daten in der oberen linken Ecke des Diagramms stimmen also mit den Daten in der unteren linken Ecke überein. Dasselbe gilt für die rechte obere und die rechte untere Ecke.

Im Allgemeinen stimmen die Ergebnisse des verschachtelten Modells gut mit dem ursprünglichen Modell überein. Beide Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen werden durch das modifizierte ZUNO-Modell gut simuliert. Für die verschiedenen Beobachtungspunkte gilt Folgendes:

- Obs(5,243): Der Durchfluss wird gut vorhergesagt, allerdings ist eine gewisse Streuung im Streudiagramm zu sehen. Zum Beispiel wird die Spitze der Strömungsgeschwindigkeit um 40.000 min übersehen. Die Richtung ist gut vorhergesagt und die Strömung verläuft hier hauptsächlich parallel zur Küste, der Schwerpunkt in Strömungsrichtung liegt bei 280 und 100°.
- Obs(13,246), obs(13,251) und obs(13,255): Die Geschwindigkeit wird hier gut vorhergesagt und auch die hohe Spitze in der Fließgeschwindigkeit wird durch das modifizierte ZUNO-Modell vorhergesagt. Die Strömungsrichtung ist der des ursprünglichen ZUNO-Modells sehr ähnlich, die Strömung verläuft hier wieder parallel zur Küste.
- Obs(26,258): Die Durchflussmenge an diesem Punkt wird vom modifizierten ZUNO-Modell leicht unterschätzt. Die Unterschätzung liegt in der Größenordnung von 5 %. Die Durchflussrichtung ist der des ursprünglichen ZUNO-Modells sehr ähnlich. Der Schwerpunkt der Fließrichtung liegt hier bei 240 und 50°, was bedeutet, dass das Wasser hier von Nordwesten nach Südosten und umgekehrt fließt. Das hat mit der Lage dieses Punktes zu tun: Er liegt am nächsten zum Auslauf der Ems. Dies ist

wahrscheinlich auch der Grund, warum die Ergebnisse hier stärker vom ursprünglichen ZUNO-Modell abweichen: das feinere Gitter in Kombination mit einem komplexen Strömungsmuster (Gezeiten, Wind + Ausfluss der Ems) kann zu anderen Ergebnissen führen, weil detailliertere Ergebnisse möglich sind.

Die Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund von Gezeiten und Wind liegen im Allgemeinen zwischen 0 und 0,8 m/s in der Mitte der Wassersäule und zwischen 0 und 1,0 m/s in der Nähe der Oberfläche. In Bodennähe liegen die Geschwindigkeiten zwischen 0 und 0,6 m/s. Dies entspricht den Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 und auch in [4].

Anhang A2

Modellergebnisse für N05-A

A2 Modellergebnisse für N05-A

A2.1 März-Szenario

Einfluss der Wellen

Eine Simulation mit Wellen wurde mit einer Simulation ohne Wellen verglichen. Abbildung 8-39 und Abbildung 8-40 zeigen die Bodenschubspannung und die Strömungsgeschwindigkeit beider Simulationen im Zeitraum um den Sturm von Ende März 2015 auf Höhe der Plattform. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der hohen Wellen zum Zeitpunkt des Sturms die Bodenschubspannung erhöht war.

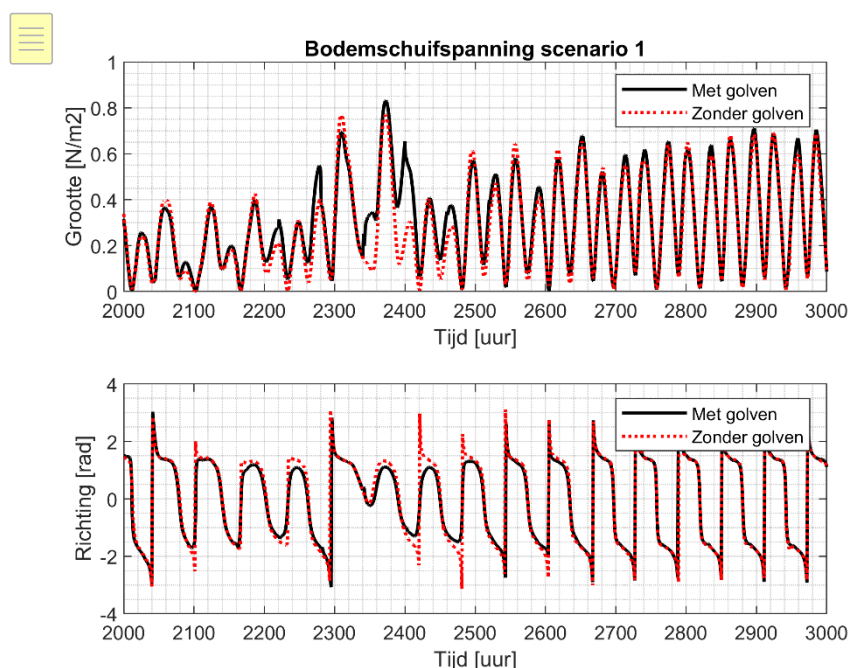


Abbildung 8- 123124: Größe und Richtung der Schubspannung in einer Simulation mit und ohne Wellen.

Zum Zeitpunkt des Sturms ist die Gesamtfliessgeschwindigkeit reduziert: die Komponente in x-Richtung ist leicht erhöht, aber die Komponente in y-Richtung ist reduziert. Dies liegt an der Richtung des Windes und damit an der Richtung der Wellen. Diese kommen von Nordwesten (Winkel von 300 Grad, siehe Abbildung 8-41 und Abbildung 8-42), während die Flut nach Nordosten geht (Winkel von 1 rad). Wind und Wellen wirken also in y-Richtung entgegengesetzt, in x-Richtung jedoch zusammen.

In der Abbildung 8-43 ist die resultierende Feder für eine Simulation ohne Wellen dargestellt. Wenn man diese Abbildung mit der Abbildung 5-1 vergleicht, wird deutlich, dass die Wellen wenig Einfluss auf die Größe der Feder haben.

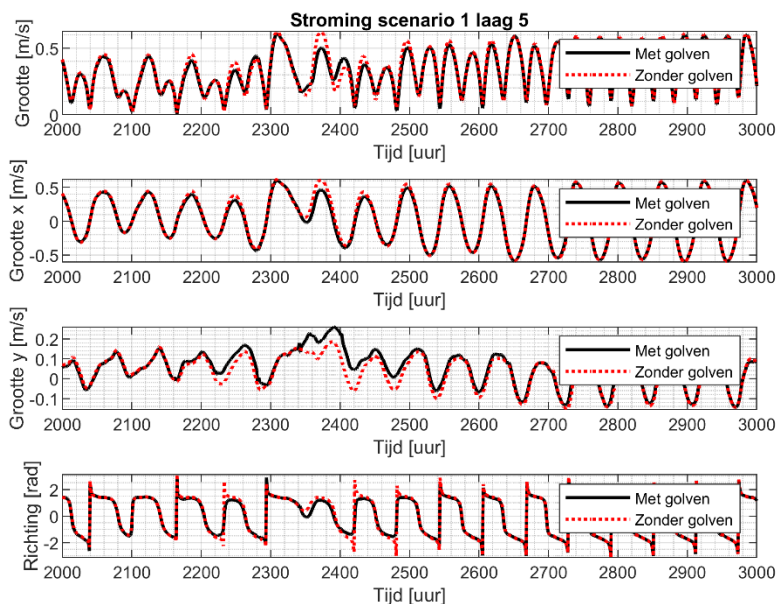


Abbildung 8- 125126: Größe und Richtung der Strömung in einer Simulation mit und ohne Wellen

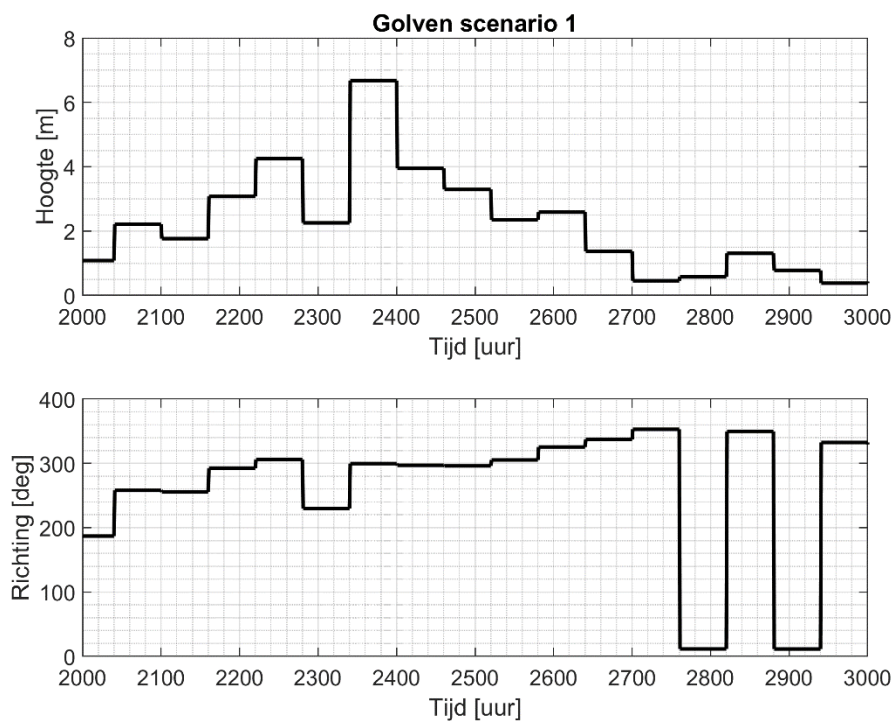


Abbildung 8- 127: Wellenhöhe und -richtung während des März-Szenarios

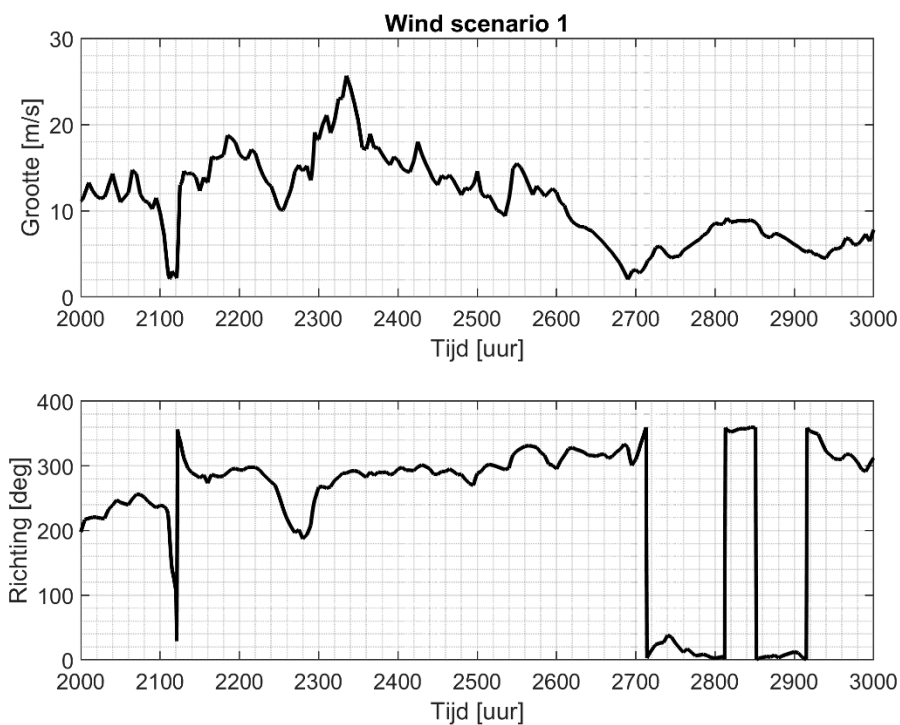


Abbildung 8- 128: Windgeschwindigkeit und -richtung während des März-Szenarios

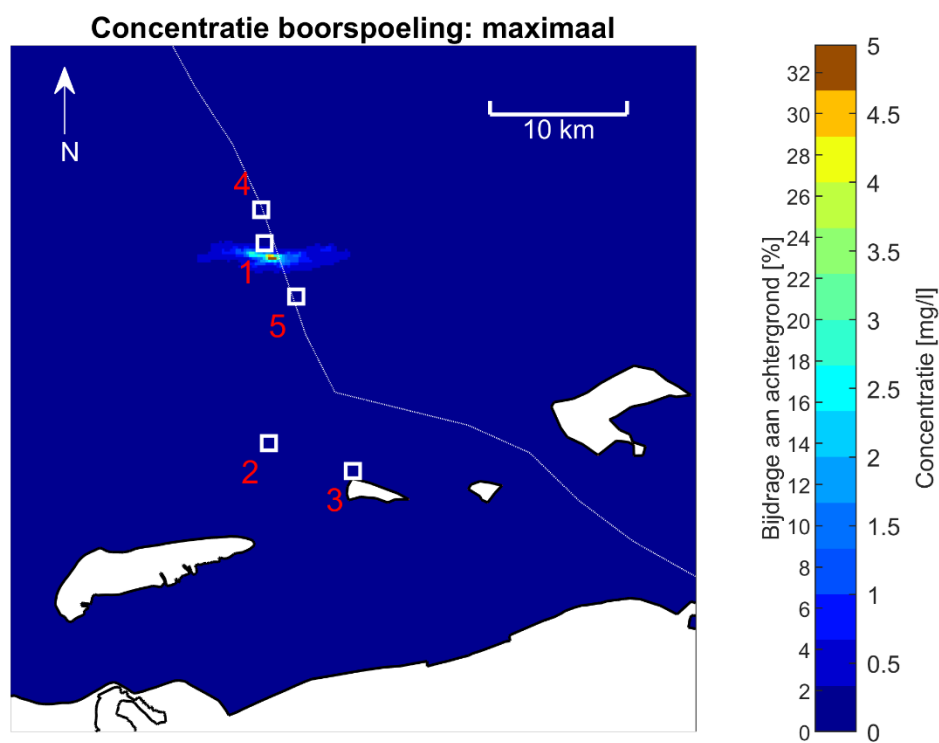


Abbildung 8 -129130: Maximale Konzentration der Boorspoeling über der Wassersäule während des März-Szenarios für eine Simulation ohne Wellen

A2.2 Oktober-Szenario

A2.2.1 Allgemein

Das Oktober-Szenario umfasst den Zeitraum zwischen dem 28. September und dem 31. Dezember 2015. Der Oktober ist ein sehr ruhiger Monat mit niedrigen Wellen und Windgeschwindigkeiten. Höhere Wellen und Windgeschwindigkeiten treten im November und Dezember auf. Die Entladung findet im Oktober statt. Die Ausgangsbedingungen für diese Simulation wurden aus einer Simulation des gesamten Jahres 2015 abgeleitet.

A2.2.2 Bohrspülung

Maximale Konzentration der Bohrspülung während der Simulation

Die maximale Konzentration der Bohrspülung während der gesamten Simulation und über die gesamte Tiefe ist in Abbildung 8-44 dargestellt. Die Abbildung zeigt die deutsch-niederländische Grenze und die verschiedenen empfindlichen Stellen (weiße Quadrate). Der höchste Maximalwert ist um den Standort der Plattform zu sehen. Um ihn herum befindet sich ein Band mit niedrigeren Konzentrationen.

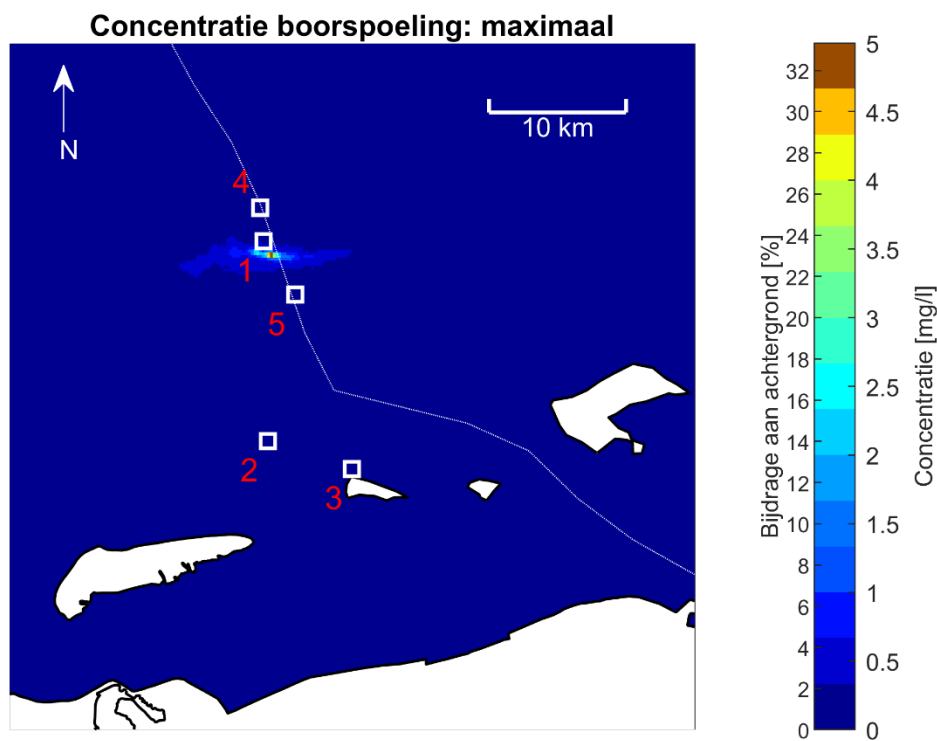


Abbildung 8- 131132: Maximale Konzentration von Bohrspülung und der maximale Beitrag relativ zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l über die gesamte Wassersäule während des Oktober-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Maximale Sedimentation während der Simulation

Die Sedimentation durch den Austritt von Bohrspülung während des Oktober-Szenarios ist in Abbildung 8-45 dargestellt. Die maximale Sedimentation tritt unterhalb der Plattform auf und beträgt etwa 0,03 mm.

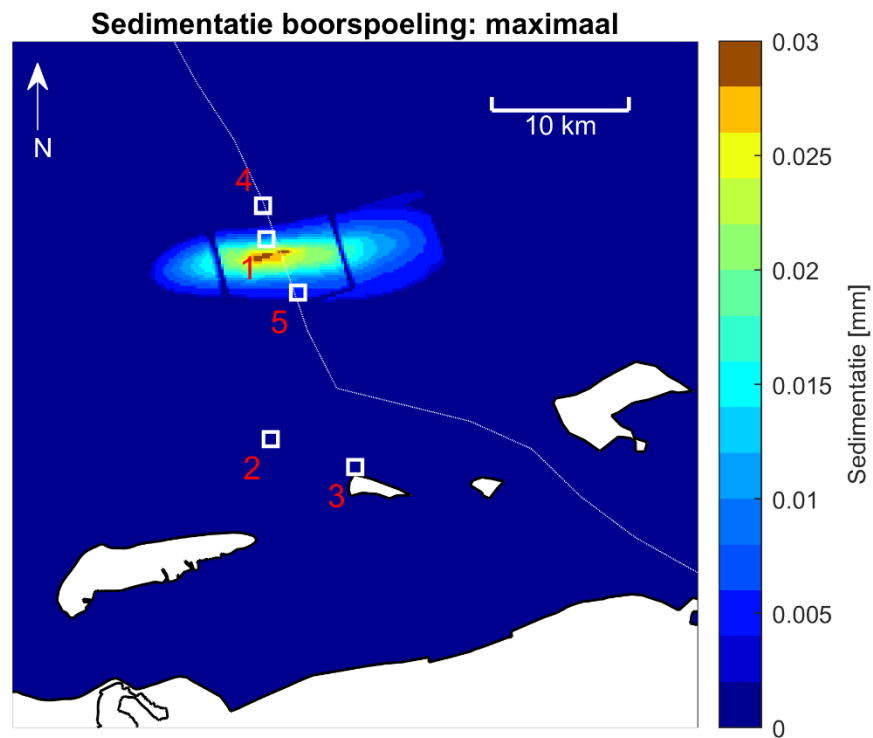


Abbildung 8- 133134: Maximale Sedimentation der Bohrspülung und während des Oktober-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Abbildung 8-46 und Abbildung 8-47 zeigen die Variation der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke über die Zeit an den folgenden Stellen:

- Borkum Riffgrund
- Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer
- Küstengebiet der Nordsee
- Das Austernbank-Restaurierungsprojekt
- Rottumerplaat

Die Abbildung 8-48 zeigt den Verlauf der Konzentration von Bohrspülung und Sedimentation in der Nähe der Plattform. Die Konzentrationen geben die maximale Konzentration über der Wassersäule an. Die Entladung über die Zeit wurde zur Veranschaulichung hinzugefügt.

In den Konzentrationen in der Nähe des Austernbank-Restaurationsprojekts ist das Abflussmuster deutlich zu erkennen, da sich dieser Standort in der Nähe der Plattform befindet. Die Konzentrationen in der Küstenzone der Nordsee und der Rottumerplaat sind sehr gering. Im Sedimentationsmuster ist zu erkennen, dass nach 1000 Stunden die Wellenhöhen zunehmen: Dies erhöht die Schubspannung und erodiert einen Teil des Materials am Boden, die Konzentration nimmt also zu.

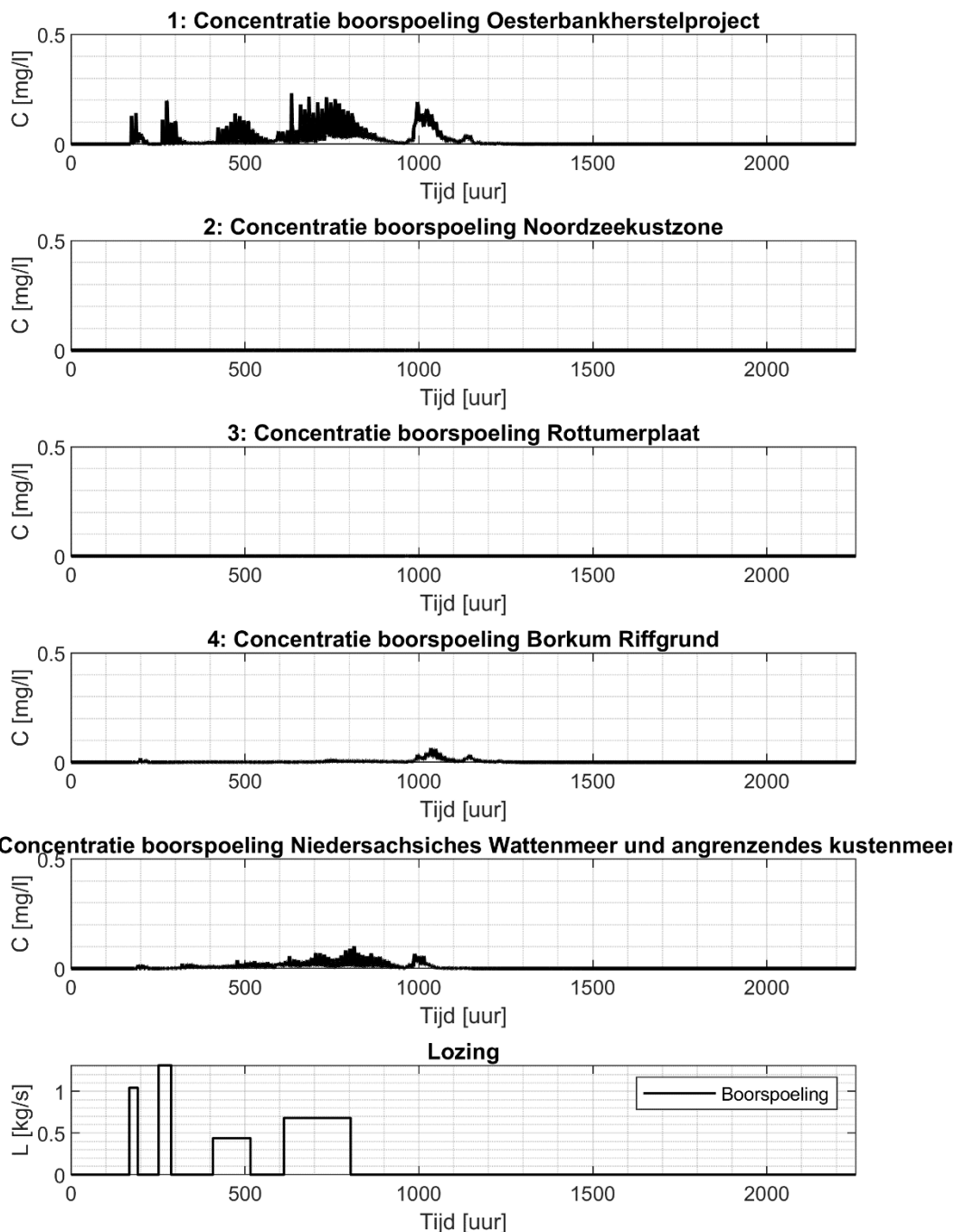


Abbildung 8- 135136: Maximale Konzentration von Bohrspülung über der Wassersäule während des Oktober-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Entladungsbedingungen sind in der unteren Grafik dargestellt.

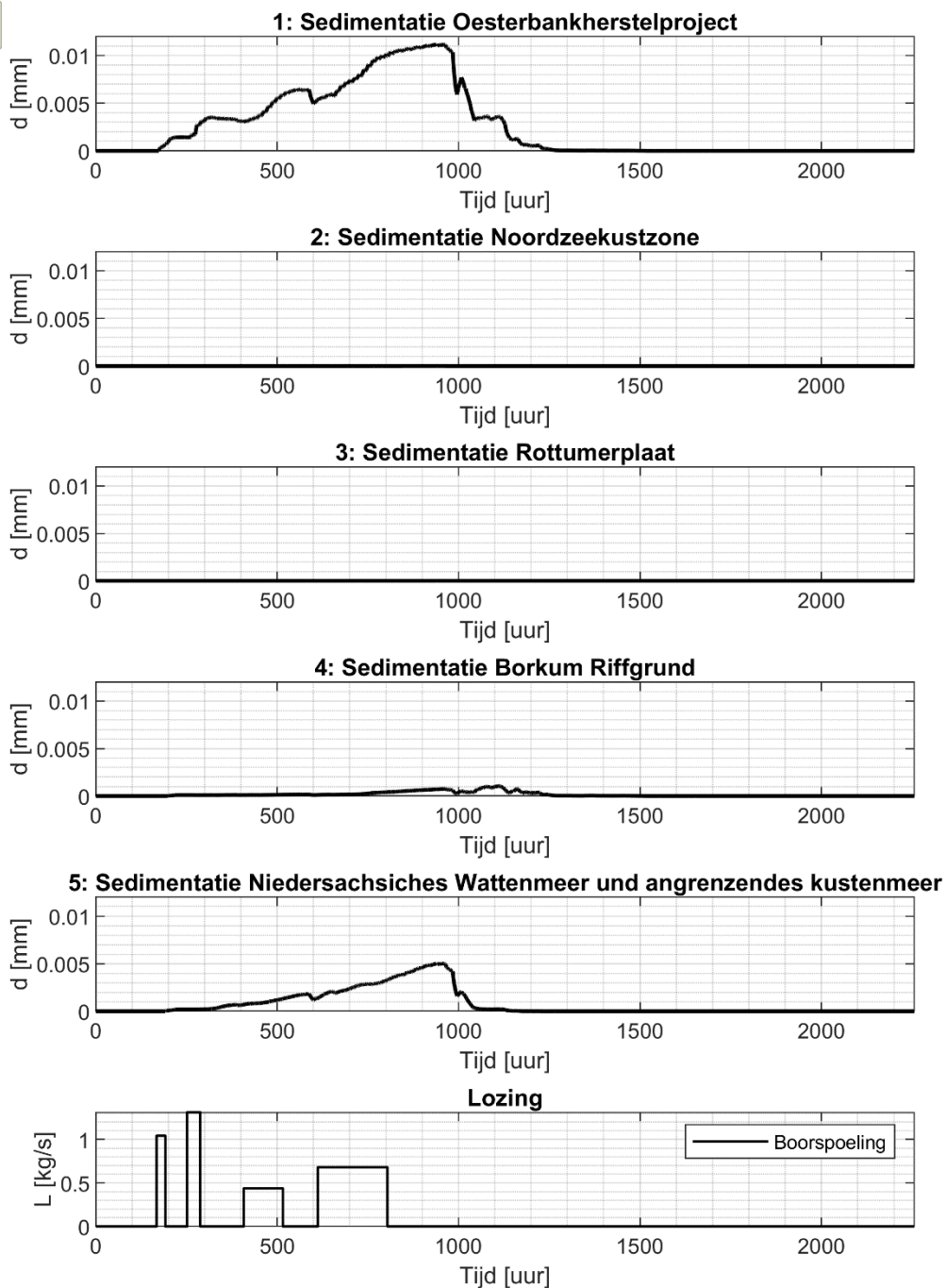


Abbildung 8- 137138: Sedimentation während des Oktober-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Entladungsterme sind in der unteren Grafik dargestellt

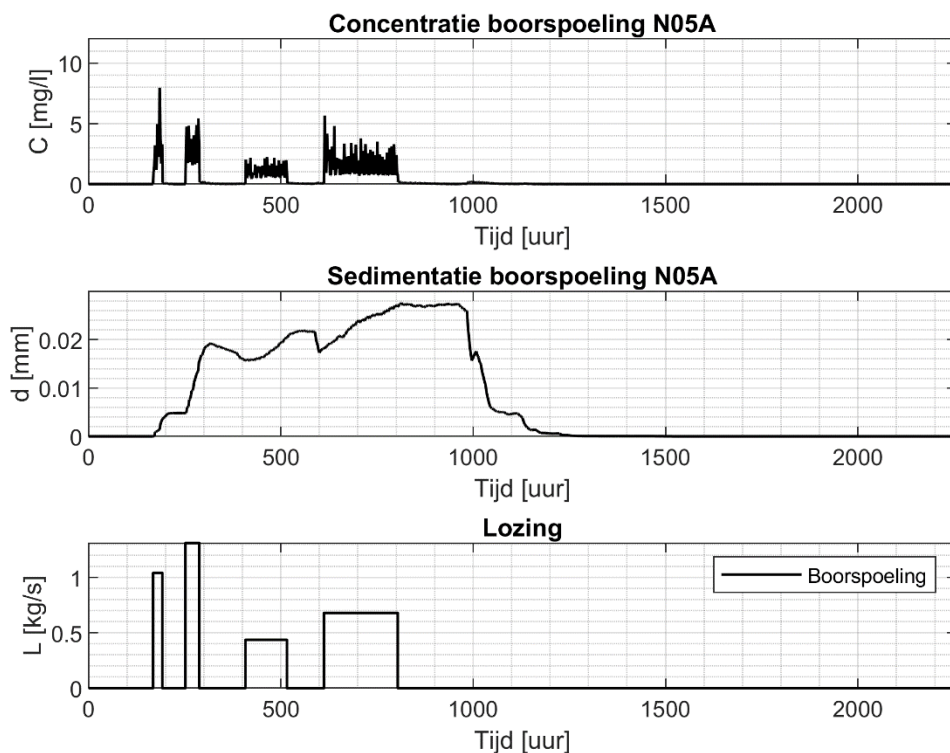


Abbildung 8- 139: Zeitliche Variation der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke der Bohrspülung am Standort der Plattform N05-A. Die Konzentration gibt die maximale Konzentration über der Wassersäule an.

Die Abbildung 8-49 zeigt die Strömungsbedingungen und die Wellenhöhe an der Plattform während der Simulation. In der ersten Hälfte der Simulation sind die Wellen sehr niedrig, in der zweiten Hälfte der Simulation (nach ca. 900 Stunden) sind sie höher. In der Abbildung 8-50 ist eine Strömungsrose an der Plattform dargestellt. Diese Rose zeigt die vorherrschenden Strömungsrichtungen an. Es ist klar, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Südwesten kommen. Dies entspricht dem Muster der großräumigen Gezeitenwelle in der Nordsee und erklärt, warum die dominante Richtung der Feder in Richtung Nordosten verläuft.

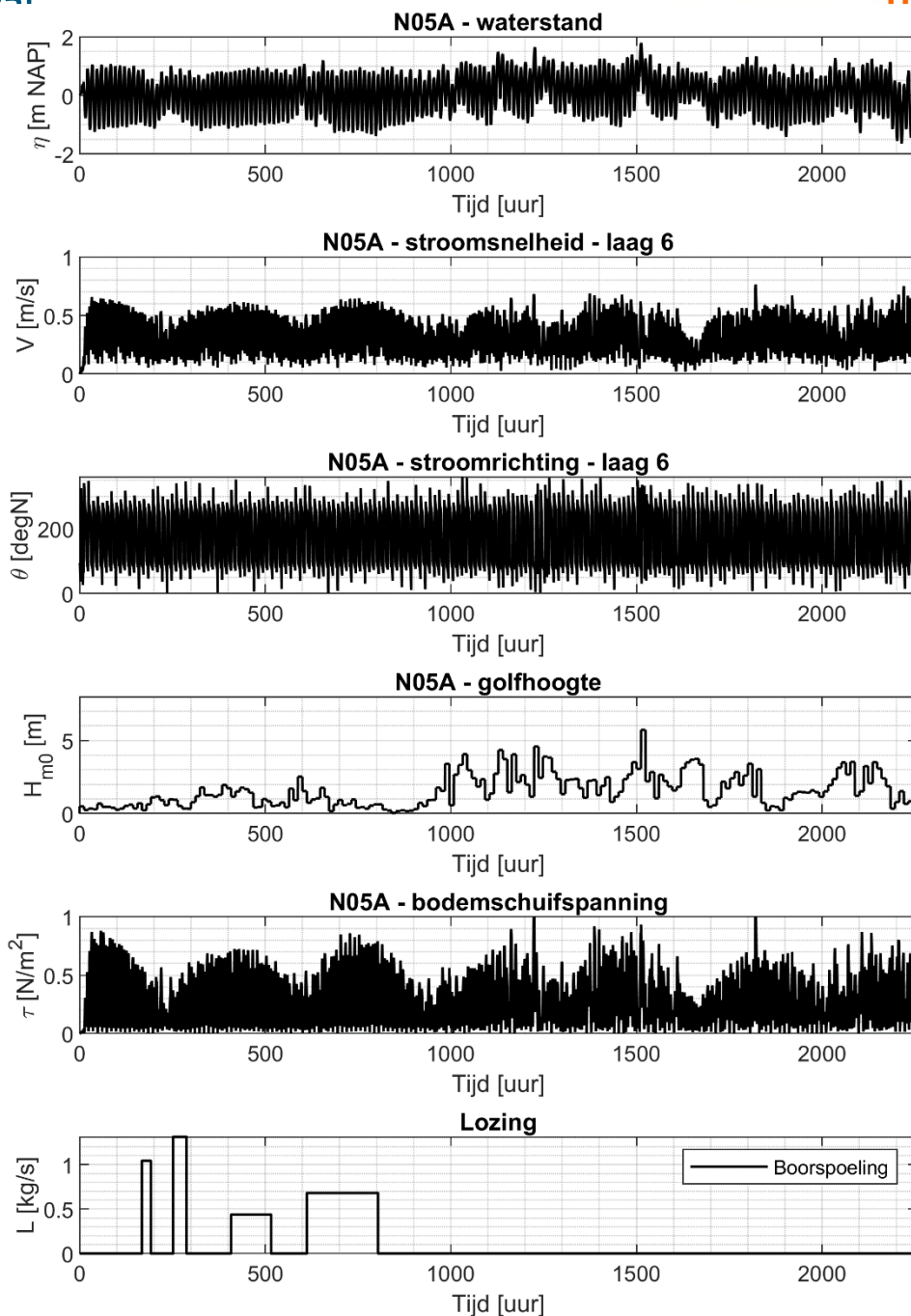


Abbildung 8 -140141: Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie Wellenhöhe in der Nähe der Plattform N05-A

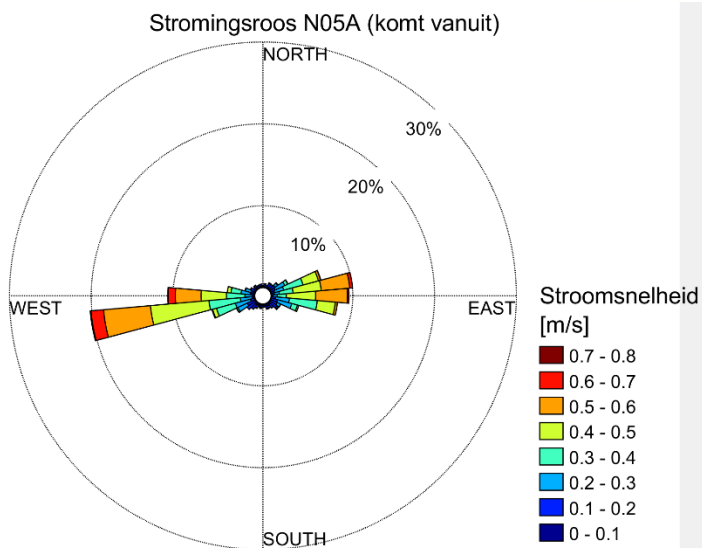
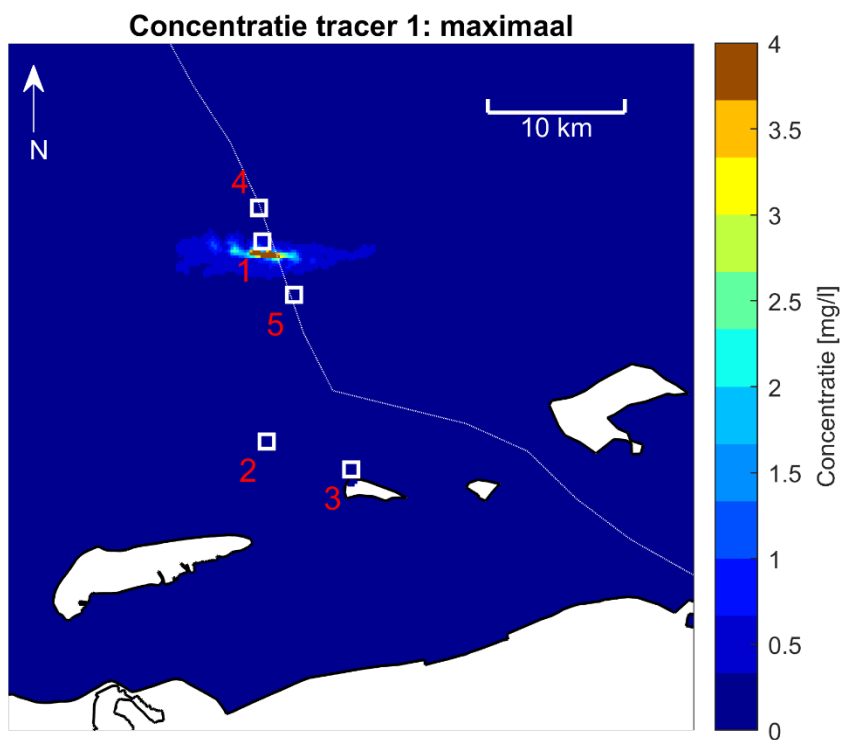


Abbildung 8- 142143: Strömungsrose am Standort der Plattform N05-A. Die Richtung gibt an, woher der Durchfluss kommt.

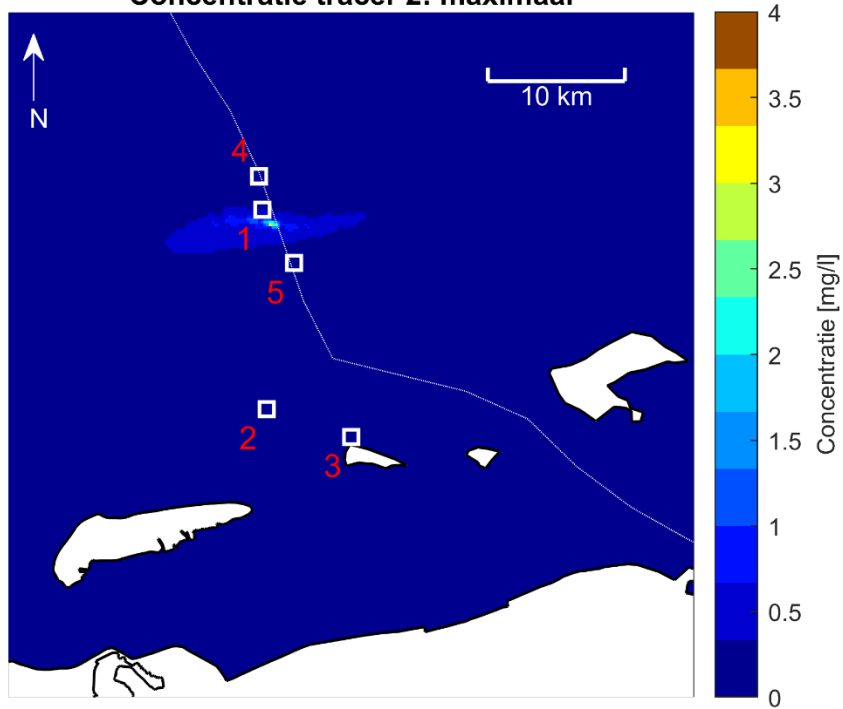
A2.2.3 Tracer

Maximale Konzentration während der Simulation

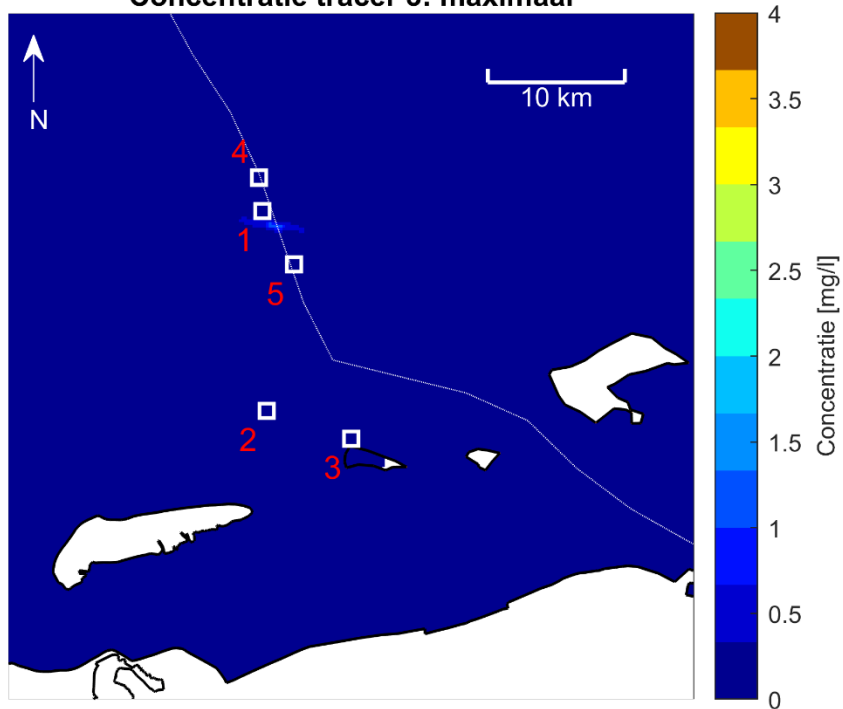
Die Abbildung 8-51 zeigt die maximale Konzentration der vier Tracer während des Oktober-Szenarios über die gesamte Wassersäule. Die höchsten Konzentrationen sind für Tracer 1 zu sehen, da sein Ableitungsterm am höchsten ist.



Concentratie tracer 2: maximaal



Concentratie tracer 3: maximaal



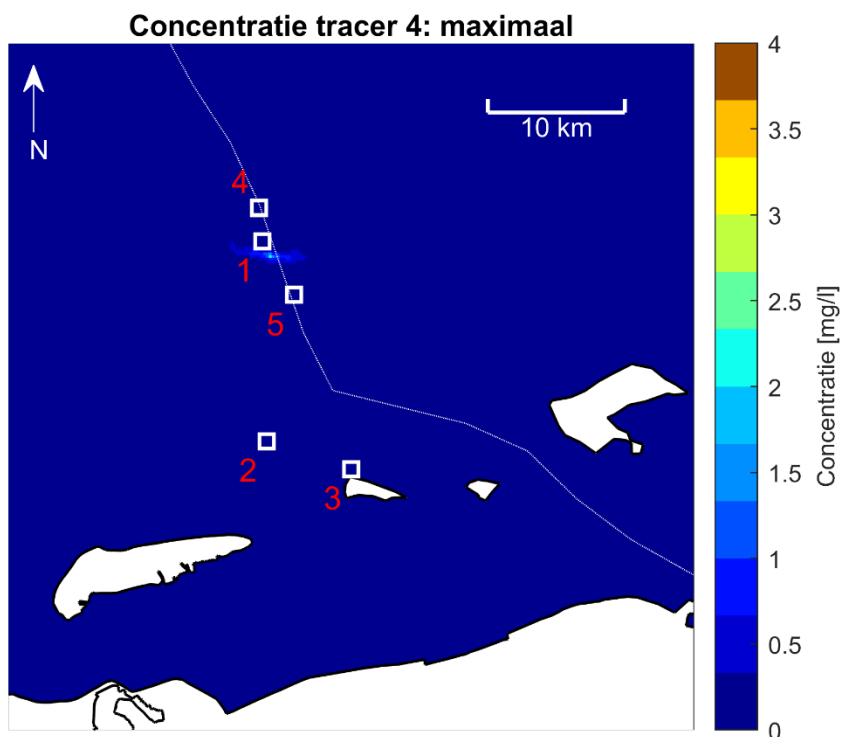


Abbildung 8- 144145: Maximale Konzentration der Tracer über die gesamte Wassersäule während des Oktober-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Die Abbildung 8-57 zeigt den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Tracer an mehreren Stellen.

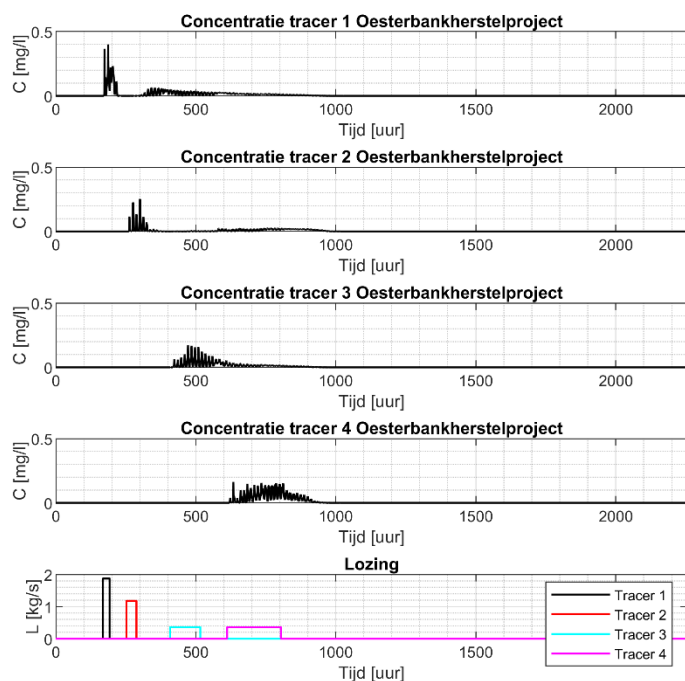


Abbildung 8 -146: Variation in Zeit (e) der Tracerkonzentration am Standort des Austernbank-Restaurationsprojekts. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

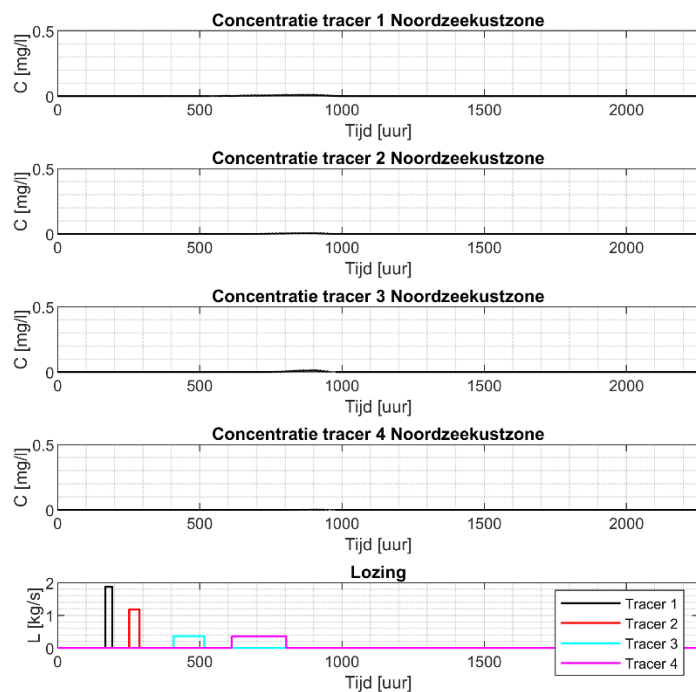


Abbildung 8- 147: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration in der Küstenzone der Nordsee. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

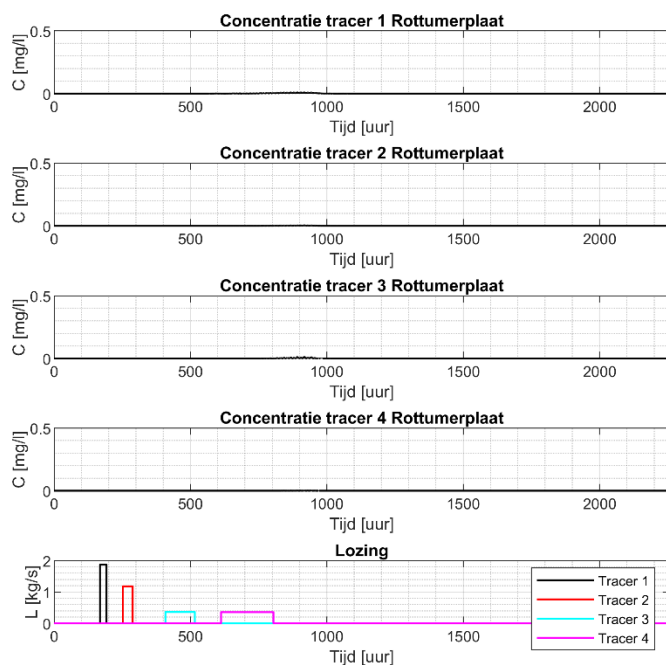
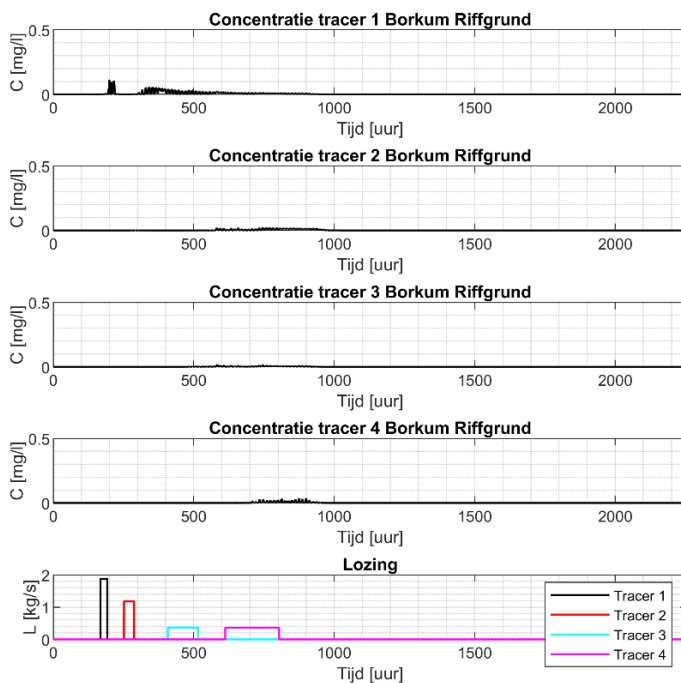


Abbildung 8 -148: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Rottumer Platte. Die Konzentration stellt den Maximalwert



über der Wassersäule dar.

Abbildung 8- 149: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Borkum Riffgrund. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

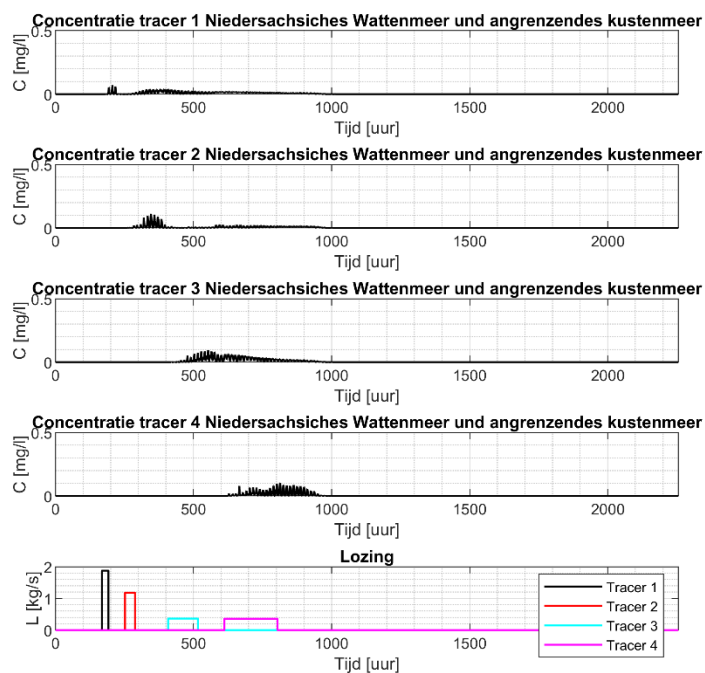


Abbildung 8- 150: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort des Niedersächsischen Wattenmeers. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

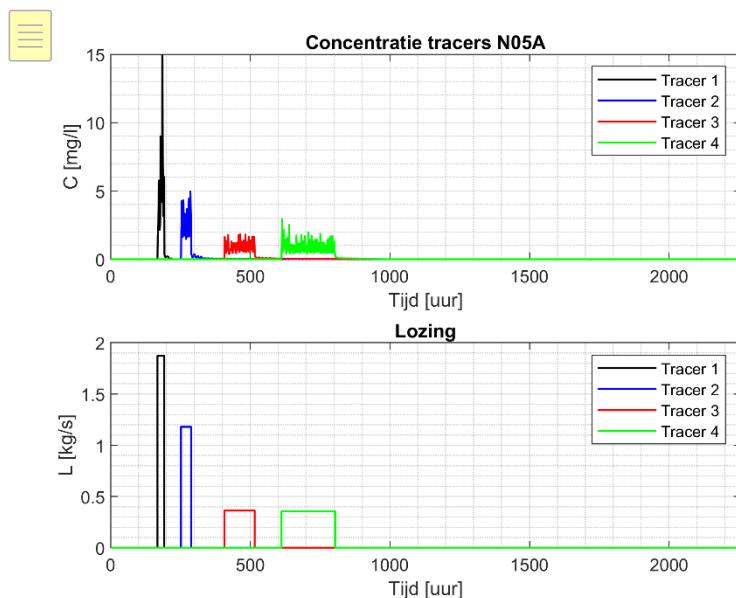


Abbildung 8- 151152: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort der Plattform. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

Zersetzung gelöster Stoffe

Tracer 1 bis 4 sind eine Aggregation der verschiedenen gelösten Stoffe pro Bohrstrecke. Anhand des Anteils jeder einzelnen Substanz am gesamten Tracer wurde eine Aufschlüsselung der Tracer

vorgenommen. Daraus ergibt sich eine maximale Konzentration aller gelösten Stoffe pro Bohrungsabschnitt, siehe Tabelle 8-8. Der Anteil der einzelnen Substanzen variiert je nach Bohrprofil. Zum Beispiel beträgt der Anteil von Kaliumchlorid bei Bohrabschnitt 1 fast 99%, während er bei Bohrabschnitt 4 0% beträgt.

Tabelle 8- 23: Maximale Konzentration der gelösten Stoffe in der Wassersäule pro Bohrstrecke



Maximale concentratie opgeloste stoffen over de gehele waterkolom [mg/l]: alle secties - scenario Oktober						
	Oesterbankherstel project	Noordzeekustzone	Rottumerplaat	Borkum Riffgrund	Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes kustenmeer	N05A
Vloeistofverliesvertrager	1.9E-03	2.5E-05	1.9E-05	4.1E-04	1.2E-03	3.4E-02
Verzadigd monocarbonzuur, calciumzout	3.3E-03	2.4E-04	2.1E-04	3.7E-04	1.5E-03	6.6E-02
Calcium hydroxide	2.5E-03	2.4E-04	2.1E-04	2.5E-04	1.3E-03	2.7E-02
Magnesium oxide	1.7E-03	2.3E-05	1.7E-05	3.7E-04	1.0E-03	3.0E-02
Potassium chloride	4.0E-01	1.3E-02	1.2E-02	1.1E-01	8.0E-02	1.5E+01
Natriumcarbonaat	2.7E-03	7.1E-05	6.7E-05	7.7E-04	8.0E-04	1.0E-01
Sodium chloride	1.5E-01	2.0E-03	1.5E-03	3.2E-02	9.1E-02	2.7E+00
Natrium carboxymethylcellulose	1.2E-02	7.2E-04	6.4E-04	1.1E-03	5.5E-03	2.5E-01
Saccharose	4.9E-04	1.3E-05	1.2E-05	1.4E-04	8.7E-05	1.9E-02
Corosieremmer	1.2E-03	1.6E-05	1.3E-05	2.7E-04	7.4E-04	2.2E-02
Antischuim	2.5E-04	1.8E-05	1.6E-05	2.2E-05	1.1E-04	4.9E-03
Stof 1: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α-butyl-ω-hydroxy	5.3E-02	2.4E-03	2.1E-03	4.7E-03	2.3E-02	1.1E+00
Potassium hydroxide	2.0E-04	2.7E-06	2.1E-06	4.4E-05	1.2E-04	3.7E-03
Stof 2: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α-butyl-ω-hydroxy	5.3E-03	7.3E-05	5.6E-05	1.2E-03	3.3E-03	9.7E-02

A2.3 November-Szenario

A2.3.1 Bohrspülung

Maximale Konzentration der Bohrspülung während der Simulation

Die maximale Konzentration der Bohrspülung während der gesamten Simulation und über die gesamte Tiefe ist in Abbildung 8-58 dargestellt. Die Abbildung zeigt die deutsch-niederländische Grenze und die verschiedenen empfindlichen Stellen (weiße Quadrate). Der höchste Maximalwert von ca. 5 mg/l ist in der Nähe des Plattformstandortes zu erkennen. Eine Feder mit niedrigeren Konzentrationen breitet sich weiter um den Standort der Plattform aus. Der maximale Beitrag bezogen auf die Hintergrundkonzentration der Bohrspülung von 15 mg/l in der Nordsee beträgt 33 %.

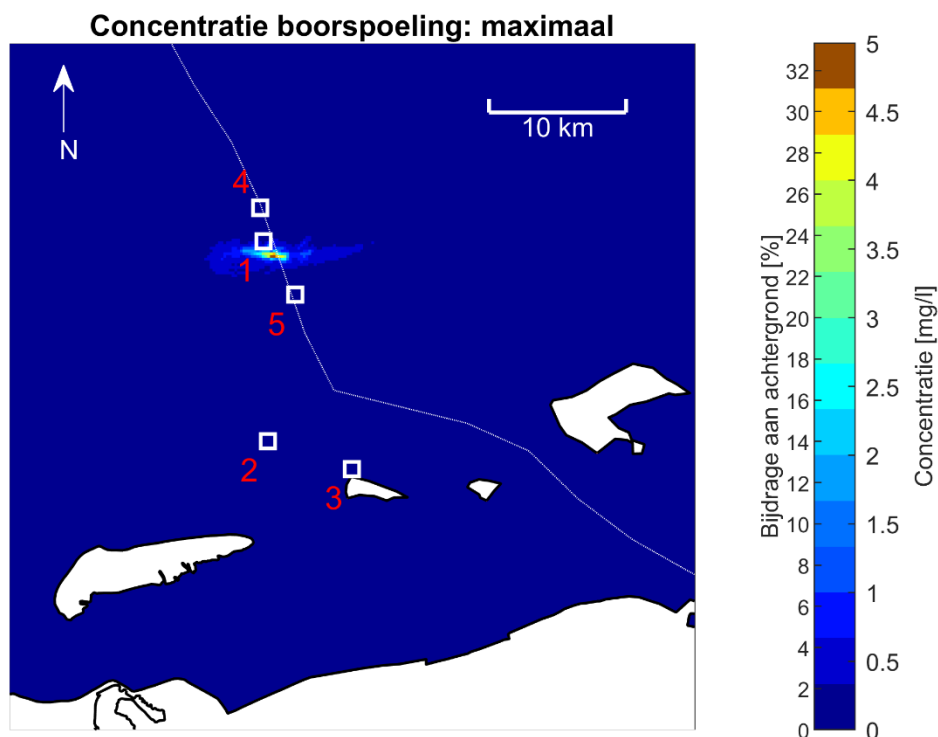


Abbildung 8- 153: Maximale Konzentration von Bohrspölung und der maximale Beitrag relativ zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l über die gesamte Wassersäule während des November-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Maximale Sedimentation während der Simulation

Die Sedimentation, die durch den Austritt von Bohrspölung während des November-Szenarios entsteht, ist in Abbildung 8-59 dargestellt. Die maximale Sedimentation von ca. 0,015 mm tritt unterhalb der Plattform auf.

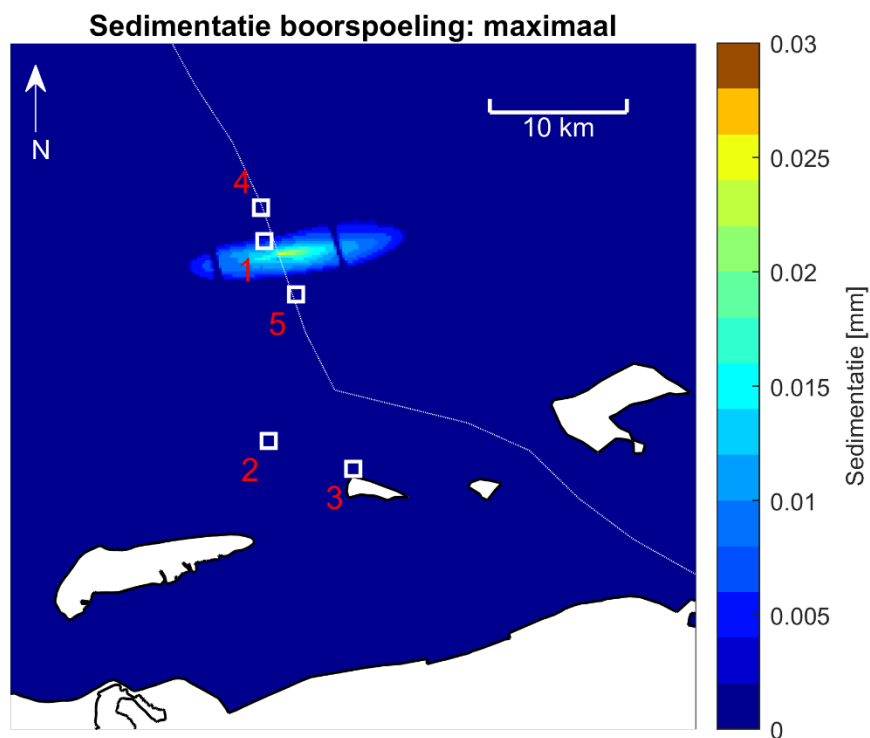


Abbildung 8- 154: Maximale Sedimentation der Bohrspülung während des November-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Abbildung 8-60 und Abbildung 8-61 zeigen die Variation der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke über die Zeit an den folgenden Stellen:

- Borkum Riffgrund
- Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer
- Küstengebiet der Nordsee
- Das Austernbank-Restaurierungsprojekt
- Rottumerplaat

Die Abbildung 8-62 zeigt den Verlauf der Konzentration von Bohrspülung und Sedimentation in der Nähe der Plattform. Die Konzentrationen geben die maximale Konzentration über der Wassersäule an. Die Einleitung über die Zeit wurde zur Veranschaulichung hinzugefügt.

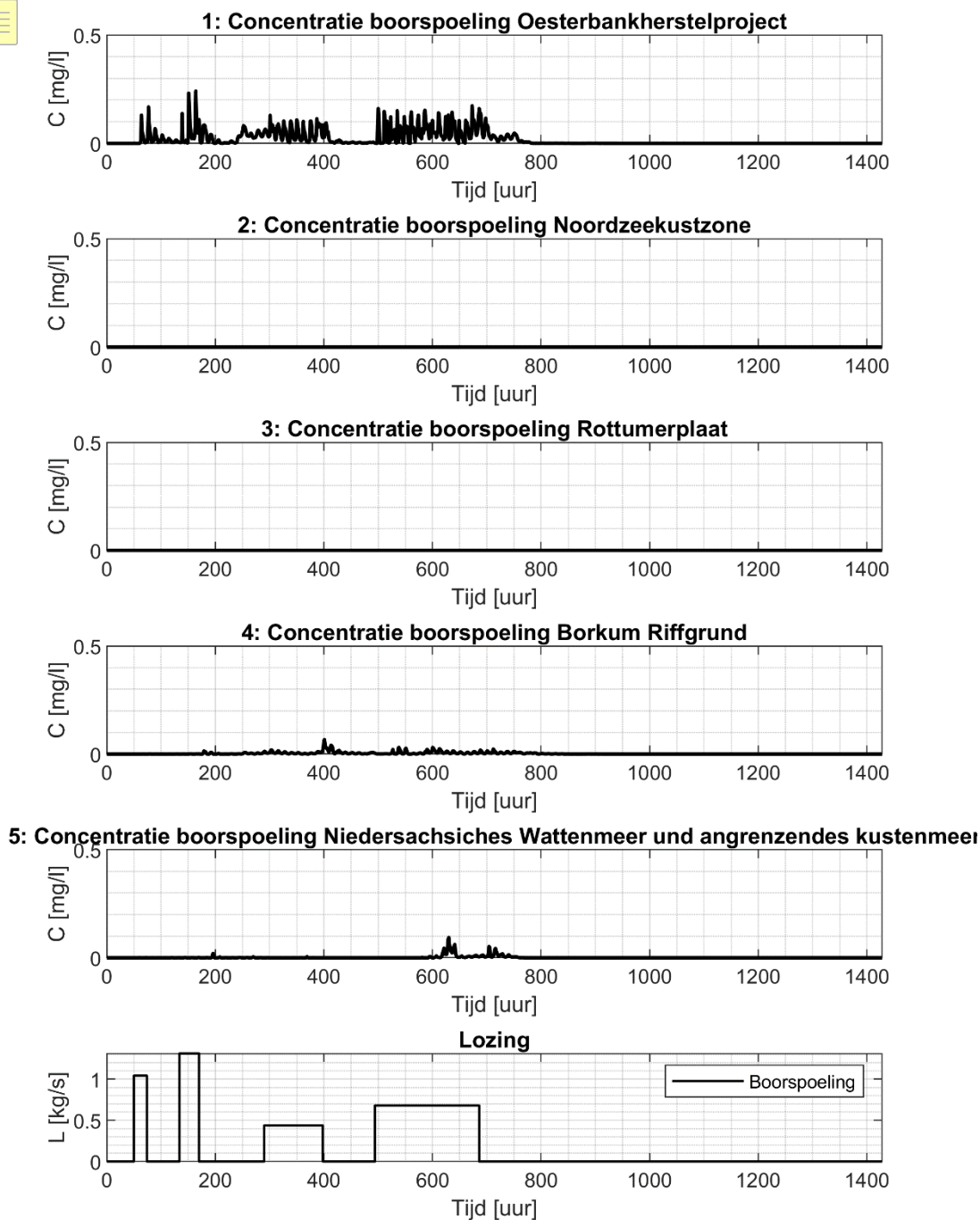


Abbildung 8- 155156: Maximale Konzentration der Bohrspülung über der Wassersäule während des November-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Entladungsbedingungen sind in der unteren Grafik dargestellt.

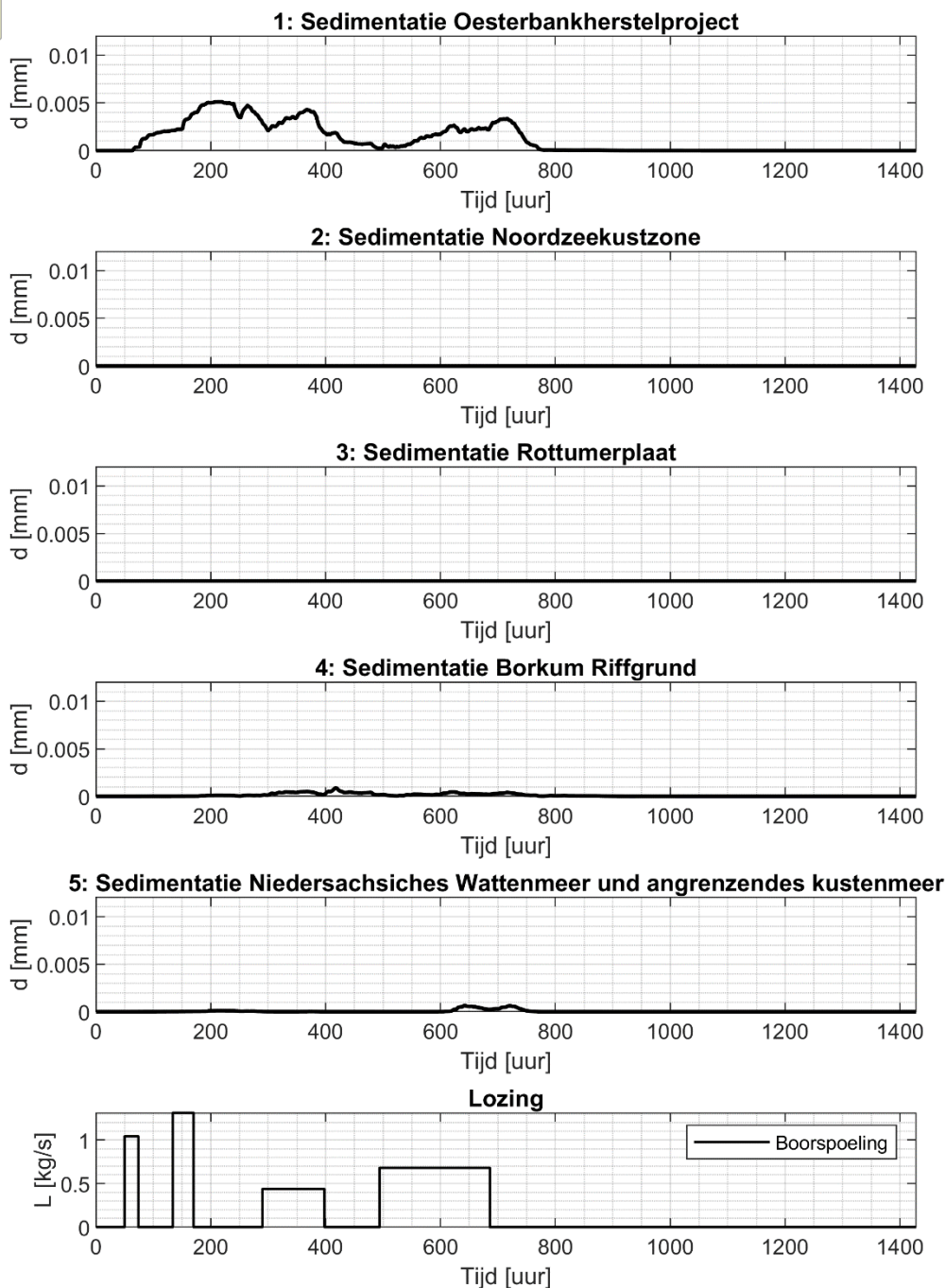


Abbildung 8- 157158: Sedimentation während des November-Szenarios an den empfindlichen Stellen. Die Einleitungsbedingungen sind in der unteren Grafik dargestellt.

In den Konzentrationen in der Nähe des Austernbank-Restaurationsprojekts ist das Abflussmuster deutlich zu erkennen, da sich dieser Standort in der Nähe der Plattform befindet. Die Konzentrationen in der Küstenzone der Nordsee und der Rottumerplaat sind sehr gering. Der Verlauf der Sedimentation spiegelt sich in der Wellenhöhe wider: Nach 300 Stunden beginnt eine Periode mit höheren Wellen, die Sedimentation nimmt aufgrund einer Zunahme der Schubspannung ab. Nach 500 Stunden beginnt die

Wellenhöhe wieder zu sinken und die geringeren Schubspannungen lassen Material sedimentieren. Um 800 Stunden gibt es einen Höhepunkt in der Wellenhöhe, die Sedimentation nimmt ab.

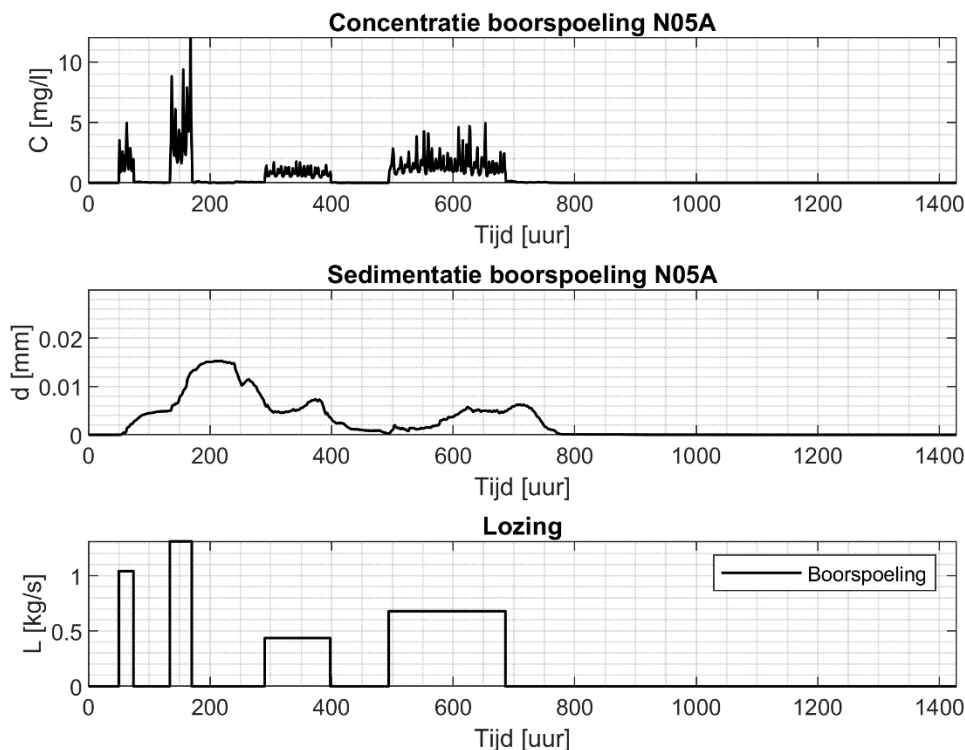


Abbildung 8 -159160: Zeitliche Veränderung der Bohrspülungskonzentration und der Sedimentationsdicke der Bohrspülung am Standort der Plattform N05-A. Die Konzentration gibt die maximale Konzentration über der Wassersäule an.

Die Abbildung 8-63 zeigt die Strömungsbedingungen und die Wellenhöhe an der Plattform während der Simulation. Im ersten Teil der Simulation (0 - 200 Stunden) sind die Wellen sehr niedrig, im zweiten Teil der Simulation sind sie abwechselnd höher und niedriger. In der Abbildung 8-64 ist eine Strömungsrose in der Nähe der Plattform dargestellt. Diese Rose zeigt die vorherrschenden Strömungsrichtungen an. Es ist klar, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Südwesten kommen. Dies entspricht dem Muster der großräumigen Gezeitenwelle in der Nordsee und erklärt, warum die dominante Richtung der Feder in Richtung Nordosten verläuft.

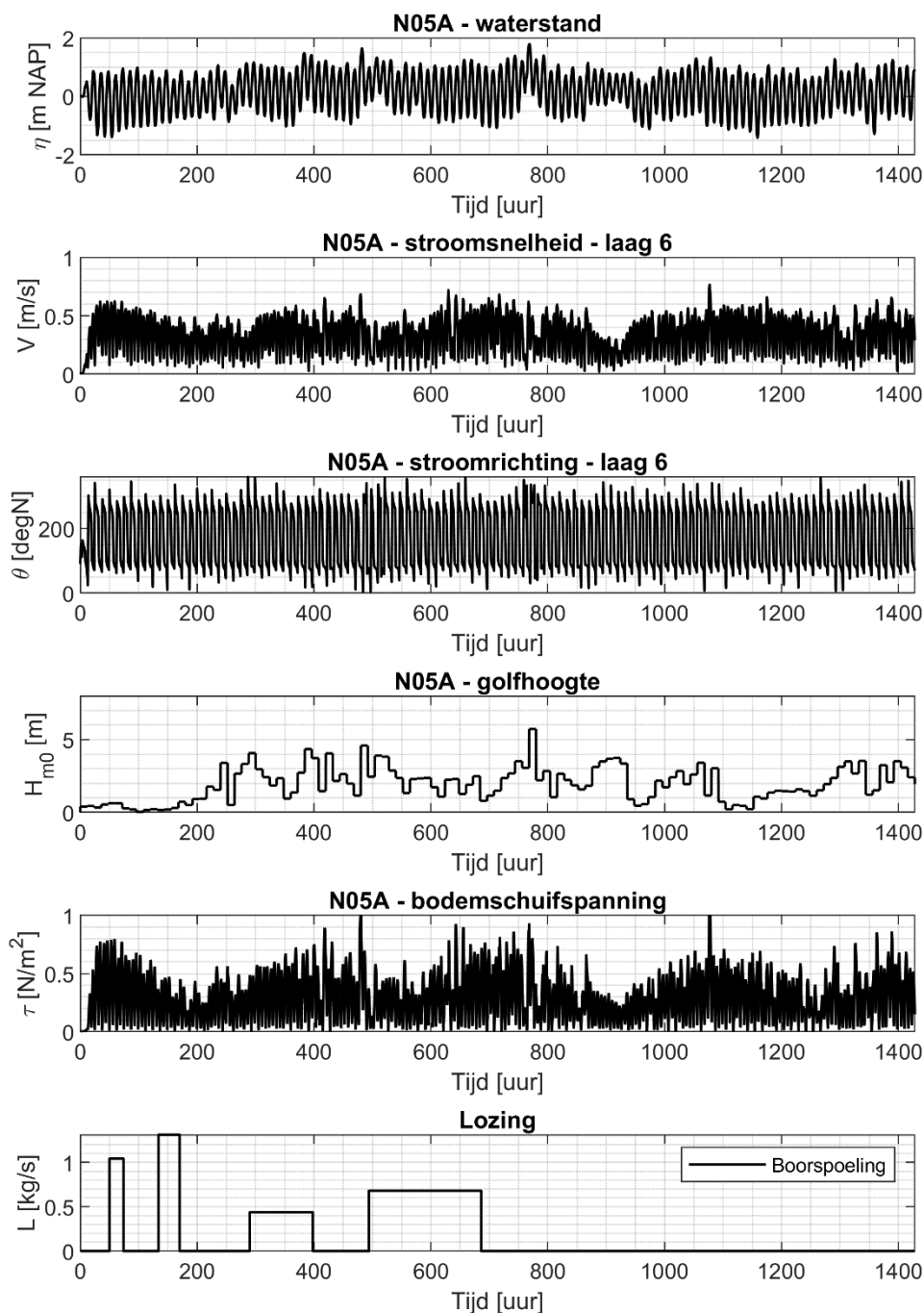


Abbildung 8- 161162: Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie Wellenhöhe in der Nähe der Plattform N05-A

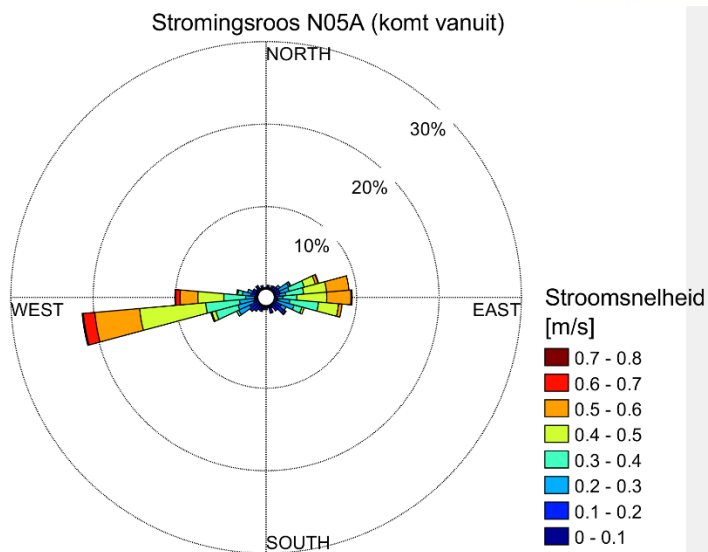
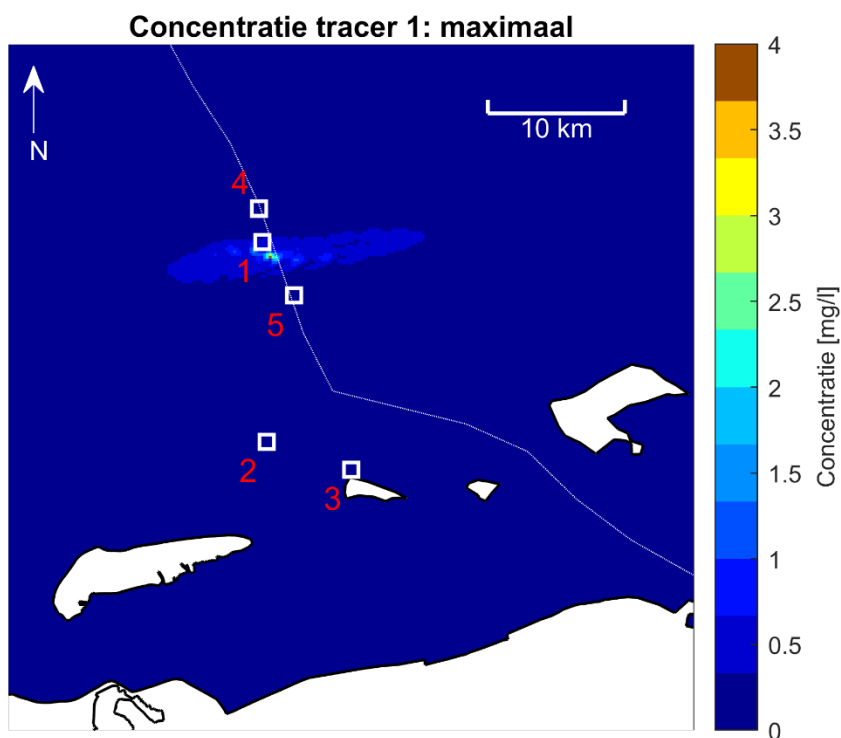


Abbildung 8- 163164: Strömungsrose am Standort der Plattform N05-A. Die Richtung gibt an, woher der Durchfluss kommt.

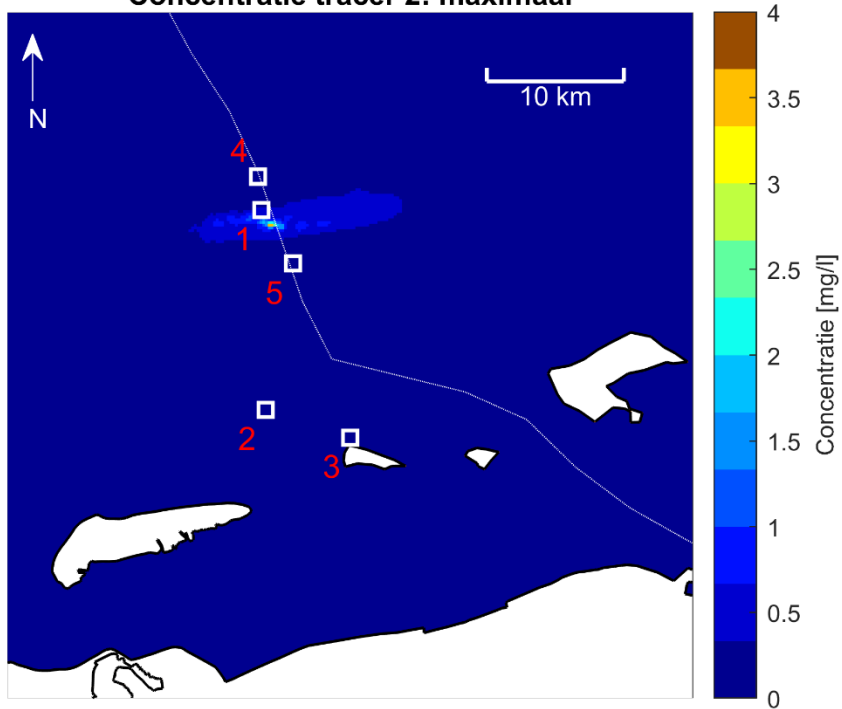
A2.3.2 Tracer

Maximale Konzentration während der Simulation

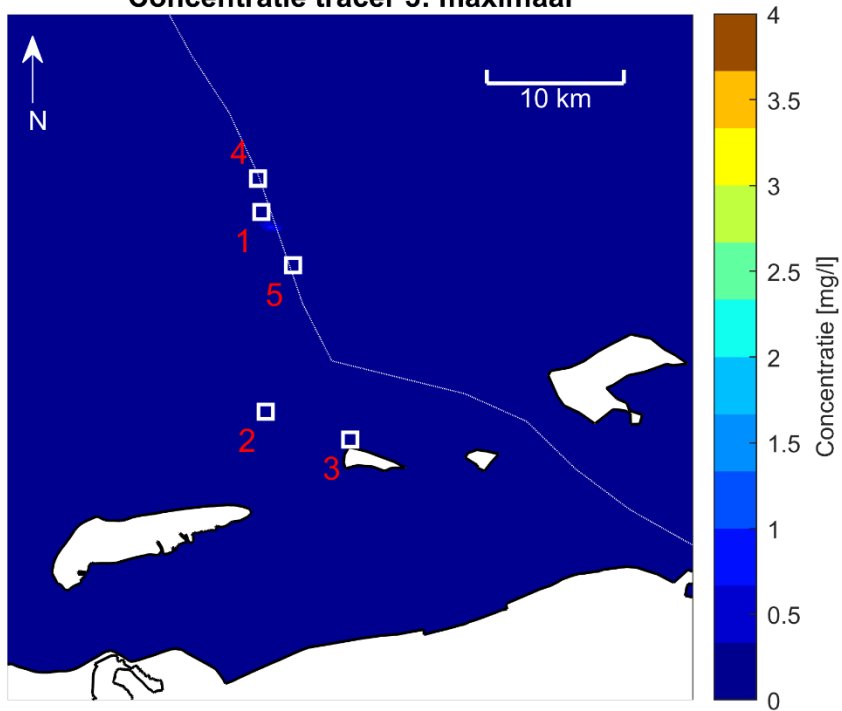
Die Abbildung 8-65 zeigt die maximale Konzentration der vier Tracer über die gesamte Wassersäule während des November-Szenarios. Jeder Tracer gehört zu einem Abschnitt, so dass sie nacheinander (mit Pausen dazwischen) eingelesen werden.



Concentratie tracer 2: maximaal



Concentratie tracer 3: maximaal



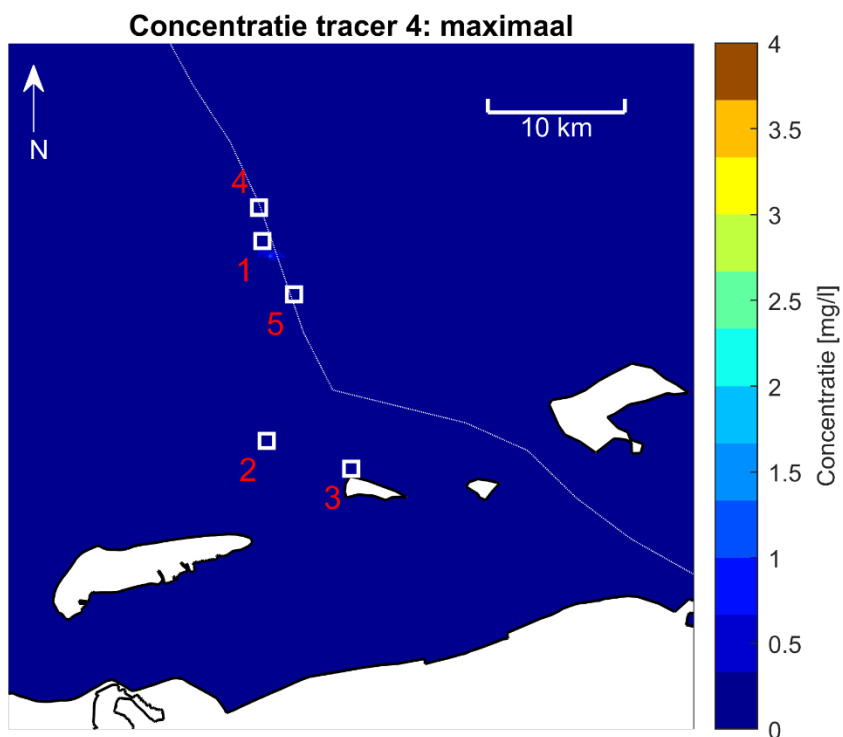


Abbildung 8 -165166: Maximale Konzentration der Tracer über die gesamte Wassersäule während des November-Szenarios. Die sensiblen Standorte sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Restaurierungsprojekt, 2 = Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit der gestrichelten Linie.

Zeitreihen

Abbildung 8-66 bis Abbildung 8-71 zeigt den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Tracer an mehreren Stellen.

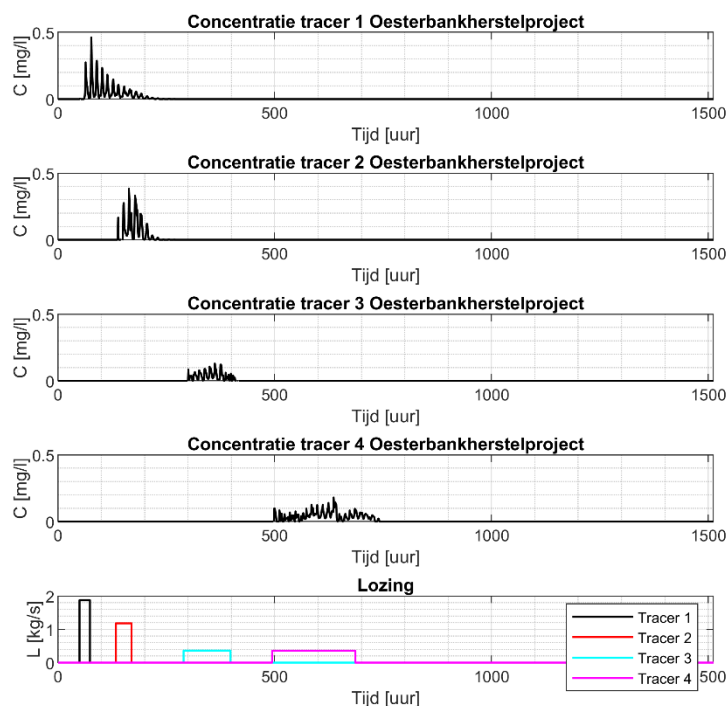


Abbildung 8- 167168: Zeitliche Veränderung der Tracerkonzentration am Standort des Austernbank-Restaurierungsprojekt. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

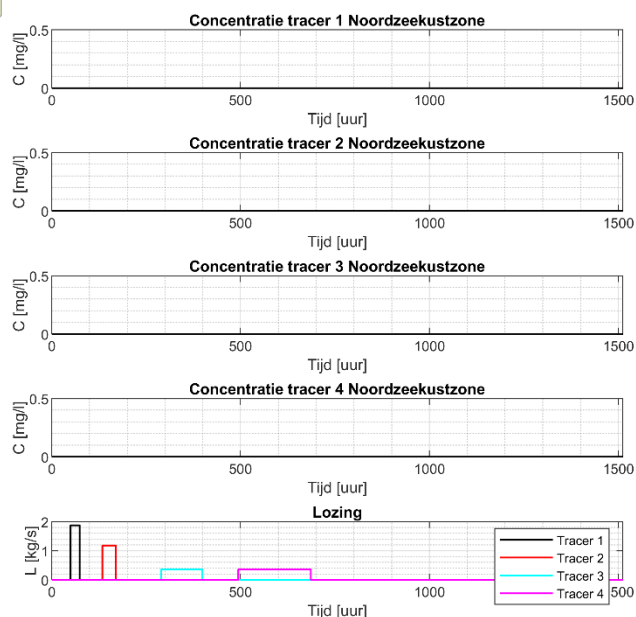


Abbildung 8- 169: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration in der Küstenzone der Nordsee. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

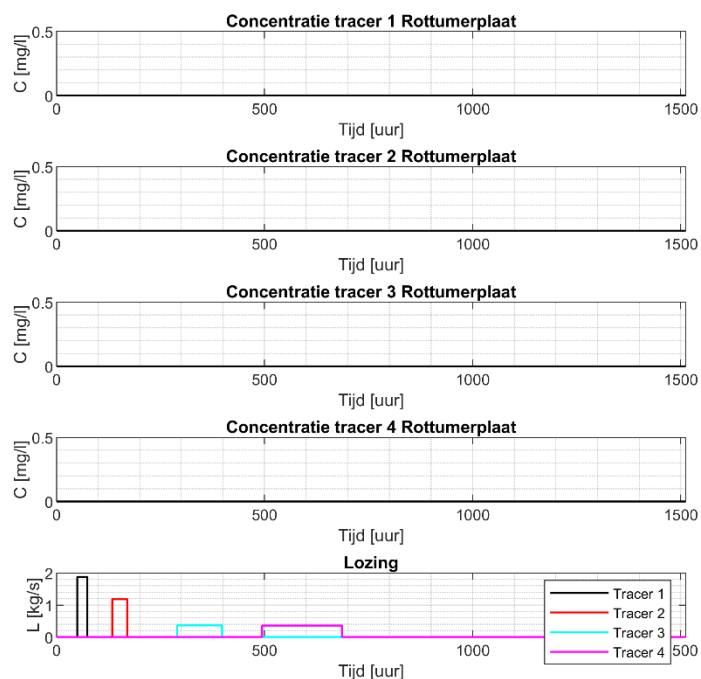
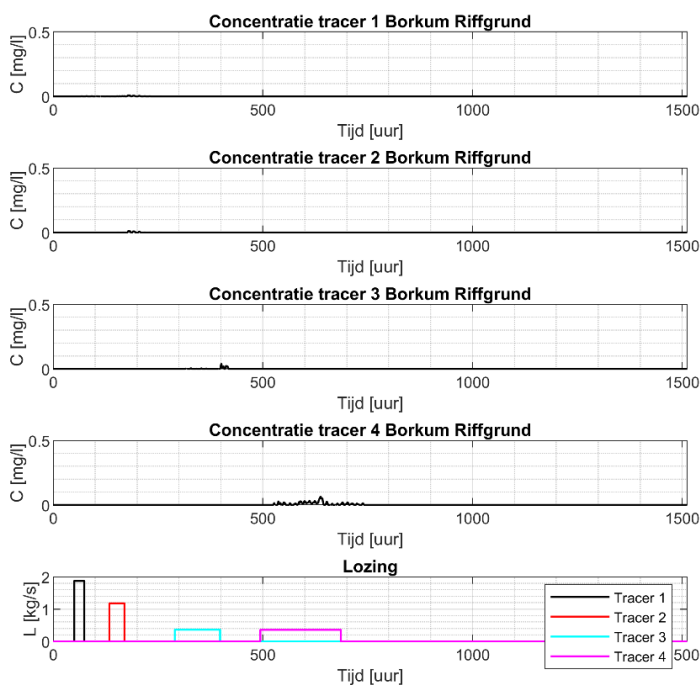


Abbildung 8- 170: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Rottumerplaat. Die Konzentration stellt den Maximalwert



über der Wassersäule dar.

Abbildung 8- 171: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Borkum Riffgrund. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

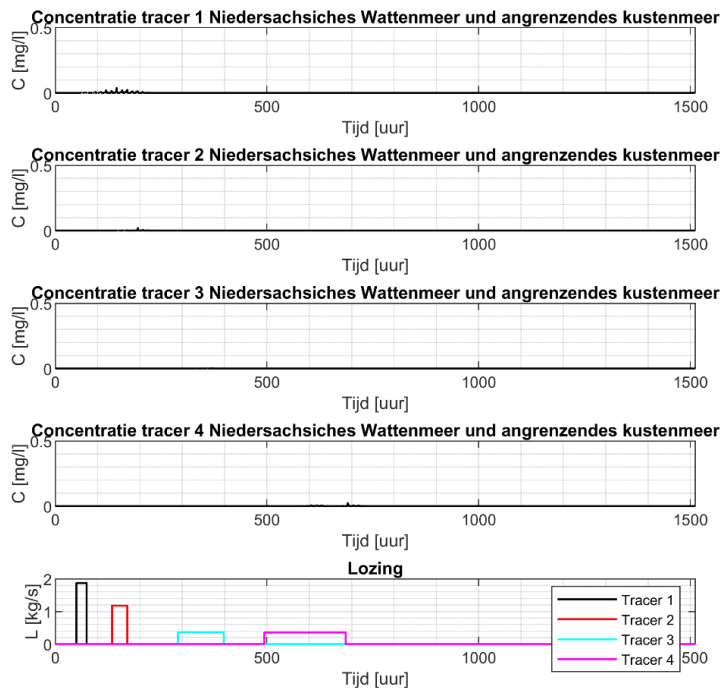


Abbildung 8- 172: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

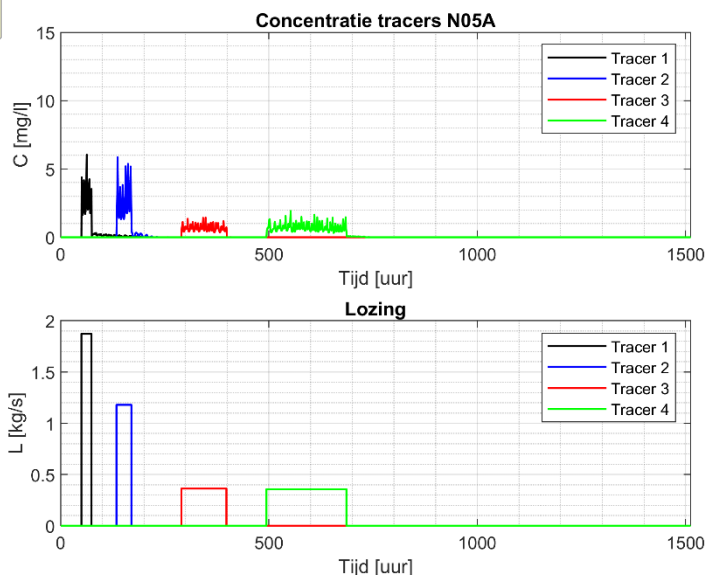


Abbildung 8- 173174: Zeitlicher Verlauf der Tracerkonzentration am Standort der Plattform. Die Konzentration stellt den Maximalwert über der Wassersäule dar.

Zersetzung gelöster Stoffe

Tracer 1 bis 4 sind eine Aggregation der verschiedenen gelösten Stoffe pro Bohrstrecke. Anhand des Anteils jeder einzelnen Substanz am gesamten Tracer wurde eine Aufschlüsselung der Tracer vorgenommen. Daraus ergibt sich eine maximale Konzentration aller gelösten Stoffe pro Bohrungsabschnitt, siehe Tabelle 8-9. Der Anteil der einzelnen Substanzen variiert je nach Bohrprofil. Zum Beispiel beträgt der Anteil von Kaliumchlorid bei Bohrabschnitt 1 fast 99%, während er bei Bohrabschnitt 4 0% beträgt.

Tabelle 8- 24: Maximale Konzentration an gelösten Feststoffen pro Bohrschnitt durch die Wassersäule an der Plattformstelle.

	Maximale concentratie opgeloste stoffen over de gehele waterkolom [mg/l]: alle secties - scenario November					
	Oesterbankherstel project	Noordzeekustzone	Rottumerplaat	Borkum Riffgrund	Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes kustenmeer	N05A
Vloeistofverliesvertrager	2.1E-03	1.5E-09	6.2E-09	7.2E-04	2.7E-04	2.2E-02
Verzadigd monocarbonzuur, calciumzout	5.0E-03	1.3E-09	5.5E-09	6.4E-04	2.5E-04	7.7E-02
Calcium hydroxide	1.9E-03	4.0E-10	1.7E-09	5.5E-04	7.2E-05	2.1E-02
Magnesium oxide	1.8E-03	1.3E-09	5.5E-09	6.4E-04	2.4E-04	2.0E-02
Potassium chloride	4.6E-01	3.2E-08	2.5E-08	3.0E-02	3.8E-02	6.0E+00
Natriumcarbonaat	3.1E-03	3.7E-10	1.5E-09	1.8E-04	2.6E-04	4.2E-02
Sodium chloride	1.6E-01	1.2E-07	4.9E-07	5.6E-02	2.1E-02	1.7E+00
Natrium carboxymethylcellulose	1.9E-02	4.0E-09	1.7E-08	1.9E-03	9.5E-04	2.9E-01
Saccharose	5.7E-04	5.3E-11	2.2E-10	2.8E-05	4.7E-05	7.5E-03
Corosieremmer	1.3E-03	9.6E-10	4.0E-09	4.6E-04	1.7E-04	1.4E-02
Antischuim	3.8E-04	1.2E-12	1.3E-12	4.2E-05	1.9E-05	5.8E-03
Stof 1: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α- butyl-ω-hydroxy	8.0E-02	2.5E-10	2.7E-10	5.5E-03	4.1E-03	1.2E+00
Potassium hydroxide	2.2E-04	1.6E-10	6.6E-10	7.7E-05	2.9E-05	2.3E-03
Stof 2: Poly(oxy-1,2-ethanediyl), α- butyl-ω-hydroxy	5.9E-03	4.3E-09	1.8E-08	2.1E-03	7.7E-04	6.3E-02

BERICHT

Ausbreitungsmodellierung Stromkabel

Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Kunde: ONE-Dyas B.V.

Referenz: BG6396IBRP2010071006

Status: Definitief/2.0

Datum: 7-10-2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titeldokument: Ausbreitungsmodellierung Stromkabel

Untertitel: Ausbreitungsmodellierung Stromkabel

Referenz: BG6396IBRP2010071006

Status: 2.0/Definitief

Datum: 7-10-2020

Projektname: Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Projektnummer: BG6396-105

Klassifizierung

Projektbezogen

Dieser Text wurde aus dem Niederländischen übersetzt. Soweit es Widersprüche zum Originaltext gibt, ist der Originaltext führend.

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever. Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Inhalt

1	Einführung	1
2	Ausgangspunkte	2
2.1	Kabelverlegung	2
2.2	Beschreibung der Eingrabungs-Methodik	2
2.3	Sedimenteigenschaften	4n
2.4	Verfahren zur Vorhersage von Sedimentkonzentrationen	4
2.4.1	Sedimentkonzentration in der Nähe des Baggers	5
2.4.2	Verdrängung des Feinsediments durch Gezeitenströmung	6
2.4.3	Sedimentation des Feinsediments	6
2.4.4	Ausbreitung durch Diffusion des Feinsediments	6
2.4.5	Berechnung der Sedimentkonzentrationen pro Segment	8
3	Ergebnis	9
3.1	Konzentration von Feinsediment	9
3.2	Sedimentation	9
4	Diskussion	12
5	Fazit und Empfehlungen	14
6	Referenzen	15

1 Einführung

ONE-Dyas hat Royal HaskoningDHV mit der Erstellung eines Umweltverträglichkeitsberichts für das Gasförderprojekt N05-A in der Nordsee beauftragt. In der UVP werden verschiedene Varianten betrachtet. Einige Varianten beziehen sich auf die Art und Weise, wie die Energieversorgung für die Bohrplattform und die Förderplattform erfolgt. Die Energieversorgung sowohl der Bohrplattform als auch der Förderplattform kann durch Eigenerzeugung mit Generatoren auf den Plattformen oder durch Strom erfolgen. Bei der Energieversorgung mittels Strom wird ein Stromkabel vom nahe gelegenen Windpark Riffgat zur Förderplattform verlegt.

Dieses Kabel hat eine Länge von ca. 8 km. Beim Eingraben des Kabels wird feines Sediment aufgeschwemmt und kann sich durch die Strömung verbreiten. Dies kann zu erhöhten Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule und zu einer zusätzlichen Sedimentation des Feinsediments führen. Eine quantitative Untermauerung dieser Effekte mittels Wolken- und Sedimentationsmodellierung ist aufgrund der Naturwerte in dem Gebiet, einschließlich Natura 2000-Gebieten, wünschenswert.

In dieser Notiz wird eine Schätzung dieser zusätzlichen Sedimentkonzentration und der Verteilung des Sediments vorgenommen. Kapitel 2 stellt die verfügbaren Daten und die Annahmen vor. Kapitel 3 zeigt die Berechnung und die Ergebnisse. Kapitel 4 enthält eine Diskussion der Ergebnisse, woraufhin in Kapitel 5 die Schlussfolgerungen erörtert werden.

2 Ausgangspunkte

2.1 Kabelverlegung

Das Kabel verläuft vom der Plattform N05-A in Richtung Osten. Der Verlauf des Kabels ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Länge des Kabels beträgt ca. 8 km.

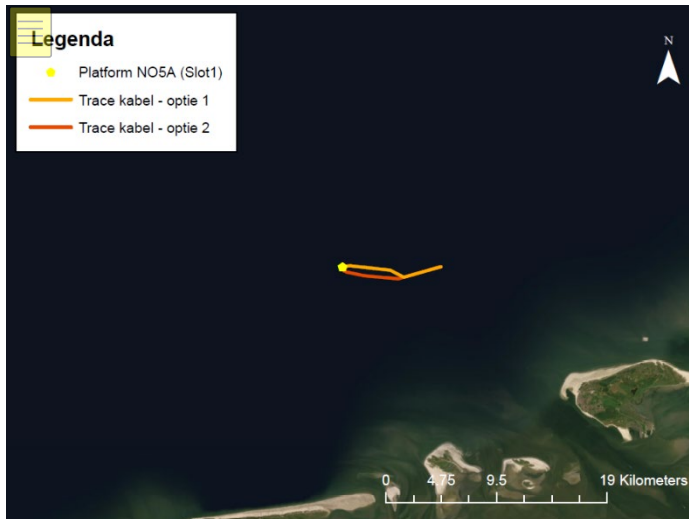


Abbildung 12: Kabelverlegungstrassen, Option 1 und 2

2.2 Beschreibung der Eingrabungs-Methodik

Das Kabel wird mit einem Bagger eingegraben, der sowohl mechanisch graben kann als auch das Sediment am Meeresboden mit Wasserjets auflockern ("fluidisieren") kann. [1]. Die Düsen befinden sich direkt unter dem Bagger, wie in Abbildung 2 dargestellt. Der mechanische Bagger befindet sich an der Rückseite der Maschine.

Die Vorgehensweise beim Eingraben des Kabels ist wie folgt: Zuerst wird das Kabel auf dem Boden verlegt. Dann fährt die Maschine über das Kabel, fluidisiert den Boden unter dem Kabel und schneidet ihn auf, so dass das Kabel unter seinem Eigengewicht absinkt.

Ein Teil des verdrängten Bodens sinkt automatisch in die Rinne zurück und bedeckt das Kabel. Ein anderer Teil des verdrängten Bodens landet direkt neben der Rinne oder wird mit der Strömung mitgerissen und in größerer Entfernung von der Rinne abgelagert. Dies bedeutet, dass die Rinne nicht vollständig gefüllt wird. Dies ist in einer Schematisierung der resultierenden Rinne zu sehen, siehe Abbildung 3. Ausgehend von den Abmessungen der Rinne wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass pro laufenden Meter Kabel 1 m³ Boden außerhalb der Rinne landet. Ein Teil davon ist Feinsediment.

Beim Graben kommen vor allem die feinen Sedimentpartikel im verdrängten Boden in Suspension und werden von der Strömung mitgerissen. Diese Sedimentpartikel verbreiten sich durch die Strömung wie eine Sedimentwolke und bewirken eine vorübergehende Erhöhung der Sedimentkonzentration in der Wassersäule.

Die natürlichen Schlickkonzentrationen entlang der Stromkabeltrasse liegen in der gleichen Größenordnung wie am Standort der Plattform N05A. In diesem Teil der Nordsee liegt die natürliche jährliche Durchschnitts-Schlickkonzentration in der Nähe der Wasseroberfläche bei etwa 10-20 mg/l [2]. In der Nähe des

Meeresbodens kann die Schlickkonzentration etwas höher sein, aber da der lokale Meeresboden aus sandigem Material besteht, ist es unwahrscheinlich, dass die Schlickkonzentrationen in der Nähe des Meeresbodens viel höher sind.

Diese Jahresdurchschnittskonzentrationen sagen jedoch nichts über die Schwankungen der Schlickkonzentration während des Jahres aus. Während der Wintermonate sind die durchschnittlichen Schlickkonzentrationen im Allgemeinen höher als im Sommer, mit durchschnittlichen Schlickkonzentrationen entlang der Trasse von etwa 10 mg/l im Sommer und etwa 20 mg/l im Winter. [2]. Darüber hinaus schwankt die Schlickkonzentration infolge von Stürmen. Während und unmittelbar nach einem Sturm sind die Schlickkonzentrationen viel höher (typischerweise etwa 20 mg/l entlang der Trasse) als nach einer ruhigen Periode (typischerweise etwa 2 mg/l).

Neben diesen jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen ist es plausibel, dass die Schlickkonzentration auch mit den Gezeiten variiert: Der Ebbstrom liefert schlickreiches Wasser aus dem Wattenmeer und der Emsmündung, während der Flutstrom aus dem Westen relativ schlickarmes Wasser anführt.

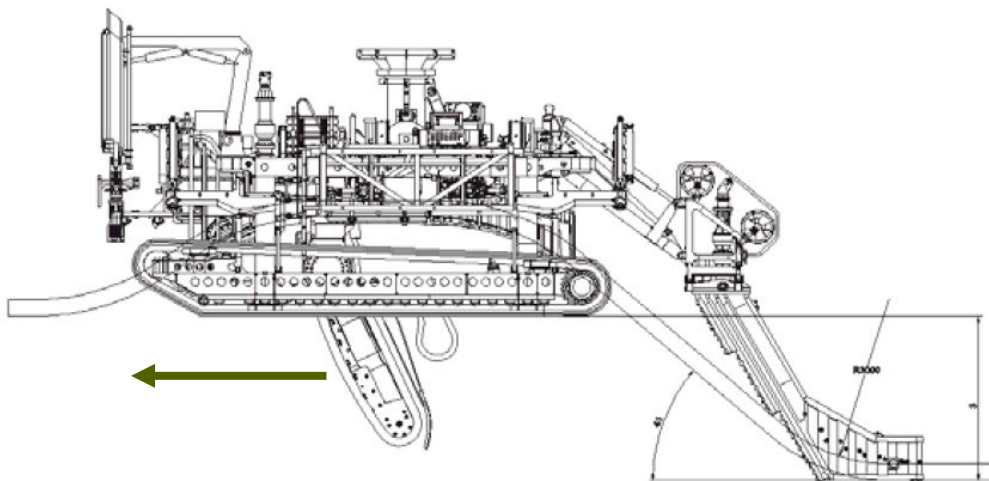


Abbildung 34: Bagger zum Eingraben des Kabels

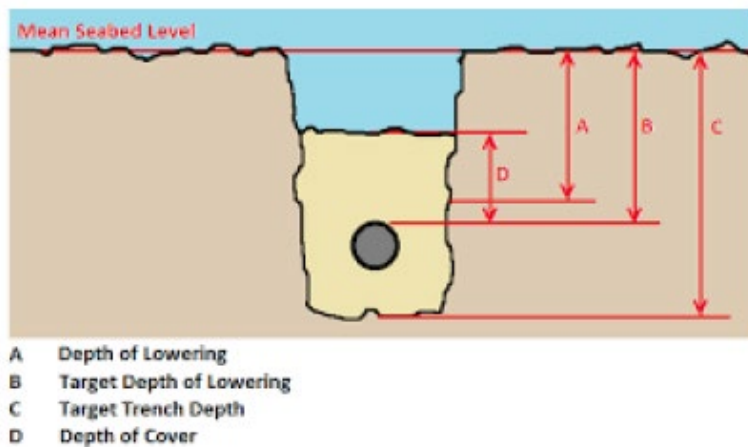


Abbildung 56: Entstehende Rinne [1]

2.3 Sedimenteigenschaften

Entlang der Kabeltrasse wurden die Bodeneigenschaften untersucht [3]. Der Boden besteht aus feinem bis mittelgrobem Sand, gelegentlich auch aus Sand und Ton mit Kies und Muschelfragmenten. Fotos des Meeresbodens zeigen deutliche, etwa einige Zentimeter hohe Sandrippel auf dem Meeresboden, was ein Hinweis darauf ist, dass der Sand entlang der Pipelinetrasse relativ mobil ist.

Bei der Vorhersage der Sedimentwolke infolge der Kabelverlegung wird aufgrund von Untersuchungen davon ausgegangen, dass ca. 33 % des Bodenmaterials aus Feinsediment besteht, das in Suspension mit der Strömung mitgeführt wird, d.h. von den kleinsten Tonpartikeln bis zu Feinsand.

Ein wichtiger Parameter bei der Vorhersage ist die Fallgeschwindigkeit der Sedimentkörner, die von der Korngröße abhängt. Da das Feinsediment aus einer Reihe von Korngrößen besteht, die von einem Minimum von 1 µm für Ton bis zu einem Maximum von 125 µm für Feinsand reichen, wird eine repräsentative Korngröße und Fallgeschwindigkeit angenommen. Die Studie zeigt, dass die repräsentative Korngröße einen Durchmesser von 31,25 µm hat, was eine Fallgeschwindigkeit von 0,27 mm/s bedeutet. Größere Sedimentkörner sinken schneller und feinere Sedimentkörner sinken im Allgemeinen langsamer.

2.4 Verfahren zur Vorhersage von Sedimentkonzentrationen

Dank der Ost-West-Ausrichtung des Stromkabels, die in Richtung der dominanten Strömung liegt, und der geringen Menge an Feinsediment, die aufgewirbelt wird und dann hoch in der Wassersäule landet und dann von der Strömung mitgenommen wird, wurde eine vereinfachte Methodik angewandt. Eine umfangreiche Ausbreitungsstudie, wie sie zur Bestimmung der Ausbreitung von Bohrschlamm [2] und der Verlegung der Pipeline durchgeführt wurde [4], ist nicht nötig.

Mit Hilfe einer Excel-Berechnung wurden die Konzentration, Verteilung und Ablagerung des Feinsediments vorhergesagt. Folgende Schritte wurden unternommen:

- 1 Vorhersage der Sedimentkonzentration in der unmittelbaren Umgebung des Baggers.
- 2 Vorhersage der Verdrängung des Feinsediments durch die Gezeitenströmung.
- 3 Vorhersage der Sedimentation des Feinsediments.
- 4 Vorhersage der Verteilung (Diffusion) des Feinsediments durch Strömung und Turbulenz.

- 5 Kombination der Schritte 1 bis 4 mithilfe einer Massenbilanz, bei der ein Teil des Feinsediments, der in Schritt 1 in Suspension übergeht, durch Diffusion seitlich verteilt oder auf dem Meeresboden abgelagert wird. Der restliche Teil wird von der Gezeitenströmung mitgeführt.

2.4.1 Sedimentkonzentration in der Nähe des Baggers

Um die Sedimentkonzentration in der unmittelbaren Umgebung des Baggers abzuschätzen, wurden die folgenden Ausgangspunkte verwendet:

- In der Berechnung bewegt sich der Bagger mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 km/h (0,28 m/s). Diese Geschwindigkeit ist höher als die in der Praxis zu erwartende Geschwindigkeit des Baggers von etwa 250 m/h (0,07 m/s), ist aber für die Anwendung der Methodik notwendig. In der Diskussion in Kapitel 4 wird der zu erwartende Unterschied in der Auswirkung, die sich aus dieser Annahme ergibt, diskutiert.
- Das in Suspension überführte Feinsediment erreicht eine Höhe von 2 m vom Boden.
- Die Breite der Wassersäule, über die das Schwebstoffsediment verteilt wird, beträgt 10 m und ist damit etwas größer als die Breite des Baggers.
- Es wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Meeresbodens gleich der Geschwindigkeit des Baggers ist, d. h. 0,28 m/s. Dies entspricht auch den Messungen und Modellergebnissen [2]: Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Meeresbodens beträgt 0,25 m/s, mit maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,4 m/s.
- Das Graben beginnt bei Nippflut, dann fließt das Wasser infolge der Gezeitenströmung während des Grabens immer in die gleiche Richtung.
- Die Trasse ist in zehn gleiche Segmente unterteilt.

Die Berechnung der Sedimentkonzentration in der Nähe des Baggers ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Berechnung besteht aus den folgenden Schritten:

- 1 Für jedes Segment wird das Volumen und die Masse des freigesetzten Bodens ermittelt. Davon ist ein gewisser Prozentsatz Feinsediment;
- 2 Es wird die Zeit ermittelt, die der Bagger benötigt, um ein Segment auszuheben;
- 3 Die Anfangskonzentration des Feinsediments in der Wassersäule wird unter der Annahme bestimmt, dass die gesamte freigesetzte Feinsedimentmenge gleichmäßig auf einmal über die angenommene Wassersäule verteilt wird, die 16.500 mg/l beträgt.

Trace	
Lengte trace [m]	8786.54
Aantal bronnen [-]	10
Lengte per bron [m]	878.65
Doorsnede	
Volume grond per m trace [m3/m]	1.00
Volume totaal trace [m3]	8786.54
Volume per bron [m3]	878.65
Tijd	
Snelheid kar [km/uur]	1
Snelheid kar [m/s]	0.28
Tijd per bron [s]	3163.15
Tijd per bron [uur]	0.88
Source term	
Dichtheid [kg/m3]	1000
Gewicht per bron [kg]	878654
Percentage fijn materiaal [%]	33
Gewicht fijn materiaal per bron [kg]	289955.8
Bronterm fijn materiaal [kg/s]	91.7
Hoogte in waterkolom [m]	2
Breedte waterkolom [m]	10
Volume waterkolom [m3]	17573.08
Concentratie fijn materiaal [kg/m3]	16.5
Concentratie fijn materiaal [mg/l]	16500
Pluim	
Valsnelheid [m/s]	2.70E-04

Abbildung 78: Berechnung der Anfangssedimentkonzentration in der Nähe des Baggers

2.4.2 Verdrängung des Feinsediments durch Gezeitenströmung

Die vorherrschende Fließrichtung entlang der Trasse ist Nordosten und es wird von einer konstanten Fließgeschwindigkeit von 0,28 m/s ausgegangen, die der Geschwindigkeit des Baggers entspricht und die der Fahrtrichtung des Baggers folgt. Dies gewährleistet einen konservativen Ansatz: Es gibt einen kumulativen Effekt durch das Eingraben des Kabels vor Ort und das Mitführen von Schwebstoffen durch die Strömung aus früheren Grabungssegmenten. Dabei spielt es keine Rolle, in welche Richtung das Kabel verlegt wird: von der Plattform zum Windpark oder umgekehrt. Die eine Richtung fällt mit der Flut zusammen, die andere mit der Ebbe. Alles Sediment, das sich nicht absetzt und nicht durch Diffusion verbreitet wird, wird mit der Gezeitenströmung mitgeführt.

2.4.3 Sedimentation des Feinsediments

Die Menge der Feinsedimentation wird anhand der Sedimentkonzentration und der Fallgeschwindigkeit berechnet: Sedimentation = Sedimentkonzentration x Fallgeschwindigkeit. Die Menge an Sediment, die auf dem Meeresboden abgelagert wird, "verschwindet" aus der Wassersäule und wird daher nicht von der Strömung mitgetragen oder durch Diffusion verteilt.

2.4.4 Diffusion durch Ausbreitung des Feinsediments

Neben dem Absetzen des Feinsediments und der Verdrängung durch die Strömung kommt es auch zur Diffusion (Ausbreitung des Feinsediments durch Turbulenzen und andere kleinräumige Prozesse), was zu geringeren Konzentrationen führt. Der Effekt der Diffusion wird mit Hilfe der Brooks-Methode bestimmt [5]. Mit dieser Methode ist es möglich, die Konzentration eines bestimmten Stoffes, z.B. Feinsediment, in einer bestimmten Entfernung von der Einleitungsstelle zu bestimmen, unter der Annahme, dass Durchfluss und Abfluss konstant sind.

Bei dieser Methode spielt die Konstante Alpha eine Rolle. Alpha, der horizontale Dispersionskoeffizient, liegt nach Literaturangaben zwischen 0,0001 und 0,0005 m^{2/3/s}. [5] für ruhige bzw. turbulente Bedingungen. Hier wurde ein Durchschnittswert von 0,0003 m^{2/3/s} gewählt.

Abbildung 5 zeigt den Effekt der Diffusion. Im Segment 1 findet Ablagerung statt. In der Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung hat die Konzentration eine Normalverteilung mit einer maximalen Konzentration von 100 % (das anfängliche Konzentrationsmaximum in der Nähe des Baggers). Im Segment 2 ist diese maximale Konzentration gesunken und das Konzentrationsprofil hat sich verbreitert. Nach einem Segment verbleiben ca. 35 % der Spitzenkonzentration.

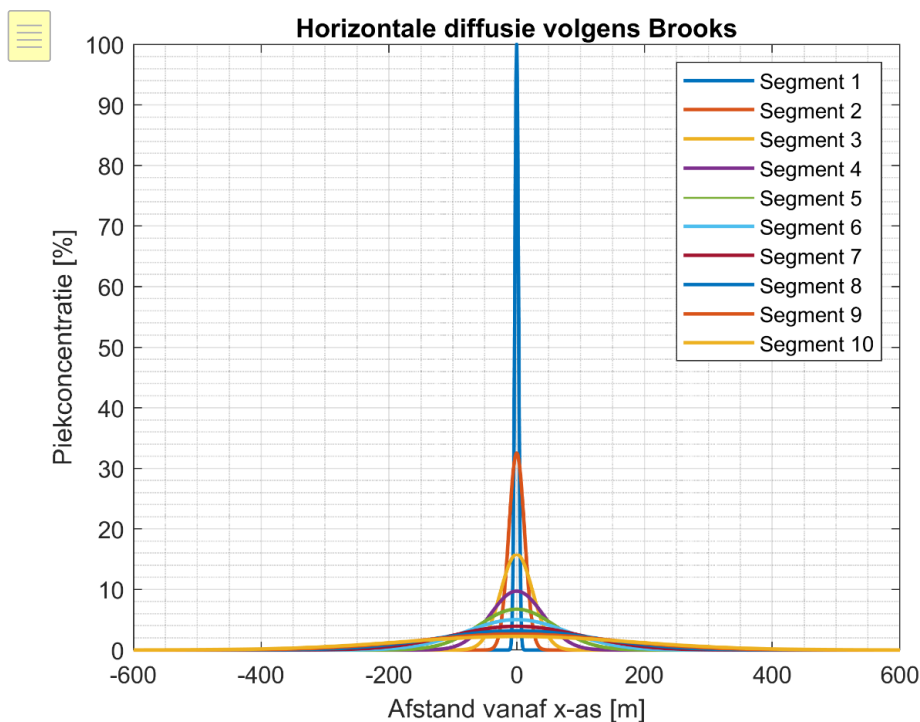


Abbildung 910: Konzentrationsprofile in verschiedenen Abständen von der Quelle:

Auf der Grundlage dieser Konzentrationsprofile wurde ein Faktor ermittelt, der die Abnahme der Spitzenkonzentration pro Segment angibt. Dieser Faktor ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 12: Faktor, um den die Spitzenkonzentration mit dem Abstand zwischen den Segmenten abnimmt

Segment	Faktor [-]
1 – 2	0,33
2 – 3	0,49
3 – 4	0,62
4 – 5	0,69
5 – 6	0,75
6 – 7	0,78
7 – 8	0,81
8 – 9	0,83
9 – 10	0,85

Dieser Faktor wurde verwendet, um die verbleibende Konzentration zu bestimmen, die im nächsten Segment aus einem vorherigen Segment ankommt.

2.4.5 Berechnung der Sedimentkonzentrationen nach Segmenten

Ausgehend von der anfänglichen Sedimentkonzentration in der Nähe des Baggers, dem "Verlust" von Feinsediment durch Ablagerung, der Verlagerung von Feinsediment durch die Gezeitenströmung und der Diffusion des Feinsediments werden die Sedimentkonzentrationen über die Zeit und über die Entfernung berechnet.

Da die Ausrichtung der Trasse und die vorherrschende Strömungsrichtung zusammenfallen, kann ein Segment nicht allein betrachtet werden, sondern es muss die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Segmenten berücksichtigt werden. Dies kann wie folgt dargestellt werden (siehe Abbildung 6):

- Im Zeitschritt 1 wird in Segment 1 gegraben, wodurch die Anfangskonzentration c_0 in die Wassersäule gelangt.
- Im Zeitschritt 2 wird in Segment 2 gegraben, wodurch ebenfalls die Anfangskonzentration in die Wassersäule gelangt. In der Zwischenzeit hat sich jedoch ein Teil des Schwebstoffs in Segment 1 abgesetzt, der Rest des Sediments wurde von der Strömung in Segment 2 abgelagert. Dadurch ergibt sich im Segment 2 eine höhere Konzentration als im Segment 1.

Dies funktioniert für alle nachfolgenden Segmente gleich, so dass immer ein Teil der Konzentration aus den vorherigen Segmenten in die nächsten Segmente überführt wird.

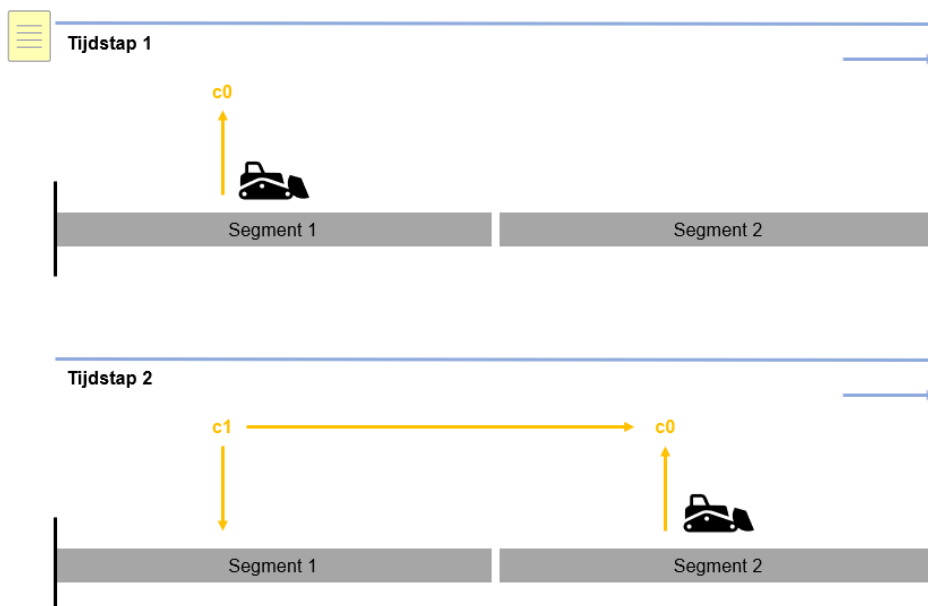


Abbildung 1112: Schematisierung der Konzentrationsverteilung für zwei Segmente für die Zeitschritte 1 und 2

3 Ergebnis

3.1 Konzentration von Feinsediment

Die Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der beschriebenen Berechnung. Diese Tabelle kann wie folgt gelesen werden:

- Zum Zeitpunkt 0 kommt es durch das Graben im Segment 1 zu einer Suspension von Feinsediment, was zu einer Anfangskonzentration von 16.500 mg/l rundum den Bagger führt.
- Nach 0,88 Stunden (die Zeit, die der Bagger benötigt, um von Segment 1 zu Segment 2 zu gelangen) wurde ein Teil dieses Sediments durch die Strömung in das Segment 2 gebracht. Die Sedimentkonzentration hat inzwischen durch Diffusion (siehe den Faktor in der oberen Zeile) und durch Absenkung (siehe Sedimentationsfluss F) abgenommen. Im Segment 4 sind nach ca. 3 Stunden nur noch 5 mg/l vorhanden. Als Anhaltspunkt: Die jährliche durchschnittliche Hintergrundkonzentration von Schlick in dem betreffenden Gebiet in der Nordsee beträgt etwa 15 mg/l. Dieser Wert schwankt im Jahresverlauf und räumlich stark.
- Nach 0,88 Stunden erreicht der Bagger auch das Segment 2, was bedeutet, dass nun 16.500 mg/l Feinsediment auch im Segment 2 in Suspension sind. Das aus dem Segment 1 kommende Sediment wird aufaddiert, was zu einer maximalen Konzentration von 17.280 mg/l im Segment 2 führt. Der Bagger fährt dann zum Segment 3 und die Konzentration im Segment 2 nimmt mit der Zeit ab.

Diese Methodik kann für jedes der zehn Segmente angewendet werden. Es wurden einige zusätzliche Segmente hinzugefügt, in die das Sediment aus den Segmenten 1 bis 10 noch strömen kann.

Die Abbildung 7 zeigt, dass die maximale Sedimentkonzentration an der Baggerstelle etwa 17.280 mg/l beträgt. Die Sedimentkonzentration kurz nach dem Passieren des Baggers: Etwa 3 Stunden nach dem Passieren des Baggers ist die Sedimentkonzentration bereits auf 9 mg/l gesunken, nach etwa 4 Stunden auf 1 mg/l und nach etwa 5 Stunden auf 0 mg/l. Der Anstieg der Sedimentkonzentration ist daher sehr kurz, aber intensiv: Die Konzentrationen steigen schnell auf eine relativ hohe Konzentration an, nehmen dann aber schnell wieder ab.

Die berechnete Konzentration ist die "zusätzliche" Konzentration als Ergebnis der Grabung, die zur natürlichen Hintergrundkonzentration hinzukommt. Unter [2] wird in der Größenordnung von 15 mg/l angenommen, allerdings muss man sich darüber im Klaren sein, dass die natürliche Hintergrundkonzentration in der Nordsee räumlich und zeitlich stark schwankt.

Konzentrationen in größerer Entfernung von der Trasse, zum Beispiel in Naturschutzgebieten, sind vernachlässigbar. Abbildung 5 zeigt, dass in ca. 200 m Entfernung von der Quelle nur noch 2 % der Anfangskonzentration vorhanden sind. Das nächstgelegene Naturschutzgebiet, das Austernbank-Renaturierungsprojekt, ist mehr als einen Kilometer von der Trasse entfernt.

3.2 Sedimentation

Die Sedimentation in jedem Abschnitt kann auch aus der Berechnung abgeleitet werden, wie in Abbildung 7 dargestellt. Für jeden Abschnitt wurde ein Sedimentationsfluss ermittelt: Dies ist die Menge an Sediment, die absinkt. Damit wird die Konzentrationsabnahme berechnet und somit kann auch die Sedimentation berechnet werden.

Kürzlich abgelagertes Feinsediment hat eine geringere Dichte als Sediment, das länger als ein paar Tage auf dem Boden gelegen hat und die Möglichkeit hatte, sich abzusetzen: Daher wurde für kürzlich abgelagertes Sediment eine Ausgangsdichte von 500 kg/m³ (für trockenes Sediment ohne Wasser in den Poren) verwendet. Diese Dichte ist die Dichte der Trockenmasse, d.h. ohne Wasser.

Die Berechnung des Sedimentationsflusses zeigt, dass die maximale Sedimentationsdicke des Feinsediments etwa 3 cm beträgt. Diese Sedimentation findet in der Nähe der Kabelrinne und teilweise innerhalb der Spurbreite des Baggers statt.

Aufgrund der Sedimentation und Verbreitung (d.h. Verdünnung) des Feinsediments nimmt der Sedimentationsfluss mit zunehmender Entfernung von der Kabelrinne schnell ab. Innerhalb einer Entfernung von 10 Metern vom Kabel fällt die Sedimentkonzentration auf weniger als 50 % der Spitzenkonzentration (siehe Abbildung 5). Auch der Sedimentationsfluss und damit die Sedimentationsdicke ist auf weniger als 50 % des Spitzenwertes zurückgegangen. Das bedeutet, dass die Ablagerungsdicke des Feinsediments in 50 Metern Entfernung vom Kabel etwa 1,5 mm beträgt.

Die Sedimentation in größerer Entfernung von der Trasse, zum Beispiel in Naturschutzgebieten, ist vernachlässigbar.

Fac [-]	0	0.33	0.49	0.62	0.69	0.75	0.78	0.81	0.83	0.85	8.79	9.67	10.54	11.42	12.30	13.18	14.06	14.94	15.82
Tijd [uur]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Vak	16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
Concentratie afkomstig uit vak 1 [kg/m ³]	0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000									
F [kg/m ² /s]																			
Concentratie afkomstig uit vak 2 [kg/m ³]		16.500	0.783	0.056	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000							
F [kg/m ² /s]		0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000									
Concentratie afkomstig uit vak 3 [kg/m ³]			16.500	0.783	0.056	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000							
F [kg/m ² /s]			0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000									
Concentratie afkomstig uit vak 4 [kg/m ³]				16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
F [kg/m ² /s]				0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000									
Concentratie afkomstig uit vak 5 [kg/m ³]					16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
F [kg/m ² /s]					0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000									
Concentratie afkomstig uit vak 6 [kg/m ³]						16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
F [kg/m ² /s]						0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000									
Concentratie afkomstig uit vak 7 [kg/m ³]							16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
F [kg/m ² /s]							0.004455	0.000211	0.000015	0.000001									
Concentratie afkomstig uit vak 8 [kg/m ³]								16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
F [kg/m ² /s]								0.004455	0.000211	0.000015	0.000001								
Concentratie afkomstig uit vak 9 [kg/m ³]									16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
F [kg/m ² /s]									0.004455	0.000211	0.000015	0.000001							
Concentratie afkomstig uit vak 10 [kg/m ³]										16.50	0.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F [kg/m ² /s]										0.004455	0.000211	0.000015	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Maximale concentratie [kg/m ³]	16.50	17.28	17.34	17.34	17.34	17.34	17.34	17.34	17.34	17.34	0.84	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Uitzakvolume vak 1 [kg/m ²]	14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
Uitzakvolume vak 2 [kg/m ²]		14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00								
Uitzakvolume vak 3 [kg/m ²]			14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Uitzakvolume vak 4 [kg/m ²]				14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Uitzakvolume vak 5 [kg/m ²]					14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Uitzakvolume vak 6 [kg/m ²]						14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Uitzakvolume vak 7 [kg/m ²]							14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Uitzakvolume vak 8 [kg/m ²]								14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Uitzakvolume vak 9 [kg/m ²]									14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Uitzakvolume vak 10 [kg/m ²]										14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sedimentatie [kg/m ²]	14.09	14.76	14.81	14.81	14.81	14.81	14.81	14.81	14.81	14.81	14.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Initiele dichtheid [kg/m ³]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Oppervlakte vak [m ²]	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787	8787
Volume sedimentatie [m ³]	247.64	259.39	260.23	260.30	260.31	260.31	260.31	260.31	260.31	260.31	12.67	0.92	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sedimentatiedikte [mm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sedimentatiedikte [mm]	28.18	29.52	29.62	29.62	29.63	29.63	29.63	29.63	29.63	29.63	1.44	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Abbildung 1314: Berechnung der Konzentrationsverteilung und Sedimentation

4 Diskussion

Die in dieser Studie beschriebene Berechnung ist eine vereinfachte Darstellung der Realität, mit dem Ziel, einen Einblick in mögliche Konzentrationen und Ablagerungen des Feinsediments zu erhalten. Bei den Berechnungen wurden eine Reihe von Annahmen getroffen, die die Ergebnisse beeinflussen. Diese Annahmen werden im Folgenden erläutert.

Strömungsgeschwindigkeit versus Baggergeschwindigkeit

Es wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung gleich der Geschwindigkeit und Richtung des Baggers ist. In der Realität variiert die Strömungsgeschwindigkeit mit der Zeit. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe beträgt ca. 0,25 m/s, die maximale Strömungsgeschwindigkeit ca. 0,4 m/s. Die Strömung ist also zeitweise schneller als der Bagger mit seiner Geschwindigkeit von 0,28 m/s. In diesen Zeiträumen erreicht das restliche Sediment aus Segment 1 bereits Segment 3, während in Segment 2 noch gegraben wird. Infolgedessen verschiebt sich das Segment mit der maximalen Konzentration etwas, aber die maximalen Konzentrationen ändern sich nicht wesentlich, da sie hauptsächlich von der Anfangskonzentration in einem Abschnitt bestimmt werden.

Wenn die Geschwindigkeit des Baggers jedoch langsamer ist als hier angenommen (in der Realität liegt die zu erwartende Fahrgeschwindigkeit des Baggers bei ca. 250 m/h oder 0,07 m/s, also dreimal so niedrig), ändert sich die Menge des pro Zeiteinheit suspendierten Feinsediments. Diese Menge wird kleiner, wenn die aus einem Abschnitt freigesetzte Feinsedimentmenge über einen längeren Zeitraum verteilt wird und sinkt daher von 91,7 kg/s auf 27,5 kg/s. Die anfänglichen Spitzenkonzentrationen in der Nähe der Kabelrinne werden daher ebenfalls um einen Faktor von etwa drei abnehmen. Außerdem werden die maximalen Konzentrationen abnehmen, da mehr Zeit für das Absinken und die seitliche Ausbreitung des Feinsediments zur Verfügung steht. Die Sedimentation in der Nähe der Kabelrinne wird abnehmen, und die Sedimentation wird sich über einen größeren Bereich verteilen.

Strömungsrichtung

Die Strömungsrichtung hängt mit dem Zeitpunkt des Grabens im Gezeitenzyklus zusammen: In der Berechnung wird angenommen, dass das Graben bei Nippflut beginnt. Die Gezeiten fließen dann während der gesamten Aushubzeit mit dem Bagger mit, von der Plattform weg und in Richtung der Gezeitenströmung. Die gesamte Trasse hat eine Länge von ca. 8 km. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von weniger als 1 km/h dauert die Aushubarbeit daher mehr als acht Stunden. Die Flut dauert sechs Stunden, daher ist es eine konservative Annahme, dass der Gezeitenstrom während der gesamten Aushubzeit in die gleiche Richtung wie der Bagger fließt. Wenn z. B. mit dem Aushub in der Mitte dieser Zeitspanne begonnen wird, fließt das Sediment während eines Teils der Aushubarbeiten mit der Ebbe zurück. Dadurch wird das Verteilungsmuster des Sediments komplexer als in diesen Berechnungen vorhergesagt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 250 m/h werden die Aushubarbeiten jedoch 32 Stunden dauern. Während dieser Zeit wechselt die Strömung mehrmals die Richtung und das Sediment in Suspension strömt auf und ab. Dadurch ergibt sich ein komplexeres Verteilungsmuster des Sediments und die vereinfachte Methode kann nicht mehr angewendet werden.

Höhe und Breite der Wassersäule

Es wird angenommen, dass die Wassersäule, über die sich das Sediment ausbreitet, eine Breite und Höhe von 10 bzw. 2 Metern hat. Wenn hier z. B. ein größeres Volumen gewählt wird, ist die Anfangskonzentration geringer.

Partikelgröße des Feinsediments

Die Korngröße des Feinsediments bestimmt, wie schnell das Sediment zu Boden sinkt. Ist das Sediment z. B. gröber, sinkt es schneller und die maximalen Konzentrationen sind geringer.

Dichte und Menge des Feinsediments

Diese Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Masse des freigesetzten Sediments. Die Dichte des Sediments liegt im Allgemeinen zwischen ca. 500 und 1600 kg/m³, abhängig von der Menge des Feinsediments, der Absenkung der oberen Sedimentschicht auf dem Meeresboden und der natürlichen Dynamik des Sediments auf dem Meeresboden.

Die Berechnung ist relativ konservativ in Bezug auf den Zeitpunkt des Aushubs während des Gezeitenzyklus und der Tatsache, dass die Strömung während der gesamten Aushubzeit mit dem Bagger fließt. Auch die Tatsache, dass das gesamte Volumenmaterial pro Abschnitt auf einmal freikommt, ist eine konservative Annahme.

5 Fazit und Empfehlungen

Durch das Eingraben eines Stromkabels gelangt Feinsediment in die Wassersäule. In dieser Studie wurde abgeschätzt, zu welchen Schwebstoffkonzentrationen und Sedimentationen dies führen kann und über welche Entfernung sich diese ausbreiten können.

Die folgenden Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Die Anfangskonzentration des Feinsediments, das beim Bagger in die Wassersäule gelangt, ist hoch (16.500 mg/l), aber von kurzer Dauer (weniger als ein paar Stunden).
- Da die vorherrschende Strömungsrichtung in Richtung der Kabeltrasse verläuft, kann Sediment in Suspension mit dem Bagger mitfließen. Die maximale Konzentration beträgt dafür 17.280 mg/l.
- Durch Absacken und Diffusion nimmt die Konzentration relativ schnell ab. Nach etwa drei Stunden sinkt die Konzentration auf 5 mg/l, die Hintergrundkonzentration in diesem Teil der Nordsee beträgt etwa 5-20 mg/l in der Nähe der Wasseroberfläche.
- Die maximale Ablagerungsdicke in der Nähe der Kabelrinne beträgt ca. 3 cm. Die Sedimentationsdicke in einer Entfernung von 50 Metern beträgt ca. 1,5 mm.

Die in dieser Studie beschriebene Art der manuellen Berechnung ist nur unter einer Reihe von Annahmen möglich. Die wichtigste Annahme ist, dass sich der Bagger mit der gleichen Geschwindigkeit und in der gleichen Richtung wie die Strömung bewegt. In der Realität fährt der Bagger jedoch dreimal langsamer als die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit und die Baggerarbeiten finden nicht nur bei Flut (Strömung in eine Richtung), sondern abwechselnd bei Ebbe und Flut statt.

6 Referenzen

- [1] DEME Offshore, „Submarine Cable General Installation Method Statement,” 2019.
- [2] Royal HaskoningDHV, „BG1359-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001 Pluimmodellering N05A - Concept,” 2019.
- [3] GEO XYZ Offshore, „Survey Report - N5A Platform to Riffgat Cable Route,” 2019.
- [4] Royal HaskoningDHV, „BG6396-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001 Pluimmodellering N05A - pijpleiding,” 2020.
- [5] N. Brooks, „Diffusion of sewage effluent in an ocean current,” in *Water disposal in the marine environmen*, 1960, pp. 247-267.
- [6] „Introduction to pipelaying, Rev.D,” 2004.
- [7] GEO XYZ Offshore, „Survey Report - N5A to NGT Hot tap,” 2019.

BERICHT

Ausbreitungsmodellierung Pipeline

Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Kunden: ONE-Dyas B.V.

Referenz: BG6396IBRP2010071018

Status: Definitief/2.0

Datum: 7-10-2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Ausbreitungsmodellierung Pipeline

Undertitel: Ausbreitungsmodellierung Pipeline

Referenz: BG6396IBRP2010071018

Status: 2.0/Definitief

Datum: 7-10-2020

Projektname: Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Projektnummer: BG6396-105

Klassifizierung

Projektbezogen

Dieser Text wurde aus dem Niederländischen übersetzt. Soweit es Widersprüche zum Originaltext gibt, ist der Originaltext führend.

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verspreid, openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever. Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Zweck der Studie	1
1.3	Anleitung zum Lesen	1
2	Hintergrunddaten	2
2.1	Einführung	2
2.2	Trasse der Pipeline	
2.3	Natürlicher Meeresboden	3
2.4	Natürliche Sedimentkonzentrationen	3
2.5	Beschreibung Eingrabungs-Methode	5
2.5.1	Allgemein	5
2.5.2	Variante 'Trenching	5'
2.5.3	Variante	5 'Jetten'
2.6	Freisetzung von Sediment	6
2.6.1	Korngröße und Fallgeschwindigkeit des freigesetzten Sediments	6
2.6.2	Freigesetzte Menge an Sediment	6
3	Modellbeschreibung	9
3.1	Einführung	9
3.2	Modell-Software	9
3.3	ZUNO-Modell-Schematisierung	9
3.4	Modell-Szenarien	9
3.5	Zufuhr von gelöstem Feinsediment	10
3.6	Modellausführung und Visualisierung	10
4	Modell-Ergebnisse	12
4.1	Einführung	12
4.2	Strömungs- und Wellenbedingungen	12
4.3	Variante 'Trenching	14'
4.3.1	Schlick-Konzentrationskarten	14
4.3.2	Karten zur Sedimentation	15
4.3.3	Zeitreihen	16
4.4	Variante 'Jetten	19'
4.4.1	Schlick-Konzentrationskarten	19
4.4.2	Karten zur Sedimentation	20
4.4.3	Zeitreihen	21
4.5	Vergleich zwischen den Varianten	24

5	Diskussion	26
6	Schlussfolgerungen	28
7	Referenzen	30

1 Einführung

1.1 Hintergrund

ONE-Dyas hat Royal HaskoningDHV mit der Erstellung eines Umweltverträglichkeitsberichts für das Gasförderprojekt N05-A in der Nordsee beauftragt. Eine der Komponenten der geplanten Aktivität ist der Bau einer Pipeline von der Gasförderplattform zur bestehenden NGT-Haupttransportpipeline in der Nordsee. Diese Pipeline hat eine Länge von ca. 15 km. Die Pipeline wird aus Sicherheitsgründen im Meeresboden vergraben.

Wenn die Pipeline eingegraben wird, wird feines Sediment vom Meeresboden aufgewirbelt. Ein Teil dieses Feinsediments wird dann durch Strömungen in der Nordsee verteilt, was zu erhöhter Sedimentation entlang der Pipeline und erhöhten Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule führen kann. Eine quantitative Untermauerung dieser Effekte mittels Ausbreitungs- und Sedimentationsmodellierung ist aufgrund der Naturwerte in dem Gebiet, einschließlich Natura 2000-Gebieten, wünschenswert.

Dieser Bericht beschreibt die Ausbreitungs- und Sedimentationsmodellierung und prognostiziert den Anstieg der Sedimentation und der Sedimentkonzentrationen als Folge der Verlegung der Pipeline. Die Modellierung erfolgt mit dem gleichen numerischen Modell (Delft3D) und der gleichen Modellschematisierung wie in der Ausbreitungs- und Sedimentationsstudie, um die Auswirkungen der Gasbohrungen zu bestimmen. [1]. In diesem Modell wurden die hydrodynamischen Prozesse in der Nordsee, wie Wellen, Gezeiten- und Windströmung, sowie die Dynamik des Bohrschlamms für verschiedene Bedingungen berechnet. In dieser Studie wird dieses Modell angewandt, um die Verteilung des aufgewirbelten Feinsediments vorherzusagen.

1.2 Zweck der Studie

Der Zweck dieser Ausbreitungs- und Sedimentationsstudie ist die Vorhersage der Ausbreitung und Sedimentation des Feinsediments, das beim Graben der Pipeline zwischen der N05-A-Plattform und dem Anschlusspunkt an die NGT-Haupttransportleitung freigesetzt wird. Die Ergebnisse dieser Studie dienen als Input für die Folgenabschätzung, einschließlich den Auswirkungen auf die Naturwerte in diesem Gebiet.

1.3 Anleitung zum Lesen

Dieser Bericht beschreibt die angewandte Methodik und die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung beim Eingraben der Pipeline. Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Hintergrunddaten wie die Pipelinetrasse, den natürlichen Meeresboden und die Schlickkonzentration, die Methode zum Eingraben der Pipeline und die Berechnung des beim Eingraben freigesetzten Feinsediments. Kapitel 3 enthält eine Beschreibung des numerischen Modells, und Kapitel 4 beschreibt die Ergebnisse der Modellierung. Kapitel 5 ist eine Diskussion der Ergebnisse und Kapitel 6 präsentiert die wichtigsten Schlussfolgerungen.

2 Hintergrunddaten

2.1 Einführung

In diesem Kapitel wird zunächst der Verlauf der Pipeline beschrieben. Zweitens werden der aktuelle natürliche Zustand des Meeresbodens und die Sedimentkonzentrationen entlang der Pipelinetrasse beschrieben. Drittens wird beschrieben, wie die Pipeline im Meeresboden vergraben wird. Schließlich wird die Menge an Feinsediment beschrieben, die während des Eingrabens der Pipeline in Suspension gebracht wird, was ein wichtiger Input für die Ausbreitungsmodellierung ist.

2.2 Trasse der Pipeline

Die Trasse der ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Pipeline verläuft von der Plattform N05-A in süd-südwestlicher Richtung und schließt dort an die bestehende NGT-Hauptgaspipeline an. Die Länge der neuen Pipeline beträgt 14,6 km. Die Wassertiefe in der Trasse variiert von 9,8 Metern im Süden am Anschluss an die NGT-Pipeline bis zu 26,4 Metern im Norden am Standort der Plattform (Abbildung 2).

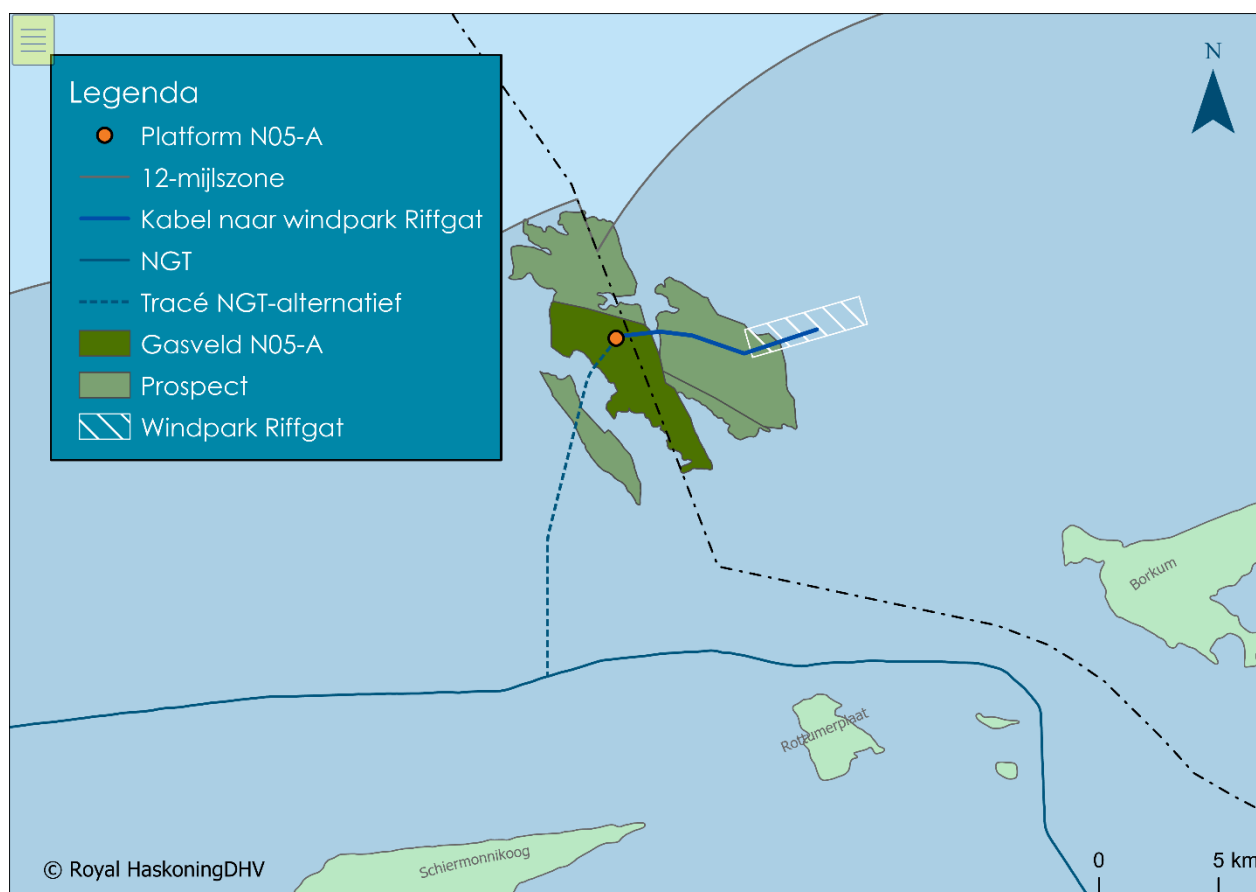


Abbildung 12: Trassenführung der Pipeline und der NGT-Haupttransportleitung

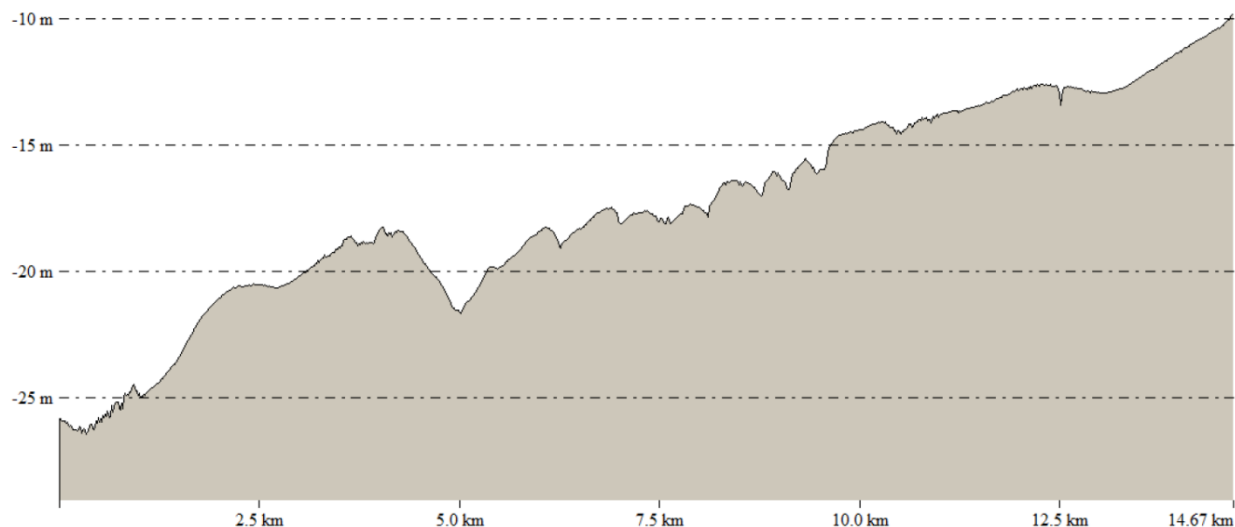


Abbildung 34: Bathymetrie des Meeresbodens entlang der Pipelinetrasse, mit der N05-A-Plattform auf der linken Seite und der Verbindung zur NGT-Haupttransportpipeline auf der rechten Seite. [2]

2.3 Natürlicher Meeresboden

Entlang der Pipelinetrasse wurden die Eigenschaften des Meeresbodens untersucht [2]. Das Sediment auf dem Meeresboden variiert von feinem bis mittelgrobem Sand, mit Sand- und Tonbereichen, die Kies und Muschelfragmente enthalten. Fotografien des Meeresbodens zeigen deutliche Sandrippel von etwa einigen Zentimetern Höhe auf dem Meeresboden, was ein Hinweis darauf ist, dass der Sand entlang der Pipelinetrasse relativ mobil ist (Abbildung 3). Die Sandrippel bewegen sich unter dem Einfluss von Strömungen und Wellen.

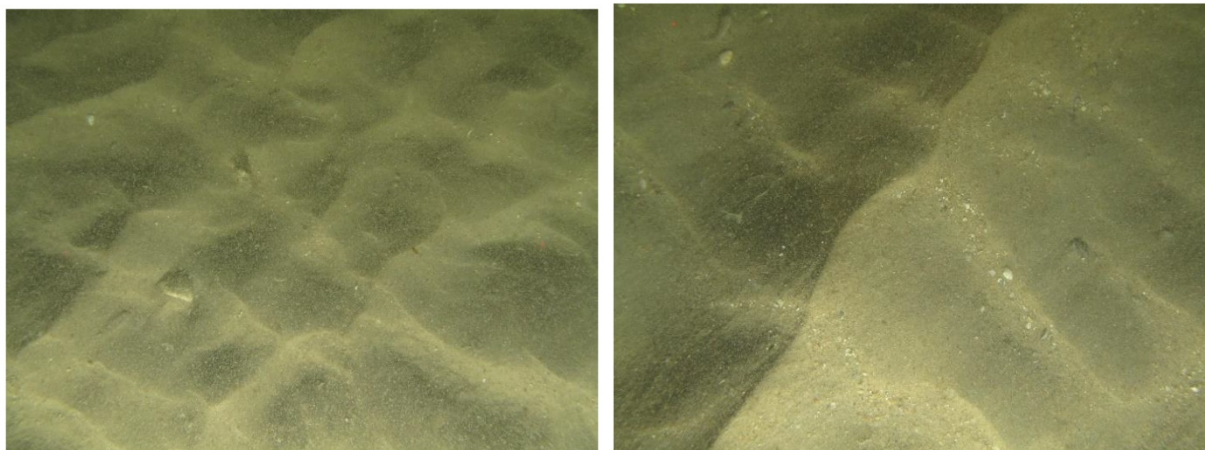


Abbildung 56: Natürlicher Meeresboden entlang der Pipelinetrasse [2]

2.4 Natürliche Sedimentkonzentrationen

Die durchschnittlichen natürlichen Schlickkonzentrationen an der Wasseroberfläche im Sommer und Winter in der Küstenzone sind in Abbildung 4 dargestellt. Diese Karten zeigen einen starken räumlichen Gradienten der Schlickkonzentration entlang der Küste, wobei die Schlickkonzentrationen innerhalb einer Entfernung von fünfzig Kilometern von den Watteninseln zwischen 3 und 100 mg/l liegen.

Die Schlickkonzentration am Standort der Plattform liegt im Jahresmittel bei etwa 10-20 mg/l in der Nähe der Wasseroberfläche. Näher am Ufer, d.h. in der Nähe des Anschlusses mit der bestehenden NGT-Pipeline, steigt die Schlickkonzentration im Jahresmittel nahe der Wasseroberfläche auf etwa 30 mg/l an. Die natürlichen Schlickkonzentrationen schwanken saisonal: Im Winter beträgt die saisonale durchschnittliche Schlickkonzentration entlang der Pipelinetrasse etwa 20-100 mg/l und im Sommer etwa 10-20 mg/l.

Darüber hinaus variiert die Schlickkonzentration auch in der Wassersäule. Näher am Meeresboden wird die Schlickkonzentration voraussichtlich etwas höher sein, aber da der lokale Meeresboden hauptsächlich aus sandigem Material besteht, ist es unwahrscheinlich, dass die Schlickkonzentration in der Nähe des Meeresbodens viel höher ist als in der Wassersäule.

In der Ausbreitungsstudie für die Bohrung [1] und in dem RIKZ-Bericht über gemessene Schlickkonzentrationen [3] wird eine genauere Beschreibung der Schwankungen der Schlickkonzentrationen gegeben, wobei erwähnt wird, dass die Konzentrationen nach einer ruhigen Periode auf etwa 2 mg/l in der Nähe des Plattformstandortes und 5-10 mg/l in der Nähe der NGT-Pipeline fallen können. Nach einer stürmischen Periode steigen die Schlickkonzentrationen auf typische Werte von etwa 20 mg/l in der Nähe des Plattformstandortes und 30-100 mg/l in der Nähe der NGT-Pipeline.

Zusätzlich zu diesen jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen ist es wahrscheinlich, dass die Schlickkonzentration auch mit den Gezeiten variiert: Die Ebbe bringt schlickreiches Wasser aus dem Wattenmeer und der Emsmündung, während die Flut aus dem Westen relativ schlickarmes Wasser mitbringt.

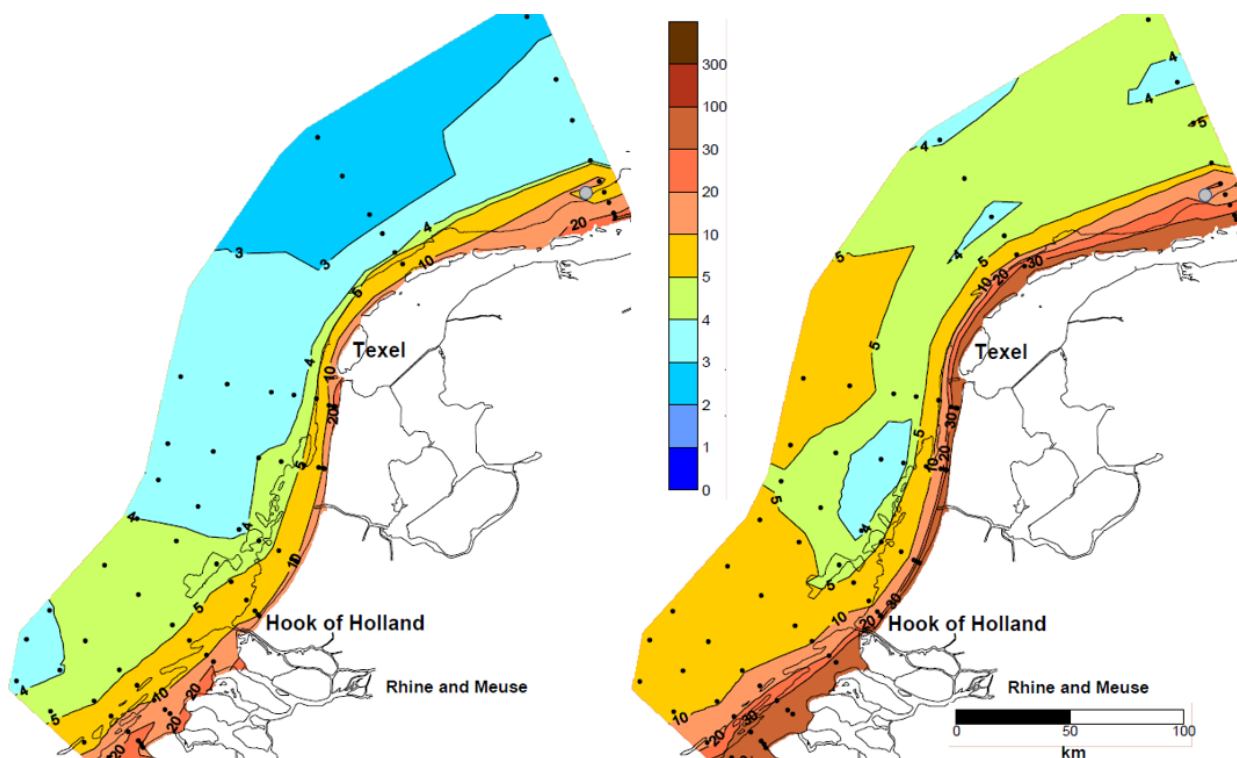


Abbildung 78: Durchschnittlich gemessene Schlickkonzentration an der Wasseroberfläche im Sommer (links) und Winter (rechts) in mg/l [3]. Der Standort der Plattform wird durch einen grauen Punkt dargestellt

2.5 Beschreibung Eingrabungs-Methode

2.5.1 Allgemein

Die Forschung zeigt, dass es zwei mögliche Varianten gibt, die Pipeline zu vergraben. Die erste Variante ist das Eingraben mit einer *mechanischen Grabenfräse (mechanical trencher)* und die zweite Variante ist das Eingraben mit einem *Düsenschlitten (jet sled)*. In den folgenden Abschnitten werden diese Aushubmethoden erläutert.

Bei beiden Varianten wird die Pipeline zunächst mit einem Spezialschiff auf dem Meeresboden verlegt und anschließend wird die Pipeline eingegraben.

2.5.2 Variante "Trenching"

Bei dieser Variante wird die Pipeline mit einer *mechanischen Grabenfräse* vergraben, die auf Raupenketten am Meeresboden entlangfährt. Die *Gabenfräse* wird von einem Schiff aus bedient. Die Grabenfräse (trencher) gräbt mit Schürfarmen eine V-förmige Rinne unter der Rohrleitung, siehe Abbildung 5. Hinter der Grabenfräse sinkt die Pipeline in die Rinne ein. Die Studie geht davon aus, dass die Rinne nicht aktiv zugeschüttet wird (*back-filling*), sondern allmählich durch die Meeresströmungen mit Sediment aufgefüllt wird.

Die Geschwindigkeit der Grabenfräse beträgt ca. 200 - 300 m/h. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, findet der Aushub unter der Maschine statt. Die Rinne, die ausgehoben wird, hat eine Tiefe von etwa 1,5 Metern mit Wänden in einem Winkel von 45°. Die gesamte Rinnenbreite beträgt vier Meter. Es wird angenommen, dass aus dieser Rinne drei Kubikmeter Sediment pro Meter Rinnenlänge freisetzt werden.

Mit einer Standardfräse ergibt der Aushub einen etwa sechzehn Meter breiten Streifen gestörten Meeresbodens. Dies wird durch die Rinne, Sandansammlungen entlang der Rinne und die Spurbreite der Raupenketten der Grabenfräse verursacht.

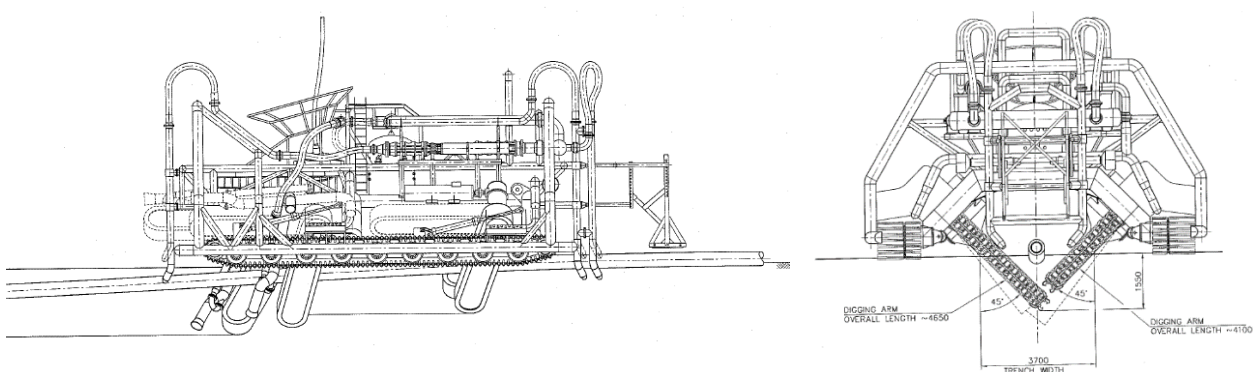


Abbildung 910: Seiten- und Vorderansicht einer mechanischen Grabenfräse

2.5.3 Variante "Jetten"

Beim Eingraben mit einem *Düsenschlitten (jet sled)* wird das Sediment auf dem Meeresboden zunächst durch Hochdruckwasserstrahlen aufgelockert ("fluidisiert"). Der gelockerte Boden kann dann mit einem Eduktorsystem aus der Rinne gesaugt werden; dies ist jedoch nicht immer notwendig. Während des *Jetting-Vorgangs* sinkt die Pipeline durch ihr Eigengewicht in die Rinne.

Diese Methode sorgt einerseits dafür, dass eine relativ schmale Rinne entsteht, andererseits wird aber auch viel Sediment aufgewirbelt. Im Vergleich zum Grabenaushub führt dies zu einer größeren und trübe- ren Sedimentwolke. Beim *Jetting* bilden sich jedoch keine Sandhaufen entlang der Rinne, sondern das grobe Sediment fällt teilweise in die Rinne zurück und der Rest sedimentiert in einer dünnen Schicht ent- lang der Rinne.

Die Geschwindigkeit des Jetting-Verfahrens beträgt ca. 50 - 300 m/h, abhängig von der Bodenart und der gewählten Ausführung. Die Rinne, die ausgehoben wird, hat eine Tiefe von ca. 1,5 Metern. Die gesamte Rinnenbreite beträgt 3 Meter. Es wird angenommen, dass in dieser Rinne 2,3 m³ Sediment pro Meter Rin- nenlänge freisetzt wird. Es wird konservativ angenommen, dass die Sedimentaushöhe (Quellhöhe) 4 Meter über dem Meeresboden beträgt. Dies ist ein Worst-Case-Ansatz, da es nicht unbedingt notwendig ist, das Sediment wegzublasen.

Das *Jetten* führt zu einem Streifen gestörten Meeresbodens, der aus der 3 Meter breiten ausgehobenen Rinne besteht. Der *Düsenschlitten* hängt über der zu grabenden Rinne. Das bedeutet, dass eine Störung durch Kettenraupen nicht vorkommt.

2.6 Freisetzung von Sediment

2.6.1 Korngröße und Fallgeschwindigkeit des freigesetzten Sediments

In dieser Modellierungsstudie wird nur das feine Material (Ton und Schluff) modelliert, da sich das grobe Material unmittelbar neben der Pipeline absetzen wird. Bodenuntersuchungen liefern keine Informationen über die genaue Zusammensetzung des Bodens oder Korngrößenverteilungen. Es wird daher angenom- men, dass 33 % des Bodens aus feinem Material, d. h. Schluff oder Ton, bestehen. Es wird außerdem an- genommen, dass das Bodenmaterial eine Dichte von 1000 kg/m³ hat. Das bedeutet, dass ein Kubikmeter Bodenmaterial (wie es im Boden vorhanden ist) ein Gewicht von 1000 kg hat. Diese Zahl wurde verwen- det, um die Menge an Feinsediment zu bestimmen, die während des Eingrabens freigesetzt wird und hat nichts damit zu tun, wie sich das Material im Wasser verhält. In der Diskussion werden die Unsicherheiten bei den verwendeten Bodeneigenschaften und deren Auswirkungen auf die Sedimentkonzentrationen und die Sedimentation angesprochen.

Es werden drei Fraktionen von Feinmaterial modelliert, die jeweils mit einem Anteil von 11 % im Boden vertreten sind. Die Korngröße und Fallgeschwindigkeit der drei Fraktionen sind in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 12: Eigenschaften (Korngröße und Fallgeschwindigkeit) der drei modellierten Fraktionen

Fraktion	D ₅₀ [μm]	V [m/s]
1 (Ton)	2,5	3,90E-6
2 (feiner Schluff)	23,5	3,48E-4
3 (grober Schluff)	43	1,2E-3

2.6.2 Freigesetzte Menge an Sediment

Für die Vorhersage der zusätzlichen Sedimentkonzentration und der Sedimentation als Folge des Rinnen- aushubs sind nur die Feinsedimentfraktionen relevant. Beim Graben werden diese Feinfraktionen aufge- wirbelt und sinken dann sehr langsam auf den Meeresboden ab. Bei diesem Sinkvorgang wird das Feinsediment von Strömungen mitgerissen. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenbedin- gungen kann es vorkommen, dass sich die Feinsedimente überhaupt nicht absetzen. Der mechanische

Rinnenaushub ist ein ruhigerer Prozess als das Jetting, was bedeutet, dass beim Trenching weniger Feinsediment aufgewirbelt wird als beim Jetting.

Die groben Sedimentfraktionen, z. B. der grobe Sand, werden beim Ausheben mit der Fräse bewegt, aber nicht aufgewirbelt. Er sinkt direkt entlang der Rinne auf den Meeresboden zurück. Die grobe Sedimentfraktion wird daher nicht in die Ausbreitungs- und Sedimentationsmodellierung einbezogen.

Für die beiden Techniken werden die folgenden Auswirkungen erwartet:

- **Trenching:** Es wird angenommen, dass beim *mechanical trenching* 50 % des Feinmaterials in Schwebe gebracht werden. Der Rest des Feinanteils und alle gröberen Fraktionen werden in den Sandhaufen abgelagert und setzen sich sofort auf beiden Seiten der Pipeline ab. Die Austragsstelle befindet sich knapp über dem Boden;
- **Jetting:** Es wird davon ausgegangen, dass das *Jetten* das gesamte Feinmaterial durch Wegblasen in Schwebe bringt. Dies ist ein Worst-Case-Ansatz: Es ist nicht notwendig, das Feinsediment wegzublasen. Die gröberen Fraktionen setzen sich in der Nähe der Pipeline ab. Die Austragsstelle kann vier Meter über dem Meeresboden liegen, kann aber auch anders eingestellt werden. Die Modellierung betrifft also ein Worst-Case-Szenario.

Die Berechnung der Menge an Feinsediment, die beim Trenchen bzw. beim Jetten in Suspension gebracht wird, ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Trasse ist in Abschnitte von über dreihundert Metern unterteilt, und die Zeit, die der Bagger zum Ausheben eines Abschnitts benötigt, wird anhand der Geschwindigkeit des Baggers bestimmt. Die Geschwindigkeit des Baggers basiert auf der Durchschnittsgeschwindigkeit innerhalb der vorgegebenen Bandbreiten (siehe Abschnitt 2.5): 250 m/h für das Trenchen und 175 m/h für das Jetting.

Anschließend wurde der "Quellterm" für jede der Feinsedimentfraktionen bestimmt, d. h. die Masse des Sediments, das pro Sekunde während der Grabungszeit in einem Abschnitt freigesetzt wird.

Trace	
Lengte trace [m]	14695.61
Aantal bronnen [-]	48
Lengte per bron [m]	306.16

Doorsnede	
Volume grond per m trace [m3/m]	3.00
Volume totaal trace [m3]	44086.83
Volume per bron [m3]	918.48

Tijd	
Snelheid kar [km/uur]	0.25
Snelheid kar [m/s]	0.07
Tijd per bron [s]	4408.68

Source term	
Dichtheid [kg/m3]	1000
Gewicht per bron [kg]	918476
Percentage fractie 1 [%]	11
Percentage fractie 2 [%]	11
Percentage fractie 3 [%]	11
Percentage in suspensie [%]	50
Gewicht fractie 1 per bron [kg]	50516.2
Gewicht fractie 2 per bron [kg]	50516.2
Gewicht fractie 3 per bron [kg]	50516.2
Bronterm fractie 1 [kg/s]	11.5
Bronterm fractie 2 [kg/s]	11.5
Bronterm fractie 3 [kg/s]	11.5

Trace	
Lengte trace [m]	14695.61
Aantal bronnen [-]	48
Lengte per bron [m]	306.16

Doorsnede	
Volume grond per m trace [m3/m]	2.30
Volume totaal trace [m3]	33799.90
Volume per bron [m3]	704.16

Tijd	
Snelheid kar [km/uur]	0.175
Snelheid kar [m/s]	0.05
Tijd per bron [s]	6298.12

Source term	
Dichtheid [kg/m3]	1000
Gewicht per bron [kg]	704165
Percentage fractie 1 [%]	11
Percentage fractie 2 [%]	11
Percentage fractie 3 [%]	11
Percentage in suspensie [%]	100
Gewicht fractie 1 per bron [kg]	77458.1
Gewicht fractie 2 per bron [kg]	77458.1
Gewicht fractie 3 per bron [kg]	77458.1
Bronterm fractie 1 [kg/s]	12.3
Bronterm fractie 2 [kg/s]	12.3
Bronterm fractie 3 [kg/s]	12.3

Abbildung 1112: Berechnung der Quellterme für Trenching (links) und Jetting (rechts)

3 Modellbeschreibung

3.1 Einführung

In diesem Abschnitt wird das numerische Modell beschrieben, das zur Vorhersage der Ausbreitung und Sedimentation des Feinsediments verwendet wird, das durch das Vergraben der Pipeline freigesetzt wird.

3.2 Modell-Software

Für die Ausbreitungs- und Sedimentationsmodellierung wurde die Modellierungssoftware Delft3D verwendet. Diese Software wurde von Deltares entwickelt und wird weltweit zur Modellierung von Strömung, Sedimenttransport und Morphologie von Küsten und Flüssen eingesetzt. Delft3D wird auch häufig für Ausbreitungsstudien verwendet, einschließlich Baggerausbreitungsstudien. Die Modellierungssoftware Delft3D kann verschiedene Arten von Sediment sowie gelöste Substanzen ("Tracer") modellieren.

3.3 ZUNO-Modell-Schematisierung

In dieser Studie wird die dreidimensionale, kalibrierte und validierte Modellschematisierung der Nordsee und des Wattenmeeres verwendet: die Südliche Nordsee-Modellschematisierung (ZUNO). Folgende Prozesse werden im ZUNO-Modell simuliert:

- Gezeiten
- Durchflussmengen aus Flüssen
- Salzgehalt
- Atmosphärischer Druck
- Windgeschwindigkeit
- Luft- und Wassertemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Bewölkung

Das bestehende ZUNO-Modell, das von Deltares zur Verfügung gestellt wurde, diente als Grundlage für die Modellschematisierung in dieser Studie und wurde, wo nötig, modifiziert, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden. So wurde z. B. die Auflösung des Berechnungsgitters lokal verfeinert und die Modellierung des Feinsediments, das beim Eingraben der Pipeline freigesetzt wird, hinzugefügt. Für eine detailliertere Beschreibung der Modellschematisierung und der Randbedingungen wird verwiesen auf [1].

Bei der Interpretation der Modellergebnisse ist zu beachten, dass die Größe der Rechengitterzellen im Modell entlang der Trasse maximal etwa 100 Meter beträgt, innerhalb derer das Modell keine detaillierten Informationen liefert. Die im Modell vorhergesagten Sedimentkonzentrationen und Sedimentationsdicken sind die räumlich gemittelten Werte innerhalb einer solchen Gitterzelle. Über der Wassersäule besteht das Rechengitter aus zwölf Schichten: Schicht 1 befindet sich in der Nähe der Wasseroberfläche und Schicht 12 in der Nähe des Meeresbodens.

3.4 Modell-Szenarien

Für die Modellierung der Eingrabung der Pipeline wurde ein Szenario aus drei Szenarien gewählt, die für die Ausbreitungsstudie der Gasbohrlöcher definiert wurden [1]: Für die Modellierung der Pipeline wurde

aus den drei Szenarien, die für die Ausbreitungsstudie der Gasbohrlöcher definiert wurden, ein Szenario ausgewählt: das Szenario für Oktober 2015. Dies ist ein Monat mit relativ ruhigen Wellen-, Wind- und Strömungsbedingungen, wodurch die Sedimentwolke in der Nähe der Pipelinetrasse bleibt, was zu relativ hohen Spitzenkonzentrationen und relativ großen Sedimentationsdicken führt. Auch in der Praxis werden Pipelines in der Regel bei ruhigen Wetterbedingungen verlegt.

Das Modell wurde für den Zeitraum vom 28. September 2015 bis zum 31. Oktober 2015 ausgeführt, wobei die Tage im September verwendet wurden, um dem Modell Zeit zu geben, mit den Strömungen und Wellen zu spielen. Im Modell beginnt das Trenching oder das Jetting am 1. Oktober.

3.5 Zufuhr von gelöstem Feinsediment

Entlang der Pipelinetrasse wurden etwa alle 300 Meter 48 Quellterme für die Feinsedimentfreisetzung modelliert. Jeder Quellterm repräsentiert das freigesetzte Sediment in dem entsprechenden 300-Meter-Abschnitt. Sukzessive wird Feinsediment entlang der Trasse freigesetzt. Die Dauer jedes Quellterms entspricht der Zeit, die der Bagger benötigt, um einen 300-Meter-Abschnitt auszuheben: bei einer Fahrgeschwindigkeit von 250 m/h beträgt für das Trenching die Zeit 1,2 Stunden für einen Abschnitt, und bei einer Fahrgeschwindigkeit von 175 m/h beträgt für das Jetting die Zeit gute 1,7 Stunden.

Es wird angenommen, dass das Eingraben bei der Plattform beginnt: Abschnitt 1 ist daher der nördlichste Einleitungspunkt und Abschnitt 48 der südlichste. Beim Trenching wird das Sediment in Bodennähe freigesetzt; im Modell wird der Austrag daher in der Bodenschicht (Schicht 12) des Modells addiert. Beim Jetting wird das Sediment in einer Höhe von 4 Metern freigegeben. Da die Tiefe und damit die Dicke der verschiedenen Schichten im Modell entlang der Trasse variiert, wird der Austrag in Schicht 10 (in der Nähe der Plattform), Schicht 9 oder Schicht 8 (südlichster Punkt) hinzugefügt.

3.6 Modellausführung und Visualisierung

Zur Visualisierung der Modellergebnisse wurden für die beiden Varianten folgende Arten von Abbildungen erstellt:

- Die maximale Konzentration von Feinmaterial während der Simulation über die gesamte Wassersäule. Dabei wurde die Konzentration der drei Sedimentfraktionen (Ton, Feinschluff und Grobschluff) berücksichtigt. Die angezeigte Konzentration ist die "zusätzliche" Konzentration als Ergebnis der Grabungsarbeiten; die natürliche Hintergrundkonzentration ist nicht enthalten. Neben der absoluten Konzentration wird auch der maximale Beitrag zur Hintergrundkonzentration in diesem Teil der Nordsee dargestellt, wobei eine natürliche Hintergrundkonzentration von 15 mg/l angenommen wird;
- Die maximale Sedimentationsdicke des Feinsediments während der Simulation;
- Zeitreihen der Konzentration und Sedimentation in sensiblen Naturgebieten (Abbildung 7): das Austernbank-Renaturierungsprojekt, Borkum Riffgrund, Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer, die Nordseeküstenzone und Rottumerplaat.



Abbildung 1314: Standorte der Modellausführungspunkte entlang der empfindlichen Naturgebiete, grün: Pipelinetrasse

4 Modell-Ergebnisse

4.1 Einführung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung vorgestellt. Zunächst werden die Strömungs- und Wellenbedingungen während des Simulationszeitraums kurz besprochen. Dann werden die Ergebnisse für das Trenching vorgestellt, gefolgt von den Ergebnissen für das Jetting. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der beiden Varianten verglichen.

4.2 Strömungs- und Wellenbedingungen

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Strömungsbedingungen während des Simulationszeitraums für die Bodenschicht in der Nähe des Meeresbodens dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit in der unteren Schicht des Modells (Schicht 12) variiert zwischen Stagnation und etwa 0,4 m/s und wird stark von den Gezeiten gesteuert: Ebbe im Westen, Flut im Osten und nahezu stagnierendes Wasser während der Gezeitenwende. Die maximale Wellenhöhe während des Simulationszeitraums beträgt etwa 3 Meter.

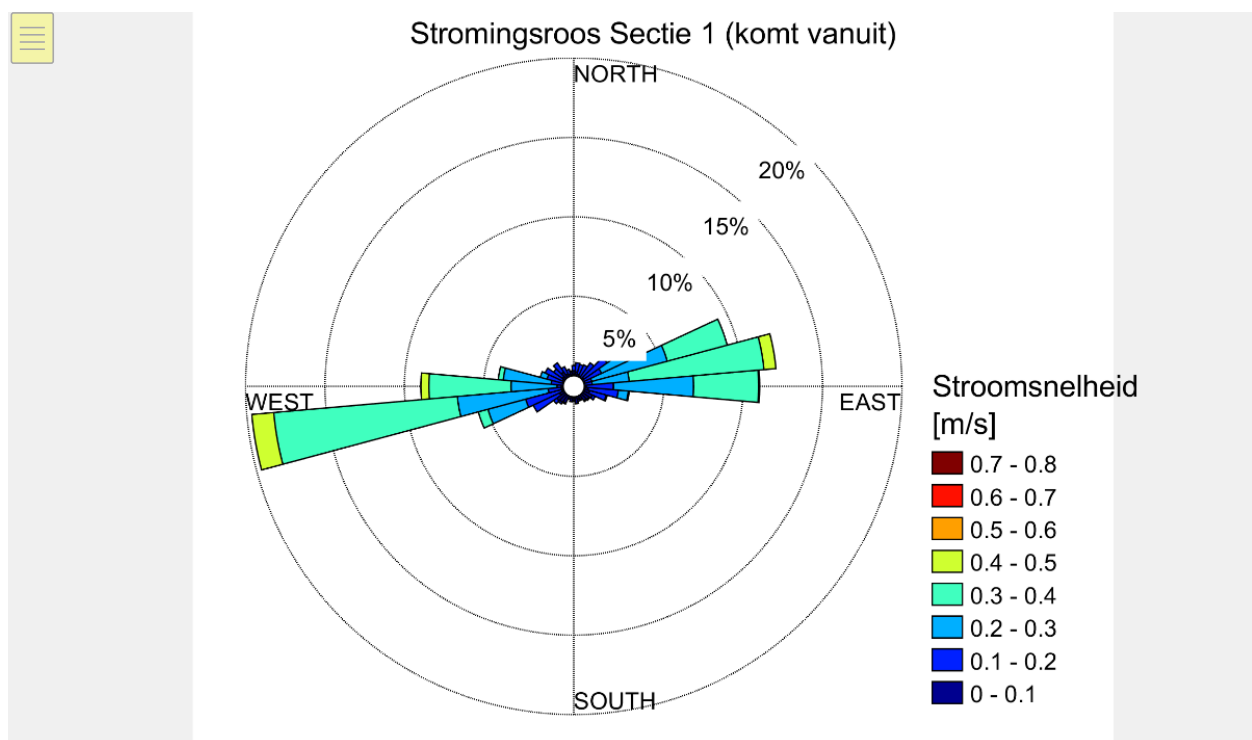


Abbildung 1516: Strömungsrose an der Austragsstelle Abschnitt 1 mit farblich gekennzeichneten Strömungsgeschwindigkeiten. Die Strömungsrichtung gibt an, woher die Strömung kommt

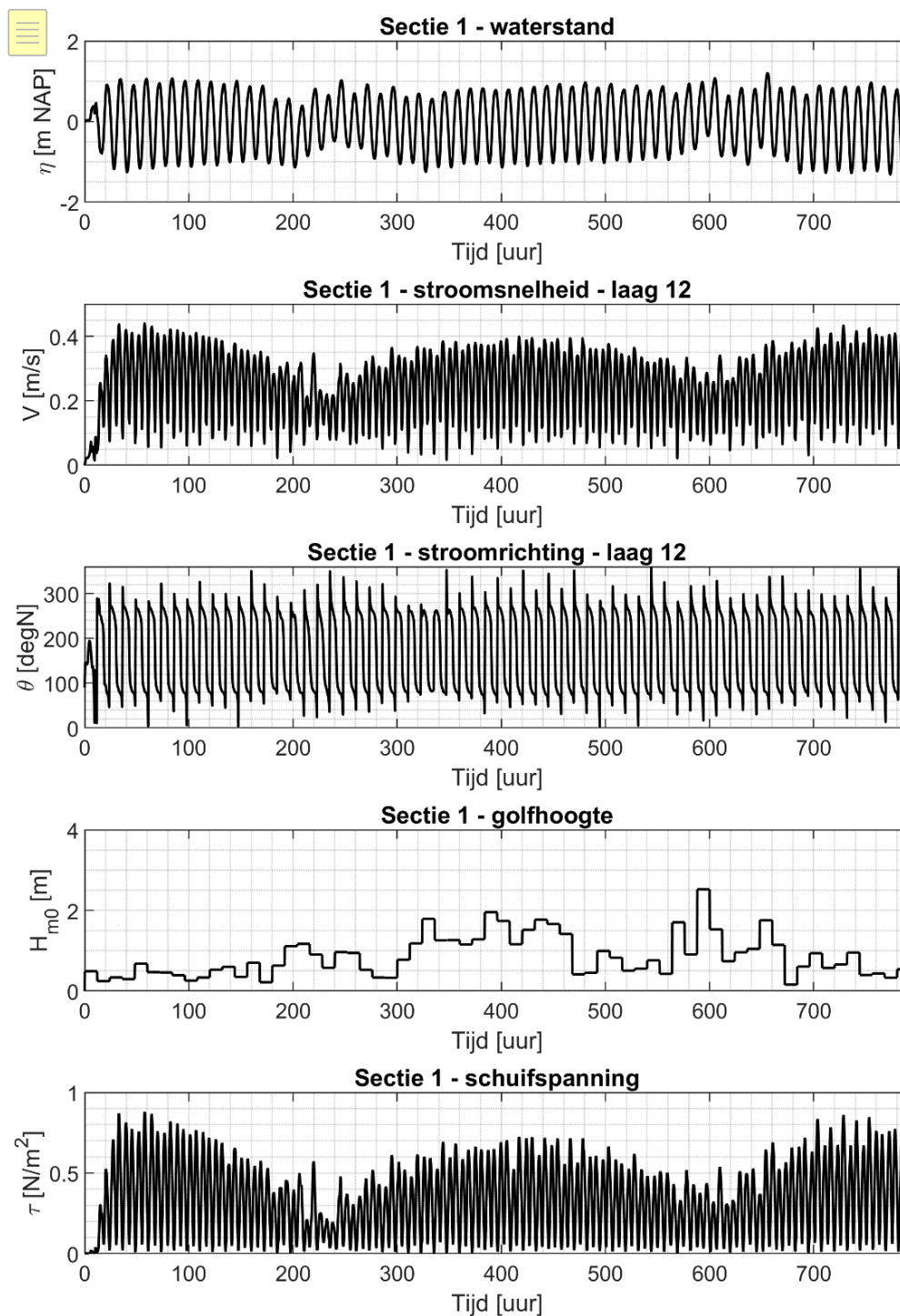


Abbildung 1718: Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung in der unteren Schicht des Modells (Schicht 12), die Wellenhöhe und die Bodenschubspannung während der Simulation in Abhängigkeit von der Zeit (h), in Höhe von Abschnitt 1

4.3 Variante 'Trenching'

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsstudie für die Variante "Trenching".

4.3.1 Schlick-Konzentrationskarten

Abbildung 10 zeigt die maximale Konzentration von Feinsediment über die gesamte Wassersäule während der Simulation. Dies ist die zusätzliche Konzentration infolge des Eingrabens, die Hintergrundkonzentration ist nicht enthalten. Der prozentuale Beitrag der zusätzlichen Konzentration im Vergleich zu einer Hintergrundkonzentration von 15 mg/l ist ebenfalls dargestellt. Die Konzentration liegt in der Nähe der Trasse bei ca. 50 mg/l und nimmt auf beiden Seiten der Trasse schnell ab. In einigen Abschnitten erstreckt sich die Ausbreitung hauptsächlich nach Osten, während sie in anderen hauptsächlich nach Westen verläuft. Dies ist auf das unterschiedliche Zusammentreffen der verschiedenen Ablagerungen mit der Gezeitenphase zurückzuführen. Die höchsten lokalen Konzentrationen in der Nähe der Trasse werden erreicht, wenn die Ablagerung während des Gezeitenwechsels stattfindet.

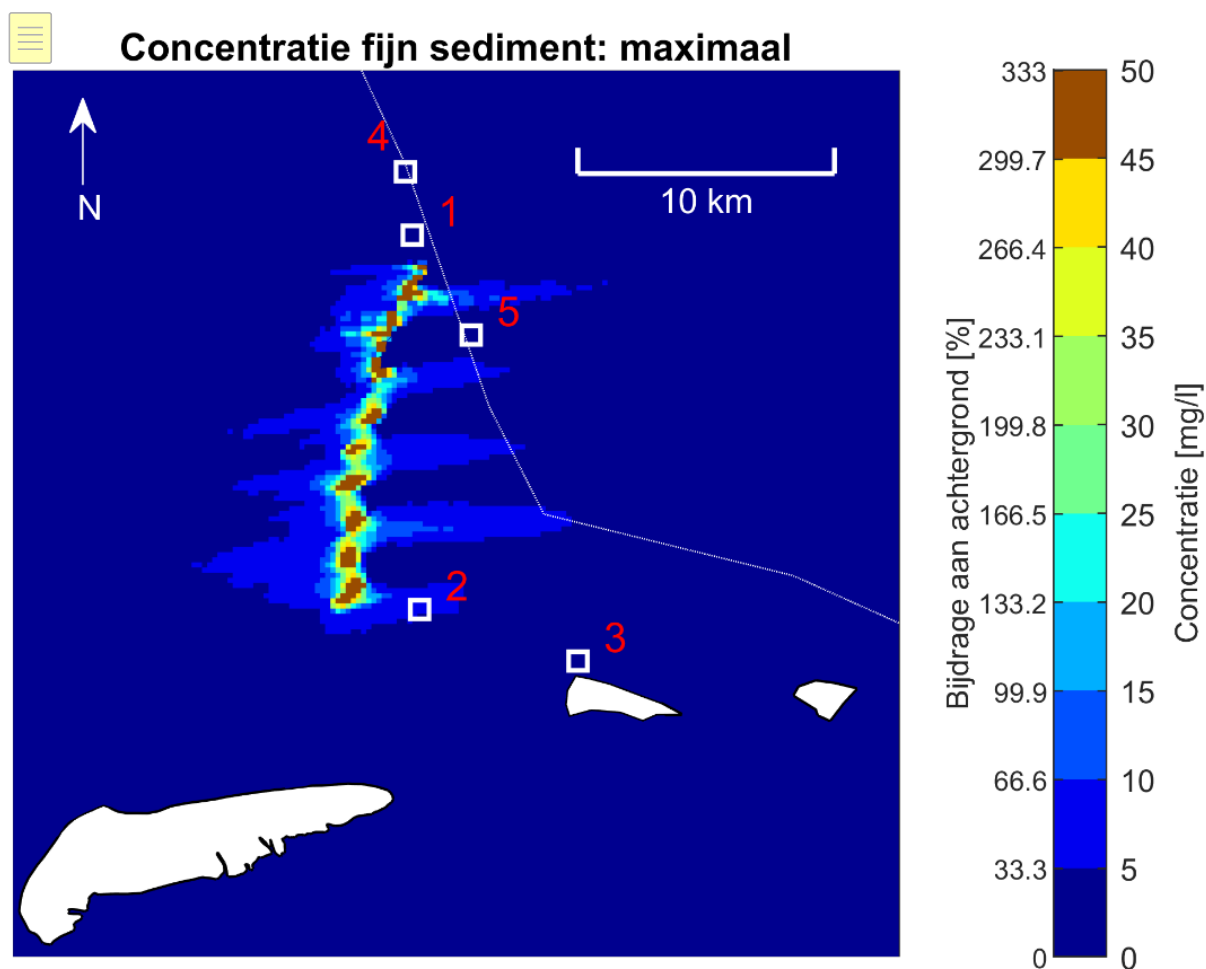


Abbildung 1920: Maximale Konzentration von Feinmaterial und rechts der maximale Beitrag relativ zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l über die gesamte Wassersäule während der Simulation. Die sensiblen Gebiete sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet

(1 = Austernbank-Renaturierungsprojekt, 2= Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit einer gestrichelten Linie.

4.3.2 Karten zur Sedimentation

Abbildung 11 zeigt die maximale Sedimentationsdicke des Feinsediments während der Simulation. Die maximale Sedimentationsdicke des Feinsediments beträgt etwa 0,5 mm in der Nähe der Trasse. Man sollte sich darüber im Klaren sein, dass die Dimensionen der Gitterzellen im Modell um die Messkurve herum höchstens etwa 100 Meter betragen; innerhalb derer keine detaillierteren Informationen verfügbar sind. Die 0,5 mm Sedimentationsdicke des Feinsediments ist die räumlich gemittelte Sedimentationsdicke innerhalb einer solchen 100-Meter-Rasterzelle.

Im Sedimentationsmuster ist das Gezeitenmuster von Ebbe, Flut und der Gezeitenwechsel deutlich erkennbar.

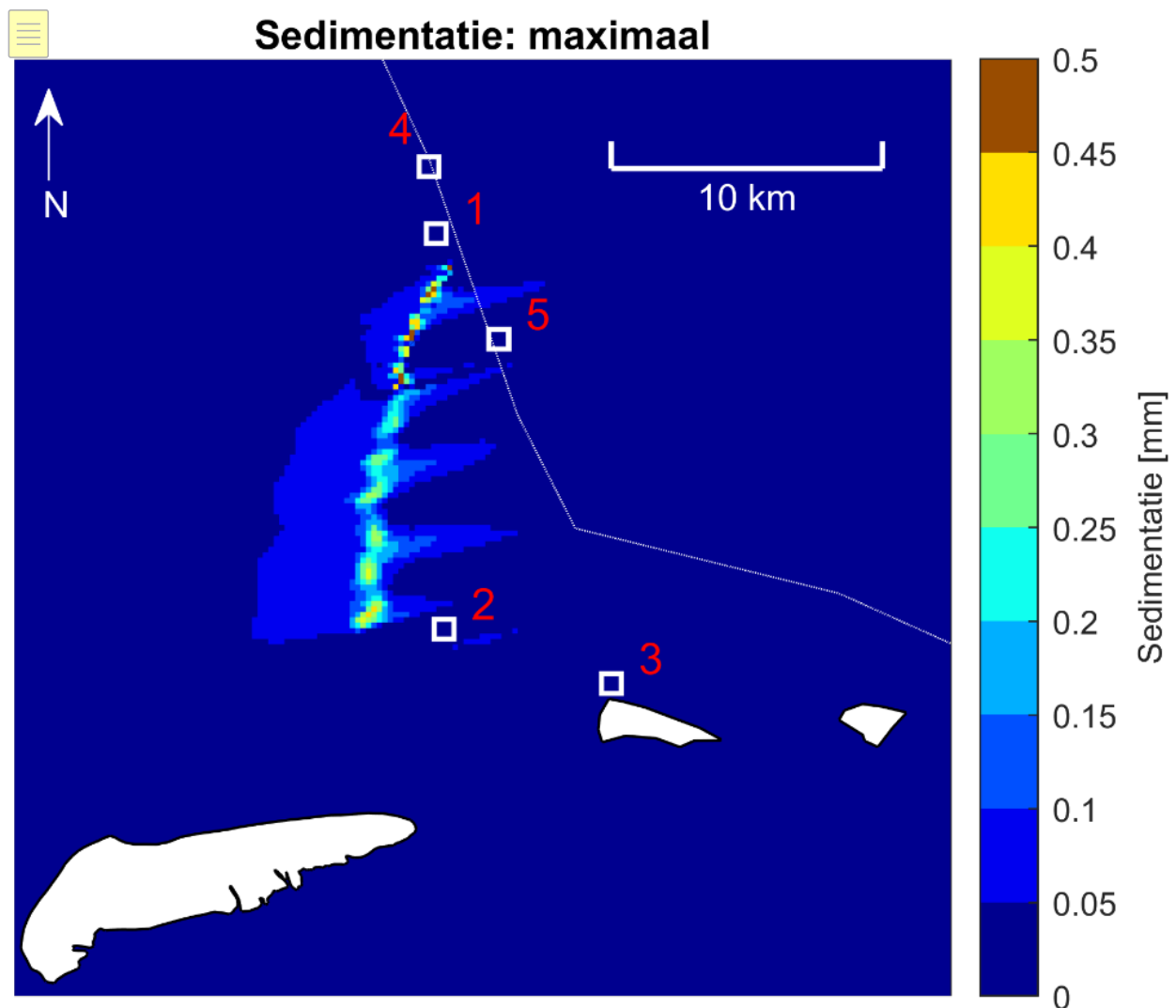


Abbildung 2122: Maximale Sedimentation von Feinmaterial während der Simulation. Die sensiblen Gebiete sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Renaturierungsprojekt, 2= Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze mit einer gestrichelten Linie.

4.3.3 Zeitreihen

In Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 ist der zeitliche Verlauf der Feinmaterialkonzentration und der Sedimentationsdicke an den Modellausgangspunkten entlang der Naturgebiete (siehe Abbildung 7) und der Plattform N05-A / Borkumse Stenen zu sehen.

Die Konzentrationen geben die maximale Konzentration über der Wassersäule an. Die Ablagerung in Abhängigkeit der Zeit wurde zur Veranschaulichung hinzugefügt. Die maximale Konzentration in der Küstenzone der Nordsee liegt bei ca. 5 mg/l, die maximale Sedimentation bei 0,06 mm. Diese bleibt für 200 Stunden ziemlich konstant und nimmt dann leicht ab. Um diesen Zeitraum herum sehen wir auch einen leichten Anstieg der Konzentration.

Im Niedersächsischen Wattenmeer und dem angrenzenden Küstenmeer liegt die maximale Konzentration bei ca.

3 mg/l. Die Sedimentation steigt hier auf 0,04 mm und bleibt ziemlich konstant. Die Tatsache, dass die Sedimentationsdicke an letzterem Standort konstant bleibt, während sie in der Küstenzone der Nordsee nach 250 Stunden abzunehmen beginnt, ist auf den Tiefenunterschied zwischen den beiden Standorten zurückzuführen. Der Beurteilungspunkt im Niedersächsischen Wattenmeer und angrenzenden Küstenmeer liegt in einer Tiefe von ca. 21 m, der Beurteilungspunkt im Küstenbereich der Nordsee in einer Tiefe von ca. 9 m.

In flacherem Wasser haben Wellen und Strömungen mehr Einfluss auf den Boden und die Bodenschubspannung ist höher: Ein Teil des sedimentierten Materials erodiert wieder. An der N05-A-Plattform und den Borkumse Stenen liegt die maximale Konzentration bei 2 mg/l, die Sedimentation bei 0,02 mm. An den anderen Standorten bleibt die Konzentration unter 1 mg/l und die Sedimentation unter 0,01 mm.

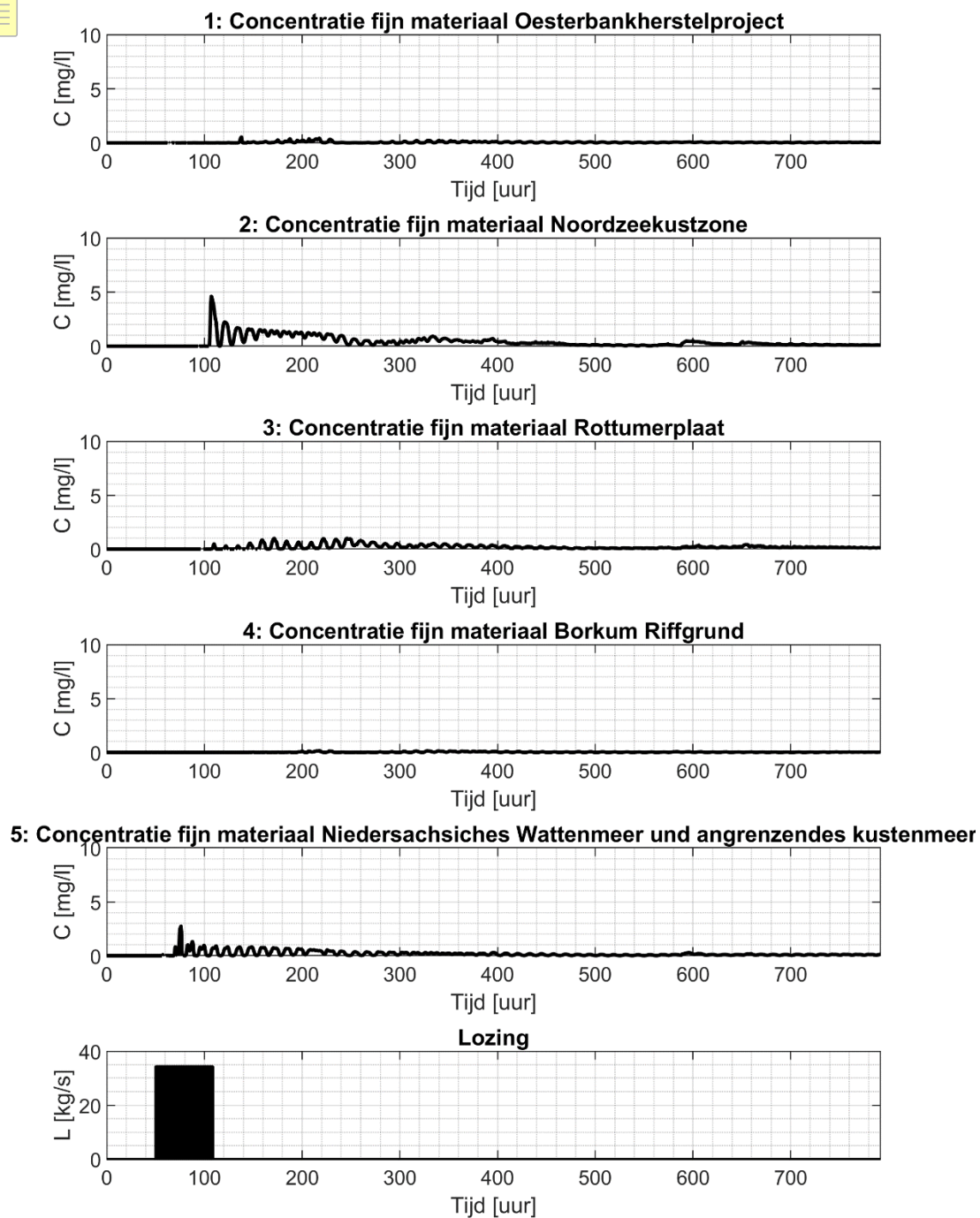


Abbildung 2324: Maximale Feinsedimentkonzentration in der Wassersäule in den empfindlichen Gebieten in Abhängigkeit von der Zeit (h), unten die Ablagerung

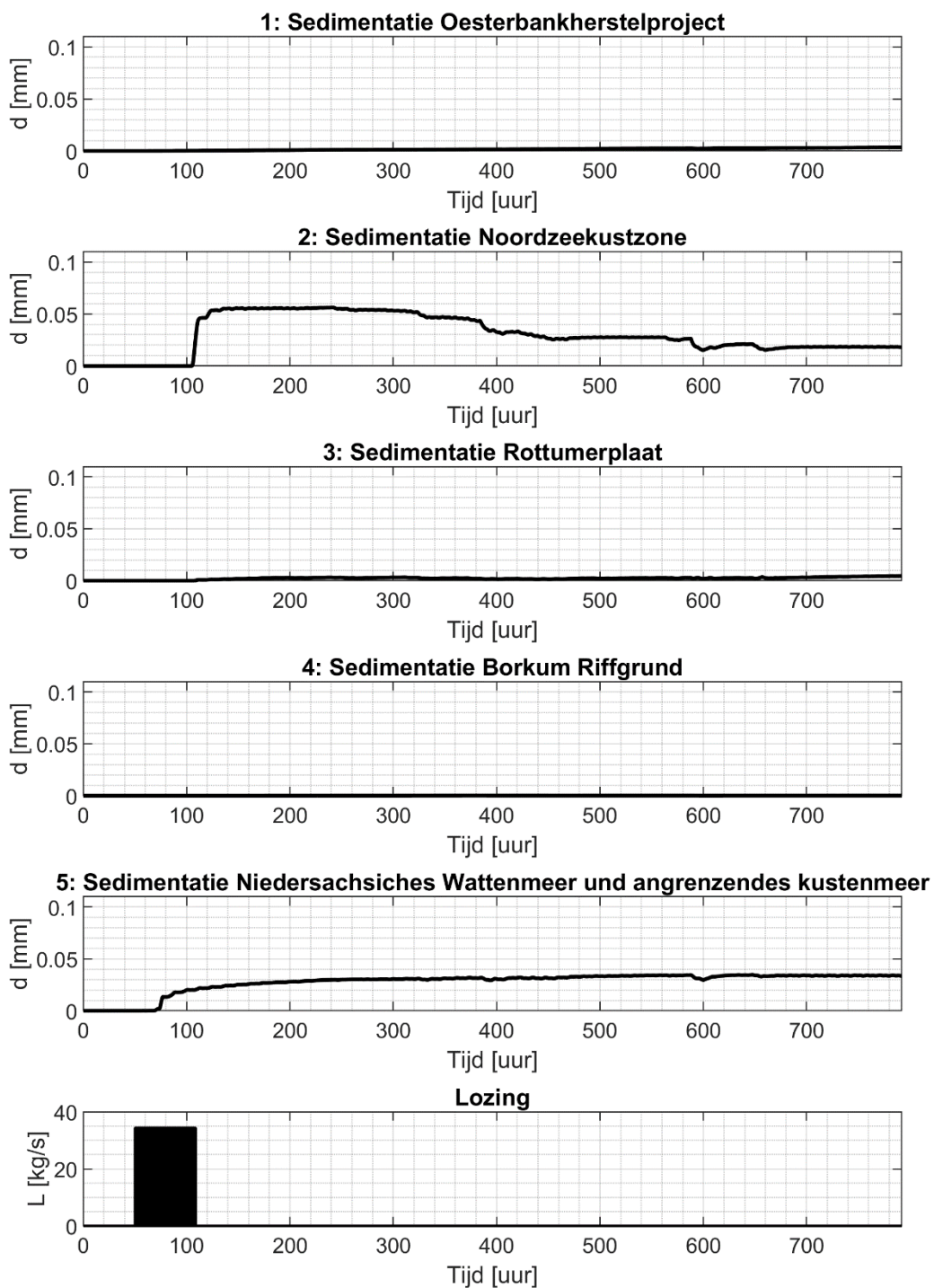


Abbildung 2526: Ablagerung von Feinsediment über der Wassersäule in den empfindlichen Gebieten 1:Austernbank-Renaturierungsprojekt usw. in Abhängigkeit von der Zeit (h), unten die Ablagerung

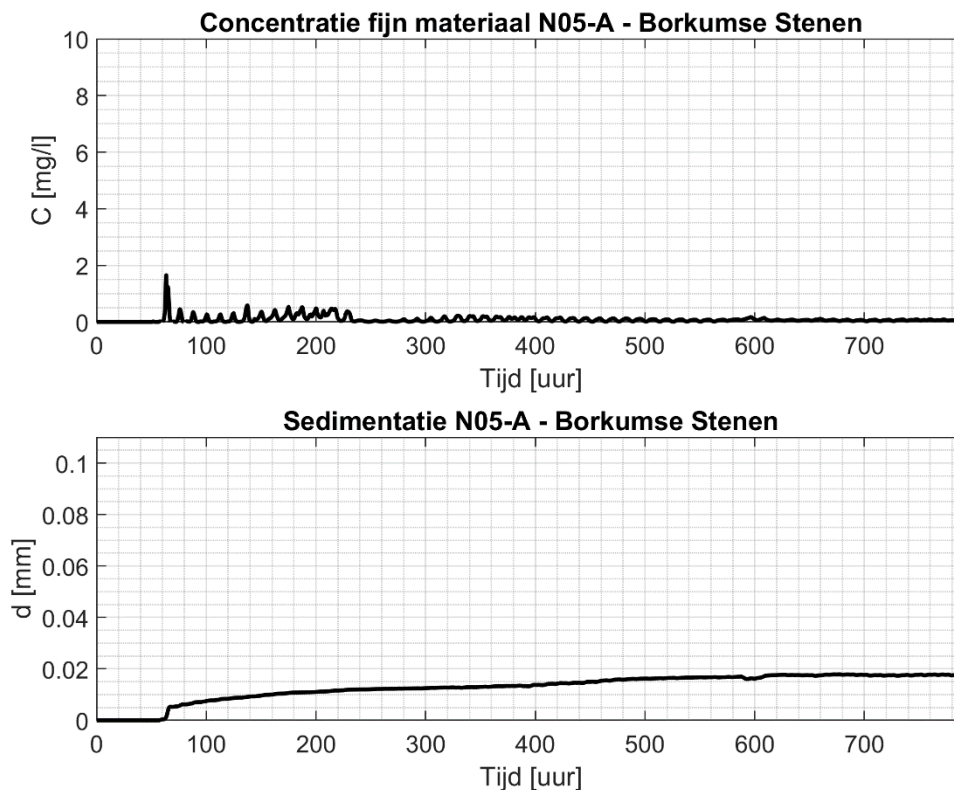


Abbildung 2728: Maximale Konzentration von Feinsedimenten in der Wassersäule und Sedimentation an der Plattform N05-A und an den Borkumse Stenen Abhängigkeit von der Zeit (h)

4.4 Variante 'Jetten'

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsstudie für die Variante 'Jetten'.

4.4.1 Schlick-Konzentrationskarten

Abbildung 15 zeigt die maximale Konzentration von Feinmaterial über die gesamte Wassersäule während der Simulation. Dies ist die zusätzliche Konzentration infolge des Jettens, die Hintergrundkonzentration ist nicht enthalten. Der prozentuale Beitrag der zusätzlichen Konzentration im Vergleich zu einer Hintergrundkonzentration von 15 mg/l ist ebenfalls dargestellt. Die maximale Konzentration liegt bei ca. 50 mg/l in der Nähe der Trasse und nimmt auf beiden Seiten der Trasse schnell ab. Die Wolke ist etwas größer als in der Rinne, was besonders an den Ausreißern der Wolke nach Osten und Westen deutlich wird.

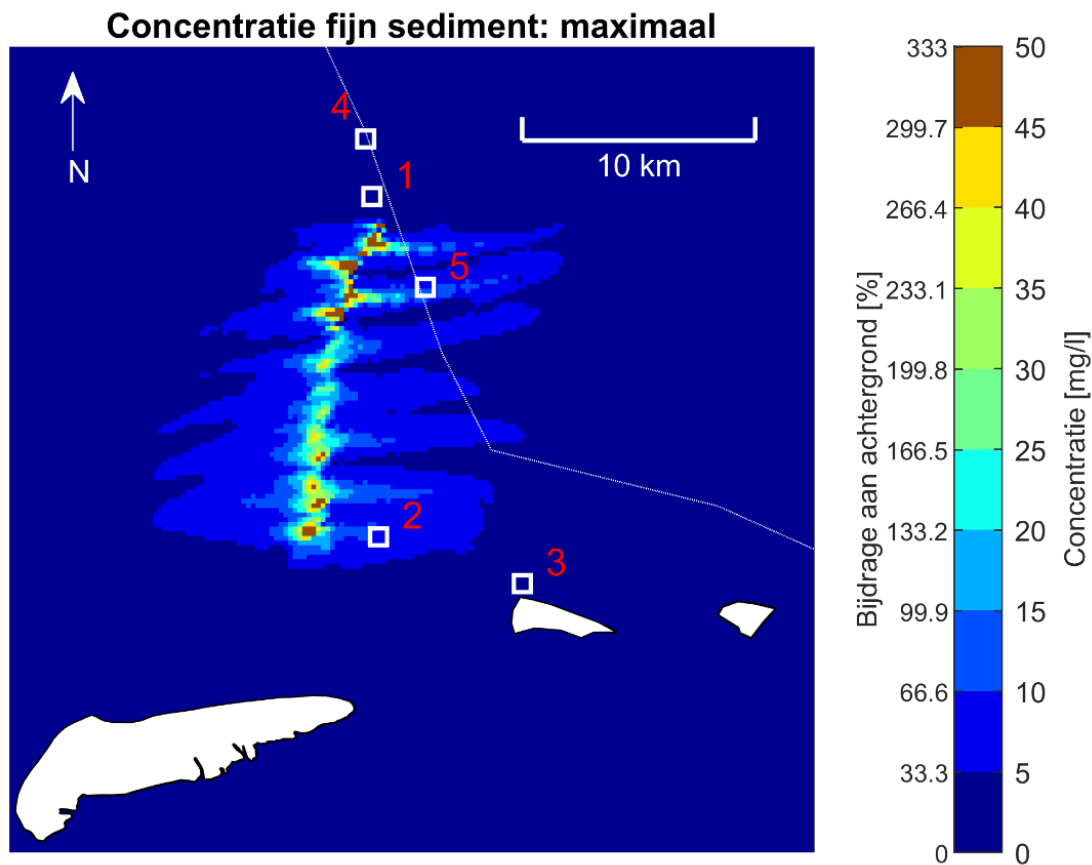


Abbildung 2930: Maximale Konzentration von Feinmaterial und der maximale Beitrag relativ zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l über die gesamte Wassersäule während der Simulation. Die sensiblen Gebiete sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet

(1 = Austernbank-Renaturierungsprojekt, 2= Nordsee-Küstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet.

4.4.2 Karten zur Sedimentation

Abbildung 16 zeigt die maximale Sedimentation von Feinmaterial während der Simulation. Die maximale Sedimentation beträgt ca. 0,5 mm in der Nähe der Trasse. Auch hier lässt sich das Gezeitenmuster im Sedimentationsmuster erkennen. Man sollte sich darüber im Klaren sein, dass die Abmessungen der Gitterzellen im Modell um die Messkurve herum höchstens etwa 100 Meter betragen; innerhalb der Zellen sind keine detaillierteren Informationen verfügbar. Die 0,5 mm Sedimentationsdicke des Feinsediments ist die räumlich gemittelte Sedimentationsdicke innerhalb einer solchen 100-Meter-Rasterzelle.

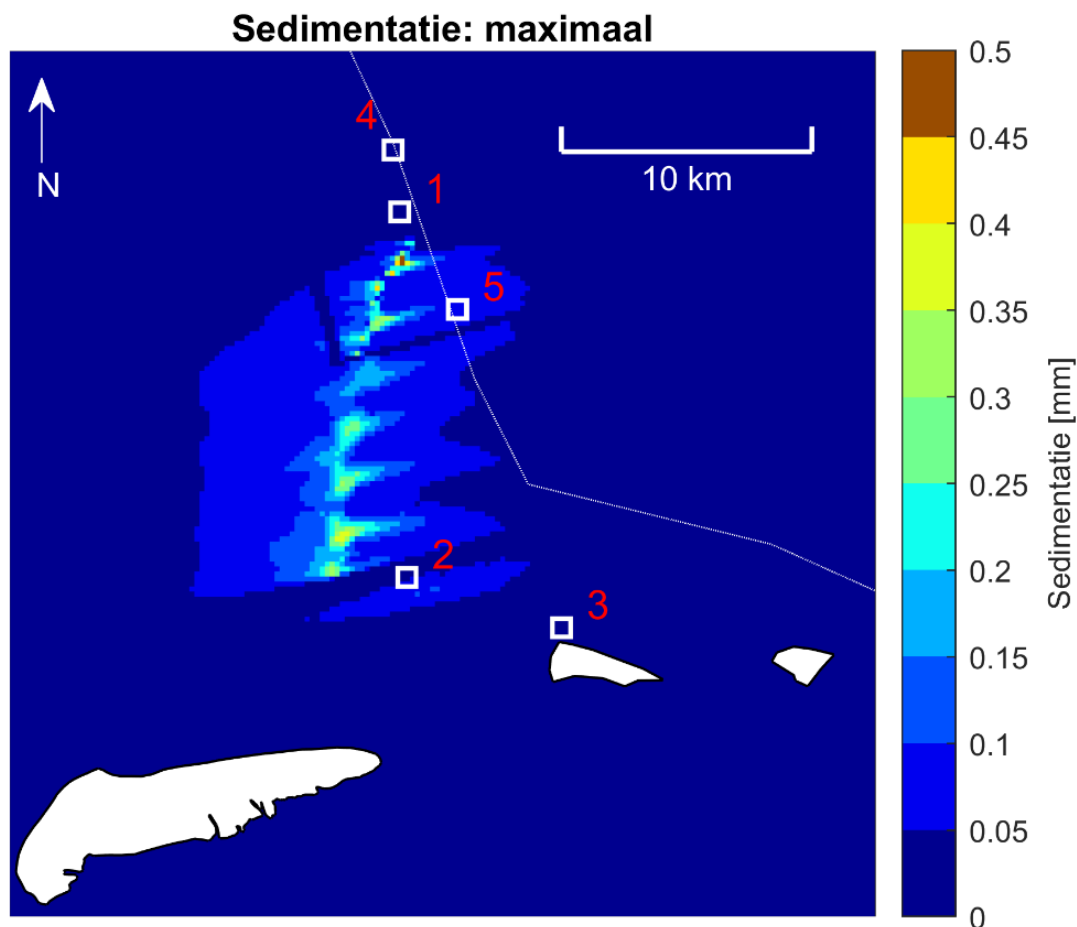


Abbildung 3132: Maximale Sedimentation von Feinmaterial während der Simulation. Die sensiblen Gebiete sind mit weißen Quadraten und einer Nummer gekennzeichnet (1 = Austernbank-Renaturierungsprojekt, 2 = Nordseeküstengebiet, 3 = Rottumerplaat, 4 = Borkum Riffgrund, 5 = Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer), die deutsch-niederländische Grenze ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet.

4.4.3 Zeitreihen

In Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 ist der zeitliche Verlauf der Feinmaterialkonzentration und der Sedimentationsdicke an den Modellausgangspunkten entlang der Naturgebiete (siehe Abbildung 7) und der Plattform N05-A / Borkumse Stenen zu sehen.

Die Konzentrationen geben die maximale Konzentration über der Wassersäule an. Die Ablagerung in Abhängigkeit der Zeit wurde zur Veranschaulichung hinzugefügt. Die maximale Konzentration in der Küstenzone der Nordsee liegt bei ca. 8 mg/l, die maximale Sedimentation bei 0,1 mm. Diese bleibt für 200 Stunden ziemlich konstant und nimmt dann leicht ab. Um diesen Zeitraum herum sehen wir auch einen leichten Anstieg der Konzentration. Im niedersächsischen Wattenmeer und dem angrenzenden Küstenmeer liegt die maximale Konzentration bei etwa 9 mg/l. Die Sedimentation steigt hier auf 0,07 mm und bleibt ziemlich konstant. An der N05-A-Plattform und den Borkumse Stenen liegt die maximale Konzentration bei etwa 3 mg/l, die maximale Sedimentation bei 0,03 mm. In den anderen Gebieten bleibt die Konzentration unter 2 mg/l und die Sedimentation unter 0,01 mm.

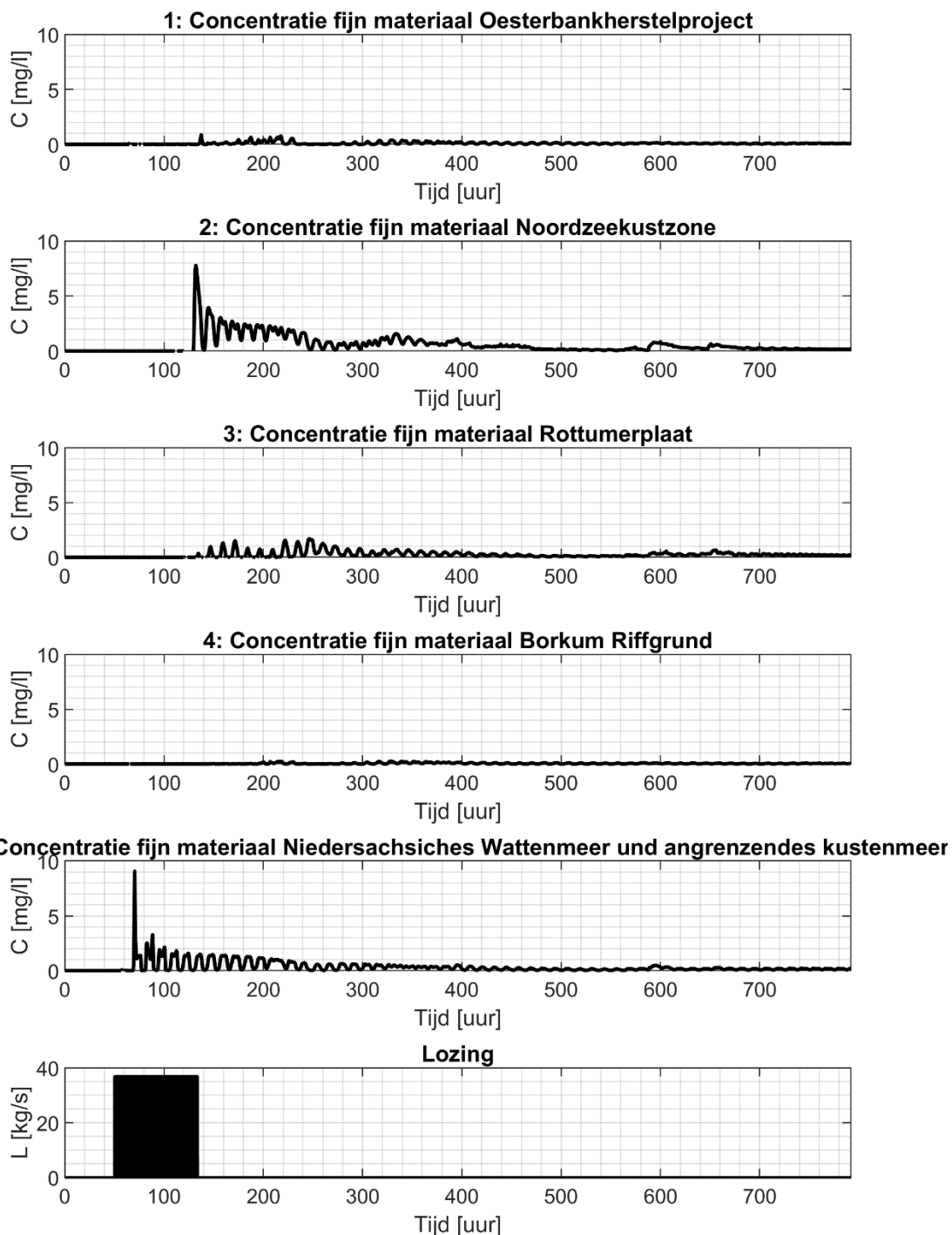


Abbildung 3334: Maximale Feinsedimentkonzentration in der Wassersäule an den empfindlichen Standorten in Abhängigkeit von der Zeit (h), unten die Ablagerung

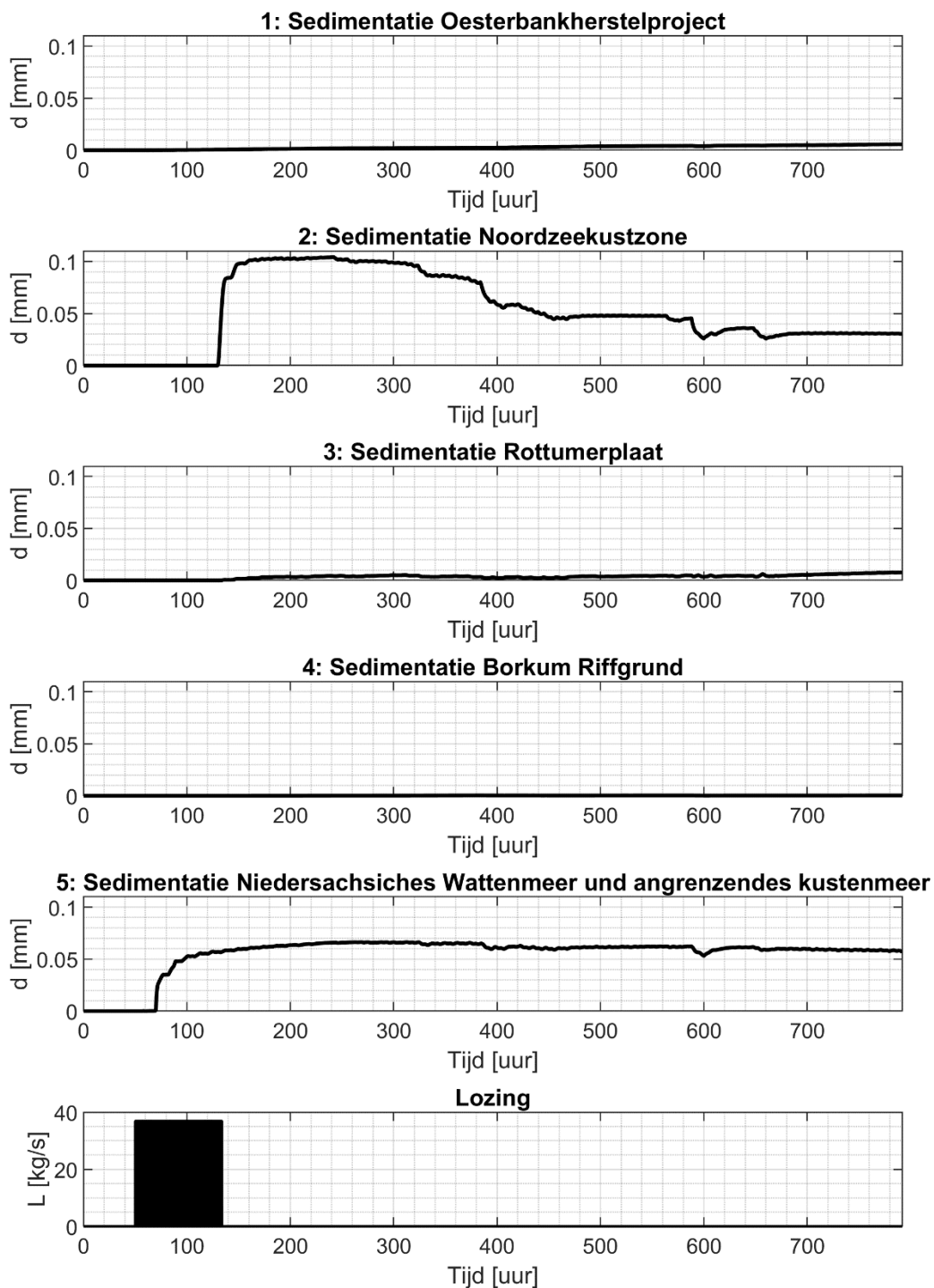


Abbildung 3536: Ablagerung von Feinsedimenten in den empfindlichen Gebieten in Abhängigkeit der Zeit (h), unten die Ablagerung

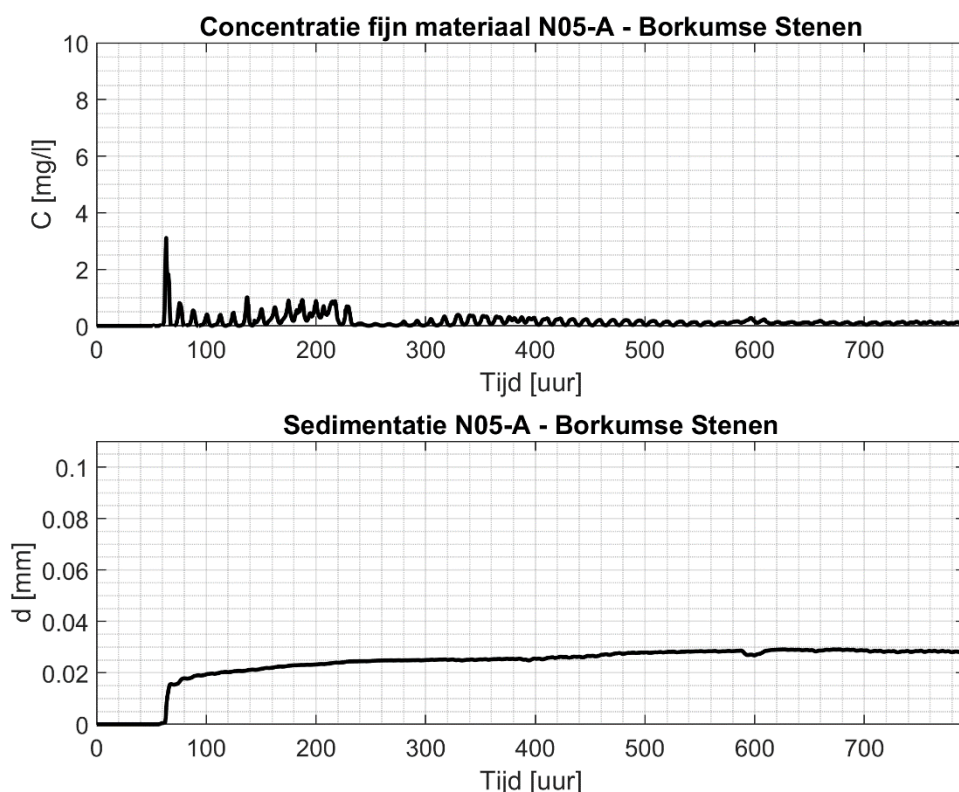


Abbildung 3738: Maximale Konzentration von Feinsedimenten in der Wassersäule und Sedimentation an der Plattform N05-A und an den Borkumse Stenen in Abhängigkeit der Zeit (h)

4.5 Vergleich zwischen den Varianten

Das Volumen des ausgehobenen Bodenmaterials pro Laufmeter ist beim mechanical Trenchen größer als beim Jetten. Da jedoch beim Jetten 100 % des Feinmaterials freigesetzt werden, während beim mechanischen Trenchen nur 50 % freigesetzt werden, ist die Gesamtmenge des freigesetzten Feinmaterials höher. Dies wird dadurch kompensiert, dass in den Modellrechnungen die Aushubgeschwindigkeit beim Jetting geringer ist als beim mechanischen Trenchen, so dass letztlich der Quellterm (die Menge des freigesetzten Materials pro Zeiteinheit) für beide Varianten vergleichbar ist. In der Praxis hat die Grabungsgeschwindigkeit eine Bandbreite (50 - 300 m/h beim Jetting und 200 - 300 m/h beim mechanischen Trenchen), sodass die Unterschiede in der Praxis größer oder kleiner sein können.

Aufgrund der durchschnittlichen Aushubgeschwindigkeit, die in den Modellberechnungen verwendet wird, bleibt der Quellterm beim Jetten für jeden Pipelineabschnitt länger bestehen als beim Trenchen. Infolgedessen ist die Wolke mit erhöhten Sedimentkonzentrationen beim Jetten größer als beim Trenchen. Ein weiterer Faktor ist, dass der Austrag beim Jetting höher in der Wassersäule stattfindet (4 Meter über dem Meeresboden in der Modellrechnung), während der Austrag beim Trenching nahe am Meeresboden stattfindet. In der Praxis kann die Austragsstelle beim Jetten niedriger sein. Die Strömungsgeschwindigkeit in 4 m Höhe ist größer als in der Nähe des Meeresbodens und das Sediment kann sich daher weiter ausbreiten. Außerdem wird die Sedimentation beim Jetten auf eine größere Fläche verteilt und die Sedimentation in empfindlichen Gebieten ist größer. Eine Übersicht über die Konzentrationen und Sedimentation für die beiden Varianten ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 34: Zusammenfassung der maximalen Sedimentkonzentrationen und die Sedimentation in den empfindlichen Gebieten für die beiden Varianten

Empfindliche Gebiete	Maximale Konzentration in der Wassersäule [mg/l].		Maximale Sedimentation [mm]	
	Trenchen	Jetten	Trenchen	Jetten
Austernbank-Renaturierungsprojekt	0,5	0,9	<0,01	0,01
Küstengebiet der Nordsee	4,6	7,8	0,06	0,10
Rottumerplaat	1,0	1,7	<0,01	0,01
Borkum Riffgrund	0,2	0,2	<0,01	<0,01
Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer	2,7	9,1	0,03	0,07
N05-A / Borkumse Stenen	1,7	3,1	0,02	0,03

5 Diskussion

Die in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse beruhen auf einer Reihe von Annahmen in der Modelleingabe. Die Hauptannahmen konzentrieren sich auf die Sedimenteigenschaften des Meeresbodens am Standort (eine Untersuchung zeigte nur die Art des Materials, nicht die genaue Zusammensetzung oder Korngrößenverteilungen), den Prozentsatz an Feinsediment, der während des Eingrabens in Suspension gebracht wird, die Geschwindigkeit des Baggers (die eine Bandbreite besitzt), das Timing des Eingrabens in Bezug auf die hydrodynamischen Bedingungen (Gezeiten und Wellen) und intrinsische Modellunsicherheiten. Somit liefert diese Studie ein indikatives Bild der Sedimentwolken, die entstehen können, wenn die Pipeline eingegraben wird.

Die Eigenschaften des Meeresbodens in der Trasse, einschließlich des Anteils an Feinsediment, Kohäsion (Klebrigkeit) und Dichte des Sediments sind unsichere Faktoren in dieser Studie. Zum Beispiel kann die Kohäsion des Sediments dazu führen, dass das Sediment in großen Stücken ausgehoben wird und nicht als kleine lose Partikel, die in der Schwebel bleiben. Auch das Verhältnis des Feinsediments zur Sandfraktion bestimmt, wie viel Sediment in Schwebel kommt und wie weit es sich ausbreitet.

Neben den lokalen Bodeneigenschaften ist auch der Anteil des Feinmaterials, der tatsächlich in Schwebel gebracht wird (und daher nicht in den Sandhaufen landet), ungewiss. Die Wahl dieses Prozentsatzes wirkt sich linear auf die Quellterme aus und ist damit auch mitbestimmend für die Sedimentwolken, die beim Eingraben entstehen.

Auch bei der Fahrgeschwindigkeit des Baggers gibt es eine Bandbreite. Besonders beim Jetten gibt es eine große Bandbreite von 50 - 300 m/h, die einen großen Unterschied in den Quelltermen macht: Eine doppelt so hohe Fahrgeschwindigkeit ergibt einen doppelt so hohen Quellterm in diesem Abschnitt. Allerdings muss man sich darüber im Klaren sein, dass der gesamte Eingrabungsvorgang dann auch doppelt so kurz ist, was den Gesamteffekt auf die Sedimentkonzentration und -ablagerung begrenzt.

Auch der Zeitpunkt des Eingrabens bestimmt die Sedimentwolkenbildung. Denn es macht einen Unterschied, ob das Eingraben bei Ebbe, Flut oder zur Gezeitenwende begonnen wird. Da in jedem Abschnitt der Pipeline nur etwa eine Stunde lang Sediment abgelassen wird, hängt die genaue Form der Wolke (die östlichen und westlichen Ausläufer) von diesem Zeitpunkt ab. Es gibt auch eine längerfristige Variation der Gezeiten: Springflut und Nippflut. Springflut tritt alle 14 Tage auf, Nippflut alle 14 Tage. Da die Gesamtdauer der Ablagerung in der Größenordnung von einigen Tagen liegt, wirkt sich dieser Zeitpunkt auch auf die Wolkenverteilung aus. Auch das Timing, z. B. in Bezug auf einen Sturm und die Jahreszeit, kann die Ausbreitung und Ablagerung des Feinsediments beeinflussen.

Außerdem stellt ein Modell wie Delft3D eine Vereinfachung der Realität dar. So wird z. B. ein Rechengitter verwendet, um die Anzahl der Berechnungspunkte, in denen die Prozesse und die Verteilung des Feinmaterials berechnet werden, auf eine überschaubare Anzahl zu reduzieren. Dies kann auf Kosten der Details gehen: Die räumliche Variation der Sedimentkonzentration und der Sedimentdicke innerhalb der Zellen des Berechnungsgitters bleibt unbekannt. Außerdem werden Prozesse, die auf einer kleineren Skala als der Größe der Rechengitterzellen auftreten (z. B. Turbulenzen), nicht genau berechnet. Daher liegt die Unsicherheitsspanne bei Berechnungen des Sedimenttransports typischerweise in der Größenordnung von -50 bis +100 %, was bedeutet, dass Konzentrationen und Sedimentation halb so groß bis doppelt so groß sein können.

Die Ergebnisse dieser Studie konzentrieren sich auf die zusätzliche Sedimentkonzentration und Versandung infolge der Verlegung der Pipeline. Die Nordsee ist ein dynamisches System mit natürlicher Hintergrundkonzentration und

-sedimentation, die im Laufe des Jahres variieren. Für die Beurteilung der Auswirkungen des Eingrabs der Pipeline wurden die zusätzlichen Sedimentkonzentrationen im Verhältnis zur Hintergrundkonzentration gesetzt. Die Hintergrundkonzentration schwankt zeitlich und räumlich erheblich, liegt aber in diesem Teil der Nordsee im Tiefen- und Jahresmittel in der Größenordnung von 15 mg/l. Die Modellberechnungen in dieser Studie zeigen, dass die zusätzliche Sedimentkonzentration in den empfindlichen Gebieten niedriger als etwa 10 mg/l ist, was nicht dem Tiefenmittel entspricht, sondern irgendwo in der Wassersäule liegt. Außerdem findet die zusätzliche Sedimentkonzentration während eines kurzen Zeitraums von einigen Stunden bis zu einigen Tagen statt. In Trassennähe sind höhere Sedimentkonzentrationen zu erwarten, sie liegen lokal um 50 mg/l. Was die Hintergrundsedimentation anbelangt, so ist die maximale Sedimentation des Feinsediments von 0,1 mm sehr gering im Vergleich zur natürlichen Dynamik des Meeresbodens, wenn man die mehrere Zentimeter hohen Sandrippel auf dem Meeresboden berücksichtigt.

Aufgrund der oben genannten Annahmen und Unsicherheiten sollten die Ergebnisse der Modellierung eher als Größenordnung denn als exakte Antwort angesehen werden.

6 Schlussfolgerungen

In dieser Studie wird die Ausbreitung von feinem Bodenmaterial, das durch das Eingraben einer Pipeline in Schwebelag gebracht wird, modelliert. Es wurden zwei Varianten analysiert: die **"Trenching"**- und die **"Jetting"**-Variante. Auf der Grundlage der Modellierung wurden die Zusatzkonzentrationen und die Sedimentation um die Pipelinetrasse als Ergebnis der Eingrabbungsarbeiten ermittelt. Also ohne die natürlichen Hintergrundkonzentrationen in der Nordsee. Das Hauptaugenmerk lag auf den maximalen Konzentrationen während des Grabens und der Variation der Konzentrationen und der maximalen Sedimentationsdicke an bestimmten Stellen. Eine Bewertung der beiden Varianten wird in dieser Studie nicht vorgenommen. Hierzu wird auf die Naturbewertung in Anhang M9 von Teil 2: Umweltauswirkungen verwiesen.

Die Modellrechnungen zeigen, dass der maximale Anstieg der Schlickkonzentration direkt entlang der Trasse hoch ist und mit der Entfernung stark abnimmt. Das Trenchen bzw. das Jetten führt an folgenden Stellen zu den unten aufgeführten erwarteten Erhöhungen gegenüber einer Hintergrundkonzentration von 15 mg/l, siehe Tabelle 3. Es sollte jedoch eine Unsicherheitsmarge von ca. -50% bis +100% berücksichtigt werden.

Tabelle 56: Maximale prozentuale Erhöhung im Vergleich zur Hintergrundkonzentration von 15 mg/l für die Varianten

Standort	Maximaler Anstieg der Konzentration (%) bezogen auf eine Hintergrundkonzentration von 15 mg/l	
	Variante 'Trenching'	Variante 'Jetten'
Austernbank-Renaturierungsprojekt	3	6
Küstengebiet der Nordsee	31	52
Rottumerplaat	7	11
Borkum Riffgrund	1	1
Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer	18	61
N05-A / Borkumse Stenen	11	21

An den Standorten in der Nähe der Trasse, wie z.B. im Nordseeküstenbereich und im Niedersächsischen Wattenmeer und im angrenzenden Küstenmeer, sind die Erhöhungen von kurzer Dauer (wenn der Bagger vorbeifährt) und die Konzentration halbiert sich nach etwa einem halben bis einem Tag. An den anderen Stellen, die nicht direkt an der Trasse liegen, sondern zu denen das Schwebstoffsediment durch die Strömung transportiert wird, ist der Anstieg deutlich geringer, kann aber länger anhalten. Am Borkum Riffgrund z.B. liegt die Konzentration bei maximal 0,2 mg/l, am Monatsende noch bei 0,05 mg/l. Es ist zu beachten, dass alle diese Konzentrationen im Vergleich zu den natürlichen Hintergrundkonzentrationen sehr niedrig sind.

Die zusätzliche Sedimentation von aufgewirbeltem Schlick liegt in der Größenordnung von 0,5 mm direkt entlang der Trasse. Für das Niedersächsisches Wattenmeer und das angrenzende Küstenmeer sind dies 0,03 mm für die Variante **"Trenching"** und 0,07 mm für die Variante **"Jetten"**. In der Küstenzone der Nordsee sind dies 0,06 mm (Trenching) bzw. 0,10 mm (Jetting). Die Sedimentation für das Austernbank-Renaturierungsprojekt liegt bei beiden Varianten in der Größenordnung von 0,01 mm. Die berechnete zusätzliche Sedimentation von aufgeworfenem Schlick ist deutlich kleiner als die natürliche Sedimentation und Erosion in dem Gebiet, sie liegt in Bezug auf die Sandrippel in der Größenordnung von Zentimetern.

Die Sedimentkonzentrationen sind bei der Variante **"Jetten"** höher als bei der Variante **"Trenching"**. Ein Grund dafür ist, dass bei der Variante **"Jetten"** mehr Feinsediment pro laufenden Meter in Schwebelag gebracht wird. Ein weiterer Grund ist, dass bei der Variante **"Jetten"** das Feinsediment höher in die

Wassersäule ausgetragen wird, wodurch sich das Sediment weiter verteilt. Dieser höhere Austrag in die Wassersäule ist jedoch eine Option und keine Notwendigkeit, so dass dies als konservativer Ansatz angesehen werden kann. Auch die Ablagerung von Feinsediment ist bei der Variante "**Jetten**" etwas höher als bei der Variante "**Trenching**".

7 Referenzen

- [1] Royal HaskoningDHV, „BG1359-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001 Pluimmodellering N05A - Concept,” 2019.
- [2] GEO XYZ Offshore, „Survey Report - N5A to NGT Hot tap,” 2019.
- [3] RIKZ, „Variability of near-surface total suspended matter concentrations in the Dutch coastal zone of the North Sea,” Rapport RIKZ/OS/2001.150X, 2001.
- [4] „Introduction to pipelaying, Rev.D,” 2004.
- [5] ONE-Dyas, „N05A Development Project Pipeline Trenching Options N05A-7-10-0-70038-01,” 2019.
- [6] „<https://www.bissomarine.com/wp-content/uploads/2015/08/BISSO-MARINE-PIPELINE-BURIAL-EXCAVATION-OVERVIEW.pdf>,” [Online]. [Geopend 06 01 2020].
- [7] RIKZ, „Atlas of near-surface total suspended matter concentrations in the Dutch coastal zone of the North Sea,” Report RIKZ/2002.059, 2002.

BERICHT

Morphologische Auswirkungen der Plattform, von Steinschüttung und Bohrschutt

Umweltverträglichkeitsbericht Gasförderung N05-A

Kunde: ONE-Dyas B.V.

Referenz: BG6396IBRP2010071021

Status: Definitief/2.0

Datum: 7-10-2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titeldokument: Morphologische Auswirkungen der Plattform, von Steinschüttung und Bohrschutt

Untertitel: Morphodynamik in der Nähe der Plattform
Referenz: BG6396IBRP2010071021
Status: 2.0/Definitief
Datum: 7-10-2020
Projektname: Milieueffectrapport Gaswinning N05-A
Projektnummer: BG6396-105

Klassifizierung

Projektbezogen

Dieser Text wurde aus dem Niederländischen übersetzt. Soweit es Widersprüche zum Originaltext gibt, ist der Originaltext führend.

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever. Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Methodik	2
1.3	Anleitung zum Lesen	2
2	Beschreibung heutige Situation	
2.1	Einführung	3
2.2	Strömungs- und Wellenbedingungen	3
2.2.1	Strömung	
2.2.2	Wellen	4
<u>2.2.3</u>	<u>Sedimenteigenschaften</u>	
3	Lokale morphologische Effekte	8
3.1	Einführung	8
3.2	Beschreibung	8
3.2.1	Plattform	8
3.2.2	Steinschüttung	9
3.2.3	Ableiten von Bohrschutt	11
3.3	Erwartete morphologische Effekte	13
3.3.1	Bohrplattform, Förderplattform und Steinschüttung	
3.3.2	Bohrschutt	14
3.3.2.1	Absacken des Bohrschutts	14
3.3.2.2	Transport von Bohrschutt über den Meeresboden	18
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	22
5	Referenzen	24

1 Einführung

1.1 Hintergrund

ONE-Dyas ist ein niederländisches Unternehmen, das sich auf die Suche und Förderung von Erdgas aus Feldern im niederländischen, deutschen, britischen und norwegischen Teil der Nordsee konzentriert. Im Jahr 2017 fand ein Konsortium aus den Gasproduzenten ONE-Dyas und Hansa Hydrocarbons Limited zusammen mit EBN B.V. ein Gasfeld (N05-A) innerhalb des sogenannten GEMS-Gebietes. Das GEMS-Gebiet umfasst eine Ansammlung von (möglichen) Gasfeldern, die sich über den Teil der niederländischen und deutschen Nordsee nördlich der Emsmündung erstrecken (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Lage des Feldes N05-A, einschließlich des geplanten Standorts der Plattform und der von diesem Standort aus zu erschließenden prospects.

Dieses Gasförderprojekt umfasst die Installation einer temporären Bohrplattform und einer Förderplattform auf dem Meeresboden sowie Steinschüttungen rundum die Verankerungspfeiler der Bohr- und Förderplattform.

Das Ziel dieser Studie ist es, die lokalen morphologischen Auswirkungen des Gasförderprojekts vorherzusagen. Dabei spielen die lokalen Einflüsse der Bohrplattform, der Förderplattform, der Steinschüttung und des ausgetragenen Bohrschutts auf die Strömung und den Sedimenttransport eine wichtige Rolle.

Dieses Dokument beschreibt und prognostiziert die morphologischen Auswirkungen der Plattform, der Steinschüttung und des Bohrschutts. Darüber hinaus wird vorhergesagt, wie der Bohrschutt auf den Meeresboden absinkt, wo er landet und wie er unter dem Einfluss von Strömungen und Wellen über den Meeresboden bewegt und verteilt wird.

In dem UVR werden verschiedene Varianten betrachtet. Bei einer der Varianten werden während der Bohrphase Bohrschutt und Bohrschlamm auf Wasserbasis ins Meer eingeleitet. Dies ist die Variante **"Ableiten von Bohrschutt und Schlamm"**. In einer anderen Variante wird Bohrschutt und Schlamm auf Wasserbasis per Schiff zu einem Aufbereitungsort an Land transportiert. Dies ist die Variante **"Abtransport von Bohrschutt und Schlamm"**. Die vorliegende Studie befasst sich mit der Sedimentation, die bei der Variante durch das Ableiten des Bohrschutts und des Bohrschlammes auf Wasserbasis entsteht.

Bei der Variante **"Abtransport von Bohrschutt und Bohrschlamm"** ist die Sedimentation nicht relevant. Diese Variante wird daher nicht weiter betrachtet. Die anderen Varianten haben keinen Einfluss auf die morphologischen Effekte und werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für die Variante **"Ableiten von Bohrschutt und Bohrschlamm"** wurde die Ausbreitung und Sedimentation des feinkörnigen Schwerspat und Bentonit aus dem Bohrschlamm in einer separaten Ausbreitungsstudie ermittelt (Anhang M3 von Teil 2: Umweltauswirkungen).

1.2 Methodik

Die Vorhersagen der morphologischen Auswirkungen in diesem Dokument beruhen auf verschiedenen früheren Studien, konzeptionellen Modellen und vereinfachten Berechnungen.

1.3 Anleitung zum Lesen

Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten natürlichen Prozesse und Eigenschaften des natürlichen Sediments am Meeresboden. Kapitel 3 beschreibt die nicht-natürlichen Elemente, d.h. die Plattform, die Steinschüttung und das Ableiten von Bohrschutt. In Kapitel 3 werden auch die lokalen morphologischen Auswirkungen der Plattform und der Steinschüttung sowie das Absinken und die Sedimentation des Bohrschutts beurteilt.

Kapitel 4 enthält die wichtigsten Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

2 Beschreibung heutige Situation

2.1 Einführung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Eigenschaften des Meeresbodens an der Bohr- und Förderplattform zusammengefasst. Darüber hinaus wird ein kurzer Überblick über die Wellen- und Strömungsverhältnisse gegeben, da diese Prozesse den Sedimenttransport steuern und das Absinken von Bohrschutt beeinflussen.

2.2 Strömungs- und Wellenbedingungen

2.2.1 Strömung

Die Strömungs- und Wellenbedingungen sind im Bericht der Ausbreitungsstudie (Anhang M3 in Teil 2: Umweltauswirkungen) und im Bericht der Entwurfbedingungen (Fugro, 2019) **Error! Bookmark not defined.** beschrieben.

Die Gezeiten sind ein wichtiger Antriebsmechanismus für die Strömung. Der Höhenunterschied zwischen Ebbe und Flut beträgt etwa drei Meter. Der Gezeitenstrom dreht sich alle sechs Stunden, von Ebbe zu Flut und umgekehrt. Durch die großräumige Zirkulation der Nordsee ist die Flutströmung in Richtung Osten etwas stärker als die Ebbströmung in Richtung Westen.

In Küstennähe gibt es auch einen gezeitenbedingten Zu- und Abfluss zwischen den Watteninseln, der im südlichen Teil der Pipelinetrasse eine Rolle spielen könnte. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten infolge der Gezeiten liegen hier in der Größenordnung von zwei bis drei Metern pro Sekunde. Der Nettoabfluss aus dem Ems-Ästuar als Folge des Abflusses aus der Ems ist vernachlässigbar.

Hinzu kommt die Strömung durch den Wind. Die Windrose in der Nähe des Huibertgat, einem Messstandort in der Nordsee in der Nähe der Rottumerplaat (Abbildung 2) zeigt, dass der dominierende Wind aus Südwest kommt, was den Windverhältnissen in der Nähe der Bohrinself entspricht. Wind aus Südwest verstärkt die flutgetriebene Strömung und hemmt die ebbgetriebene Strömung.

Die Kombination aus Gezeiten und Wind sorgt für tägliche Spitzenfließgeschwindigkeiten von ca. 0,6 m/s nahe der Wasseroberfläche, ca. 0,5 m/s in der Mitte der Wassersäule und ca. 0,35 m/s in der Nähe des Meeresbodens am Standort der Plattform (Anhang M3 in Teil 2: Umweltauswirkungen). Die täglichen Strömungsgeschwindigkeiten auf Basis der Modellierung (Fugro, 2019) liegen in der gleichen Größenordnung.

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit, die etwa einmal pro Jahr auftritt, die 1/Jahres-Strömungsgeschwindigkeit, liegt in der Größenordnung von maximal 1 m/s in der Nähe der Wasseroberfläche, maximal 0,9 m/s in der Mitte der Wassersäule und maximal 0,74 m/s in der Nähe des Meeresbodens, basierend auf der Vor-Ort-Modellierung² des Plattformstandorts.

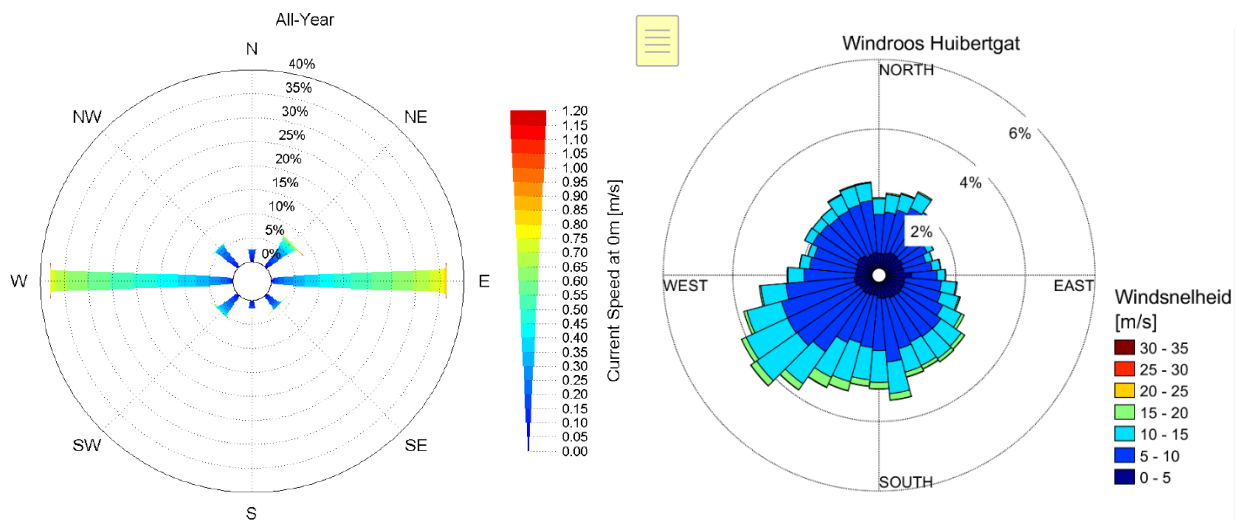


Abbildung 23: Jahresströmungsrose in der Nähe des Plattformstandorts (links) und Jahreswindrose in der Nähe von Huibertgat (rechts)

2.2.2 Wellen

Die Wellenhöhe im Zeitraum 2005-2017 variierte von etwa einem Meter bis über acht Meter (Abbildung 3), mit Wellenperioden von bis zu mehr als fünfzehn Sekunden. Meistens erreichen die Wellen den Standort der Plattform von Westen bzw. Norden (Abbildung 4), haben eine Wellenhöhe von 0,5 bis zwei Metern und eine Spitzenperiode von zwei bis zehn Sekunden (Abbildung 5).

Die Auswirkung der Wellen auf den Sedimenttransport und die Morphologie hängt auch von der Wassertiefe ab: Je größer die Wassertiefe, desto weniger Strömung verursachen die Wellen in der Nähe des Meeresbodens (Abbildung 6). Auch die Wellenlänge spielt eine Rolle: Je länger die Wellen sind, desto tiefer wirken sie sich aus. Bei einer Wassertiefe, die größer ist als die halbe Wellenlänge, ist eine Welle am Meeresboden nicht mehr spürbar. In der Wassertiefe von 26 m am Standort der Plattform ist dies eine Wellenlänge von 52 m, das bedeutet eine Welle mit einer Wellenlängenperiode: $[\text{Wellenlänge} / 1,56]^{0,5} =$ sechs Sekunden. Wellen mit einer Wellenperiode von mehr als sechs Sekunden haben daher Auswirkungen auf den Transport von Sediment und Bohrschutt auf dem Meeresboden am Standort der Plattform. Während beinahe der Hälfte der Zeit ist die Spitzenwellenperiode am Standort der Plattform größer als sechs Sekunden (Abbildung 5), ein Teil der Wellen wirkt sich daher auf den Transport von Sediment und Bohrschutt am Meeresboden aus.

Es wird erwartet, dass die Wellen im flacheren südlichen Teil der Pipelinetrasse eine dominantere Rolle spielen.

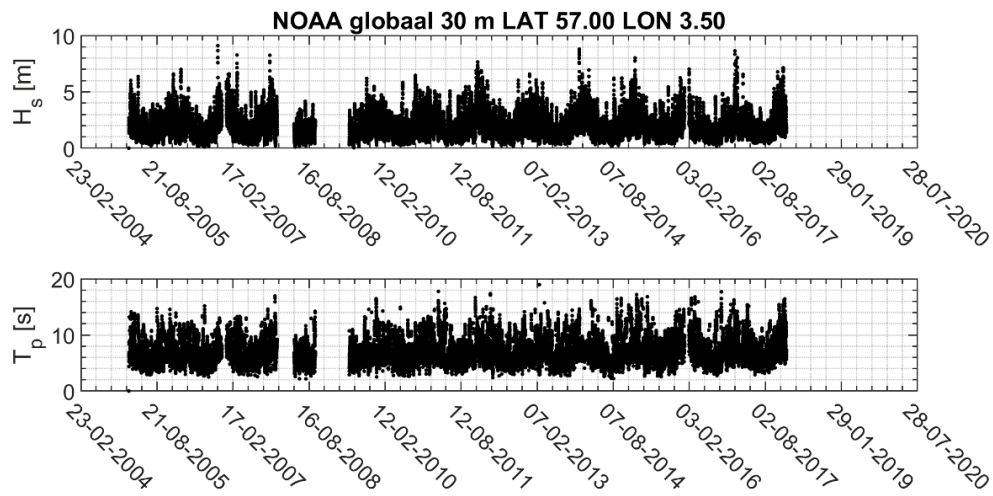


Abbildung 45: Wellenbedingungen in der Nähe des Plattformstandorts

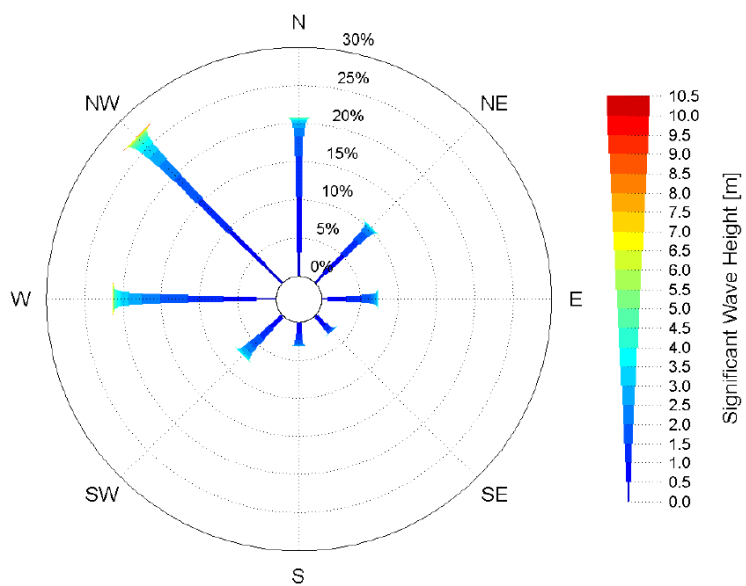


Abbildung 67: Jährliche Wellenhöhe am Standort der Plattform (Fugro, 2019)

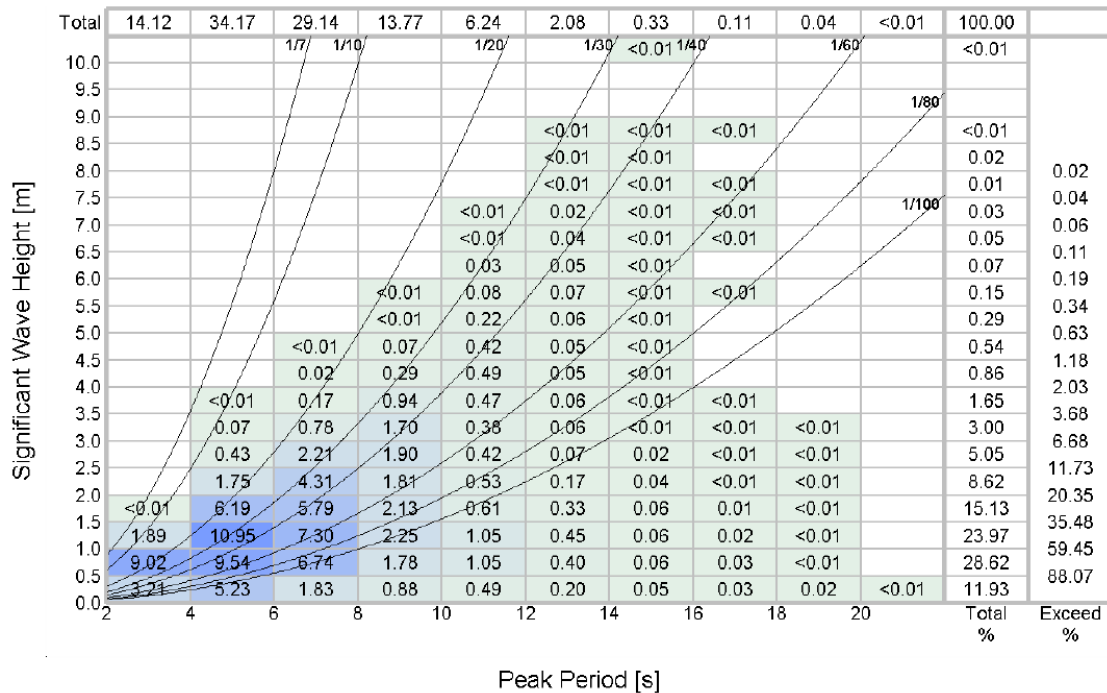


Abbildung 89: Jährliche Wellenhöhe und Wellenperiode am Standort der Plattform (Fugro, 2019)

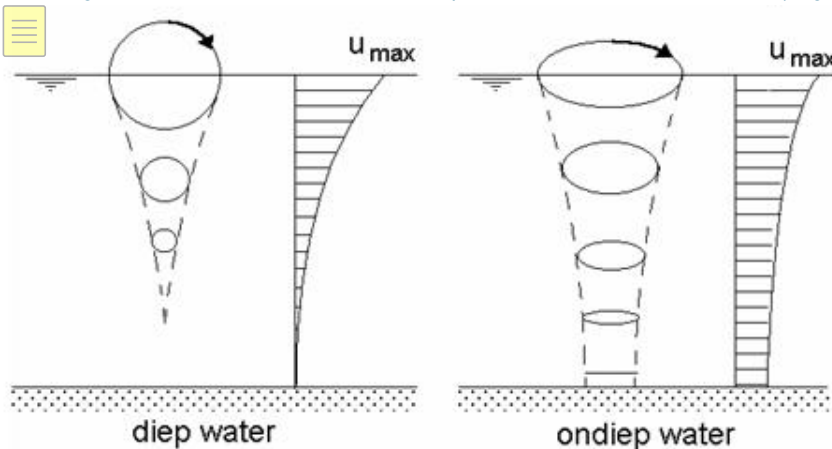


Abbildung 1011: Prinzip des Einflusses der Wassertiefe auf die wellengetriebene Strömung am Meeresboden, links tiefes, rechts untiefes Wasser

2.2.3 Sedimenteigenschaften

Das Forschungsbüro GEOxyz beschreibt den Meeresboden und die Eigenschaften des Sediments an der Oberfläche am Standort der Plattform (GEOxyz, 2019): Der Meeresboden am Standort der (Bohr-)Plattform besteht aus feinem Sand mit Muschelresten (Abbildung 7). Dieser Sand hat Korndurchmesser in der Größenordnung von zweihundert Mikrometern (200 μm oder 0,2 mm). Außerdem befinden sich dort Tonbrocken, die bis zu fünfzig Zentimeter über den Rest des Meeresbodens herausragen. Das örtliche Auftreten von grobem Sand und Kies führt auch zu Höhenschwankungen des Meeresbodens an der Plattform. Im Übrigen ist der Meeresboden am Standort der Plattform praktisch flach, ohne deutliche Wellen- und Strömungsrippel, Dünen oder größere Reliefformen.

Das Fehlen von Wellen- und Strömungsrippeln auf dem sandigen Meeresboden ist ein Hinweis darauf, dass es wenig Sedimenttransport gibt und der lokale Meeresboden daher nicht sehr dynamisch ist. Sandkörner von zweihundert Mikrometern beginnen sich bei einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 0,2 m/s zu bewegen. Da in der Mitte der Wassersäule bereits unter alltäglichen Bedingungen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu ca. 0,5 m/s auftreten, ist das natürliche Sediment bei der Plattform zumindest während eines Teils des Gezeitenzyklus in Bewegung. Wellen mit einer Wellenperiode von mehr als sechs Sekunden tragen ebenfalls dazu bei, dass sich das Sediment in Bewegung setzt. Beim Gezeitenwechsel sinkt dieses Sediment zurück auf den Meeresboden und bleibt, je nach Wellenbedingungen, für einige Stunden dort liegen, bis die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Meeresbodens wieder ca. 0,2 m/s überschreitet. Der feinere Teil des natürlichen Sediments am Meeresboden ist mobiler als der gröbere Teil des Sediments und wird daher häufiger und über größere Entfernungen transportiert.



Abbildung 1213: Foto des Meeresbodens an der Bohrplattform, ohne deutliches Relief wie Wellen- und Strömungsrippel.

3 Lokale morphologische Effekte

3.1 Einführung

In diesem Kapitel wird eine Vorhersage der lokalen morphologischen Auswirkungen der Bohrplattform, der Förderplattform und der Bohraktivitäten gemacht. Die Frage ist, wie die Plattformen und die Bohraktivitäten die Morphologie des natürlichen Meeresbodens durch zusätzliche Erosion und Sedimentation um die Bohrplattform und die Förderplattform herum beeinflussen.

Für die lokalen morphologischen Effekte sind drei Elemente relevant, die in Abschnitt 3.2 näher beschrieben werden:

- 1 Die Plattform, deren Pfeiler und conductors für die Morphologie am relevantesten sind:
 - 1.1 Temporäre Bohrplattform und Förderplattform während der Bohrphase;
 - 1.2 Förderplattform während der Förderphase.
- 2 Steinschüttung rundum die Pfeiler der Plattformen zum Schutz vor Kolken;
- 3 Ableiten von Bohrschutt während der Bohrphase.

Basierend auf dieser Beschreibung werden in Abschnitt 3.3 die erwarteten morphologischen Effekte pro Element beschrieben.

3.2 Beschreibung

3.2.1 Plattform

Während der Bohr- und Bauphase besteht die Plattform aus einer temporären Bohrplattform und der Förderplattform (Abbildung 8). Anschließend wird die temporäre Bohrplattform entfernt und die Förderplattform bleibt an ihrem Platz. Es ist auch möglich, dass die ersten Bohrungen vor der Installation der Förderplattform durchgeführt werden.



Abbildung 1415: Abbildung der Plattform während der Bohr- und Bauphase mit temporärer Bohrplattform (links) und der Plattform während der Förderphase mit nur der Förderplattform (rechts).

Die temporäre Bohrplattform hat drei Pfeiler mit einer Fläche von jeweils etwa zweihundertfünfzig Quadratmetern. Beim Aufstellen der Bohrplattform wird die schwimmende Bohrplattform an die richtige Stelle gebracht, mit temporären Ankern gesichert und dann werden die drei Pfeiler abgesenkt, bis sie den Meeresboden erreichen. Dann werden die Anker entfernt und die Bohrplattform wird auf die gewünschte Höhe aufgebockt.

Die Förderplattform hat sechs Pfeiler mit Querverbindungen, um die Konstruktion zu verstärken. Jeder der sechs Pfeiler ist mit Stahlrammpfeilern am Meeresboden befestigt. Diese Rammpfeiler haben einen Durchmesser von drei Metern. Zwischen den sechs Pfeilern verlaufen eine Reihe von conductors, in denen sich die Bohrlöcher befinden. Diese conductors haben einen Durchmesser von 75 cm. Die Abbildung 9 zeigt den Aufbau der Förderplattform, die orangefarbene Schattierung zeigt den Teil, der Unterwasser liegt. Dieser Teil der Konstruktion beeinflusst die Strömung, die Wellen, den Sedimenttransport und die Morphologie. Wichtig ist hier die geringe freie Fließfläche zwischen den Pfeilern, das dicke Fundament der Pfeiler und das Vorhandensein von Querverbindungen in Bodennähe.

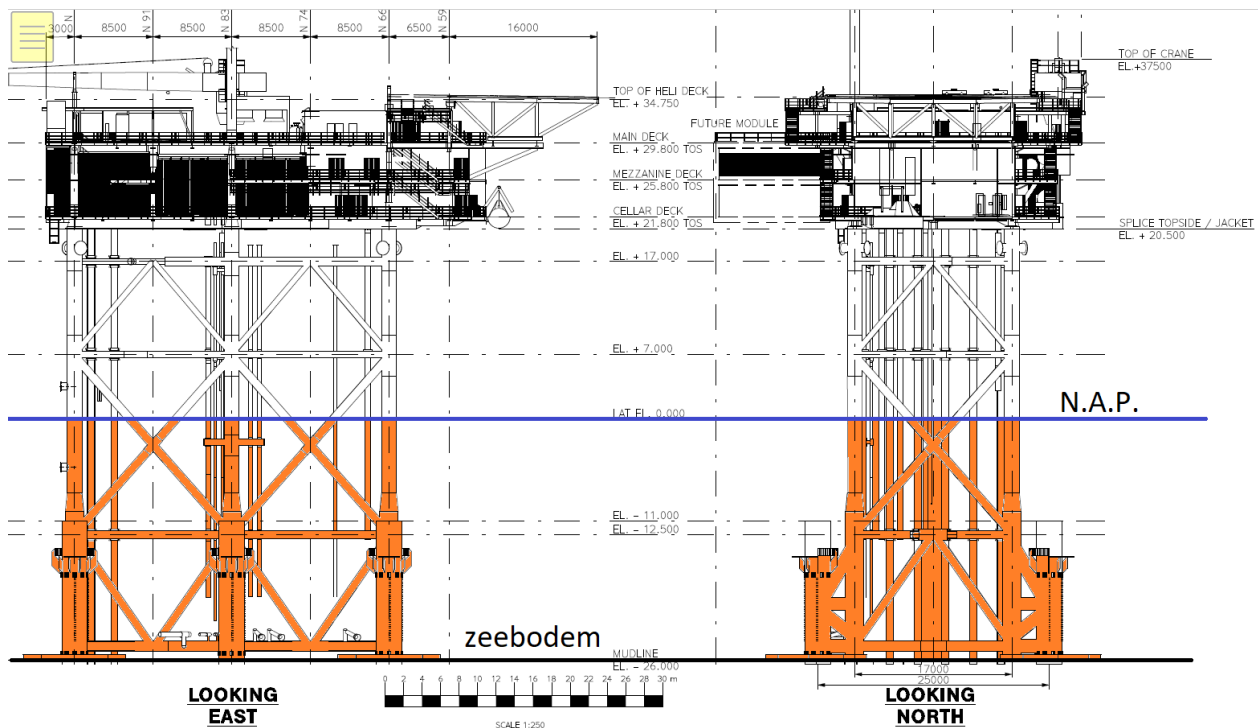


Abbildung 1617: Vorder- und Seitenansicht der Förderplattform und darin in Orange der Unterwasser liegende Teil

3.2.2 Steinschüttung

Es findet Steinschüttung an der Förderstätte statt, um Erosion rundum die Pfeiler der Bohrplattform und der Förderplattform zu verhindern.

Die Beschreibung der Steinschüttung an der Bohrplattform basiert auf dem Entwurf und den Messungen von Tideway (Tideway, 2017), die die Steinschüttung für die Pfeiler einer ähnlichen Bohranlage und die Methodik zur Konstruktion dieser Steinschüttung beschreibt. Gemäß des Entwurfs von Tideway besteht die Steinschüttung aus Steinen mit einer Körnung von einem bis drei Zoll. Diese Steine sind so groß, dass sie von der Strömung und / oder den Wellen nicht oder kaum bewegt werden.

Für jeden Pfeiler der Bohrplattform ist eine Steinschüttung von sechshundert Tonnen vorgesehen, d.h. insgesamt achtzehnhundert Tonnen für die Bohrplattform. Dies entspricht einem Volumen von mehr als vierhundert Kubikmetern pro Pfeiler, oder mehr als zwölfhundert Kubikmetern insgesamt. Die Steinablage befindet sich hauptsächlich an den Außenseiten der drei Pfeiler (Abbildung 10). Die Schichtdicke der Steinschüttung beträgt fünfzig bis achtzig Zentimeter, woraus sich eine Fläche in der Größenordnung von sechshundert Kubikmetern pro Pfeiler bzw. in der Größenordnung von achtzehnhundert Kubikmetern insgesamt für die Bohrplattform ergibt.

Die Steinschüttung rundum die Förderplattform ist in Abbildung 11 dargestellt. Um die sechs Pfeiler herum wird eine 3,5 m breite Schicht Steinschüttung verlegt, was einer Gesamtfläche von mehr als zweitausend Quadratmetern entspricht. Außerdem wird Steinschüttung entlang der ersten Abschnitte der Pipeline und des Stromkabels verlegt. Sie wird ca. 10 m breit und 73 m lang sein und eine Fläche von 730 m² für die Pipeline einnehmen. Mit einer Länge von etwa fünfzig Metern hat die Steinschüttung für das Stromkabel eine Fläche von fünfhundert Quadratmetern.

Wichtig für die Vorhersage der morphologischen Auswirkungen in der Nähe der Bohrplattform und der Förderplattform ist, dass die Steinschüttung lokal ist und dass keine Steinschüttung zwischen den Pfeilern angelegt wird.

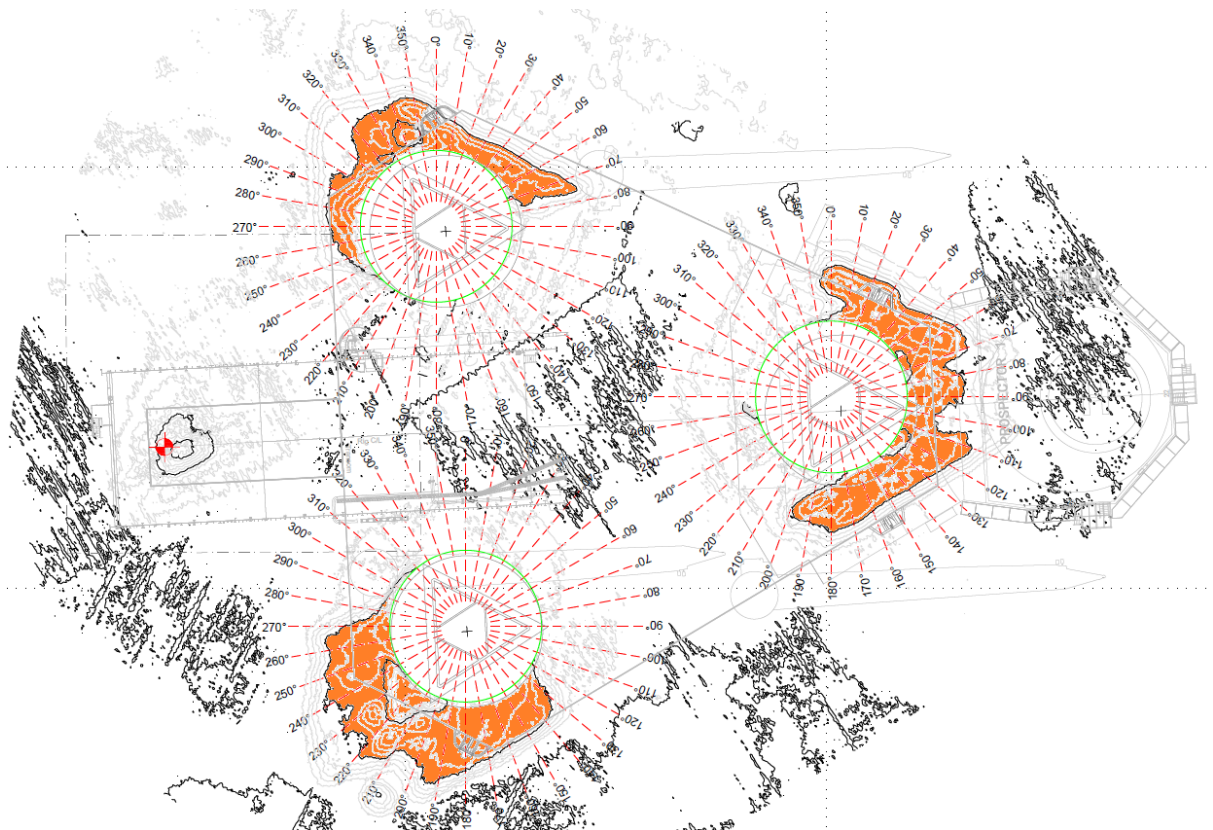


Abbildung 1819: Indikationen der Standorte der Steinschüttung (orange) an den Pfeilern der Bohrplattform (Tideway, 2017)

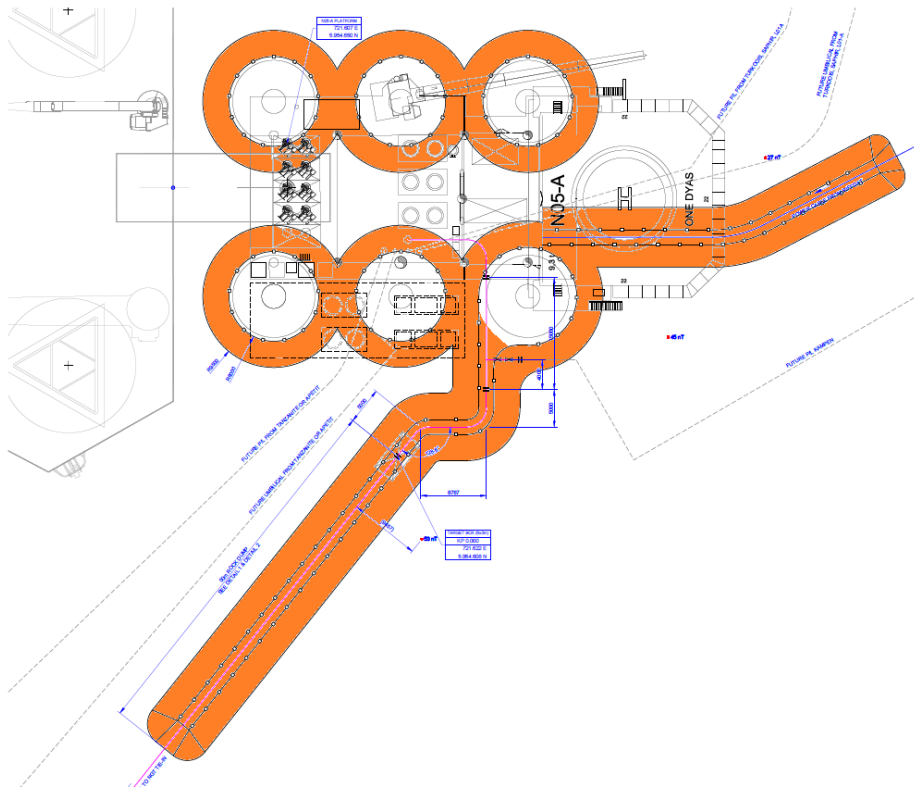


Abbildung 2021: Entwurf der Steinschüttung (orange) an den Pfeilern der Förderplattform und entlang der ersten Teile der Pipeline und des Stromkabels

3.2.3 Ableiten von Bohrschutt

Beim Bohren werden bei der Variante **"Ableiten von Bohrschutt und Bohrschlamm"** Bohrschutt und Bohrschlamm auf Wasserbasis ins Meer abgeleitet. Bei der Variante **"Abtransport von Bohrschutt und Bohrschlamm"** werden Bohrschutt und Bohrschlamm auf Wasserbasis abtransportiert. Ölhaltiger Bohrschutt und Bohrschlamm werden immer abtransportiert.

Die Gesamtmenge des zu entsorgenden Bohrschutts beträgt 664 m³, verteilt auf vier Bohrabschnitte. Die Menge des zu entsorgenden Bohrschutts und die Dauer wurde für eine durchschnittliche Bohrung bei N05-A berechnet und variiert pro Bohrungsabschnitt:

- 205 Tonnen an einem Tag für Abschnitt 1;
- 484 Tonnen in eineinhalb Tagen für Abschnitt 2;
- 492 Tonnen in viereinhalb Tagen für Abschnitt 3;
- 545 Tonnen in acht Tagen für Abschnitt 4;
- und für Abschnitt 5 wird der Bohrschutt ohnehin abtransportiert.

Die Gesamtmenge des zu entsorgenden Bohrschutts beträgt daher ca. 1725 Tonnen. Bei einer Dichte von 2650 kg/m³ für das Gestein und 40 % Poren im auf dem Meeresboden abgelagerten Bohrschutt beträgt die Gesamtmenge des zu entsorgenden Bohrschutts ca. 1100 m³. In der Realität variiert die Dichte pro Gesteinsschicht und die Porosität des abgelagerten Bohrschutts ist ebenfalls variabel, so dass die tatsächlichen Mengen variieren können.

Die Korngrößenverteilung des abgeleiteten Bohrschutts ist unsicher und variiert mit der Tiefe. Die Bohrdaten einer Erkundungsbohrung zeigen, dass der oberste Teil bis zu einer Tiefe von etwa 380 Metern aus lockerem Sand besteht. Darunter befindet sich festes Gestein. Die Korngrößenverteilung des Bohrschutts aus dem Festgestein ist je nach Gesteinsschicht unterschiedlich. Zum Beispiel sind die Kalksteinschichten im oberen Kilometer weicher als die Kalksteinschichten, die tiefer als ein Kilometer liegen, was bedeutet, dass das Bohrschutt aus dem Kalkstein im oberen Kilometer voraussichtlich feiner ist als der Bohrschutt aus den tieferen Kalksteinschichten. Bohrschutt aus den Halit- und Anhydritschichten (in einer Tiefe von ca. 2.000 - 3.500 Metern) löst sich teilweise im Meer und im Bohrschlamm auf und wird daher nicht vollständig auf dem Meeresboden abgelagert.

Um die Ablagerung von Bohrschutt auf dem Meeresboden trotz der Unsicherheiten und Variationen in Gesteinsart und Korngröße abschätzen zu können, wird eine gewisse normale Korngrößenverteilung angenommen. Es wird geschätzt, dass eine Korngröße von ca. 1,25 mm am häufigsten vorkommt.

Es gibt verschiedene empirische Relationen zur Bestimmung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit, bei der sich der Bohrschutt in Bewegung setzt. Nach dem Hjulström-Diagramm (Abbildung 12) bewegt sich der Bohrschutt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,2 m/s für feinen Bohrschutt von 0,5 mm und bei ca. 0,5 m/s für zwei Millimeter großen Bohrschutt. Nach der Methode von Van Rijn³ bewegt sich feiner Bohrschutt erst bei 0,45 m/s und grober, zwei Millimeter großer Bohrschutt erst bei 0,85 m/s. Diese Methode berücksichtigt keine eventuellen Wellenbewegungen und Turbulenzen, die dazu führen könnten, dass sich der Bohrschutt bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in Bewegung setzt. Klar ist jedoch, dass grober Bohrschutt nur sehr begrenzt transportiert werden kann und dass feiner Bohrschutt nur um die Gezeitenspitzen herum bewegt werden kann.

Trotz der Unsicherheiten in der Korngrößenverteilung des Bohrschutts erscheint es plausibel, dass ein signifikanter Teil des Bohrschutts eine größere Korngröße aufweist als das natürliche Sediment (ca. 0,2 mm Durchmesser) auf dem Meeresboden an der Bohrplattform. Der Bohrschutt ist daher weniger mobil als das natürliche Sediment. Der Bohrschutt wird nur bei höheren Strömungen/Wellen und über kürzere Strecken transportiert.

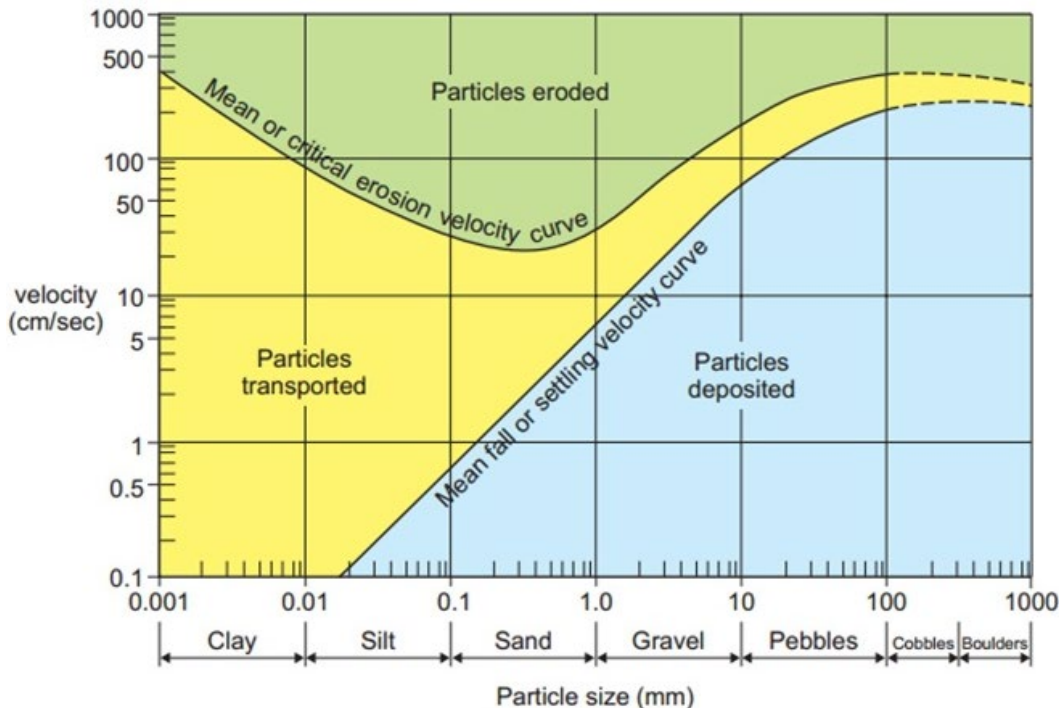


Abbildung 2223: Hjulström-Diagramm mit Schwellenwerten der Strömungsgeschwindigkeit für Erosion, Transport und Ablagerung von Sediment.

3.3 Erwartete morphologische Effekte

3.3.1 Bohrplattform, Förderplattform und Steinschüttung

Die Pfeiler der Bohrplattform und der Förderplattform bilden eine Teilblockade für die Strömung. Dies verursacht eine lokale Verlangsamung der Strömung an der stromaufwärtigen Seite jedes Pfeilers, eine Beschleunigung entlang jedes Pfeilers und Turbulenzen auf der stromabwärtigen Seite jedes Pfeilers. Je stromlinienförmiger und glatter die Pfeiler sind, desto geringer sind diese Effekte. Die Querverbindungen in der Konstruktion sorgen für zusätzlichen Widerstand und Turbulenzen.

Am Boden kann es durch die Strömungsverzögerung zu lokalen Sedimentationen kommen. Die Strömungsbeschleunigung und die stromabwärts gerichteten Turbulenzen verursachen jedoch Erosion: es bilden sich Kolken. Als Folge dieser Erosion ist die Sedimentation stromaufwärts oft gering oder gar nicht vorhanden.

Die Bildung von Kolken wird durch die Aufschüttung von Steinschüttung an den Pfeilern der Bohrplattform verhindert. Bei dieser Steinschüttung handelt es sich um grobes Material (siehe Abschnitt 3.2.2), die Steine sind so groß, dass sie auch unter widrigen Bedingungen, wie z. B. einem schweren Sturm in Kombination mit Gezeitenströmung, an ihrem Platz bleiben.

In Abschnitt 3.2.2 wird jedoch auch beschrieben, dass die Steinschüttung, zumindest bei der Bohrplattform, nur an den Außenseiten der Pfeiler erfolgt. Das bedeutet, dass die Innenseiten der Pfeiler ungeschützt sind, was hier je nach Strömungsrichtung zu Kolken führen kann.

Außerdem ist es wahrscheinlich, dass an den Rändern der Steinschüttung Erosion des Meeresbodens stattfindet. Das liegt daran, dass die Steinschüttung eine Art Deckschicht bildet, unter der sich das natürliche Sediment nicht bewegen kann. Außerdem bleibt hinter den groben Steinen der Steinschüttung natürliches Sediment hängen. Das sedimentarme Wasser an der Steinschüttung nimmt an den Rändern der Steinschüttung Sediment auf und verursacht dadurch lokal Erosionen. Durch die Erosion kann die Steinschüttung an den Rändern in die Erosionsgruben rollen. Diese Art von Erosionsgruben werden sich hauptsächlich im Südwesten und Nordosten des Bodenschutzes bilden, da dies die Richtung der Gezeitenströmung ist.

Nach der Bohrphase wird die Bohrplattform entfernt, nur die Förderplattform bleibt zurück. Es ist zu erwarten, dass die trotz des Bodenschutzes entstandenen Kolken durch natürliche Sedimentation innerhalb von wenigen Tagen bis Wochen aufgefüllt werden.

Die Steinschüttung ist rundum die sechs Pfeiler der Förderplattform vorgesehen (siehe Abschnitt 3.2.2). Daher sind hier keine großen Kolken als Folge hydrodynamischer Effekte der Pfeiler der Förderplattform zu erwarten. Genau wie bei der Bohrplattform könnte es jedoch an den Rändern der Steinschüttung der Förderplattform zu einer gewissen Erosion kommen, die weiter entfernt zu einer gewissen Sedimentation führt.

3.3.2 Bohrschutt

3.3.2.1 Absacken des Bohrschutts

Das Absacken des Bohrschutts nach dem Ableiten aus dem Austragsrohr ist ein wichtiger Prozess, bei dem verschiedene Faktoren eine Rolle spielen. Die Abbildung 13 zeigt schematisch den Vorgang des Absackens des Bohrschutts. Aus dem Austragsrohr sinkt der Bohrschutt mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Kurz darauf bestimmen Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung und Fallgeschwindigkeit, wo der Bohrschutt auf dem Meeresboden landet.

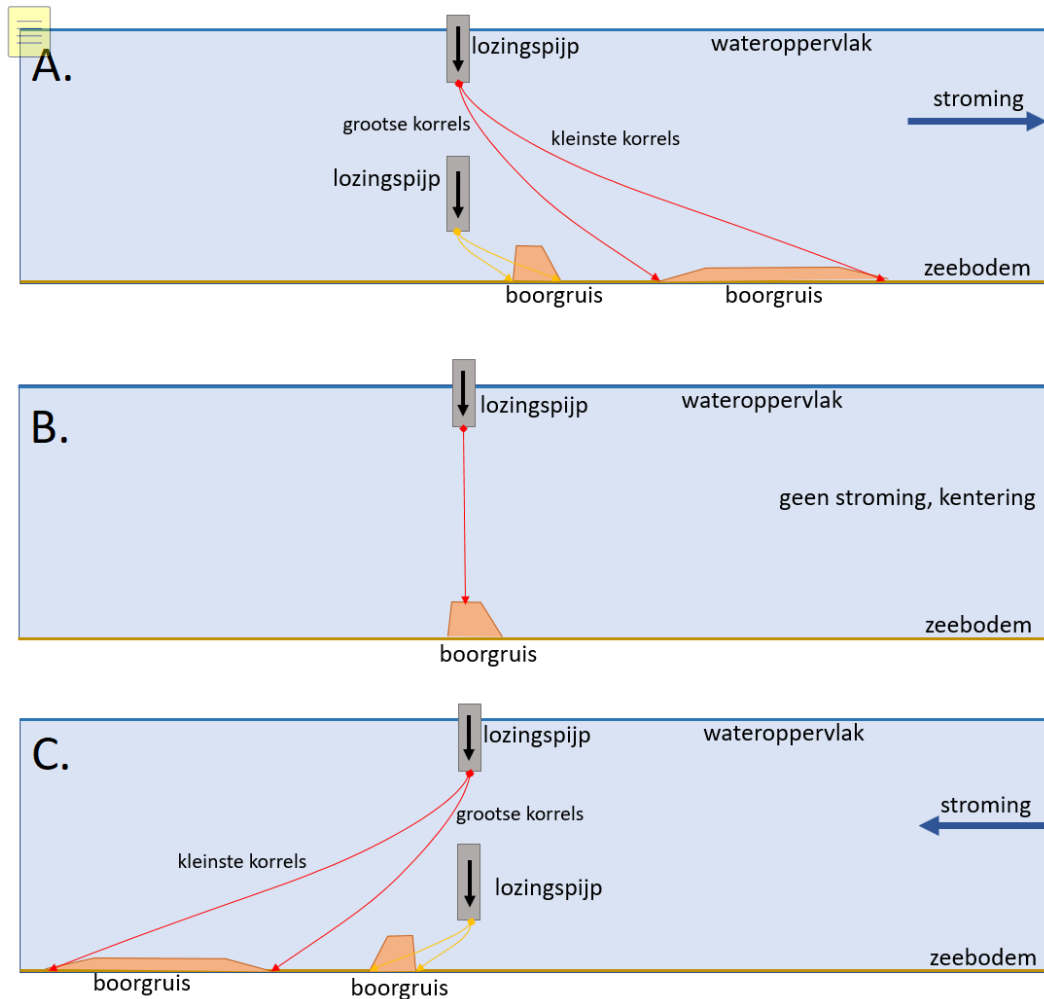


Abbildung 2425: Schematische Darstellung der Auswirkung der (Gezeiten-)Strömung und der Höhe des Austragsrohrs auf die Sedimentation von Bohrschutt, bei Strömung nach rechts (A), Gezeitenwechsel (B) und Strömung nach links (C).

Vereinfachte Berechnungen können einen Hinweis darauf geben, wo der Bohrschutt auf dem Meeresboden landet und wie dick die Ablagerung sein wird:

- Relativ kleine Körner (0,5 mm) haben eine geringe Fallgeschwindigkeit von etwa sieben cm/s. Größere Körner (2 mm) haben eine Fallgeschwindigkeit von etwa zwanzig cm/s. Wenn sich das Ende des Austragsrohrs zwanzig Meter über dem Meeresboden befindet, dauert es also durchschnittlich fast zwei Minuten, bis größere Körner den Boden erreichen, und fast fünf Minuten, bis die kleinen Körner den Boden erreichen.
- Für das Absacken des Bohrschutts ist es relevant, dass die Suspensionszahl Z sowohl für kleinen als auch für großen Bohrschutt größer als fünf ist, d. h. die Fallgeschwindigkeit ist so groß, dass die Fallgeschwindigkeit die turbulenten Strömungen überwindet, die den Bohrschutt in der Suspension halten können.
- Wenn sich das Austragsrohr näher am Meeresboden befindet, ist die Zeit, die die Körner brauchen, um den Boden zu erreichen, viel kürzer. In zehn Metern Höhe über dem Meeresboden dauert es beispielsweise 2,5 Minuten, bis die kleinen Körner den Meeresboden erreichen, und eine Minute für die größeren Körner.

- Der Ort, an dem der Bohrschutt den Meeresboden erreicht, hängt dann auch von der Strömungsgeschwindigkeit ab, siehe Tabelle 1, in der die Entfernung anhand der Höhe des Austragsrohrs, der Fallgeschwindigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit berechnet wurde. Bei Flut wird der Bohrschutt östlich des Plattformstandortes abgelagert, bei Ebbe westlich des Plattformstandortes. Zweimal am Tag gibt es Ebbe und zweimal am Tag gibt es Flut. Beim Gezeitenwechsel gibt es kaum Strömung und der ausgetragene Bohrschutt landet unter dem Austragsrohr (Abbildung 13).
- Angesichts der geschätzten Korngrößenverteilung des Bohrschutts und der variierenden Strömungsgeschwindigkeit während eines Ebbe-Flut-Zyklus wird erwartet, dass sich der größte Teil des Bohrschutts in einem Abstand von 55 Metern vom Austragsrohr ablageret (Abbildung 13). In einer Entfernung von über ca. hundert Metern wird kaum noch Bohrschutt abgelagert. Bei einer Entfernung von 55 Metern liegt die Sedimentationsgeschwindigkeit des Bohrschutts in der Größenordnung von 7,5 mm/Tag. Ohne Transport des Bohrschutts entspricht dies einer Schichtdicke von 23 cm nach dem Abteufen einer Bohrung, wobei eine Nord-Süd-Ausbreitung über fünfzig Meter und ein Gesamtaustrag von 1100 m³ Bohrschutt pro Bohrung angenommen wird. In einem Abstand von ca. 90 m vom Austragsrohr beträgt die Schichtdicke für eine Bohrung ca. 1,5 cm.
- Bei mehreren Bohrungen, entweder in Serie oder im Batch, muss die vorhergesagte Schichtdicke mit der Anzahl der Bohrungen multipliziert werden. Zwölf Bohrungen ergeben also ca. $12 \times 23 = 276$ cm Bohrschuttablagerung. Bei zwölf Bohrungen wird eine Schichtdicke von 1,5 cm in einer Entfernung von ca. 105 Metern vom Austragsrohr erreicht. In der Praxis wird die Bohrschuttschicht während und nach der Bohrperiode (etwa drei Jahre für zwölf Bohrungen) aufgrund der Ausbreitung des Bohrschutts bei Stürmen, der teilweisen Auflösung des Bohrschutts aus den Salzschichten, der Variation der Korngröße und der Neigungseffekte dünner sein.
- Im nächsten Kapitel wird der Transport des Bohrschutts abgeschätzt, wodurch der Bohrschutt auf eine größere Fläche verteilt wird und somit dünner wird. Der feine Teil des Bohrschutts wird mehr und schneller verteilt als der grobe Anteil, was bedeutet, dass die Schichtdicke entlang der Außenseite des Bohrschutts (in einem Abstand von ca. 100 Metern vom Austragsrohr), an der der feinere Bohrschutt abgelagert wurde, schnell dünner wird.
- Wellen erzeugen vertikale und horizontale Zirkulationen, wodurch das Absacken des Bohrschutts einem komplexeren Muster folgt als oben beschrieben. Am Standort der Plattform sorgen die Wellen jedoch nicht für einen Nettotransport in eine bestimmte Richtung.
- Auch windgetriebene Strömungen machen das Absacken des Bohrschutts komplexer. Wenn sich der Wind in die gleiche Richtung wie die Gezeiten bewegt, erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten und der Bohrschutt landet in einer größeren Entfernung vom Austragsrohr. Ein Beispiel: Extreme Windverhältnisse können einen Anstieg von einigen zehn cm/s bis zu etwa 0,9 m/s in der 1/Jahr-Kondition verursachen². Bei diesen Strömungsgeschwindigkeiten landet der Bohrschutt in über 92 bis 253 Metern Entfernung vom Austragsrohr.

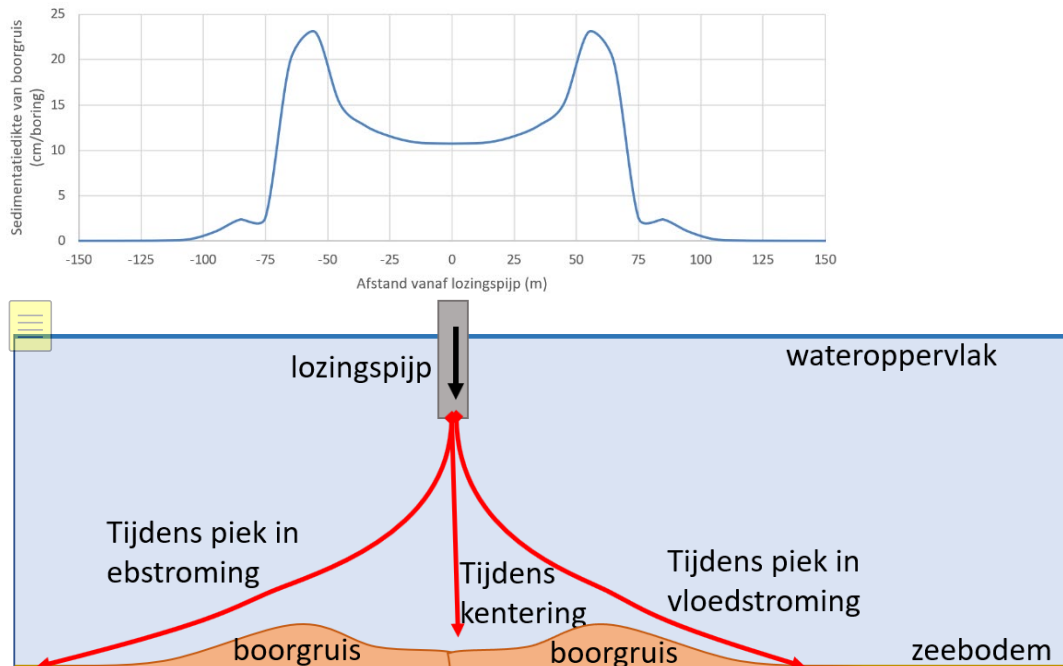


Abbildung 26: Berechnete Schichtdicke des Bohrschutts bei einer Bohrung und einer Austragsrohrhöhe von 20 Metern (oben) in Abhängigkeit von der Entfernung zum Austragsrohr und schematische Darstellung der räumlichen Verteilung der Bohrschuttablagerung über einen Ebbe-Flut-Zyklus (unten).

Tabelle 12: Beispiele für die berechnete Entfernung, in der der Bohrschutt auf dem Meeresboden landet, in Metern vom Ende des Austragsrohrs. Die Richtung, in der der Abstand gilt, ist abhängig von Ebbe oder Flut.

Korrelgrootte (mm)	Hoogte van lozingspijp (m boven zeebodem)	Stroomsnelheid (m/s)	Afstand vanaf lozingspijp (m)
0,5	20	0.5	141
1	20	0.5	79
2	20	0.5	51
0,5	10	0.5	70
1	10	0.5	40
2	10	0.5	26
0,5	20	0.9	253
1	20	0.9	142
2	20	0.9	92
0,5	20	0.1	28
1	20	0.1	16
2	20	0.1	10

In einer früheren Studie für eine ähnliche Bohrplattform wurde die Sedimentationsdicke des Bohrschutts auf der Grundlage von Modellrechnungen⁴ vorhergesagt. Dort wurde eine maximale Schichtdicke von 22 cm Bohrschutt für eine einzelne Bohrung vorausgesagt. Die maximale Schichtdicke in einer Entfernung von vierhundert Metern betrug 6,5 mm, wobei der Bohrschutt durch die Gezeitenströmung hauptsächlich in östlicher und westlicher Richtung verteilt wurde.

In den Berechnungen und in früheren Studien wurde der Einfluss der Bohrplattform und der Förderplattform auf die lokale Strömung nicht berücksichtigt. Wie in Abschnitt 3.3.1 erläutert, ist es plausibel, dass die Pfeiler der beiden Plattformen die Gezeitenströmung teilweise blockieren und zusätzliche Turbulenzen

verursachen. Je nach Position des Austragsrohrs zu den Pfeilern der Plattformen und der Strömungsrichtung wird der Bohrschutt in unterschiedlicher Entfernung vom Austragsrohr abgelagert. Da die vorherrschende Gezeitenrichtung nach Osten und Westen verläuft (Abbildung 2), ist es plausibel, dass die (Pfeiler der) Plattformen die Gezeitenströmung entlang der Nord- und Südseite beschleunigen, während die Strömung auf der Ost- und Westseite verlangsamt wird. Um die Verteilung (und die dünnere Sedimentationsschicht) des Bohrschutts zu maximieren, sollte das Austragsrohr daher auf der Nord- oder Südseite der Bohrplattform platziert werden.

3.3.2.2 Transport von Bohrschutt über den Meeresboden

Sobald der Bohrschutt auf dem Meeresboden liegt, bestimmen die Korngröße und die Strömung, ob und wie schnell der Bohrschutt weiterbewegt wird. Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, ist der Bohrschutt mit einem typischen Korndurchmesser von etwa 0,5 - 2 mm deutlich gröber als das natürliche Sediment am Bohrstandort. Dadurch ist der Bohrschutt nicht so mobil wie das natürlich vorhandene Sediment.

Es erscheint plausibel, dass fast nur der feine Anteil des Bohrschutts um die täglichen Spitzen von Ebbe und Flut herum mobil ist, angesichts:

- 4 den täglichen Spitzen im Tiefenmittel der Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,5 m/s;
- 5 der minimale Wellenperiode von sechs Sekunden, die eine Auswirkung auf den Meeresboden ausübt, was etwa in der Hälfte der Zeit der Fall ist;
- 6 der kritischen Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,2 - 0,45 m/s für den feinen Bohrschutt;
- 7 der kritischen Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,5 - 0,85 m/s für den groben Bohrschutt.

Der grobe Teil des Bohrschutts ist unter normalen Bedingungen nicht mobil, und zwischen den Spitzen ist der Bohrschutt überhaupt nicht mobil.

Eine Berechnung des Transports des Bohrschutts (mit der Soulsby - Van Rijn Sedimenttransportvorhersage⁵) gibt einen Hinweis darauf, wie viel des ausgetragenen Bohrschutts nach dem Absinken auf dem Meeresboden weiter transportiert wird. Während des Bohrens und des Ableitens werden je nach Bohrschnitt 68 - 322 Tonnen/Tag Bohrschutt entleert. Unter täglichen Bedingungen wie einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s, einer Wellenhöhe von einem Meter und einer Wellenperiode von sechs Sekunden werden weniger als 0,1 % der täglichen Abtragmenge transportiert. Das bedeutet, dass jeden Tag 99,9 % des ausgetragenen Bohrschutts dort verbleiben, wo er auf dem Meeresboden auftritt. Unter extremen Bedingungen, die etwa einmal im Jahr auftreten (durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit in der Tiefe von 0,9 m/s, Wellenhöhe von 5,5 Metern und Wellenperiode von vierzehn Sekunden), beträgt der tägliche Transport ca. 160 - 350 Tonnen/Tag, d.h. in der gleichen Größenordnung wie die täglich ausgefragene Menge an Bohrschutt. Das bedeutet, dass bei extremen Bedingungen nur ein Bruchteil des gesamten ausgetragenen Bohrschutts bewegt wird.

Anhand dieser Berechnungen lässt sich vorhersagen, dass es mindestens Wochen, wahrscheinlicher aber Monate bis Jahre dauern wird, bis der Bohrschutt vom Standort der Plattform aus über ein großes Gebiet in der Nordsee verteilt ist. Dies hängt auch von den Wetter- und Strömungsverhältnissen ab. Die in Abschnitt 3.3.2.1 für eine einzelne Bohrung berechnete Bohrschuttschichtdicke, multipliziert mit der Anzahl der Bohrungen (Serie oder Charge macht keinen großen Unterschied), ist eine konservative Worst-Case-Berechnung, da bei mehreren Bohrungen auch die Bohrzeit länger wird. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass während der Bohrperiode mehrere Stürme auftreten. Außerdem hat der Bohrschutt aus den Salzsichten längere Zeit, um sich im Meerwasser aufzulösen.

In den Monaten und Jahren nach der Bohrung breiten sich sowohl der feine als auch der grobe Teil des Bohrschutts allmählich aus. Der grobe Teil des Bohrschutts wird nur über eine kleine Fläche bewegt und verteilt, der feine Teil des Bohrschutts wird über eine größere Fläche bewegt und verteilt (Abbildung 15). Eine automatische Folge dieser Ausbreitung ist, dass die Bohrschuttschicht immer dünner wird. Dieser Vorgang ist in Abbildung 16 dargestellt. Das Gesamtvolumen des Bohrschutts auf dem Meeresboden bleibt unverändert, es sei denn, es wird z. B. durch Sandabbau entfernt.

Die Abbildung 17 gibt einen Hinweis auf die Verteilung des Bohrschutts nach einigen Jahren, wobei das Gesamtvolumen des Bohrschutts gleich bleibt. Die Dicke der Bohrschuttschicht nimmt ab, aber die Oberfläche nimmt zu. Dieses indikative Beispiel geht von einer mehr oder weniger identischen Verteilung in beide Richtungen und einer Breite von einhundert Metern aus. In diesem Beispiel wird der Schwellenwert von eineinhalb Zentimetern Schichtdicke in einer Entfernung von etwa dreihundert Metern vom Austragsrohr überschritten, was zu einer Gesamtfläche von fast fünf Hektar führt, in der die eineinhalb Zentimeter Schichtdicke überschritten wird.

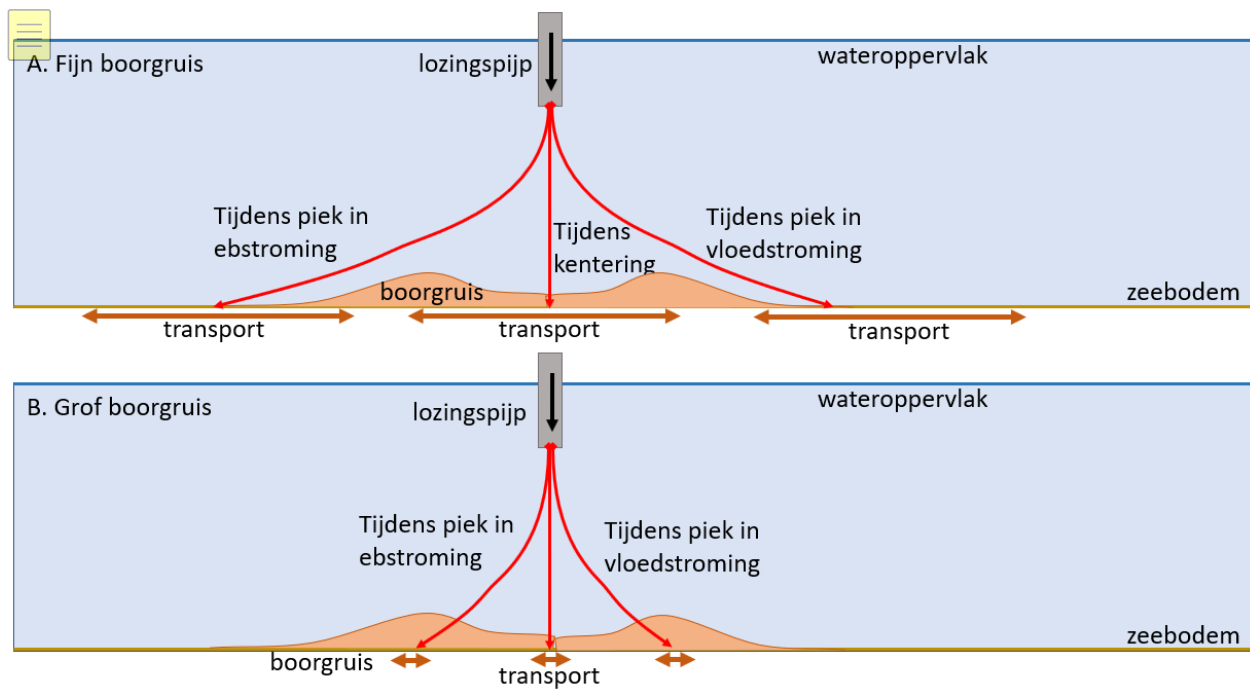


Abbildung 2728: Schematische Darstellung des Transports von Bohrschutt, sobald es sich auf dem Meeresboden absetzt: für den feinen Teil des Bohrschutts (A) und für den groben Teil des Bohrschutts (B).

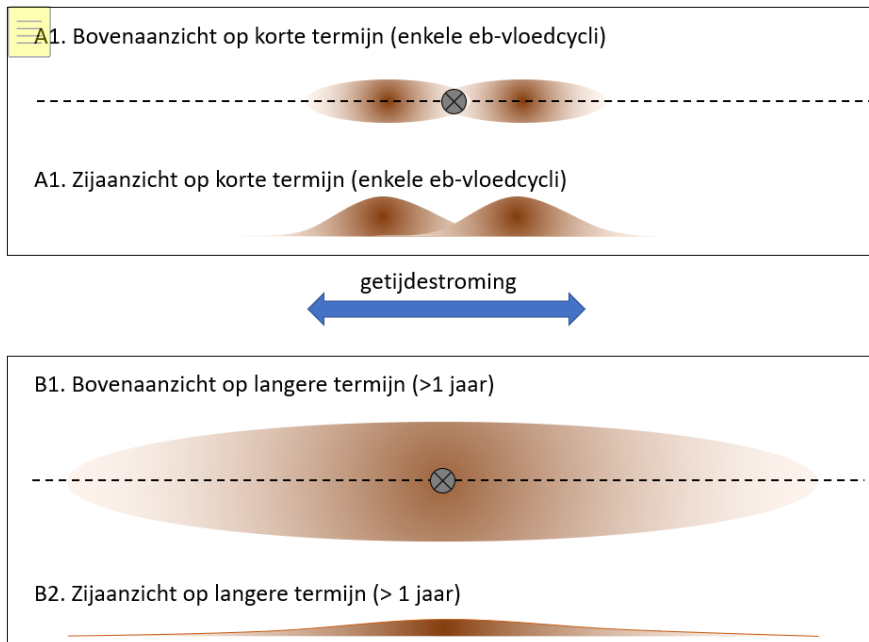


Abbildung 2930: Schematische Darstellung der Verteilung und Schichtdicke des Bohrschutts im Kurzzeitbereich (oben) und im Langzeitbereich (unten).

Die langfristige Verteilung des feinen Bohrschutts erfolgt durch die Gezeiten hauptsächlich in Ost-West-Richtung und in geringerem Maße in Nord-Süd-Richtung, z. B. durch windgetriebene Strömungen und Wellen. Bei symmetrischen Gezeiten würde sich der feine Bohrschutt nach jedem Ebbe- und Flutzyklus mehr oder weniger an der gleichen Stelle befinden, d. h. in einem Abstand von etwa hundert Metern vom Standort der Plattform, aber etwas weiter verstreut. Aufgrund der Gezeitenasymmetrie, bei der die Flutströmung in östliche Richtung stärker ist als die Ebbströmung, ist jedoch zu erwarten, dass insbesondere der Feinanteil des Bohrschutts nach jedem Ebbe-Flut-Zyklus etwas weiter nach Osten transportiert wird.

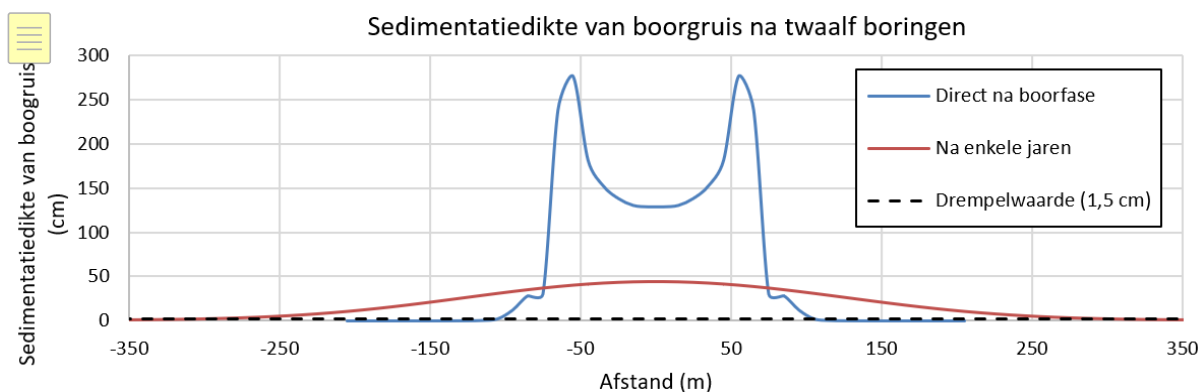


Abbildung 3132: Darstellung der Sedimentationsdicke des Bohrschutts nach zwölf Bohrungen in Abhängigkeit der Entfernung (m) für verschiedene Zeitangaben: blau direkt nach der Bohrung, rot: nach einigen Jahren. Nach einigen Jahren wird der Schwellenwert von 1,5 cm in einer Entfernung von ca. 300 m vom Austragsrohr überschritten.

Außerdem ist der Sedimenttransport ein stochastischer Prozess, was bedeutet, dass nicht alle Bohrschuttteile zur gleichen Zeit mit der gleichen Geschwindigkeit über die gleiche Strecke transportiert werden. Kleine Variationen in der Korngröße, Turbulenzen, Unebenheiten des Meeresbodens usw. führen zu Variationen im Transport. Dadurch wird der Bohrschutt nach und nach über eine immer größere Fläche

des Meeresbodens verteilt und die Bohrschuttschicht auf dem Meeresboden wird automatisch kleiner und in der Nähe der Bohrstelle ist weniger vorhanden.

In einer früheren Studie für eine andere Bohrinselfür in der Nordsee kam Imares (Imares, 2015) zu dem Schluss, dass der Bohrschutt keinen sichtbaren morphologischen Effekt und nur einen geringen Einfluss auf die lokale Flora und Fauna hat. Einerseits ist zu beachten, dass die Wassertiefe (47 Meter) an diesem Plattformstandort größer war als am Plattformstandort N05-A, und daher der Bohrschutt während des Austrags über eine größere Fläche verteilt wurde. Andererseits lässt sich aus dieser Studie schließen, dass der Bohrschutt im Laufe der Zeit über den Meeresboden verteilt wurde und nun Teil des Meeresbodens ist.

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Basierend auf vereinfachten Berechnungen, Analysen und früheren Studien werden in diesem Dokument die morphologischen Auswirkungen der Bohrplattform und der Förderplattform, der Steinschüttung und des ausgetragenen Bohrschutts abgeschätzt. Darüber hinaus wurde eine Abschätzung der Dynamik des Bohrschutts vorgenommen.

Aufgrund der Anordnung der Steinschüttung an den Pfeilern der Bohrplattform und der Förderplattform ist es wahrscheinlich, dass entlang der Ränder der Steinschüttung Erosion auftritt. Es ist auch plausibel, dass diese Kolken mit Steinschüttungen, die in die Kolken rollen, aufgefüllt werden.

Aus den Berechnungen über das Absinken des Bohrschutts wird gefolgert, dass die Höhe des Austragsrohrs über dem Meeresboden einen großen Einfluss auf die Strecke hat, über die sich der Bohrschutt auf dem Meeresboden absetzt. Ein Austragsrohr in der Nähe des Meeresbodens führt zu einer kleinen, aber dicken Sedimentationsschicht mit Bohrschutt, während ein Austragsrohr hoch in der Wassersäule zu einer weiter verbreiteten und dünneren Sedimentationsschicht aus Bohrschutt führt, wodurch die Schicht dünner wird. Auch die Lage des Austragsrohrs spielt eine Rolle für die Ausbreitung: Ein Austragsrohr auf der Nord- oder Südseite sorgt für eine größere Ausbreitung des Bohrschutts.

Die Dicke des Bohrschutts variiert über die Entfernung zum Austragsrohr und mit der Zeit. Bei einer Austragsrohrhöhe von zwanzig Metern über dem Meeresboden beträgt die maximale Schichtdicke ca. 23 cm pro Bohrloch. Bei einer niedrigeren Austragsrohrhöhe ist die Bohrschuttschicht dicker und verteilt sich auf eine kleinere Fläche.

Bei mehreren Bohrungen, die in Chargen oder seriell durchgeführt werden, beträgt die maximale Bohrschuttschicht ca. 23 cm x Anzahl der Bohrungen. Bei zwölf Bohrungen⁶ ist die Bohrschuttablagerung also maximal etwa zweihundertachtzig Zentimeter dick. Diese Dicke der Bohrschuttschicht ist ein Worst-Case-Szenario, da bei mehreren Bohrungen die Gesamtbohrzeit zunimmt und daher mehr Stürme während der Bohrzeit auftreten. Ein Teil des Bohrschutts aus den Salzsichten löst sich außerdem im Meerwasser auf.

Wird zur Ermittlung der ökologischen Auswirkungen der Bohrschuttablagerung eine kritische Schichtdicke von eineinhalb Zentimetern angenommen, so wird diese kritische Schichtdicke bei einer einzelnen Bohrung in einem Abstand von etwa neunzig Metern rundum das Austragsrohr überschritten. Bei mehreren Bohrungen wird dieser Abstand vergrößert. Bei zwölf Bohrungen wird unter Berücksichtigung der Worst-Case-Situation die Schichtdicke von eineinhalb Zentimetern in einem Abstand von ca. 105 Metern vom Austragsrohr überschritten.

Basierend auf der Korngröße des Bohrschutts, der kritischen Strömungsgeschwindigkeit vor Beginn des Transports, den Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund von Gezeiten und Wind sowie Berechnungen zum Sedimenttransport ist es wahrscheinlich, dass sich ein sehr kleiner Teil des Bohrschutts, und zwar nur der feine Teil des Bohrschutts, um die Spitzen von Ebbe und Flut herum in Bewegung setzt und mit dem Gezeitenstrom mitgeführt wird. Dieser Teil des Bohrschutts bewegt sich mit Ebbe und Flut hin und her. Bei den jährlichen Sturmverhältnissen kann eine Menge transportiert werden, die ungefähr dem Tagesaustrag entspricht. Das bedeutet, dass es mindestens Wochen, wahrscheinlicher aber Monate bis Jahre dauern wird, bis der Bohrschutt über eine große Entfernung vom Standort der Plattform verteilt sein wird, dies hängt auch vom Auftreten von Stürmen ab.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Analysen und Berechnungen dieser Studie mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Diese Unsicherheit findet sich vor allem in den Analysen und Berechnungen in Bezug auf den Bohrschutt. Wichtige unsichere Faktoren sind die Korngrößenverteilung des Bohrschutts und die natürliche Variation der Turbulenz, Strömungs- und Wellenbedingungen.

5 Referenzen

- 1 HaskoningDHV, *Pluimmodelleren boringen N05-A*, 2020
- 2 Fugro, *Metoccean Criteria for the N05A Platform*, ref.no.: 18192_1_R2, 2019
- 3 GEOxyz, *Survey Report – N5A Platform Area*, ref.no.: N05-A-7-10-0-70016-01, 2019
- 4 Tideway, *As-Built Report FPV*, ref.no.: TW-RP-17076RD1-22000-ABR, 2017
- 5 Imares, *Post drill survey A6-A6*, ref.no.: C046.15, pp 41, 2015