



Natuur Impuls Oosterschelde

Toepassingsmogelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw

Auteurs: Tom Ysebaert, Brenda Walles, Jebbe van der Werf, Thijs van Kessel, Lodewijk de Vet, Jill Hansen, Luca van Duren, Jaco de Smit, Tjeerd Bouma, Joost Stronkhorst

Wageningen Marine Research rapport C038/20

Natuur Impuls Oosterschelde

Toepassingsmogelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw

Auteurs: Tom Ysebaert*, Brenda Walles*, Jebbe van der Werf**, Thijs van Kessel**, Lodewijk de Vet**, Jill Hansen**, Luca van Duren**, Jaco de Smit***, Tjeerd Bouma***, Joost Stronkhorst****

* Wageningen Marine Research

** Deltares (projectnummer 1204489)

*** NIOZ

**** HZ University of Applied Sciences

Wageningen Marine Research
Yerseke, maart 2020

VERTROUWELIJK Nee

Wageningen Marine Research rapport C038/20

Keywords: Natuurherstel, Oosterschelde, Sediment, Slib, Suppletie, Slibmotor, Zandhonger, Intergetijdengebieden.

Wijze van citeren: Ysebaert, Tom; Walles, Brenda; van der Werf, Jebbe; Van Kessel, Thijs; de Vet, Lodewijk, Hansen, Jill; van Duren, Luca; De Smit, Jaco; Bouma, Tjeerd; Stronkhorst, Joost. 2019. Natuur Impuls Oosterschelde: toepassingsmogelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw. Wageningen Marine Research, Rapport C038/20

Opdrachtgever: 1. Natuurmonumenten
T.a.v.: Mark Mandemakers & Frans van Zijderveld
Zwaaksedijk 5
4434 RD Kwadendamme
2. Rijkswaterstaat
T.a.v.: Frank Gijzel & Eric van Zanten
Poelendaelesingel 18
4335 JA Middelburg

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/519760>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor gevolgschade, binnen de rechtspersoon Stichting noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van Wageningen Marine Research, hierbij werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen Marine Research. vertegenwoordigd door Dr. M.C.Th. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van aanspraken van derden Scholten, Algemeen directeur in verband met deze toepassing.

KvK nr. 09098104,

WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.

Code BIC/SWIFT address: RABONL2U

IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

A_4_3_1 V29 (2019)

Inhoud

Samenvatting	6
Opbouw rapport	11
Verantwoording	11
Fase 1: Verkennende studie	12
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond	12
1.2 Totstandkoming van deze studie: Natuur Impuls Oosterschelde	12
1.3 Doelstelling	13
1.4 Methodologie	14
2 Studiegebied	15
2.1 Kom van de Oosterschelde	15
2.2 Morfologie	16
2.3 Sedimentsamenstelling	19
2.4 Zwevend stofconcentratie	20
2.5 Ecologie	22
2.5.1 Ecotopen	22
2.5.2 Benthos	22
2.5.3 Vogels	24
2.5.4 Schorren	25
2.5.5 Zeegrasvelden	26
2.6 Functies/Menselijk gebruik	27
3 Afwegingskader	28
3.1 Doel van de ingreep	28
3.2 Type maatregel	29
3.3 Wijze van uitvoering	29
3.4 Doelhabitat i.r.t. beschikbaar sediment	29
3.5 Randvoorwaarden	30
3.6 Technische beperkingen	30
4 Suppletievarianten	31
4.1 Sediment als bouwstof	31
4.1.1 Technieken	31
4.1.2 Natuur Impuls Oosterschelde	33
4.2 Beschikbaar sediment Zandkreek	34
4.3 Mogelijke suppletiegebieden	37
4.3.1 Verdrongen land van Zuid-Beveland	38
4.3.2 Hooge Kraaijer	39
4.4 Suppletievarianten	39
5 Sedimentverspreiding en neveneffecten	42
5.1 Slib	42
5.1.1 Aanpak	42
5.1.2 Vier scenario's	44
5.1.3 Van vier naar twee scenario's	44

5.1.4	Gedetailleerde uitwerking twee scenario's	47
5.1.5	Resultaten berekening slibverspreiding en potentiële effecten	48
5.1.6	Conclusies t.a.v. de scenario's en de effecten	60
5.2	Zand	61
5.2.1	Aanpak	61
5.2.2	Resultaten	65
6	Sedimentverspreiding en effecten op het litorale habitat	68
6.1	Algemeen	68
6.2	Twee scenario's: Suppletie Laag vs Slibmotor Oost	68
6.2.1	Verspreiding van de slibfractie (op het einde van de simulatieperiode)	68
6.2.2	Verspreiding van de zandfractie	70
6.2.3	Effecten op droogvalduur en (autonome) erosie van het intergetijdengebied	70
6.2.4	Effecten op het bodemleven en foerageerfunctie voor vogels	71
6.2.5	Effecten op de schorren	71
7	Discussie en conclusie	72
7.1	Algemeen	72
7.2	Afweging tussen een suppletie en een slibmotor	73
	Fase 2: Definitief suppletie-ontwerp + monitoringsplan	77
1	Inleiding – Fase 2: definitief suppletie-ontwerp	77
2	Kenmerken definitief suppletie-ontwerp	78
3	Sedimentverspreiding definitief suppletie-ontwerp	80
3.1	Slibverspreiding definitief suppletie-ontwerp	80
3.1.1	Modelinput	80
3.1.2	Modelresultaten definitief suppletie-ontwerp voor R08PH2_2_30_S05_20ha	81
3.1.3	Potentiële effecten	85
3.2	Zandtransport definitief suppletie-ontwerp	87
4	Conclusie definitief suppletie-ontwerp	88
5	Aanbeveling aanleg definitief suppletie-ontwerp	89
6	Monitoringsplan definitief suppletie-ontwerp	91
6.1	Inleiding	91
6.2	Hydro-morfologische ontwikkeling	92
6.2.1	Achtergrond	92
6.2.2	Doel	92
6.2.3	Methode	93
6.2.4	Resultaat	95
6.3	Sediment- & suspensietransportmetingen	95
6.3.1	Achtergrond	95
6.3.2	Doel	96
6.3.3	Methode	96
6.3.4	Resultaat	97
6.4	Ecologische ontwikkeling suppletie - bodemdieren	97
6.4.1	Achtergrond	97
6.4.2	Doel	98

6.4.3	Methode	98
6.4.4	Resultaat	98
6.5	Vogels	99
6.5.1	Achtergrond	99
6.5.2	Doel	99
6.5.3	Methode	100
6.5.4	Resultaat	100
6.6	Schorren en zeegras	100
6.7	Evaluatie	100
7	Mogelijkheden voor opschaling	102
7.1	Inleiding	102
7.2	Hoeveelheid en type baggerspecie	103
7.3	Geschikt sediment volume	104
7.4	Aandeel in de sediment balans	104
7.5	Uitvoeringsprogramma rond baggerwerk	105
	Kwaliteitsborging	106
	Literatuur	107
	Verantwoording	109
Bijlage 1	Natuur Impuls bijeenkomsten	110
Bijlage 2	Metingen kritische erosiesnelheid sediment Zandkreek	111
Bijlage 3	Resultaten van scenarioberekeningen	120
Bijlage 4	Slibconcentraties waterkolom definitief suppletie-ontwerp	135
Bijlage 5	Accumulatie van slib op de bodem definitief suppletie-ontwerp	136

Samenvatting

Ter compensatie van natuurverlies door de bouw van een hoogspanningsverbinding tussen Vlissingen en Rilland wil Natuurmonumenten, in samenwerking met Rijkswaterstaat, onderzoeken of er natuurwinst is te behalen in de Kom van de Oosterschelde door maatregelen uit te voeren die de negatieve effecten van de zandhonger kunnen tegengaan. In dit rapport is een aantal mogelijk kansrijke opties onderzocht die zich richten op het behoud van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Uitgangspunt hierbij was om te onderzoeken of gebruik kan gemaakt worden van het slibrijk sediment dat in de winter van 2020/2021 zal vrijkomen bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden die dienen te worden uitgevoerd aan de vaargeul in de Zandkreek (zo'n 190.000 m³ sediment met een variabel maar hoog tot zeer hoog slibgehalte). Dit opgebaggerd sediment wordt normaliter in diepe putten in de Oosterschelde gedumpt, maar zou mogelijk ook nuttig benut kunnen worden in het systeem, bijv. ten behoeve van natuurbouw ter bestrijding van de negatieve effecten van de zandhonger ('werk met werk'). Doelstellingen van voorliggende studie zijn:

- Het verkennen van de mogelijkheden voor behoud van intergetijdengebieden in de Kom van de Oosterschelde door het (op doellocatie en strategische locatie) suppleren van slibrijk sediment in intergetijdengebieden.
- Het maken van grofstoffelijke ontwerp(en) voor verkennende pilot(s) (max. 2 ontwerpen).
- Het opstellen van een monitoringsplan om kennis op te doen over toepasbaarheid en effectiviteit van dit soort maatregelen.

Uiteindelijk is deze studie in twee fasen uitgevoerd. De eerste fase omhelsde de verkenning van de mogelijkheid tot het benutten van onderhoudsbaggerspecie in de Kom van de Oosterschelde ter versterking van de natuur en het tegengaan van de negatieve effecten van de zandhonger (d.i. erosie van het intergetijdengebied). Dit is gedaan voor twee alternatieve toepassingen (slibmotor en suppletie), toegepast op twee verschillende locaties. Op basis van modelstudies naar de verspreiding van slib en zand en deskundigenoordeel zijn deze alternatieven vergeleken.

In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit voorkeursalternatief (het definitief suppletie-ontwerp) is tevens een monitoringsplan opgesteld. Als laatste wordt ook ingegaan op de mogelijkheden voor opschaling in de Oosterschelde.

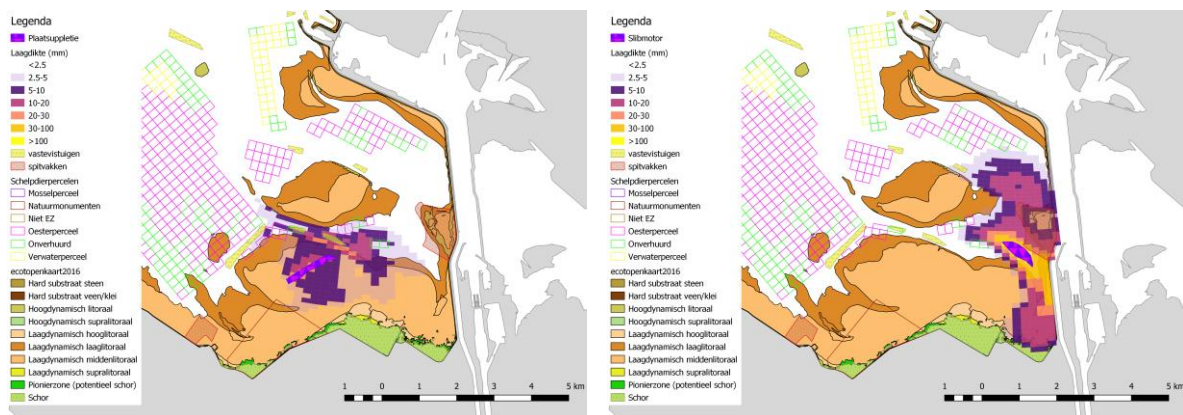
Fase 1

In fase 1 is een quickscan uitgevoerd naar het morfologisch functioneren en de ecologische kenmerken en natuurwaarden van de Kom van de Oosterschelde, met een focus op het Verdrongen land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de slikken nabij de Oesterdam. Tevens zijn kort de gebruiksfuncties in het gebied geschetst.

Een afwegingskader is vervolgens gebruikt om een onderbouwde keuze te maken voor natuurbouw met sediment in de Kom van de Oosterschelde. Hierbij is rekening gehouden met het doel van de ingreep, type maatregel, type sediment dat beschikbaar is, wijze van uitvoering, mogelijke randvoorwaarden en neveneffecten en technische beperkingen. Op basis hiervan is tijdens een deskundigenbijeenkomst een selectie gemaakt van de mogelijke maatregelen binnen het onderzoeksgebied. Het slibrijke karakter van het sediment uit de Zandkreek maakt het geschikt voor toepassing als

suppletie in relatief luwe gebieden of als sedimentmotor die als bron dient om een groter slikken- en schorregebied te voeden met sediment. Hiervoor lijkt het gebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland het meest geschikt. Dit grote slikkengebied van zo'n 1350 ha is deels onderhevig aan erosie (westelijk deel, erosiesnelheden tot 10 mm per jaar), deels stabiel of zelfs licht aangroeiend (oostelijk deel). Het is van nature relatief slibrijk, zeker de hogere delen nabij de dijk en het schor. Het gebied kent nog een relatief groot oppervlak aan 50-80 % droogvalduur (zo'n 675 ha), maar een groot deel ligt ook laag (< 40% droogvalduur).

Twee typen maatregelen zijn uitgewerkt: 1) een sediment- of slibmotor, 2) een sedimentsuppletie, gebruik makend van (een deel van) het sediment dat beschikbaar komt bij de baggerwerkzaamheden in de Zandkreek. Bij een sedimentmotor wordt het sediment op een strategische locatie gestort (in dit geval in het sublitoraal) vanuit waar de slikken en schorren op een natuurlijke manier worden gevoed. Bij een suppletie wordt het sediment direct op de doellocatie in het litoraal gestort. Van elk type maatregel zijn in eerste instantie twee scenario's onderzocht. Hiervoor zijn met een slibmodel slibberekeningen uitgevoerd naar zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de verspreiding van het slib op de bodem. Op basis van deze eerste berekeningen is tijdens een deskundigenbijeenkomst een selectie gemaakt van twee scenario's die verder zijn uitgewerkt. Dit zijn de oostelijke variant van de slibmotor (slibmotor oost nabij de Oesterdam) en de laaggelegen suppletie (suppletie laag). Voor deze twee scenario's zijn vervolgens weer slibberekeningen uitgevoerd, met variatie in erosiegevoeligheid van het sediment, slibfractie (groter bij de slibmotor dan de suppletie), totaal te storten volume (100.000 m³ en 190.000 m³, dit laatste enkel voor de slibmotor). Deze berekeningen geven inzicht in zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de verspreiding van het slib op de bodem (zie figuur A). Daarnaast zijn ook modelberekeningen uitgevoerd naar het gedrag van de zandfractie.



Figuur A: Verspreiding van slib op de bodem bij de suppletie (links) en slibmotor (rechts) op basis van modelberekeningen.

Beide maatregelen (slibmotor en suppletie) hebben een positief effect op het litorale habitat van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De baten voor natuur worden groter ingeschat voor de suppletie dan voor de slibmotor. Een suppletie draagt direct bij aan het versterken/behoud van het areaal 40-80% droogvalduur. De zandfractie blijft meerdere jaren in het litoraal aanwezig. De zandfractie van de slibmotor ligt sublitoraal en komt waarschijnlijk maar beperkt in het litoraal terecht. De slibfractie verspreidt zich zowel bij de suppletie als de slibmotor via de waterkolom over een relatief groot gebied en komt deels in het litoraal en deels in het sublitoraal op de bodem terecht. Qua efficiëntie verspreidt zich er meer slib naar het litoraal vanuit de suppletie dan vanuit de slibmotor (de helft tegenover een derde). De absolute hoeveelheid die zich verspreidt is voor de berekende scenario's groter voor de slibmotor, omdat hier sediment wordt gestort met een grotere slibfractie dan de suppletie. Verder laten de simulaties zien dat

bij de suppletie een groter oppervlakte van het litoraal met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel een dunnere laag. Dit met name door een verschil in de lokale hydrodynamische condities. De bijdrage van de slibfractie aan het ophogen van het litorale habitat is relatief klein, gaande van enkele mm's tot enkele cm's. Enkel lokaal zullen wat dikkere slibpakketten worden afgezet (vooral bij de slibmotor). Éénmalig deze maatregel uitvoeren zal dus niet veel bijdragen aan de lange termijn erosie van dit gebied (zeker met versnelde zeespiegelstijging), maar bij regelmatig herhalen kan de slibfractie wel degelijk bijdragen aan het afremmen van de erosie van dit gebied. Met name in het oostelijk deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, waar nu weinig erosie optreedt, zal de bijdrage naar verwachting het grootst zijn. Hierbij dient benadrukt te worden dat de modelsimulaties een relatief grote onzekerheid kennen en de resultaten dientengevolge met de nodige voorzichtigheid dienen geïnterpreteerd te worden.

In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar op basis van de modelberekeningen. Ondanks dat moet toch ook met deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

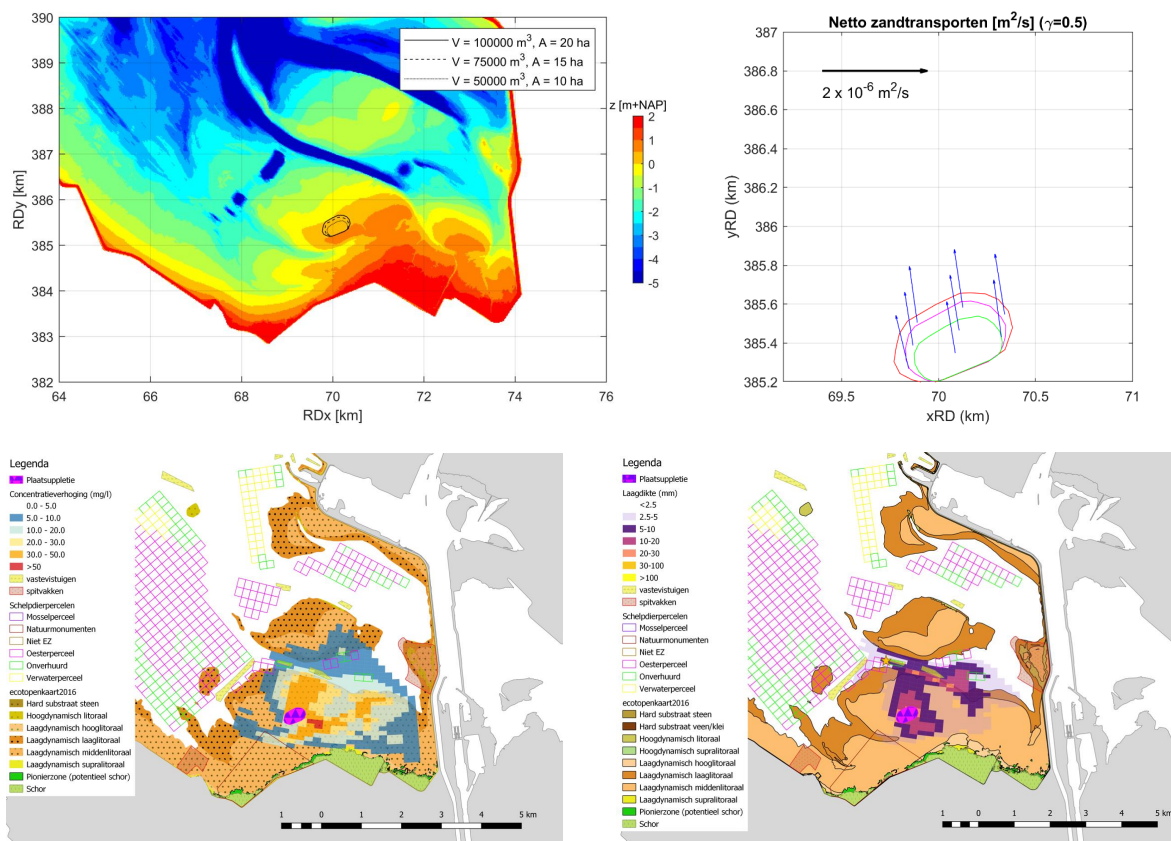
In essentie lijkt dus het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. De kosten die gepaard gaan met de aanleg van een suppletie dan wel slibmotor worden niet in detail behandeld in deze studie.

Het is belangrijk te onderstrepen dat beide maatregelen innovatief zijn, met een groot potentieel voor kennisopbouw, welke in de toekomst ook bruikbaar zal zijn voor beheer in andere estuaria en kustgebieden, zowel in Nederland als wereldwijd. Een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitoringsprogramma.

Fase 2

In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit definitief suppletie-ontwerp is tevens een monitoringsplan opgesteld.

Het definitieve ontwerp kent 3 varianten, namelijk een suppletie van 10, 15 of 20 ha. Voor alle varianten is de dikte van de opgebrachte laag 0.5 m, zodat het gaat om een suppletievolume van respectievelijk 50.000, 75.000 en 100.000 m³ (Figuur B). Voor de modelering is uitgegaan van een slibpercentage van 30% en een kritische schuifspanning voor erosie van 0.2 Pa. Dit geeft een bovengrens voor de verspreidingssnelheid van de slibfractie en een bovengrens voor de extra vertroebeling en snelheid van opslibbing buiten het suppletiegebied. De modelresultaten zijn erg vergelijkbaar met de eerder doorgerekende plaatsuppletievariant, die een paar honderd meter naar het noorden lag (zie fase 1).



Figuur B: Linksboven: Hoogte kaart met positionering van het definitief suppletie-ontwerp in de kom van de Oosterschelde. De drie verschillende contouren geven de ontwerpen weer voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³). Rechtsboven: Berekende netto zandtransporten (zonder slibeffecten) voor het definitief suppletie-ontwerp op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013. Linksonder: Berekende verhoging van de weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom in week 13 (op het einde van de simulatieperiode). De verschillende waarden van concentratieverhogingen zijn met kleuren weergegeven (zie legenda). Rechtsonder: Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken).

Het definitief suppletie-ontwerp resulteert in een suppletie waarvan de zandfractie (70% van het volume) meerdere jaren een bijdrage zal leveren aan het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De zandfractie zal zich langzaam verspreiden in voornamelijk NNO richting (Figuur B). Van de slibfractie (30% van het volume) zal zo'n 70% uitgespoeld zijn drie maanden na aanleg. Hierbij dient in acht genomen te worden dat het slibmodel gedraaid is met een lage kritische schuifspanning voor het slib. Zo'n 55% van dit slib komt in het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland terecht en zal zich over een groot gebied verspreiden (Figuur B). Concentratieverhoging van het slib in de waterkolom zal tijdelijk optreden, vooral ter hoogte van de suppletie zelf, maar uitdijend tot in de Mosselkreek (Figuur B). Ter hoogte van de oesterpercelen in de Mosselkreek zal de concentratieverhoging beperkt blijven en naar alle waarschijnlijkheid niet tot sterfte leiden van oesters. De slibafzetting op oesterpercelen lijkt nauwelijks significant.

De suppletie kan als een nuttige en zinvolle maatregel gezien worden om de effecten van de zandhonger in de Oosterschelde tegen te gaan. De suppletie levert een bijdrage aan het mitigeren van de negatieve effecten van de zandhonger en meer bepaald aan het behoud van het foerageerhabitat voor steltlopers ter hoogte van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Uiteraard is er de verstoring van de aanleg, en zal tijdelijk het bodemleven ter hoogte van de suppletie en in een beperkte omgeving daarrond

afsterven. Lokaal kan door grote slibafzetting ook verstikking van bepaalde biota optreden (bijv. schelpdieren). Net als bij eerdere suppleties is de verwachting dat de rekolonisatie van het bodemleven relatief snel (3-5 jaren) zal verlopen. In hoeverre de samenstelling van de bodemdiergemeenschap anders zal zijn, omwille van het meer slibrijke sediment, is moeilijk te voorspellen. Aanvullend worden een aantal aanbevelingen gemaakt ten aanzien van de aanleg van het definitieve suppletieontwerp.

Voor het definitief suppletie-ontwerp is vervolgens een monitoringsplan opgesteld. Het doel van de monitoring van de Natuur Impuls suppletie is om antwoord te kunnen geven op de vraag of, middels een suppletie van slibrijk baggerspecie het intergetijdengebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland behouden kan blijven en de foerageerfunctie voor steltlopers gewaarborgd. Daarnaast moet de monitoring en het onderzoek ook meer generieke kennis ontwikkelen voor suppleren met slibrijk sediment in intergetijdengebieden. Dit is in belang van het lange termijn beheer van de Oosterschelde. Optimalisatie en validatie van de hydromorfologische modellen vormen een wezenlijk onderdeel van het plan. De monitoring omvat hydromorfologische metingen, onderzoek naar sedimenteigenschappen, onderzoek naar het bodemleven en het herstel van bodemdieren op de suppletie, en onderzoek naar het gebruik van de suppletie door foeragerende steltlopers.

In het project *Natuur Impuls* krijgt baggerspecie uit de vaargeul van de Zandkreek een zinnige herbestemming op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in de Kom van de Oosterschelde. Het helpt de effecten van de zandhonger in dit gebied, nl. de langzame erosie van het slik, enigszins te verkleinen. Door de uitvoering van dit project wordt voor het eerst ervaring opgedaan met het suppleren van gebaggerd slibrijk sediment in de Oosterschelde. Misschien biedt dit een nieuwe vorm van sedimentbeheer waarin voortaan het gebaggerd sediment uit havens en vaargeulen niet meer gedumpt wordt in diepe geulen of putten maar op intergetijdengebieden t.b.v. natuurbehoud of -ontwikkeling. In een laatste hoofdstuk verkennen we alvast de mogelijkheden om het project *Natuur Impuls* in de Oosterschelde op te schalen en werk-met-werk te maken. Geconcludeerd wordt dat het volume aan baggerspecie in de Oosterschelde een kleine maar structurele bijdrage kan leveren bij natuurbouw van slikken en voorlanden langs de oevers.

Opbouw rapport

Het onderzoek is in twee fasen verlopen en het rapport is derhalve ook opgebouwd uit twee delen, fase 1 en fase 2.

Fase 1

Het morfologische functioneren en de ecologische karakteristieken van de Kom staan beschreven in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 wordt het afwegingskader gepresenteerd. In Hoofdstuk 4 worden de randvoorwaarden voor suppleren met slibrijk materiaal uitgewerkt en vier alternatieve suppleties gepresenteerd. Hoofdstuk 5 toont de sedimentverspreiding per suppletie alternatief op basis van slibpluimberekeningen. In Hoofdstuk 6 worden de hydro-morfologische, ecologische en uitvoeringstechnische aspecten van de suppletieontwerpen besproken en wordt op basis hiervan een keuze gemaakt. Hoofdstuk 7 bediscussieert suppleren met slibrijk sediment in de kom en Hoofdstuk 8 presenteert conclusies en enkele aanbevelingen van de eerste fase.

Fase 2

In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit definitief suppletie-ontwerp is tevens een monitoringsplan opgesteld. Hoofdstuk 2 geeft de kenmerken van het definitief suppletie-ontwerp weer, waarna in Hoofdstuk 3 de modelresultaten van de slibverspreiding en het zandtransport worden getoond. Hoofdstuk 4 presenteert de conclusie en Hoofdstuk 5 geeft een aanbeveling t.b.v. de aanleg. Hoofdstuk 6 bevat het monitoringsplan om de suppletie te monitoren en te evalueren. Tot slot gaan we kort in op de mogelijkheden voor opschaling in de hele Oosterschelde.

Verantwoording

Fase 1 - Hoofdstukken 1, 2, 3, 4, 7 en 8 zijn geschreven door Wageningen Marine Research. Deltares heeft in opdracht van Rijkswaterstaat de modelstudie uitgevoerd. De resultaten zijn in de vorm van een bijdrage aan deze rapportage toegevoegd. De hoofdstukken 5 en 6 zijn geschreven door Deltares, alsook paragrafen 2.2, 4.4. en bijlage 3 betreffen de resultaten van de scenarioberekeningen die zijn uitgevoerd door Deltares. Wageningen Marine Research, Deltares, NIOZ en HZ hebben deelgenomen aan de deskundigenbijeenkomsten en alle hoofdstukken nagelezen en van commentaar voorzien. NIOZ (Jaco de Smit) heeft bijkomende proeven gedaan naar de erosiegevoeligheid van slibrijke sedimenten (zie Bijlage 2). De Deltares bijdrage is gereviewd door Prof. Zheng Bing Wang.

Fase 2 – Alle hoofdstukken zijn geschreven door Wageningen Marine Research en Deltares. Deltares heeft de sediment modellering uitgevoerd. Wageningen Marine Research, Deltares, NIOZ en HZ hebben deelgenomen aan de deskundigenbijeenkomst en alle hoofdstukken nagelezen en van commentaar voorzien. Het hoofdstuk over de opschaling is door Joost Stronkhorst, in samenwerking met RWS collega's, opgesteld.

Fase 1: Verkenkende studie

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de Oosterschelde neemt het oppervlakte van rust- en foerageergebied voor vogels af als gevolg van de zandhonger. De Oosterschelde, als onderdeel van de Zuidwestelijke Delta, is een belangrijk gebied voor (trek)vogels en aangewezen als Natura 2000-gebied. De zandhonger heeft negatieve gevolgen voor de natuurlijke kwaliteit van het gebied en meer bepaald meerdere Natura 2000-instandhoudingsdoelen. Het intergetijdengebied wordt kleiner en komt steeds lager te liggen waardoor de tijd dat ze bereikbaar zijn voor vogels afneemt. De voedselbeschikbaarheid voor steltlopers en andere watervogels wordt hierdoor verminderd wat in de toekomst kan leiden tot een afname in het voorkomen van deze soorten. Zandplaten, slikken en schorren zorgen tevens voor een natuurlijk damping tegen golven. Dijken met een aanzienlijk voorland worden minder belast. Door de verlaging van het voorland, veroorzaakt door de zandhonger in de Oosterschelde, wordt de levensduur van dijken verkort. Naast de gevolgen voor natuur en veiligheid, heeft de zandhonger ook een negatieve invloed op de landschappelijke waarden en sociaaleconomische belangen in het gebied. De zandhonger, in combinatie met zeespiegelstijging, zal op de langere termijn leiden tot een Oosterschelde met nauwelijks nog droogvallende platen, slikken en schorren.

1.2 Totstandkoming van deze studie: Natuur Impuls Oosterschelde

Natuurmonumenten streeft naar behoud, en waar mogelijk versterking, van de foerageer functie van de Oosterschelde voor steltlopers en andere soorten watervogels. Middels middelen beschikbaar gesteld door TenneT vanuit een compensatiemaatregel naar aanleiding van de bouw van een hoogspanningsverbinding tussen Vlissingen en Rilland wil Natuurmonumenten, in samenwerking met Rijkswaterstaat, onderzoeken of maatregelen mogelijk zijn in de Kom van de Oosterschelde die de negatieve effecten van de zandhonger kunnen tegengaan. Tijdens een aantal werksessies met Natuurmonumenten, Rijkswaterstaat, Wageningen Marine Research en NIOZ is gebrainstormd over de beste benutting van deze middelen, inclusief mogelijke meekoppelkansen. Op basis hiervan is een aantal mogelijke kansrijke opties geselecteerd, vooral gericht op het behoud van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Deze opties worden nader uitgewerkt in onderliggende studie.

Daarbij wordt uitdrukkelijk gekeken naar meekoppelkansen met reeds geplande ingrepen in het systeem. In de Oosterschelde dienen op regelmatige tijdstippen baggerwerkzaamheden uitgevoerd te worden t.b.v. het op diepte houden van havens en havengeulen en het op diepte houden van vaargeulen, bijv. ter hoogte van sluizen. Zo moet in de winter van 2020/2021 bij de Zandkreek zo'n 190.000 m³ gebaggerd worden om de dichtgeslibde vaargeul terug op diepte te brengen. Dit opgebaggerd sediment wordt normaliter in diepe putten in de Oosterschelde gedumpt, maar zou mogelijk ook

nuttig kunnen worden gebruikt in het systeem, bijv. ter bestrijding van de negatieve effecten van de zandhonger ('werk met werk'). Dit vraagt een omslag in denken, en vergt studie naar de korte en lange termijn effecten van zulke toepassingen. Uitgangspunt moet zijn dat het gebaggerde sediment in het systeem blijft en toegepast wordt voor het versterken van natuur en veiligheid. Enkel als dit niet gewaarborgd kan worden, kunnen andere oplossingen benut worden, bijv. het storten in diepe putten. Dan blijft het sediment weliswaar ook in het systeem maar zonder echte toegevoegde waarde. Dit uitgangspunt is door Rijkswaterstaat en Natuurmonumenten omarmd en er is overeengekomen om te onderzoeken hoe sediment dat vrijkomt bij allerlei onderhoudsbaggerwerkzaamheden van de Zandkreek optimaal ingezet kan worden voor natuurbehoud en -winst (*beneficial use of dredged sediments*). Meer specifiek wordt in deze studie onderzocht of het sediment dat in de Zandkreek vrijkomt mogelijk gebruikt kan worden voor verbetering van de natuurfuncties in de Kom van de Oosterschelde. Het gaat hierbij om een proef, waarvan geleerd kan worden. Indien succesvol, kan deze kennis benut worden voor opschaling dan wel frequenter herhalen van de ingreep.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project is onderzoek doen naar toepassingsmogelijkheden van (slibrijk) sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden t.b.v. natuurbouw in de Oosterschelde, waarmee een bijdrage geleverd kan worden aan het behoud dan wel versterking van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Concreet gaat het hierbij om het benutten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden bij de Zandkreek in het kader van de Natuur Impuls Oosterschelde. Het onderzoek betreft een haalbaarheidstudie (variantenstudie), op basis van deskundigenoordeel en sedimentmodellering, waarbij gezocht wordt naar toepassingsmogelijkheden in de Kom van de Oosterschelde. De doelstellingen van dit project kunnen als volgt gedefinieerd worden:

- Het verkennen van de mogelijkheden voor behoud van intergetijdengebieden in de Kom van de Oosterschelde door het (op doellocatie en strategische locatie) suppleren van slibrijk sediment op intergetijdengebieden.
- Het maken van grofstoffelijke ontwerp(en) voor verkennende pilot(s) (max. 2 ontwerpen).
- Het opstellen van een monitoringsplan om inzicht te krijgen in de functionaliteit (morfologisch, ecologisch) van de voorgestelde sediment maatregelen en daarmee genereren van kennis over toepasbaarheid en effectiviteit van dit soort maatregelen.

Natuurmonumenten heeft als doel het behouden, en waar mogelijk versterken, van de foerageer functie van de Oosterschelde voor steltlopers en andere soorten watervogels. Om te bepalen of dit doel behaald wordt middels suppleren in de Kom van de Oosterschelde zijn de volgende vragen gedefinieerd:

- Hoofdvraag: Draagt storten/suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie of strategische locatie bij tot behoud of mogelijks versterking van het foerageerareaal in de Kom van de Oosterschelde (en daarmee aan Natura 2000-instandhoudingsdoelstellingen)? Deze beoordeling is gebaseerd op hoogte veranderingen, effecten op erosie en veranderingen van het 40-80% droogvallende areaal op korte en lange termijn na suppleren. Daarnaast wordt gekeken naar veranderingen in sedimentsamenstelling en voedselaanbod voor steltlopers.
- Nevenvraag: Draagt suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie of strategische locatie bij aan behoud van bestaande schorren?
- Nevenvraag: Is het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor natuurbouw en kustveiligheid een

duurzame en kostenefficiënte maatregel? Hier spelen zaken zoals verspreiding en verblijftijd van het sediment in het litorale habitat, maar ook mogelijke neveneffecten en kosten-baten i.v.m. uitvoering en aanleg.

1.4 Methodologie

De aanpak van de ontwerpstudie bestaat uit de volgende onderdelen:

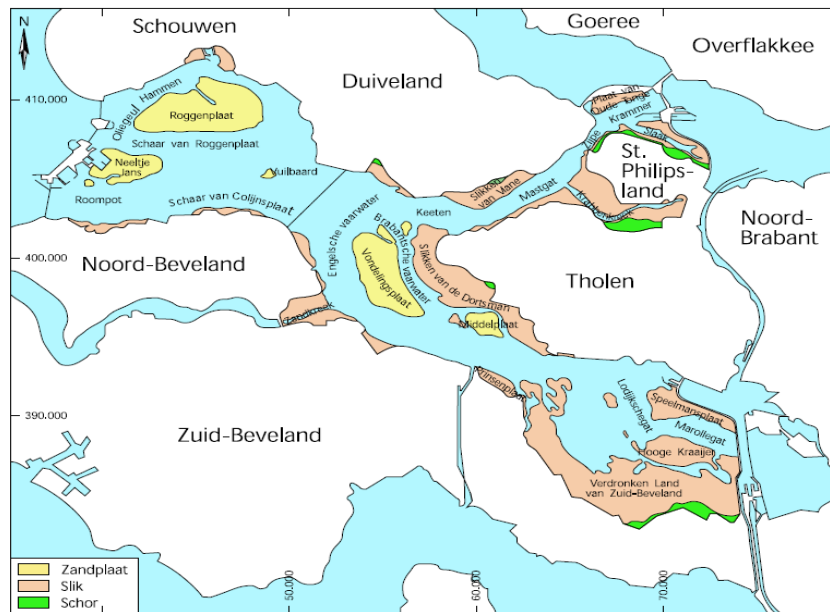
1. De beschikbare kennis, data en modellen van de Kom worden op hoofdlijnen geïnventariseerd en verzameld. Deze worden gebruikt voor een beschrijving van het morfologische en ecologische functioneren van de Kom van de Oosterschelde.
2. Op basis van een deskundigenoordeel, waarbij rekening gehouden wordt met ecologische, hydro-morfologische, economische (i.e. andere gebruiksfuncties) en uitvoeringstechnische aspecten, wordt een geschiktheidskaart gemaakt die aangeeft welke gebieden in de Kom geschikt zijn voor natuurbouw met sediment.
3. Uit de doelstellingen van Natuurmonumenten en de beschikbare kennis wordt een afwegingskader afgeleid om een objectieve en onderbouwde keuze mogelijk te maken voor suppletiealternatieven.
4. Voor vier suppletiealternatieven worden vervolgens berekeningen uitgevoerd van de slibverspreiding (zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de opslibbing van de bodem).
5. De verschillende suppletiealternatieven worden gewogen met behulp van het afwegingskader. Het toetsen aan de criteria gebeurt op basis van systeemkennis, modelresultaten en deskundigenoordeel. De twee best scorende suppletiealternatieven worden nader onderzocht.
6. De overgebleven twee suppletiealternatieven zijn nader onderzocht en getoetst aan uitvoeringstechnische aspecten en te behalen (natuur)rendement.
7. Tot slot neemt Natuurmonumenten in samenspraak met RWS, en met advies van de opdrachtnemers, een beslissing over het voorkeursalternatief waarvoor vervolgens een monitoringsplan wordt opgesteld.

Tijdens fase 1 zijn drie workshops en deskundigenbijeenkomsten georganiseerd, en zijn de eerste resultaten toegelicht tijdens een stakeholdersbijeenkomst. Zie Bijlage 1 voor een overzicht van deze bijeenkomsten.

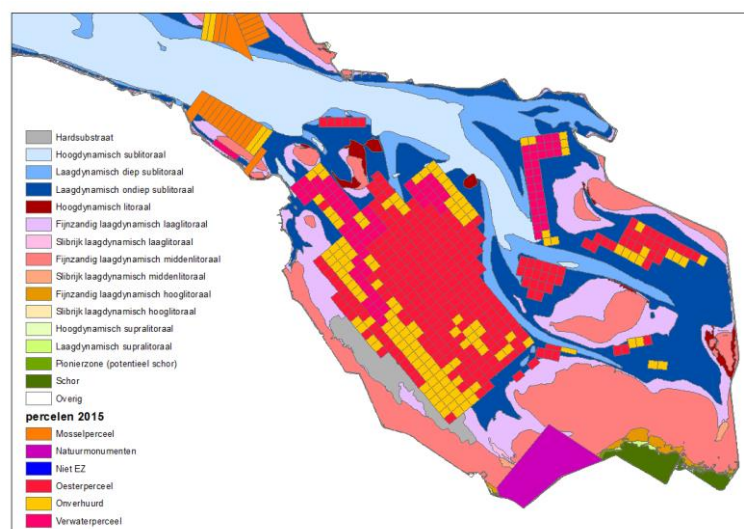
2 Studiegebied

2.1 Kom van de Oosterschelde

Het zoekgebied waar Natuur Impuls Oosterschelde zich op richt is het oostelijke deel, de Kom van de Oosterschelde. In de Kom van de Oosterschelde bevindt zich een aantal grote intergetijdengebieden waaronder Verdronken Land van Zuid-Beveland, Hooge Kraaijer, en Speelmansplaat (Figuur 1 en Figuur 2). Middels een quickscan worden de morfologische en ecologische kenmerken en trends van de Kom van de Oosterschelde beschreven, met een focus op het Verdronken land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de slikken nabij de Oesterdam.



Figuur 1. De Oosterschelde met situering van de kom.

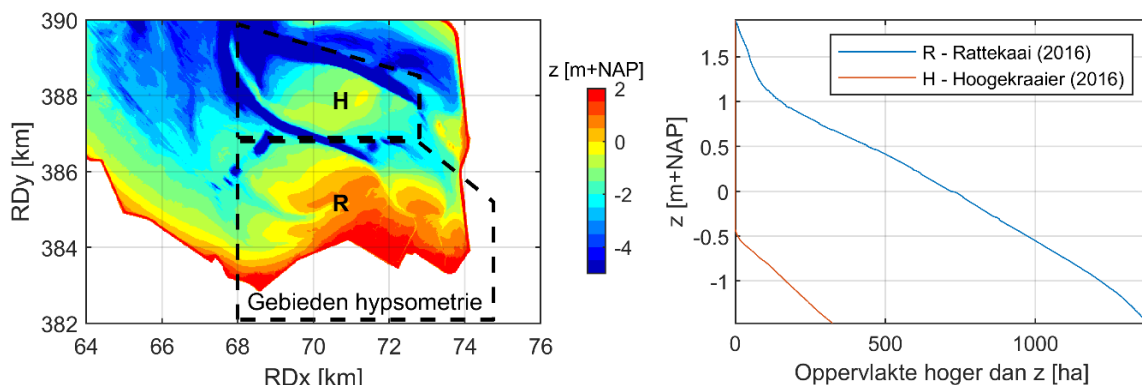


Figuur 2. Ecotopenkaart van de Kom van de Oosterschelde met aanduiding van de locatie van de schelpdierpercelen.

2.2 Morfologie

In de Kom van de Oosterschelde is het gemiddeld laagwater NAP -1,47m en gemiddeld hoogwater NAP +1,91m. De stroomsnelheden onder invloed van het getij zijn hier beperkt, mede door de aanwezigheid van de Oesterdam die het getijdeprisma beperkt. De stroomsnelheden in de geulen in het zoekgebied hebben een grootte tot $\sim 0,3 \text{ m s}^{-1}$ (De Vet et al., 2017). In de intergetijdengebieden zijn de snelheden nog lager. Door de beperkte stroomsnelheden zal wind de stroming op de intergetijdengebieden in de Kom substantieel versterken, zoals eerder al gedemonstreerd voor de Roggenplaat (De Vet et al., 2018).

Voor twee grote intergetijdengebieden (R: Rattekaai, onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland en H: Hooge Kraaijer) is gekeken naar de hoogteligging van het gebied middels hypsometrische curves (Figuur 3). Een hypsometrische curve geeft aan hoeveel oppervlakte er van een bepaalde hoogteklasse beschikbaar is. De hypsometrische curves duiden een duidelijk verschil tussen beide gebieden: daar waar de oppervlakten van Rattekaai onder NAP +1m relatief uniform verdeeld zijn over de hoogteklassen (relatief rechte lijn van de hypsometrische curve), is het areaal van Hooge Kraaijer slechts beperkt tot hoogteklassen onder NAP -0,5m. Hooge Kraaijer ligt dus veel lager dan Rattekaai, zoals ook zichtbaar is in de overzichtskaart van Figuur 3.



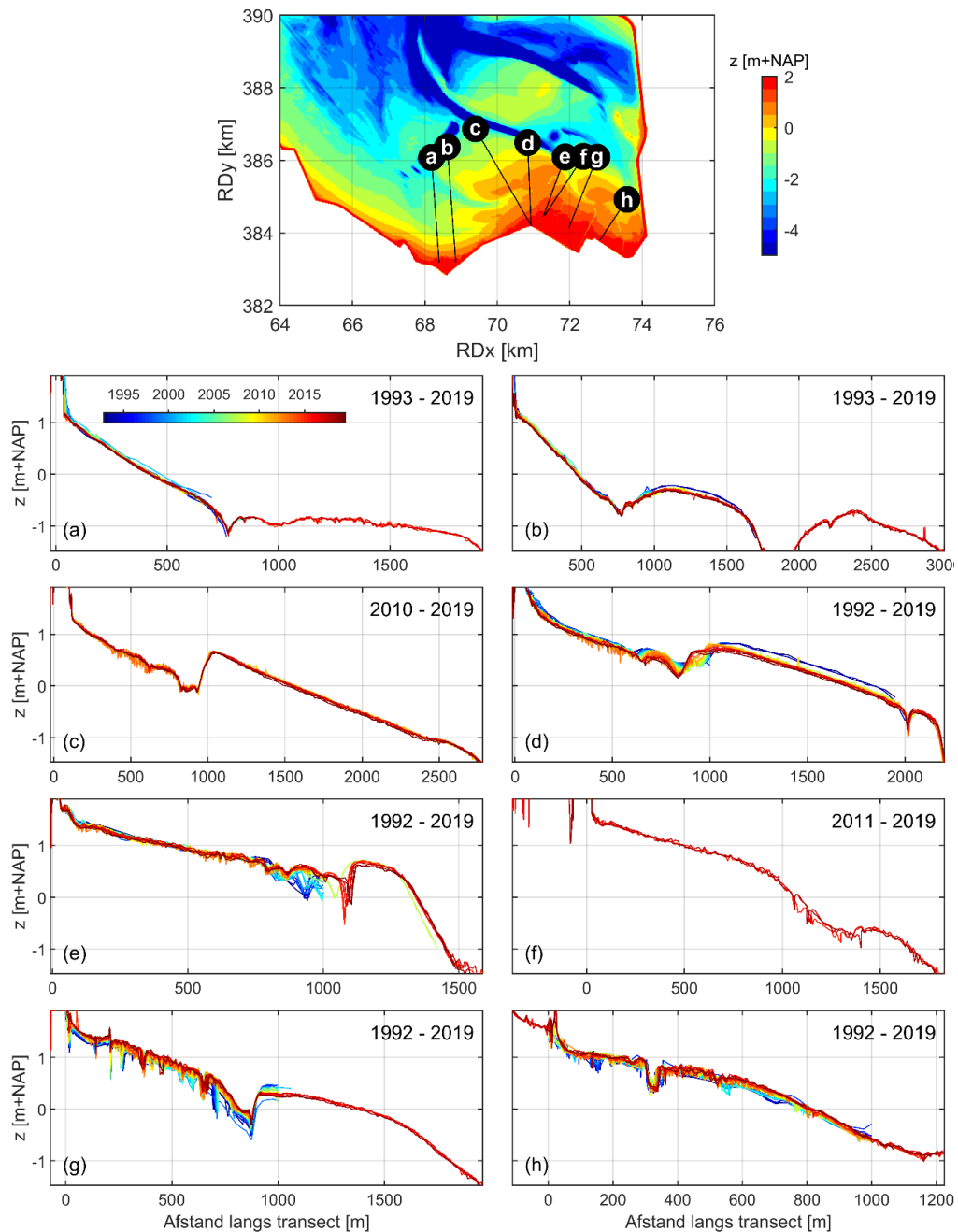
Figuur 3. Hypsometrische curves Rattekaai en Hooge Kraaijer. Links: overzichtskaart met de ligging van de intergetijdengebieden Rattekaai, onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (R) en Hooge Kraaijer (H). De achtergrond toont de vaklodings dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Hierin zijn ook de gebieden weergegeven waarvoor de hypsometrische curves zijn bepaald (R refereert naar Rattekaai, H naar Hooge Kraaijer). Rechts: hypsometrische curves voor beide intergetijdengebieden met de 2016 bodem. De hypsometrische curves zijn alleen bepaald voor delen van het intergetijdengebied die boven gemiddeld laagwater (NAP -1.47m) en onder gemiddeld hoogwater (NAP +1.91m) liggen.

In De Vet et al. (2017) is de ontwikkeling van de Hooge Kraaijer geanalyseerd. Hierin wordt getoond dat dit intergetijdengebied een behoorlijke erosie heeft ondergaan na voltooiing van de Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen eind jaren 80 van de vorige eeuw: een afname in de gemiddelde hoogte van ongeveer 20 cm, in oppervlakte van 30% en in sedimentvolume van 50% (tot 2013).

De morfologische ontwikkeling van het intergetijdengebied van Rattekaai is nader onderzocht middels analyse van de door Rijkswaterstaat gemeten bodemhoogte (RTK-dGPS) raaien. Het voordeel van RTK-dGPS raaien is dat deze een grotere nauwkeurigheid hebben ($\sigma \approx 3 \text{ cm}$) dan andere datasets zoals LiDAR ($\sigma \approx 15 \text{ cm}$). Door de ruime beschikbaarheid van deze raaien op Rattekaai ($n=8$, Figuur 4), kan een relatief compleet beeld van de ontwikkeling van de Rattekaai worden bepaald. Twee korte raaien (enkele honderden meters lang) zijn buiten beschouwing gelaten. De meeste raaien zijn sinds 1992/1993 bemeten, Raai C en Raai F waren pas respectievelijk in 2010 en 2011 geïntroduceerd. Het meetinterval was ongeveer een jaar. De raaien zijn niet in elk jaar

geheel gemeten, de delen die in Raai A, Raai B en Raai G het verst van de dijk af liggen zijn pas in de laatste jaren gemeten.

Voor de vier westelijke raaien (Figuur 4) heeft er erosie plaatsgevonden (voor Raai C is dit minder duidelijk door de kortere periode waarover gemeten is). Dit is in lijn met de algemene ontwikkeling van de intergetijdengebieden in de Oosterschelde gerelateerd aan de zandhonger: erosie sinds de aanleg van de Oosterscheldekering (1986). Tijdsgemiddelde erosiesnelheden tot ongeveer 1 cm per jaar zijn waargenomen. Het lijkt dat de erosiesnelheden in recente jaren wat minder waren. Daarentegen is de bodem relatief stabiel of zelfs aangroeiend voor de vier oostelijke raaien (Figuur 4). Vooral in Raai G is de aangroei duidelijk zichtbaar, lokaal met gemiddeld meer dan 1 cm per jaar. Op basis van de huidige data is het moeilijk te zeggen waardoor het verschil in erosie in het westen en sedimentatie in het oosten veroorzaakt wordt.



Figuur 4. RTK-dGPS raaien op het Rattekaai (onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland) intergetijdengebied. Boven: overzichtskaart met de ligging van de raaien. De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Onder: de acht relevante raaien zijn in a–h weergegeven. Raaien C en F worden pas sinds 2010/2011 gemeten (zie getallen rechtsboven in de deelfiguren). Bij Raaien A, B en G ontbreekt oude data voor het gedeelte het verste van de dijk (rechter stuk van de profielen).

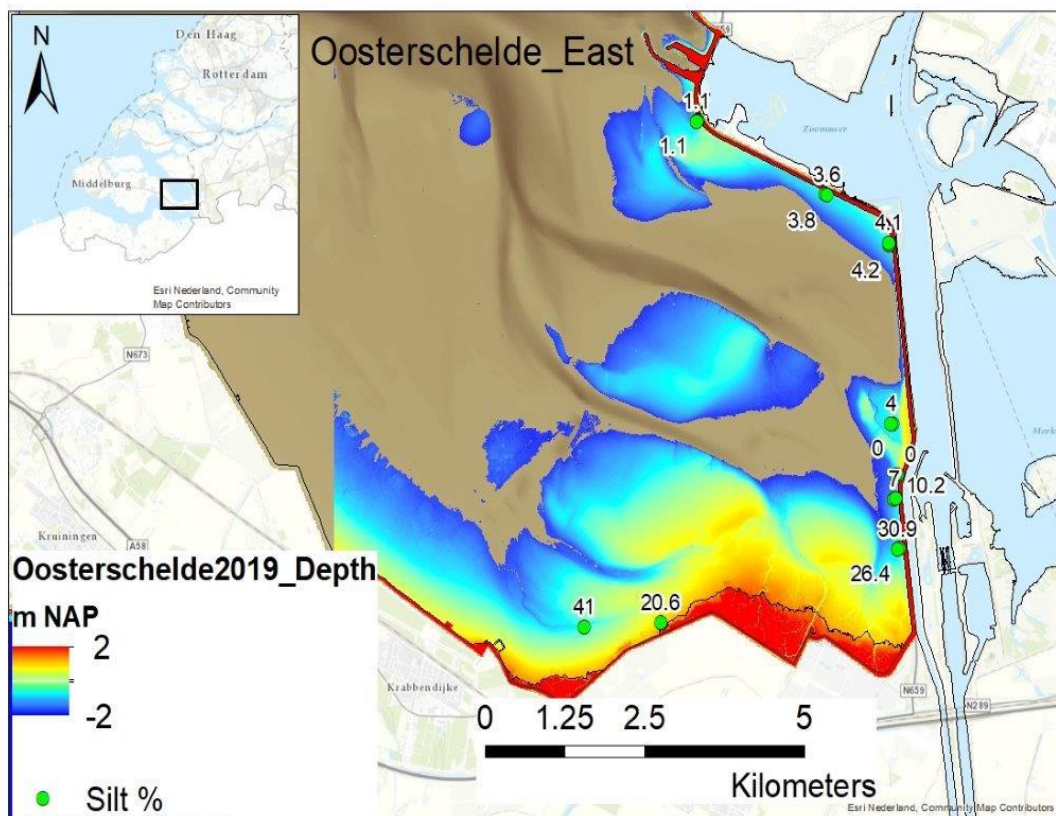
Analyse van de morfologische ontwikkeling voor de vier grote deelgebieden binnen de Oosterschelde, (west, midden, noordoost (d.i. noordelijk tak) en oost (d.i. kom)) uitgevoerd binnen de ANT studie (Troost en Ysebaert, 2011; de Ronde et al. 2013), laat zien dat de verdeling van arealen over de gehele droogvalduur gradiënt (dus alle bodemhoogteklassen) verschilt tussen de deelgebieden. Het grootste deel van de intergetijdengebieden in de kom bevindt zich lager dan 40% droogvalduur, terwijl de intergetijdengebieden in het noordoostelijke compartiment voor een groot deel langer dan 40% van de tijd droogvallen (Figuur 5). In de kom is het areaal 40-60% droogvalduur in de jaren afgenomen terwijl het areaal 0-40% droogvalduur is toegenomen.

Figuur 5 uit de Ronde et al. (2013) toont voor de vier deelgebieden van de Oosterschelde de voorspelde ontwikkeling in areaal van de verschillende droogvalduurklassen tot 2100 bij een zeespiegelstijging van 60cm. Verwacht wordt dat door de combinatie van zandhonger en zeespiegelstijging het totale areaal intergetijdengebieden het meest zal afnemen in het oostelijke deelgebied (de Kom) (40%) binnen de komende 50 jaar. De deelgebieden West en Noord nemen het minste af met ongeveer 25%. De lagere gebieden (<40% droogvalduur) nemen eveneens het meeste af in de Kom. Hoogste afname in de hogere gebieden zal plaatsvinden in het westen en na verwachting zal het areaal 60-100% droogvalduur in 2060 nagenoeg verdwenen zijn in dit deelgebied. Het areaal 40-80% droogvalduur is voor vogels het meest belangrijk (de Ronde et al. 2013). De achteruitgang van dit gebied is het grootst in het westelijke deelgebied (80%) en het minst in het oostelijke en noordoostelijke deelgebied (40%). In het midden neemt dit areaal af met 65%.

Figuur 5. Verloop in de tijd voor de vier deelgebieden van de arealen per droogvalduurklasse voor het scenario met gemiddelde zeespiegelstijging (60cm tot 2100) (de Ronde et al., 2013).

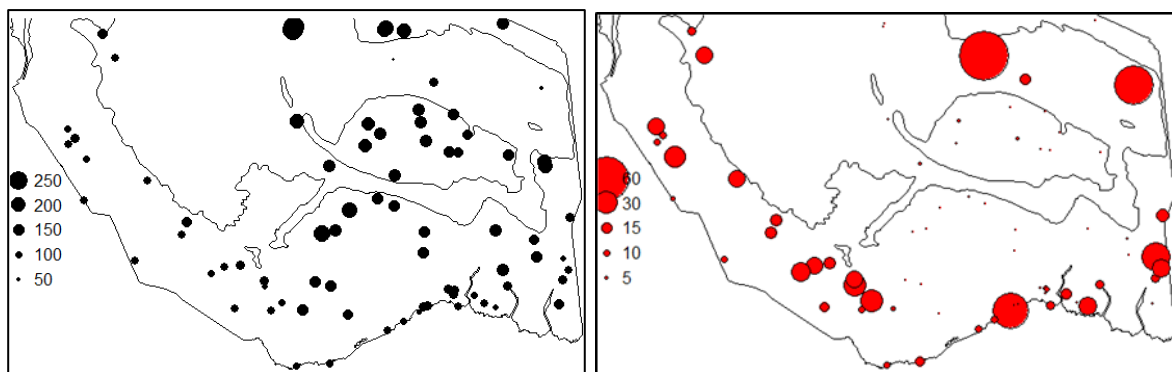
2.3 Sedimentsamenstelling

NIOZ heeft een aantal experimenten uitgevoerd in de Kom van de Oosterschelde waarbij ook gekeken is naar de sedimentsamenstelling. Figuur 6 geeft het slibgehalte (fractie <63µm) weer op een aantal locaties in de kom. Bij de Speelmansplaat en de Oesterdam suppletie zijn de slibgehalten laag (<5%). Het slibgehalte neemt langs de Oesterdam in zuidelijke richting toe, met max. 30.9% slib. Ook langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komen relatief hoge slibconcentraties voor.



Figuur 6. Slib concentraties (% <63 μm) op een aantal meetpunten in de Kom van de Oosterschelde. Bron: Jeroen van Dalen, NIOZ.

Dit is ook terug te zien in de sedimentmetingen die zijn verricht binnen de MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014 (Figuur 7). Langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komen relatief hoge slib concentraties voor terwijl er nauwelijks slib aanwezig is op de Hooge kraaijer. Daarmee is de Kom van de Oosterschelde één van de meest van nature slibrijke gebieden van de Oosterschelde, naast beschutte gebieden zoals de Zandkreek.

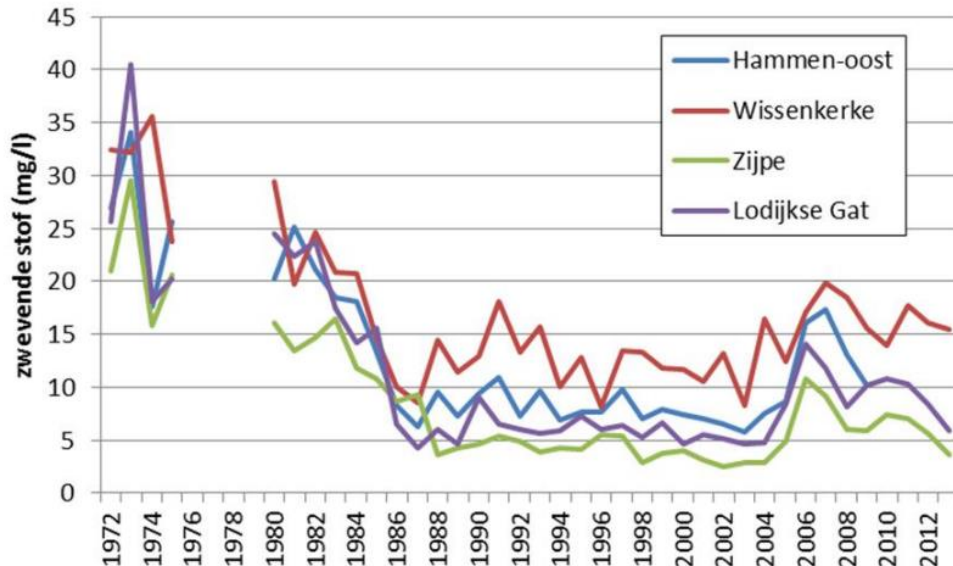


Figuur 7. D50 (links, in μm) en slib concentraties (rechts, % <63 μm) op een aantal meetpunten in de Kom van de Oosterschelde. Bron: MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014.

2.4 Zwevend stofconcentratie

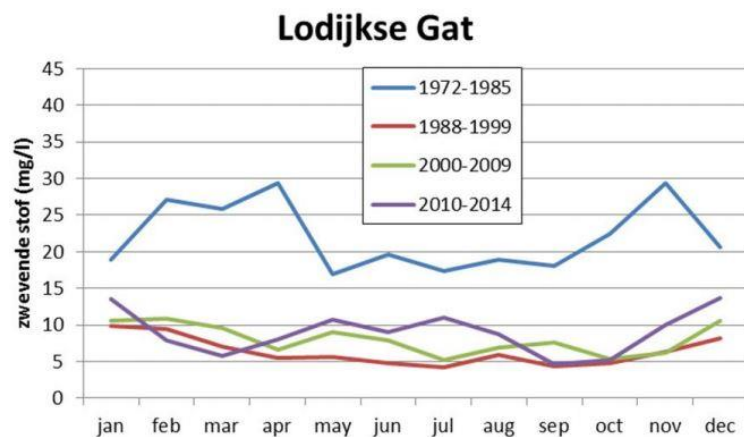
In dit rapport worden de effecten van de sediment maatregelen ook getoetst op doorwerking naar zwevende stofconcentraties. Deze resultaten worden gepresenteerd relatief t.o.v. een referentiesituatie. Om deze veranderingen te kunnen duiden en interpreteren is het goed om inzicht te hebben in de referentiesituatie voor de slibconcentratie in de waterkolom.

De Oosterschelde is voor Nederlandse begrippen een zeer helder watersysteem. Na de bouw van de stormvloedkering in 1987 is de gemiddelde zwevend stofconcentratie sterk afgenomen door de verminderde getijbeweging (Figuur 8). Voor de sluiting lag de jaargemiddelde concentratie in het westen en het oosten rond de 35 mg l⁻¹ en in het noorden rond de 30 mg l⁻¹. Na de sluiting is dit gemiddeld afgenomen tot rond de 15 mg l⁻¹ in het westelijk deel en rond de 10 mg l⁻¹ in het oostelijk deel (waar deze studie zich op concentreert). De noordelijke tak (gegevens van Zijpe) heeft nóg lagere concentraties (De Vries, 2014).



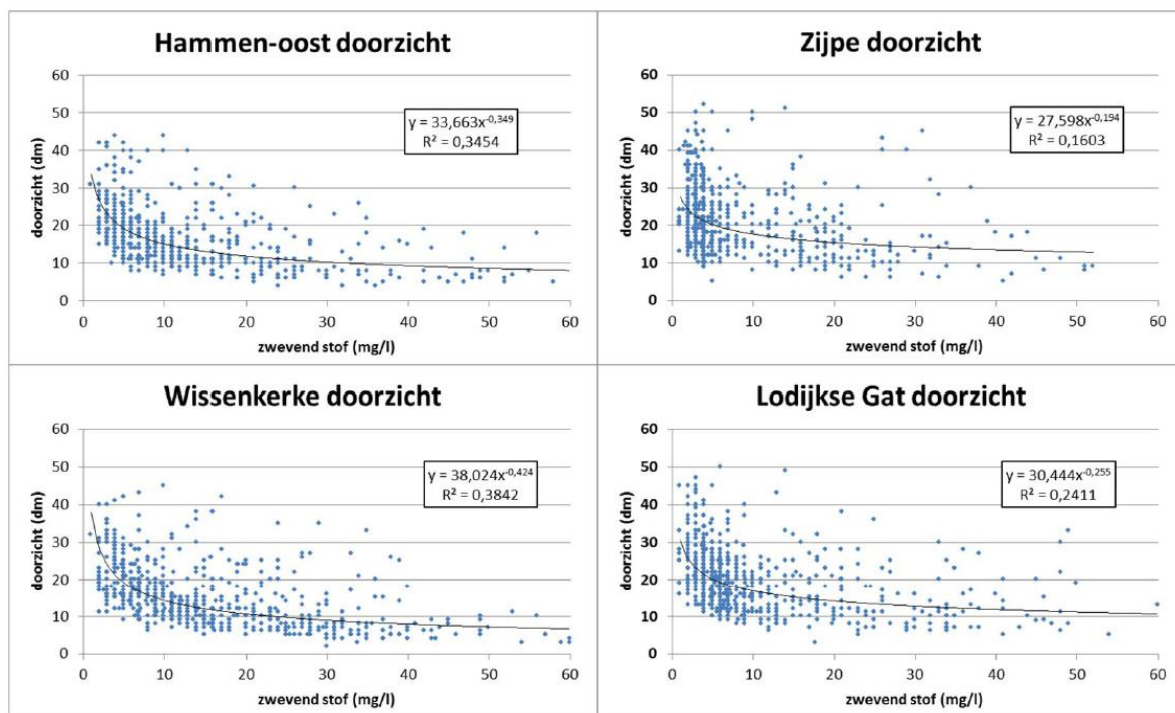
Figuur 8. Jaargemiddelde zwevende stofconcentraties op verschillende locaties in de Oosterschelde. De locatie Lodijkse Gat licht in de KOM van de Oosterschelde. Voor een overzicht van de locaties van deze meetpunten zie Figuur 11 (De Vries, 2014).

De slibconcentratie in het water varieert per seizoen, onder invloed van golfwerking en biologische terugkoppelingen. In het oostelijke deel (meetpunt Lodijkse Gat) varieert de slibconcentratie in de winter tussen de 10 en 15 mg l⁻¹ (Figuur 9). Deze metingen zijn laagfrequent. Op korte tijdschaal kan de slibconcentratie sterk variëren door resuspensie als gevolg van golfwerking. Deze variaties zijn niet zichtbaar in Figuur 9.

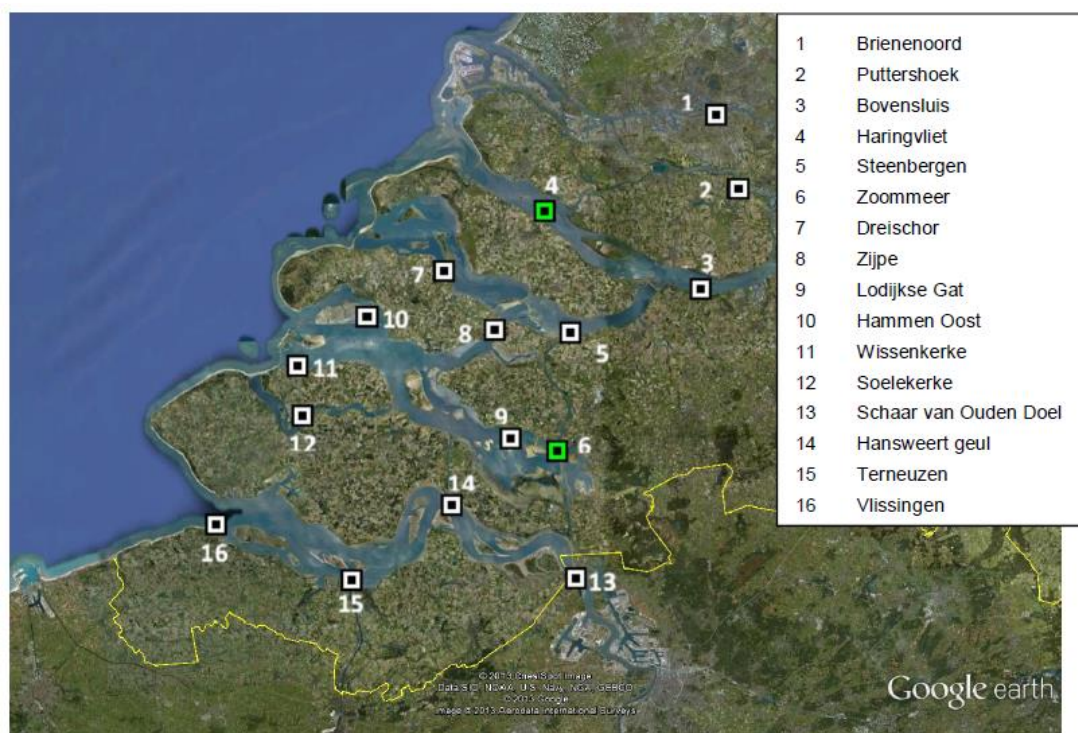


Figuur 9. Gemiddelde slibconcentraties in het oostelijke deel van de Oosterschelde per maand (De Vries, 2014).

Het effect van verhogen van de slibconcentratie op doorzicht is sterk afhankelijk van de referentiesituatie. In zeer helder water is het effect veel sterker dan in troebel water (Figuur 10). De locaties van de MWTL meetpunten zijn te vinden in Figuur 11.



Figuur 10. Relatie tussen doorzicht en zwevend stofconcentratie op vier MWTL locaties in de Oosterschelde (De Vries, 2014). Zie figuur 11 voor de locaties.



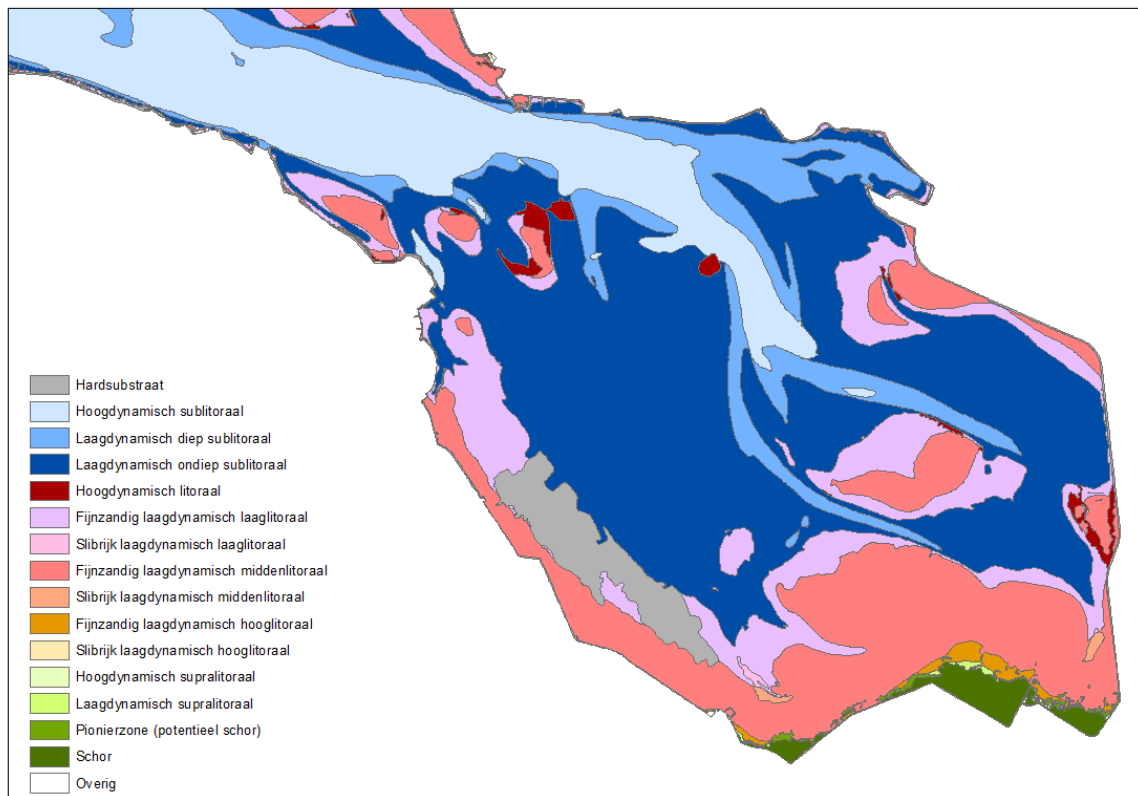
Figuur 11. Locaties van de MWTL meetpunten waarnaar gerefereerd wordt door De Vries (2014). Punten 8-11 zijn relevant voor deze studie.

Dit houdt in dat eventuele effecten van slibverspreiding in het oostelijk deel van de Oosterschelde eerder merkbaar zullen zijn op doorzicht dan in het westen. Daarnaast zal ook een keuze om alleen in de winterperiode te suppleren minder effecten geven op natuur- en gebruiksfuncties, hoewel dit per locatie dient geëvalueerd te worden. Zo zijn eventuele doorvertalingseffecten op primaire productie (algengroei) in de winter minimaal.

2.5 Ecologie

2.5.1 Ecotopen

De ecotopenkaart van 2016 laat zien dat de Kom van de Oosterschelde grotendeels uit laagdynamisch gebied bestaat, zowel litoraal als sublitoraal (Figuur 12). In het litorale overheerst het ecotoop fijnzandig laagdynamisch middenlitoraal. Hooglitoraal komt, op een kleine strook nabij de schorren van Roelshoek/Rattekaai na, nauwelijks voor. Slibrijk laagdynamisch middenlitoraal komt in een klein gebiedje voor bij de Oesterdam en nabij Roelshoek. Hoogdynamisch litoraal komt voor op de Oesterdam (als gevolg van de suppletie daar) en een klein stukje aan de noordrand van de Hooge Kraaijer. De Hooge Kraaijer, de grootste getijdenplaat in de Kom van de Oosterschelde, is een laaggelegen plaat met een relatief groot oppervlak aan fijnzandig laagdynamisch laaglitoraal.

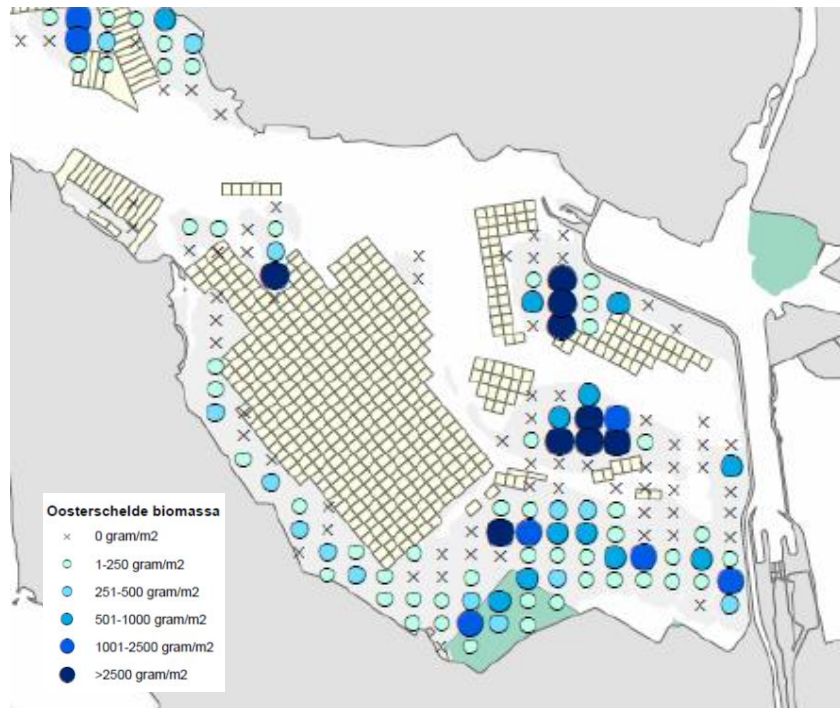


Figuur 12. Ecotopenkaart van de Kom van de Oosterschelde in 2016.

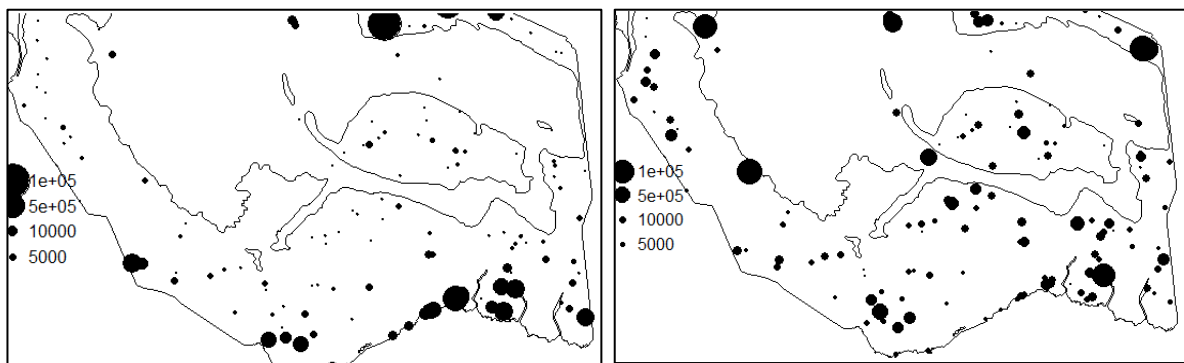
2.5.2 Benthos

Figuur 13 laat het voorkomen van kokkels zien in 2018 op basis van de WOT-survey (van Asch et al. 2018). Kokkels komen verspreid in het gebied voor, met de hoogste biomassa's op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de Speelmansplaten. Ook bij de Oesterdam suppletie komen op basis van de WOT-survey weinig kokkels voor, hoewel uit meer gedetailleerde observaties lokaal hoge kokkel biomassa's bekend zijn (Boersema et al. 2018).

Figuur 14 toont dichtheden en biomassa van benthos verzameld tussen 2010 en 2014 binnen de MWTL monitoring. Hoge dichtheden worden geobserveerd langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (door voorkomen van grote aantallen wadslakjes). Lager gelegen delen van deze slikken laten aantallen zien vergelijkbaar met de Hooge Kraaijer.



Figuur 13. Het voorkomen van kokkels (biomassa in g versgewicht per m²) in de Kom van de Oosterschelde in 2018 (Bron: Kokkel survey, WMR, van Asch et al. 2018).



Figuur 14. Dichtheden (ind. m⁻²) (links) en biomassa (mg m⁻²) (rechts) in de Kom van de Oosterschelde. Bron: MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014.

2.5.3 Vogels

De kom is een belangrijk foerageergebied voor onder meer de bergeend, kanoet, bonte strandloper (Tabel 1) en zwarte ruiter. Een belangrijke voedselbron voor de bergeend, bonte strandloper en zwarte ruiter is het wadslakje (*Peringia ulvae*). Wadslakjes kunnen in zeer hoge aantallen voorkomen, met name in het hooglitoraal gebied (Troost en Ysebaert, 2011). Verwacht wordt dat een achteruitgang van dit hooglitoraal areaal direct effect zal hebben op de verdere achteruitgang van deze soorten.

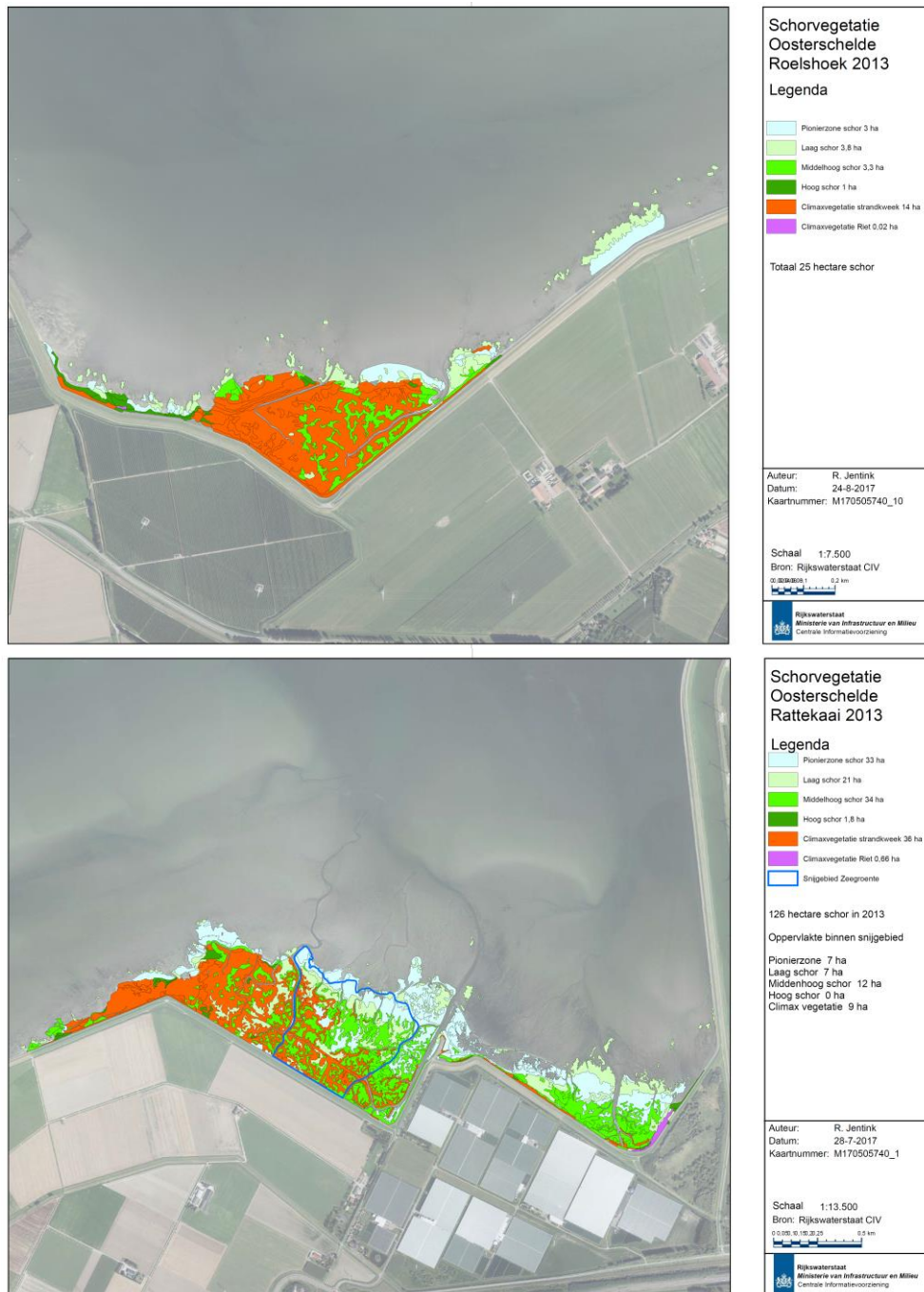
Tabel 1. Belang van de Kom van de Oosterschelde voor drie veel voorkomende vogelsoorten in de Oosterschelde. Verdeling per deelgebied (seizoengemiddelde gebaseerd op de periode 2006/2007-2010/2011).

	Seizoengemiddelde			
	West	Midden	Kom	Noordoost
Bergeend	536	385	818	297
Bonte Strandloper	3556	4691	6021	2881
Kanoetstrandloper	572	2151	2034	1674

Naar verwachting zal door erosie van de intergetijdengebieden, in combinatie met zeespiegelstijging, een plotselinge verandering optreden in de draagkracht voor steltlopers. Een dergelijke verandering zal moeilijk te herstellen zijn. Het totale areaal intergetijdengebied neemt de komende 50 jaar in deelgebied Oost (de Kom) het meeste af met ruim 40% (zie ook 2.2. Morfologie). Met name de areaalveranderingen voor de droogvalduurklasse 40-80 % is voor vogels in de Oosterschelde de meest belangrijke zone (de Ronde et al. 2013). Voor de gehele Oosterschelde is de achteruitgang van deze zone 56% in 2060 (de Ronde et al. 2013). De grootste achteruitgang is in het westen (80 %), in het gebied Midden neemt dit areaal met 65% af, terwijl de achteruitgang in de deelgebieden Oost en Noordoost ongeveer 40 % is (de Ronde et al. 2013). Door een combinatie van direct verlies aan areaal intergetijdengebied en het langzaam verlagen van de hogere delen in de Kom van de Oosterschelde, dreigt hier op termijn, net als in de andere delen van de Oosterschelde, een probleem te ontstaan voor de foerageer functie voor steltlopers (Troost en Ysebaert, 2011, de Ronde et al. 2013). Daarmee is de Kom van de Oosterschelde een voor de toekomst kwetsbaar gebied.

2.5.4 Schorren

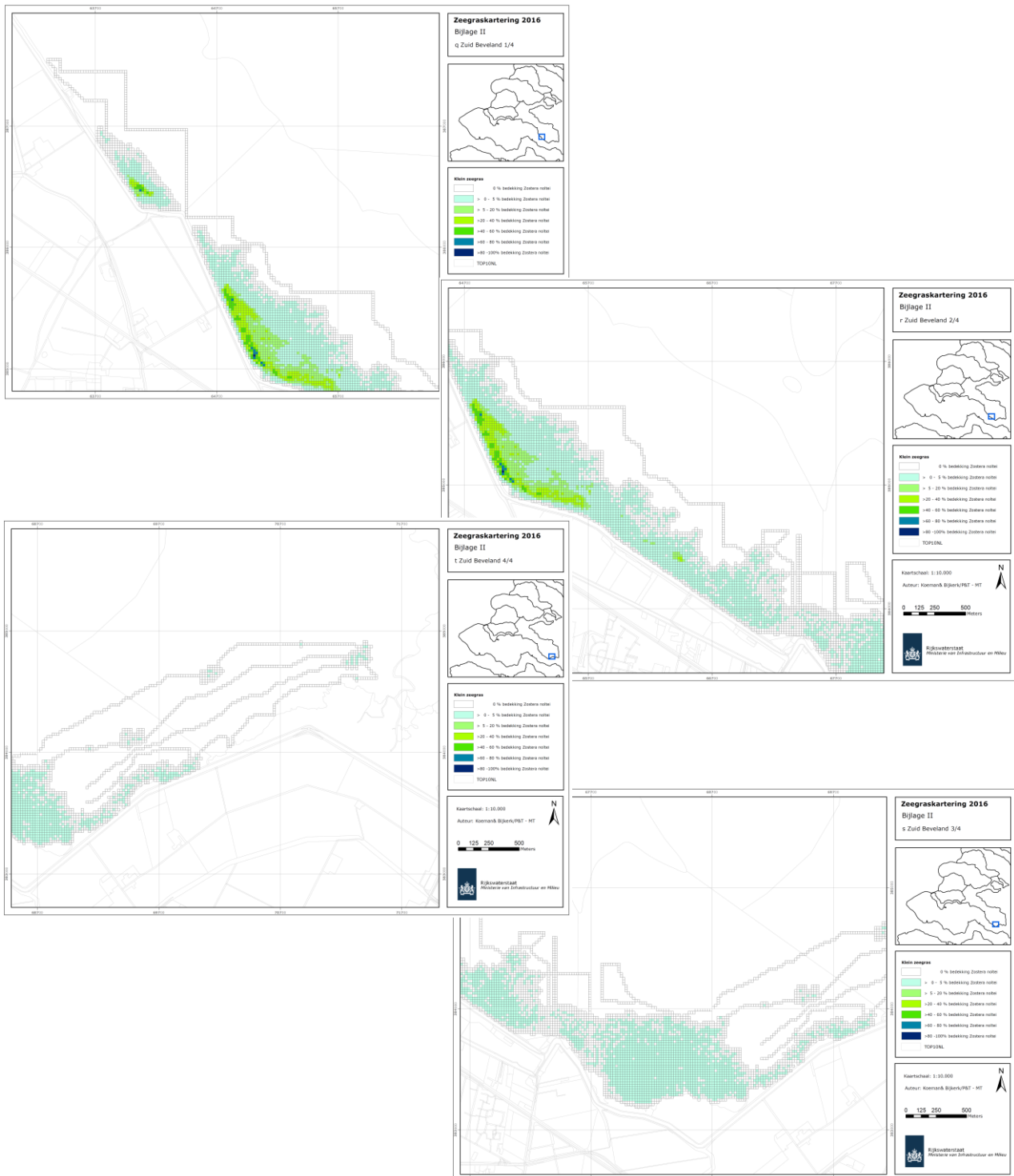
In Oosterschelde bevinden zich zo'n 465 ha aan schorren (situatie 2013, Jentink 2017). In de kom bevindt zich zo'n 25% van de schorren, met schorvegetaties langsheen het Verdrongen Land van Zuid-Beveland bij Roelshoek (25 ha) en Rattekaai (126 ha) (Figuur 15). Een deel van de schorren is verdedigd met een schorrandverdediging in de vorm van stenen dammetjes die voor het schor zijn aangelegd.



Figuur 15. Schorvegetaties bij Roelshoek (boven) en Rattekaai (onder) (Jentink, 2017). Voor de ligging van beide gebieden zie Fig. 13.

2.5.5 Zeegrasvelden

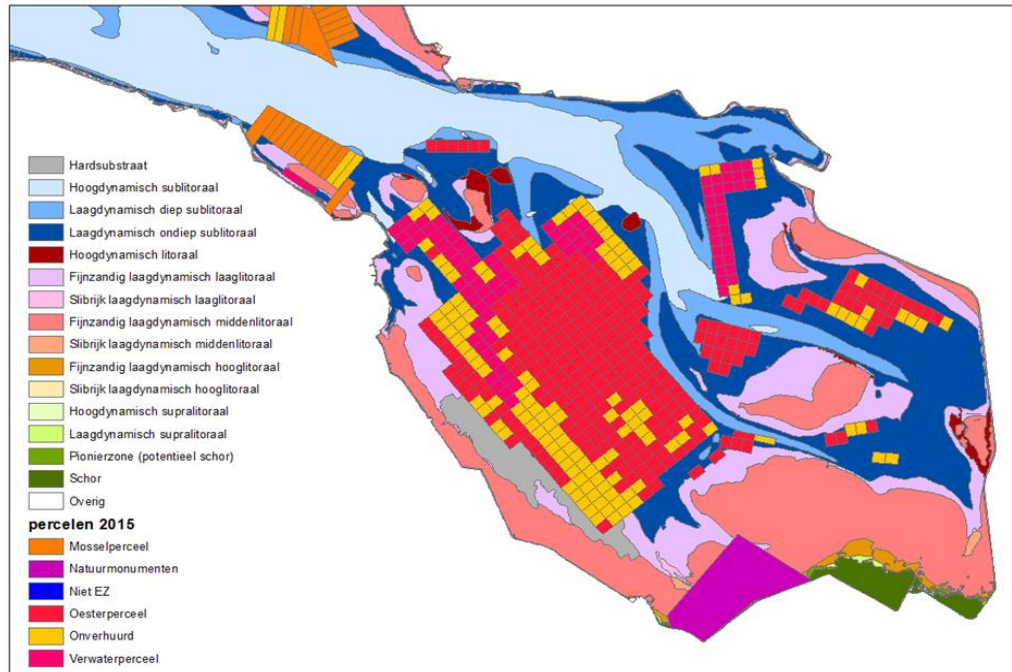
De Kom van de Oosterschelde is een belangrijk gebied voor klein zeegras. Langs het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komt zo'n 184 ha klein zeegrasvelden voor (op een totaal in de Oosterschelde van 780 ha) (Koeman en Bijker, 2016) (Figuur 16), vooral in het noordwestelijke deel van het gebied. Op de Oesterdam suppletie komt sinds 2016 ook beperkt klein zeegras voor.



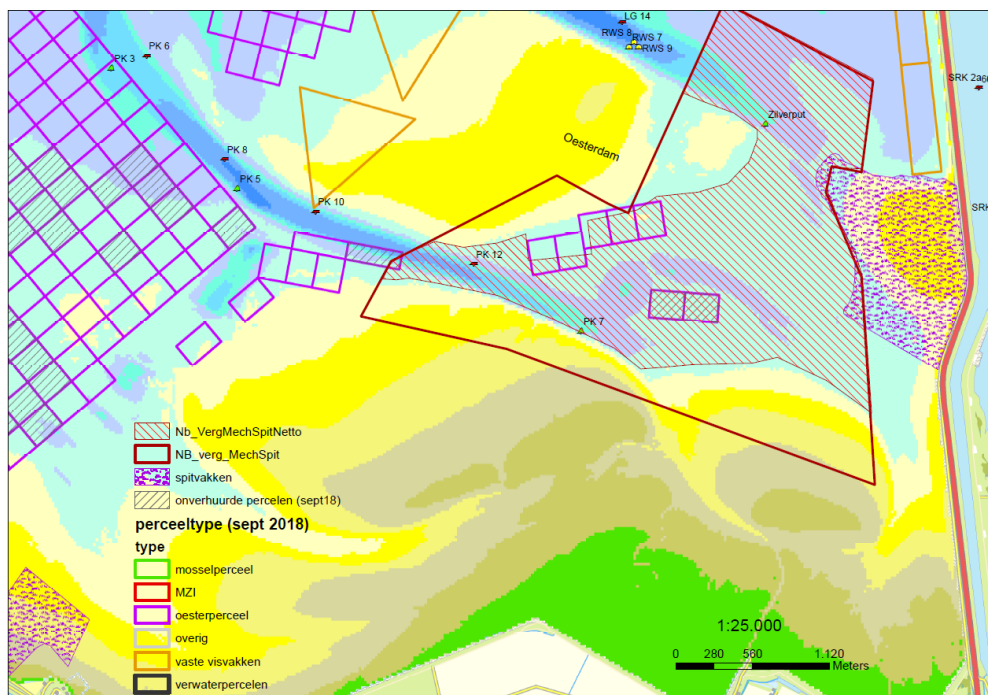
Figuur 16. Zeegrasvelden langs het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (Koeman en Bijker, 2016).

2.6 Functies/Menselijk gebruik

In de Kom bevinden zich geen percelen voor de kweek van mosselen. Wel verwateren kwekers hier hun mosselen op de verwaterpercelen voor ze ter consumptie verhandeld worden. In de kom liggen kweekpercelen voor oesters (Figuur 17). Daarnaast zijn er pierenspit gebieden op de intergetijdengebieden bij de Oesterdam en Roelshoek en vindt er mechanische pierenvisserij plaats (Figuur 18). Bij de Oesterdam suppletie bevindt zich ook een belangrijk surf- en kitesurfgebied en komen veel (dag)recreanten voor.



Figuur 17. Oester en mossel kweek- en verwaterpercelen. Onderliggende ecotopen kaart uit 2016.



Figuur 18. Pierenspit gebieden en vergund gebied voor mechanische pierenvisserij.

3 Afwegingskader

Uit de doelstellingen van Natuurmonumenten en de beschikbare kennis is een afwegingskader afgeleid om een objectieve en onderbouwde keuze mogelijk te maken voor natuurbouw met sediment in de Kom van de Oosterschelde. Natuurbouw met sediment kan op verschillende manieren. Wat het beste is – dat wil zeggen het meest voldoet aan de doelstellingen binnen de gestelde randvoorwaarden – zal afgewogen moeten worden. Hierbij hoort ook een beoordeling en afweging van de mogelijke neveneffecten. Een dergelijke afweging is waar mogelijk gebaseerd op kwantificeerbare indicatoren en waar nodig gebaseerd op kwalitatieve deskundigenoordelen. In beide gevallen dient de onderbouwing wetenschappelijk verantwoord te zijn, waarbij expliciteren van de mate van (on)zekerheid een belangrijke rol speelt.

Het algemene afwegingskader is afgeleid door 6 vragen te beantwoorden, waarbij literatuur en gesprekken met projectdeelnemers en experts als informatiebron zijn gebruikt:

1. Wat is het doel van de ingreep?
2. Voor welk type maatregel wordt gekozen?
3. Op welke manier wordt de maatregel uitgevoerd?
4. Welke type sediment is beschikbaar? Voor welk doelhabitat kan de maatregel worden uitgevoerd?
5. Welke andere menselijke gebruiken of andere omgevingsfactoren sluit een maatregel uit?
6. Technische beperkingen

Hieronder staan de vragen verder uitgewerkt.

3.1 Doel van de ingreep

Het doel van een Natuur Impuls Oosterschelde kan verschillend zijn. Binnen deze studie gaan we uit van natuurbehoud of natuurversterking van het intergetijdengebied in de Kom van de Oosterschelde. M.a.w., de focus is op het tegengaan van de negatieve effecten van de zandhonger in de Oosterschelde. Specifiek richt Natuur Impuls Oosterschelde zich op het behoud van eroderende slikken en zandplaten in de Kom van de Oosterschelde als foerageergebied voor steltlopers. Voor steltlopers is het foerageerareaal en de voedselbeschikbaarheid van belang. Voedselbeschikbaarheid wordt enerzijds bepaald door de aanwezige hoeveelheid (geschikt) voedsel (met name bodemdieren), en anderzijds door de beschikbare foerageertijd per laagwaterperiode. Door de zandhonger, in combinatie met zeespiegelstijging, neemt de beschikbare foerageertijd af in de Oosterschelde, en leidt dit op termijn tot een verkleining van de draagkracht van de Oosterschelde voor steltlopers en zullen de aantallen afnemen. Een ingreep richt zich dus met name het best op behoud van areaal en foerageertijd, en met name behoud van de droogvalduurklasse 40-80% lijkt hierbij belangrijk te zijn, omdat hier de biomassa aan voedsel voor vogels groot is en de vogels nog voldoende lang kunnen foerageren (de Ronde et al. 2013).

Natuurversterking focust zich op het veerkrachtiger maken van het natuurlijke systeem t.a.v. klimaatverandering, met name zeespiegelstijging. Randvoorwaarde voor natuurversterking is een lange termijn inspanning. De effecten van de zandhonger en zeespiegelstijging zullen zich in de toekomst verder manifesteren, en zullen, met het

huidige beheer van de Oosterschelde, blijvende inspanningen vragen voor het behoud van het intergetijdengebied.

3.2 Type maatregel

Het type maatregel gekozen binnen Natuur Impuls Oosterschelde is sediment (her)gebruiken als bouwstof voor natuurbouw en in eerste instantie sediment dat vrijkomt bij de geplande onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek.

3.3 Wijze van uitvoering

Natuurbouw ter behoud van intergetijdengebied middels sediment input kan op twee manieren uitgevoerd worden:

- Reallocatie naar een gewenste doellocatie:
 - Suppletie van een ondiep water/slik/zandplaat tot gewenste hoogte t.b.v. behoud foerageergebied steltlopers.
 - Suppletie van intergetijdengebied (slik) t.b.v. het creëren van schor.
- Reallocatie naar een strategische locatie:
 - Voeden van aanpalende slikken/zandplaten met sediment via natuurlijk sediment transport.
 - Voeden van aanpalende schorren met sediment via natuurlijk sediment transport.

De focus van deze studie richt zich op het behoud van foerageergebied voor steltlopers.

3.4 Doelhabitat i.r.t. beschikbaar sediment

Welk type sediment heb je nodig om het einddoel te bereiken, of andersom, welk type sediment kun je in welk type habitat benutten?

- Voor een suppletie op de doellocatie op een zandplaat of slik bepalen de lokale hydrodynamische condities en lokale sedimentsamenstelling welk type sediment het meest geschikt is. Beschutte slikgebieden zijn doorgaans wat slibrijker dan meer geëxponeerde zandplaten. Op slikken zie je vaak een gradiënt met hoogte, hogerop in het profiel wordt het sediment fijner. Als vuistregel kun je stellen dat gesuppleerd sediment dat de samenstelling van het lokale sediment benadert het meest geschikt is. Fijner sediment heeft het risico dat de fijne fractie snel uitgespoeld en getransporteerd wordt met de waterbeweging. Grover sediment kan dan weer ecologisch minder interessant zijn, door bijv. snellere uitdroging van het sediment. Overigens is dit een veel complexer proces en hangt van allerlei factoren af (cohesiviteit, bulk density, etc.). Mits golf reducerende maatregelen getroffen worden kan slibrijker sediment beschermd worden tegen uitspoeling.
- Voor het voeden van een slik of schor via natuurlijk sediment transport moet het sediment via de waterbeweging getransporteerd worden naar het gewenste intergetijdengebied. Sediment met te grove korrelgrootte bezinkt snel naar de bodem terwijl slib langer in de waterkolom blijft en daardoor verder getransporteerd kan worden. Onder normale omstandigheden heeft slibrijk sediment meer potentie om over grotere afstanden getransporteerd te worden, terwijl bij extremere omstandigheden (bijv. stormen) ook zandig materiaal kan getransporteerd worden. In van nature hoogdynamische gebieden kan ook zand getransporteerd worden.

3.5 Randvoorwaarden

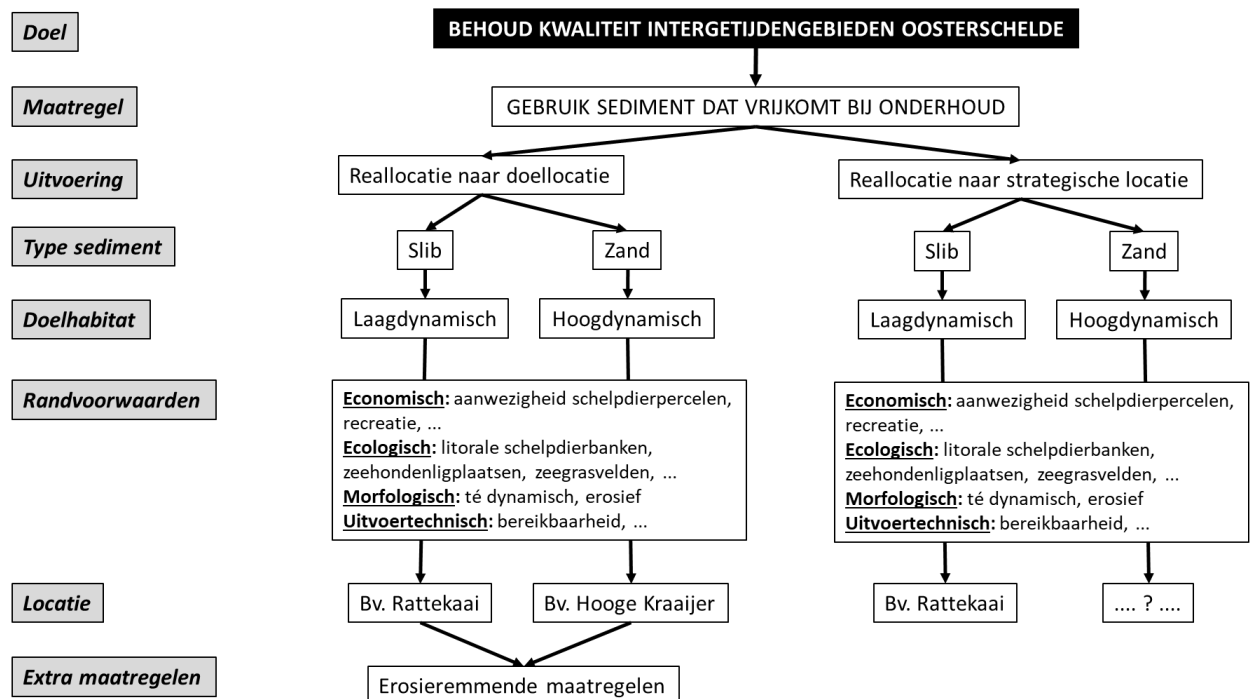
Bepaalde economische activiteiten of menselijk gebruik kunnen leiden tot aanpassing van een ingreep, dan wel volledig uitsluiten van een ingreep. Voorbeelden van economische activiteiten in de Kom van de Oosterschelde zijn (1) de aanwezigheid van kweekpercelen voor schelpdieren, (2) kreeftenvisserij, (3) mechanische pierenvisserij, en (4) weervisserij. (Tijdelijke) vertroebeling van het water kan bijvoorbeeld leiden tot negatieve effecten voor schelpdierkweek. Ook recreatieve functies kunnen belemmerend werken. In de Kom van de Oosterschelde bevinden zich gebieden voor pierensteken, zijn er windsurf en kitesurf locaties, duiklocaties en komen veel (dag)recreanten voor.

Naast socio-economische randvoorwaarden kunnen ook ecologische en morfologische randvoorwaarden spelen. Ecologische randvoorwaarden focussen zich bijvoorbeeld op het behoud van reeds aanwezige kwetsbare natuur, zoals zeegrasvelden, schelpdierbanken of zeehonden ligplaatsen. Morfologische randvoorwaarden kunnen zijn dat het gebied té dynamisch of erosief is voor de levensduur van de maatregel. Dit kan eventueel gemitigeerd worden door aanvullende maatregelen, bijvoorbeeld stabiliserende of golfremmende maatregelen. Verder zijn er nog cultuurhistorische randvoorwaarden zoals de aanwezigheid van verdronken dorpen.

3.6 Technische beperkingen

Een belangrijke randvoorwaarde is dat de maatregel technisch uitvoerbaar moet zijn. Daarbij horen ook de kosten die een maatregel met zich mee brengt (cost-benefit).

In onderstaand schema wordt als voorbeeld een uitgewerkt afwegingskader getoond voor een sediment ingreep in de Kom van de Oosterschelde:



4 Suppletievarianten

4.1 Sediment als bouwstof

Gedurende de laatste decennia is meer nadruk komen te liggen op het gebruik van sediment als grondstof binnen het waterbeheer en het natuurbehoud. Sinds begin 21ste eeuw wordt sediment ingezet als nature-based solution voor het creëren, herstellen en/of versterken van (de veerkracht van) habitats. Onder aquatische omstandigheden zijn toepassingen van sediment als nature-based solution onder meer afhankelijk van sedimentsamenstelling, lokale hydrodynamische omstandigheden (golven en stroming) en aanwezigheid van vegetatie. Golven kunnen sediment in suspensie brengen waarna stroming en golven sediment kan transporteren. Aanwezigheid van vegetatie kan leiden tot het invangen en vasthouden van sediment, maar ook andere zogen. Biobouwers zoals oesterriffen en mosselbanken kunnen sediment invangen en vasthouden. Het inzetten van sediment als nature-based solution vergt inzicht in lokale natuurlijke processen en natuurlijke variatie. Er is geen standaard oplossing die overal werkt, maatwerk is noodzakelijk.

4.1.1 Technieken

Afhankelijk van het beoogde doel, zijn er verschillende technieken in te zetten voor het aanbrengen, dan wel vasthouden van sediment t.b.v. behoud van (eroderend) intergetijdengebied:

- Reallocatie naar de doellocatie: sediment wordt getransporteerd en gepompt of gestort op de doellocatie, bijvoorbeeld een suppletie zoals uitgevoerd bij de Galgeplaat en Roggenplaat (Van der Werf et al., 2015; 2019).
- Reallocatie naar een strategische locatie: Sediment wordt op een strategische locatie gestort waarna lokale natuurlijke processen het sediment verder verspreiden naar de doellocatie, bijvoorbeeld de slibmotor Koehoal t.b.v. kwelderontwikkeling bij Harlingen (Baptist et al., 2019).

Combinatie van beide voorgaande technieken: in sommige gevallen wordt sediment gestort op een locatie met als doel lokaal het habitat te versterken maar op termijn ook het omliggende, niet gesuppleerde habitat te voeden. Een voorbeeld is de Oesterdam suppletie (

- Figuur 19) in de Oosterschelde t.b.v. behoud van slik als foerageergebied voor steltlopers (Boersema et al., 2018).
- Erosieremmende of invang bevorderende maatregelen: het natuurlijk vermogen sediment in te vangen en te behouden in het systeem verbeteren middels het aanleggen van structuren. Deze structuren kunnen natuurlijk (bijv. vegetatie, oesterriffen) dan wel artificieel (bijv. strekdammen) zijn. Voorbeelden zijn de strekdammen langs de Westerschelde ter bevordering van laagdynamisch intergetijden ontwikkeling of oesterriffen in de Oosterschelde t.b.v. behoud van slik.

Het grote verschil tussen reallocatie naar een doellocatie of strategische locatie zit zowel in de ruimtelijke als temporele component. Direct aanbrengen van sediment op de doellocatie brengt het sediment direct op de juiste locatie en gewenste (aanvangs)hoogte, en het ruimtebeslag beperkt zich in principe tot de gekozen oppervlakte. Lokaal is de ecologische schade tijdelijk groot maar na herstel heeft deze maatregel, afhankelijk van hoe lang het sediment blijft liggen, een vrij lange levensduur. M.a.w., een langetermijn rendement. Uiteindelijk zal het sediment, bij verderzetting van zandhonger en zeespiegelstijging, uit het gesuppleerde gebied verdwijnen, maar

mogelijk nog een hele tijd in het intergetijdengebied blijven. Daarmee kan het ook nog een voedende werking hebben op de rest van het intergetijdengebied.

Aanbrengen op een strategische locatie is een meer diffuus proces. Het sediment wordt lokaal op een locatie aangebracht waarna het zich verspreidt over een veel groter doelgebied. In hoeverre het doelgebied gevoed wordt hangt van velerlei factoren af, waaronder lokale getijdestromingen en golfwerking. Hierdoor is het moeilijker voorspelbaar of het sediment binnen het gewenste doelgebied terecht komt. Lokaal is er, net als bij suppleren op de doellocatie, een grote verstoring (i.e. op de locatie waar het sediment wordt neergelegd). Wordt het storten in het sublitoraal uitgevoerd, dan is de verstoring in het intergetijdengebied minimaal. Om het doelgebied over een langere, zeg meerdere jaren te voeden, zal er herhaaldelijk in de tijd moeten worden gesuppleerd.

Uiteraard zijn tussenvarianten tussen beide types varianten denkbaar. Algemeen kan gesteld worden dat zandig tot matig slibrijk sediment beter geschikt is voor gebruik op doellocatie, want zal beter ter plaatse blijven liggen, en zeer slibrijk sediment beter geschikt is op strategische locaties van waaruit het slib zich kan verspreiden naar een groter doelgebied. Maar dit wordt ook in belangrijke mate bepaald door de lokale omgevingscondities.

Daarnaast zijn bijkomende maatregelen denkbaar die het aangebrachte sediment langer kunnen vasthouden (voor het bijv. weer weg erodeert). Dit kunnen bijv. biogene structuren zijn zoals oesterriffen (zie voorbeeld bij Oesterdam suppletie, Figuur 19) of strekdammen (zie voorbeeld bij suppletie Schelphoek).



Figuur 19. Suppletie bij de Oesterdam met vier oesterriffen. Foto: Edwin Paree (RWS).

4.1.2 Natuur Impuls Oosterschelde

De samenstelling van het beschikbare sediment bepaalt in belangrijke mate de toepassingsmogelijkheden en er zal dus steeds gezocht moeten worden naar de meest geschikte toepassing (zie boven). Dit vereist maatwerk. In de meeste gevallen blijkt dat het te baggeren sediment bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor vaargeulen en havens uit relatief slibrijk zand bestaat, wat anders is dan het zandige sediment dat tot nu toe gebruikt wordt bij suppleties in de Oosterschelde. Dit is ook het geval voor het op te baggeren sediment uit de vaargeul in de Zandkreek.

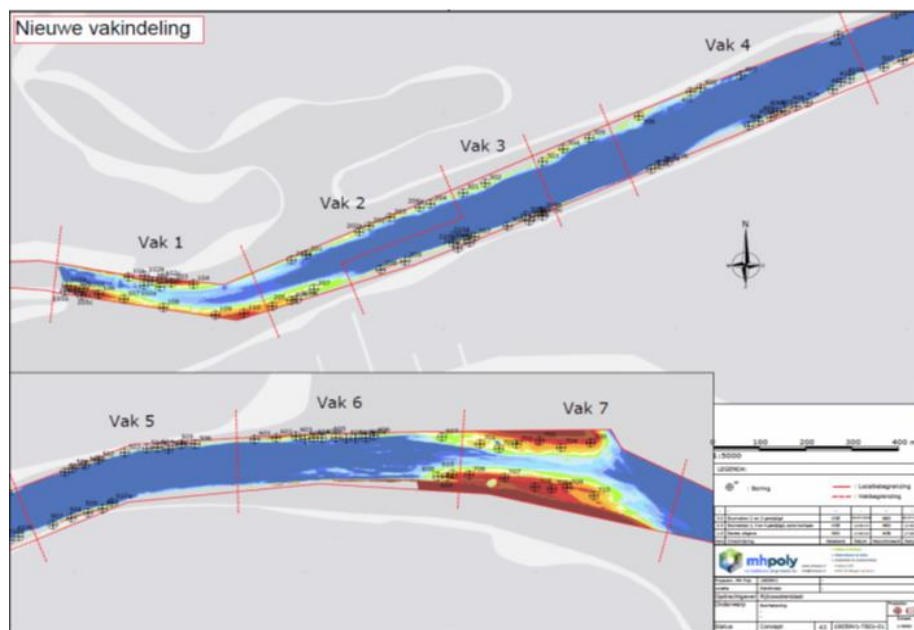
In tegenstelling tot bouwen met zand is bouwen met slibrijk sediment geen 'common practice' en bestaat er een grote kennislacune rondom het inzetten van slibrijk sediment voor natuurherstel. Nochtans zal in de toekomst vaker slibrijk sediment ter beschikking komen omwille van bovengenoemde activiteiten. Het gedrag van slibrijk sediment t.o.v. zand is anders en daarmee ook de morfologische en ecologische effecten. Slib vormt een belangrijke component voor het ecologisch functioneren van estuaria en kustgebieden. Dit uit zich op verschillende manieren. Slib komt enerzijds in suspensie in de waterkolom voor en anderzijds vormt het een belangrijk onderdeel van de sediment matrix van de waterbodem. Slib in suspensie bepaalt de troebelheid van het water en heeft daarmee effecten op primaire productie, maar ook op bijv. filter feeders (bijv. mosselen, oesters, kokkels) die afhankelijk zijn van het fytoplankton als voedsel. Voldoende slib in de waterkolom zorgt er bijv. ook voor dat schorren ophogen en kunnen meegroeien met zeespiegelstijging. Slibrijke sedimenten zijn cohesief en daardoor moeilijker te eroderen.

In de intergetijdengebieden ontwikkelen diatomeeën (kiezelwieren) zich goed op slibrijke sedimenten en maken op hun beurt sedimenten minder erosiegevoelig. Het microphytobenthos vormt tevens een belangrijke voedselbron voor heel wat bodemdieren (bijv. wadpier, nonnetje, slijkgarnaal, wadslakje, etc.). Op hun beurt vormen deze bodemdieren een belangrijke voedselbron voor heel wat vis- en vogelsoorten. In het algemeen kan gesteld worden dat fijnzandige/slibrijke sedimenten, in combinatie met relatief laagdynamische (m.b.t. getijdenstromingen en golven) omstandigheden, doorgaans een hoge primaire en secundaire productie kennen en als biologisch rijk kunnen gekenmerkt worden. Hier komen de grootste aantallen en biomassa's aan bodemdieren voor die het voedsel vormen voor steltlopers en andere soorten watervogels. Heel slibrijke en slappe bodems kunnen dan weer minder geschikt zijn voor bodemdieren, omdat bodemdieren zich moeilijk kunnen handhaven in dit type sedimenten, bijv. doordat gangenstelsels of kokers waarin de dieren leven niet kunnen gebouwd worden.

4.2 Beschikbaar sediment Zandkreek

Er zijn zeven vakken onderscheiden in de te baggeren zone in de Zandkreek (Figuur 20). Zintuigelijk wordt het sediment als volgt omschreven: "De te baggeren waterbodem bestaat ter plaatse van vak 1 t/m 7 uit slib. In vak 4 en 5 is in een aantal boringen ook zandlagen aangetroffen. De consistentie van het slib is beschreven als matig vast. Het aangetroffen zand in vak 4 en vak 5 is beoordeeld als matig fijn" (MH Poly, 2019). Een aantal foto's van het sediment, genomen tijdens de Navicula cruise op vrijdag 27 september door het NIOZ staat in Figuur 21.

Middels een aantal boringen per vak is de sedimentsamenstelling bepaald (Tabel 1). Het slibgehalte (% < 63 μm) varieert tussen 17,4 en 86,0%. In totaal is er maximaal 193.000 m^3 te baggeren sediment in de Zandkreek. Zestig procent hiervan (116.000 m^3) bestaat uit sediment met een slibfractie > 40%. Sediment met een hoge slibfractie bevindt zich in de vakken 1 t/m 5.



Figuur 20. De zeven vakken in de Zandkreek die gebaggerd dienen te worden.



Figuur 21. Indruk van de sedimentsamenstelling in de Zandkreek. Bron: NIOZ Navicula cruise, 27 september 2019.

Tabel 2. Sedimentsamenstelling van het te baggeren sediment in de Zandkreek. Bron: MH Poly, 2019.

Vak	Separaat monster	Hoofdgrondsoort	Monstertraject (m –wb)	<2 µm (%)	<16 µm (%)	<32 µm (%)	<63 µm (%)	<250 µm (%)
1	102-1		0 - 0,5	22,0	78,2	80,3	83,9	98,7
	102-2		0,5 - 1,0	45,4	69,7	77,4	86,0	99,0
	102-3		1,0 - 1,5	39,3	56,0	63,9	71,5	99,5
	102-4		1,5 - 2,0	25,2	37,5	43,3	50,7	99,4
2	204-1		0 - 0,5	20,2	33,0	41,7	53,4	99,6
3	309A-1		0 - 0,5	25,8	36,4	42,9	55,5	99,4
	309A-2		0,5 - 1,0	45,4	67,8	75,6	84,9	99,4
	309A-3		1,0 - 1,5	31,5	46,6	55,3	66,4	99,1
	309A-4		1,5 - 2,0	44,4	57,4	62,8	68,9	98,1
4	410-1		0 - 0,5	15,6	21,5	25,3	31,9	99,2
	410-2		0,5 - 1,0	25,0	36,4	41,8	50,3	98,7
5	504-1		0 - 0,5	15,6	21,3	25,1	31,8	99,2
	504-2		0,5 - 1,0	29,0	40,0	45,4	56,3	99,0
6	604-1		0 - 0,5	11,2	15,6	17,0	22,3	99,3
	604-2		0,5 - 1,0	14,7	23,6	26,9	33,6	98,8
7	703-1		0 - 0,5	9,2	11,7	14,4	17,4	99,4
	703-2		0,5 - 1,0	10,0	15,0	17,2	22,0	99,5
	703-3		1,0 - 1,5	16,8	23,8	27,2	34,4	99,3

De karakteristieke diameters van de zandfractie zijn bepaald door een lineaire interpolatie op een logaritmische schaal, zie Tabel 3. De gemiddelde D10, D50 en D90 van de zandfractie is 0.07, 0.13 en 0.23 mm, respectievelijk. Het betreft dus fijn zand.

Tabel 3. Karakteristieke diameters van de zandfractie. Bron: MH Poly, 2019.

Vak	Monster	Pzand (%)	D _{10,zand} (mm)	D _{50,zand} (mm)	D _{90,zand} (mm)
1	102-1	16	0.07	0.13	0.24
	102-2	14	0.07	0.13	0.24
	102-3	29	0.07	0.13	0.22
	102-4	49	0.07	0.13	0.22
2	204-1	47	0.07	0.13	0.22
3	309A-1	45	0.07	0.13	0.22
	309A-2	15	0.07	0.13	0.23
	309A-3	34	0.07	0.13	0.23
	309A-4	31	0.07	0.13	0.24
4	410-1	68	0.07	0.13	0.22
	410-2	50	0.07	0.13	0.23
5	504-1	68	0.07	0.13	0.22
	504-2	44	0.07	0.13	0.22
6	604-1	78	0.07	0.13	0.22
	604-2	66	0.07	0.13	0.22
7	703-1	83	0.07	0.13	0.22
	703-2	78	0.07	0.13	0.22
	703-3	66	0.07	0.13	0.22
gemiddeld		49	0.07	0.13	0.23

Tabel 4 geeft een overzicht van de te baggeren hoeveelheden en de gemiddelde slibpercentages per stortvak. Sommige stortvakken hebben een zeer slibrijk sediment, andere vakken duidelijk minder.

Tabel 4. Te baggeren volumes en gemiddeld slibgehalte per stortvak in de Zandkreek. Bron: Thijs van Kessel.

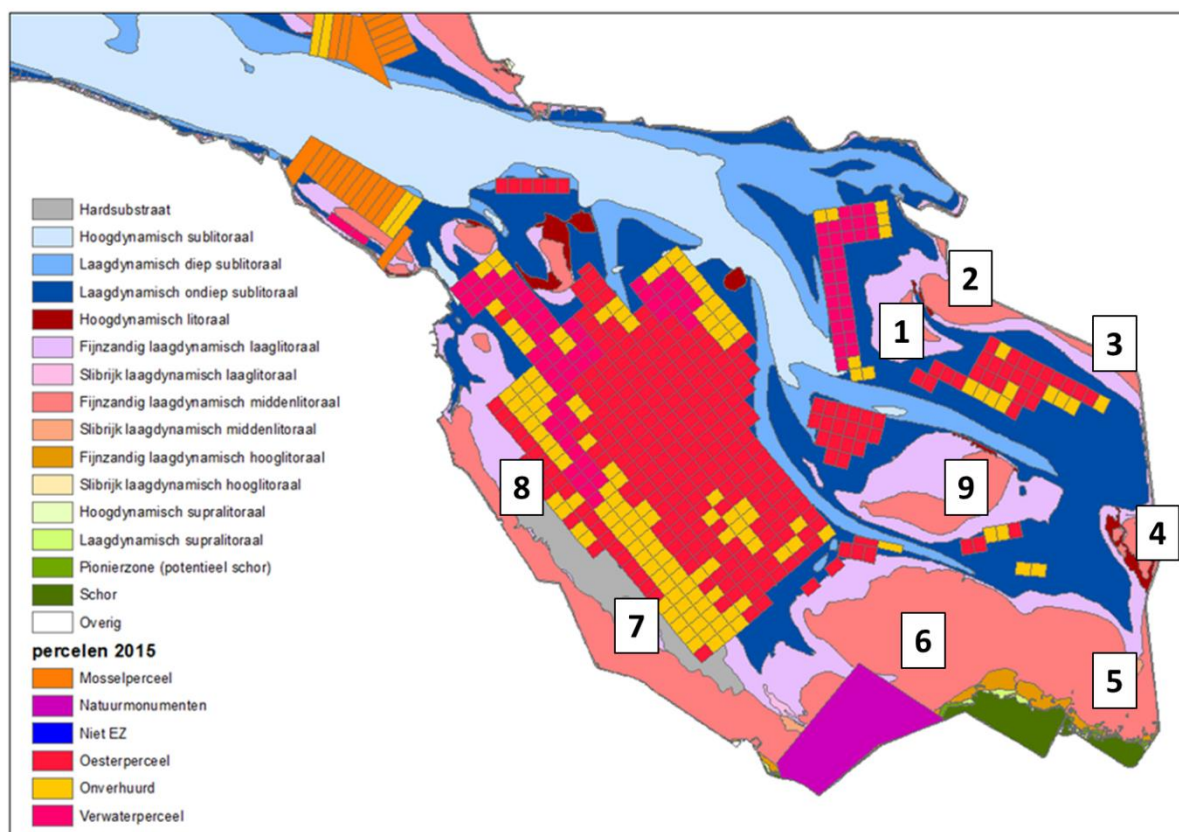
Stortvak	volume	%slib
1	21004	73
1	21467	73
2	6672	53
3	15927	69
3	6376	69
4	20374	41
5	24753	44
6	29296	28
7	47232	25

4.3 Mogelijke suppletiegebieden

De kaart in Figuur 22 geeft negen verschillende intergetijdengebieden weer in de Kom. Een lijst van potentiële gebieden die in aanmerking komen voor natuurbouw zijn tot stand gekomen tijdens de deskundigenbijeenkomst van 21 oktober 2019. Het moet benadrukt worden dat hier voor een conservatieve benadering is gekozen op basis van een deskundigenoordeel gebruik makend van beschikbare kennis, en er geen gedetailleerde analyses aan ten grondslag liggen. Dit betekent ook dat mogelijk gebieden die nu afvallen in potentie wel in aanmerking komen voor natuurbouw met sediment.

Hieronder wordt per gebied (Figuur 22), op basis van het afwegingskader, welke intergetijdengebieden al dan niet in aanmerking komen voor natuurbouw met sediment in het kader van Natuur Impuls Oosterschelde:

1. Op basis van zijn ligging een hoogdynamisch gebied. Natuurbouw middels slibrijk sediment zal op deze locatie mogelijk gepaard moeten gaan met extra golfreducerende/erosieremmende maatregelen. Door nabijgelegen verwaterpercelen voor mosselen, welke mogelijk negatieve effecten kunnen ondervinden van sedimentverspreiding, valt dit gebied af voor natuurbouw met sediment.
2. Door zijn ligging aan de lijzijde van gebied 1 is dit een minder hoogdynamisch gebied. Echter ligt ook dit gebied nabij verwaterpercelen die mogelijk negatieve effecten kunnen ondervinden van sedimentverspreiding en wordt dit gebied niet verder meegenomen in deze studie.
3. Door de nabijgelegen oesterpercelen bij de Speelmansplaat wordt ook dit gebied niet meegenomen in deze studie.
4. Omdat de Oesterdam recentelijk (2013) gesuppleerd is met 350.000 m³ sediment wordt dit gebied ook niet meegenomen.
5. Door zijn ligging is dit een laagdynamisch intergetijdengebied met schorren. Sedimentsamenstelling varieert van zandig tot slibrijk. Door zijn ligging, sedimenttype en heersende erosie wordt dit gebied als potentieel voor natuurbouw middels sediment ingeschat.
6. Dit deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland wordt ingeschat als laagdynamisch. Het gebied is onderhevig aan erosie. Sedimenttype varieert van zandig tot slibrijk. In het gebied zijn weinig medegebruikers aanwezig. Aan de noordrand in de Mosselkreek vindt mechanische pierenspitten plaats. Dit gebied wordt op basis van zijn ligging, sedimenttype, en nabijgelegen schor als potentieel gebied voor natuurbouw middels sediment ingeschat.
7. Dit deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland wordt gebruikt voor off-bottom schelpdier teelt. Tevens is het gelegen nabij oesterpercelen en zeegrasvelden. Sediment verspreiding kan mogelijk leiden tot negatieve gevolgen voor medegebruikers en natuur, waardoor dit gebied af valt.
8. Dit gebied is gelegen nabij oesterpercelen en valt om deze reden af voor natuurbouw.
9. De Hooge Kraaijer is een laag gelegen, zanderige, hoog dynamisch plaat onderhevig aan erosie. Door zijn lage liggen en zanderige sedimentsamenstelling is er een potentie voor natuurbouw middels zandig sediment in combinatie met erosieremmende maatregelen. Door de lage ligging is een grote hoeveelheid zand nodig om de plaat voldoende op te hogen. Het gebruik van slibrijk sediment is in dit dynamisch gebied minder aangewezen.



Figuur 22. Indicatie waar al dan niet natuurbouw met sediment mogelijk is in de Kom van de Oosterschelde (op basis van afwegingskader, zie tekst).

De focus komt op basis van deze quick screening te vallen op het Verdrunken Land van Zuid-Beveland ((#5 en #6) en de Hooge Kraaijer (#9), het eerste gebied een groot slikkengebied met in de zuidoostelijke hoek een relatief groot schor, het tweede een grote zandplaat in de Kom van de Oosterschelde (Figuur 22). Beide gebieden verschillen wezenlijk.

4.3.1 Verdrunken land van Zuid-Beveland

Het Verdrunken Land van Zuid-Beveland (waarvan de Rattekaai een onderdeel vormt) is een groot slikken- en schorrengebied. Hier heb je nog de volledige gradiënt van laaglitoraal naar hooglitoraal (zie paragraaf 2.2). Het grootste deel van het gebied bestaat uit fijnzandig laagdynamisch middenlitoraal. Kleine delen zijn gekarteerd als slibrijk. Ook de (beperkte) metingen laten een relatief hoog slibgehalte zien van het sediment.

Toepassingsmogelijkheden voor dit gebied:

Omwille van zijn laagdynamische karakter komt dit gebied in aanmerking voor natuurbouw met slibrijk sediment, en kan gedacht worden aan reallocatie direct naar een eindlocatie (suppletie op het slik) of reallocatie naar een strategische locatie t.b.v. het voeden van het slik en schor (sedimentmotor). Afhankelijk van waar een suppletie komt te liggen, zijn mogelijks erosieremmende maatregelen wenselijk. Dit moet nader onderzocht worden. Sediment t.b.v. een sedimentmotor kan zowel onder de laagwaterlijn als boven de laagwaterlijn worden aangebracht. Welke meest efficiënt is moet nader onderzocht worden.

4.3.2 Hooge Kraaijer

De Hooge Kraaijer is een laaggelegen, zanderige getijdenplaat gelegen in de Kom van de Oosterschelde (zie 2.2. Morfologie). Een groot deel van de plaat wordt geclassificeerd als fijnzandig laagdynamisch laaglitoraal (droogvalduur < 25%). Het centrale deel bestaat uit fijnzandig laagdynamische middenlitoraal. Aan de noordzijde komt een smalle strook hoogdynamisch litoraal voor. Hooglitoraal ecotoop (droogvalduur > 75%) komt op deze plaat niet meer voor. Ondanks het feit dat het gebied grotendeels als laagdynamisch wordt aangeduid is het toch duidelijk een meer zandige plaat dan de slikken bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, met weinig slib in de bodem (zie 2.2. Morfologie). Dit wijst op een meer dynamisch karakter. Deze plaat is onderhevig aan sterke erosie en dreigt zijn foerageerfunctie voor steltlopers te verliezen in de nabije toekomst.

Toepassingsmogelijkheden voor dit gebied:

Omwille van het meer dynamische karakter, het laaggelegen karakter van het gebied en de sterke erosieve trend lijkt een suppletie met zandig sediment, die de droogvalduur herstelt, het meest aangewezen. Hiervoor zijn grote hoeveelheden zand nodig.

4.4 Suppletievarianten

Natuur Impuls Oosterschelde wil gebruik maken van het sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek t.b.v. natuurbouw in de Kom van de Oosterschelde. Dit sediment heeft een overwegend slibrijk karakter, hoewel bepaalde te baggeren zones meer zandig sediment bevatten (vakken 6 en 7, zie 4.2). Het slibrijke karakter van het sediment maakt het geschikt voor toepassing als suppletie op doellocatie in relatief luwe gebieden of als sedimentmotor die als bron dient om een groter slikken- en schorregebied te voeden. Hiervoor lijkt het gebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland het meest geschikt. Het gebruik van slibrijk sediment is in het dynamische gebied van de Hooge Kraaijer minder aangewezen. Dit is tijdens de deskundigenbijeenkomst van 21 oktober 2019 nader uitgewerkt.

In eerste instantie gaan we uit van een suppletievolume van 100.000 m³.

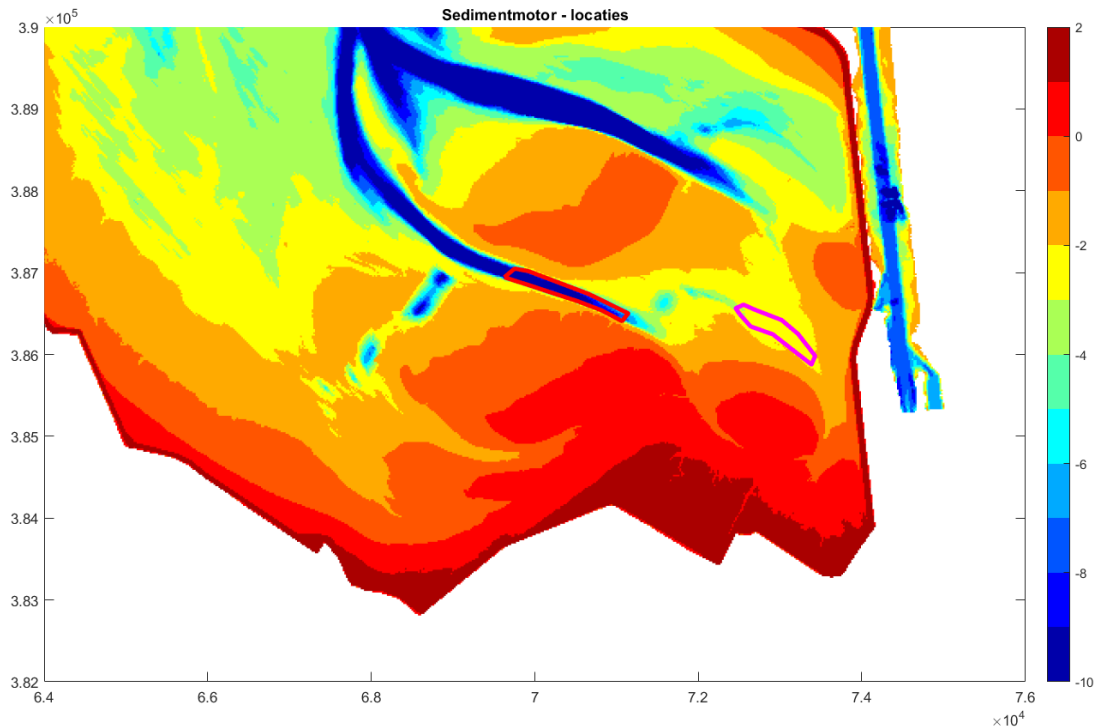
Twee typen alternatieven zijn uitgewerkt: 1) een sedimentmotor, 2) een sedimentsuppletie. Bij een sedimentmotor wordt het sediment op een strategische locatie gestort vanuit waar de slikken en schorren op een natuurlijke manier worden gevoed. Bij een sedimentsuppletie wordt het sediment direct op de doellocatie gestort.

Uitgangspunten zijn:

- De sedimentmotor wordt in het sublitoraal (i.e. dieper dan Gemiddeld Laag Water, GLW) aangebracht. Dit is mogelijk bevorderlijk voor de sedimentverspreiding en dit biedt uitvoer-technische voordelen. De sedimentmotor is gebaat bij relatief slibrijk sediment ter bevordering van de verspreiding.
- De sedimentsuppletie wordt in het litoraal aangelegd, i.e. direct op de gewenste plek, met relatief meer zandige specie zodat het langer blijft liggen en de ecologie zich kan herstellen.
- Om de footprint, het gebied dat bij aanleg verstoord wordt, in te perken is een zo groot mogelijke suppletiedikte gewenst. Voor de aanleg van de sedimentmotor of de suppletie is het niet mogelijk om "heel dik" te suppleren. Daarom wordt gekozen voor een suppletiedikte van 0.5 m, i.e. 20 ha gegeven het suppletievolume.
- Zoveel mogelijk het natuurlijke reliëf volgen ter bevordering van de stabiliteit van het aangebrachte sediment.

Er worden twee varianten van de sedimentmotor onderzocht om het effect van de locatie op de sedimentverspreiding in kaart te brengen (Figuur 23) :

- Aan het einde van de geul ten noorden van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, de Mosselkreek. Hier kan het sediment direct geklept worden. De lokale bodemligging is \sim NAP-10 m. Dit is de meest westelijke locatie die geschikt is voor een onderwatersuppletie. Verder naar het westen wordt ingeschat dat het meeste slib de geul instroomt en niet op het intergetijdengebied terecht komt.
- Gebied ten oosten hiervan, onder de Oesterdam. Hier kan het sediment met ondieper stekende schepen naar toe worden gebracht of via een persleiding vanaf het einde van de Mosselkreek naar toe worden gepompt. Lokale diepte \sim NAP -2-3 m; dit is beneden GLW (Figuur 23).
- Net als bij de suppletie is voor de sedimentmotor uitgegaan van een oppervlak van 20 ha met een dikte van 0.5 m.

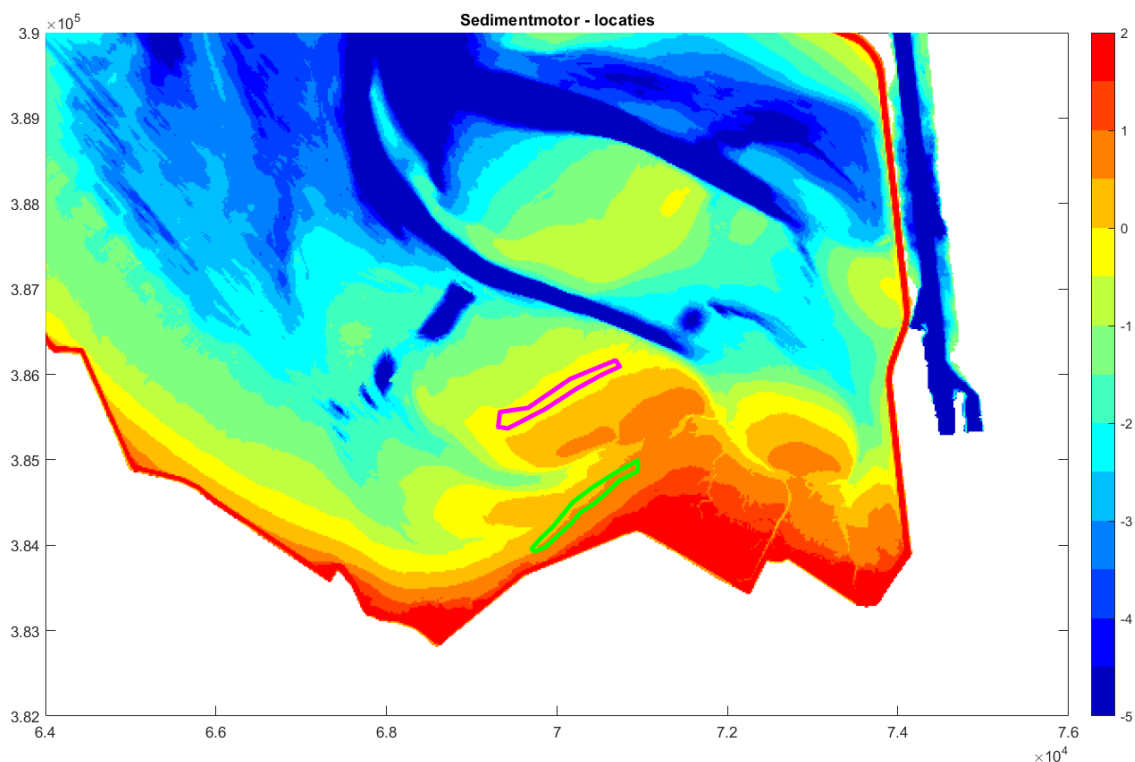


Figuur 23. Locaties sedimentmotor varianten: i) op \sim NAP-10m (rode polygoon), ii) op \sim NAP-2.5m (magenta polygoon).

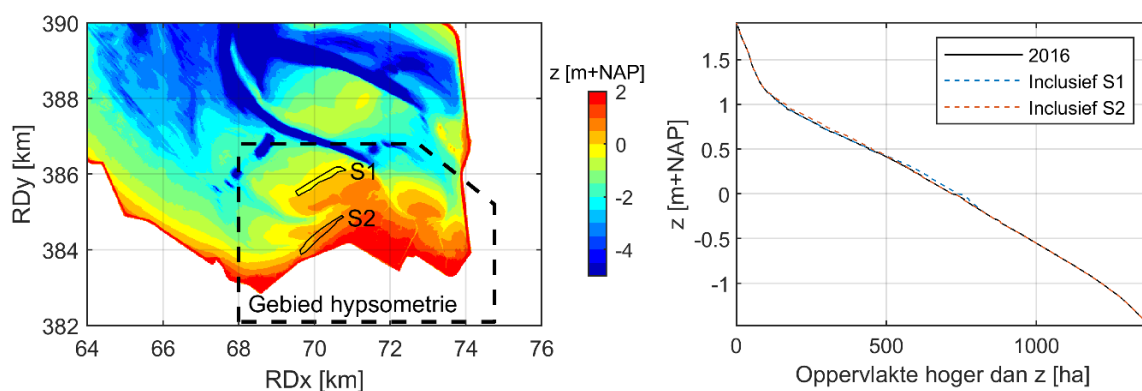
Bij de sedimentsuppleties zijn twee varianten geselecteerd voor een directe versterking van het areaal met 40-80 % droogvalduur (DVD) (Figuur 24):

- Bij de eerste variant, S1, is het uitgangspunt om direct waardevol areaal te creëren. De diepte die correspondeert met een DVD van 50% is \sim NAP -0,1 m. Vanaf deze diepte tot aan de contour "DVD50% -0,4m" wordt een sliblaag van 50 cm aangelegd. Dit is gekozen om een bestendig ontwerp te maken met een marge van 20 cm sediment i.v.m. de huidige erosie van de plaat (1cm per jaar). Zoeklocatie is het gebied ten zuiden van het doodlopen van de Mosselkreek, tegen een hogere rug op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland aan.
- Bij de tweede variant, S2, wordt de suppletie aangelegd t.b.v. het nabijgelegen schor, i.e. hoger en zuidelijker dan de eerste variant. De maximale aanleghoogte is tot 75-80% van de DVD (\sim NAP+1 m).

In Figuur 25 is de hypsometrische curve van het interessegebied gebied getoond, als ook de hypsometrische curves na toepassing van de suppletievarianten op het intergetijdengebied. De varianten met de stortingen in de diepere delen (onder gemiddeld laagwater) zijn niet getoond, omdat die niet direct de hypsometrie van het intergetijdengebied doen veranderen (alleen na transport naar het intergetijdengebied). Zoals zichtbaar vindt er bij variant S1 een toename in oppervlakte plaats tussen ongeveer NAP-0,1 m en NAP+0,4 m van 20 ha. Bij variant S2 is dit ook 20 ha, maar dan tussen ongeveer NAP+0,5 m en NAP+1,0 m.



Figuur 24. Locaties sedimentsuppletie varianten: i) diepere locatie tegen de rug op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (magenta polygoon), ii) hoger gelegen suppletie t.b.v. het schor (groene polygoon).



Figuur 25. Hypsometrische curves ontwerpen. Links: overzichtskaart met de ligging van de twee suppletiealternatieven op het intergetijdengebied. De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Hierin is ook het gebied weergegeven waarvoor de hypsometrische curves zijn bepaald. Rechts: hypsometrische curves van (i) de 2016 bodem, (ii) de 2016 bodem na ophoging van S1 met 0,5 m en (iii) de 2016 bodem na ophoging van S2 met 0,5 m. De hypsometrische curves zijn alleen bepaald voor delen van het intergetijdengebied die boven gemiddeld laagwater (MLW = -1.47 m NAP) en onder gemiddeld hoogwater (MHW = +1.91 m NAP) liggen.

5 Sedimentverspreiding en neveneffecten

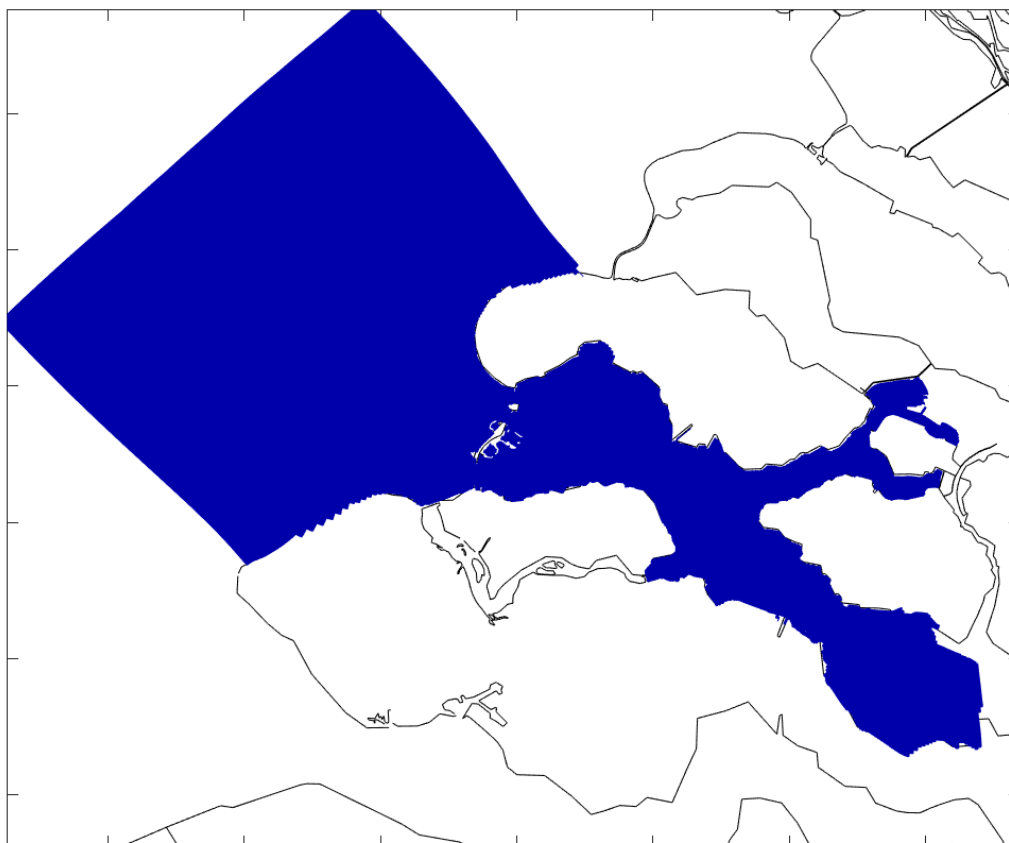
5.1 Slib

5.1.1 Aanpak

Voor de modellering is gebruik gemaakt van een bestaand slibverspreidingsmodel voor de Oosterschelde. Dit is eerder ook gebruikt voor de berekening van het nulalternatief zonder Natuur Impuls, namelijk de reguliere verspreiding van baggerspecie op diep water in de buurt van de Zandkreekgeul (Van Duren et al., 2019). Met het oog op de zelfstandige leesbaarheid van het huidige rapport worden de belangrijkste aspecten van dit model hieronder toegelicht.

Dit model beschrijft alleen de verspreiding van de fijne sedimentfractie ($< 63 \mu\text{m}$) en niet van de zandfractie. Voor de stabiliteit en initiële transportrichting van de zandfractie is een aparte analyse gemaakt (zie paragraaf 5.2).

Het slibmodel is gebaseerd op het hydrodynamische model ScalOost (5^e generatie). Dit is een model dat in het verleden veel gebruikt is voor verschillende doeleinden, goed gevalideerd is en in het beheer en onderhoudssysteem van RWS is opgenomen. Voor de modelscenario's is de 2D versie gebruikt. Het is weliswaar een versimpeling om met diepte-gemiddelde waarden te rekenen in plaats van met verticale profielen, maar de Oosterschelde kent geen stratificatie. Hierdoor is dit model redelijk goed bruikbaar om een eerste indruk te krijgen van slibverspreiding (Van Duren et al., 2019). Het rekendomein is weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26. Rekendomein ScalOost 5e generatie.

Het model bevat geen uitwisseling met het Veerse meer, maar dit heeft nauwelijks invloed op de verspreiding van baggerspecie. Na het storten zinkt het merendeel van de baggerspecie snel naar de bodem als een dichtheidsstroming. Een klein deel mengt echter direct op en wordt direct meegevoerd door de stroming. Het model bevat geen *near-field* effecten zoals sediment gedreven dichtheidsstromingen. Bij de definitie van de brontermen wordt rekening gehouden met dit *near-field* gedrag door 90% van de bronterm aan de bodem toe te kennen en 10% aan de waterkolom. De specie op de bodem kan (voor zover niet afgedekt door latere stortingen) weer eroderen onder invloed van stroming en golven en alsnog bijdragen aan vertroebeling. Slib dat gestort werd en vervolgens elders terecht komt kan dus in het model ook weer opwervelen en zich opnieuw verder verspreiden.

Golven worden in het model berekend met een SWAN-model, integraal gekoppeld aan de hydrodynamische modellering. In de ondiepe gebieden in de oostelijke Kom van de Oosterschelde is de invloed van wind en golven relatief belangrijk ten opzichte van getijstroming. De berekende periode voor stroming en golven is 1 september tot 1 december 2013. Het golf- en stromingsmodel wordt geforceerd met winddata voor dezelfde periode afkomstig van het KNMI-station Stavenisse. Randvoorwaarden m.b.t. waterstanden en stroomsnelheden voor deze periode zijn afkomstig van het DCSMv6-ZUNOV4-model. De slibverspreiding wordt ontkoppeld berekend van de hydrodynamica met Delft3D-WAQ. Voor slibverspreiding in de periode na 1 december wordt de hydrodynamica cyclisch hergebruikt, d.w.z. de hydrodynamica vanaf 1 september wordt weer gebruikt.

Het rooster is curvi-lineair en heeft een resolutie van ongeveer 100×200 m in de oostelijke Kom van de Oosterschelde. Dit geeft voldoende resolutie om elke verspreidingslocatie van 20 hectare uit circa 10 roosterzellen te laten beslaan. Het model heeft twee bodemlagen, waarvan de bovenste laag eigenschappen heeft die deze laag gemakkelijk laten eroderen terwijl de onderste laag meer 'geconsolideerd' is en minder makkelijk erodeert.

Het erosie- en verspreidingsgedrag van de specie kent diverse onzekerheden. Naast de bovengenoemde beperkingen m.b.t. *near-field* bedrag en resolutie kunnen worden genoemd:

- De erosie-eigenschappen van de specie. Deze hangen mede af van de toegepaste bagger- en storttechniek. Deze onzekerheid is ondervangen door verschillende berekeningen te maken voor de boven- en ondergrens van de erosie-eigenschappen. Deze grenzen zijn mede gebaseerd op erosie-onderzoek door het NIOZ op slibmonsters uit de Zandkreekgeul (zie bijlage 2);
- Variaties in wind- en golfdynamiek. Tijdens perioden met harde wind en hoge golven treedt veel meer transport op dan tijdens rustige perioden. De transportrichting is bovendien sterk afhankelijk van de windrichting. Dit is ondervangen door het transport uit te rekenen over een periode van 3 maanden, waarbij het effect van variaties in wind- en golfbelasting wordt uitgemiddeld.
- De depositie-eigenschappen van slib. De snelheid waarmee slib na erosie en transport weer wordt afgezet op de bodem hangt o.a. af van de valsnelheid en de consolidatie- of mengsnelheid van de bodem. In het huidige model is gerekend met 1 slibfractie met een netto depositiesnelheid van 0.1 mm s^{-1} . Ervaring op basis van eerdere bagger- en verspreidingsstudies leert dat een dergelijke waarde het depositiegedrag het dichtst benadert. Een kanttekening is dat de effecten van filtratie van water door schelpdieren niet is meegenomen in de slibmodellering. Door filtratie kan de netto depositiesnelheid hoger worden.

5.1.2 Vier scenario's

Alle vier locaties hebben een afmeting van 20 ha. Bij een suppletievolume van 100.000 m³ betekent dit een laagdikte van 0.5 m. Figuur 23 en Figuur 24 tonen respectievelijk de locaties van de twee slibmotoren en de twee suppleties, namelijk:

- slibmotor oost (smot1)
- slibmotor west (smot2)
- suppletie laag (psup1)
- suppletie hoog (psup2)

Voor de eerste reeks verkennende scenario's zijn de volgende uitgangspunten en modelinstellingen gebruikt:

- duur verspreiding: 2 maanden (storten van 15 november tot 15 januari)
- totale simulatieduur: drie maanden (tot 15 februari)
- verdeling over de verticaal, slibmotor: 10% uniform verdeeld over de waterkolom en 90% aan de bodem (waar vandaan het sediment kan resuspenderen)
- verdeling over de verticaal: suppletie: 100% aan de bodem (waar vandaan het sediment in resuspensie kan gaan)
- effectieve valsnelheid (depositiesnelheid): 0.1 mm s⁻¹
- kritische schuifspanning (τ_{cr}) voor erosie: 0.2 Pa (slibmotor en plaatsuppletie) of 0.4 Pa (slibmotor) en 0.8 Pa (plaatsuppletie)
- erosieparameter: 0.1 g m⁻² s⁻¹
- suppletievolume 100.000 m³
- slibpercentage 46%
- de omrekening van volume sediment naar massa slib is als volgt: 1 m³ sediment = 1000 kg sediment = 460 kg slib.

Er is gekozen voor een hogere τ_{cr} ("lagere erosiesnelheid") voor de plaatsuppletie (0.8 Pa) dan voor de slibmotor (0.4 Pa), ingegeven door de mogelijke sterkere consolidatie op de plaat door droogval.

Voor deze startscenario's is voor de slibmotor en plaatsuppletie een gelijk slibpercentage gebruikt, namelijk het gemiddelde percentage in de baggerspecie uit de Zandkreek. Hiermee is een onderlinge vergelijking van deze scenario's makkelijker.

5.1.3 Van vier naar twee scenario's

De resultaten van deze startberekeningen zijn besproken en beoordeeld tijdens de deskundigenbijeenkomst van 18 november 2019. Resultaten van de eerste reeks berekeningen worden getoond in Bijlage 3. Het gaat om de maximale weekgemiddelde concentratieverhoging in de waterkolom (in mg l⁻¹) en om de opslibbing op de bodem aan het einde van de berekening (in g m⁻²). Op basis van deze berekeningen is tijdens de deskundigenbijeenkomst van 18 november 2019 een selectie gemaakt van de scenario's die verder worden uitgewerkt. Dit zijn de oostelijke variant van de slibmotor (slibmotor oost nabij de Oesterdam) en de laaggelegen suppletie (suppletie laag).

De westelijke variant van de slibmotor (nabij de Mosselkreek) is afgefallen omdat hiervoor meer verlies optreedt naar de geulen (en dus minder slib beschikbaar komt voor de platen) en omdat mogelijk negatieve effecten optreden voor de oesterpercelen bij de Hooge Kraaijer. De hoge variant van de suppletie is afgefallen omwille van het feit dat dit een complexe uitvoering is (lange persafstand van hopper naar suppletielocatie), en dat daardoor naar verwachting het beschikbare budget onvoldoende is om hier 100.000 m³ baggerspecie te plaatsen en een veel kleinere plaatsuppletie te weinig meerwaarde voor de natuur heeft.

Resultaten van de tweede reeks berekeningen worden eveneens getoond in bijlage 3. Bovendien zijn voor deze berekeningen nabewerkingen met GIS uitgevoerd om de

resultaten te tonen in de context van de gebruiksfuncties. Deze figuren zijn hieronder in de hoofdtekst opgenomen.

In Tabel 5 staat de afweging die geleid heeft tot de selectie van de twee varianten.

Tabel 5. Afweging van de vier scenario's.

Doel/draagt bij aan	Slibmotor oost nabij Oesterdam	Slibmotor west in Mosselgeul	Suppletie laag in het litoraal	Suppletie hoog in het litoraal
Behoud dvd areaal Wat komt er terecht tussen de 40-80% dvd	+	0	++	+++
	Uitdrukken in hoeveel er in de geul/dvd klassen terecht komt.	Uitdrukken in hoeveel er in de geul/dvd klassen terecht komt. Komt meer in de geul terecht.	Direct aanbrengen in litoraal. Zand blijft liggen. Slib deels op het slik en deels in de geul.	Direct aanbrengen in litoraal. Zand blijft liggen en blijft langer in litoraal dan lage suppletie. Slib deels op het slik en deels in de geul.
Versterking van schor	+	0	+	++
	Mogelijk wat voeding van slib op de schorren.		Mogelijks wat voeding van slib op de schorren.	Slib komt duidelijk op het schor terecht.
Impact op ander gebruik	0	--	--	-
	geen negatieve effecten verwacht.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen, maar minder dan slibmotor-west en de suppletie-laag.
Ecologische verstoring aanleg	-	-	--	--
	De stortlocatie wordt verstoord. Lokaal bodemleven gaat dood, maar geen direct effect op het foerageergebied voor vogels.	De stortlocatie wordt verstoord. Lokaal bodemleven gaat dood, maar geen direct effect op het foerageergebied voor vogels.	Lokaal bodemleven gaat dood, rechtstreeks foerageergebied voor vogels beïnvloed.	Lokaal bodemleven gaat dood, rechtstreeks foerageergebied voor vogels beïnvloed.
Kosten/CO2	€€	€	€€€	€€€€
	Minder goed bereikbaar dan slibmotor west, waardoor waarschijnlijk duurder.	Waarschijnlijk goedkoopst, door bereikbaarheid.	Specie moet geperst worden met hopper.	Specie moet geperst worden met hopper. Door grotere afstand wschl. booster nodig. Ook meer CO2 (uitstoot groter door booster).
Kennis opbouw	++	+	+++	+++
	Ondanks innovatief en potentieel interessant, bestaat risico dat effecten op de natuur mogelijks moeilijk meetbaar zijn. Verwachte effecten op het litoraal wel groter dan slibmotor west.	Ondanks innovatief en potentieel interessant, heerst de indruk dat effecten op de natuur mogelijks moeilijk meetbaar of zelfs niet meetbaar zullen zijn.	Kennisopbouw wordt groot geacht, innovatie met hergebruik van slibrijk sediment voor natuurbouw. Meeste effecten goed meetbaar. Grote toekomstige potentie.	Kennisopbouw wordt groot geacht, innovatie met hergebruik van slibrijk sediment voor natuurbouw. Meeste effecten goed meetbaar. Grote toekomstige potentie.

Potentie herhaalbaarheid (1x/5jaar)	Slib uit haventjes en beschutte vaargeulen meer geschikt voor slibmotor. Komen waarschijnlijk op meer regelmatige basis beschikbaar.	Slib uit haventjes en beschutte vaargeulen meer geschikt voor slibmotor. Komen waarschijnlijk op meer regelmatige basis beschikbaar.	Meer zanderig materiaal zoals b.v. afkomstig uit vaargeulonderhoud van Brabants-vaarwater meer geschikt voor suppleties. Komen waarschijnlijk op minder regelmatige basis beschikbaar.	Meer zanderig materiaal zoals b.v. afkomstig uit vaargeulonderhoud van Brabants-vaarwater meer geschikt voor suppleties. Komen waarschijnlijk op minder regelmatige basis beschikbaar.
Conclusie	Natuurwinst nog onzeker, maar innovatief (weinig ervaring wereldwijd met slibmotoren), technisch haalbaar, en interessant voor kennisopbouw. Dit scenario is geselecteerd voor nader onderzoek binnen Natuur Impuls.	Natuurwinst wordt klein geacht (rel. weinig slib richting litoraal), terwijl mogelijke negatieve effecten kunnen optreden op nabije oesterpercelen. Is om deze reden niet geselecteerd voor nadere uitwerking t.b.v. Natuur Impuls.	Natuurwinst relatief groot, technisch haalbaar, innovatief en interessant voor kennisopbouw. Dit scenario is geselecteerd voor nader onderzoek binnen Natuur Impuls.	Natuurwinst groot maar technische haalbaarheid is een vraagteken. Complex in uitvoerbaarheid waardoor kosten naar alle waarschijnlijkheid hoog zullen oplopen. Is om deze reden niet geselecteerd voor nadere uitwerking t.b.v. Natuur Impuls.

5.1.4 Gedetailleerde uitwerking twee scenario's

Voor de uitwerking van de overgebleven twee scenario's is een verschillend slibpercentage gehanteerd voor de plaatsuppletie en de slibmotor, namelijk 30% voor de plaatsuppletie en 64% voor de slibmotor. Dit zijn namelijk de slibpercentages van respectievelijk het meest zandige en het meest slibrijke deel van 100.000 m³ van de beschikbare baggerspecie uit de Zandkreek (zie 4.2). Deze differentiatie is doorgevoerd met als doel de twee verschillende scenario's te optimaliseren. Door met minder slibrijk sediment te werken voor de suppletie zal het sediment, met name de aanwezige zandfractie, veel langer blijven liggen op de suppletielocatie, terwijl de slibfractie zich sneller zal verspreiden. Aangezien het voor een slibmotor juist de bedoeling is dat de slibfractie zich verspreid over een groter gebied, zal een groter slibpercentage, en daarmee een groter volume slib, leiden tot meer verspreiding van slib in het gebied. Van de zandfractie is de verwachting dat die veel minder mobiel is en langer ter plaatse zal blijven liggen (zie §5.2).

In de tweede set berekeningen is de slibmotor ook doorgerekend met 190.000 m³ (d.w.z. alle beschikbare specie uit de Zandkreek, met logischerwijs een slibpercentage van 46%, die zich tussen de 30% (suppletie) en 64% (kleine slibmotor met 100.000 m³) bevindt). Voor deze variant is ook gerekend met een dikte van 0.5 m, waardoor de afmeting van deze slibmotor 38 ha bedraagt. Een overzicht van alle uitgevoerde berekeningen is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Overzicht van alle slibverspreidingsberekeningen t.b.v. Natuur Impuls Oosterschelde. De berekening met code R08Z6S03 is al eerder uitgevoerd in het kader van de Zandkreekstudie (Van Duren, 2019) en is hierin ter referentie opgenomen. smot = slibmotor; psub = suppletie

Code	Locatie	Volume (m ³)	Areaal (ha)	Slib (%)	Hoeveelheid slib (kT)	Kritische schuifspanning (Pa)
<i>Modelberekeningen vier scenario's</i>						
R08PH2_1_S01	smot1	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S01	smot1	100.000	20	46%	46	0.4
R08PH2_1_S02	smot2	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S02	smot2	100.000	20	46%	46	0.4
R08PH2_1_S03	psub1	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S03	psub1	100.000	20	46%	46	0.8
R08PH2_1_S04	psub2	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S04	psub2	100.000	20	46%	46	0.8
<i>Modelberekeningen twee scenario's</i>						
R08PH2_2_64_S01	smot1	100.000	20	64%	64	0.2
R08PH2_2_64_S02	smot1	100.000	20	64%	64	0.4
R08PH2_3_S01	smot1	190.000	38	46%	87	0.2
R08PH2_3_S02	smot1	190.000	38	46%	87	0.4
R08PH2_2_30_S03	psub1	100.000	20	30%	30	0.2
R08PH2_2_30_S04	psub1	100.000	20	30%	30	0.8
<i>Referentie</i>						
R08Z6S03	O10	190.000	5	46%	87	0.2

5.1.5 Resultaten berekening slibverspreiding en potentiële effecten

De belangrijkste modeluitvoer is de verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom t.g.v. de verspreidingen en de extra aan- of opslibbing van de bodem die hierdoor ontstaat. Deze uitvoer is ruimtelijk en op diverse tijdstippen beschikbaar. De hier getoonde resultaten zijn de effecten direct na aanleg van het storten van het sediment (na 2 maanden) en aan het einde van de berekening (na 3 maanden).

Het model geeft voor de sliblaag op de bodem de massa per vierkante meter (kg m^{-2}). Om in te kunnen schatten wat dit voor effecten op de bodem geeft moet deze waarde omgerekend worden naar de laagdikte van slib. Dit kan echter variëren, afhankelijk van de toestand van het slib. Voor net afgezet en nog niet geconsolideerd slib is de dichtheid lager en dus de laagdikte groter, dan voor slib dat geconsolideerd is.

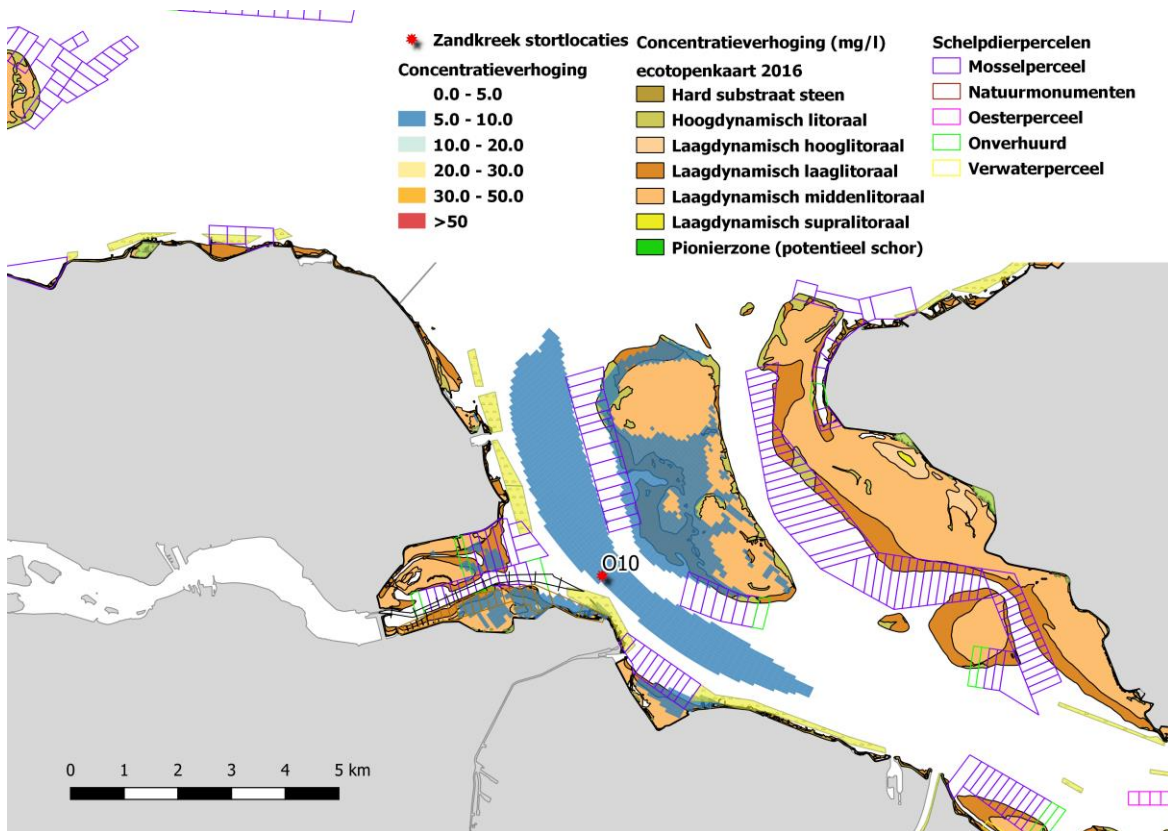
- Net afgezet slib: 1 kg m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 2,5 mm (droge bulkdichtheid van 400 kg/m^3).
- Geconsolideerd slib: 1 kg m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 1,25 mm (droge bulkdichtheid van 800 kg/m^3).

In de figuren is uitgegaan van net gestort slib, resulterend in de grootste laagdikte.

In de komende paragrafen worden de modelresultaten beschreven en een eerste indruk gegeven van de potentiële effecten op de omgeving (positief en negatief), met name effecten op de oesterpercelen. De onderliggende onderbouwing voor de effectbeoordeling is te vinden in eerdere rapportages m.b.t effecten van baggeren van enkele Oosterschelde havens (Van Duren et al., 2019a) en scenario's voor uitbaggeren van de Zandkreek, gebruikmakend van reguliere stortlocaties (Van Duren et al., 2019b). De effecten op natuur worden apart in hoofdstuk 6 beschreven. Effecten op waterkwaliteit van het aanwezige organische materiaal in de baggerspecie zijn niet meegenomen in de modelstudie. Volgens het waterbodemonderzoek is het percentage gemiddeld ca. 5% (percentages variëren tussen 2% en 7%). Vanwege dit relatief lage percentage wordt dit aspect niet als kritisch gezien en is in de modelstudie niet verder meegenomen.

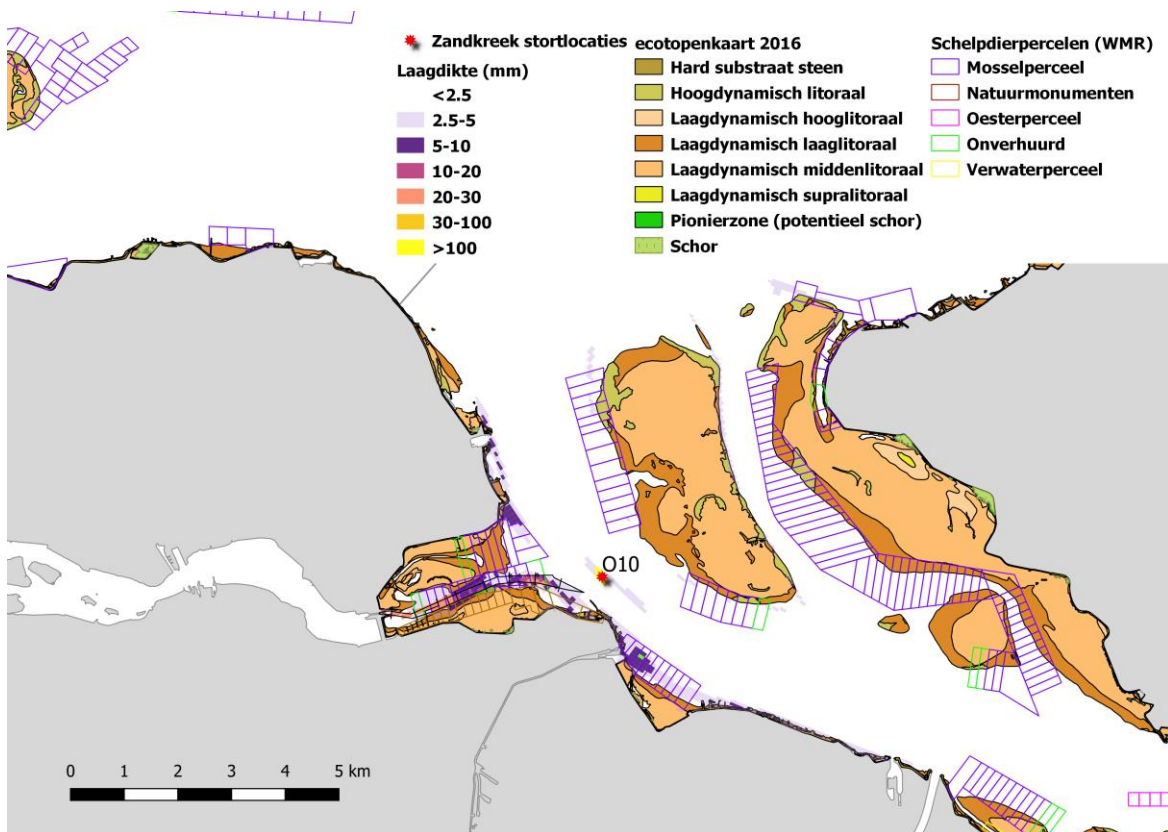
5.1.5.1 Resultaten referentie (R08Z6S03)

In dit scenario wordt alle beschikbare materiaal gestort in het stortvak O10 (Figuur 27). Dit was het scenario dat in een eerdere studie (waarin verschillende combinaties van storten in reguliere stortvakken werd onderzocht) de minste negatieve effecten op de omgeving gaf.



Figuur 27. Maximale weekgemiddelde concentratieverhoging in de waterkolom van scenario R08Z6S03.

In Figuur 27 is te zien dat dit scenario slechts in een beperkt deel een verhoging van de slibconcentratie geeft van tussen de 5 en 10 mg l⁻¹. Dit zijn effecten die vrijwel verwaarloosbaar zijn in termen van zowel natuur- als gebruikers functies (van Duren et al. 2019).

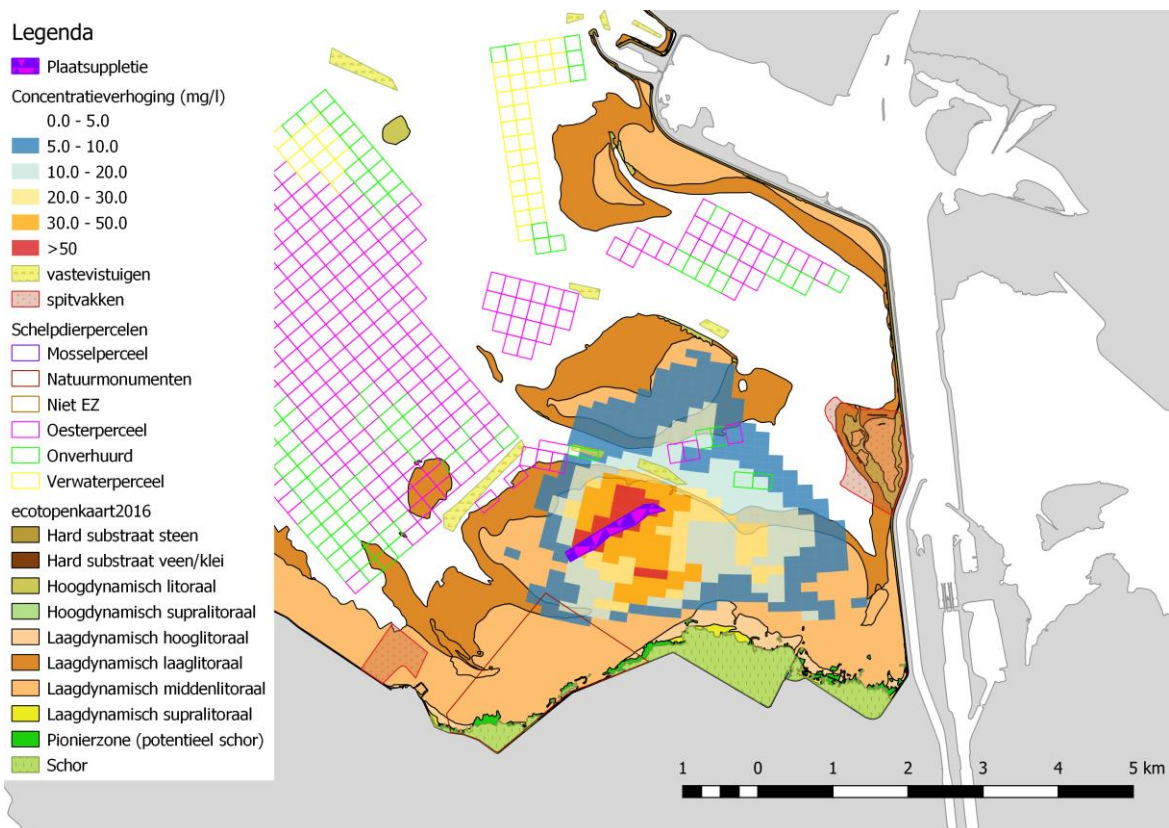


Figuur 28. Accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08Z6S03.

Ook de sliblaag die zich na 14 weken heeft afgezet op de bodem is alleen in de Zandkreek zelf (Figuur 28), rond de baggerlocatie rond de 30 mm dik en op gevoelige gebieden buiten de Zandkreek (het mosselperceel ten zuiden van de stortlocatie) is de accumulatie van slib net iets meer dan 3 kg m⁻². Dit komt overeen met een laagdikte van 8 mm ongeconsolideerd slib. Dit is een hoeveelheid die, als dit in één keer op een mosselbank terecht komt mogelijk wel schadelijk is. Verdere analyses hebben echter aangetoond dat de ophogingssnelheid niet meer is dan ongeveer 0.5 mm per week. Dit is een depositiesnelheid die ruim binnen de marges valt die mosselen aankunnen zonder negatieve effecten (Bijkerk, 1988).

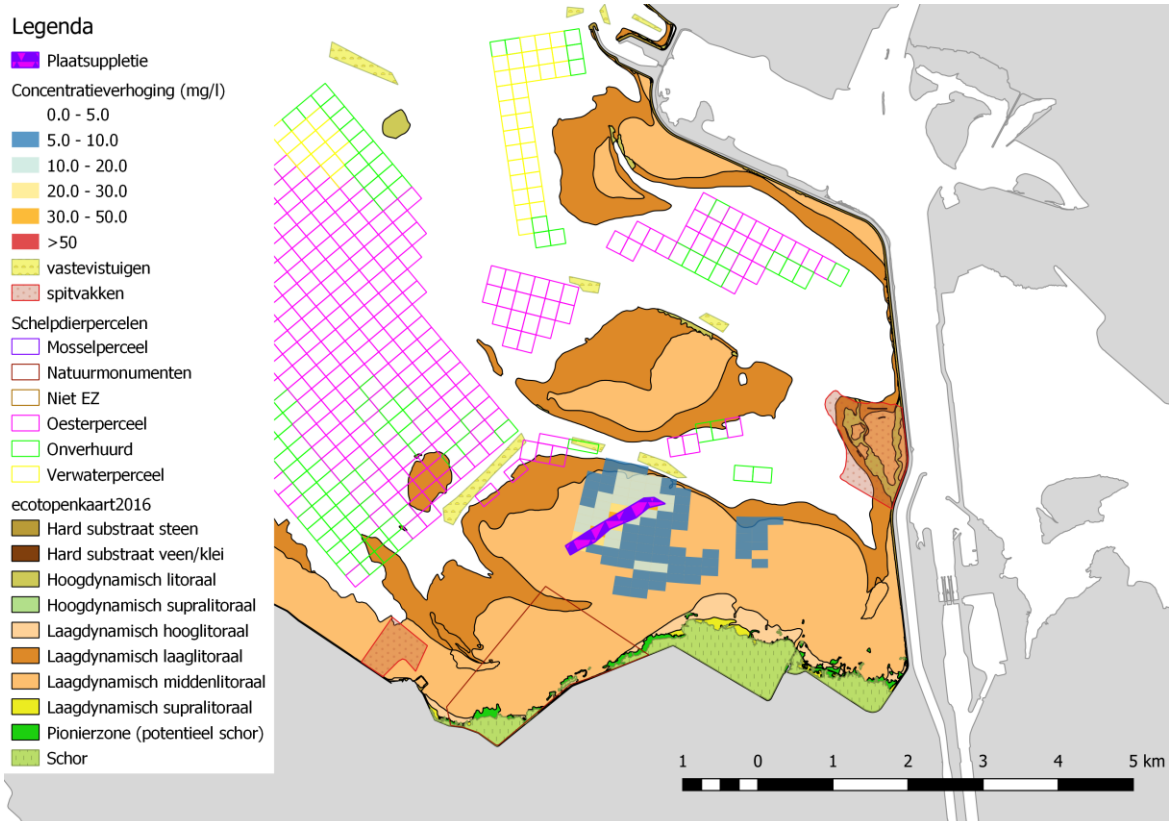
5.1.5.2 Resultaten suppletie (laag in het litoraal) met 30% slib

Van de verschillende plaatsuppletie scenario's wordt alleen het resultaat getoond van de simulatie met een volume van 100.000 m³ en 30% slibgehalte voor de suppletie die laag in het litoraal wordt aangebracht. Aangezien het de bedoeling is dat een plaatsuppletie relatief lang blijft liggen, ligt het niet voor de hand een suppletie uit te voeren met een hoger slibpercentage, als er materiaal met een lager percentage slib voorhanden is.



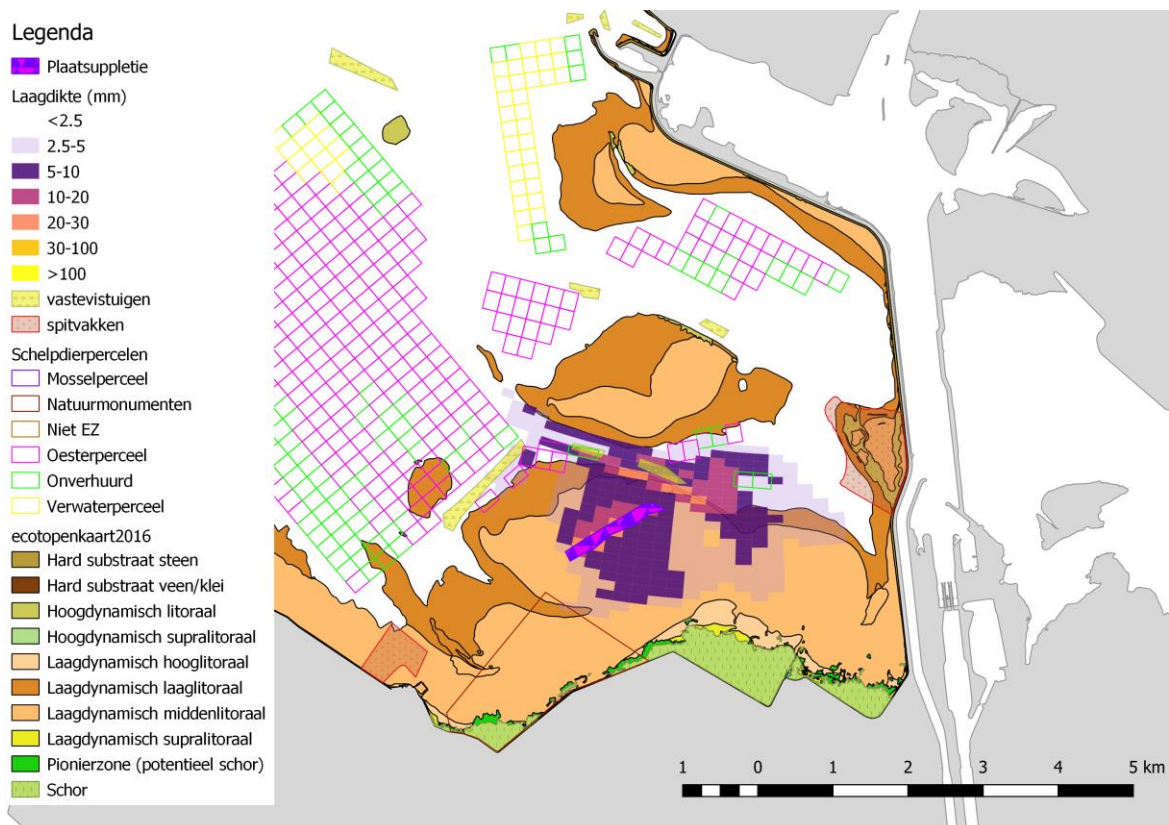
Figuur 29. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie met een lage kritische schuifspanning).

Figuur 29 toont het resultaat van de modelsimulatie voor een suppletie met een lage kritische schuifspanning en Figuur 30 het vergelijkbare scenario maar met een hogere kritische schuifspanning. De inschatting van experts is dat in werkelijkheid de waarden hier tussenin zullen liggen. Aangezien een plaatsuppletie uitgevoerd wordt door het opspuiten/persen van de baggerspecie, waarbij het zand-slibmengsel met water wordt vermengd, zal het werkelijke effect waarschijnlijk dichterbij Figuur 29 liggen dan bij Figuur 30.

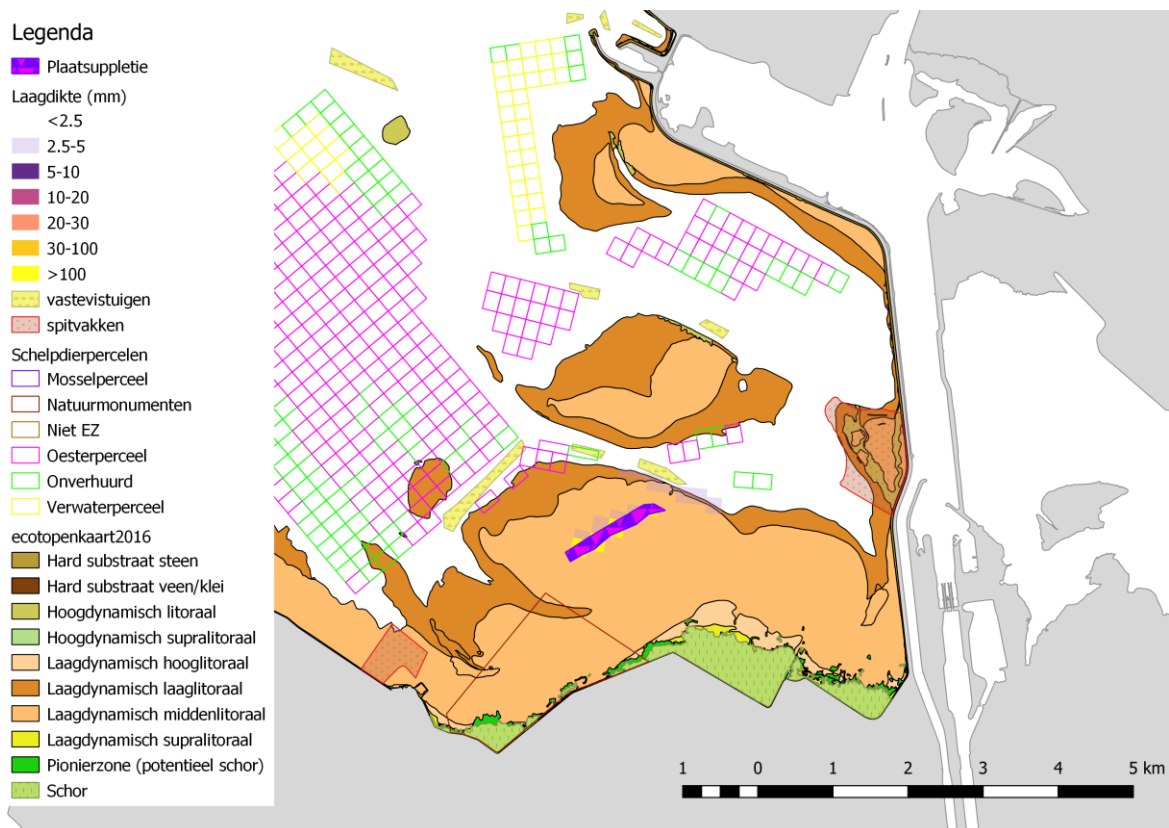


Figuur 30. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie met een hoge kritische schuifspanning).

In Figuur 31 en Figuur 32 wordt de berekende laagdikte weergegeven in de suppletiescenario's met hoge en lage verspreidingsnelheid. Bij de hoge kritische schuifspanning is zeer weinig verspreiding in de simulatieperiode waar te nemen. Bij de lage kritische schuifspanning komt er wat materiaal op en vlak in de buurt van oesterpercelen terecht, met een laagdikte van < 10 mm.

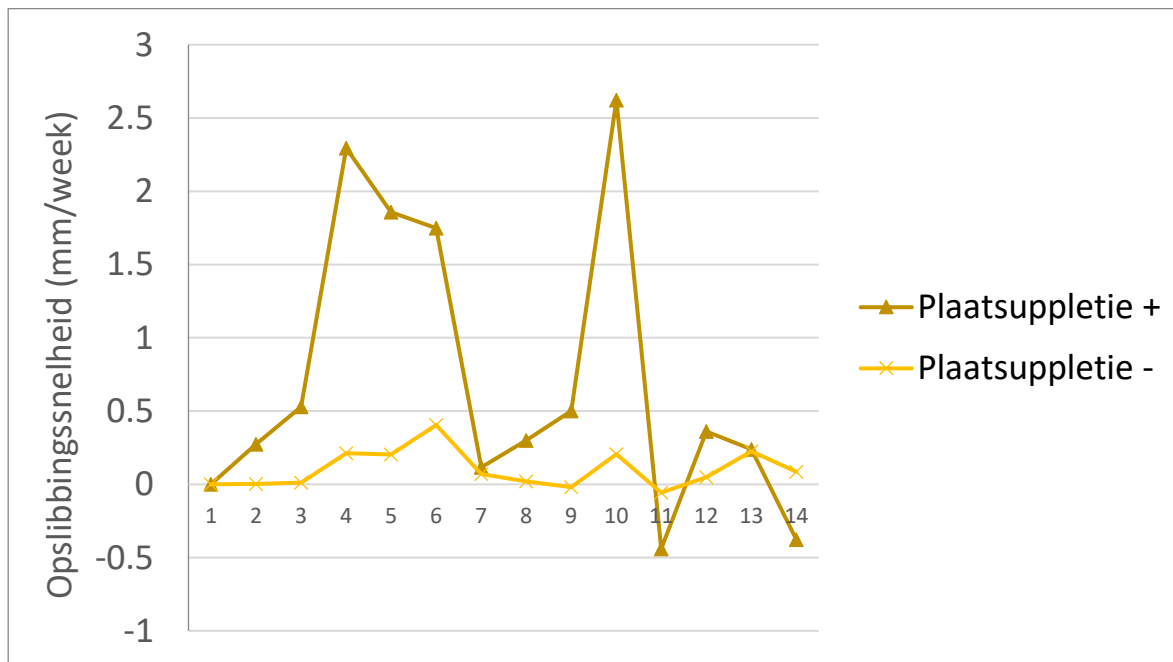


Figuur 31. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie met een lage kritische schuifspanning).



Figuur 32. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie met een hoge kritische schuifspanning).

De grootste hoeveelheid (op een perceel) komt op een onverhuurd perceel terecht. Hier is na 14 weken ongeveer een centimeter slib op terecht gekomen. De opslibbingssnelheid wisselt sterk per week, vooral omdat slibverspreiding hier sterk onderhevig is aan de wind. Echter in de gekozen periode komt de ophogingssnelheid ook op dit perceel net boven de 2.5 mm per week (Figuur 33). Een snelheid die oesters zonder problemen aan moeten kunnen (Bijkerk 1988).



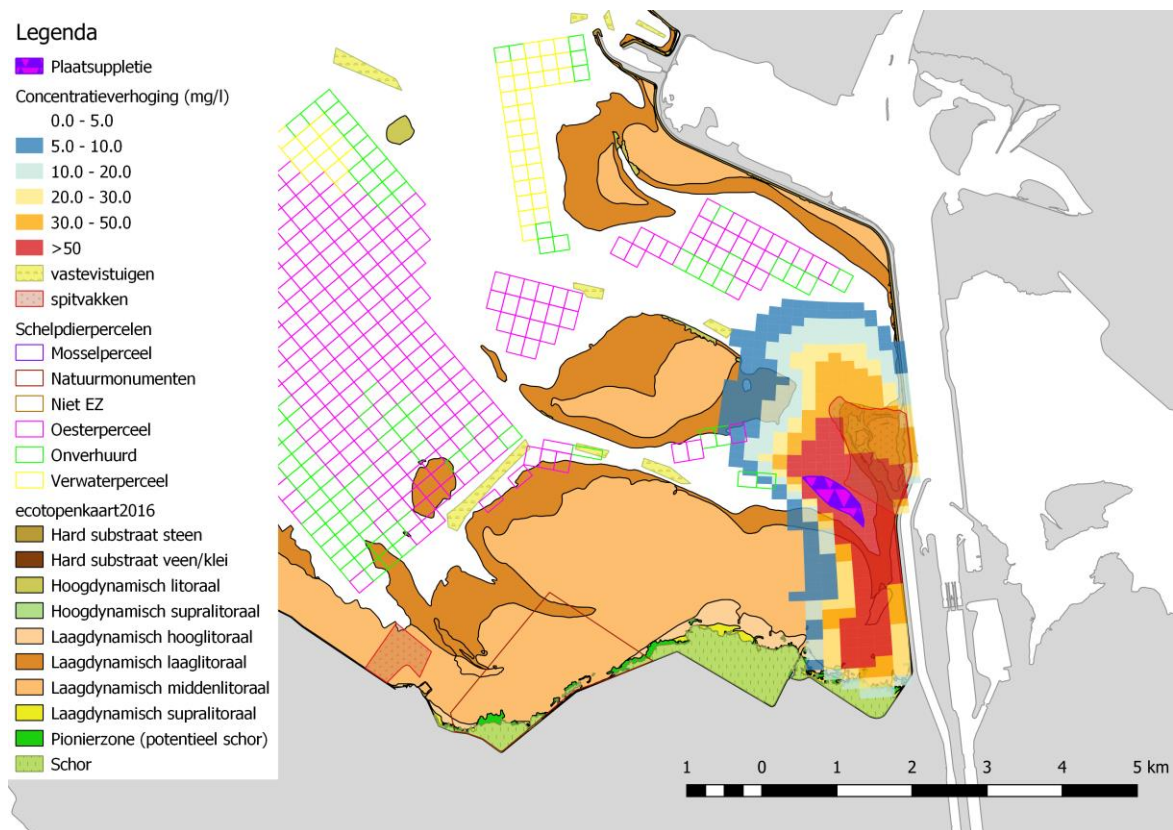
Figuur 33 Opslibbingssnelheden voor de gemodelleerde plaatsuppletie met hoge (+) en lage (-) verspreidings-snelheid. Op de x-as staan de 14 (gemodelleerde) weken.

5.1.5.3 Resultaten sedimentmotor met 64% slib

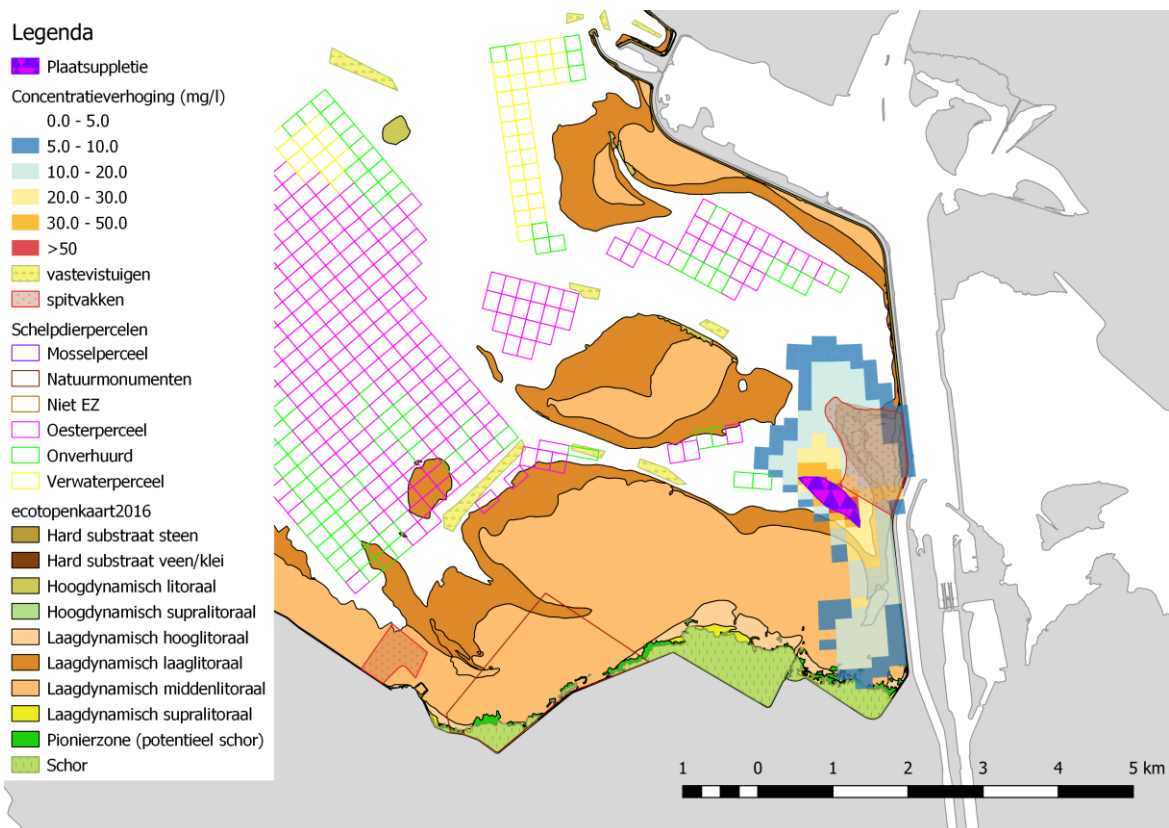
Van de verschillende sedimentmotorscenario's wordt alleen het resultaat getoond van de simulatie met een volume van 100.000 m³ en 64% slibgehalte. Bij een sedimentmotor (ofwel hier: slibmotor) is het de bedoeling dat materiaal relatief gemakkelijk verspreidt.

De slibmotorvarianten geven zoals verwacht een veel sterkere verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom dan de suppletie vanwege het grotere slibaanbod. De slibpluim strekt zich in deze simulatie uit langs de oostrand van de kom langs de Oesterdam. In het scenario met een lage kritische schuifspanning kunnen boven het litoraal langs de Oesterdam concentratieverhogingen voorkomen van meer dan 50 mg l⁻¹ (Figuur 34). Dit is een sterke verhoging die voor veel filter feeders negatieve effecten kan geven. In de variant met hoge kritische schuifspanning is de concentratieverhoging veel lager en komen de zeer hoge concentraties alleen voor vlak boven de stortlocatie (Figuur 35).

De slibmotor variant zal worden aangebracht ofwel met een kraanschip of door te "kleppen". Hierbij wordt het sediment niet sterk met water opgemengd en zal het zich meer geconsolideerd gedragen. Voor deze variant is dan ook de inschatting dat de uiteindelijke effecten meer richting Figuur 35 zullen gaan dan Figuur 34.



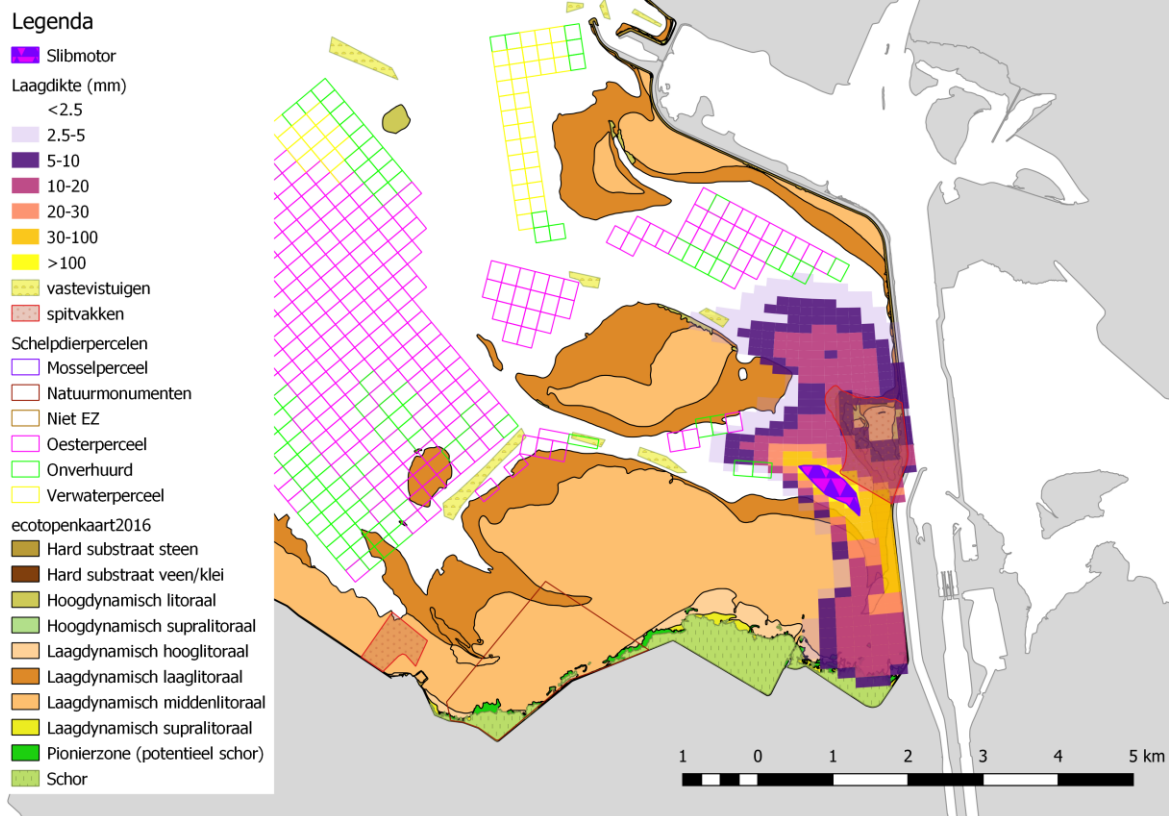
Figuur 34. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor met een lage kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.



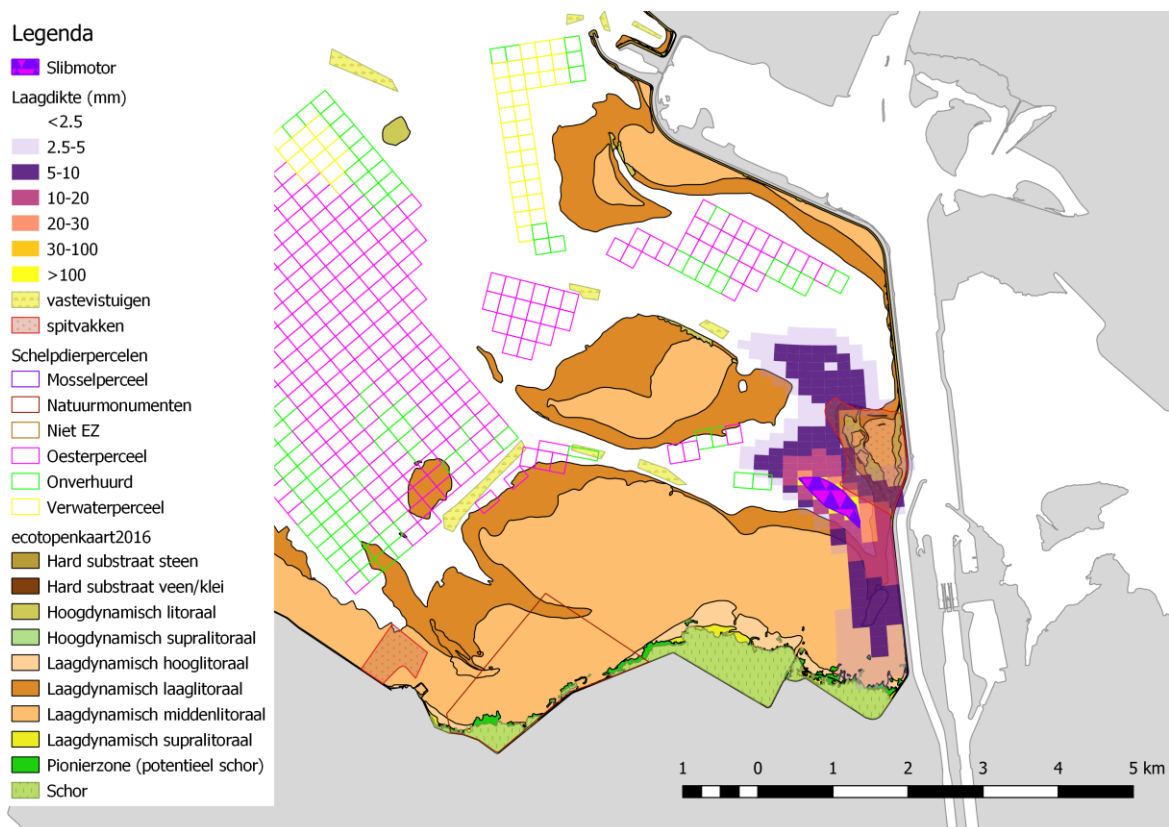
Figuur 35 Berekende verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor met een hoge kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

Figuur 36 toont de berekende laagdikte op de bodem in het slibmotor scenario met de lage kritische schuifspanning. Dit scenario geeft weinig effecten op schelpdierpercelen, maar veroorzaakt wel een zeer sterke opslibbing langs de rand van het intergetijdengebied. Op de rand van het pierensteekgebied komt 12 tot 20 kg m⁻² terecht. Verderop op het pierensteekgebied is dit veel minder (Figuur 36). Naar het zuiden toe verspreid het slib zich tot aan de rand van het schor. Aan de rand van het schor is de laagdikte beperkt tot 5 mm (niet geconsolideerd slib). Op de delen die dichter naar de rand van het slik liggen varieert de laagdikte tussen de 1 en 2 centimeter (5-10 kg m⁻²).

In het vergelijkbare scenario met hogere kritische schuifspanning is dit veel minder (Figuur 37). Langs het schor is de laagdikte beperkt tot enkele millimeters en alleen aan de rand van het slik komt een laag van 1-2 centimeter terecht. Ook langs de rand van het pierensteek gebied is de opslibbing veel minder groot en zal weinig problemen veroorzaken voor zowel bodemdieren als risico voor mensen om daar vast te komen zitten.



Figuur 36 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor met een lage kritische schuifspanning).

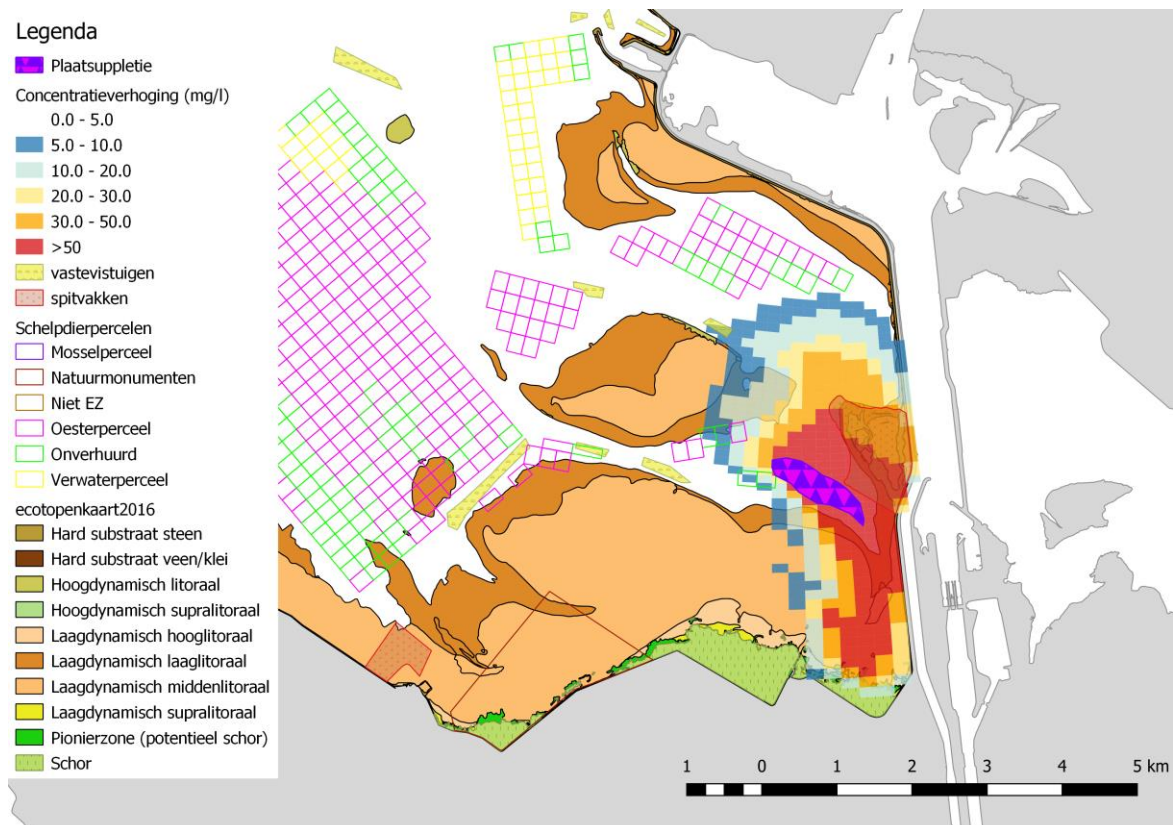


Figuur 37 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor met een hoge kritische schuifspanning).

5.1.5.4 Resultaten vergrootte sedimentmotor met 46% slib

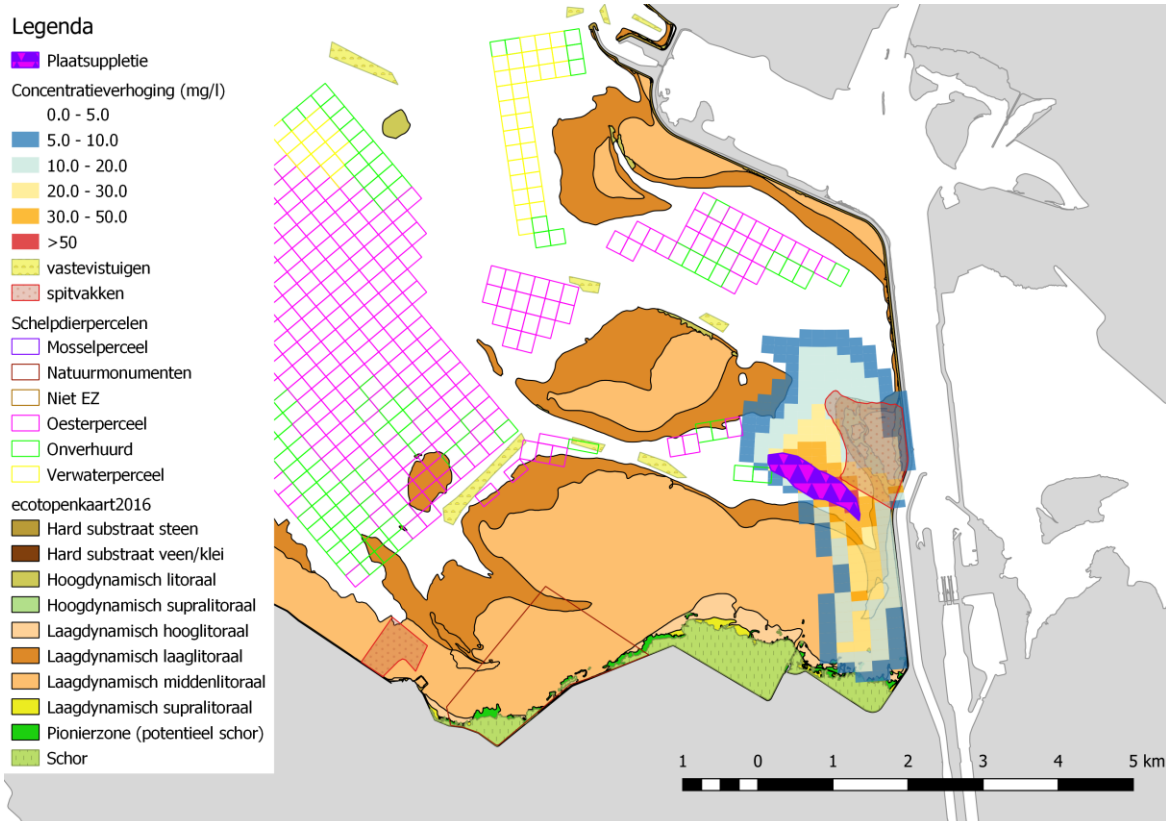
Indien alle baggerspecie van de Zandkreek wordt gebruikt voor een sedimentmotor is er geen keuzemogelijkheid voor een bepaalde slibconcentratie. Dit wordt dan automatisch de gemiddelde concentratie in de zandkreek.

De resultaten van de simulatie met een lage kritische schuifspanning zijn vrij vergelijkbaar met de resultaten van de kleinere slibmotor met 64% slib (38 ha t.o.v. 20 ha voor de kleine slibmotor). Enerzijds zit er minder slib in het mengsel, anderzijds is het oppervlak van waaruit slib verspreidt groter. De effecten op vertroebeling zijn iets groter en reiken iets verder dan in de R08PH2_2_64_S01-simulatie (Figuur 38). In de simulatie met de vergrote slibmotor komen ook boven enkele oesterpercelen verhoogde concentraties voor tussen de 10 en 15 mg l⁻¹. Een concentratie die niet meteen tot conditieverslechtering zal leiden zolang de effecten niet meer dan een paar weken aanhouden. Dat is niet het geval.



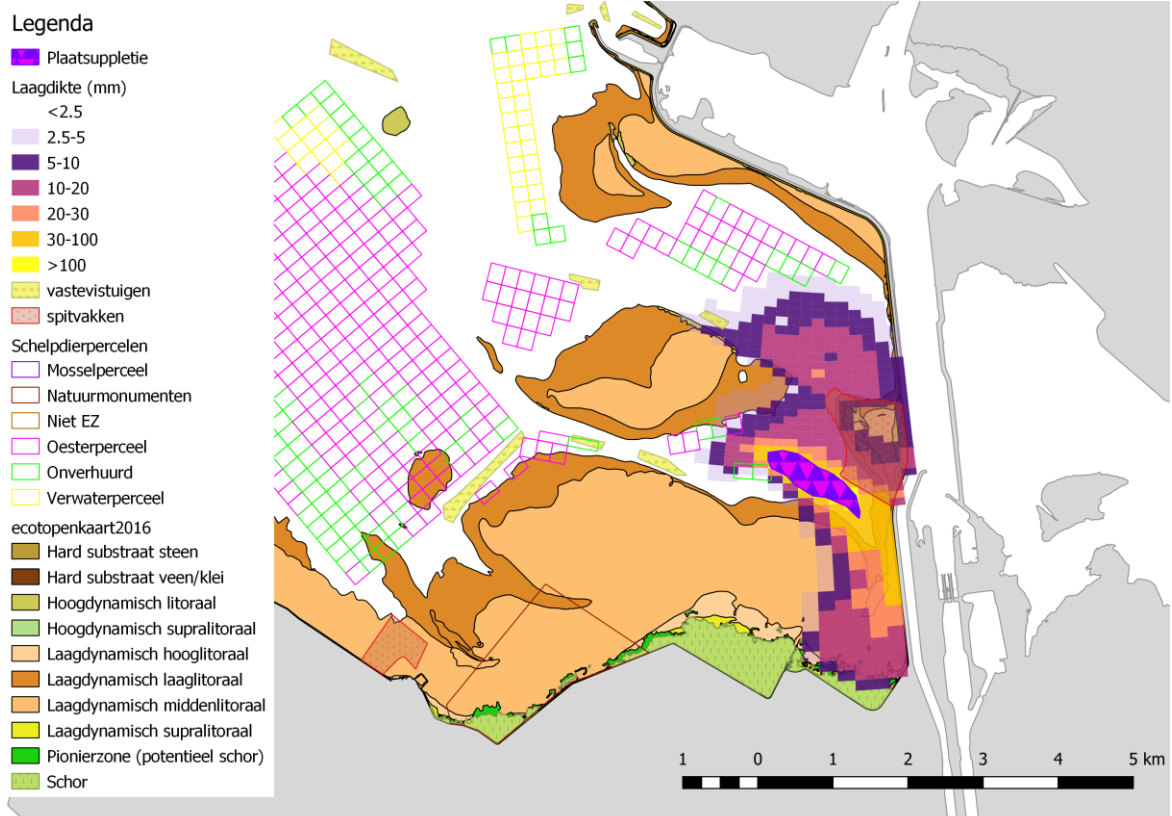
Figuur 38. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_3_S01 (vergrote slibmotor met een lage kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

In het scenario met de hogere kritische schuifspanning zijn de concentratieverhogingen aanmerkelijk minder (Figuur 39). Hier wordt vrijwel geen (minder dan 5 mg l⁻¹) verhoging berekend boven gevoelige gebieden zoals oesterpercelen en komen extreem hoge concentratieverhogingen (>50 mg l⁻¹) alleen voor pal boven de stortlocatie.

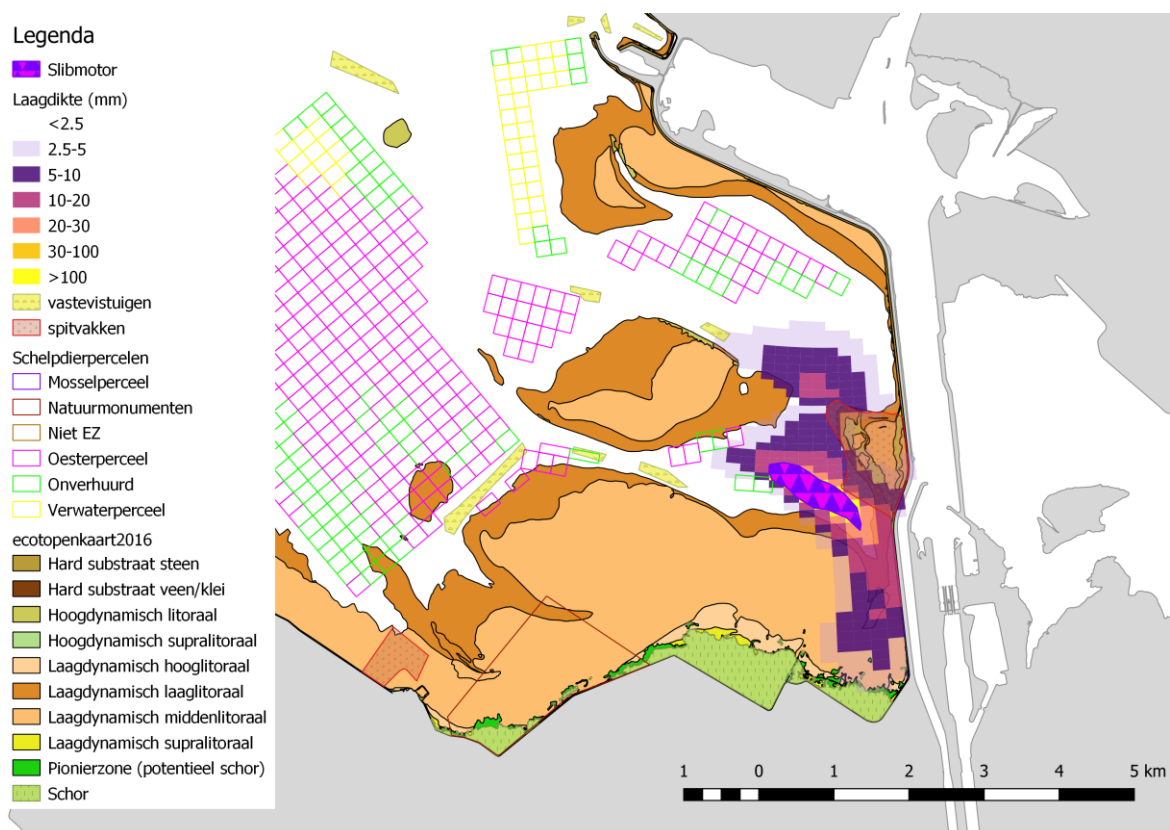


Figuur 39. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_3_S02 (vergroete slibmotor met een hoge kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

Ook op de bodem zijn de effecten van de vergroete slibmotor na 14 weken zeer vergelijkbaar met de kleinere slibmotor. Ook hier komt in de berekening met een lage kritische schuifspanning op de rand van het pierensteek gebied een behoorlijk dikke laag slib (Figuur 40) die mogelijk bepaalde bodemdier soorten kan verstikken. Door het slappe slib houdt dit mogelijk ook een klein risico in voor mensen die het gebied betreden. Er lijken geen problematische sliblagen te komen op verhuurde oesterpercelen. Op het onverhuurde oesterperceel dat precies op de rand van het stortgebied ligt kan wel materiaal terecht komen. Het model voorspelt alleen aan de rand van dit perceel een opslibbing van enkele centimeters, maar aangezien dit onverhuurde perceel exact op de rand van het stortgebied ligt, moet hier toch rekening gehouden worden met enig effect, vanwege modelonzekerheid en de precisie waarmee in de praktijk gestort kan worden. Hoewel de verspreiding in het scenario met de hogere kritische schuifspanning veel minder is (Figuur 41), geldt dit laatste ook voor dit scenario. In het scenario met de lage kritische schuifspanning komt er aan de rand van het schor aan de zuidkant van de slibmotor ongeveer 1 à 2 cm slib terecht. In het scenario met de hoge kritische schuifspanning is dit net boven de 2.5 mm. In het scenario met hoge verspreidingssnelheid komt er op een groot deel van het slik een laag van 1-3 cm. Aan de rand van het slik aan de zuidkant is dit nog meer. Daar komt tot 26 kg m⁻² ofwel een laag van 10 cm dik (ongeconsolideerd). In het scenario met lage verspreidingssnelheid is dit beperkt tot 2 à 3 cm op de rand en enkele millimeters tot een centimeter verder op het slik.

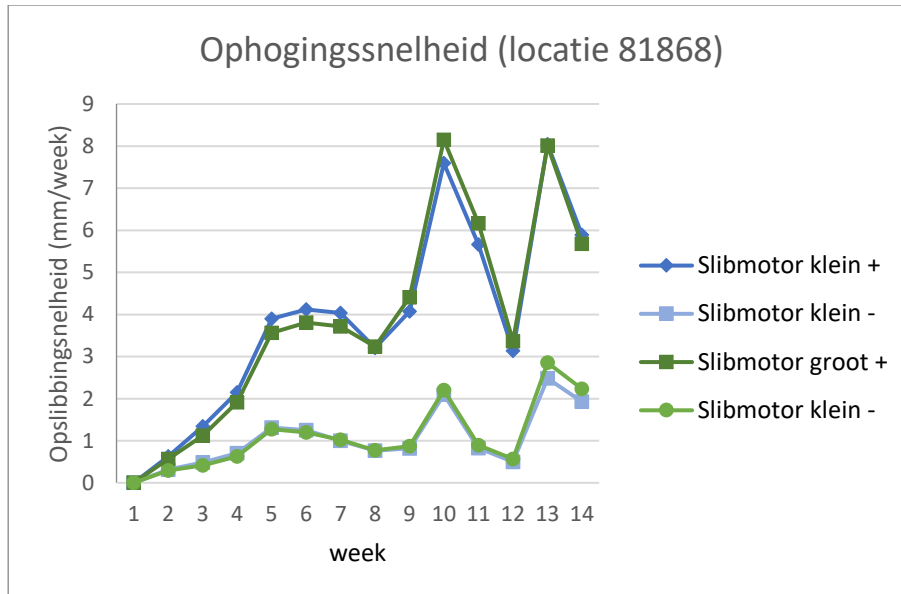


Figuur 40 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_3_S01 (vergroete slibmotor met een lage kritische schuifspanning).



Figuur 41 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_3_S02 (vergroete slibmotor met een lage kritische schuifspanning).

Op het zuidwestelijke puntje van het pierensteekgebied is de opslibbingssnelheid per week bepaald (Figuur 42). Beide slibmotorvarianten geven in de scenario's met lage kritische schuifspanning lokaal een opslibbingssnelheid van rond de 8 mm per week. Voor sommige biota (o.a. schelpdieren) kan dit tot verstikking leiden. De versies met de hoge kritische schuifspanning komen maximaal tot 3 mm per week ofwel iets meer dan een cm per maand. Voor sommige schelpdiersoorten begint dit kritisch te worden. De meeste andere biota hebben daar weinig problemen mee (Bijkerk, 1988).



Figuur 42 Opslibbingssnelheden op de zuidrand van het pierensteekgebied in de vier slibmotor scenario's. Scenario's met '+' zijn met lage kritische schuifspanning en scenario's aangeduid met '-' zijn met hogere kritische schuifspanning berekend.

5.1.6 Conclusies t.a.v. de scenario's en de effecten

Bij al deze scenario's is het goed te bedenken dat de modellen voor 14 weken gedraaid zijn. Aan het eind van de modelperiode ligt er nog steeds een hoeveelheid materiaal op de stortlocatie (afhankelijk van het scenario) van waaruit de verspreiding nog maanden lang verder zal gaan. Het effect van het verschil in kritische schuifspanning voor de verschillende scenario's kan ook vertaald worden naar wat er in de tijd gebeurt met de verspreiding op de bodem: in het geval van de hoge kritische schuifspanning heeft maar een beperkt deel van het beschikbare slib zich verspreid, in het geval van de lage kritische schuifspanning het overgrote deel van het beschikbare slib. M.a.w., het scenario met de lage kritische schuifspanning geeft een goede indicatie van de eindverspreiding van het slib.

Zeker voor de slibmotorvarianten waar een vrij dikke laag materiaal aan de rand van een gebied terecht komt waar mensen regelmatig lopen (pierenstekers) zal hier mogelijk rekening mee gehouden moeten worden. Een deel van het slib zal samen met het zandige materiaal consolideren en langere tijd vastgelegd worden, maar over verloop van tijd zal dit materiaal vrijkomen en ofwel onderwater ofwel litoraal terechtkomen.

In dit deel van de Oosterschelde is slibdynamiek zeer sterk beïnvloed door de golven en dus wind. Dit betekent dat de modelvoorspellingen sterk kunnen afhangen van de gekozen periode. In een veel kalmere periode zal verspreiding langzamer gaan, in een stormachtige periode zal verspreiding sneller gaan. In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar. Enerzijds is de modelinstelling met de lage kritische schuifspanning vrijwel zeker een worst-case benadering en is het niet waarschijnlijk dat verspreiding veel sneller zal verlopen. Ondanks dat moet toch ook met

deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

5.2 Zand

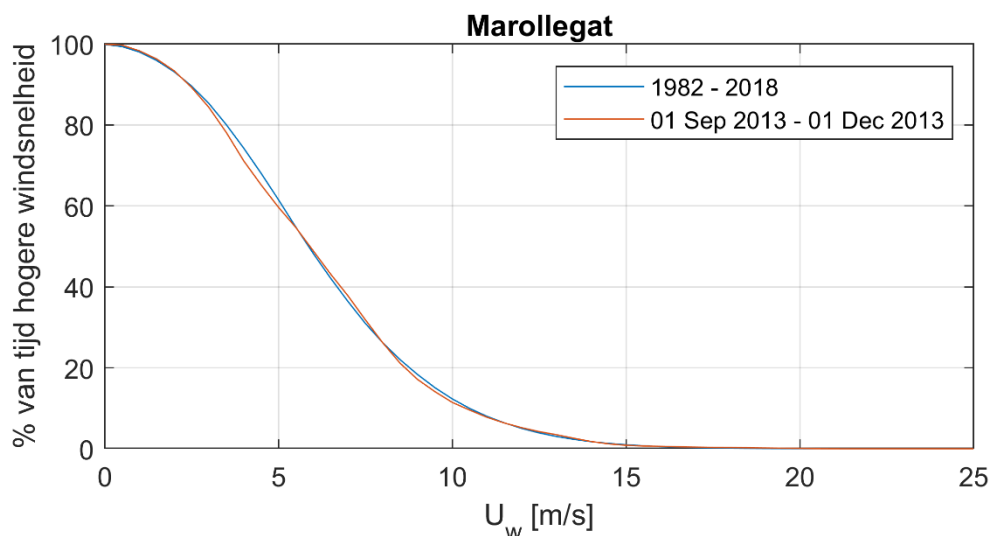
5.2.1 Aanpak

De zandtransporten ter plekke van de oostelijke sedimentmotor en de lage suppletie zijn berekend met de formules van Van Rijn (2007a,b). Deze transportformuleringen maken onderscheid tussen bodem- en suspensietransport, en nemen de invloed van stroming en golven mee. Het is een veel gebruikte formule gebaseerd op een grote hoeveelheid lab- en veldmetingen.

Er wordt gerekend met de karakteristieke korrelgroottes $[D_{10}, D_{50}, D_{90}] = [0,07 \text{ } 0,13 \text{ } 0,23] \text{ mm}$, op basis van de bodemonsters uit de Zandkreek (zie paragraaf 4.2).

Representativiteit van de rekenperiode 1 september tot 1 december 2013

De zandtransporten worden uitgerekend op basis van met Delft3D berekende waterbeweging voor de periode 1 september tot 1 december 2013 (zie paragraaf 5.1). Figuur 43 laat zien dat de windsnelheden bij het Marollegat (Kom van de Oosterschelde, ten noorden van de projectlocatie) gedurende deze periode niet sterk afwijken van een langjarige periode (1982-2018). De gesimuleerde periode kan dus als representatief worden beschouwd in termen van de grootte van de windsnelheid.



Figuur 43. Vergelijking windsnelheden bij het Marollegat gedurende de gesimuleerde periode (1 september – 1 december 2013) en gedurende een langjarige periode (1982-2018).

Effect van slib op erodeerbaarheid zand

De aanwezigheid van slib, in het bijzonder van kleideeltjes, oefent een cohesieve kracht uit waardoor zanddeeltjes moeilijker geërodeerd kunnen worden. Volgens Van Rijn (2007a) kan dit effect als volgt worden meegenomen:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{mud})^3 \tau_{cr,0} \quad (0.1)$$

met $\tau_{cr,0}$ de kritische schuifspanning van niet-cohesief zand (i.e. zonder slib), p_{mud} het percentage klei- en siltdeeltjes ($< 62 \mu\text{m}$) in de bodem en $\tau_{cr,bed}$ de kritische schuifspanning van zanddeeltjes in een bodem met slib. Deze vergelijking laat zien dat

de aanwezigheid van slib (in het bijzonder klei) zorgt voor een toename van de kritische bodemschuifspanning, i.e. het zand komt minder snel in beweging.

De berekende $\tau_{cr,0}$ voor zand met een D50 van 0,13 mm is 0,14 Pa. 30% slib zorgt volgens Vgl. (1.1) voor een toename met een factor 2,2, i.e. $\tau_{cr,bed} = 0,31$ Pa. De laatste waarde valt in de range van de kritische schuifspanning zoals gehanteerd in de slibberekeningen (0,2-0,8 Pa).

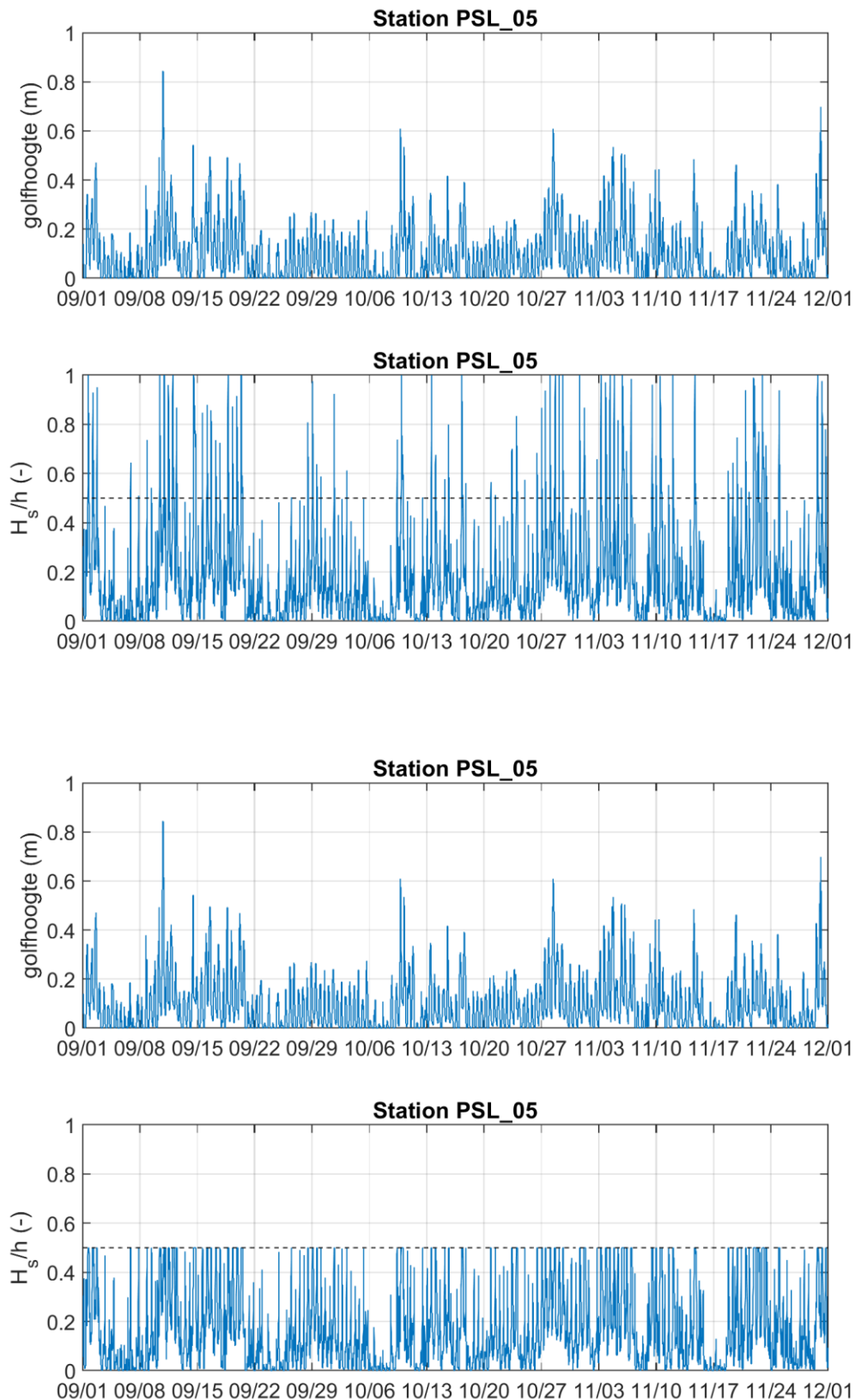
De lage kritische bodemschuifspanning voor zand is een bovengrens van de zandtransportberekeningen, de hoge kritische schuifspanning een ondergrens. Na aanleg zal de hogere $\tau_{cr,bed}$ representatief zijn door de aanwezigheid van slib. Pas na verloop van tijd, als het slib uitgespoeld wordt, zal de lagere $\tau_{cr,bed}$ meer representatief zijn.

Verhouding golfhoogte en waterdiepte

De golfhoogte wordt gelimiteerd door de waterdiepte. Uit metingen en modellen blijkt de verhouding tussen beide (γ) voor flauw-hellende intergetijdengebieden als in de Oosterschelde ongeveer 0,5 te zijn (De Vet et al., 2018), oftewel bij 1 m waterdiepte is de golfhoogte gelimiteerd tot 0,5 m.

De Delft3D berekeningen geven hogere golfhoogtes, met name rondom laagwater (**Error! Reference source not found.**). We hebben voor de zandtransportberekeningen de golfhoogtes afgekapt met $\gamma = 0,5$. De grootste golven traden op tijdens hoogwater, waardoor het effect van $\gamma = 0,5$ niet sterk zichtbaar is in de golfhoogtes, maar wel in de verhouding met de waterdiepte.

Het afkappen van de golfhoogtes met $\gamma = 0,5$ zorgt voor een afname van de zandtransporten bij de plaatsuppleties met ~20-30%. Dit effect is relatief beperkt omdat de hoogste golfhoogtes niet diepte-gelimiteerd zijn, want optreden tijdens hoogwater. De diepte-limitering van de golfhoogte heeft geen effect op de sublitorale sedimentmotor, vanwege de grotere waterdiepte.



Figuur 44. De berekende golfhoogte op een locatie ter plekke van de plaatsuppletie. Boven: niet afgekapt; onder: afgekapt met een $\gamma = 0,5$.

Onzekerheid zandtransportberekeningen

Een bron van onzekerheid wordt gevormd door de relatief lage resolutie van het SCALOOST model. Hierdoor is de ruimtelijke variatie in de berekende zandtransporten waarschijnlijk te laag. De hydrodynamische input komt van de SCALOOST berekeningen voor de referentiesituatie. Dit betekent dat het effect van de suppletie op de stroming,

golven en zandtransporten niet wordt meegenomen. Een typische onzekerheidsmarge van de brekende zandtransporten is een factor 2. Door middel van kalibratie op basis van veldmetingen zou de modelonzekerheid verkleind kunnen worden

Vertaling zandtransporten naar morfologische ontwikkeling

Om een idee te krijgen van de morfologische tijdschaal van de suppletie, is het analytische model van Ribberink (2004) toegepast. Dit berekent de verplaatsingssnelheid en uitdovingstijd van een kleine bodemverstoring op basis van netto zandtransporten:

$$c_{bed} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_0)h_0} \left\{ 3q_{b_0}^c + \frac{4q_{s_0}^c}{L_A^2 k^2 + 1} \right\}$$

$$T_{bed} = (1 - \varepsilon_0)h_0 \left\{ L_A k^2 \frac{4|q_{s_0}^c|}{L_A^2 k^2 + 1} + \frac{k^2 h_0}{\tan \varphi} |q_{b_0}^c| \right\}^{-1}$$

met $\varepsilon_0 = 0,4$ de bodemporositeit, h_0 de waterdiepte in de ongestoorde situatie, L_A de aanpassingslengte van het suspensietransport, $k = 2\pi / L_{bed}$ het golfgetal van de bodemverstoring met lengte L_{bed} , $q_{s_0}^c$ het netto suspensietransport in de ongestoorde situatie, $\tan(\varphi) = 0,63$ met φ de natuurlijke rusthoek van zand en $q_{b_0}^c$ het netto bodemtransport in de ongestoorde situatie. Hierbij wordt het eventuele effect van de bodemhelling op suspensietransport niet meegenomen.

Deze vergelijkingen laten zien dat een bodemverstoring sneller migreert en uitdooft bij grotere zandtransporten.

De aanpassingslengte van suspensietransport wordt berekend met:

$$L_A = \hat{L} \frac{u_0 h_0}{w_s}$$

met coëfficiënt $\hat{L} = 0,5$, u_0 is de stroomsnelheid in de ongestoorde situatie en w_s de valsnelheid van zand ($\sim 0,01 \text{ m s}^{-1}$). De diameter van een cirkel met het suppletieoppervlakte van 20 ha is genomen als karakteristieke lengte, i.e. ca. 500 m. In het geval van een relatief grote aanpassingslengte ($k \cdot L_A \gg 1$) draagt suspensietransport niet bij aan de morfologische ontwikkeling van de bodemverstoring. Dit is niet het geval bij de plaatsuppletie of de sedimentmotor, omdat deze relatief groot zijn. In het andere limietgeval, een hele kleine aanpassingslengte ($k \cdot L_A \rightarrow 0$), heeft suspensietransport geen invloed op de uitdoving, die dan volledig wordt bepaald door hellingseffecten op het bodemtransport. Ook hier is geen sprake van. Dit betekent dat zowel bodem- als suspensietransport bijdragen aan de morfologische ontwikkeling van de bodemverstoring, in belangrijke mate gekoppeld aan hoe groot deze transporten zijn.

Het analytische model is ontwikkeld op basis van de Bailard (1981) zandtransportformule, maar in dit rapport worden de transporten zoals berekend met Van Rijn (2007a,b) gebruikt.

Deze vergelijking is toegepast voor de instantane zandtransporten (elke 10 minuten). Hierna is gemiddeld over de periode van 3 maanden om een representatieve verplaatsingssnelheid en uitdovingstijd te bepalen.

Deze aanpak is een sterke versimpeling van de werkelijkheid. Zo is een belangrijke aanname dat de bodemverstoring klein is ten opzichte van de waterdiepte. Dit is niet

het geval voor een suppletie met een verstoring van ~ 0.5 m op een waterdiepte van 1-2 m. Daarnaast houden deze formules geen rekening met 2D effecten. Ook wordt gebruik gemaakt van de berekende zandtransporten met een grote onzekerheid, zoals beschreven aan het begin van deze paragraaf. Ondanks deze grote onzekerheid kan met deze formules op een simpele en snelle manier een eerste inschatting van de morfologische ontwikkeling worden gemaakt. Een meer realistische inschatting kan worden verkregen met een morfodynamische modelberekening, b.v. met de Delft3D software. Dit viel echter buiten de scope van deze studie.

5.2.2 Resultaten

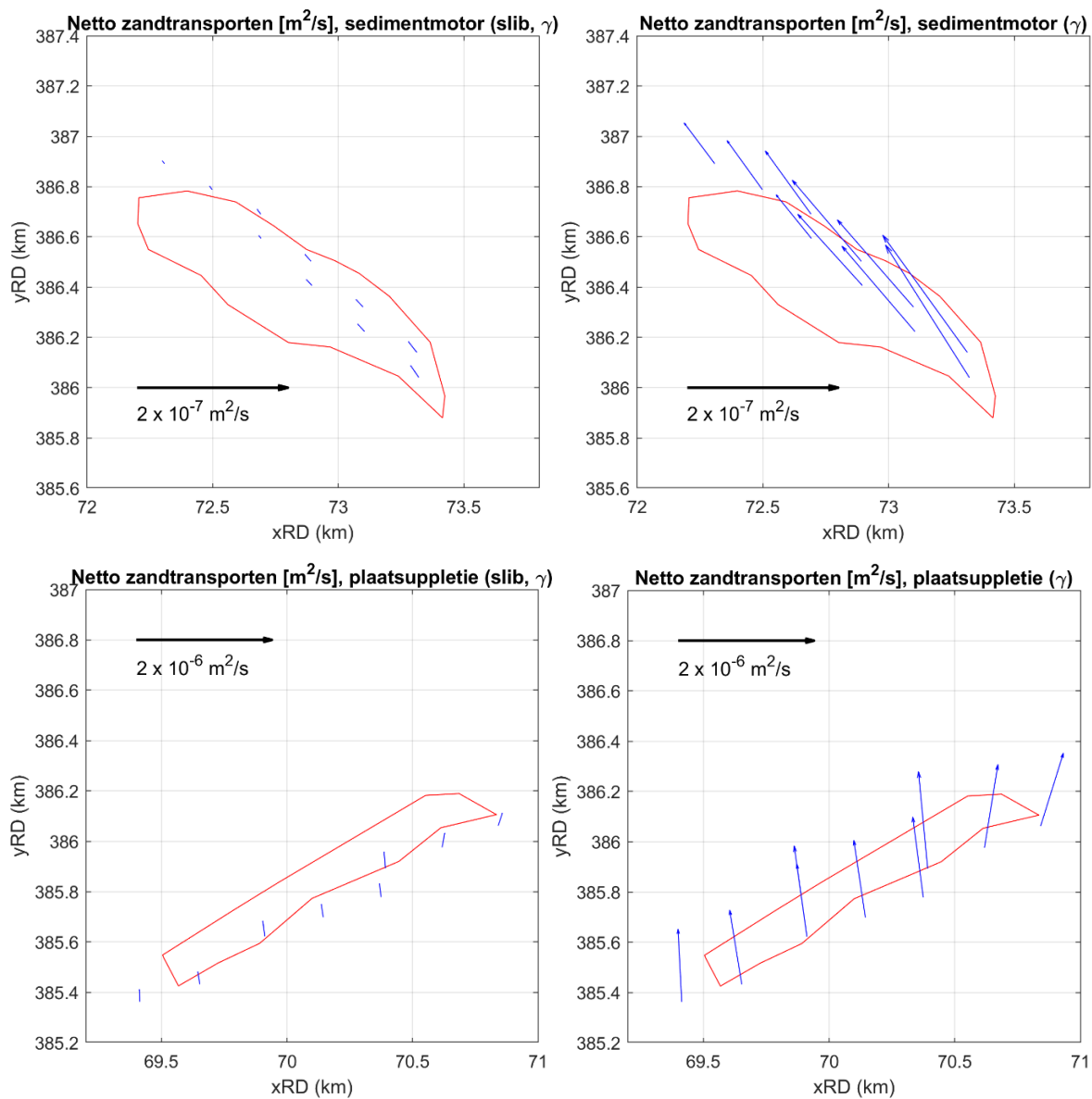
Figuur 45 toont de netto zandtransporten voor twee voorkeursvarianten: de oostelijke slibmotor (nabij de Oesterdam) en de noordelijker gelegen suppletie in het lage litoraal van de Rattekaai. De netto zandtransporten bij de suppletie zijn een orde van grootte groter dan bij de sedimentmotor. Dit komt door de sterkere golfwerking in het ondiepere water op het slik. De timing van de waterdiepte, golfhoogte en stroomsnelheid is bepalend voor de dominante, noordelijke richting van het netto zandtransport. Dit is goed zichtbaar rondom de storm op 10 september 2013 (Figuur 46). De hoogste golven vallen samen met de grootste waterdiepte (vloed), omdat de golfenergie dan minder gedempt wordt door de bodem. Deze golven woelen het sediment op dat door de noordoostelijke/noordwestelijke stroming wordt getransporteerd. De golven zijn dus erg belangrijk voor het zandtransport, omdat de getijstroming met maxima van $\sim 0,3$ m/s maar weinig zand mobiliseert.

De verhoogde kritische schuifspanning door de aanwezigheid van slib zorgt voor een aanzienlijke reductie van het netto zandtransport (\sim factor 12 voor de sedimentmotor, \sim factor 6 voor de suppletie). Dit komt doordat het dominante suspensietransport ongeveer schaalst met de bodemschuifspanning tot de macht 1,5 volgens de gehanteerde Van Rijn (2007b) transportformule. Dit zorgt er, in combinatie met de 2,2x verhoogde kritische schuifspanning en het feit dat op veel momenten in het getij relatief lage schuifspanning optreden (i.e. dicht tegen begin van beweging aan), voor dat het netto zandtransport zo sterk afneemt.

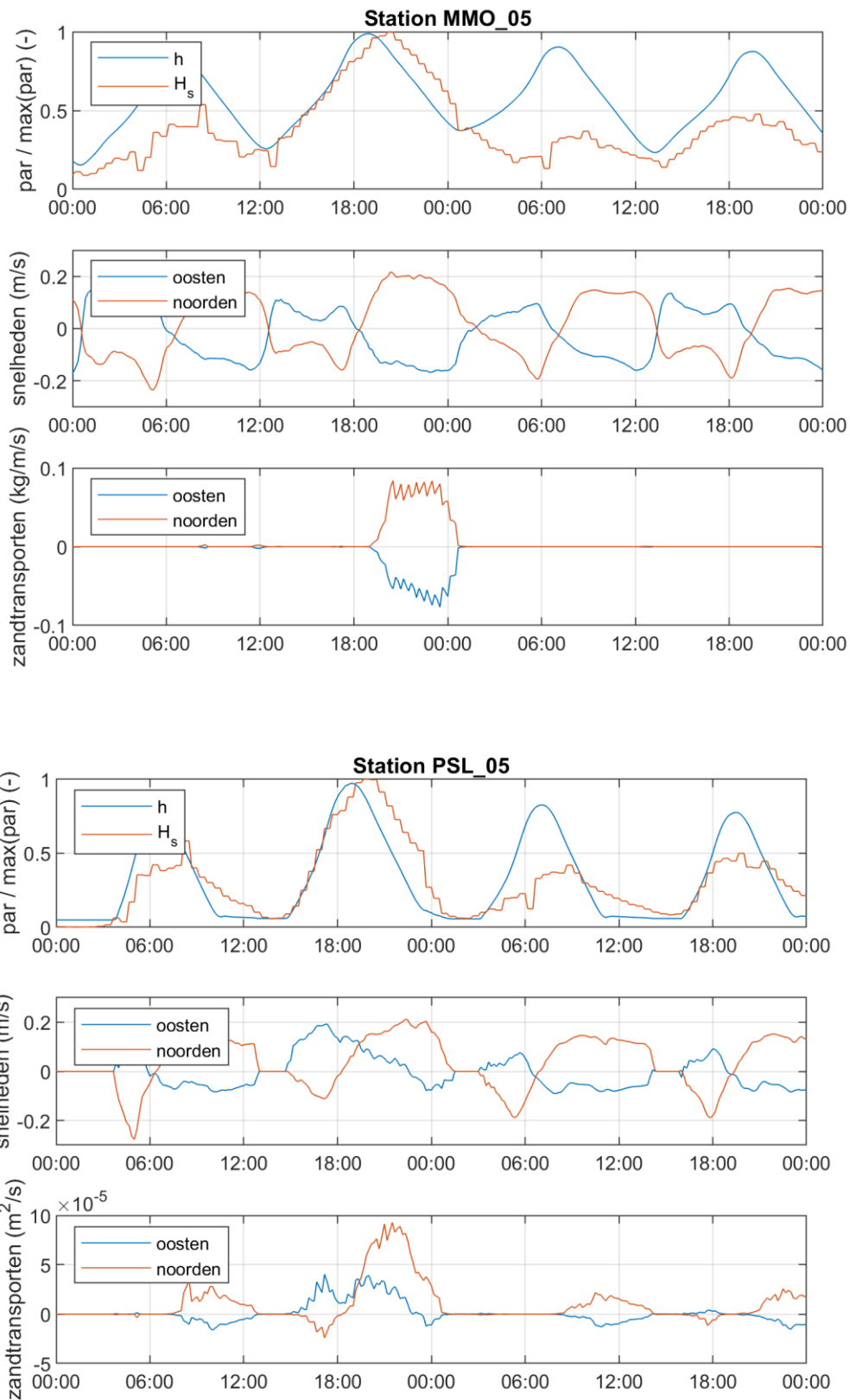
De berekende suspensietransporten zijn veel groter dan de bodemtransporten, vanwege de relatief kleine korrelgrootte ($D_{50} = 0,13$ mm). De morfologische ontwikkeling wordt dan ook bepaald door het suspensietransport. Als gevolg van de grotere transporten (en de kleinere waterdiepte) verplaatst de suppletie zich naar verwachting een stuk sneller dan de sedimentmotor, en deze zal ook naar verwachting veel sneller uitdoven:

	Verplaatsing (m/jaar)		Uitdovingstijd (jaar)	
	Suppletie	Sedimentmotor	Suppletie	Sedimentmotor
hoge taucr (na aanleg, door slib)	60-100	1-2	20-30	200-900
lage taucr (na verloop van tijd)	400-600	10-20	3-4	20-70

Het is belangrijk om aan te tekenen dat deze getallen onzeker zijn, met minimaal een factor 2 bandbreedte. Desondanks lijkt het zeer waarschijnlijk dat het zand op de plaat mobieler is dan in de geul ter plekke van de sedimentmotor.



Figuur 45. Berekende netto zandtransporten voor de oostelijke sedimentmotor (bovenste panelen) en de lagere plaatsuppletie (onderste panelen) met (linker panelen) en zonder (rechter panelen) slibeffecten, op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013.



Figuur 46. Berekende waterstanden en golfhoogtes (beiden genormaliseerd), stroomsnelheden en zandtransporten voor de periode 9-11 september 2013. De bovenste 3 panelen zijn bij de locatie van de oostelijke sedimentmotor, de onderste 3 zijn bij de lagere plaatsuppletie.

6 Sedimentverspreiding en effecten op het litorale habitat

6.1 Algemeen

Van de oorspronkelijke vier scenario's (twee suppleties in het litoraal en twee sedimentmotoren in het sublitoraal) zijn uiteindelijk twee scenario's geselecteerd die nader onderzocht zijn (zie boven): een suppletie laag in het litoraal en een oostelijke sedimentmotor nabij de Oesterdam. In dit hoofdstuk kijken we naar de effecten op het litoraal en wat het betekent voor natuur.

6.2 Twee scenario's: Suppletie Laag vs Slibmotor Oost

6.2.1 Verspreiding van de slibfractie (op het einde van de simulatieperiode)

Voor de suppletie (100.000 m³, 30% slib) met een lage erosiesnelheid verspreidt 7% (2 kton) van het gestorte slib zich vanuit de suppletie in drie maanden (met een minimale aanslibbing van 1 mm) (Figuur 47, Figuur 48 & Tabel 7). Van dit verspreide sediment bevindt 53% zich in het litoraal wat overeenkomt met 1 kton afzetting verspreid over 174 ha (gemiddelde laagdikte 1,6 mm).

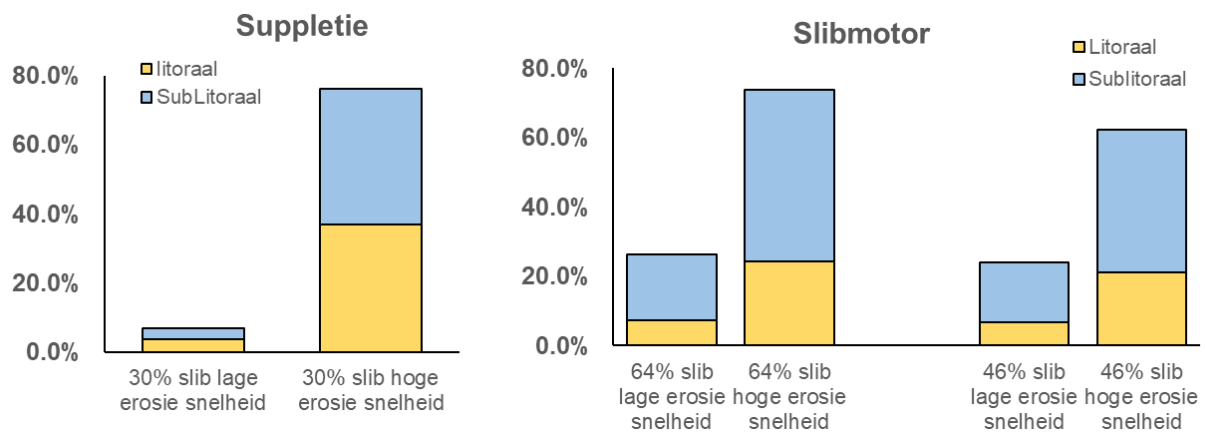
Voor een suppletie met een hoge erosiesnelheid verspreidt 76% van het slib zich vanuit de suppletie in drie maanden. Hiervan bevindt 49% zich in het litoraal wat overeenkomt met 11 kton afzetting verspreid over 782 ha (Figuur 47, Figuur 48 & Tabel 7).

Voor de slibmotor (100.000 m³, 64% slib) met een lage erosiesnelheid verspreidt 26% (Tabel 7) van het gestorte slib zich aan het einde van de simulatie (met een minimale aanslibbing van 1 mm). Hiervan komt 27% terecht in het litoraal, goed voor 5 kton verspreid over 273 ha met een gemiddelde aanslibbing van 4.2 mm (Tabel 7).

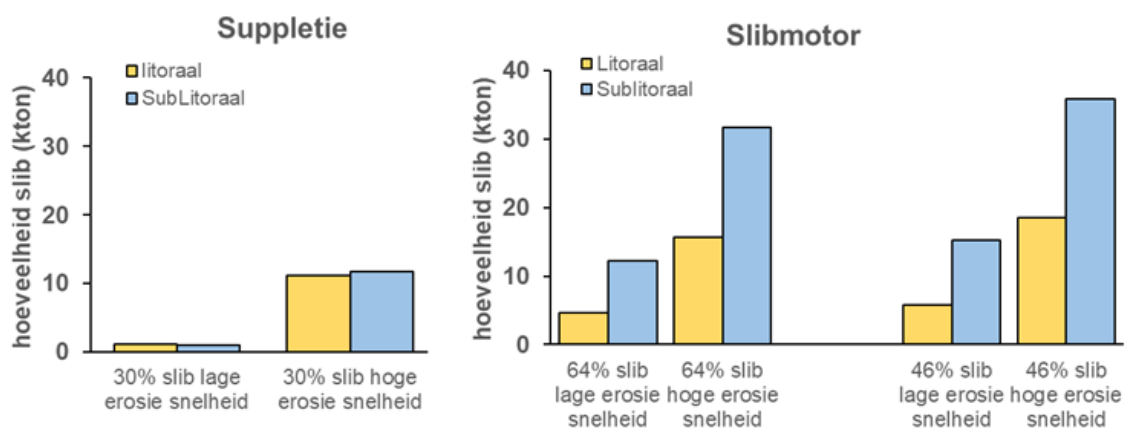
Voor de slibmotor met een hoge erosiesnelheid verspreidt 74% van het gestorte slib zich (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7). Hiervan komt 33% in het litoraal terecht, wat overeenkomt met 16 kton die verspreid wordt over 356 ha met een gemiddelde laagdikte van 10,9 mm.

Wanneer de volledig beschikbare 190.000 m³ uit de Zandkreek gebruikt wordt als slibmotor (slibpercentage van 46%) verspreidt bij een lage erosiesnelheid 24% van het slib zich (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7). Hiervan ligt 28% (6 kton) op het litoraal verspreid over 303 ha met een gemiddelde aanslibbing van 4.8 mm. Bij een hoge erosiesnelheid wordt 62% slib afgezet waarvan 34% (19kton) op het litoraal (verspreid over 393 ha met gemiddelde aanslibbing van 11.8 mm (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7).

Wanneer alles in de diepe put O10 gestort wordt (46% slibpercentage), rekening houdend met een hoge erosiesnelheid, zal 38% van het slib zich verspreid hebben aan het einde van de modelberekening. Hiervan komt 5% (2 kton) in het litoraal terecht verspreid over 300 ha (gemiddelde aanslibbing van 1,5mm).



Figuur 47. Percentage van de slibfractie van het gedeponeerde sediment met een minimale laagdikte van 1 mm dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor: een suppletie van 100.000 m³ met een slibpercentage van 30% (links); een slibmotor van 100.000 m³ met een slibpercentage van 64% (midden); en een slibmotor van 190.000m³ met een slibpercentage van 46% (rechts). Voor alle varianten wordt de situatie met een lage en hoge erosiesnelheid weergegeven.



Figuur 48. Verspreiding van de slibfractie van het gedeponeerde sediment (met een minimale laagdikte van 1 mm) in kton dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor: een suppletie van 100.000 m³ met een slibpercentage van 30% (links); een slibmotor van 100.000 m³ met een slibpercentage van 64% (midden); en een slibmotor van 190.000m³ met een slibpercentage van 46% (rechts). Voor alle varianten wordt de situatie met een lage en hoge erosiesnelheid weergegeven.

De resultaten kunnen ook op een andere manier geïnterpreteerd worden. De verspreiding aan het einde van de modelberekeningen met een lage erosiesnelheid geeft de situatie weer wanneer maar een relatief klein deel van het slib zich vanuit de stortlocatie verspreid heeft, terwijl de berekeningen met een hoge erosiesnelheid de situatie schetsen waarbij het meeste slib (62-74%, Tabel 7) verdwenen is uit de oorspronkelijke stortlocatie en zich verspreid heeft. Opgemerkt dient te worden dat de vermelde laagdiktes ongeconsolideerd slib betreft, dat na consolidatie ongeveer de helft zal zijn.

Tabel 7. Kenmerken van de verschillende scenario's en hun effect op de slibverspreiding. Kenmerken van het gestorte sediment: Erosiegevoeligheid (τ_{cr} = kritische bodemschuifspanning), gestort volume (V_{tot}), bulkdensiteit (Bulk) en totale hoeveelheid gestort (M_{tot}), slibfractie (Slib) en hoeveelheid slib gestort (M_{slib}). Slibverspreiding na drie maanden: percentage slib (Spreid_tot) en hoeveelheid (M_{spreid_tot}), aandeel (Spreid_lit) en hoeveelheid (M_{spreid_lit}) van Spreid_tot M_{spreid_tot} dat op het litoraal terecht komt, het oppervlak (Ospreid_lit) dat met minimaal 1 mm slib bedekt wordt en de gemiddelde laagdikte (dZ).

	τ_{cr} (pa)	V_{tot} (m ³)	Bulk (kg/m ³)	M_{tot} (kton)	Slib (%)	M_{slib} (kTon)	Spreid_tot (%)	M_{spreid_tot} (kTon)	Spreid_lit (kton)	M_{spreid_lit} (kton)	Ospreid_lit (ha)	dZ (mm)
Suppletie	0.8	100000	1000	100	30%	30	7%	2	53%	1	174	1.6
	0.2	100000	1000	100	30%	30	76%	23	49%	11	782	3.5
Sedimentmotor_klein	0.4	100000	1000	100	64%	64	26%	17	27%	5	273	4.2
	0.2	100000	1000	100	64%	64	74%	47	33%	16	356	10.9
Sedimentmotor_groot	0.4	190000	1000	190	46%	87	24%	21	28%	6	303	4.8
	0.2	190000	1000	190	46%	87	62%	54	34%	18	393	11.8

6.2.2 Verspreiding van de zandfractie

De verspreiding van de zandfractie wordt in hoofdzaak bepaald door het suspensietransport. Als gevolg van de grotere transporten (en de kleinere waterdiepte) verplaatst de suppletie (~ 500 - 1000 m jaar⁻¹) zich naar verwachting een stuk sneller dan de slibmotor (~ 10 - 20 m jaar⁻¹). Beide transporten zijn in noord – noordwestelijke richting, m.a.w. richting de geulen. De zandfractie van de sedimentmotor zal dus maar beperkt op het litoraal terecht komen en dus weinig bijdrage leveren aan behoud of versterking van het litorale habitat. De suppletie ligt in het litoraal en de zandfractie (in dit scenario 70.000 m³) zal voor een periode van ~ 2 - 3 jaar blijven liggen en bij transport richting de geul ook nog meerdere jaren het lagere litoraal blijven voeden. De zandfractie van het litoraal draagt dus wezenlijk bij aan het behoud en versterking van het litorale habitat (zie ook 6.2.3).

6.2.3 Effecten op droogvalduur en (autonome) erosie van het intergetijdengebied

De lage suppletie wordt in het litoraal aangebracht en draagt daarmee direct bij aan het behoud en versterken van het litorale habitat met 20 ha. Met name vindt er een toename in oppervlakte plaats tussen ongeveer NAP- $0,1$ m en NAP+ $0,4$ m van 20 ha. Dit is in de droogvalduur zone van 40 - 80% , welke als belangrijke zone wordt geacht om in stand te houden voor de foerageerfunctie van het litorale habitat voor steltlopers (de Ronde et al. 2013). De slibmotor heeft dit effect niet. Lokaal worden er wel dikkere lagen slib afgezet die de droogvalduur zullen doen toenemen (tot max. 5 ha kent een opslibbing van > 5 cm), maar het grootste deel betreft verspreiding van een relatief dunne laag slib.

Zowel de lage suppletie als de slibmotor oost resulteert in de verspreiding van slib in het litoraal over een behoorlijk grote oppervlakte (782 ha voor de suppletie, 356 - 393 ha voor de slibmotor). Het betreft hier een relatief dunne laag, gemiddeld 3.5 mm voor de suppletie en 10.9 - 11.8 mm voor de slibmotor (ongeconsoleerd slib) (zie Tabel 7). De suppletie laat zien dat een groter oppervlakte met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel met een dunnere laag. Dit komt door het verschil in hydrodynamische condities. De bodemschuifspanningen op het slik zijn hoger en dus kan het slib verder verspreiden. Het kan bovendien alle kanten op; de oostelijke slibmotor is meer ingesloten en golfwerking is daar minder sterk.

Deze sliblaag kan dus bijdragen aan het afremmen van de erosie van het slik als gevolg van de zandhonger. Het westelijke deel van het Verdrongen Land Van Zuid-Beveland erodeert gemiddeld met zo'n 10 mm per jaar, in het oosten treedt geen noemenswaardige erosie op (zelfs accretie in bepaalde delen). Waar geen erosie optreedt kan de afgezette sliblaag dus bijdragen aan opbouw. Zoals eerder gesteld is de afgezette sliblaag over het algemeen zeer dun. Er kan dan ook gesteld worden dat hiermee tijdelijk (max. 1 - 2 jaren) de erosie kan worden afgeremd, en wil dit soort

maatregelen effectief zijn in het afremmen van de erosie of het laten groeien van het slik zullen ze om de 1-2 jaren dienen herhaald te worden.

6.2.4 Effecten op het bodemleven en foerageerfunctie voor vogels

In eerste instantie wordt alle bodemleven bedolven onder een laag sediment ter grootte van de footprint van de stort- of suppletie locatie. In het geval van de suppletie gaat het in deze studie om een halve meter op 20 ha (100.000 m³), in het geval van de slibmotor om 20 ha (100.000 m³) of 38 ha (190.000 m³). Bij zo'n sedimentdikte gaat alle bodemleven dood en het vraagt een zekere tijd (3-5 jaren) voor het bodemleven om zich te herstellen (d.i. uit ervaring met suppleties bij de Galgenplaat en Oesterdam). Dit wil niet zeggen dat al het eerste jaar na het storten/suppleren zich bodemdieren zullen vestigen, maar met name herstel van de biomassa vraagt meer tijd. Vaak wordt na verloop van tijd wel een gelijkaardige soortenrijkdom en biomassa bereikt als voorheen, maar is de soortensamenstelling of de dominantie van bepaalde soorten anders.

Het verschil tussen de suppletie en de slibmotor is dat de suppletie in het litoraal plaatsvindt en daar dus duidelijk een oppervlakte geen of weinig bodemleven zal hebben en daarmee dus ook tijdelijk minder geschikt zal zijn als foerageergebied voor steltlopers. De slibmotor ligt sublitoraal en beïnvloedt daarmee niet direct de foerageerfunctie voor steltlopers.

De slibfractie die zich verspreidt over het litoraal betreft grotendeels een dunne laag slib die zich zal consolideren en door bioturbatie deels zal ingemengd worden in het sediment, maar mogelijks ook deels wordt uitgespoeld door bioturbatie. Op het overgrote deel van het litoraal verwachten we geen negatief effect van dit extra slib op het bodemleven, maar juist eerder positief. Het slikkengebied bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland is al relatief slibrijk (zie paragraaf 2.2) en een extra input van slib wordt als positief beoordeeld: slibrijk sediment houdt het water beter vast en kent vaak een hoge primaire productie aan microfytobenthos, wat enerzijds een belangrijke voedselbron is voor heel wat soorten bodemdieren (dus potentieel meer bodemdieren), en anderzijds een extra stabiliserend effect heeft op het sediment waardoor het minder snel erodeert. Enkel waar de afgezette sliblaag wat dikker is (> 1 cm, afhankelijk van de sedimentatiesnelheid), kan lokaal het bodemleven negatieve invloed ondervinden omdat het bedolven raakt onder een laag fijn slib.

6.2.5 Effecten op de schorren

De modelresultaten zijn hier weinig onderscheidend en het is dan ook moeilijk in te schatten wat het effect op de schorren zal zijn. Vermoedelijk zal een relatief klein deel van het slib op de schorren terecht komen, dit zal aanzienlijker zijn voor de slibmotor oost dan voor de lage suppletie (zie ook Figuur 49).

7 Discussie en conclusie

7.1 Algemeen

In deze studie hebben we onderzocht of het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een meer duurzame bestemming kan krijgen, met toegevoegde waarde voor de natuur in de Oosterschelde. Meer specifiek is onderzocht of sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek nuttig toegepast kan worden voor natuurbouw in de Kom van de Oosterschelde, met als doel het behoud van het litorale habitat voor foeragerende steltlopers. Het uiteindelijke zoekgebied dat geselecteerd is als kansrijk om een pilot uit te voeren betreft het slikkengebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Dit grote slikkengebied van zo'n 1350 ha is deels onderhevig aan erosie (westelijk deel, erosiesnelheden tot 10 mm per jaar), deels stabiel of zelfs licht aangroeiend (oostelijk deel). Het is van nature relatief slibrijk, zeker de hogere delen nabij de dijk en het schor. Het gebied kent nog een relatief groot oppervlak aan 50-80 % droogvalduur (zo'n 675 ha), maar een groot deel ligt ook laag (< 40% droogvalduur). In het algemeen is de verwachting dat, onder invloed van de zandhonger en zeespiegelstijging, het totale areaal intergetijdengebieden het meest zal afnemen in het oostelijke deelgebied (de Kom) (40%) binnen de komende 50 jaar en dat ook de lagere gebieden (<40% droogvalduur) eveneens het meeste zullen afnemen in de Kom (de Ronde et al. 2013). Op termijn zullen ook de hogere delen verdwijnen.

Het slikkengebied bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland heeft baat bij het in standhouden van deze droogvalduur verdeling, omdat dit gunstig is als foerageerhabitat voor steltlopers. Steltlopers zijn gebaat bij een litoraal habitat dat voldoende areaal aan droogvalduur klasse 40-80 % heeft, omdat dit de vogels in staat stelt voldoende lang te foerageren tijdens laagwater om in hun energiebehoefte te voldoen (de Ronde et al. 2013). Deze zone is nu nog in belangrijke mate aanwezig, dus grootschalige ingrepen (zoals bij de Roggenplaat) zijn nu nog niet aan de orde. Maar door het (regelmatig) aanbrengen van sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden (werk met werk) kan dit gebied gevoed worden met sediment waardoor op langere termijn de foerageerfunctie voor steltlopers kan behouden blijven.

In deze studie hebben we uiteindelijk twee type maatregelen in detail onderzocht: (1) een suppletie in het litoraal waarbij de minder slibrijke fractie van de specie die vrijkomt bij het baggeren van de Zandkreek wordt benut (100.000 m³, 20 ha, 30% slib), en (2) een slibmotor die wordt aangelegd in het sublitoraal met (a) de meer slibrijke fractie van de specie (100.000 m³, 20 ha, 64% slib) en (b) de totaal beschikbare te baggeren specie (190.000 m³, 38 ha, 46% slib). Voor beide type maatregelen zijn telkens twee scenario's onderzocht (vier in totaal), na selectie zijn er twee scenario's nader uitgewerkt: een suppletie laag in het litoraal op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, en een slibmotor helemaal in het oosten, grenzend aan de Oesterdam en het Verdrongen Land van Zuid-Beveland.

Beide scenario's zijn via modelberekeningen (slib- en zandverspreiding) en deskundigenoordeel verder uitgewerkt en beoordeeld.

7.2 Afweging tussen een suppletie en een slibmotor

Allereerst zijn de onderzochte maatregelen nooit eerder uitgevoerd in de Oosterschelde, en kunnen beide als innovatief worden beschouwd, met een groot potentieel voor kennisopbouw. Er is al wel de nodige ervaring met het suppleren van slikken en platen in de Oosterschelde, maar dit betrof steeds suppleren met zandig sediment met nauwelijks slib in. In deze studie betreft het slibrijk sediment, dat zich anders zal gedragen dan zand.

Tabel 8 vat de effecten op het litorale habitat van beide maatregelen samen. Hoewel begin condities verschillen tussen beide maatregelen (niet alleen in aanleg, maar ook in samenstelling van het sediment), kan toch een aantal duidelijke conclusies gemaakt worden:

1. Een suppletie in het litoraal draagt direct bij aan het ophogen/voeden van het litorale habitat (met 20 ha, 0.5 m hoog), en meer specifiek versterkt het de droogvalduur in de zone 40-80% waardoor deze zone langer in stand wordt gehouden. Dit is niet het geval voor de slibmotor die in het sublitoraal wordt aangelegd.
2. De zandfractie van de suppletie (in dit geval zo'n 70.000 m³) draagt met name bij aan de ophoging van het slik (zie punt 1). De verwachte verplaatsing is aanvankelijk ~60-100 m/jaar en na verloop van tijd 400-600 m/jaar in N richting en zal de suppletie binnen ~3-30 jaar afgevlakt cq. uitgedoofd zijn. De ondergrens van de verplaatsing en de bovengrens van de uitdovingstijd corresponderen met de situatie direct na aanleg; de aanwezigheid van slib vertraagt de morfologische ontwikkeling. De levensduur van de zandfractie van deze suppletie is korter dan de levensduur die voorspeld wordt voor bijv. de Roggenplaat suppleties. Dit heeft vooral te maken met het fijnere sediment dat in deze studie gebruikt wordt, maar ook met de lokale hydrodynamische omstandigheden (golfwerking). Het zand verplaatst zich richting de geul en zal dus het lagere litoraal meerdere jaren voeden met zand. De zandfractie van de slibmotor ligt bij aanvang sublitoraal en zal naar alle waarschijnlijkheid nauwelijks verspreiden in het litoraal, maar zal in het sublitoraal blijven liggen. De verspreiding vanuit de stortlocatie zal ook veel trager verlopen omwille van de kalmere hydrodynamische condities.
3. De slibfractie zal zich zowel bij de suppletie als de slibmotor verspreiden via de waterkolom en deels in het litoraal en deels in het sublitoraal op de bodem terecht komen. Qua efficiëntie verspreidt zich er meer slib naar het litoraal vanuit de suppletie dan vanuit de slibmotor (49% tegenover 33%). De absolute hoeveelheid die verspreidt is groter voor de slibmotor, omdat hier sediment is gestort met een grotere slibfractie dan de suppletie.
4. De suppletie laat zien dat een groter oppervlakte van het litoraal met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel een dunnere laag (Figuur 49). Dit komt door het verschil in hydrodynamische condities. De bodemschuifspanningen op de plaat zijn hoger en dus kan het slib verder verspreiden. Het kan bovendien alle kanten op; de oostelijk slibmotor is meer ingesloten en golfwerking is daar minder sterk.
5. De bijdrage van de slibfractie aan het ophogen van het litorale habitat is relatief klein, gaande van enkele mm's tot enkele cm's. Enkel lokaal zullen wat dikkere slibpakketten worden afgezet (vooral bij de slibmotor). Wel gaat het hier om een grote oppervlakte (Tabel 8). Éénmalig deze maatregel uitvoeren zal dus niet veel bijdragen aan de lange termijn erosie van dit gebied (zeker met versnelde zeespiegelstijging), maar bij regelmatig herhalen kan de slibfractie wel degelijk bijdragen aan het afremmen van de erosie van dit gebied. Met name in het oostelijk deel, waar nu geen erosie optreedt, zal de bijdrage naar verwachting het grootst zijn. Hier heeft de slibmotor een positief effect.

6. Extra slib in het litorale habitat van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland wordt als positief beoordeeld, omdat het naar alle waarschijnlijkheid de biologische rijkdom zal doen toenemen.
7. Conclusie: de suppletie draagt meer bij aan het in standhouden van het litorale habitat van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland dan een slibmotor.

Tabel 8. Samenvatting van de effecten van een slibmotor en suppletie op het litorale habitat. Resultaten tonen de simulaties met een hoge erosiegevoeligheid ($\tau_{cr} = 0.2 \text{ Pa}$), omdat dit beter weergeeft waar het slib uiteindelijk terecht zal komen, ongeacht de snelheid waarmee dit gebeurt.

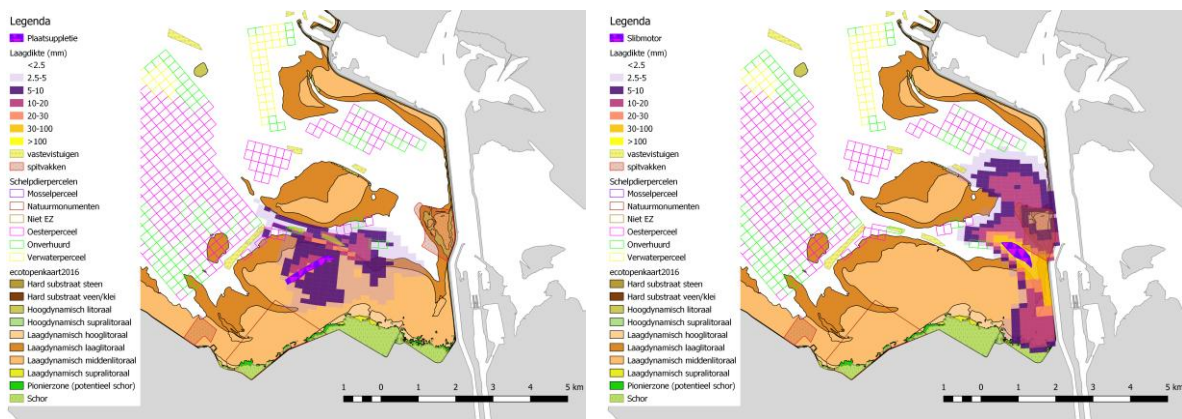
	Suppletie	Slibmotor
Kenmerken		
Bronlocatie	Litoraal	Subtidaal
Oppervlakte stortlocatie	20 ha	20 ha
Volume totaal	100.000 m ³	100.000 m ³
Volume slibfractie	30.000 m ³	64.000 m ³
Volume zandfractie	70.000 m ³	36.000 m ³
Effecten		
<u>Zandfractie</u>		
Oppervlakte in het litoraal direct na aanleg	20 ha	0 ha
Verplaatsing (m/jaar) (hoge τ_{cr} – na aanleg, door slib)	60-100	1-2
Verplaatsing (m/jaar) (lage τ_{cr} – na verloop van tijd)	400-600	10-20
Uitdovingstijd (jaar) (hoge τ_{cr} – na aanleg, door slib)	20-30	200-900
Uitdovingstijd (jaar) (lage τ_{cr} – na verloop van tijd)	3-4	20-70
Hoofdrichting van het netto zandtransport	N	NNW
<u>Zandfractie</u>		
Oppervlakte in het litoraal direct na aanleg	20 ha	0 ha
Duur aanwezig in stort-/suppletielocatie	2-3 jaar	20-30 jaar
Hoofdrichting van het netto zandtransport	N	NNW
<u>Slibfractie</u>		
Volume in het litoraal direct na aanleg	30.000 m ³	0 m ³
Volume in de stortlocatie nog aanwezig een maand na aanleg	7.200 m ³ (24%)	16640 m ³ (26%)
Volume/kton verspreid over het litoraal een maand na aanleg*	11k m ³ / 11 kton	16k m ³ / 16 kton
Volume/kton verspreid over het litoraal einde verspreiding**	15k m ³ / 15 kton	21k m ³ / 21 kton
Efficiëntie verspreiding slib naar litoraal***	± 49%	± 33%
Totale litorale oppervlakte beïnvloed (> 1mm)****	782 ha	356 ha
Gemiddelde aanslibbing in het litoraal een maand na aanleg	3.5 mm	10.9 mm
<u>Droogvalduur (DVD)</u>		
Bijdrage aan versterken 40-80% DVD	20 ha	0 ha
Duur van de bijdrage	5-10 jaar	0

* voor de suppletie: volume slib verspreid vanuit de suppletie in het litoraal

** : alle slib verdwenen uit stortlocatie en verspreid in omgeving (geïnterpoleerd)

*** : percentage van het slib dat in het litoraal terecht komt; overige in het sublitoraal

**** : oppervlakte van het litoraal dat beïnvloed wordt door slib dat zich verspreidt vanuit de bronlocaties op het einde van de simulatie



Figuur 49. Verspreiding van slib bij de suppletie (links) en slibmotor (rechts). Zie Tabel 8 voor kenmerken.

Het is interessant om te bekijken wat het effect zou zijn mocht een suppletie aangelegd worden met dezelfde kenmerken als de slibmotor, dus niet met 30% slib maar met 64% slib. Dit is verder niet gemodelleerd maar op basis van een deskundigenoordeel is de verwachting dat bij een groter slibvolume in de suppletie het oppervlakte dat beïnvloed wordt niet sterk zal veranderen; vooral de sliblaag zal dikker worden. Dit geldt voor het gebied dat überhaupt beïnvloed wordt (d.i. de footprint van de suppletie). De slibmotor geeft aan het einde van de levensduur $\sim 1,5$ cm aanslibbing over ~ 400 ha litoraal gebied. Bij de slibsuppletie met zelfde hoeveelheid slib zal dit $\sim 0,5$ cm zijn voor een ~ 800 ha (beide scenario's met hoge erosiesnelheid). Het totale volume slib in het litoraal is echter groter voor de suppletie, wat zichtbaar is in het % verspreid in het litoraal (~ 49 vs 33% , Tabel 7).

Wanneer we terug komen op de doelstellingen / vragen gesteld bij aanvang van dit project:

Hoofdvraag: Draagt storten/suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie (suppletie) of strategische locatie (slibmotor) bij tot behoud of mogelijks versterking van het foerageerareaal in de Kom van de Oosterschelde (en daarmee aan Natura 2000-instandhoudingsdoelstellingen)?

Antwoord: Beide maatregelen hebben een positief effect op het litorale habitat van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, zoals hierboven geschetst. De baten worden groter ingeschat voor de suppletie dan voor de slibmotor.

Nevenvraag: Draagt suppleren op een doellocatie of strategische locatie bij aan behoud van bestaande schorren?

Antwoord: De modelresultaten zijn hier weinig onderscheidend en het is dan ook moeilijk in te schatten wat het effect op de schorren zal zijn. Vermoedelijk zal een relatief klein deel van het slib op de schorren terecht komen, dit zal aanzienlijker zijn voor de slibmotor oost dan voor de lage suppletie (zie ook Figuur 49). De onderzochte maatregelen zullen dus vooral het slik beïnvloeden, en daarmee indirect het schor, want een hoog en breed voorland beschermt het schor tegen laterale erosie (Bouma et al. 2016; Ladd et al. 2019; Willemsen et al. 2020). Voor een groter effect op het schor zal het sediment beter hoger in het litoraal moeten worden aangebracht.

Nevenvraag: Is het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor natuurbouw en kustveiligheid een duurzame en kostenefficiënte maatregel? Hier spelen zaken zoals verspreiding en verblijftijd van het sediment in het litorale habitat, maar ook mogelijke neveneffecten en kosten-baten i.v.m uitvoering en aanleg.

Antwoord: In essentie lijkt het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het

beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Een combinatie met golfbrekende structuren zal de effectiviteit verder vergroten. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. Het is gunstiger grotere hoeveelheden in een keer te storten, omdat het tijdsinterval waarop de suppletie herhaald dient te worden hiermee zal toenemen. De kosten die gepaard gaan met de aanleg van een suppletie dan wel slibmotor worden niet in detail behandeld in deze studie.

In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar. Ondanks dat moet toch ook met deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

Hierbij dient nogmaals benadrukt te worden dat de modelsimulaties een relatief grote onzekerheid kennen en de resultaten dientengevolge met de nodige voorzichtigheid dienen geïnterpreteerd te worden.

Als laatste is het belangrijk te onderstrepen dat beide maatregelen innovatief zijn, met een groot potentieel voor kennisopbouw, welke in de toekomst ook bruikbaar zal zijn voor beheer in andere estuaria en kustgebieden, zowel in Nederland als wereldwijd. Intergetijdengebieden staan wereldwijd onder druk door menselijk handelen en klimaatverandering (met name zeespiegelstijging maar ook toename in stormfrequentie en – intensiteit), en zullen in de toekomst in toenemende mate moeten beschermd, dan wel ontwikkeld worden, omwille van de vele ecosysteemdiensten die deze habitats leveren. Een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitoringsprogramma.

Een aantal aanbevelingen zijn:

- Optimalisatie suppletie: lage suppletie wat hoger, zo hoog als technisch haalbaar is => zal leiden tot nog meer slib op het slik en langere levensduur van het zand op het litoraal.
- Optimalisatie suppletie: toch alle 190.000 m³ benutten voor de suppletie => groter effect van de slibfractie op het litoraal. Bij gebruik van grotere hoeveelheden baggerspecie moet wel een nieuwe effectberekening en evaluatie gemaakt worden.
- Golf reducerende maatregelen zullen zeker helpen om het slib en zand van de suppletie beter vast te houden.
- Naast toepassingen zoals voorgesteld hier: toepassing binnendijks onderzoeken in het kader van dubbele dijken en wisselpolders.

Fase 2: Definitief suppletie-ontwerp + monitoringsplan

1 Inleiding – Fase 2: definitief suppletie-ontwerp

Op basis van fase 1 en een bijeenkomst op zes januari 2020 (Bijlage 1) is besloten dat een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland een geschikte invulling kan geven aan de Natuur Impuls Oosterschelde, daarbij gebruik makend van de onderhoudsbaggerspecie die vrijkomt bij het uitbaggeren van de vaargeul in de Zandkreek. Besloten is om een volgende fase in te gaan en de lage suppletievariant, zoals in fase 1 uitgewerkt, verder te optimaliseren qua ligging, opnieuw te modelleren voor slibpluimverspreiding en zandtransport, en daarbij een monitoringsplan op te stellen voor dit definitief ontwerp.

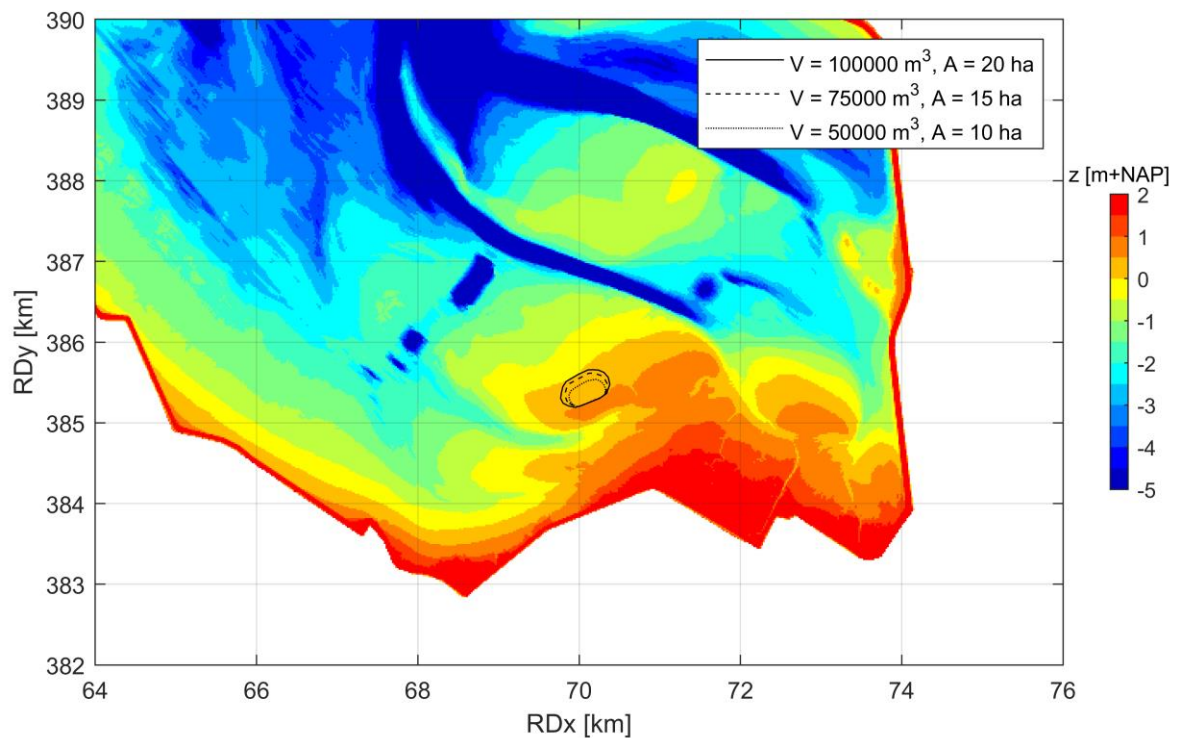
Op 27 januari 2020 heeft een deskundigenbijeenkomst (Bijlage 1) plaatsgevonden waarop de lage suppletievariant opnieuw is bekeken en een eerste schets gemaakt om deze qua ligging te optimaliseren. Deze voorkeursvariant (=definitief suppletie-ontwerp) is nader uitgewerkt door Deltares en wordt in fase 2 van dit rapport nader toegelicht, incl. het monitoringsplan.

2 Kenmerken definitief suppletie-ontwerp

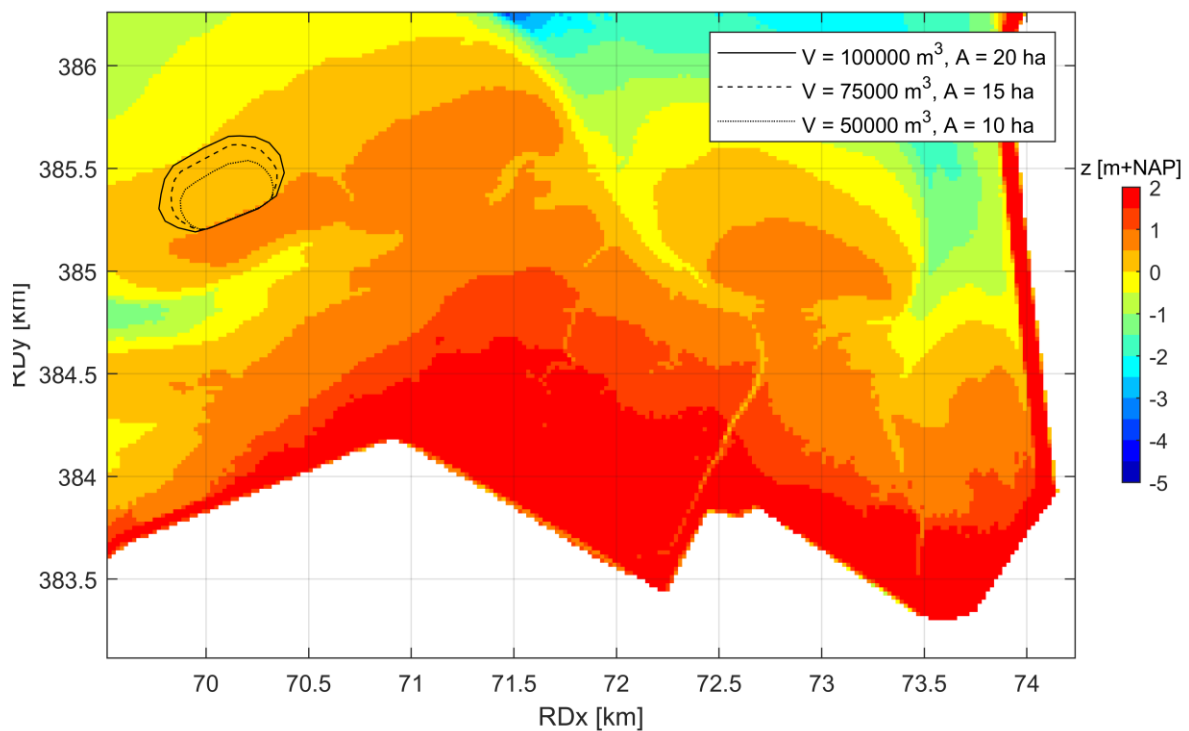
Op basis van de deskundigenbijeenkomst van 27 januari 2020 is een definitief ontwerp gekozen die weergegeven staat in Figuur 50 en Figuur 51. Als basis is de redeneerlijn uit fase 1 gebruikt. Aanvullende beschouwingen/criteria volgend uit de bijeenkomst zijn:

- er wordt één definitief ontwerp beschouwd;
- voor dit ontwerp zijn drie volumes ingetekend (50.000 m³, 75.000 m³ en 100.000 m³). Dit omdat het budget momenteel nog niet is vastgesteld;
- In het definitieve ontwerp wordt gerekend met 3 varianten met een suppletievolume van 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het totale baggervolume is echter groter, zodat een selectie van de specie moet worden gemaakt. Hierbij geldt dat het meest zandige deel van de specie (voornamelijk bij de overgang van de Zandkreek naar de Oosterschelde) het eerst in aanmerking komt voor de plaatsuppletie en dat het resterende meest slibrijke deel (voornamelijk achterin bij de sluis) wordt verspreid in de reguliere verspreidingslocatie O10.
- voor de dikte van de suppletie is vastgehouden aan 0.5 m (in lijn met fase 1):
 - dunner wordt onwenselijk geacht (hogere aanlegkosten en grotere verstoring (d.i. groter oppervlakte) van aanwezige bodemdieren);
 - dikker wordt ook onwenselijk geacht (grotere verstoring van de vorm/morfologie van het slik en mogelijke problemen met consolidatie);
 - uiteraard hoeft de 0.5 m niet exact gerealiseerd te worden. Gedacht kan worden om de aannemer in de uitvoering een marge te geven van +/- 20 cm, mits dit geen nadelige gevolgen heeft voor de ecologie. Bijvoorbeeld: grote vlaktes waar het water bij het droogvallen op vast blijft staan dienen voorkomen te worden;
- het ontwerp is gepositioneerd tussen de twee suppletievarianten op het slik van onze eerdere analyse (suppletie laag en suppletie hoog uit fase 1):
 - daarmee ligt het ontwerp nu hoger op de plaat dan de eerdere lage suppletievariant (met waarschijnlijk minder verlies naar de noordelijk gelegen geul (Mosselkreek), maar ligt het ontwerp wel nog dichterbij dan 2 km (max ~1.6 km) van de noordelijke geul (Mosselkreek) t.b.v. uitvoerbaarheid;
 - de afwateringskreek tussen de twee eerdere suppletievarianten wordt niet geblokkeerd. Dit ter minimalisatie van de hoeveelheid slib dat richting de westelijk gelegen oesterpercelen zal transporteren. Bovendien wordt suppleren op de ontwateringskreek ook onwenselijk geacht omdat het waarschijnlijk is dat het slik een nieuwe kreek zal vormen of de suppletie extra zal doen eroderen;
 - voor de zelfde hoogteligging zou het ontwerp ook iets in noordoostelijke richting verplaatst kunnen worden, maar dit wordt onwenselijk geacht omdat het verlies van sediment naar de noordelijke geul dan zal toenemen;
- net als voor de eerdere ontwerpen is aangehouden dat de hoogte van de suppletie na aanleg niet hoger mag zijn dan NAP+1.0 m (~75% droogvalduur). Met de dikte van 0.5 m is het ontwerp ingetekend op een bodem die nu niet hoger dan NAP+0.5 m ligt;
- er is gekozen voor een ontwerp met een meer gelijkwaardige lengte/breedte-verhouding (dus minder langwerpig), dit omdat dit waarschijnlijk in lagere uitvoeringskosten resulteert (kortere omtrek);

- het is een positieve bijkomstigheid dat het ontwerp doorkruist wordt door één van de reeds bestaande RTK-dGPS raaien van Rijkswaterstaat. Dit geeft een meerjarig inzicht in de lokale ontwikkeling van het slik in de T0 situatie.



Figuur 50. Hoogte kaart met positionering van de voorkeursvariant suppletie in de kom van de Oosterschelde. De drie verschillende contouren geven de ontwerpen weer voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³). De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LIDAR) van 2016.



Figuur 51. Zoom in op de voorkeursvariant suppletie voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³).

3 Sedimentverspreiding definitief suppletie-ontwerp

3.1 Slibverspreiding definitief suppletie-ontwerp

3.1.1 Modelinput

Voor de modellering is gebruik gemaakt van een bestaand slibverspreidingsmodel voor de Oosterschelde. Het slibmodel is gebaseerd op het hydrodynamische model ScalOost (5^e generatie). Voor meer details zie paragraaf 5.1 van fase 1 van dit rapport en Van Duren et al. (2019).

Dit model beschrijft alleen de verspreiding van de fijne sedimentfractie (< 63 µm) en niet van de zandfractie. Voor de stabiliteit en initiële transportrichting van de zandfractie is een aparte analyse gemaakt (zie paragraaf 3.2 van fase 2).

Het definitieve ontwerp kent 3 varianten, namelijk een suppletie van 10, 15 of 20 ha afhankelijk van de kosten per m³ en het beschikbare budget om deze suppletie aan te leggen. Voor alle varianten is de dikte van de opgebrachte laag 0.5 m, zodat het gaat om een suppletievolume van respectievelijk 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het slibpercentage in het sediment bedraagt voor alle varianten 30% en de kritische schuifspanning voor erosie is 0.2 Pa. Dit geeft een bovengrens voor de verspreidingssnelheid van de slibfractie en een bovengrens voor de extra vertroebeling en snelheid van opslibbing buiten het suppletiegebied. In fase 1 is met zowel 0.2 Pa (lage kritische schuifspanning, hoge erosiesnelheid en snelle slibverspreiding) als 0.8 Pa (hoge kritische schuifspanning, lage erosiesnelheid en trage slibverspreiding) gerekend. De verspreiding aan het einde van de modelberekeningen met een lage erosiesnelheid geeft de situatie weer wanneer maar een relatief klein deel van het slib zich vanuit de stortlocatie verspreid heeft, terwijl de berekeningen met een hoge erosiesnelheid de situatie schetsen waarbij het meeste slib verdwenen is uit de oorspronkelijke suppletie en zich verspreid heeft.

De varianten zijn in Tabel 9 samengevat.

Tabel 9. Kenmerken van het definitieve ontwerp t.b.v. de modelberekeningen.

Code	Locatie	Volume (m ³)	Areaal (ha)	Slibpercentage (%)	Kritische schuifspanning (Pa)
<i>Modelberekeningen definitieve scenario's</i>					
R08PH2_2_30_S05_10ha	def	50.000	10	30%	0.2
R08PH2_2_30_S05_15ha	def	75.000	15	30%	0.2
R08PH2_2_30_S05_20ha	def	100.000	20	30%	0.2

De belangrijkste modeluitvoer is de verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom t.g.v. de verspreidingen en de extra aan- of opslibbing van de bodem die hierdoor ontstaat. Deze uitvoer is ruimtelijk en op diverse tijdstippen beschikbaar. De hier getoonde resultaten van de slibconcentraties in de waterkolom zijn de weekgemiddelde effecten vlak voor het einde van de aanlegperiode (week 9, na twee maanden) in de modelberekening) en enkele weken na afronding van de werkzaamheden (week 13, na

drie maanden). De slibpluim in week 9 geeft de hoogste concentraties in het water, in week 13 zijn de lokale concentraties lager, maar de verspreiding wat verder. Het model geeft voor de sliblaag op de bodem de massa per vierkante meter (kg/m^2) op het einde van de simulatieperiode (week 14). Om in te kunnen schatten wat dit voor effecten op de bodem geeft moet deze waarde omgerekend worden naar de laagdikte van slib. Dit kan echter variëren, afhankelijk van de toestand van het slib. Voor net afgezet en nog niet geconsolideerd slib is de dichtheid lager en dus de laagdikte groter, dan voor slib dat geconsolideerd is.

- Net afgezet slib: 1 kg.m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 2,5 mm (droge bulkdichtheid van 400 kg.m^{-3}).
- Geconsolideerd slib: 1 kg.m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 1,25 mm (droge bulkdichtheid van 800 kg.m^{-3}).

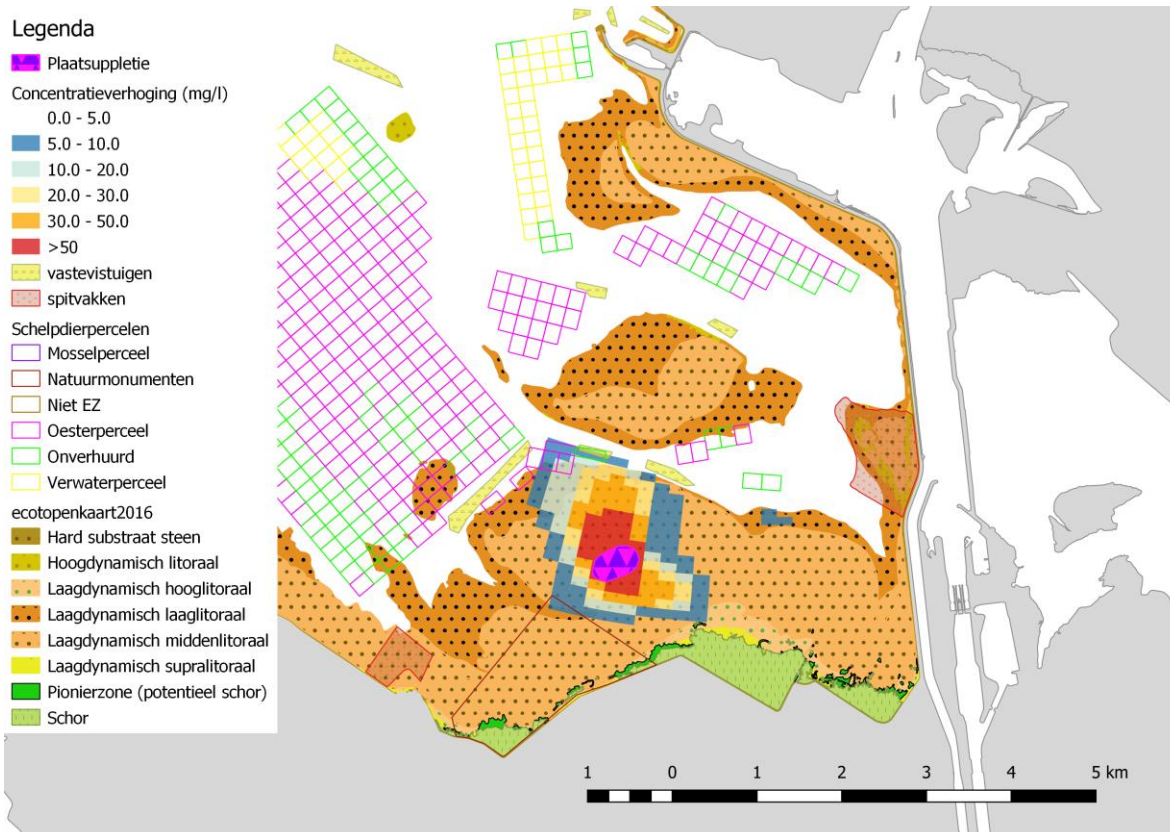
In de figuren is uitgegaan van net afgezet slib, resulterend in de grootste laagdikte. Dit geeft dus een "worst case" benadering van de mogelijke effecten op de omliggende oesterpercelen.

In de komende paragraaf worden de modelresultaten beschreven. De resultaten van het scenario met een plaatsuppletie van 20 hectare worden getoond. De resultaten voor de kleinere suppleties (10 en 15 Ha) zijn te vinden in Bijlage 4 en 5. Bij de varianten die zijn doorgerekend is tevens een analyse uitgevoerd op de potentiële natuur- en gebruikers functies volgens dezelfde methodiek als gebruikt in fase 1 (zie boven) en bij eerdere studies m.b.t. het storten van baggerslib in de Oosterschelde (Van Duren et al. 2019). Het gaat hierbij nadrukkelijk om de effecten op de omgeving t.g.v. slibverspreiding. Op de suppletielocatie zelf zal uiteraard de aanwezige biota in eerste instantie volledig verdwijnen. Effecten op de baggerlocatie zijn in deze studie niet meegenomen. Ook zijn effecten zoals verstoring van foeragerende vogels tijdens de werkzaamheden in deze sectie niet aan de orde.

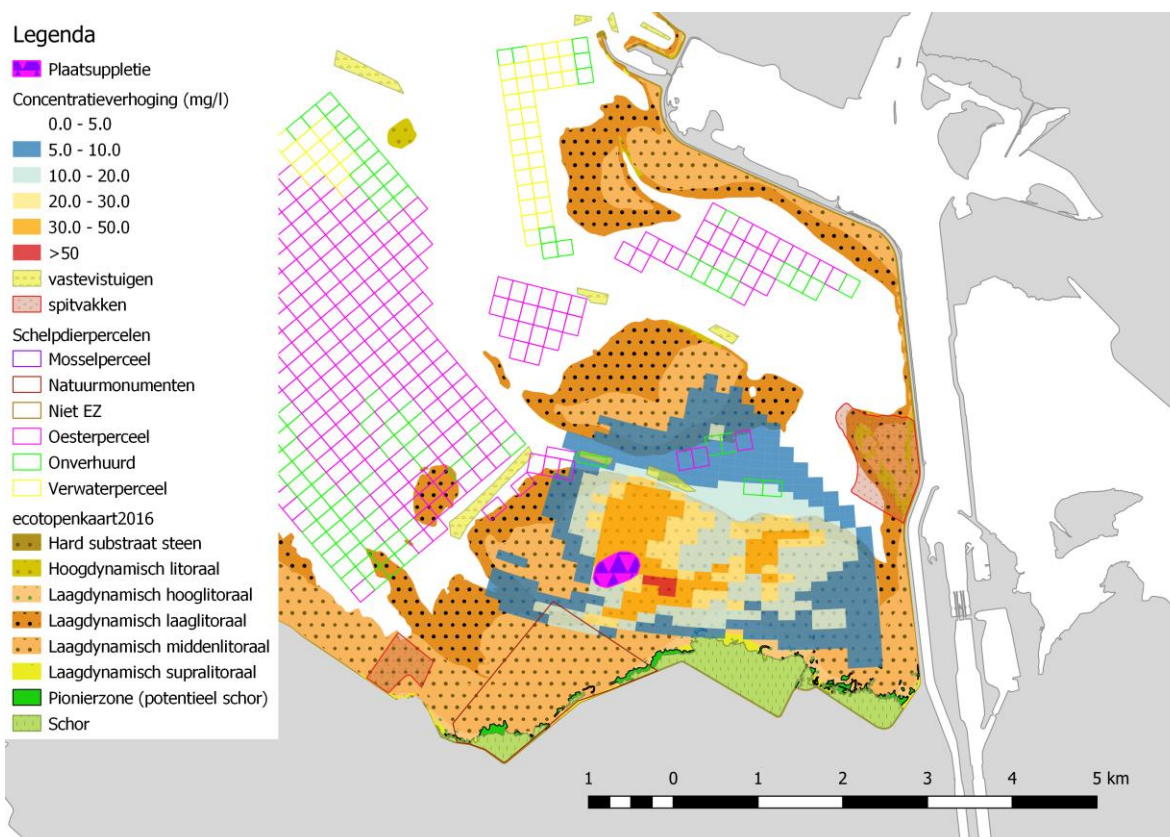
3.1.2 Modelresultaten definitief suppletie-ontwerp voor R08PH2_2_30_S05_20ha

Figuur 52 toont het resultaat van de modelsimulatie voor het definitieve ontwerp m.b.t. de verhoging van de weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van de suppletie (week 9, twee maanden simulatie). Ten opzichte van de eerder berekende variant 'lage suppletie' uit fase 1 (R08PH2_2_30_S03, zelfde kenmerken als definitief ontwerp, maar iets meer noordelijke locatie, zie fase 1 onderzoek), verloopt de verspreiding wat langzamer en is de maximale concentratieverhoging in de waterkolom lager. Bovendien spreidt de zone met een verhoogde concentratie zich wat minder ver uit rondom de suppletie. Dit is gunstig voor de mogelijke invloed op belendende oesterpercelen. Niettemin ondervinden enkele percelen ten noordwesten van de suppletie tijdelijk een concentratieverhoging van 5 tot 10 mg/l. Voor de suppletievarianten van 15 en 10 ha is deze invloed op de concentratie proportioneel kleiner.

Figuur 53 toont dezelfde resultaten tegen het einde van de berekening, namelijk ca. een maand na aanleg van de suppletie (week 13, drie maanden simulatie). Ook dan ondervinden enkele percelen een concentratieverhoging van 5 tot 10 mg/l, maar dit zijn andere, meer oostelijk gelegen percelen dan in week 9. Een verklaring voor deze verschillen is dat naast het getij ook windsnelheid en -richting een belangrijke invloed hebben op de verspreiding. Deze zijn sterk variabel.

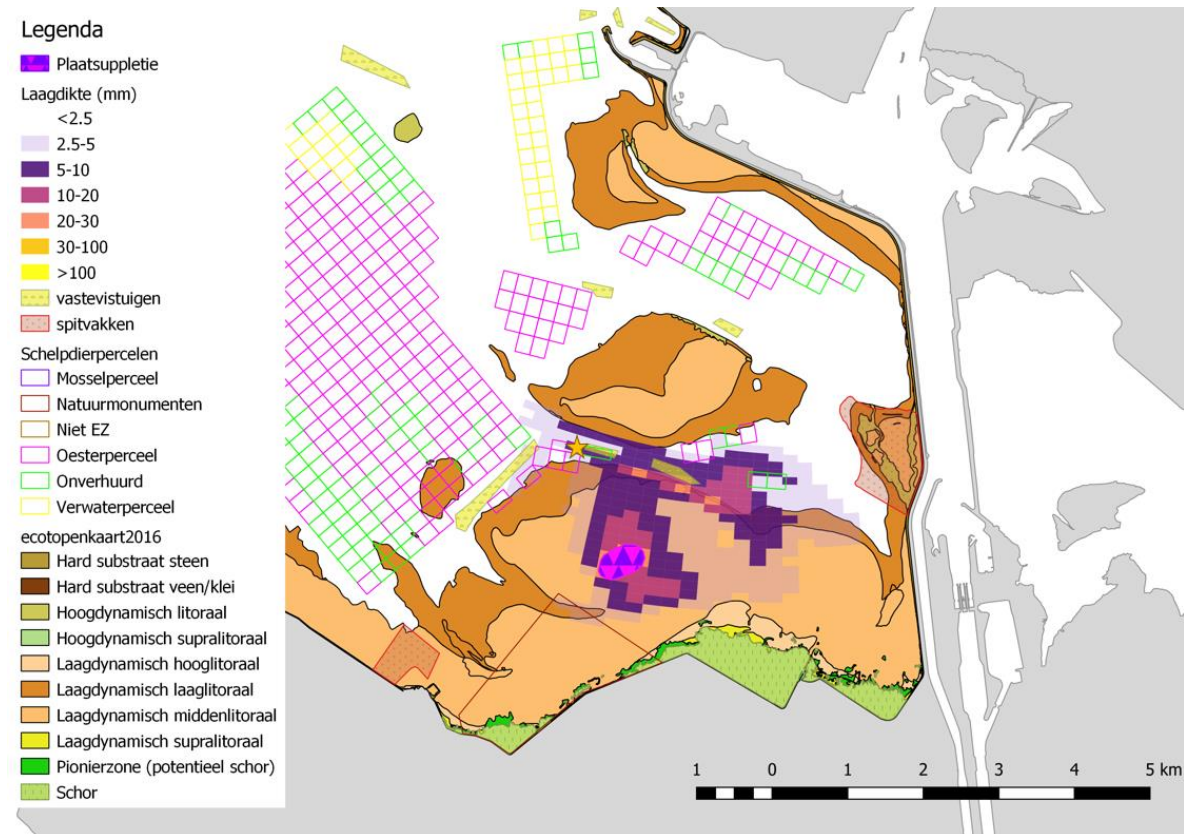


Figuur 52. Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van de suppletie (week 9) voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het gedeelte binnen de 'blauwe ring' geeft concentratieverhoging aan. De gestippelde oranje vlakken zijn het laagdynamisch litoraal.



Figuur 53. Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom in week 13 voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het gedeelte binnen de 'blauwe ring' geeft concentratieverhoging aan. De gestippelde oranje vlakken zijn het laagdynamisch litoraal.

Figuur 54 toont het resultaat van de modelsimulatie voor het definitieve ontwerp m.b.t. de verspreiding en accumulatie van het slib op de bodem één maand na de aanleg van de suppletie (week 14, drie maanden simulatie). Ten opzichte van de eerder berekende variant 'lage suppletie' uit fase 1 (R08PH2_2_30_S03, zelfde kenmerken als definitief ontwerp, maar iets meer noordelijke locatie, zie fase 1 onderzoek), verloopt de verspreiding wat langzamer en is de maximale dikte van de slibafzetting rondom de suppletielocatie kleiner. Dit is gunstig voor de mogelijke invloed op belendende mosselpercelen. Voor de suppletievarianten van 15 en 10 ha is deze invloed op de slibafzetting proportioneel kleiner.



Figuur 54. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken) voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het sterretje geeft aan waar de analyse voor de ophogingssnelheid is uitgevoerd.

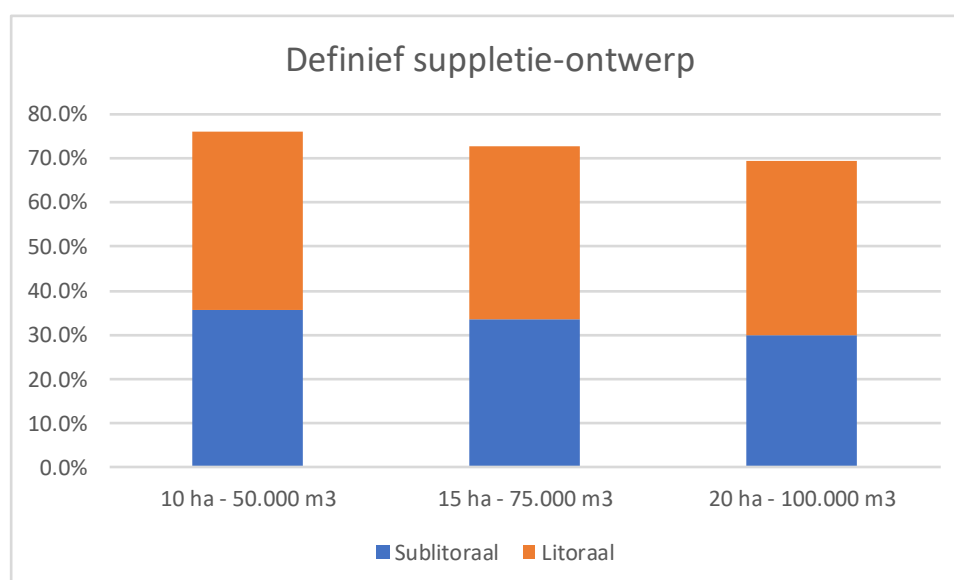
Tabel 10 toont de slibmassa en het areaal van de gebieden (buiten de suppletie zelf) met een dikte van opslibbing van meer dan 1 mm en meer dan 1 cm, zowel in het litoraal (> -1.47 m NAP) en het sublitoraal (< -1.47 m NAP). Hieruit blijkt dat de suppletie van 20 ha bijdraagt aan een opslibbing van meer dan 1 cm over 50 ha in het litoraal en over 52 ha in het sublitoraal. Een ophoging van meer dan 1 mm treedt over een veel groter gebied op, namelijk 792 ha in het litoraal en 659 in het sublitoraal. Nergens is de opslibbing meer dan 5 cm. Deze getallen zijn iets gunstiger, in de zin van de hoeveelheid slib dat in het litoraal terecht komt, dan voor de eerdere variant 'lage suppletie' (R08_PH2_2_30_S03, fase 1) die ter referentie ook in Tabel 10 is getoond. De verschillen voor laagdikte > 1mm zijn klein, maar voor een laagdikte > 1cm is het oppervlakte 3,5x groter bij het definitieve suppletie-ontwerp. Bij een suppletievolumen van 75.000 m³ is het areaal bedekt met een laagdikte > 1 cm gelijkaardig met de 'lage suppletie' uit het fase 1 onderzoek, bij een suppletievolumen van 50.000 m³ is het areaal bedekt met een laagdikte > 1 cm slechts de helft t.o.v. deze 'lage suppletie'.

Vanuit het definitief suppletie-ontwerp wordt 69-76% van het gestorte slib verspreid in drie maanden (met een minimale aanslibbing van 1 mm), afhankelijk van de hoeveelheid

gestorte baggerspecie (Tabel 10 en Figuur 55). Van dit verspreide sediment bevindt 53-57% zich in het litoraal wat overeenkomt met 12,1, 8,8 en 5,9 kton afzetting voor respectievelijk een suppletie van 100.000 m³, 75.000 m³ en 50.000 m³. De gemiddelde dikte van het verspreide slib is 3,1, 3,4 en 3,8 mm voor respectievelijk een suppletie van 100.000 m³, 75.000 m³ en 50.000 m³.

Tabel 10. Areaal met opslibbing voor respectievelijk een laagdikte > 1 mm en een laagdikte > 1 cm) voor het definitief suppletie-ontwerp voor de varianten 10 ha (50.000 m³), 15 ha (75.000 m³) en 20 ha (100.000 m³). In cursief is ter referentie ook de variant 'lage suppletie' (R08_PH2_2_30_S03) uit het fase 1 onderzoek opgenomen.

klasse	areaal (ha)	massa (kton)	areaal (ha)	massa (kton)
> 1 mm	litoraal		sublitoraal	
R08PH2_2_30_S05_20ha	792	12,1	659	10,7
R08PH2_2_30_S05_15ha	644	8,8	534	7,6
R08PH2_2_30_S05_10ha	485	5,9	366	4,5
<i>R08_PH2_2_30_S03</i>	<i>782</i>	<i>11,1</i>	<i>688</i>	<i>11,7</i>
> 1 cm	Litoraal		Sublitoraal	
R08PH2_2_30_S05_20ha	49,9	2,49	52,0	3,2
R08PH2_2_30_S05_15ha	20,6	1,12	28,7	1,6
R08PH2_2_30_S05_10ha	7,9	0,71	6,65	0,3
<i>R08_PH2_2_30_S03</i>	<i>17,0</i>	<i>0,81</i>	<i>66,8</i>	<i>4,1</i>



Figuur 55. Percentage van de slibfractie het gedeponeerde sediment met een minimale laagdikte van 1 mm dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor het definitief suppletie-ontwerp voor de varianten 10 ha (50.000 m³), 15 ha (75.000 m³) en 20 ha (100.000 m³).

3.1.3 Potentiële effecten

Bij de effecten van slibverspreiding is onderscheid gemaakt tussen effecten van verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom en effecten van sedimentatie van slib op de bodem.

3.1.3.1 Waterkolom

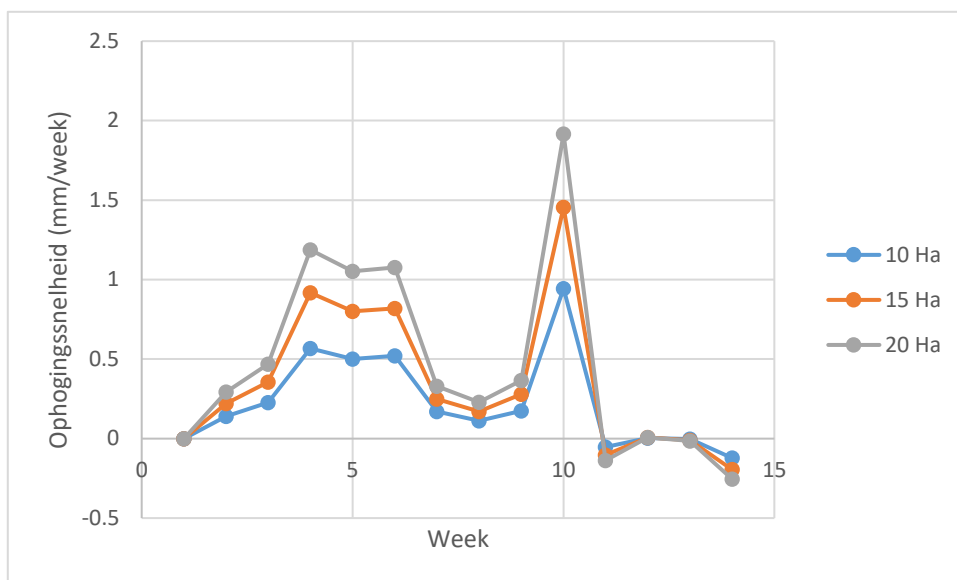
In Figuur 52 is te zien dat er lokaal zeer hoge concentraties slib in de waterkolom voorkomen vlak rond de suppletielocatie. Deze zeer hoge concentraties verdwijnen vrij snel (binnen 2 weken) na voltooiing van de werkzaamheden. Omdat er rond de locatie vrij veel fijn materiaal op de bodem ligt, kunnen in weken met veel wind, de concentraties in de omgeving af en toe weer verhogen, zoals te zien is in Figuur 53. Dit is een week met een aantal dagen met vrij veel wind, waardoor materiaal opwervelt en daarmee ook de weekgemiddelde concentraties verhoogd worden. In deze week komen op enkele oesterpercelen aan de zuidkant van de Hooge Kraaijer concentratieverhogingen van iets meer dan 10 mg/l voor. Dit zijn geen concentraties waarbij sterfte op kan treden bij oesters, maar enig effect op groeisnelheden kan niet helemaal worden uitgesloten. Het betreft wel een beperkt aantal percelen. Uit de eerdere studies is gebleken dat oesters en mosselen de meest gevoelige soorten zijn voor concentratieverhoging van slib in het water. Voor andere diersoorten wordt hier geen effect verwacht.

De gepresenteerde data zijn weekgemiddelden. Binnen deze weken zijn er wel enkele dagen dat concentratieverhogingen flink hoger kunnen liggen. Echter, een kortstondige periode (1 à 2 dagen) van verhoogde slibconcentraties kunnen schelpdieren over het algemeen goed doorstaan.

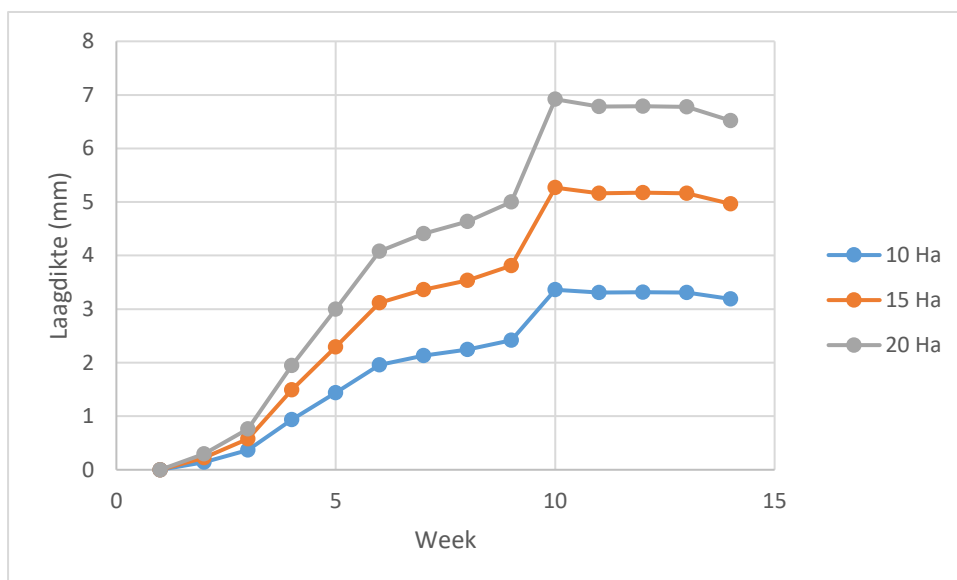
3.1.3.2 Bodem

In het scenario met een aangelegde suppletie van 20 hectare komen vlak in de buurt van de suppletie laagdiktes voor van enkele centimeters (Figuur 54, Tabel 10). NB: in dit model is alleen rekening gehouden met slib. Een deel van het zand zal zich ook over de bodem verspreiden rondom de suppletielocatie (zie verder). Ook langs de rand van het slik komt tot 10 kg slib per m² terecht wat overeenkomt met een laagdikte van 25 mm (2.5 cm) slib, over een tijd van 3 maanden. Er is slechts op een beperkt aantal oesterpercelen waar meer dan 2 kg/m² op terecht komt, overeenkomend met 5 mm ongeconsolideerd slib. In principe zijn dit hoeveelheden die voor oesters geen probleem vormen. Na 3 maanden zal een deel van het slib zijn geconsolideerd en de uiteindelijke laagdikte zal vermoedelijk minder zijn.

Uiteindelijk zijn opslibbingssnelheden belangrijker dan de uiteindelijke hoeveelheden die op een locatie terecht komen. Om zeker te zijn dat deze mate van opslibbing geen negatieve effecten zal hebben op deze oesterpercelen is voor alle drie de scenario's op één van de locaties een analyse gedaan op alle weekuitvoeren van het model (zie Figuur 54 voor locatie). Hiermee kan de snelheid waarmee slib op een bepaalde locatie accumuleert worden berekend. Figuur 56 toont de opbouw van de sliblaag op deze locatie. Figuur 57 toont de opslibbingssnelheid per week. Uit de literatuur blijkt dat schelpdieren in principe gemakkelijk om kunnen gaan met opslibbingssnelheden tot 1 cm /maand (Bijkerk 1988). De maximale snelheid bij het grootste scenario is 2 mm/week, dus nog minder dan 1 cm/maand. Alle andere weken zit de opslibbingssnelheid daar duidelijk onder. Dit houdt in dat dit geen probleem zou moeten opleveren voor de oesters op dit perceel. Op de andere percelen komt minder slib terecht, behalve op enkele onverhuurde percelen. Daar was de opslibbing vergelijkbaar.



Figuur 56. Laagdikte van gesedimenteerd slib over de modelperiode voor de drie scenario's



Figuur 57. Ophogingssnelheid per week op de aangegeven locatie.

3.1.3.3 Conclusies

M.b.t. de omgevingseffecten van slib, blijkt uit de modellen dat er in de directe omgeving van de suppletie (en uiteraard op de suppletielocatie zelf) effecten op het slib zullen plaatsvinden die tijdelijk negatief kunnen uitwerken voor de lokale bodemdierpopulaties en dus ook voor de waarde van het gebied als foerageergebied voor vogels. Het gebied waar meerdere centimeters materiaal terecht komt is beperkt. Wel zal er mogelijk langs de rand van het slib enige sterfte of verstikking van bodemdieren optreden. Omdat het gebied in oppervlak beperkt is zal het relatief snel rekoloniseren.

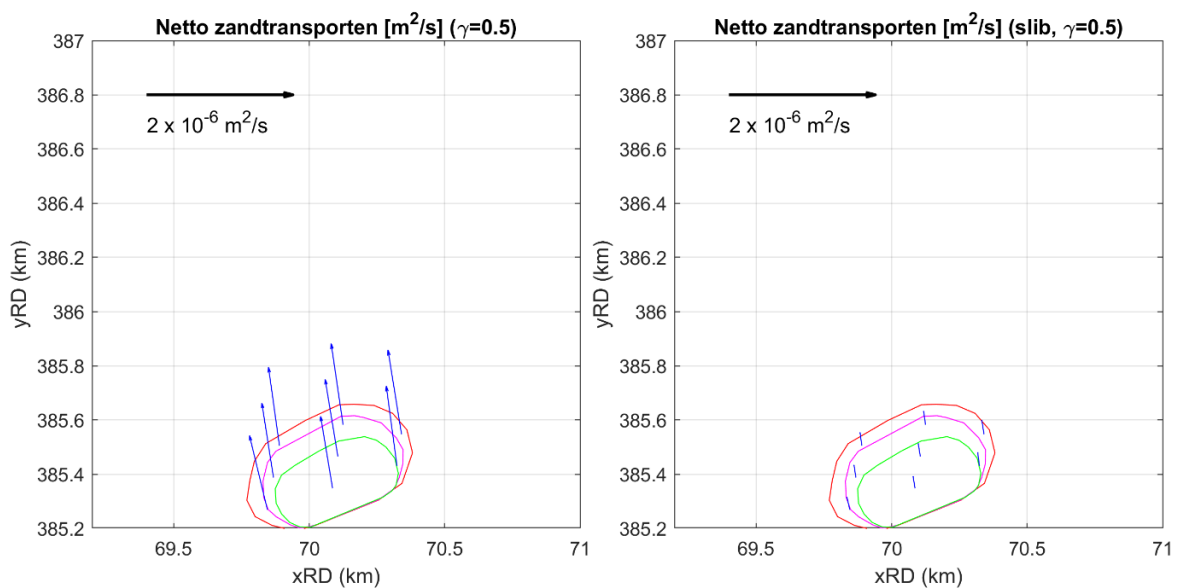
Op gebruiksfuncties lijkt er alleen een beperkt risico te zijn voor enkele oesterpercelen langs de Hoge Kraaijer. Dit speelt vooral rond de tijd van aanleg, wanneer slibconcentraties in het water zijn verhoogd. Effecten van opslibbing lijken nauwelijks significant.

3.2 Zandtransport definitief suppletie-ontwerp

Figuur 58 laat de berekende zandtransporten zien, met en zonder slibeffecten. De resultaten zijn erg vergelijkbaar met de eerder doorgekende plaatsuppletievariant, die een paar honderd meter naar het noorden lag (zie fase 1). De netto transporten zijn iets kleiner. Er is weinig verschil tussen de 8 verschillende locaties waarvoor het zandtransport is uitgerekend. De 3 varianten (20, 15, 10 ha) zijn dus niet onderscheidend. De verhoogde kritische schuifspanning door de aanwezigheid van slib zorgt voor een aanzienlijke reductie van het netto zandtransport (\sim factor 6), in lijn met de bevindingen in fase 1.

Als we dit vertalen naar de morfologische ontwikkeling van het zandige deel van de suppletie, volgens de eerder beschreven simpele aanpak, is de verwachte verplaatsing \sim 100-500 m/jaar in NNO richting en zal de suppletie binnen \sim 4-15 jaar afgevlakt cq. uitgedoofd zijn. De ondergrens van de verplaatsing en de bovengrens van de uitdovingstijd corresponderen met de situatie direct na aanleg; de aanwezigheid van slib vertraagt de morfologische ontwikkeling. Als de suppletie uitgedoofd is, ligt het zand niet direct in de geul; het is waarschijnlijker dat deze voor een aanzienlijk deel onderdeel is geworden van het intergetijdengebied.

Het is belangrijk om aan te tekenen dat deze getallen onzeker zijn, met minimaal een factor 2 bandbreedte.



Figuur 58. Berekende netto zandtransporten voor het definitief suppletie-ontwerp op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013. De lagere zandtransporten in de som met slib (rechts) worden veroorzaakt door de slibfractie die zorgt voor een hogere kritische bodemschuifspanning.

4 Conclusie definitief suppletie-ontwerp

Het definitief suppletie-ontwerp resulteert in een suppletie waarvan de zandfractie (70% van het volume) meerdere jaren een bijdrage zal leveren aan het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De zandfractie zal zich langzaam verspreiden in voornamelijk NNO richting. Van de slibfractie (30% van het volume) zal zo'n 70% uitgespoeld zijn drie maanden na aanleg. Hierbij dient in acht genomen te worden dat het slibmodel gedraaid is met een lage kritische schuifspanning voor het slib. Zo'n 55% van dit slib komt in het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland terecht en zal zich over een groot gebied verspreiden. Concentratieverhoging van het slib in de waterkolom zal tijdelijk optreden, vooral ter hoogte van de suppletie zelf, maar uitdijend tot in de Mosselkreek. Ter hoogte van de oesterpercelen in de Mosselkreek zal de concentratieverhoging beperkt blijven en naar alle waarschijnlijkheid niet tot sterfte leiden van oesters. De slibafzetting op oesterpercelen lijkt nauwelijks significant.

De suppletie kan daarmee als een nuttige en zinvolle maatregel gezien worden om de effecten van de zandhonger in de Oosterschelde tegen te gaan, en zal meer bepaald bijdragen aan het behoud van het foerageerhabitat voor steltlopers ter hoogte van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Uiteraard is er de verstoring van de aanleg, en zal tijdelijk het bodemleven ter hoogte van de suppletie en in een beperkte omgeving daarrond afsterven. Lokaal kan door grote slibafzetting ook verstikking van bepaalde biota optreden (bijv. schelpdieren). Net als bij eerdere suppleties is de verwachting dat de rekolonisatie van het bodemleven relatief snel zal verlopen. In hoeverre de samenstelling van de bodemdiergemeenschap anders zal zijn, omwille van het meer slibrijke sediment, is moeilijk te voorspellen.

In essentie lijkt dus het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. Met het suppleren van slibrijke specie op een slik is nog geen ervaring opgedaan en een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitorings- en onderzoeksprogramma. Het is de verwachting dat toepassing van golfdempende elementen de effectiviteit en duurzaamheid van de maatregel kan verhogen.

5 Aanbeveling aanleg definitief suppletie-ontwerp

In hoofdstuk 2 van Fase 2 is het definitief suppletie-ontwerp met de kenmerken beschreven. De locatie/contouren van de suppletie zijn hierin vastgesteld met daarvan uitwerkingen van diverse volumes gesuppleerd sediment. In aanvulling daarop worden in dit hoofdstuk aanbevelingen ten aanzien van de aanleg van het definitieve suppletieontwerp gemaakt:

- Bij de kenmerken van het definitieve ontwerp is beschreven dat, ten behoeve van de uitvoerbaarheid van het ontwerp, een marge van +/- 20 cm op de aanlegdikte van 50 cm noodzakelijk kan zijn. Als de aanlegdikte lokaal kleiner wordt dan orde 30 cm wordt de bijdrage aan de lange termijn doelstellingen van de suppletie te beperkt geacht. Ook moet voorkomen worden dat de suppletie op een te klein oppervlakte wordt uitgevoerd (dus met een te grote dikte), daarom wordt een aanlegdikte groter dan 70 cm ook onwenselijk geacht.
- Voorkomen moet worden dat de randen van de suppletie te steil worden uitgevoerd. Een gelijkmatige overgang van de suppletie naar de omliggende bodem is vanuit morfologisch en ecologisch perspectief wenselijk (zie ook Roggenplaat suppletie, van der Werf et al. 2019). Als richtlijn kan, net als bij de Roggenplaat, een helling van 1 op 50 worden genomen. Het is niet noodzakelijk dat de randen van de suppletie uniform met deze helling worden uitgevoerd. Gedacht kan worden deze helling als richtlijn naar de aannemer op te leggen, mits lokaal hellingen in ieder geval niet steiler worden dan 1 op 25. Flauwer maakt in principe niet uit, zolang er voldoende sediment binnen de contouren van het ontwerp terecht komt.
- De verwachting is dat de specie die geperst gaat worden op het slik relatief vloeibaar zal zijn omwille van het hoge watergehalte. Risico hiervan is dat tijdens de aanleg al een substantieel deel van het gesuppleerde sediment buiten de ontwerpcontouren terecht zal komen. Om tijdens de aanleg ongecontroleerd wegvloeien van het sediment te beperken wordt aanbevolen om eerst een ringdijk aan te leggen zoals ook bij de Galgeplaat suppletie is toegepast (Figuur 59). Dit dient niet zozeer om de oesterpercelen te beschermen, wel om het ontwerp zo goed mogelijk te kunnen realiseren. Gekozen kan worden om het al dan niet gebruiken van een ringdijk aan de aannemer over te laten. Waarschijnlijk is het praktischer een aanvullende eis te stellen aan het percentage van het gesuppleerde sediment dat na uitvoering nog binnen de ontwerpcontouren aanwezig is, bijvoorbeeld 80%. Het vaststellen van een eis omtrent de oppervlakte van de suppletie is dan niet nodig, deze volgt inherent uit bovenstaande bepaling in combinatie met de eis omtrent de aanleghoogte.
- Micro - macroreliëf kan een positieve uitwerking hebben op een meer diverse ontwikkeling van het bodemleven. Het gladstrijken van de suppletie hoeft dus niet in precisie te gebeuren. Grote vlaktes waar het water bij droogvallen op vast blijft staan dienen, zoals al bij het definitieve ontwerp beschreven, wel voorkomen te worden. Dit kan het gevolg zijn van te veel macroreliëf of een eventuele ringdijk die afstroming van water na aanleg beperkt.
- Specifiek voor wat de beschikbare baggerspecie uit de Zandkreek betreft, wordt aanbevolen, indien de hoeveelheid te suppleren sediment beperkend is, eerst de specie met de grootste zandfractie te benutten. Voor het definitieve ontwerp is gerekend met 3 varianten met een suppletievolume van 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het totale baggervolume is echter groter, zodat een selectie van de specie moet worden gemaakt. Hierbij geldt dat het meest zandige deel van de

specie (voornamelijk bij de overgang van de Zandkreek naar de Oosterschelde) het eerst in aanmerking komt voor de plaatsuppletie en dat het resterende meest slibrijke deel (voornamelijk achterin bij de sluis) wordt verspreid in de reguliere verspreidingslocatie O10.

Benadrukt wordt dat de uiteindelijke specificering van het ontwerp en onderliggende marges in het bestek mede afhangen van het budget. Nauwere eisen kunnen leiden tot hoge kosten of zelfs een niet uitvoerbaar ontwerp. Bovenstaande aanbevelingen zijn daarom geschreven vanuit het perspectief waarbinnen het ontwerp nog zinvol is binnen de gestelde doelstellingen. Het is aan de opdrachtgever om, wellicht na consultatie van een uitvoerende partij, definitieve uitvoeringseisen vast te stellen.



Figuur 59. Galgepaat suppletie met ringdijk waarbinnen het sediment geperst wordt.

6 Monitoringsplan definitief suppletie-ontwerp

6.1 Inleiding

In dit monitorings- en onderzoeksplan worden de plannen en de randvoorwaarden met betrekking tot de monitoring van de suppletie in het kader van Natuur Impuls (2020-2026) beschreven. Het doel van de monitoring van de Natuur Impuls suppletie is om antwoord te kunnen geven op de vraag of, middels een suppletie van slibrijk baggerspecie het intergetijdengebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland behouden kan blijven en de foerageerfunctie voor steltlopers gewaarborgd. Daarnaast moet de monitoring en het onderzoek ook meer generieke kennis ontwikkelen voor suppleren met slibrijk sediment in intergetijdengebieden. Optimalisatie en validatie van de hydromorfologische modellen vormen een wezenlijk onderdeel van het plan. Daarom is het monitoringsplan opgebouwd uit zogenaamde evaluatievragen en kennisvragen.

Voorliggend monitoringsprogramma gaat uit van een suppletie van 100.000 m³. Er wordt uitgegaan van een aanleg van de suppletie in de winter van 2020 – 2021, wat inhoudt dat er maar geringe tijd is voor een T0 bemonstering. Indien de suppletie met een jaar wordt uitgesteld kan de T0 monitoring worden uitgebreid in de tijd. Na aanleg wordt een monitoring van vijf jaren (2021 – 2025 of 2022 – 2026) voorzien. Naast tussentijdse evaluaties wordt in 2026 (of 2027) een eindrapport, incl. evaluatie, opgeleverd.

Voor het monitoringsplan is gebruik gemaakt van het monitoringsplan dat opgesteld is voor de Roggenplaat suppletie (Ysebaert et al. 2017). Het monitoringsplan is mede tot stand gekomen dankzij input van verschillende deskundigen van de betrokken kennisinstellingen en Rijkswaterstaat. De monitoring van de mogelijke effecten op gebruiksfuncties (bijv. de oesterkweek) vormt geen onderdeel van dit monitoringsplan.

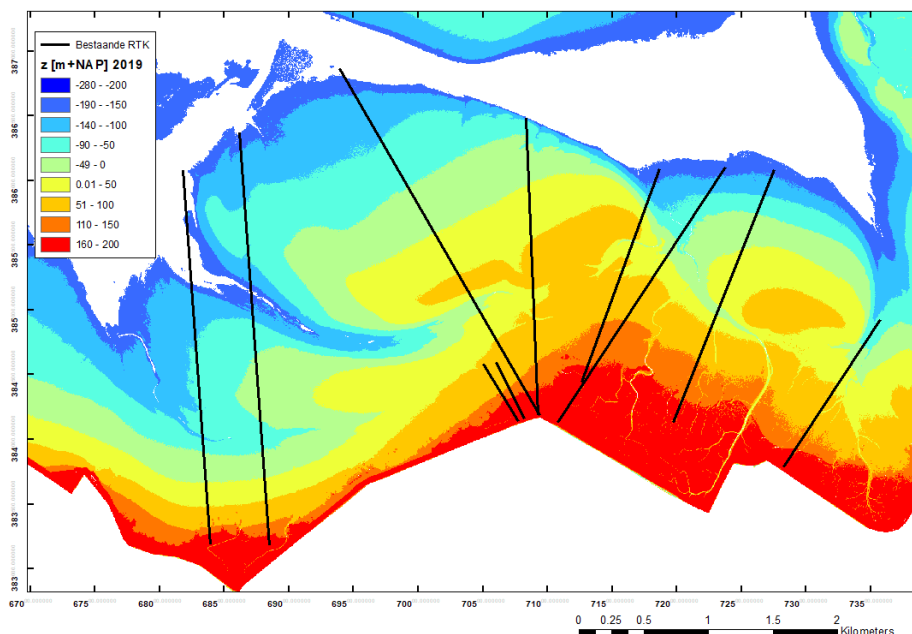
De exacte positie van de bemonsteringslocaties, raaien etc. zoals hieronder voorgesteld kunnen uiteraard nog wijzigen afhankelijk van de uiteindelijke realisatie van de suppletie. Op het moment dat het duidelijk wordt wat de hoeveelheden en omvang zijn van de suppletie kan het monitoringsplan verder gedetailleerd en geoptimaliseerd worden. Hierbij kan ook rekening gehouden worden met praktische zaken, zoals bijv. wat tijdens een laagwaterperiode haalbaar is.

De monitoring omvat de hydro-morfologische ontwikkelingen van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland en de suppletie, monitoring van de sedimenteigenschappen van de suppletie en de verspreiding ervan (incl. troebelheidsmetingen), ecologische monitoring van het bodemleven, zowel de rekolonisatie op de suppletie als de mogelijke effecten van de verspreiding van het sediment op het bodemleven, en monitoring van het gebruik van de suppletie door foeragerende steltlopers. De mogelijke effecten op schorren en zeegras worden door middel van visuele inspecties opgevolgd.

6.2 Hydro-morfologische ontwikkeling

6.2.1 Achtergrond

Er worden door Rijkswaterstaat jaarlijks waterpassingen uitgevoerd door middel van RTK (Real Time Kinematic) over vaste raaien in de Kom van de Oosterschelde (Figuur 60, zie ook Figuur 4). Om de drie jaar wordt er ook gebiedsdekkende LIDAR opname gemaakt van de hele Oosterschelde, de laatste heeft plaatsgevonden in 2019. Om een beeld te krijgen van de morfologische ontwikkeling na aanleg van de suppletie dienen aanvullende metingen uitgevoerd te worden middels RTK, LIDAR en sensoren. Modelberekeningen voorspellen een netto zandtransport in noordelijke richting (Figuur 58). Omdat berekende suspensietransporten veel groter zijn dan de bodemtransporten zal de morfologische ontwikkeling vooral bepaald worden door het suspensietransport. Naar verwachting zal het zandige gedeelte van de suppletie zich verplaatsen met honderden meters per jaar en binnen een paar jaar uitgedoofd zijn, echter zit er een grote onzekerheidsmarge in deze getallen (zie boven). De slibfractie zal zich veel sneller verspreiden en dit over een veel groter oppervlak.



Figuur 60. Overzichtskartaal met de ligging van RTK-dGPS raaien op het Verdrunken Land van Zuid-Beveland intergetijdgebied. De achtergrond toont de LIDAR van 2019.

6.2.2 Doel

Het doel van de aanvullende metingen is het goed in kaart brengen van de morfologische veranderingen in het intergetijdgebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland en in kaart brengen of en hoe het sediment (slib en zand) van de suppletie na aanleg zal verplaatsen. Dit gaat dan zowel om de migratiesnelheid, de migratierichting, en vormveranderingen. Hieronder wordt onderscheid gemaakt in gebied- en suppletie-specifieke evaluatie- en kennisvragen. Met het gebied bedoelen we het Verdrunken Land van Zuid-Beveland, zoals weergegeven in Figuur 60, incl. de aanpalende geulen zoals de Mosselgeul.

Gebied specifieke evaluatievragen:

1. Hoe verandert het areaal droogvalduur in de periode 2020-2025 op het intergetijdgebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland?

Gebied specifieke kennisvragen:

2. Welke processen liggen aan de grondslag van de veranderingen in areaal droogvalduur op het intergetijdgebied Rattekaai?

- a. Wanneer (bijv. bij stormen) en waar treedt vooral erosie op?
- b. Hoe verplaatst het sediment zich over het Verdrongen Land van Zuid-Beveland?
- c. Hoe worden de niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) beïnvloed door de aanwezigheid van de suppletie?

Suppletie specifieke evaluatievragen:

- 3. Hoe ontwikkelt de suppletie zich morfologisch (zowel m.b.t. hoogteligging als samenstelling van de bodem)?

Suppletie specifieke kennisvraag:

- 4. Welke processen liggen ten grondslag aan de veranderingen in de suppletie?
 - a. Wanneer treedt vooral erosie op (bijv. bij stormen) en hoe verandert het erosiegedrag in de tijd onder invloed van veranderingen in de samenstelling en dichtheid?
 - b. Hoe verspreidt het sediment zich en waar gaat het gesuppleerde sediment naar toe: blijft het op het intergetijdengebied of wordt een deel afgevoerd naar de nabijgelegen geulen en het sublitoraal?
 - c. Ontstaan geulen nabij de suppletie?

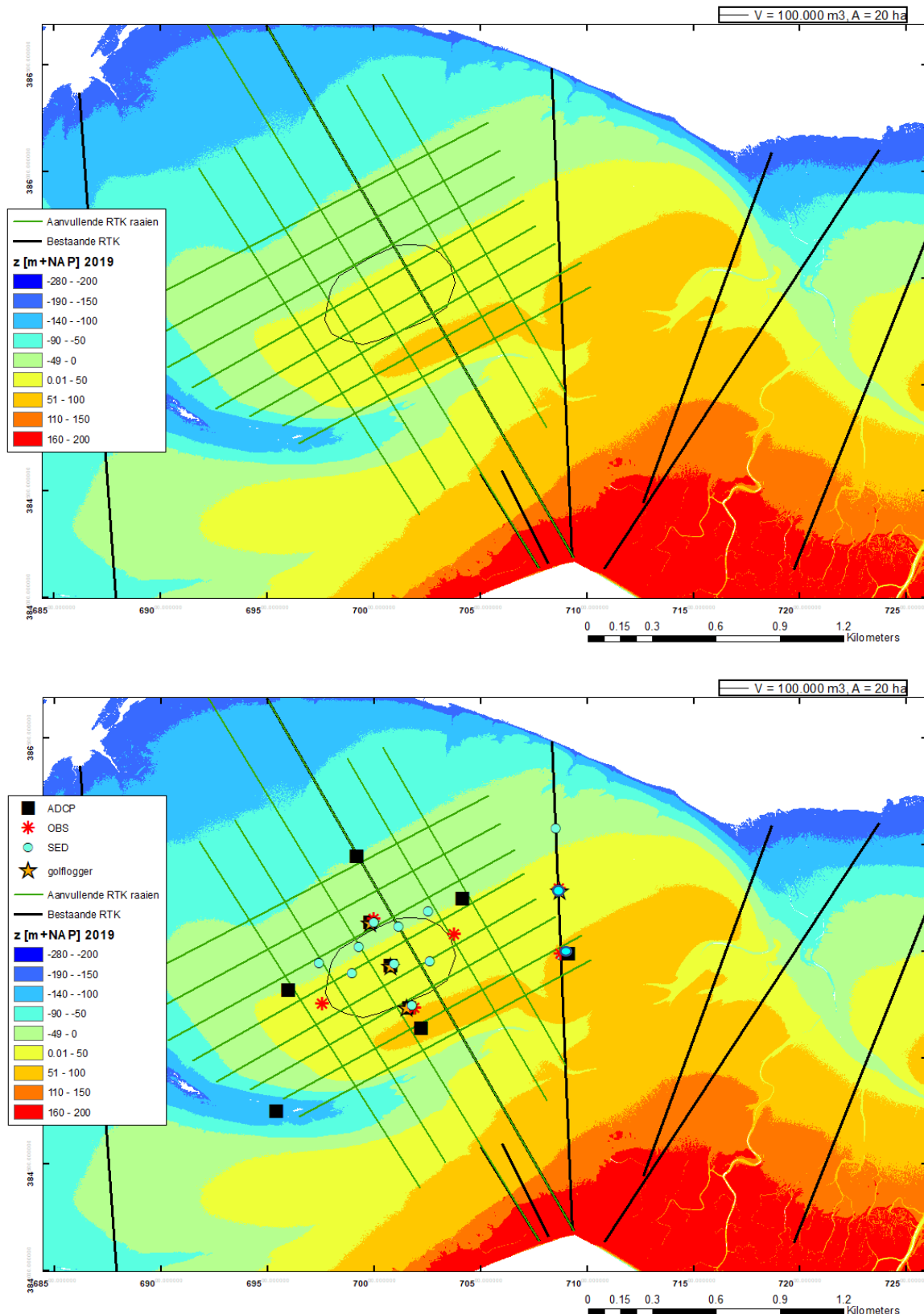
6.2.3 Methode

Voorgesteld wordt een combinatie van verschillende meetmethoden te gebruiken om alle aspecten te kunnen onderzoeken. LIDAR (resulteert in ruimtelijke kaarten met een grote ruimtelijke dekking maar relatief lage frequentie), drone, RTK (lijnmetingen) en SED sensoren (puntmetingen met een relatieve hoge frequentie) worden ingezet om de morfologie te bemeten (Tabel 11). Golfloggers (druksensoren) en stromingsmeters (ADCPs) worden ingezet om de hydrodynamische forceringen te meten. In combinatie hiermee worden troebelheidsmeters (OBS-en) ingezet om de slibconcentraties in de waterkolom te meten (en i.c.m. de ADCP het suspensietransport). Op tenminste 1 positie wordt een LISST ingezet in combinatie met een vlokcamera. Hiermee wordt de grootte en valsnelheid van de slibvlokken bepaald die sturend zijn voor slibtransport (zie §5.2). De bodemligging van de Oosterschelde wordt driejaarlijks opgemeten. Voor het intergetijdengebied wordt hiervoor gebruik gemaakt van LIDAR. LIDAR (Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging) is een meting van de afstand tussen vliegtuig of helikopter en het grondoppervlak, waarmee in combinatie met de plaatsbepaling van het vliegtuig de hoogte van het grondoppervlak kan worden gemeten. In 2019 is de laatste LIDAR meting uitgevoerd en de volgende staat gepland in 2022 en 2025. Aangezien de Roggenplaat de komende vijf jaren jaarlijks met LIDAR opgemeten wordt stellen we voor dit uit te breiden naar het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. We stellen ook voor om foto's en 3D metingen uit te voeren met een drone: T0, kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maand na de aanleg, 6 maand na de aanleg en vervolgens jaarlijks.

Aanvullend op de RWS RTK metingen (**Error! Reference source not found.**) worden er extra raaien ingelopen in de buurt van de suppletie (Figuur 61). RTK is een hoogtemeting welke een hoge nauwkeurigheid (ca 2 cm) in de verticaal oplevert. RTK metingen dienen uitgevoerd te worden voor de aanleg (T0), kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maanden na de aanleg, zes maanden na de aanleg, negen maanden na de aanleg, en vervolgens 3 keer per jaar (2022 en 2023) en 2 keer per jaar (2024 en 2025). De raaien zijn nog niet definitief in afwachting van het definitieve suppletievolume. De raaien worden zo gelegd dat de metingen gebruikt kunnen worden om morfologische veranderingen na aanleg van de suppletie in kaart te brengen.

Aanvullend worden SED sensoren ingezet om de temporele veranderingen van de suppletie goed te kunnen vatten, daar waar wij grote (meetbare) veranderingen verwachten (orde centimeters). SED sensoren hebben een nauwkeurigheid van 2 mm. SED sensoren worden bij laagwater geplaatst en kunnen een lange periode autonoom meten (tot > 1 jaar). Wel dienen de sensoren regelmatig schoongemaakt te worden ter

voorkoming van biofouling. De sensoren worden na de aanleg van de suppletie geplaatst, waarna ze in de maanden maart, mei, juni, juli, augustus, september, oktober en december gecontroleerd en schoongemaakt worden. Hierbij wordt de hoogte van de sensor gecontroleerd. In november worden de instrumenten meegenomen naar het lab en de data uitgelezen en de batterijen vervangen, waarna de instrumenten teruggeplaatst worden.



Figuur 61. Voorgestelde ligging van extra RTK raaien en meetsensoren. De zwarte raaien zitten in het bestaand programma van RWS. De groene lijnen zijn de aanvullende raaien. Rondom de suppletie worden ADCPs (zwarte vierkanten), SED sensoren (blauwe stippen), golfloggers (gele sterren) en OBS sensoren (rode asterisk) geplaatst.

Golf- en stromingsmetingen zullen op een aantal locaties uitgevoerd worden om de forcering achter de morfologische veranderingen in kaart te kunnen brengen. Daarnaast is het aan te bevelen om een waverider in de geul te plaatsen. Golfmetingen zullen continu gedaan worden tussen 2020 en 2025 zodat alle weersomstandigheden gemeten worden, inclusief stormachtige condities. De instrumenten worden uitgelezen en batterijen vervangen om de zes tot acht weken. Stroommetingen met ADCP's gedurende twee springtij/doodtij cycli zullen door RWS uitgevoerd worden in 2020 (voor aanleg) en 2021 (na aanleg). Additionele meting tijdens een storm is aan te bevelen.

Daarnaast zal ook de ontwikkeling van de bodemsamenstelling van de suppletie worden gevolgd. Hiertoe worden op de suppletie bodemonsters genomen en geanalyseerd, zie voor verdere details §5.2.

Tabel 11. Fysische metingen t.b.v. morfologische ontwikkelingen. Groen: extra metingen t.b.v. monitoring Natuur Impuls. Oranje: reguliere RWS metingen. De metingen worden in een bepaald kwartaal (Q) uitgevoerd en nemen 1-2 meetdagen per kwartaal in beslag. LIDAR in combinatie met Roggenplaat.

	2020		2021				2022				2023				2024				2025			
Q	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
LIDAR																						
RTK reg.																						
RTK extra																						
SED																						
Golven																						
Stroming																						
Drone																						
Sediment																						

6.2.4 Resultaat

Gedetailleerde hoogtemetingen op de plaat. Door de metingen van verschillende momenten met elkaar te vergelijken kan worden onderzocht hoe de suppletie verandert en in welke richting het sediment migreert. Middels stroming en golfmetingen kan onderzocht worden welke factoren mogelijk ten grondslag liggen aan migratie van de suppletie, in combinatie met modellen om sedimenttransporten en bodemontwikkeling af te schatten en te interpreteren. Dit draagt bij aan het begrip van deze suppletie, maar ook aan een verdere optimalisatie van toekomstige suppletieprojecten.

6.3 Sediment- & suspensietransportmetingen

6.3.1 Achtergrond

Na aanleg van de suppletie wordt verspreiding van slib richting het omliggende intergetijdengebied verwacht. Deze aanvoer kan direct gemeten en gekwantificeerd worden door een optische deeltjes teller (OBS = optical back scatter) in samenhang met een stromingsmeter (Figuur 61). Hierbij is het van belang is dat de korrelgrootteverdeling van het slib (die het verband bepaalt tussen lichtverstrooiing massaconcentratie) bekend is. Verder wordt als gevolg van suspensietransport, op basis van modelberekeningen, morfologische veranderingen in de orde van 2-10 mm verwacht (**Error! Reference source not found.**). Dit valt binnen de onnauwkeurigheidsmarge van de RTK-metingen en vraagt om aanvullende morfologische metingen. Verwacht wordt dat toevoer van slibrijk sediment door suspensietransport effect heeft op het slibgehalte en sedimentsamenstelling van de bodem. Grootste veranderingen worden voornamelijk in de bovenste centimeters verwacht.

6.3.2 Doel

Het doel is het goed in kaart brengen van de erosieflux van slib vanaf de suppletie en het resulterende suspensietransport in de waterkolom en richting de bodem in het gebied nabij de suppletie.

Evaluatievragen:

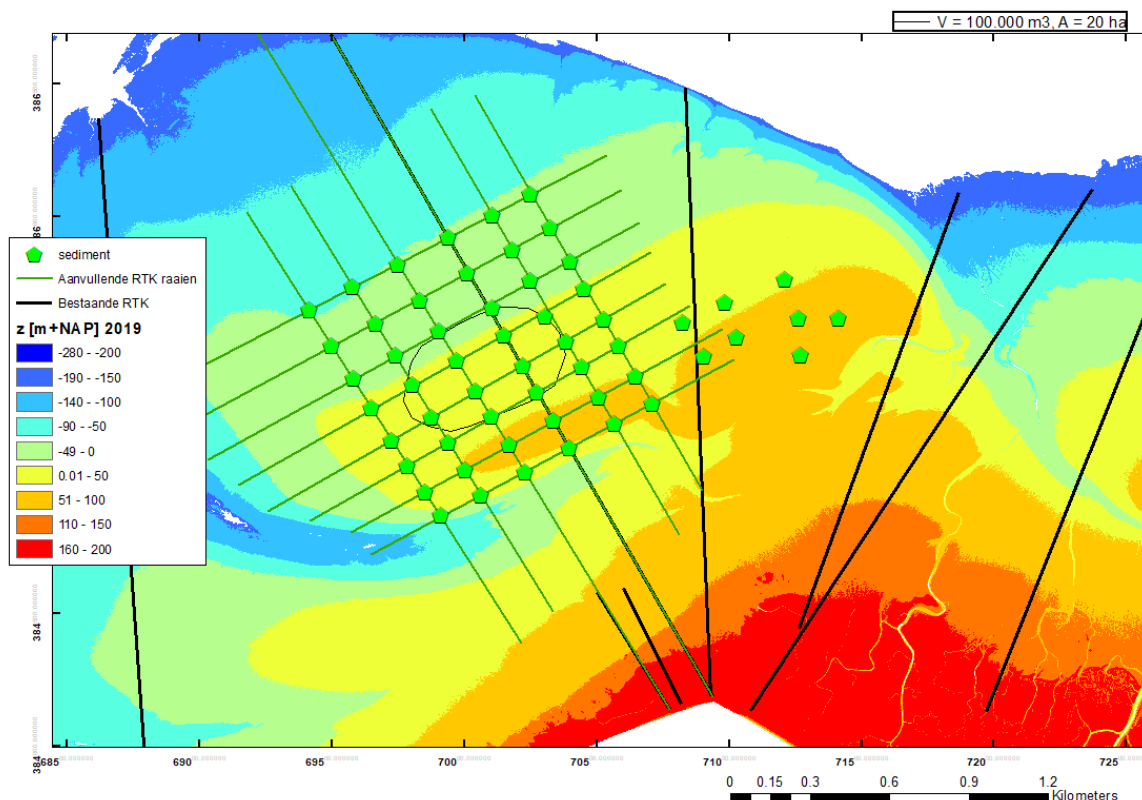
5. Hoe verandert suspensietransport de sedimentsamenstelling van het intergetijdengebied?

Kennisvragen:

6. Hoe groot is de erosieflux van slib en hoe ontwikkelt deze zich in de tijd?
7. In welke richting vindt suspensietransport plaats?
8. Welke processen liggen aan de grondslag aan suspensietransport?
 - a) Wanneer en waar treedt suspensietransport vooral op (bijv. bij stormen)?
 - b) Hoe hangt dit af van de erosie-eigenschappen van de suppletie?
 - c) Wat is de invloed van de eigenschappen van het gesuspendeerde materiaal (denk aan seizoensdynamiek in vlokvorming o.i.v. zout, temperatuur en organisch materiaal).
9. Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door suspensietransport na aanleg van de suppletie?

6.3.3 Methode

Verandering van sediment samenstelling door suspensietransport van het slibrijke sediment wordt voornamelijk in de bovenste centimeters verwacht. Grootste effect verwachten we te meten in de eerste centimeter. De bovenste centimeter wordt bemonsterd voor slibgehalte, korrelgrootteverdeling en organisch stofgehalte bepalingen. Tevens zal de top 3 cm bemonsterd worden voor slibgehalte, korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte en bulkdichtheid. Sediment monsters worden genomen op vaste locaties voor de aanleg (T0), kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maanden na de aanleg, zes maanden na de aanleg, negen maanden na de aanleg, en vervolgens 3 keer per jaar (2022 en 2023) en 2 keer per jaar (2024 en 2025) (Figuur 62, Tabel 11). Op enkele plekken op de suppletie zullen kernen van 0.5 m worden gestoken om de dikte van de actieve laag te bepalen (t.g.v. fysische en biologische omwerking) en om de ontwikkeling van de dichtheid en sterkte in de tijd te bepalen. Op deze plekken zal ook de erosiebestendigheid van de toplaag worden bepaald. Dit kan (afhankelijk van beschikbaarheid) plaatsvinden met een in-situ erosiemeter of d.m.v. monsternamen en erosiemetingen in het lab. Erosiebestendigheid zal gemeten worden kort na de aanleg, na 1 maand, na drie maanden en na een jaar. Daarnaast worden in-situ sterkteprofielen van de slibrijke suppletielaag (0.5 m) bepaald met een hand-vane. Ter plekke van de golflogger op de suppletie zal ook de waterspanning in de bodem worden gemeten op 10, 30 en 50 cm diepte. Dit geeft belangrijke informatie over de invloed van de golven op de bodem, de consolidatiesnelheid na aanleg van de suppletie en de doorlatendheid van de bodem. Hiermee wordt de ontwikkeling van de stabiliteit van de bodemlaag gevolgd i.c.m. de bodembemonstering.



Figuur 62. Voorgestelde locaties voor sedimentbemonstering.

6.3.4 Resultaat

Ruimtelijke ontwikkeling in slibgehalte en korrelgrootteverdeling op de plaat. Door de metingen van verschillende momenten met elkaar te vergelijken kan worden onderzocht hoe het suspensietransport na aanleg van de suppletie effect heeft op de sedimentsamenstelling van het omliggende gebied. De ontwikkeling van het slibgehalte en de bodemhoogte op de suppletie geeft in combinatie met de SED, RTK en LIDAR metingen inzicht in de tijdspanne waarin de suppletie een bron van slib is. Erosiemetingen kunnen hieraan ook bijdragen.

Inzicht in het suspensietransport rondom de suppletie. De waargenomen bodemveranderingen zijn het cumulatieve effect van sedimenttransporten in de beschouwde periode. Op basis van ADCP- en OBS-metingen wordt vastgesteld onder welke condities de dominante transporten plaatsvinden. Op basis van de LISST en vlokcamera i.c.m. laboratoriumanalyse van water- en bodemonsters wordt vastgesteld in hoeverre er sprake is van een seizoen dynamiek in de slibeigenschappen als vlok grootte en valsnelheid.

Beide resultaten dragen bij aan het begrip van de stabiliteit van de slibrijke suppletie en haar invloed op de omgeving. Deze resultaten zijn ook zeer nuttig om de bestaande verspreidingsmodellen te valideren en de huidige grote onzekerheden in het ontwerp van dergelijke suppleties te verkleinen.

6.4 Ecologische ontwikkeling suppletie - bodemdieren

6.4.1 Achtergrond

Na aanleg van de suppletie zijn alle bodemdieren begraven onder een 50 cm dikke sediment laag. Voorgaande suppleties (Galgenplaat, Schelphoek en Oesterdam) lieten zien dat het herstel van de bodemdiergemeenschap enkele jaren duurt, en dat er mogelijk een andere bodemdiergemeenschap ontwikkelt omdat de fysische

omstandigheden op de suppletie veranderd zijn (droogvalduur, sedimentsamenstelling). In tegenstelling tot de Galgenplaat, Schelphoek, Oesterdam en Roggenplaat suppleties zal de geplande suppletie meer slib bevatten. Dit kan leiden tot een andere ontwikkeling in bodemdiergemeenschap. In slibrijke bodems leven andere soorten dan in zandbodems en slib speelt een rol in de stabiliteit van de bovenste laag van het intergetijdengebied. Hierdoor heeft het een effect op de vestiging en overleving van organismen die afhankelijk zijn van stabiel sediment. Slib kan ook indirect effecten hebben op de bulkdichtheid, zuurstofgehalte, nutriëntengehalte en organische fractie van de bodem. Slib heeft ook een ecologische eigenschap als voedselcarrier.

6.4.2 Doel

Het doel is het goed in kaart brengen van de bodemdiergemeenschap voor aanleg van de suppletie en het herstel na aanleg van de suppletie.

Evaluatievraag:

10. Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de suppletie?

Kennisvraag:

11. Is de ontwikkeling van de bodemdieren gerelateerd aan, droogvalduur, hydrodynamiek, sedimentdynamiek, slibgehalte, etc.?

6.4.3 Methode

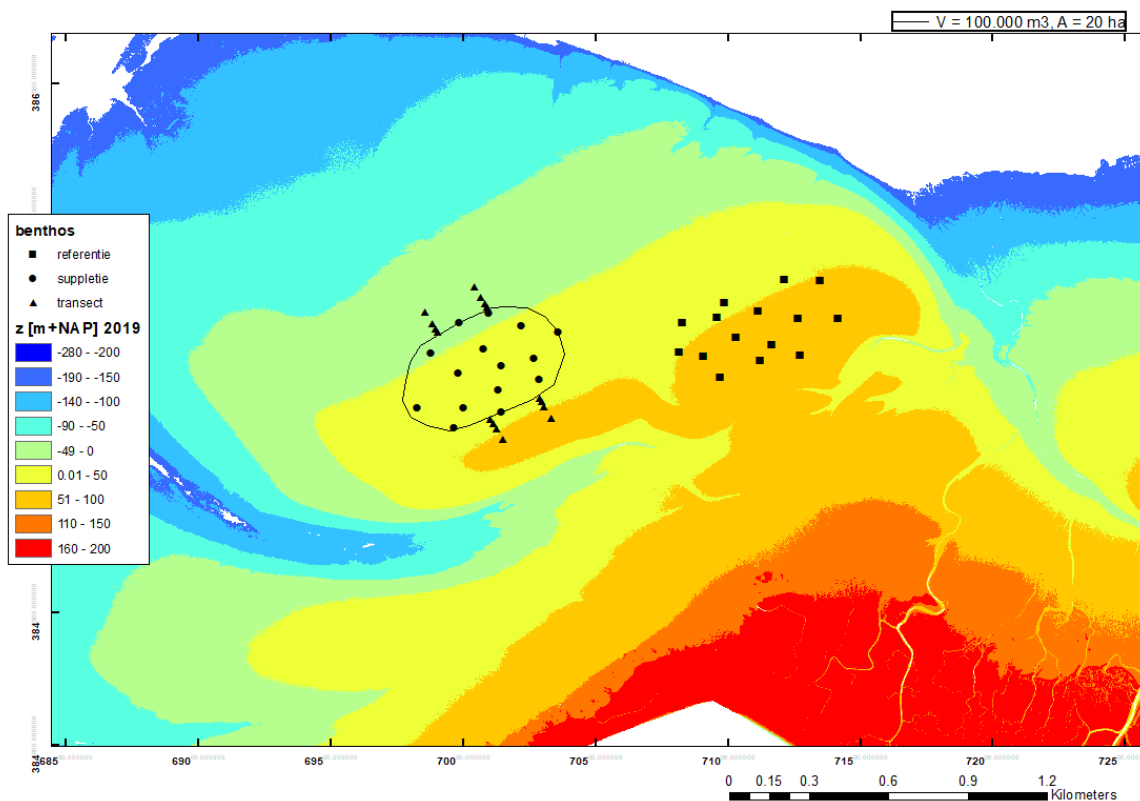
Bemonstering wordt uitgevoerd middels drie steekbuizen van 10cm in diameter, 35 cm diep te steken en gepoold te zeven over een 1 mm zeef in het veld. Het gezeefde materiaal wordt naar het lab gebracht en gefixeerd met formaline voor verdere verwerking. In het lab worden bodemdieren op naam gebracht en dichtheid en biomassa per punt bepaald. Tevens worden er sedimentmonsters genomen voor het bepalen van bulkdichtheid, slibgehalte, korrelgrootteverdeling en organisch stof (zie paragraaf 6). Als maat van voedselbeschikbaarheid voor bodemdieren wordt chlorofyl-a bemonsterd middels een gepoolde sample van 3 spuitjes van de top 1 centimeter van het sediment. Daarnaast wordt de dikte van de geoxideerde laag bepaald met een duimstok in het veld. Binnen de contouren van de suppletie wordt er op 15 random locaties bemonsterd (Figuur 63). Als referentie wordt een gebied ter grootte van de suppletie ten oosten van de suppletie geselecteerd. Bij het selecteren van dit gebied is rekening gehouden met de verwachte hoogte na aanleg van de suppletie. Ook hier zijn random 15 locaties geselecteerd. We hanteren dus een BACI aanpak (Before-After-Control-Impact) waarbij bemonsterd wordt voor (2020) en na aanleg van de suppletie (2021, 2022, 2023, 2024 en 2025) op dezelfde punten. Tevens zullen er op vaste afstanden tot de rand (10, 50, 100 en 200 m) van suppletie contouren bemonsterd worden. De bemonsteringen gebeuren in het najaar (tweede helft september, begin oktober), behalve het eerste jaar waar ook in het voorjaar (mei-juni) zal bemonsterd worden om de eerste rekolonisatie van bodemdieren in kaart te brengen (Tabel 12). Kort na de aanleg van de suppletie worden de locaties tevens bezocht om na te gaan of er nog bodemleven aanwezig is na aanleg.

6.4.4 Resultaat

Het effect van de suppletie op rekolonisatie en ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap op de suppletie. Door de BACI aanpak kan worden onderzocht hoe de bodemdiergemeenschap zich herstelt na de impact. Middels abiotische metingen (slibgehalte, korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte, chlorofyl-a, etc.) kan onderzocht worden welke factoren mogelijk ten grondslag liggen aan de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap. Dit draagt bij aan het begrip van deze suppletie, maar ook aan een verdere optimalisatie van toekomstige suppletieprojecten.

Tabel 12. Meetmomenten van de benthos ontwikkeling. Groen: extra metingen t.b.v. monitoring Natuur Impuls. De metingen worden in een bepaald kwartaal (Q) uitgevoerd en neemt 1-2 meetdagen per jaar in beslag.

	2020		2021				2022				2023				2024				2025				
Q	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Benthos																							
Quick scan																							



Figuur 63. Locaties voor het uitvoeren van de benthos bemonstering.

6.5 Vogels

6.5.1 Achtergrond

De suppletie zal aanvankelijk niet geschikt zijn als foerageergebied voor vogels en het terug geschikt worden hangt voor een groot deel af van de rekolonisatie van de bodemdieren. Maar ook vorm en het slibgehalte van de suppletie kan mogelijk een rol spelen in de geschiktheid van het foerageerhabitat. Daarom is het nuttig om laagwatertellingen uit te voeren van de suppletie en het referentiegebied waar ook bodemdieren bemonsterd worden.

6.5.2 Doel

Het doel is de geschiktheid in kaart te brengen van de suppletie als foerageerhabitat voor steltlopers.

Evaluatievraag:

1. Wat is de geschiktheid van de suppletie als foerageerhabitat voor steltlopers?

Kennisvraag:

2. Hoe is het gebruik door vogels van de suppletie gelinkt aan het herstel van het bodemleven en/of abiotische kenmerken van de suppletie?

6.5.3 Methode

Laagwatertellingen worden uitgevoerd volgens de methode zoals eerder gebruikt door Zwarts et al. (2011) in de Oosterschelde. Er worden telvakken uitgezet ter hoogte van de suppletie en in het referentiegebied waar ook het benthos wordt bemonsterd. Tellingen gebeuren vanuit een centraal punt. De vogels worden geobserveerd vanuit een schuilhut boven op een platte boot. De boot vaart naar de waarnemingsplek tijdens hoogwater. De schuilhut wordt opgebouwd ruim voordat de vogels arriveren en weer afgebroken als de vogels vertrokken zijn. We stellen voor de tellingen uit te voeren in de maanden oktober t/m maart, mei en augustus.

6.5.4 Resultaat

Inzicht in hoe de suppletie gebruikt wordt als foerageerhabitat voor steltlopers in vergelijking tot het niet gesuppleerde slik.

6.6 Schorren en zeegras

De effecten op de aanwezige schorren en zeegrasvelden worden klein ingeschat door de relatief grote afstand van de suppletie tot deze habitats. Voorgesteld wordt om wel een visuele inspectie en opname uit te voeren naar de kwaliteit van deze habitats.

6.7 Evaluatie

Evaluatie van de monitoring vormt een essentieel onderdeel van het monitoringsplan. Het primaire doel van het vergaren van de monitoringsdata is evalueren hoe de morfologie, ecologie en slibgehalte van de suppletie en de omgeving zich feitelijk ontwikkelen. Hiertoe dienen de opgestelde evaluatievragen. Daarnaast kan de data ook bijdragen aan de ontwikkeling van kennis voor de toepassing van gebaggerd slibrijk materiaal voor suppleties op intergetijdengebieden. Dit laatste is een belangrijk neven doel voor dit project, omdat het voor het eerst is dat dergelijk slibrijk materiaal in deze vorm direct op een intergetijdengebied wordt toegepast. Hiertoe dienen de kennisvragen. Deze kennisontwikkeling wordt in ieder geval noodzakelijk geacht tot het niveau waarop deze bijdraagt aan een meer gefundeerde toekomstige herhaling van een dergelijke slibrijke suppletie in de Oosterschelde.

Omdat het voorzien is dat na 5-10 jaar mogelijk weer slibrijk materiaal beschikbaar is voor een dergelijke suppletie, is het aan te raden binnen dit monitoringsproject niet alleen de evaluatievragen te beantwoorden maar direct ook de noodzakelijke kennisontwikkeling op te pakken. Dit zorgt er voor dat de pilotstatus van dit project goed benut wordt en dat eventuele toekomstige suppleties tijdig voorzien zijn van een verder verfijnde onderbouwing.

Verschillende fasen van het monitoringsproject worden gedefinieerd. In de eerste fase worden de metingen uitgevoerd. Deze metingen moeten vervolgens worden opgewerkt van de ruwe meetgegevens naar zinvolle parameters (bijvoorbeeld drukdata naar

golfdata). Met behulp van deze opgewerkte data kunnen de analyses worden uitgevoerd om de evaluatie- en kennisvragen te beantwoorden. Het kan waardevol zijn om met behulp van de data de berekeningen/rekenmodellen uit de ontwerpfase te valideren en aan te scherpen. Dit zodat voor toekomstige ontwerpen preciezere voorspellingen kunnen worden gemaakt van bijvoorbeeld de migratiesnelheid van een dergelijke suppletie.

De voorziene looptijd van de monitoring is 5 jaar. Om eerste lessen te kunnen trekken en om eventueel de monitoring nog bij te sturen, wordt voorgesteld om naast een eindrapportage ook toe te werken naar een tussenrapportage halverwege de monitoringscampagne.

Met de hier beschreven aanpak draagt de suppletie niet alleen bij aan de ecologische meerwaarde op de gesuppleerde locatie, maar ook aan het verder verfijnen van het beheer van het estuarium op de lange termijn. Dit is in lijn met de opzet van eerdere pilotstudies binnen de Oosterschelde en zorgt er voor dat alle waarde uit de geïnvesteerde middelen wordt gehaald.

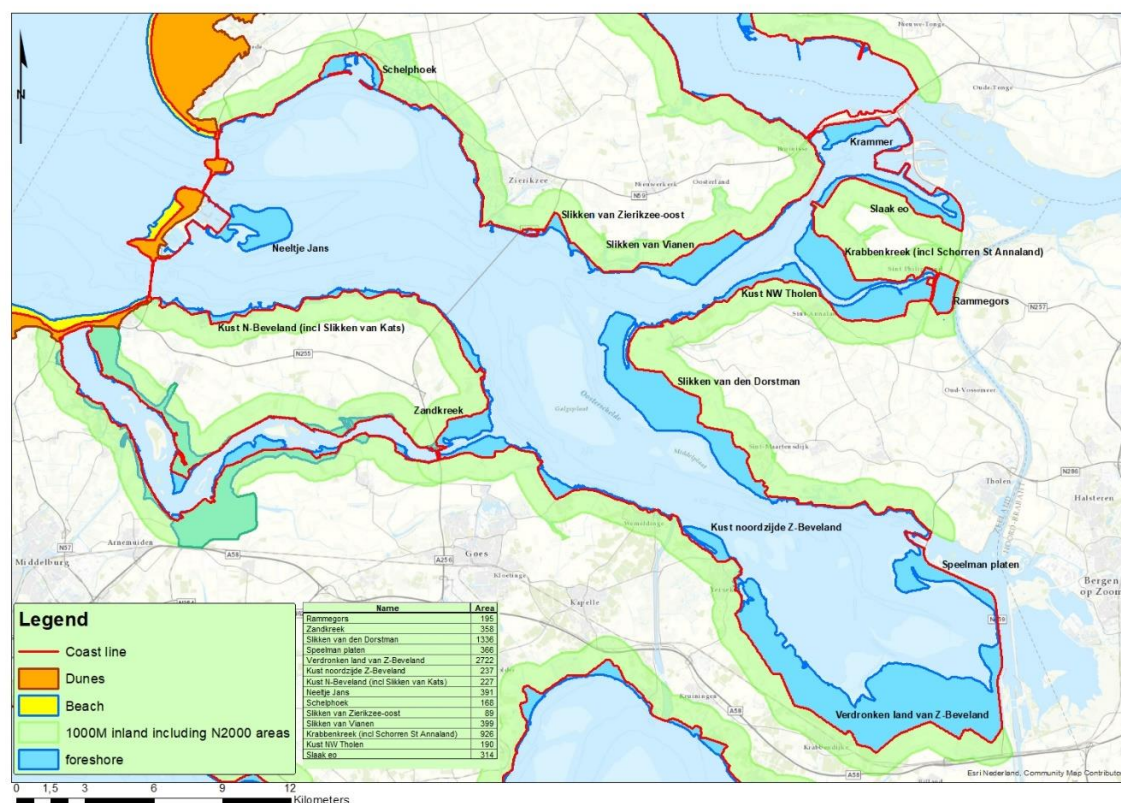
7 Mogelijkheden voor opschaling

7.1 Inleiding

In het project *Natuur Impuls* krijgt baggerspecie uit de vaargeul van de Zandkreek een zinvolle herbestemming op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in de Kom van de Oosterschelde. Het helpt de effecten van de zandhonger in dit gebied, nl. de langzame erosie van het slik, enigszins te verkleinen. Door de uitvoering van dit project wordt voor het eerst ervaring opgedaan met het suppleren van gebaggerd slibrijk sediment in de Oosterschelde. Misschien biedt dit een nieuwe vorm van sedimentbeheer waarin voortaan het gebaggerd sediment uit havens en vaargeulen niet meer gedumpt wordt in diepe geulen of putten maar op intergetijdengebieden t.b.v. natuurbehoud of -ontwikkeling. Dit hoofdstuk verkent alvast de mogelijkheden om het project *Natuur Impuls* op te schalen en werk-met-werk te maken.

In deze verkenning naar herbestemming van gebaggerd sediment ligt de focus niet op de grote zandplaten in de Oosterschelde, waarvoor al ruime ervaring met suppleties bestaat, maar op de slikken langs de oevers, een gebied met een totale oppervlakte van 7918 ha (Figuur 64).

Allereerst is in kaart gebracht waar en hoeveel baggerspecie er periodiek beschikbaar komt om de bevaarbaarheid van de Oosterschelde op peil te houden. Er is een inschatting gemaakt van het bruikbare sediment volume, dat wil zeggen, het deel van de baggerspecie dat geschikt is voor het geleidelijk ophogen van de slikken. Vervolgens is het bruikbare sediment volume vergeleken met de zandhonger van de slikken langs de oevers van de Oosterschelde. Tenslotte worden suggesties gedaan voor een uitvoeringsprogramma rond baggerwerk in de Oosterschelde.



Figuur 64. Slikken (foreshores) in de Oosterschelde.

7.2 Hoeveelheid en type baggerspecie

Door de aanleg van de stormvloedkering is de stroomsnelheid en het slibgehalte in het water gedaald zodat er tegenwoordig minder sedimentatie plaats vindt en er zodoende niet veel gebaggerd hoeft te worden. Het uitdiepen van vaargeulen en (jacht-)havens gebeurt op incidentele basis wanneer daar directe aanleiding toe is. Op sommige locaties vindt het baggerwerk om de 4-5 jaar plaats, in andere gevallen pas na 20-30 jaar. De samenstelling van de baggerspecie varieert van zand tot zeer slibrijk materiaal met een lage dichtheid.

Door RWS (Frank Gijzel, Robin Bal) is op basis van de vergunningverlening voor baggerwerk in de afgelopen 30 jaar, een inventarisatie uitgevoerd naar de hoeveelheid gebaggerd sediment in de Oosterschelde. De resultaten zijn samengevat in Tabel 13.

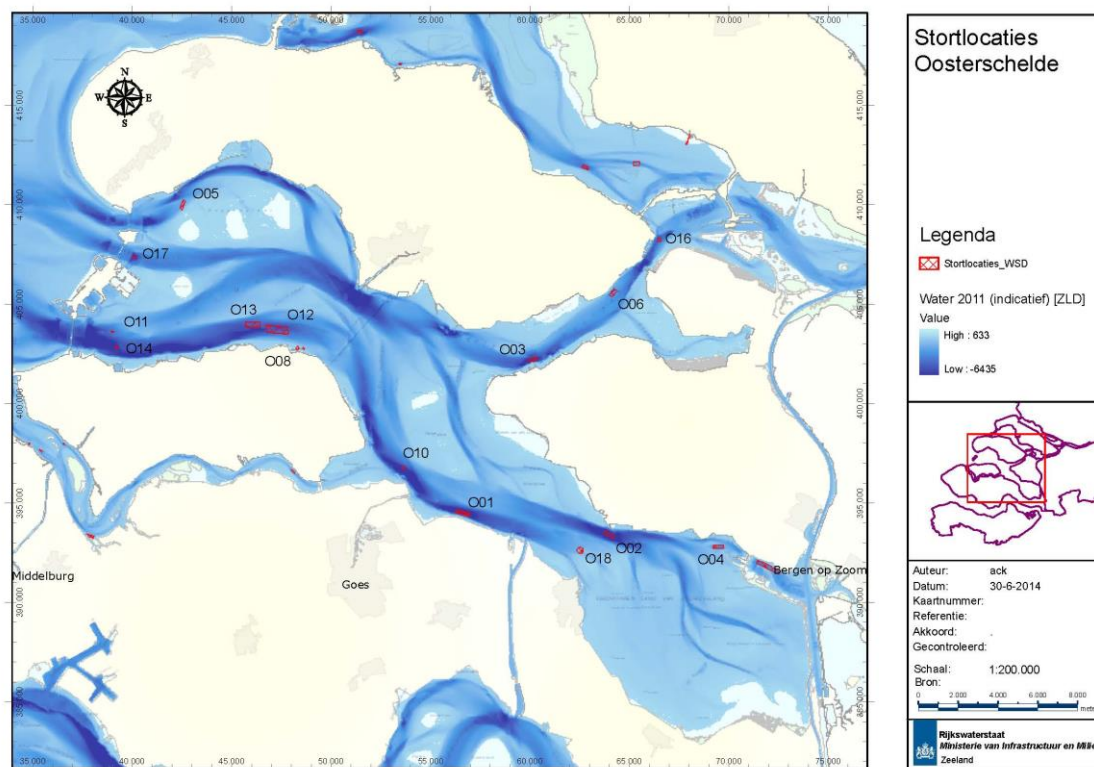
Tabel 13. Gebaggerde volumes sediment uit vaargeulen en havens in de Oosterschelde (periode 1990 – 2020) en een inschatting van het volume aan geschikt sediment voor het ophogen van slikken.

	jaar laatst gebaggerd	jaar nieuw gepland baggerwerk	Frequentie (1: jaar)	volume (m3)	1= geschikt 0 = te hoog slib%	Geschikt volume (m3)	Geschikt volume, gemiddeld per 10 jaar (m3/10 jaar)	Opmerking
Vaargeulen								
Keeten Mastgat Zijpe (Kramm)	1995	2030	35	75000	1	75000	21429	
Zandkreek	1995	2020	25	125000	1	125000	50000	frequentie wordt opgeschroef conform regulier beheer en onderhoud. Inschatting ca. 1 x / 15 - 20 jaar en dan ca. 50 - 75.000 m3.
Kanaal door Z-Beveland	2008	2028	20	50000	1	50000	25000	
Brabantsch Vaarwater/Witte	2008	2025	17	150000	1	150000	88235	
Krabbenkreek	2009	2023	14	50000	1	50000	35714	
Oosterschelde West	2000	2035	35	50000	1	50000	14286	
Totaal vaargeulen							234664	
Havens								
Buinnisse			4	500	0	0	0	
Burghsluis			5	3000	0	0	0	
Colijnsplaat			3	10000	0	0	0	pijp over dijk + storten
Goes			4	500	0	0	0	Incl Goese sas
Jacobahaven	1990	2020	30	66317	1	66317	22106	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Stavenisse			3	3000	0	0	0	
Gorishoek			3	500			0	
Kats			5	1000	0	0	0	
Roompot			5	2500	0	0	0	
St Annaland			3	10000	0	0	0	
Tholen			4	500	0	0	0	langs Rijn-Scheldekanaal
Wemeldinge			3	5000	0	0	0	
Yerseke			4	10000	0	0	0	inclusief Verswatergeul
Zierikzee			4	2500	0	0	0	
Neeltje Jans betonhaven	1990	2020	30	58819	1	58819	19606	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Noordland Binnenhaven	1990	2020	30	323035	0	0	0	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Roggenplaat haven	1990	2020	30	167115	1	167115	55705	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Totaal havens							97417	
Overall							332081	

7.3 Geschikt sediment volume

Baggerspecie met een hoog slibpercentage heeft doorgaans een te lage dichtheid en weinig cohesie voor een zinvolle toepassing op intergetijdengebieden. Uit de inventarisatie (Tabel 1) blijkt dat:

- Baggerspecie uit havens vaak een te hoog slib percentage (>40-50%) heeft en daarom minder geschikt is voor het geleidelijk ophogen van slikken. Bovendien zijn de volumes aan havenslib klein en daardoor de verwachte kosten relatief hoog. Dit materiaal kan beter op de bestaande stortlocaties in de geul (Figuur 65) verspreid worden. Een alternatief is het toepassing op land, bijv. in dubbelde dijken om gebieden geleidelijk op te hogen of in een kleirijperij, maar heeft als bezwaar dat de sedimentbalans van het watersysteem nog meer wordt verstoord;
- Sediment uit de vaargeulen in alle gevallen geschikt materiaal is. Het gaat om relatief grote volumes zandig sediment waarmee intergetijdengebieden opgehoogd kunnen worden. Een voorbeeld van deze toepassing is het gebruik van 0,15 Mm³ zand uit de vaargeul van het Brabants vaarwater in 2009 dat werd aangebracht op de Galgeplaat (dus in dit geval niet op een slik);
- Gemiddeld over een periode van 10 jaar het geschikte sediment volume uit vaargeulen en havens ca. 0,2 resp. 0,1 Mm³ is; in totaal dus 0,3 Mm³ per decennium.



Figuur 65. Stortlocaties voor baggerspecie in de Oosterschelde.

7.4 Aandeel in de sediment balans

De erosie (zandhonger) en zeespiegelstijging bepalen de zogenaamde accommodatie ruimte voor sediment op de slikken langs de oevers, een gebied met een totale oppervlakte van 7918 ha (Figuur 64). Uitgaande van een scenario met een erosie en zeespiegelstijging van resp. 2 en 2 mm per jaar wordt de totale zandhonger geschat op 3,2 Mm³ per decennium. Dit volume kan in de toekomst wijzigen naarmate de snelheid van erosie en zeespiegelstijging verandert.

Het geschikt sediment volume van 0,3 Mm³ per decennium kan in theorie dus ca. 10 % voorzien in de sedimentvraag van de slikken en voorlanden langs de oevers van de Oosterschelde. Om de sedimentbalans van deze gebieden kloppend te krijgen is, uitgaande van het genoemde scenario, ca. 2,9 Mm³ per 10 jaar nodig uit zandwinlocaties gelegen in de geulen van de Oosterschelde of elders.

In een vervolg op deze verkenning zou het areaal aan slikken nog verder gespecificeerd worden door rekening te houden met:

- De fourageer functie voor vogels, zoals de zogenaamde 'vogelkerngebieden' uit de ANT studie (De Ronde et al, 2013);
- De toekomstige opgave voor waterveiligheid. Sedimentsuppleties versterken het voorland en kunnen, afhankelijk van de locatie en het faalmechanisme in kwestie, een (deel-) oplossing bieden bij het beheer & onderhoud van dijken.

7.5 Uitvoeringsprogramma rond baggerwerk

Geconcludeerd wordt dat het volume aan baggerspecie in de Oosterschelde een kleine maar structurele bijdrage kan leveren bij natuurbouw van slikken en voorlanden langs de oevers. Op basis van de ervaringen in het Natuur Impuls project kan worden nagegaan of het idee van herbestemming van baggerspecie op slikken ook daadwerkelijk goedkoper uitvalt dan een reguliere suppletie met zand uit een zandwinlocaties zijn. Mocht dit positief uitvallen dan is het zinvol om een uitvoeringsprogramma op te stellen voor het reguliere baggerwerk in de Oosterschelde t.b.v. de bereikbaarheid voor de beroepsscheepvaart en recreatievaart en dit te koppelen aan de instandhouding van intergetijdengebieden (werk-met-werk).

In het contract met een marktpartij voor het uitvoeren van de baggerwerkzaamheden zullen bepalingen moeten worden opgenomen over zowel het baggerwerk (timing, diepte etc.) als over de verspreiding met het gebaggerde sediment op de intergetijdengebieden (locaties, hoogteligging, tijd van het jaar, eventuele bijkomende erosie remmende maatregelen, etc.).

Uit kostenoverweging zal de vaarafstand tussen bagger- en stortlocatie niet te groot moeten zijn. Als vuistregel kan een maximale vaarafstand van ~10-15 km worden aangehouden. Zo kan baggerwerk in de Krabbenkreek dus het best benut worden op de intergetijdengebieden in de Krabbenkreek, baggerwerk ten westen van de Zeelandbrug alleen binnen het westelijk deel van de Oosterschelde toegepast worden etc.

Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. Dit certificaat is geldig tot 15 december 2021. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV GL.

Literatuur

- van Asch, M. Brummelhuis, E.B.M. , Ende, D. van den , Troost, K. , Zweeden, C. van. (2018). Het kokkelbestand in de Nederlandse kustwateren in 2018. *IJmuiden : Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO) (CVO report 18.011)*.
- Bailard, J.A. (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *J. Geophys. Res.* 86: 10938. doi:10.1029/JC086iC11p10938
- Baptist, M.J., T. Gerkema, B.C. van Prooijen, D.S. van Maren, M. van Regteren, K. Schulz, I. Colosimo, J. Vroom, T. van Kessel, B. Grasmeijer, P. Willemsen, K. Elschot, A.V. de Groot, J. Cleveringa, E.M.M. van Eekelen, F. Schuurman, H.J. de Lange, M.E.B. van Puijenbroek (2019). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor'. *Ecological Engineering*, 127: 312-323. (<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.019>)
- Bijkerk, R. (1988). "Ontsnappen of begraven blijven: de effecten op bodemdieren van een verhoogde sedimentatie als gevolg van baggerwerkzaamheden," Rep. No. T-460. Koeman en Bijkerk Ecologisch advies, Haren.
- Boersema, M.P., J. van der Werf, J.N. Salvador de Paiva, A.M. van den Brink, L. Soissons, B. Walles, T.J. Bouma, P.L.M. de Vet, T.J.W. Ysebaert, E. Paree, M. Bijleveld, E. van Zanten, K van Westenbrugge, J. Stronkhorst, D. de Jong (2018). Oesterdam sand nourishment: Ecological and morphological development of a local sand nourishment. *Vlissingen: Centre of Expertise Delta Technology*, 78.
- Bouma, T.J., J. van Belzen, T. Balke, J. van Dalen, P. Klaassen, A.M. Hartog, P.M.J. Herman. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnol. Oceanogr.*, 61 (6) (2016), pp. 2261-2275, 10.1002/lno.10374.
- Consortium Arcadis-Technum (2007). "Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Baggeren en storten." Antwerp, Belgium (in Dutch).
- van Duren, L. A., van Kessel, T., and Kamermans, P. (2019a). "Modelstudie verspreidingsstrategie baggerspecie Oosterschelde," Rep. No. Deltares 11203112-002-ZKS-0004. Deltares, Delft.
- van Duren, L. A., Cado van der Lelij, J. A., Hanssen, J., Gaytan Aguilar, S., and Van Kessel, T. (2019b). "Modelstudie Effecten Slibpluim Zandkreek," Rep. No. 11203112-002-ZKS-0004. Deltares, Delft.
- Koeman en Bijkerk B.V., 2016. Zeegraskartering MWTL 2016 Oosterschelde en Westerschelde. Rijkswaterstaat, CIV, Delft.
- Ladd, C.J.T., M.F. Duggan-Edwards, T.J. Bouma, J.F. Pagès, M.W. Skov. (2019). Sediment supply explains long-term and large-scale patterns in salt marsh lateral expansion and erosion. *Geophys. Res. Lett.* 46(20): 11178-11187. <https://dx.doi.org/10.1029/2019gl083315>.

-
- MH Poly. (2019). Waterbodemonderzoek – project Zandkreek te Kats. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Zee & Delta. MH Poly Consultants & Engineers. Documentcode 19059V1 RA01 versie 3.0.
- Ribberink, J.S. (2004). Migration and infill of trenches in the marine environment: an analytical engineering model. SANDPI report, University of Twente, The Netherlands.
- van Rijn, L.C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves, I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 649-667.
- van Rijn, L.C. (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 668-389.
- de Ronde, J.G., Mulder, J.P.M., Van Duren, L.A., Ysebaert, T.J.W., 2013. Eindadvies ANT Oosterschelde, Deltares rapport 1207722-000-ZKS-0010.
- Troost, K., T. Ysebaert (2011). ANT Oosterschelde: Long-term trends of waders and their dependence on intertidal foraging grounds, Report number C063/11, Imares Yerseke.
- de Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, Z.B. Wang (2017). The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt. *Geomorphology*, 281: 31-42.
(<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.031>)
- de Vet, P. L. M., B.C. van Prooijen, R.A. Schrijvershof, J.J. van der Werf, T. Ysebaert, M.C. Schrijver, Z.B. Wang (2018). The importance of combined tidal and meteorological forces for the flow and sediment transport on intertidal shoals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123: 2464–2480.
- de Vries, I. (2014). Waterkwaliteiten Deltawateren. Datarapport Oosterschelde. Delft: Deltares.
- van der Werf, J., Reinders, J., Van Rooijen, A., Holzhauer, H., Ysebaert, T. (2015). Evaluation of a tidal flat sediment nourishment as estuarine management measure. *Ocean & Coastal Management*, 114: 77-87.
- van der Werf, J., De Vet, L., Boersema, M., Bouma, T., Nolte, A., Schrijvershof, R., Soissons, L., Stronkhorst, J., Van Zanten, E., Ysebaert, T. (2019). An integral approach to design the Roggenplaat intertidal shoal nourishment. *Ocean & Coastal Management* <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.023>
- Willemsen, P. W. J. M. , Borsje, B. W., Vuik, V., Bouma, T. J. , & Hulscher, S. J. M. H. (2020). Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal engineering*, 156, [103628].
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103628>
- Ysebaert T., van der Werf J., de Vet L., Bouma, T.J. 2017. Monitoringsplan Roggenplaat suppletie. Centre of Expertise Delta Technology, Wageningen Marine Research rapport.
- Zwarts, L., Blomert, A.-M., Bos, D., & Sikkema, M. (2011). Exploitation of intertidal flats in the Oosterschelde by estuarine birds. Rapport Altenburg & Wymenga.

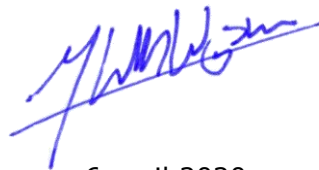
Verantwoording

Rapport C038/20
Projectnummer: 4313100113

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: Jeroen Wijsman
Senior onderzoeker

Handtekening:



Datum: 6 april 2020

Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager Integratie

Handtekening:

Datum: 6 april 2020

Bijlage 1 Natuur Impuls bijeenkomsten

Voorafgaand aan de hieronder vermelde bijeenkomsten zijn voorbereidende bijeenkomsten geweest met Natuurmonumenten, RWS, WMR en NIOZ op 24 mei, 3 juli, 27 augustus en 2 september 2019.

Datum	Aanwezig
23-09-2019	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf en Lodewijk de Vet
Start bijeenkomst (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
21-10-2019	WMR: Tom Ysebaert en Brenda Walles Deltares: Jebbe van der Werf, Jill Hansen, Thijs Kessel en Lodewijk de Vet
Ontwerp sessie (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst NIOZ: Tjeerd Bouma RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel en Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
18-11-2019	WMR: Tom Ysebaert en Brenda Walles Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs Kessel en Amrit Cado van der Lelij
Workshop (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst NIOZ: Tjeerd Bouma RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten, Jan de Kam en Herman Reekers Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
06-12-2019	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf en Luca van Duren
Stakeholders bijeenkomst (Yerseke)	RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel en Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
06-01-2020	WMR: Tom Ysebaert RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten, Frank Gijzel, Yuri de Nooijer, Jan de Kam
Bijeenkomst (Goes)	Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
27-01-2020	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs van Kessel, Lodewijk de Vet
Workshop (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
02-03-2020	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs Kessel, Lodewijk de Vet, Luca van Duren
Workshop (Delft)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel, Robin Bal Natuurmonumenten: Mark Mandemakers

Bijlage 2 Metingen kritische erosiesnelheid sediment Zandkreek

Meetprotocol

De kritieke snelheid voor het begin van beweging van verschillende sedimenten uit de Zandkreek is gemeten in een stroomgoot die de beweging van golven op de bodem nabootst.

Sediment was op 5 locaties in de Zandkreek bemonsterd, met een gradiënt van slikkig met een klein percentage zand (locatie 1, 2 en 3) tot zeer slikkig (locatie 4 en 5). Per locatie is de kritieke snelheid van 3 sedimentmonsters gemeten. Er zijn twee metingen gedaan per sedimentmonster; 1) direct na mengen van het sediment en 2) na twee dagen laten consolideren.

Elk sedimentmonster is eerst opnieuw gemengd, vanwege de tijd tussen bemonstering en de stroomgootmetingen. Na het mengen is een sedimentmonster genomen. Hiervan zijn de bulkdichtheid en de korrelgrootte gemeten. Omdat sommige monsters erg vloeibaar waren was het onmogelijk om steeds precies dezelfde hoeveelheid te nemen. Daarom is de bulkdichtheid als volgt berekend:

$$BD = \rho_w \left[1 - \frac{m_{droog}}{m_{nat}} \right] + \rho_s \frac{m_{droog}}{m_{nat}}$$

m_{droog} en m_{nat} zijn respectievelijk de droge en natte massa van het sedimentmonster (g), en ρ_w en ρ_s zijn respectievelijk de dichtheid van water (1000 kg m^{-3}) en het sediment (2650 kg m^{-3}).

Het sediment is voorzichtig in een bak geschept en glad afgestreken, waardoor de ruwheid alleen afhankelijk is van het type sediment (zie Foto 1).

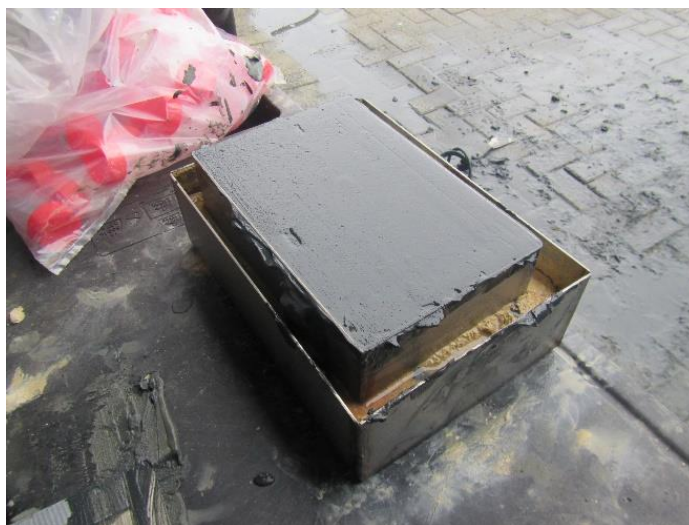
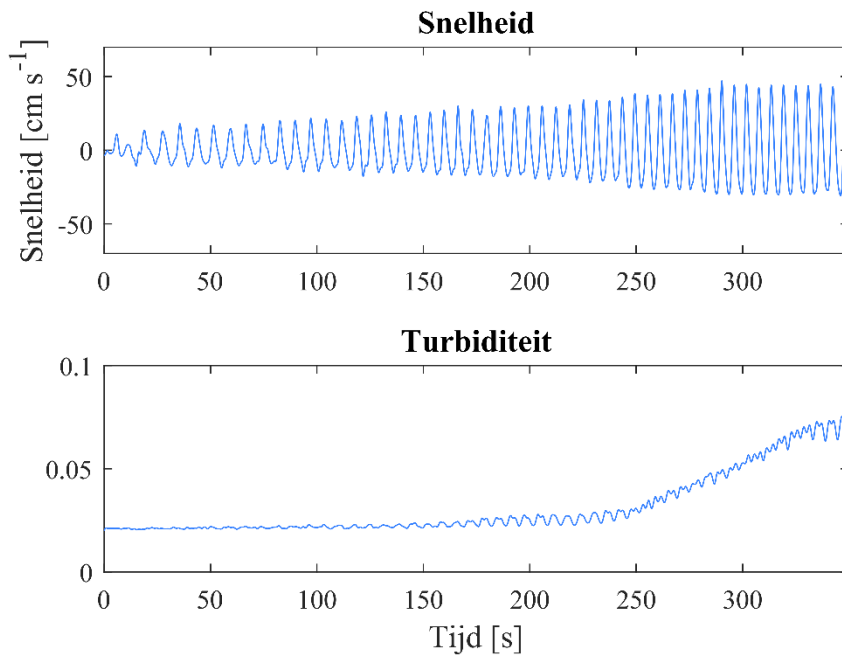


Foto 1. Een sedimentmonster voordat deze in de stroomgoot wordt geplaatst.

Vervolgens is de bak van onderuit de stroomgoot ingedrukt, waardoor er een vlakke bodem ontstaat met het sedimentmonster in het midden. De golfsnelheid in de stroomgoot werd langzaam opgevoerd totdat het sediment in suspensie kwam, waarbij snelheid en turbiditeit continu zijn gemeten (zie Figuur 1).



Figuur 1. Ruwe meetresultaten. Na 250 seconden wordt de kritieke snelheid bereikt en neemt de turbiditeit toe.

Uitrekenen bodemschuifspanning (BSS)

Omdat de vlakke bodems tot hoge kritieke snelheden leiden is de kritieke bodemschuifspanning (BSS_{cr}) uitgerekend. Deze waarden kunnen namelijk ook gerelateerd worden aan bodems met reliëf, of andere typen golven dan die van de stroomgoot. De BSS_{cr} ($N\ m^{-2}$) is als volgt berekend (Van Rijn 1993):

$$BSS_{cr} = \frac{1}{2} \rho_w f_w u_{cr}^2$$

u_{cr} is hier de kritieke snelheid ($m\ s^{-1}$) en f_w is een dimensieloze wrijvingsfactor die als volgt is uitgerekend (Soulsby 1997):

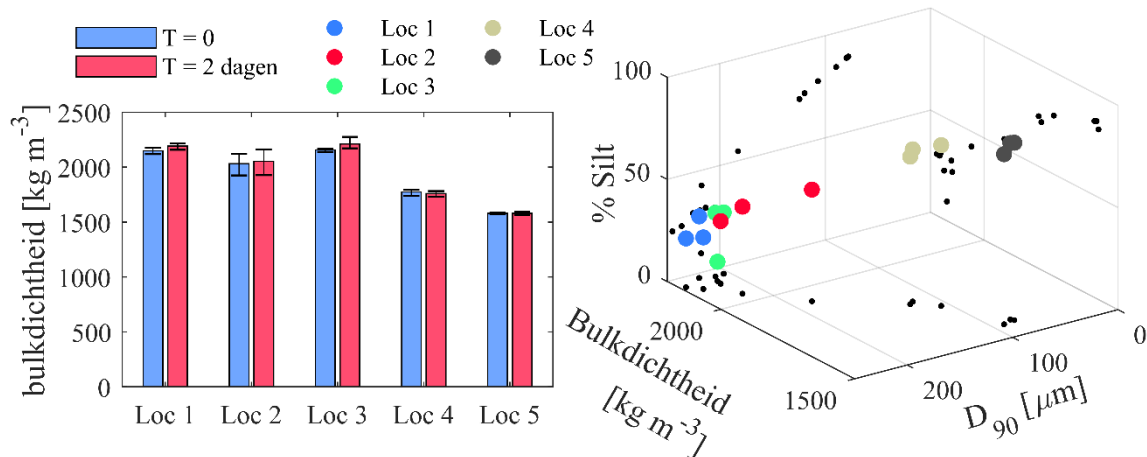
$$f_w = 1.39 \left(\frac{A}{\frac{1}{30} ks} \right)^{-0.52}$$

waar A de lengte van de orbitaalbeweging is (m) en ks de ruwheid van de bodem (m), hier berekend als $2.5D_{50}$ (gemiddelde korrelgrootte).

Resultaten

Sedimenteigenschappen

De sedimentmonsters bestaan in essentie uit twee groepen (zie Figuur 2): 1) Locaties 1 en 3, waarvan de bulkdichtheid gemiddeld 2150 kg m^{-3} is, het silt (i.e. slib) percentage gemiddeld 25 %, en de D_{90} gemiddeld $225 \mu\text{m}$, en 2) locaties 4 en 5, met een gemiddelde bulkdichtheid van 1670 kg m^{-3} , een gemiddeld silt percentage van 80 %, en een gemiddelde D_{90} van $100 \mu\text{m}$. Een van de sedimentmonsters van locatie 2 valt tussen deze twee groepen in. De andere twee monsters komen overeen met locaties 1 en 3.

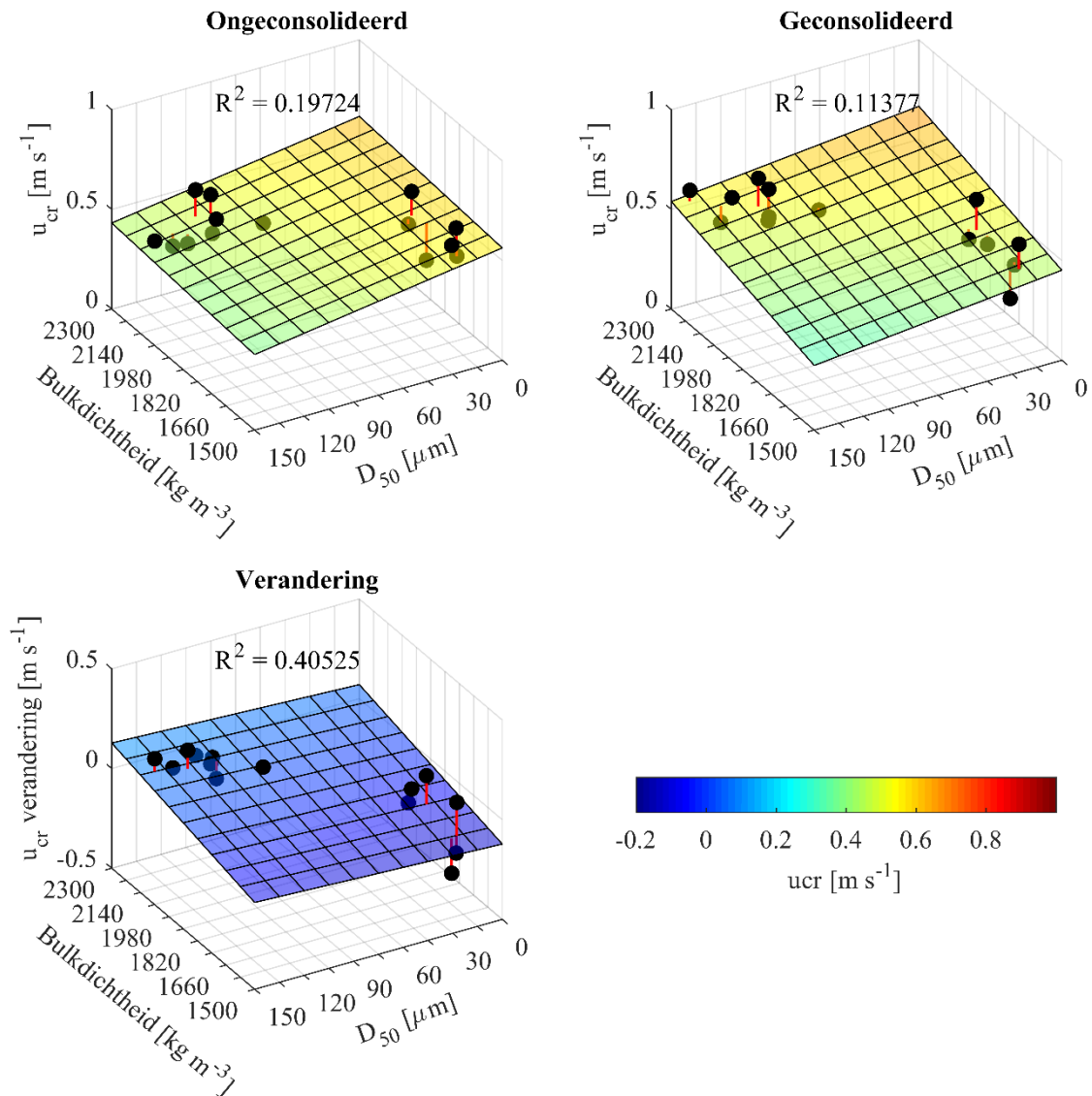


Figuur 2. Sedimenteigenschappen. Links de bulkdichtheid direct na mengen en na 2 dagen consolideren. Rechts de relaties tussen bulkdichtheid, D_{90} , en silt percentage. De zwarte puntjes geven de 2-D relaties weer.

Na twee dagen consolidatie is de bulkdichtheid van locaties 1 en 3 licht toegenomen, van 2150 kg m^{-3} naar 2200 kg m^{-3} . De bulkdichtheid van de slikkige sedimenten is ongewijzigd gebleven. De zandige sedimenten klonken in (er lag een laagje water op de sedimentmonsters), terwijl de slikkige sedimenten juist uitdroogden (de toplaag van het sediment was zuurstofrijk). Hoe zandiger het sediment, hoe hoger de bulkdichtheid ($p = 7 \times 10^{-9}$) en hoe sneller de consolidatie ($p = 0.0033$).

Stroomgootmetingen

De gemiddelde $\pm \text{SD}$ kritieke orbitaalsnelheid (u_{cr}) die in de stroomgoot is gemeten is $0.52 \pm 0.11 \text{ m s}^{-1}$. In Figuur 3 zijn de relaties tussen bulkdichtheid, D_{50} en u_{cr} weergegeven. Er is sprake van een sterke correlatie tussen de bulkdichtheid en de andere sedimenteigenschappen, deze was het minst voor D_{50} die daarom is geplot, waardoor de R^2 -waardes laag zijn (alle meetpunten vallen op één bulkdichtheid – D_{50} lijn). Wat opvalt is dat de u_{cr} voor alle types sediment ongeveer gelijk is, maar dat na 2 dagen consolidatie de u_{cr} van de sedimenten met een hoge bulkdichtheid is toegenomen (gem. $0.47 \text{ m s}^{-1} \rightarrow$ gem. 0.54 m s^{-1} , $p = 0.02$) terwijl die van de sedimenten met een lage bulkdichtheid juist is afgenomen (gem. $0.55 \text{ m s}^{-1} \rightarrow$ gem. 0.48 m s^{-1} , $p = 0.31$).

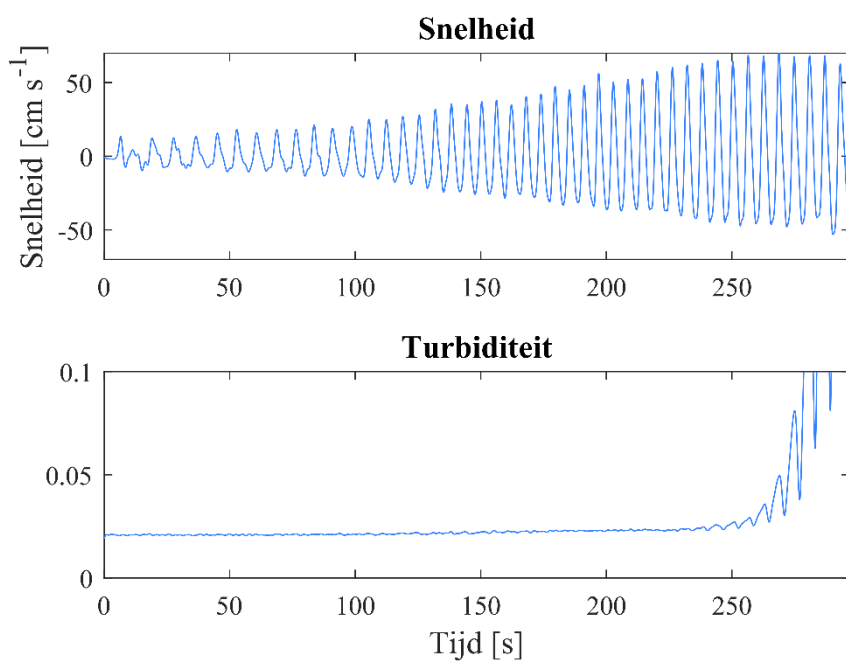


Figuur 3. Relaties tussen bulkdichtheid, D_{50} en u_{cr} voor de ongeconsolideerde en geconsolideerde sedimentmonsters. De derde figuur geeft de verandering in u_{cr} weer. De fits zijn lineair. De rode lijnen geven de afwijkingen aan, en de grootte van de punten geeft de ruwheid aan (grotere punten = hogere ruwheid). Van één van de geconsolideerde sedimentmonsters kon de u_{cr} niet gemeten worden.

De toename van de erosiegevoeligheid van de slikkige sediment komt doordat er een wat drogere zuurstofrijke laag vormde met kleine scheurtjes erin, welke vooral aan de randen van de core ontstonden bij het omhoog drukken in de stroomgoot. Dit zorgde voor een stochastisch karakter in de erosie van het sediment. Zodra er een klein stukje van deze laag loskwam werd de rest er als het ware afgestroopt, waarbij veel sediment in suspensie kwam (zie Foto 2 en Figuur 4). Hierdoor nam de u_{cr} van deze sedimenten gemiddeld genomen af, ook al was de toplaag zelf zeer stabiel.



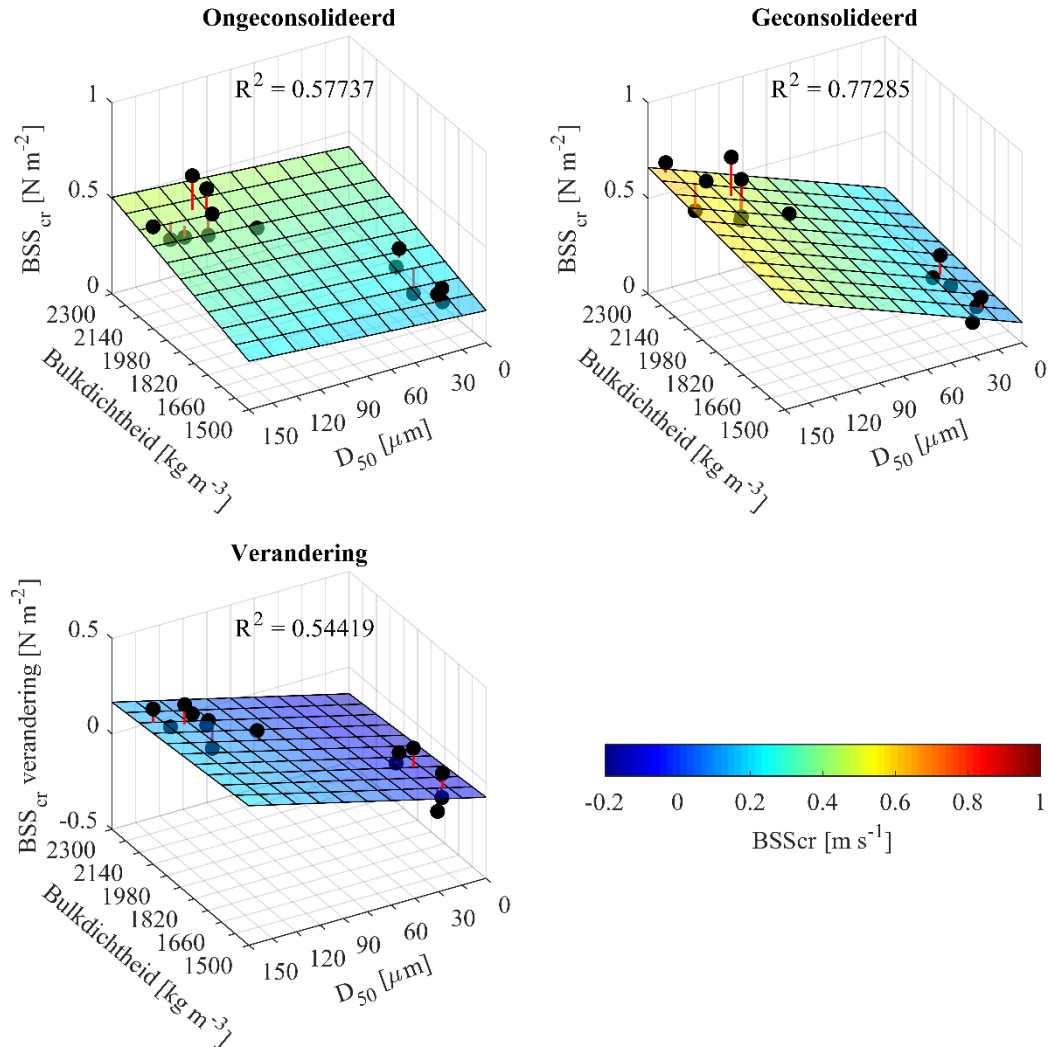
Foto 2. Afstropen van de toplaag van een geconsolideerd sedimentmonster.



Figuur 4. Stochastisch karakter van de kritieke snelheid voor suspensie. De maximale snelheid is op 240 seconden ingezet, maar pas na 270 seconden schiet er een deel van de toplaag los, waardoor er ineens veel erosie optreedt.

Bij het omrekenen naar BSS_{cr} ontstaan er, overeenkomend met de sedimenteigenschappen, twee groepen (Figuur 5). Van de zandige sedimenten is de BSS_{cr} $0.44 \pm 0.11 \text{ N m}^{-2}$ en van de slikkige sedimenten is dit $0.23 \pm 0.07 \text{ N m}^{-2}$. Vanwege de lage D_{50} van de slikkige sedimenten is de ruwheid van deze bodems ook laag, waardoor de BSS_{cr} lager is ook al is de u_{cr} hetzelfde. In een realistische situatie waar de ruwheid van de bodem afhangt van het bodemreliëf zullen de zandigere sedimenten dus (veel) stabiel zijn.

De BSS_{cr} van de ongeconsolideerde sedimenten hangt vooral af van de bulkdichtheid, terwijl die van de geconsolideerde sedimenten juist meer afhangt van de D_{50} . Dit houdt in dat de verandering in BSS_{cr} na consolidatie voor de slikkige sedimenten niet het resultaat is van een veranderende bulkdichtheid, maar van andere processen zoals de vorming van de droge, zuurstofrijke toplaag.



Figuur 5. Zelfde als figuur 3, maar omgerekend naar BSS_{cr} .

Discussie

Overwegingen interpretatie meetresultaten

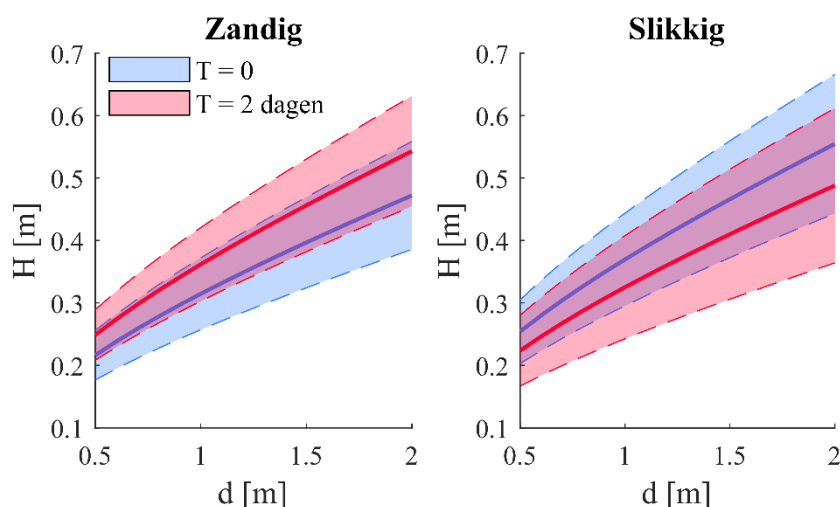
Voor interpretatie van deze resultaten moet met een aantal dingen rekening gehouden worden:

1. Voor consistentie zijn de sedimentmonsters steeds glad afgestreken. Dit zorgt ervoor, vooral met slijkgig sediment, dat de ruwheid zeer laag is. Hierdoor zijn hoge snelheden nodig om het sediment in suspensie te krijgen. Dit maakt de onzekerheid in de berekening van de BSS_{cr} groter.
2. De golfbeweging in de stoomgoot bootst de beweging na van niet-brekende golven, met minimale verticale waterbewegingen. In de brekerzone zullen door de sterke turbulentie veel minder sterke golven nodig zijn om het sediment in suspensie te brengen.
3. Het sediment is geconsolideerd in een bak die aan de zijkanten en onderkant is afgesloten. Hierdoor kan het grondwater niet wegstromen, waardoor de consolidatie van vooral de slijkgige sedimenten langzamer gaat dan in werkelijkheid.
4. Er zat geen benthos in het sediment, terwijl deze een sterk effect hebben op de erodeerbaarheid van sedimenten met een hoge silt fractie zoals die uit de Zandkreek.

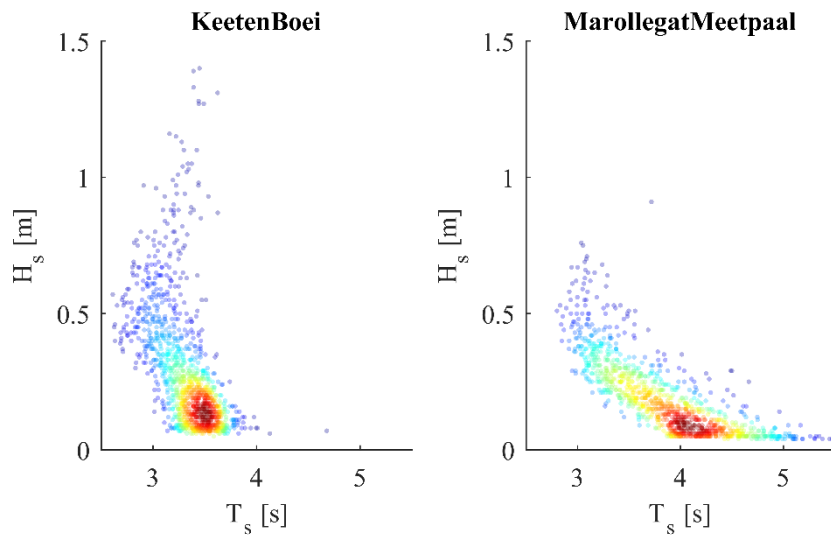
Vergelijking met golfdata Oosterschelde

De u_{cr} en BSS_{cr} waardes die zijn gemeten komen vallen binnen het kader van de hydrodynamica in de Oosterschelde. Figuur 6 laat de waterdiepte-golfhoogte lijn zien waarop erosie optreedt, benaderd met lineaire golftheorie. Tijdens opkomend en afgaand water (waterdiepte 0.5 m) valt de benodigde golfhoogte voor resuspensie tussen 0.17 en 0.31 meter voor zowel zandig als slijkgig sediment. Tijdens hoogwater (waterdiepte 1.5-2 meter) is de golfhoogte voor resuspensie gemiddeld 0.5 meter. De variatie in u_{cr} wordt echter uitvergroot bij het omrekenen naar golfhoogte op grotere dieptes in absolute zin, waardoor de standaardafwijking groot is.

Deze diepere golven zijn goed te vergelijken met tijdseries van meetboeien, welke zijn geplot in Figuur 7. Hieruit kunnen we opmaken dat de sedimenten stabiel zullen zijn onder de meest voorkomende golfcondities.



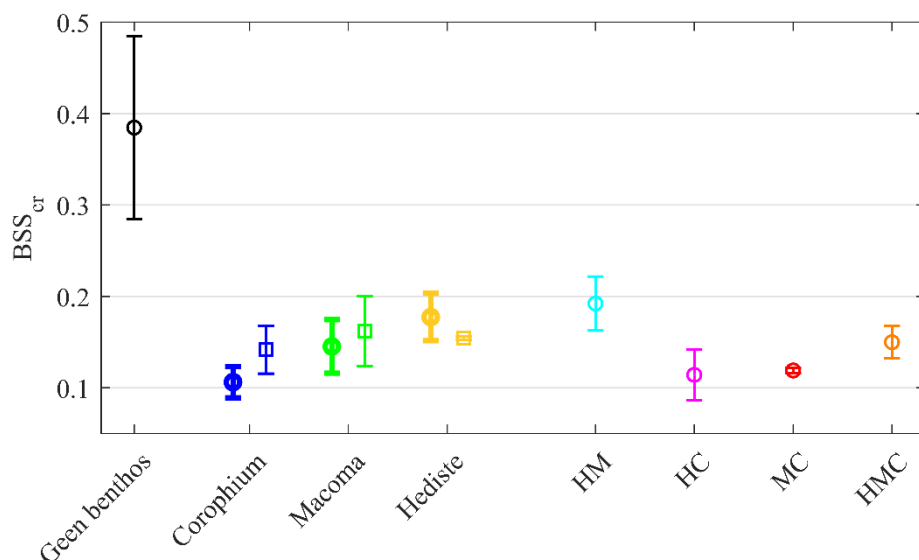
Figuur 6. Waterdiepte-golfhoogte grafieken voor zandig en slijkgig sediment voor en na consolidatie. De dikke lijnen geven het gemiddelde aan, het gearceerde deel is de standaardafwijking.



Figuur 7. Significante golfperiodes en hoogtes tussen 2015 en 2019 in de Oosterschelde. De kleur geeft de dichtheid aan. Rood = golven die vaak voorkomen en blauw = golven die zelden voorkomen.

Vergelijking met andere stroomgootexperimenten met benthos

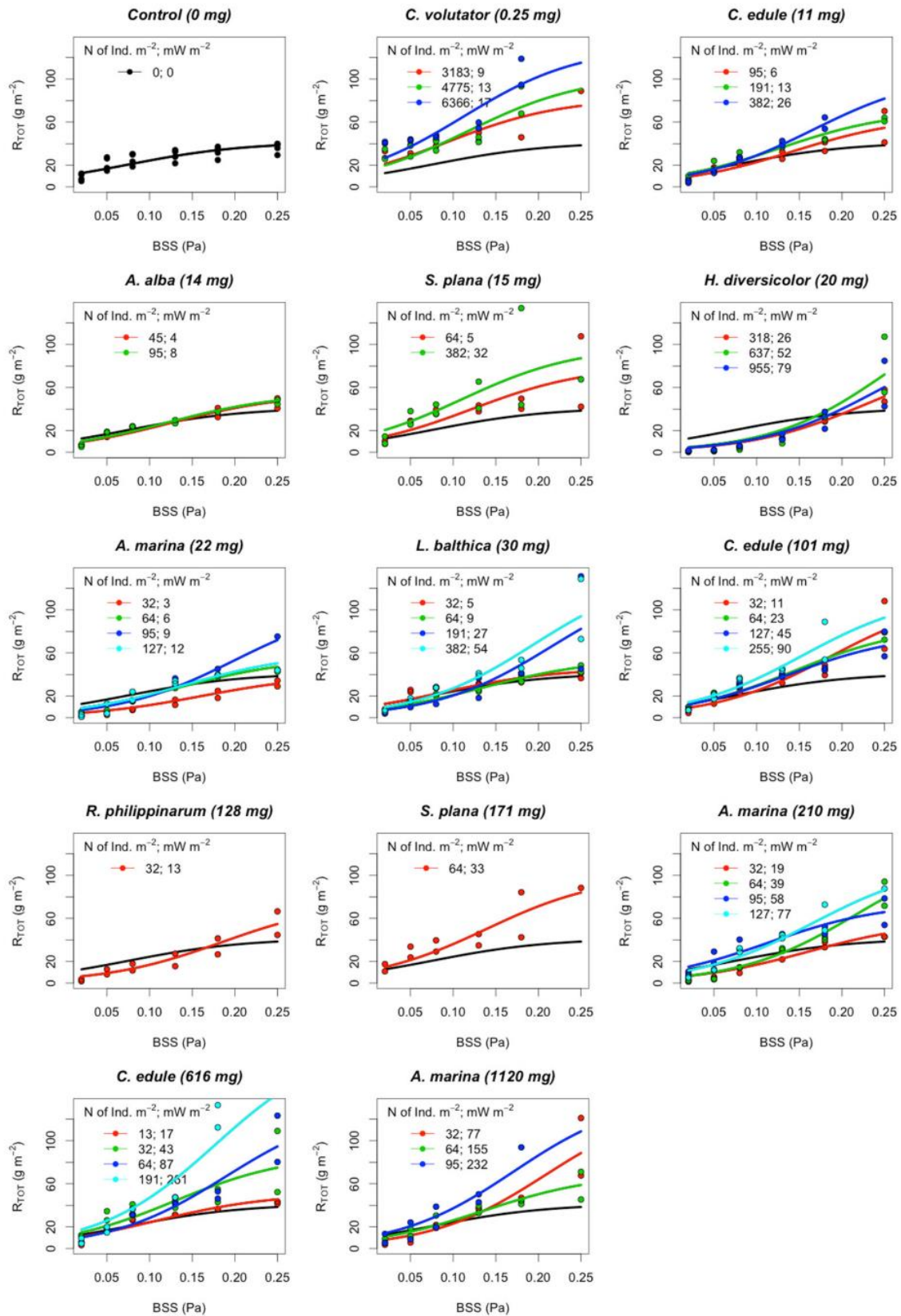
Met dezelfde stroomgoot zijn ook metingen gedaan met waarin verschillende soorten(mengsels) en biomassa's van benthos zijn toegevoegd. Het sediment voor deze metingen kwam van een andere locatie, maar is qua eigenschappen ($D_{50} = 48 \mu\text{m}$, siltpercentage = 70 %, bulkdichtheid = 2100 kg m^{-3}) vergelijkbaar met de slikkigere sedimenten van de Zandkreek, hoewel de bulkdichtheid hoger lag. De BSS_{cr} zonder benthos is gemiddeld 0.39 N m^{-2} , wat vergelijkbaar is met de waarden van de sedimenten uit de Zandkreek met vergelijkbare bulkdichtheid (zie Figuur 8 en Figuur 5). Wanneer benthos worden toegevoegd neemt de BSS_{cr} af met een factor 2 tot 3 (u_{cr} neemt dus af met een factor 1.4-1.7), afhankelijk van de soort(combinatie) en de biomassa.



Figuur 8. BSS_{cr} voor verschillende benthos soorten(combinaties).

Cozzoli et al. 2019 hebben metingen gedaan in een unidirectionele stroomgoot (Figuur 9) met sediment dat meer vergelijkbaar is met het zandige sediment uit de Zandkreek ($D_{50} = 120 \mu\text{m}$ en het siltpercentage was 12 %). De erosiegevoeligheid van dit sediment neemt ook toe wanneer benthos worden toegevoegd. De BSS_{cr} is in deze studie niet specifiek gemeten, maar de hoeveelheid materiaal in suspensie voor een bepaalde BSS . Als we de BSS_{cr} definiëren als het punt waarop de hoeveelheid materiaal in suspensie

exponentieel toeneemt en hoger is dan de controlemetingen zonder benthos zijn deze vergelijkbaar met de BSS_{cr} metingen uit deze studie ($< 0.1 \text{ N m}^{-2}$ voor *Corophium* sp., $\sim 0.14 \text{ N m}^{-2}$ voor *Limecola (Macoma) balthica*, en $\sim 0.18 \text{ N m}^{-2}$ voor *Hediste diversicolor*).

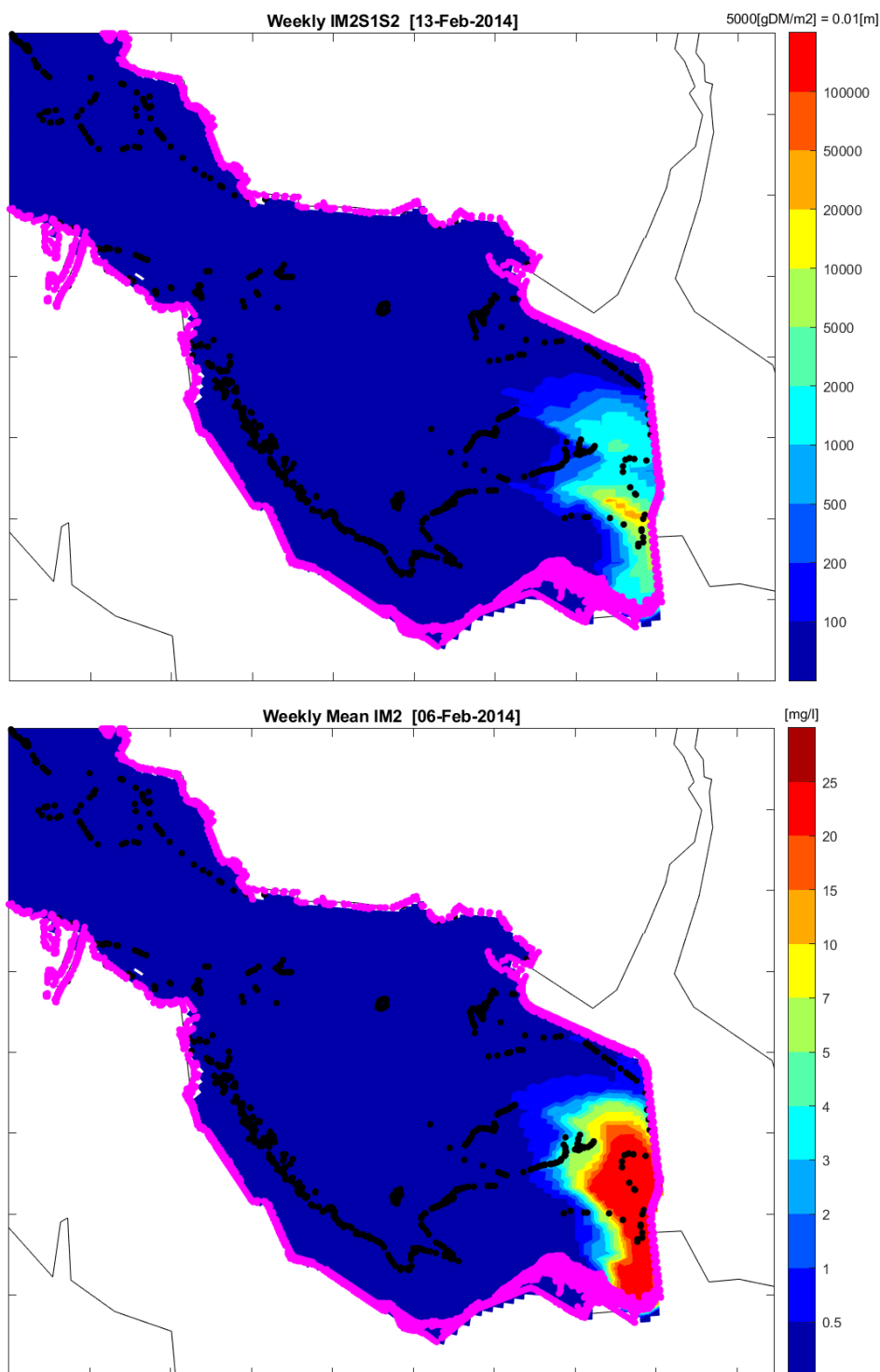


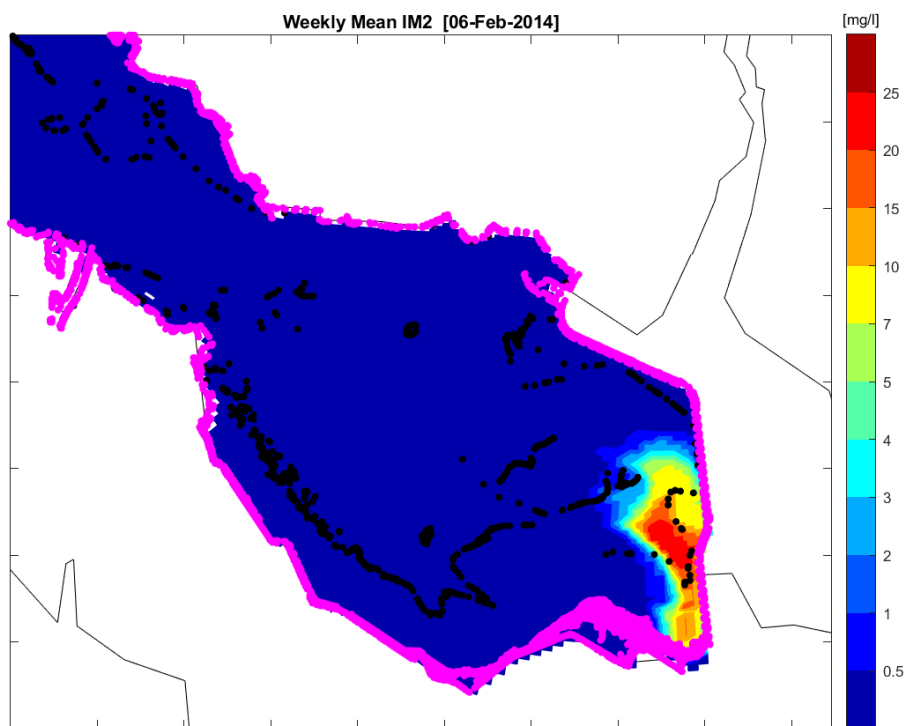
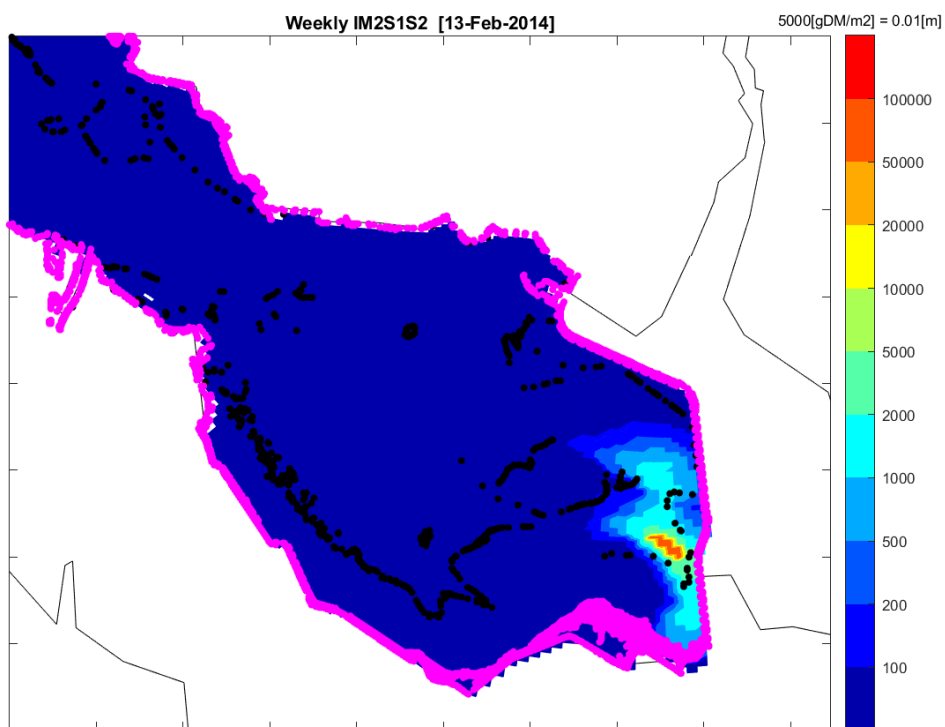
Figuur 9. Relaties tussen BSS en resuspensie voor verschillende soorten en dichtheden benthos (Cozzoli et al. 2019).

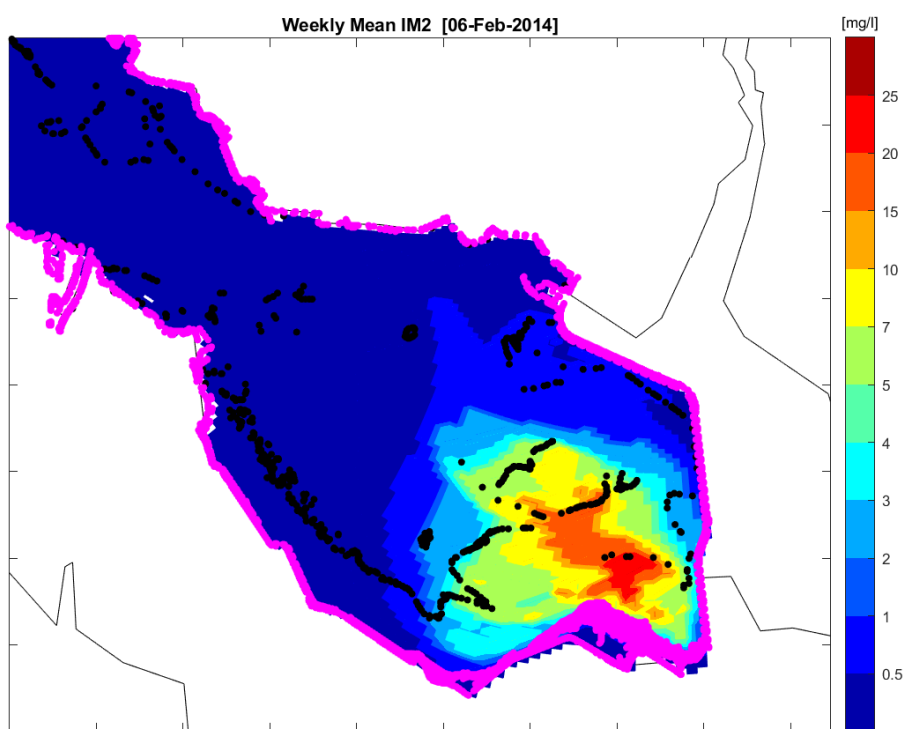
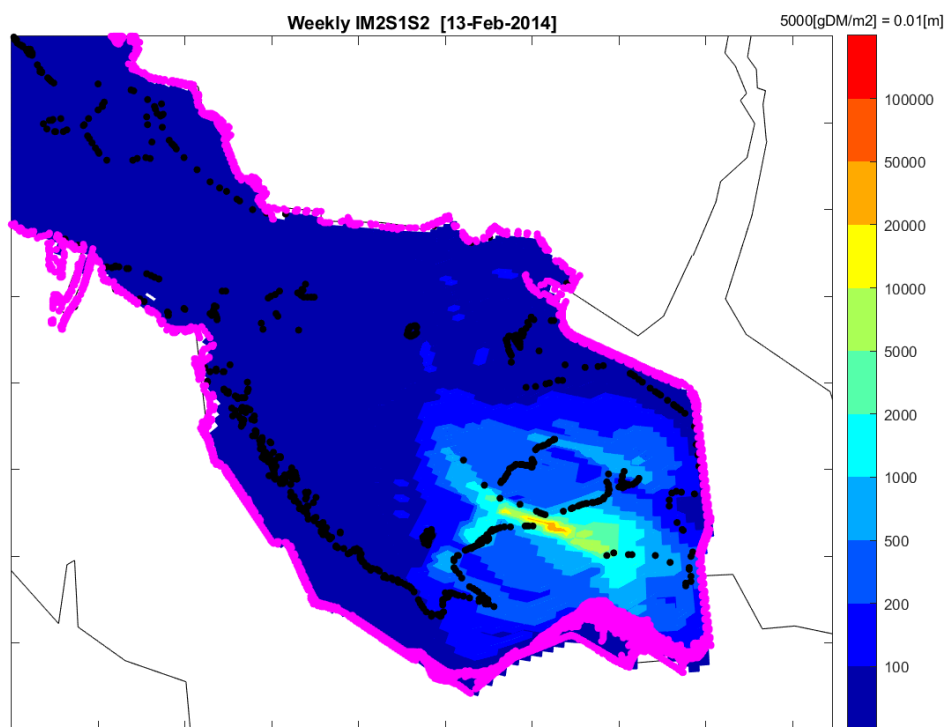
Bijlage 3 Resultaten van scenarioberekeningen

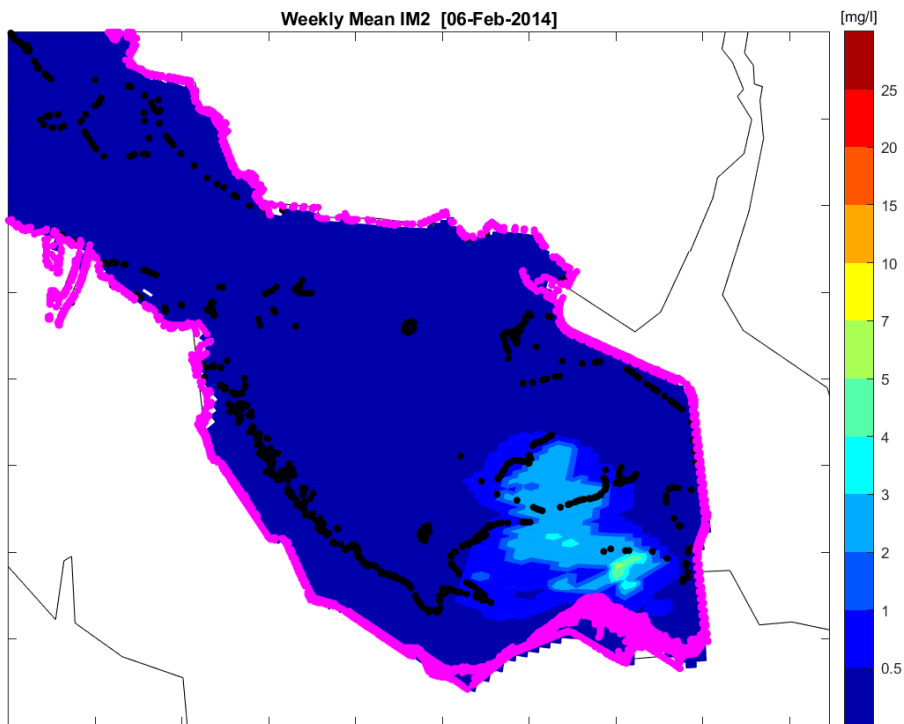
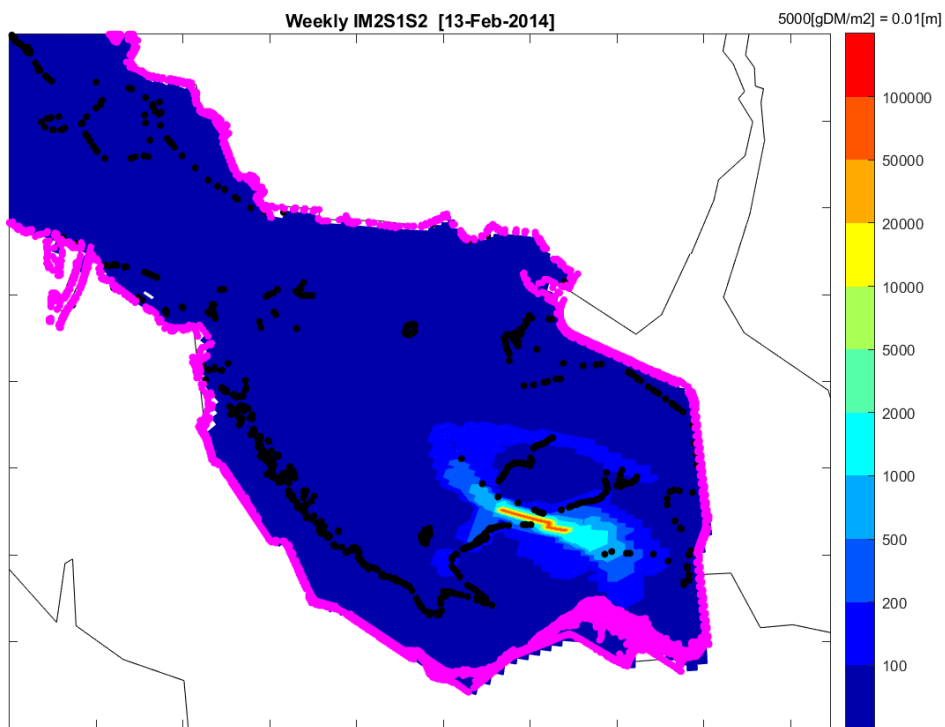
Getoond is de opslibbing na 3 maanden (in g/m², 5000 = 1 cm) en de maximale weekgemiddelde concentratieverhoging (in mg/l) t.g.v. de verspreiding. Hoogwaterlijn roze, laagwaterlijn zwart

Scenario R08PH2_1_S01 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)

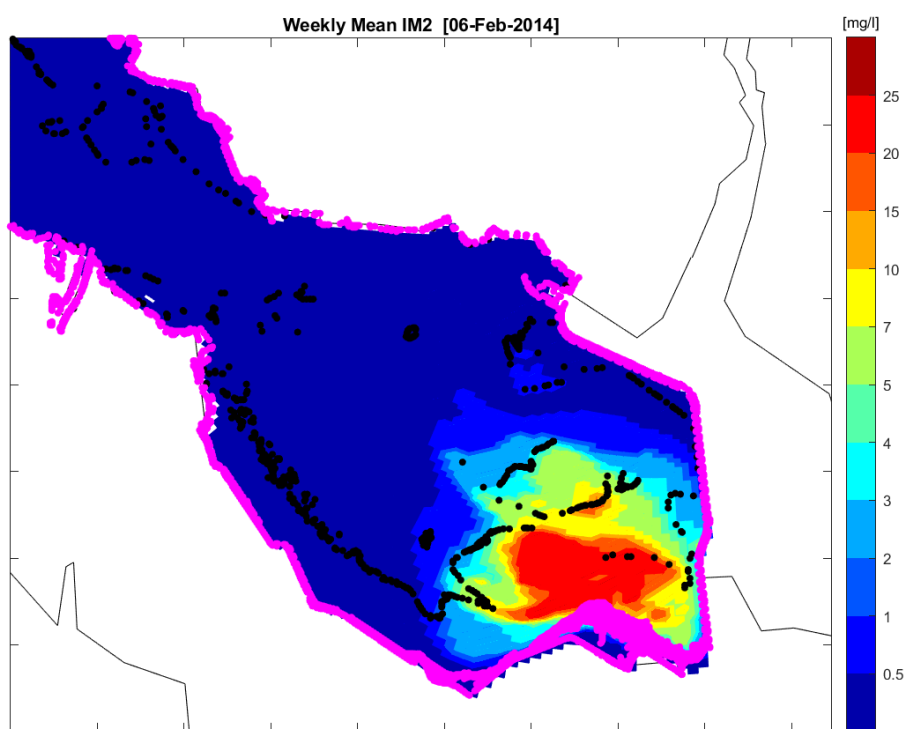
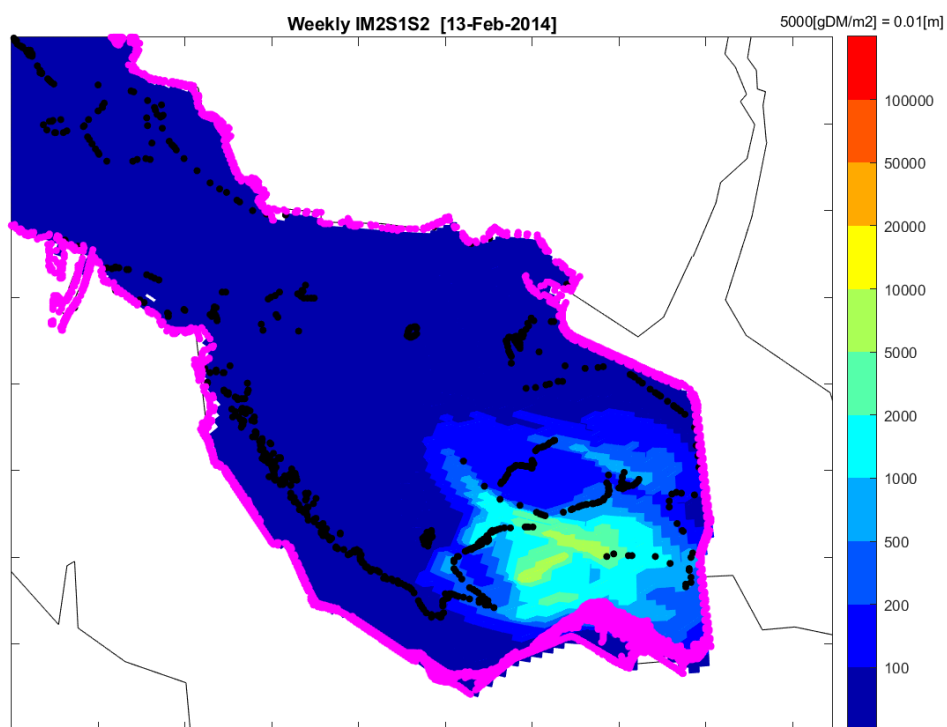




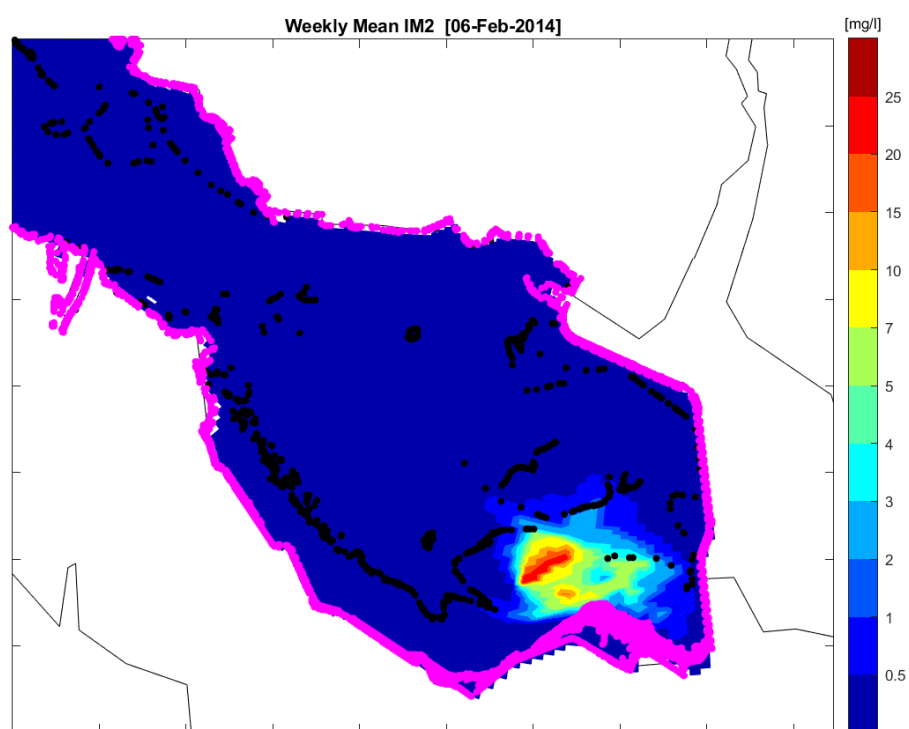
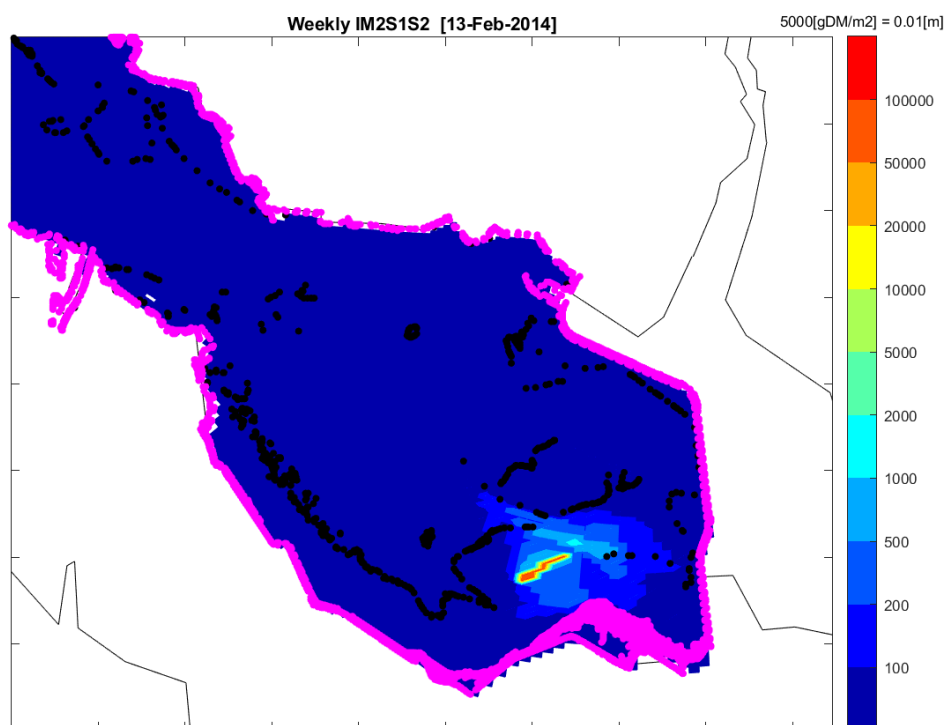




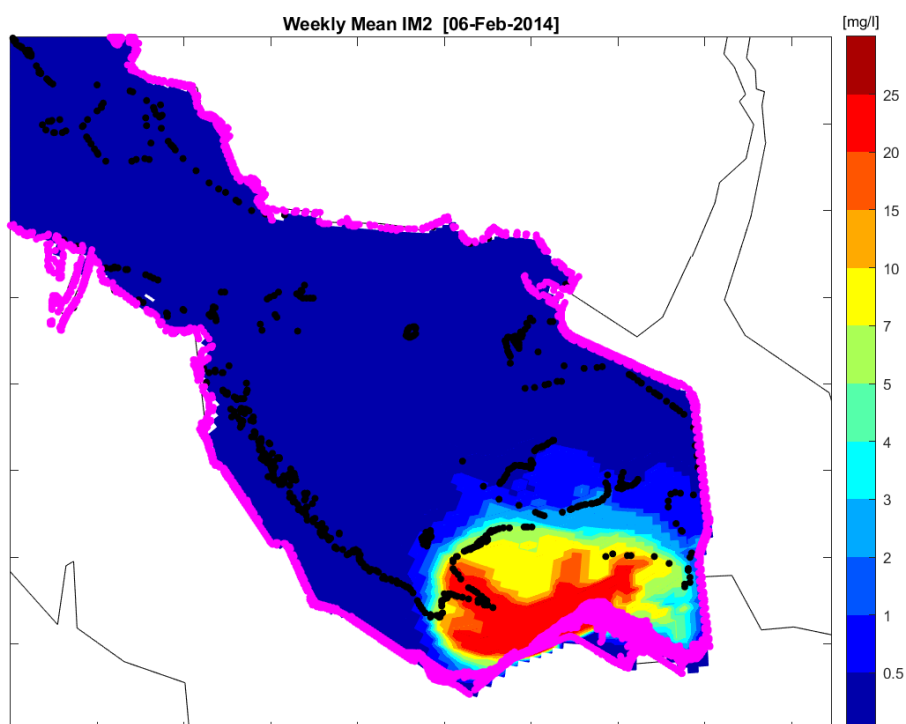
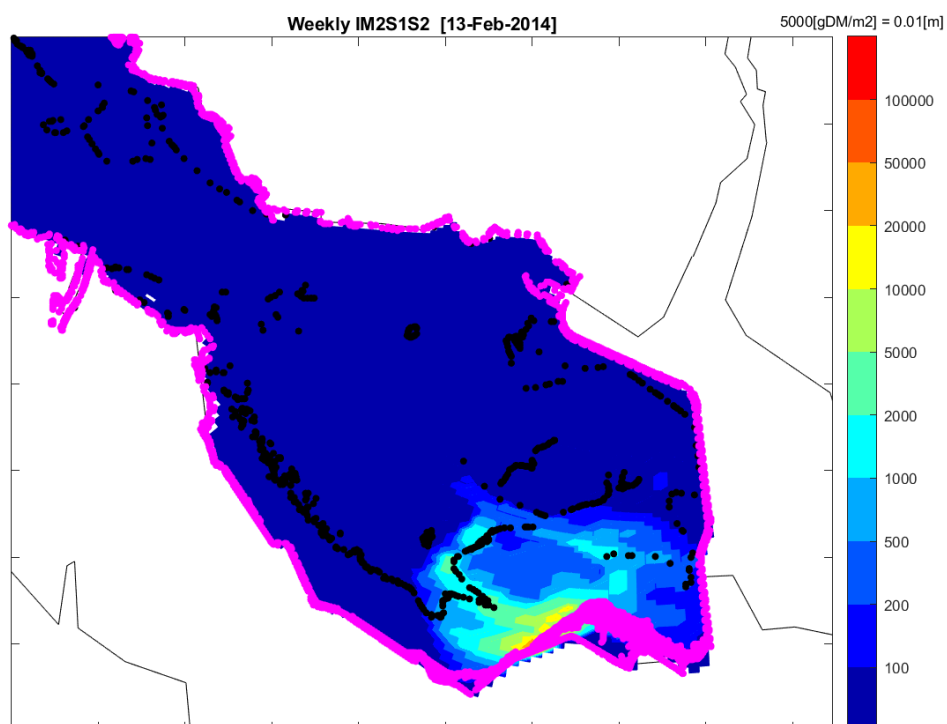
Scenario R08PH2_1_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



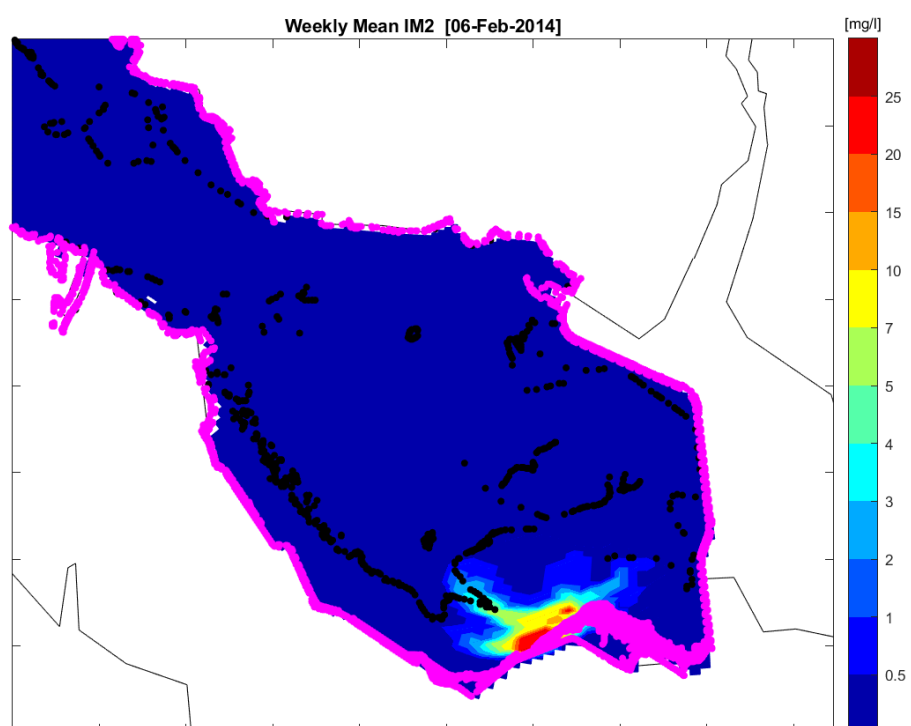
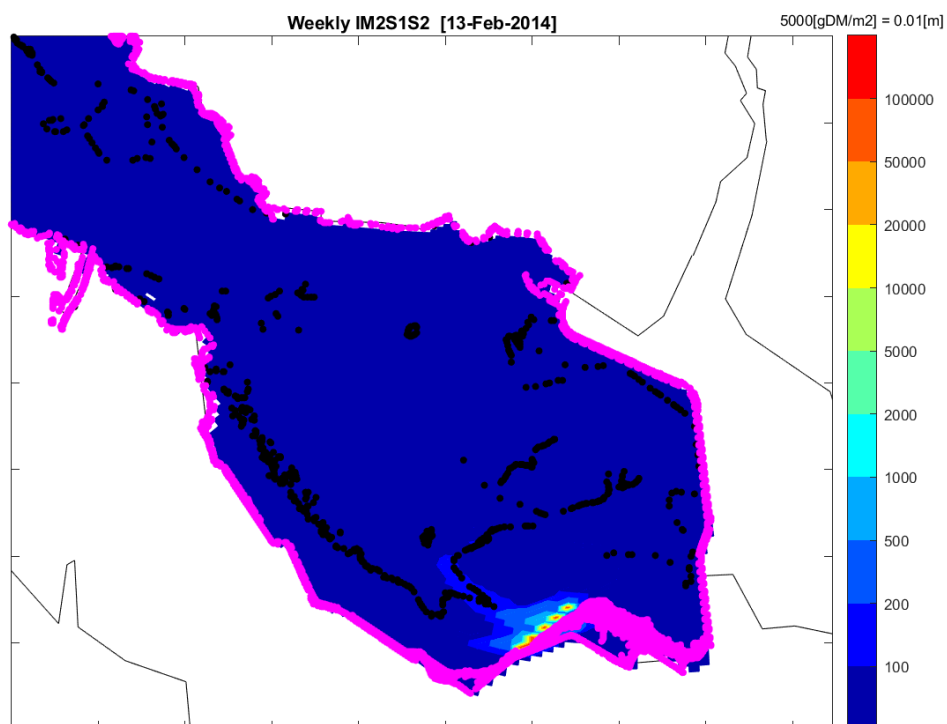
Scenario R08PH2_2_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.8 Pa)



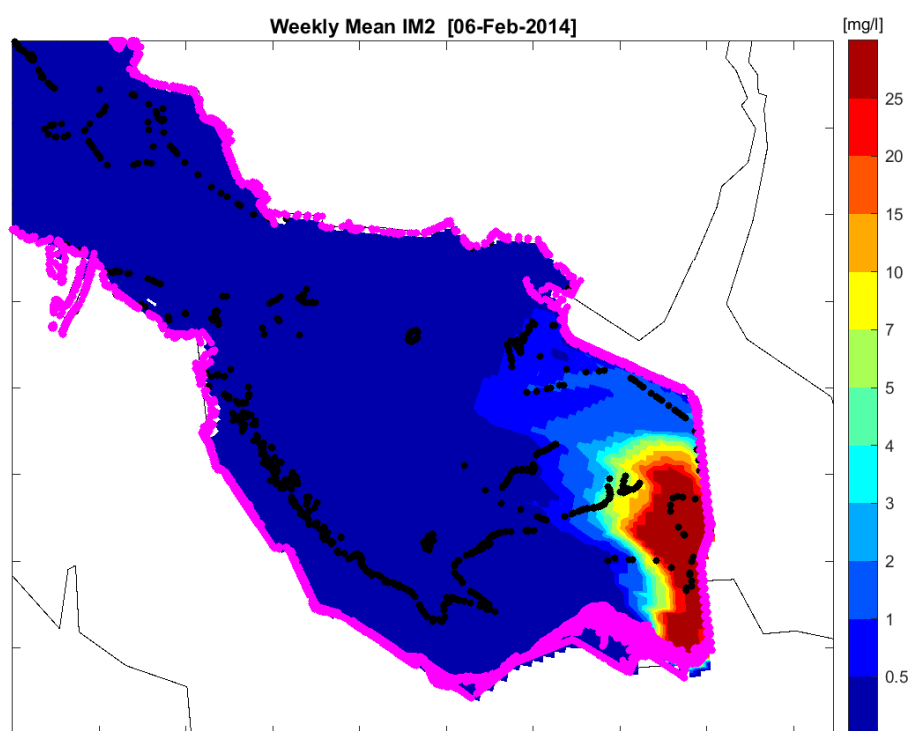
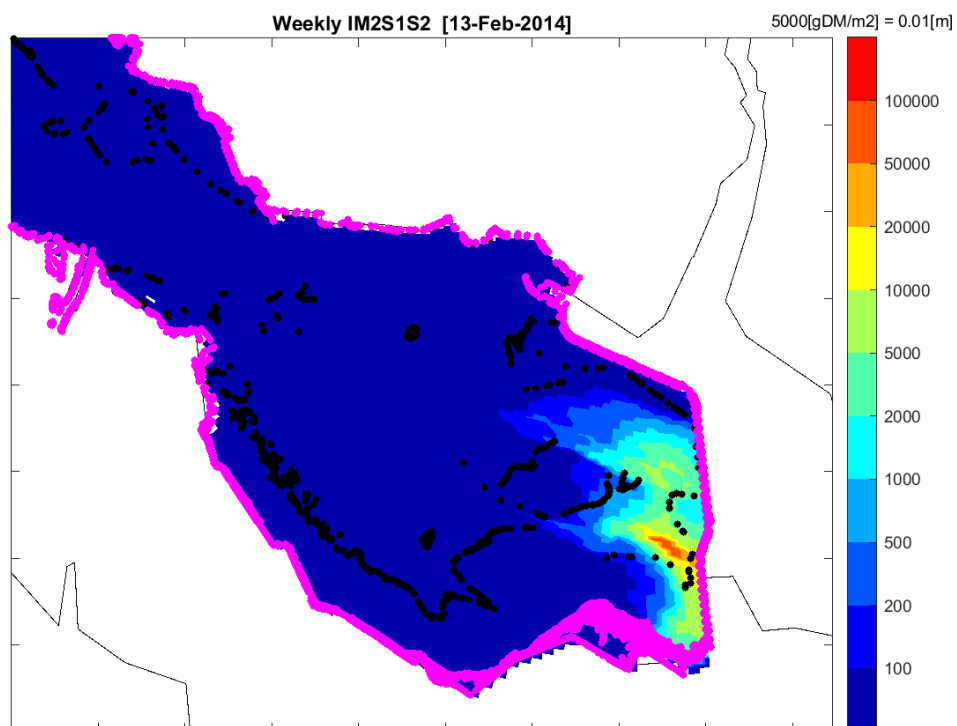
Scenario R08PH2_1_S04 (plaatsuppletie 2, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



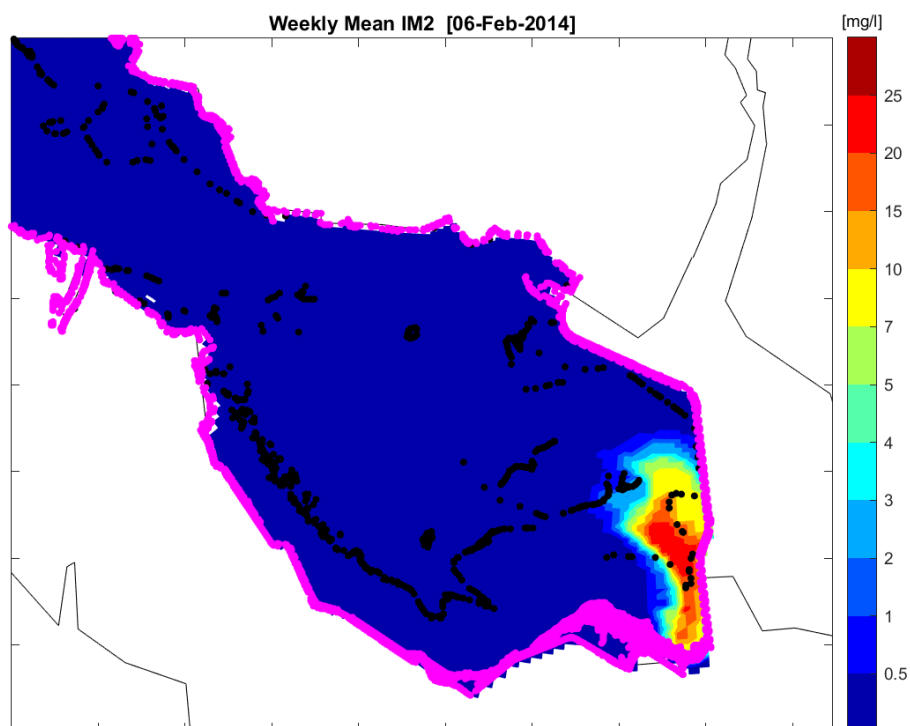
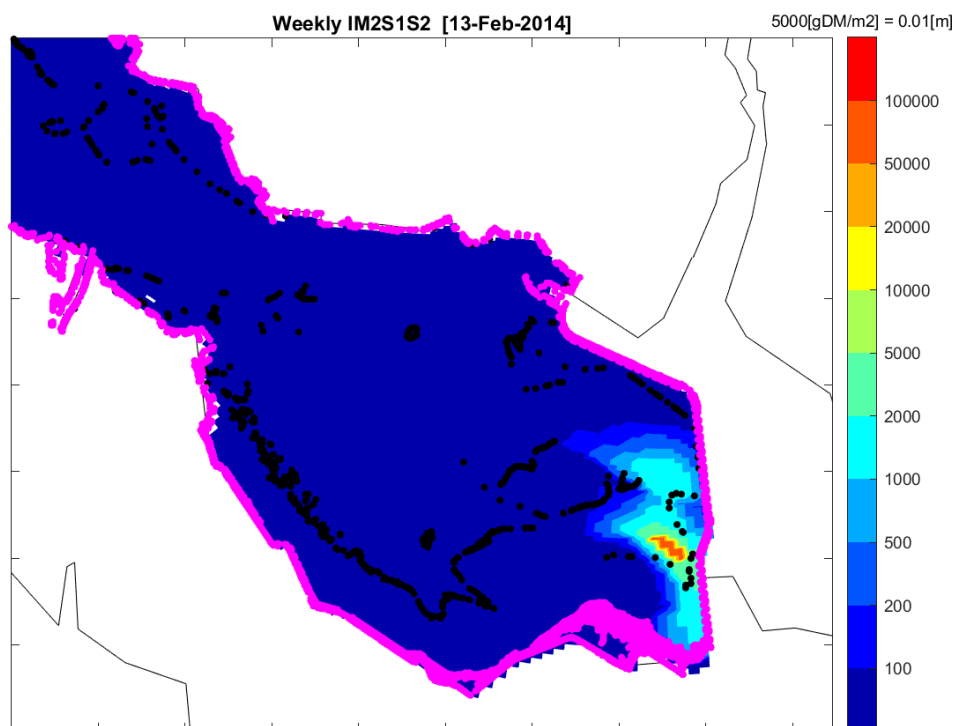
Scenario R08PH2_2_S04 (plaatsuppletie 2, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.8 Pa)

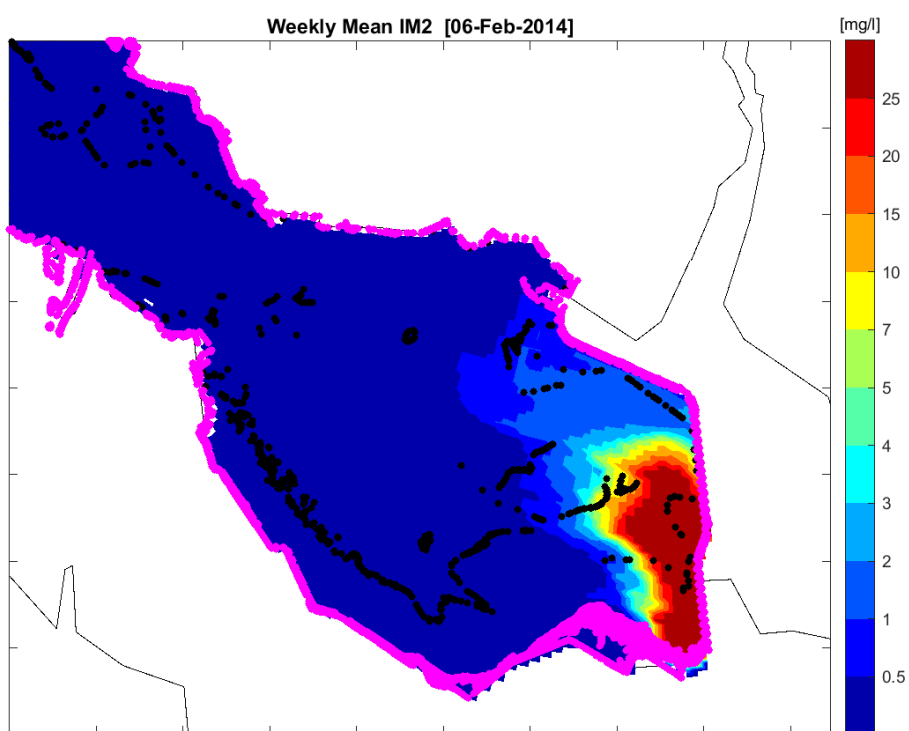
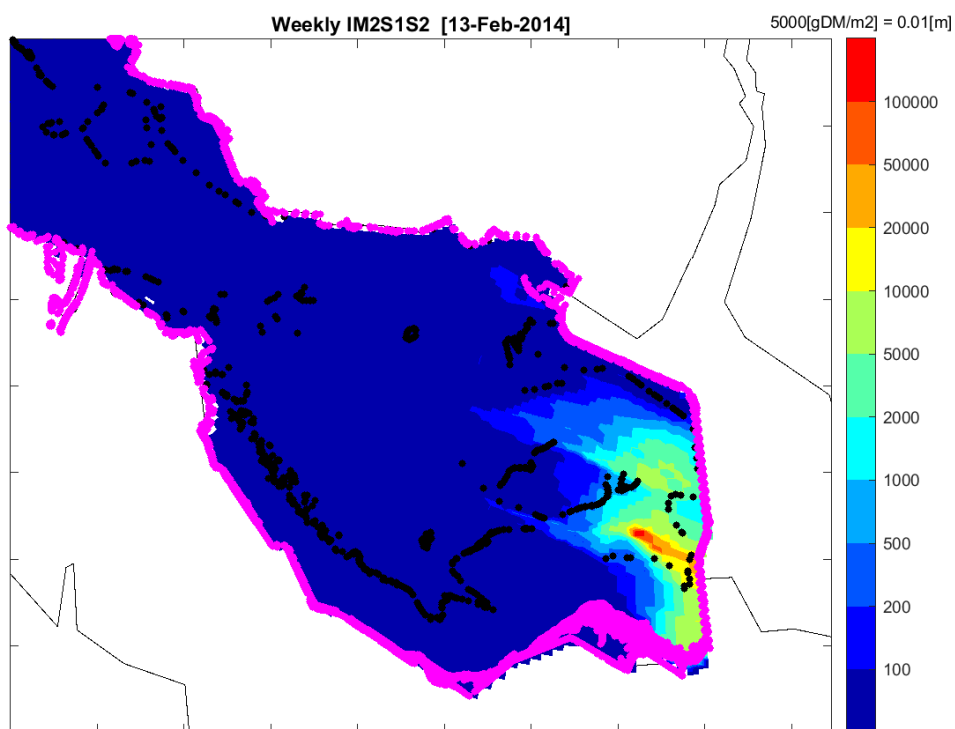


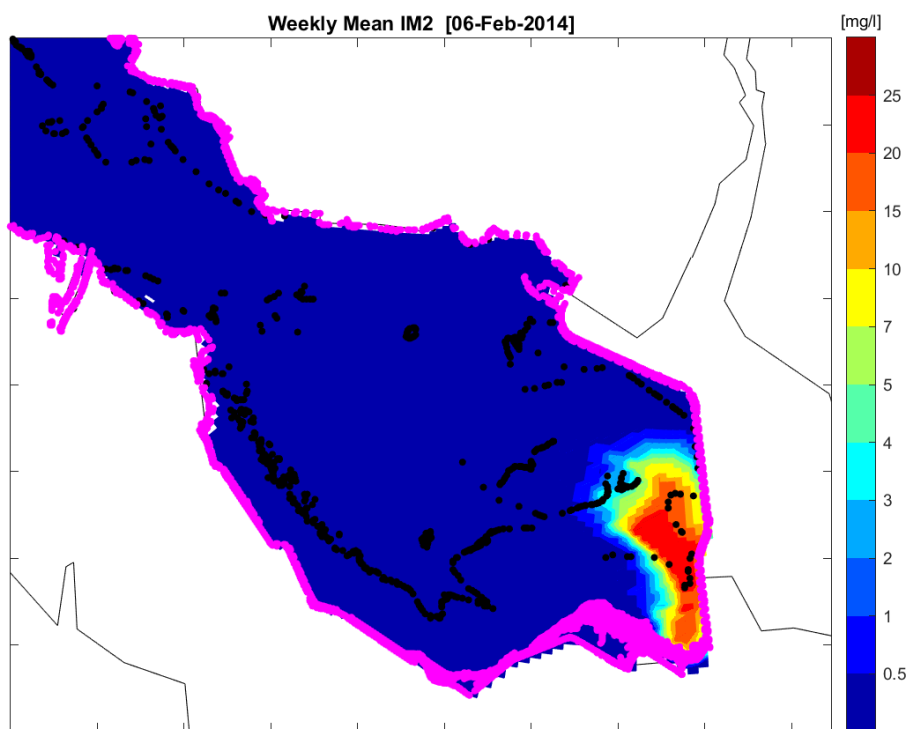
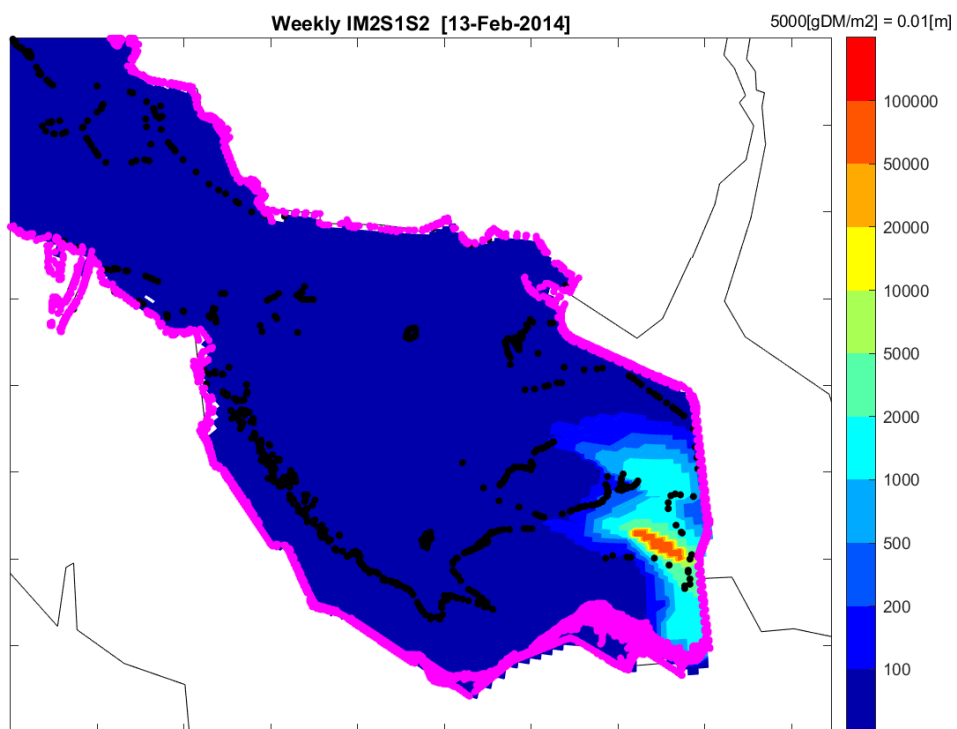
Scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 64% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



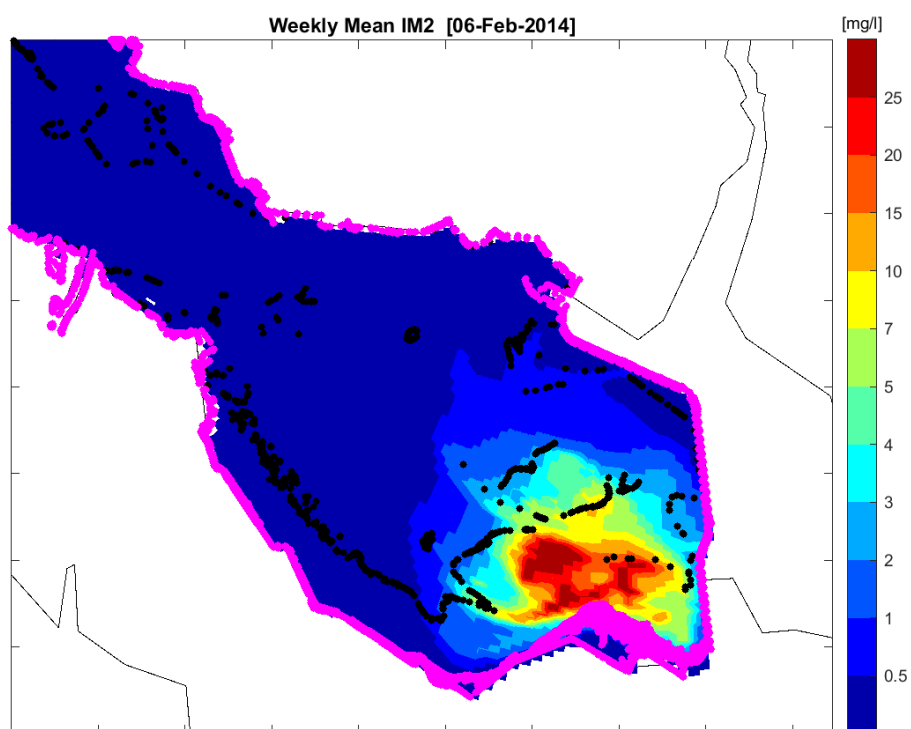
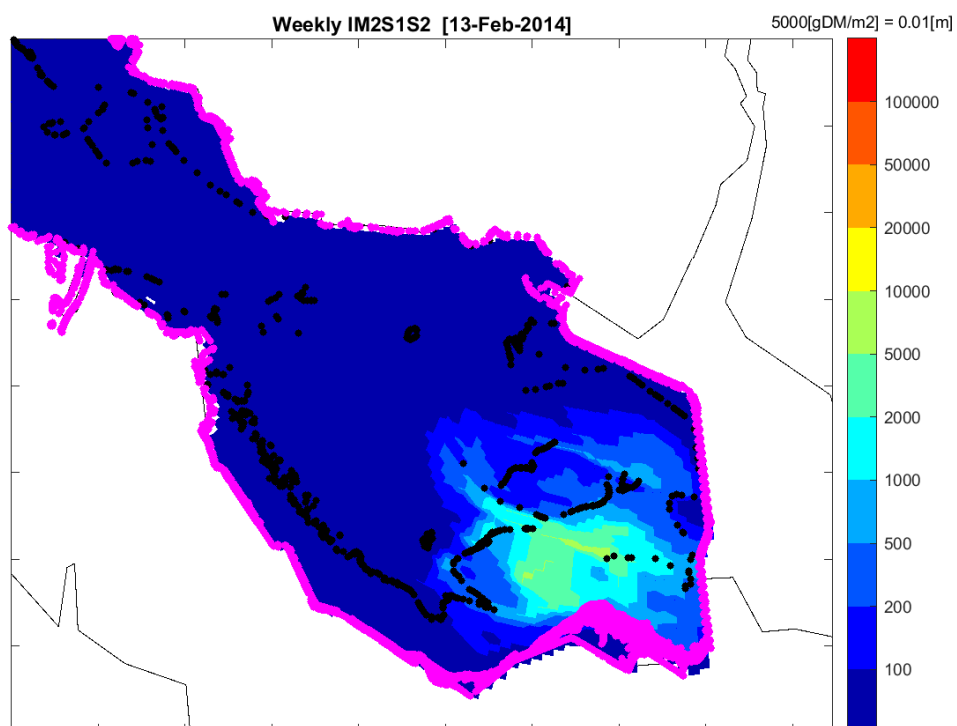
Scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 64% slib, tau_crit = 0.4 Pa)



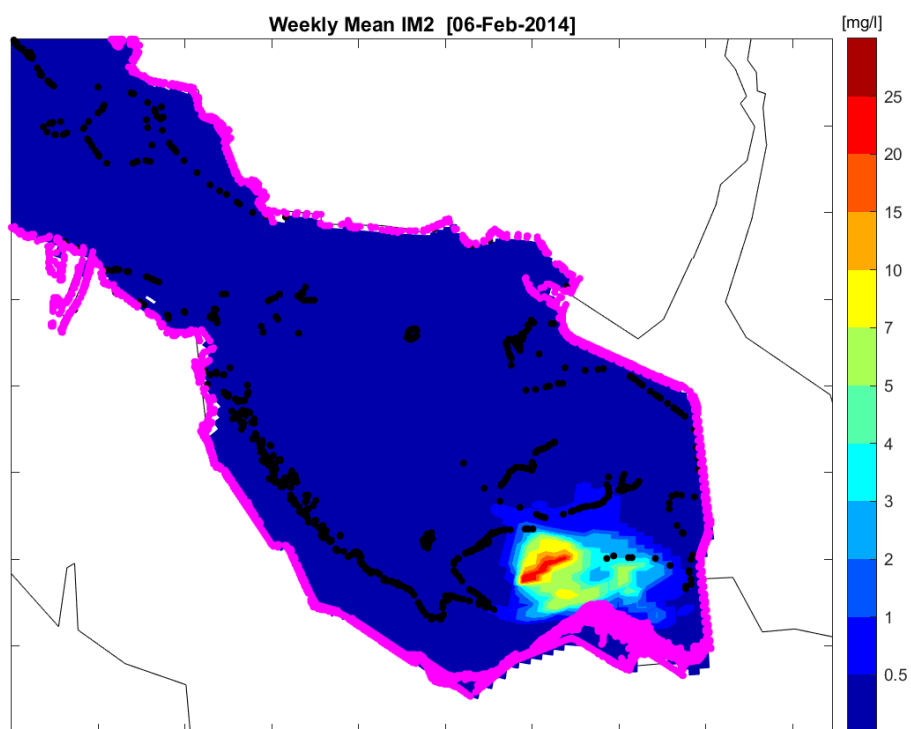
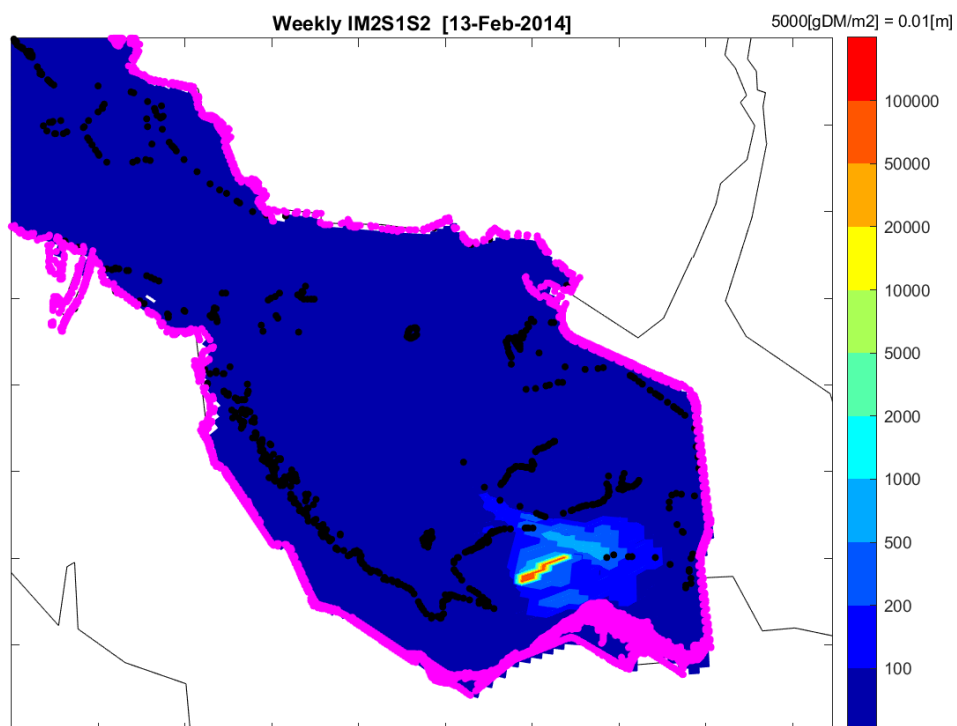


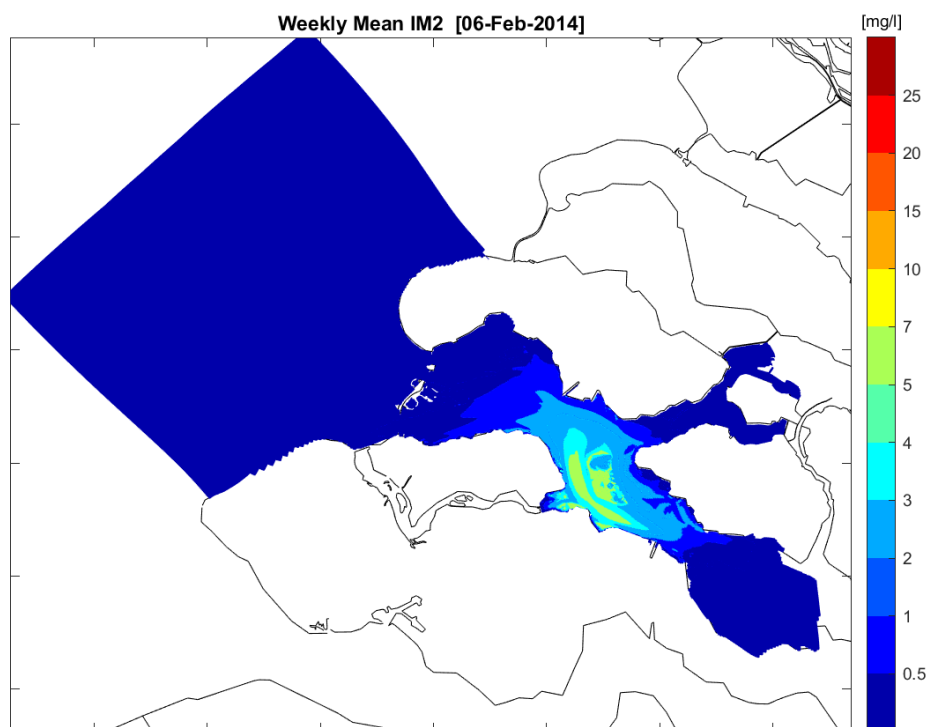
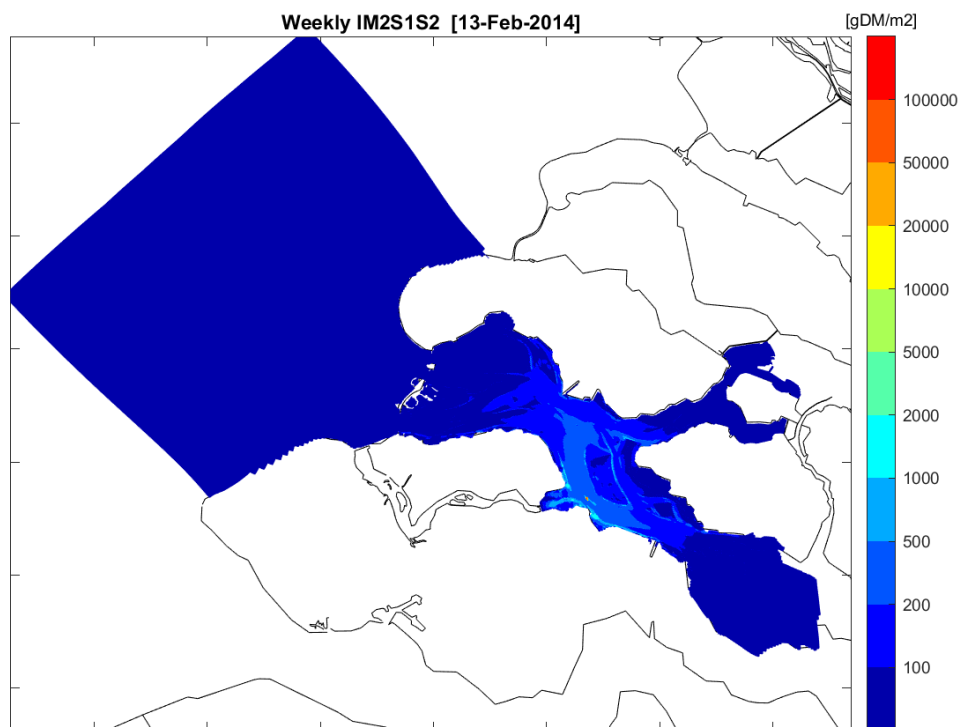


Scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 30% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



Scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 30% slib, tau_crit = 0.8 Pa)

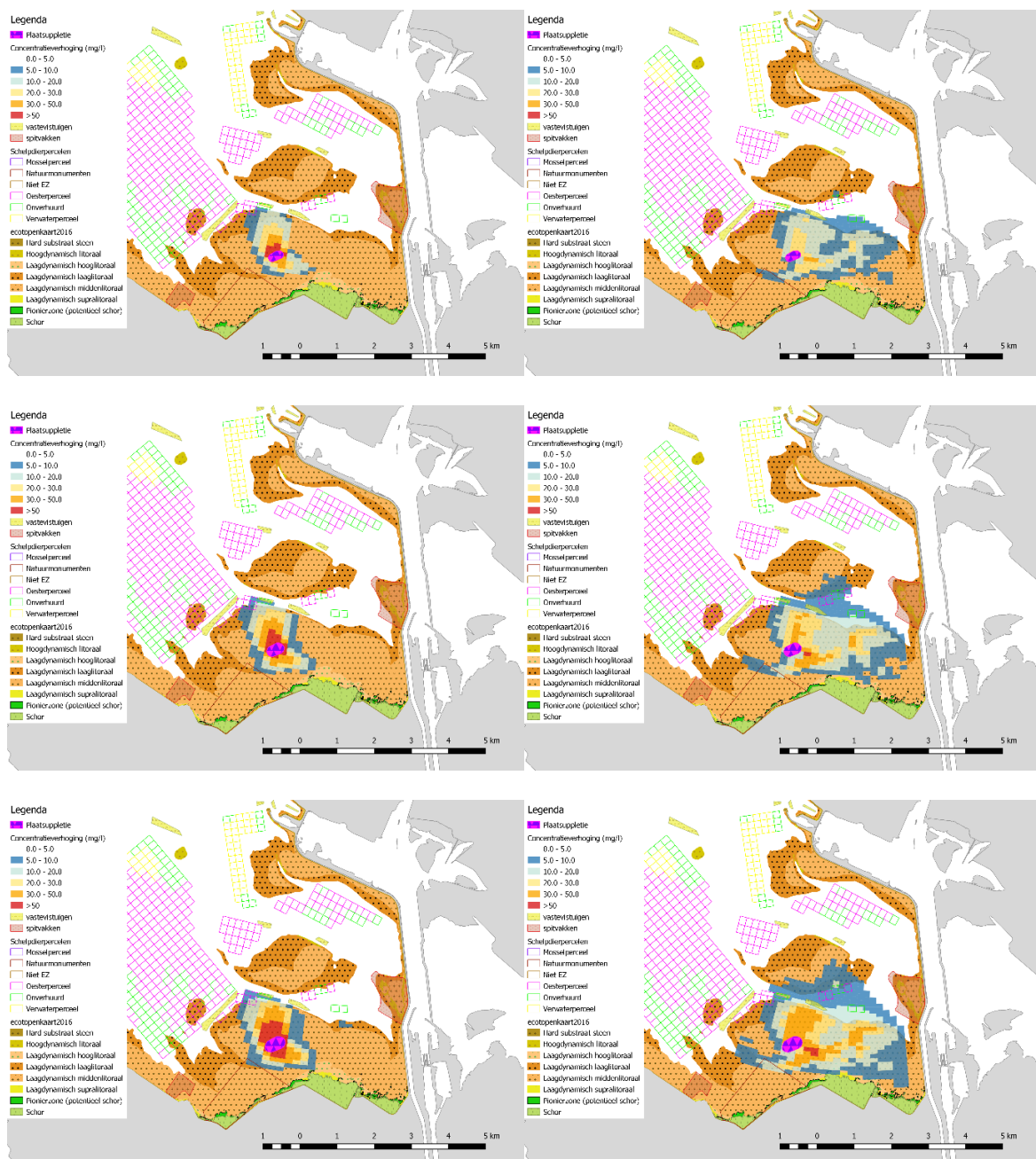




Bijlage 4 Slibconcentraties definitief suppletie-ontwerp

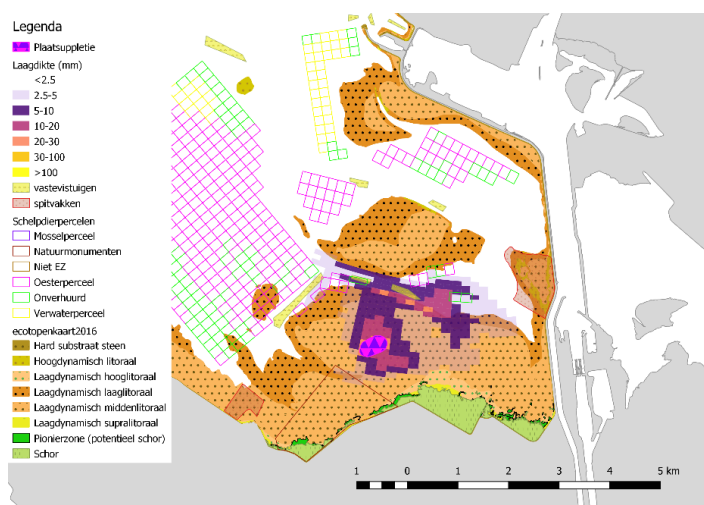
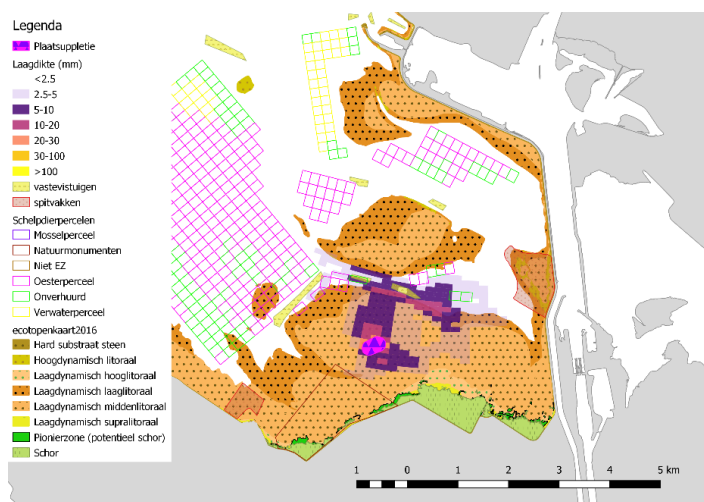
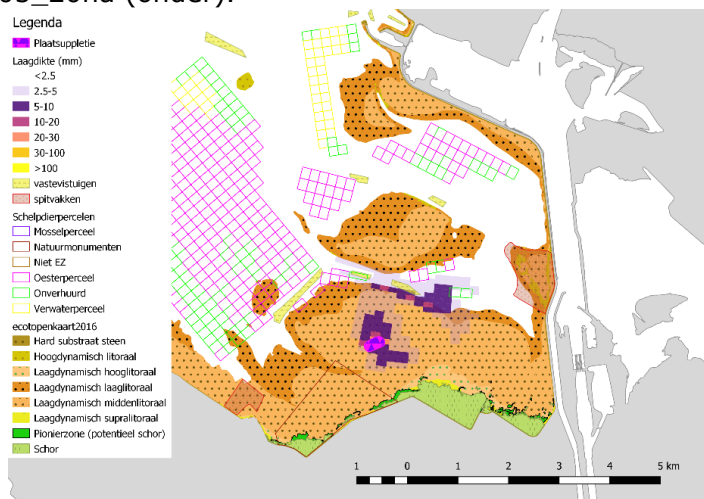
waterkolom

Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van het definitieve suppletie-ontwerp (week 9, linkse figuren) en na 13 weken (rechtse figuren) voor scenario R08PH2_2_30_S05_10ha (top), R08PH2_2_30_S05_15ha (midden) en R08PH2_2_30_S05_20ha (onder).



Bijlage 5 Accumulatie van slib op de bodem definitief suppletie-ontwerp

Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken) voor het definitieve suppletie-ontwerp voor scenario R08PH2_2_30_S05_10ha (top), R08PH2_2_30_S05_15ha (midden) en R08PH2_2_30_S05_20ha (onder).



Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 09 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekers adres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden

Wageningen Marine Research levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'

Natuur Impuls Oosterschelde

Toepassingsmogelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw

Auteurs: Tom Ysebaert*, Brenda Walles*, Jebbe van der Werf**, Thijs van Kessel**, Lodewijk de Vet**, Jill Hansen**, Luca van Duren**, Jaco de Smit***, Tjeerd Bouma***, Joost Stronkhorst****

* WMR

** Deltares (projectnummer 1204489)

*** NIOZ

**** HZ University of Applied Sciences

Wageningen Marine Research
Yerseke, maart 2020

VERTROUWELIJK Nee

Wageningen Marine Research rapport C038/20

Keywords: Natuurherstel, Oosterschelde, Sediment, Slib, Suppletie, Slibmotor, Zandhonger, Intergetijdgebieden.

Wijze van citeren: Ysebaert, Tom; Walles, Brenda; van der Werf, Jebbe; Van Kessel, Thijs; de Vet, Lodewijk, Hansen, Jill; van Duren, Luca; De Smit, Jaco; Bouma, Tjeerd; Stronkhorst, Joost. 2019. Natuur Impuls Oosterschelde: toepassingsmogelijkheden van slibrijk sediment voor natuurbouw. Wageningen Marine Research, Rapport C038/20

Opdrachtgever: 1. Natuurmonumenten
T.a.v.: Mark Mandemakers & Frans van Zijderveld
Zwaaksedijk 5
4434 RD Kwadendamme
2. Rijkswaterstaat
T.a.v.: Frank Gijzel & Eric van Zanten
Poelendaelesingel 18
4335 JA Middelburg

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/519760>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor gevolgschade, binnen de rechtspersoon Stichting noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van Wageningen Research, hierbij werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen Marine Research. vertegenwoordigd door Dr. M.C.Th. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van aanspraken van derden Scholten, Algemeen directeur in verband met deze toepassing.

KvK nr. 09098104, Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16. zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

A_4_3_1 V29 (2019)

Inhoud

Samenvatting	6
Opbouw rapport	11
Verantwoording	11
Fase 1: Verkennende studie	12
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond	12
1.2 Totstandkoming van deze studie: Natuur Impuls Oosterschelde	12
1.3 Doelstelling	13
1.4 Methodologie	14
2 Studiegebied	15
2.1 Kom van de Oosterschelde	15
2.2 Morfologie	16
2.3 Sedimentsamenstelling	19
2.4 Zwevend stofconcentratie	20
2.5 Ecologie	22
2.5.1 Ecotopen	22
2.5.2 Benthos	22
2.5.3 Vogels	24
2.5.4 Schorren	25
2.5.5 Zeegrasvelden	26
2.6 Functies/Menselijk gebruik	27
3 Afwegingskader	28
3.1 Doel van de ingreep	28
3.2 Type maatregel	29
3.3 Wijze van uitvoering	29
3.4 Doelhabitat i.r.t. beschikbaar sediment	29
3.5 Randvoorwaarden	30
3.6 Technische beperkingen	30
4 Suppletievarianten	31
4.1 Sediment als bouwstof	31
4.1.1 Technieken	31
4.1.2 Natuur Impuls Oosterschelde	33
4.2 Beschikbaar sediment Zandkreek	34
4.3 Mogelijke suppletiegebieden	37
4.3.1 Verdrongen land van Zuid-Beveland	38
4.3.2 Hooge Kraaijer	39
4.4 Suppletievarianten	39
5 Sedimentverspreiding en neveneffecten	42
5.1 Slib	42
5.1.1 Aanpak	42
5.1.2 Vier scenario's	44
5.1.3 Van vier naar twee scenario's	44

5.1.4	Gedetailleerde uitwerking twee scenario's	47
5.1.5	Resultaten berekening slibverspreiding en potentiële effecten	48
5.1.6	Conclusies t.a.v. de scenario's en de effecten	60
5.2	Zand	61
5.2.1	Aanpak	61
5.2.2	Resultaten	65
6	Sedimentverspreiding en effecten op het litorale habitat	68
6.1	Algemeen	68
6.2	Twee scenario's: Suppletie Laag vs Slibmotor Oost	68
6.2.1	Verspreiding van de slibfractie (op het einde van de simulatieperiode)	68
6.2.2	Verspreiding van de zandfractie	70
6.2.3	Effecten op droogvalduur en (autonome) erosie van het intergetijdengebied	70
6.2.4	Effecten op het bodemleven en foerageerfunctie voor vogels	71
6.2.5	Effecten op de schorren	71
7	Discussie en conclusie	72
7.1	Algemeen	72
7.2	Afweging tussen een suppletie en een slibmotor	73
	Fase 2: Definitief suppletie-ontwerp + monitoringsplan	77
1	Inleiding – Fase 2: definitief suppletie-ontwerp	77
2	Kenmerken definitief suppletie-ontwerp	78
3	Sedimentverspreiding definitief suppletie-ontwerp	80
3.1	Slibverspreiding definitief suppletie-ontwerp	80
3.1.1	Modelinput	80
3.1.2	Modelresultaten definitief suppletie-ontwerp voor R08PH2_2_30_S05_20ha	81
3.1.3	Potentiële effecten	85
3.2	Zandtransport definitief suppletie-ontwerp	87
4	Conclusie definitief suppletie-ontwerp	88
5	Aanbeveling aanleg definitief suppletie-ontwerp	89
6	Monitoringsplan definitief suppletie-ontwerp	91
6.1	Inleiding	91
6.2	Hydro-morfologische ontwikkeling	92
6.2.1	Achtergrond	92
6.2.2	Doel	92
6.2.3	Methode	93
6.2.4	Resultaat	95
6.3	Sediment- & suspensietransportmetingen	95
6.3.1	Achtergrond	95
6.3.2	Doel	96
6.3.3	Methode	96
6.3.4	Resultaat	97
6.4	Ecologische ontwikkeling suppletie - bodemdieren	97
6.4.1	Achtergrond	97
6.4.2	Doel	98

6.4.3	Methode	98
6.4.4	Resultaat	98
6.5	Vogels	99
6.5.1	Achtergrond	99
6.5.2	Doel	99
6.5.3	Methode	100
6.5.4	Resultaat	100
6.6	Schorren en zeegras	100
6.7	Evaluatie	100
7	Mogelijkheden voor opschaling	102
7.1	Inleiding	102
7.2	Hoeveelheid en type baggerspecie	103
7.3	Geschikt sediment volume	104
7.4	Aandeel in de sediment balans	104
7.5	Uitvoeringsprogramma rond baggerwerk	105
	Kwaliteitsborging	106
	Literatuur	107
	Verantwoording	109
Bijlage 1	Natuur Impuls bijeenkomsten	110
Bijlage 2	Resultaten metingen kritische erosiesnelheid sediment Zandkreek (Jaco de Smit – NIOZ)	111
Bijlage 3	Resultaten van scenarioberekeningen	120
Bijlage 4	135	
Bijlage 5	136	

Samenvatting

Ter compensatie van natuurverlies door de bouw van een hoogspanningsverbinding tussen Vlissingen en Rilland wil Natuurmonumenten, in samenwerking met Rijkswaterstaat, onderzoeken of er natuurwinst is te behalen in de Kom van de Oosterschelde door maatregelen uit te voeren die de negatieve effecten van de zandhonger kunnen tegengaan. In dit rapport is een aantal mogelijk kansrijke opties onderzocht die zich richten op het behoud van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Uitgangspunt hierbij was om te onderzoeken of gebruik kan gemaakt worden van het slibrijk sediment dat in de winter van 2020/2021 zal vrijkomen bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden die dienen te worden uitgevoerd aan de vaargeul in de Zandkreek (zo'n 190.000 m³ sediment met een variabel maar hoog tot zeer hoog slibgehalte). Dit opgebaggerd sediment wordt normaliter in diepe putten in de Oosterschelde gedumpt, maar zou mogelijk ook nuttig benut kunnen worden in het systeem, bijv. ten behoeve van natuurbouw ter bestrijding van de negatieve effecten van de zandhonger ('werk met werk'). Doelstellingen van voorliggende studie zijn:

- Het verkennen van de mogelijkheden voor behoud van intergetijdengebieden in de Kom van de Oosterschelde door het (op doellocatie en strategische locatie) suppleren van slibrijk sediment in intergetijdengebieden.
- Het maken van grofstoffelijke ontwerp(en) voor verkennende pilot(s) (max. 2 ontwerpen).
- Het opstellen van een monitoringsplan om kennis op te doen over toepasbaarheid en effectiviteit van dit soort maatregelen.

Uiteindelijk is deze studie in twee fasen uitgevoerd. De eerste fase omhelsde de verkenning van de mogelijkheid tot het benutten van onderhoudsbaggerspecie in de Kom van de Oosterschelde ter versterking van de natuur en het tegengaan van de negatieve effecten van de zandhonger (d.i. erosie van het intergetijdengebied). Dit is gedaan voor twee alternatieve toepassingen (slibmotor en suppletie), toegepast op twee verschillende locaties. Op basis van modelstudies naar de verspreiding van slib en zand en deskundigenoordeel zijn deze alternatieven vergeleken.

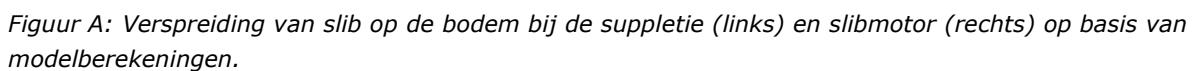
In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit voorkeursalternatief (het definitief suppletie-ontwerp) is tevens een monitoringsplan opgesteld. Als laatste wordt ook ingegaan op de mogelijkheden voor opschaling in de Oosterschelde.

Fase 1

In fase 1 is een quickscan uitgevoerd naar het morfologisch functioneren en de ecologische kenmerken en natuurwaarden van de Kom van de Oosterschelde, met een focus op het Verdrongen land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de slikken nabij de Oesterdam. Tevens zijn kort de gebruiksfuncties in het gebied geschetst.

Een afwegingskader is vervolgens gebruikt om een onderbouwde keuze te maken voor natuurbouw met sediment in de Kom van de Oosterschelde. Hierbij is rekening gehouden met het doel van de ingreep, type maatregel, type sediment dat beschikbaar is, wijze van uitvoering, mogelijke randvoorwaarden en neveneffecten en technische beperkingen. Op basis hiervan is tijdens een deskundigenbijeenkomst een selectie gemaakt van de mogelijke maatregelen binnen het onderzoeksgebied. Het slibrijke karakter van het sediment uit de Zandkreek maakt het geschikt voor toepassing als

Twee typen maatregelen zijn uitgewerkt: 1) een sediment- of slibmotor, 2) een sedimentsuppletie, gebruik makend van (een deel van) het sediment dat beschikbaar komt bij de baggerwerkzaamheden in de Zandkreek. Bij een sedimentmotor wordt het sediment op een strategische locatie gestort (in dit geval in het sublitoraal) vanuit waar de slikken en schorren op een natuurlijke manier worden gevoed. Bij een suppletie wordt het sediment direct op de doellocatie in het litoraal gestort. Van elk type maatregel zijn in eerste instantie twee scenario's onderzocht. Hiervoor zijn met een slibmodel slibberekeningen uitgevoerd naar zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de verspreiding van het slib op de bodem. Op basis van deze eerste berekeningen is tijdens een deskundigenbijeenkomst een selectie gemaakt van twee scenario's die verder zijn uitgewerkt. Dit zijn de oostelijke variant van de slibmotor (slibmotor oost nabij de Oesterdam) en de laaggelegen suppletie (suppletie laag). Voor deze twee scenario's zijn vervolgens weer slibberekeningen uitgevoerd, met variatie in erosiegevoeligheid van het sediment, slibfractie (groter bij de slibmotor dan de suppletie), totaal te storten volume (100.000 m^3 en 190.000 m^3 , dit laatste enkel voor de slibmotor). Deze berekeningen geven inzicht in zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de verspreiding van het slib op de bodem (zie figuur A). Daarnaast zijn ook modelberekeningen uitgevoerd naar het gedrag van de zandfractie.



Wageningen Marine Research rapport C038/20 | 7 van 137

bij de suppletie een groter oppervlakte van het litoraal met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel een dunnere laag. Dit met name door een verschil in de lokale hydrodynamische condities. De bijdrage van de slibfractie aan het ophogen van het litorale habitat is relatief klein, gaande van enkele mm's tot enkele cm's. Enkel lokaal zullen wat dikkere slibpakketten worden afgezet (vooral bij de slibmotor). Éénmalig deze maatregel uitvoeren zal dus niet veel bijdragen aan de lange termijn erosie van dit gebied (zeker met versnelde zeespiegelstijging), maar bij regelmatig herhalen kan de slibfractie wel degelijk bijdragen aan het afremmen van de erosie van dit gebied. Met name in het oostelijk deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, waar nu weinig erosie optreedt, zal de bijdrage naar verwachting het grootst zijn. Hierbij dient benadrukt te worden dat de modelsimulaties een relatief grote onzekerheid kennen en de resultaten dientengevolge met de nodige voorzichtigheid dienen geïnterpreteerd te worden.

In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar op basis van de modelberekeningen. Ondanks dat moet toch ook met deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

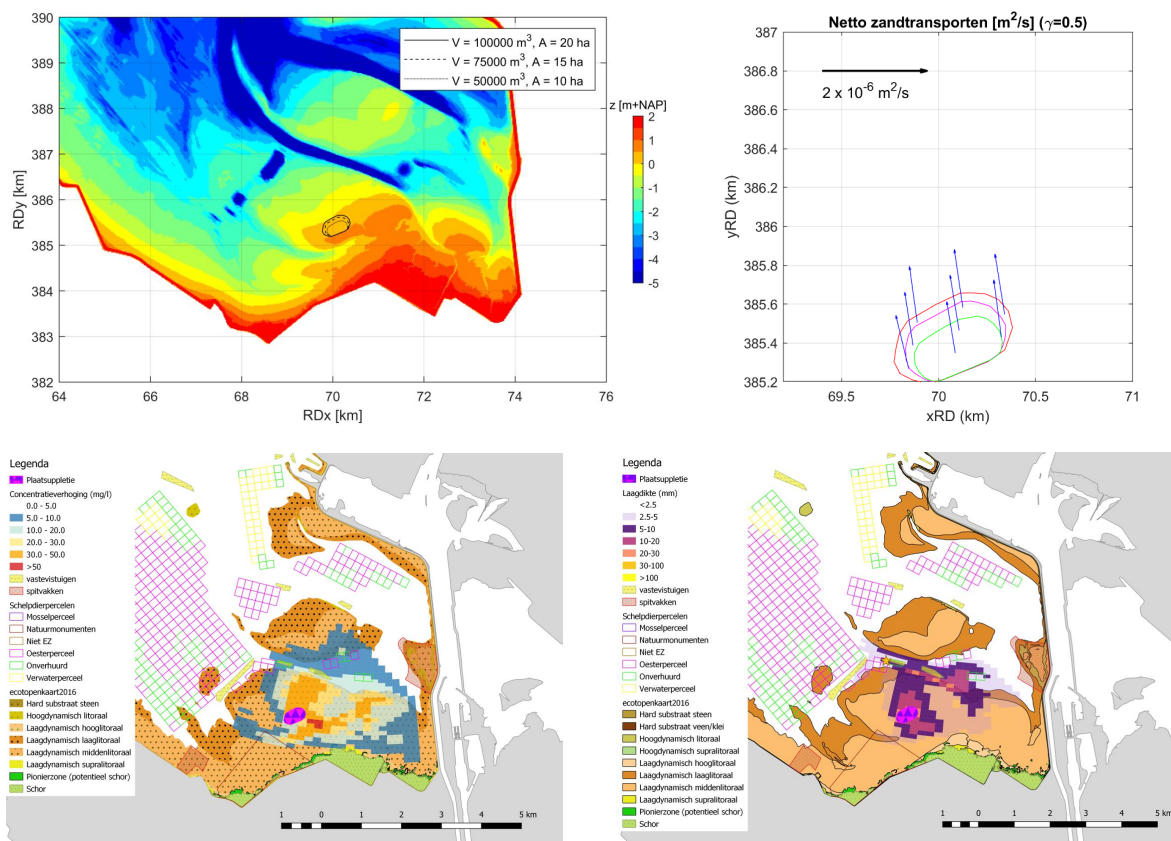
In essentie lijkt dus het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. De kosten die gepaard gaan met de aanleg van een suppletie dan wel slibmotor worden niet in detail behandeld in deze studie.

Het is belangrijk te onderstrepen dat beide maatregelen innovatief zijn, met een groot potentieel voor kennisopbouw, welke in de toekomst ook bruikbaar zal zijn voor beheer in andere estuaria en kustgebieden, zowel in Nederland als wereldwijd. Een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitoringsprogramma.

Fase 2

In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit definitief suppletie-ontwerp is tevens een monitoringsplan opgesteld.

Het definitieve ontwerp kent 3 varianten, namelijk een suppletie van 10, 15 of 20 ha. Voor alle varianten is de dikte van de opgebrachte laag 0.5 m, zodat het gaat om een suppletievolume van respectievelijk 50.000, 75.000 en 100.000 m³ (Figuur B). Voor de modelering is uitgegaan van een slibpercentage van 30% en een kritische schuifspanning voor erosie van 0.2 Pa. Dit geeft een bovengrens voor de verspreidingssnelheid van de slibfractie en een bovengrens voor de extra vertroebeling en snelheid van opslibbing buiten het suppletiegebied. De modelresultaten zijn erg vergelijkbaar met de eerder doorgerekende plaatsuppletievariant, die een paar honderd meter naar het noorden lag (zie fase 1).



Figuur B: Linksboven: Hoogte kaart met positionering van het definitief suppletie-ontwerp in de kom van de Oosterschelde. De drie verschillende contouren geven de ontwerpen weer voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³). Rechtsboven: Berekende netto zandtransporten (zonder slibeffecten) voor het definitief suppletie-ontwerp op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013. Linksonder: Berekende verhoging van de weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom in week 13 (op het einde van de simulatieperiode). Het gedeelte binnen de 'blauwe ring' geeft de concentratieverhoging aan. Rechtsonder: Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken).

Het definitief suppletie-ontwerp resulteert in een suppletie waarvan de zandfractie (70% van het volume) meerdere jaren een bijdrage zal leveren aan het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De zandfractie zal zich langzaam verspreiden in voornamelijk NNO richting (Figuur B). Van de slibfractie (30% van het volume) zal zo'n 70% uitgespoeld zijn drie maanden na aanleg. Hierbij dient in acht genomen te worden dat het slibmodel gedraaid is met een lage kritische schuifspanning voor het slib. Zo'n 55% van dit slib komt in het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland terecht en zal zich over een groot gebied verspreiden (Figuur B). Concentratieverhoging van het slib in de waterkolom zal tijdelijk optreden, vooral ter hoogte van de suppletie zelf, maar uitdijend tot in de Mosselkreek (Figuur B). Ter hoogte van de oesterpercelen in de Mosselkreek zal de concentratieverhoging beperkt blijven en naar alle waarschijnlijkheid niet tot sterfte leiden van oesters. De slibafzetting op oesterpercelen lijkt nauwelijks significant.

De suppletie kan daarmee als een nuttige en zinvolle maatregel gezien worden om de effecten van de zandhonger in de Oosterschelde tegen te gaan, en zal meer bepaald bijdragen aan het behoud van het foerageerhabitat voor steltlopers ter hoogte van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Uiteraard is er de verstoring van de aanleg, en zal tijdelijk het bodemleven ter hoogte van de suppletie en in een beperkte omgeving daarrond afsterven. Lokaal kan door grote slibafzetting ook verstikking van bepaalde

biota optreden (bijv. schelpdieren). Net als bij eerdere suppleties is de verwachting dat de rekolonisatie van het bodemleven relatief snel zal verlopen. In hoeverre de samenstelling van de bodemdiergemeenschap anders zal zijn, omwille van het meer slibrijke sediment, is moeilijk te voorspellen. Aanvullend worden een aantal aanbevelingen gemaakt ten aanzien van de aanleg van het definitieve suppletieontwerp.

Voor het definitief suppletie-ontwerp is vervolgens een monitoringsplan opgesteld. Het doel van de monitoring van de Natuur Impuls suppletie is om antwoord te kunnen geven op de vraag of, middels een suppletie van slibrijk baggerspecie het intergetijdengebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland behouden kan blijven en de foerageerfunctie voor steltlopers gewaarborgd. Daarnaast moet de monitoring en het onderzoek ook meer generieke kennis ontwikkelen voor suppleren met slibrijk sediment in intergetijdengebieden. Optimalisatie en validatie van de hydromorfologische modellen vormen een wezenlijk onderdeel van het plan. De monitoring omvat hydro-morfologische metingen, onderzoek naar sedimenteigenschappen, onderzoek naar het bodemleven en het herstel van bodemdieren op de suppletie, en onderzoek naar het gebruik van de suppletie door foeragerende steltlopers.

Tot slot gaan we kort in op de mogelijkheden voor opschaling. In dit hoofdstuk verkennen we alvast de mogelijkheden om het project *Natuur Impuls* in de Oosterschelde op te schalen en werk-met-werk te maken.

Opbouw rapport

Het onderzoek is in twee fasen verlopen en het rapport is derhalve ook opgebouwd uit twee delen, fase 1 en fase 2.

Fase 1

Het morfologische functioneren en de ecologische karakteristieken van de Kom staan beschreven in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 wordt het afwegingskader gepresenteerd. In Hoofdstuk 4 worden de randvoorwaarden voor suppleren met slibrijk materiaal uitgewerkt en vier alternatieve suppleties gepresenteerd. Hoofdstuk 5 toont de sedimentverspreiding per suppletie alternatief op basis van slibpluimberekeningen. In Hoofdstuk 6 worden de hydro-morfologische, ecologische en uitvoeringstechnische aspecten van de suppletieontwerpen besproken en wordt op basis hiervan een keuze gemaakt. Hoofdstuk 7 bediscussieert suppleren met slibrijk sediment in de kom en Hoofdstuk 8 presenteert conclusies en enkele aanbevelingen van de eerste fase.

Fase 2

In een tweede fase is het voorkeursalternatief, namelijk een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, geoptimaliseerd qua ligging en zijn drie verschillende suppletievolumes gemodelleerd. Voor dit definitief suppletie-ontwerp is tevens een monitoringsplan opgesteld. Hoofdstuk 2 geeft de kenmerken van het definitief suppletie-ontwerp weer, waarna in Hoofdstuk 3 de modelresultaten van de slibverspreiding en het zandtransport worden getoond. Hoofdstuk 4 presenteert de conclusie en Hoofdstuk 5 geeft een aanbeveling t.b.v. de aanleg. Hoofdstuk 6 bevat het monitoringsplan om de suppletie te monitoren en te evalueren. Tot slot gaan we kort in op de mogelijkheden voor opschaling in de hele Oosterschelde.

Verantwoording

Fase 1 - Hoofdstukken 1, 2, 3, 4, 7 en 8 zijn geschreven door Wageningen Marine Research. Deltares heeft in opdracht van Rijkswaterstaat de modelstudie uitgevoerd. De resultaten zijn in de vorm van een bijdrage aan deze rapportage toegevoegd. De hoofdstukken 5 en 6 zijn geschreven door Deltares, alsook paragrafen 2.2, 4.4. en bijlage 3 betreffen de resultaten van de scenarioberekeningen die zijn uitgevoerd door Deltares. Wageningen Marine Research, Deltares, NIOZ en HZ hebben deelgenomen aan de deskundigenbijeenkomsten en alle hoofdstukken nagelezen en van commentaar voorzien. NIOZ heeft bijkomende proeven gedaan naar de erosiegevoeligheid van slibrijke sedimenten (zie Bijlage 2). De Deltares bijdrage is gereviewd door Prof. Zheng Bing Wang.

Fase 2 – Alle hoofdstukken zijn geschreven door Wageningen Marine Research en Deltares. Deltares heeft de sediment modellering uitgevoerd. Wageningen Marine Research, Deltares, NIOZ en HZ hebben deelgenomen aan de deskundigenbijeenkomst en alle hoofdstukken nagelezen en van commentaar voorzien. Het hoofdstuk over de opschaling is door Joost Stronkhorst, in samenwerking met RWS collega's, opgesteld.

Fase 1: Verkenkende studie

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de Oosterschelde neemt het oppervlakte van rust- en foerageergebied voor vogels af als gevolg van de zandhonger. De Oosterschelde, als onderdeel van de Zuidwestelijke Delta, is een belangrijk gebied voor (trek)vogels en aangewezen als Natura 2000-gebied. De zandhonger heeft negatieve gevolgen voor de natuurlijke kwaliteit van het gebied en meer bepaald meerdere Natura 2000-instandhoudingsdoelen. Het intergetijdengebied wordt kleiner en komt steeds lager te liggen waardoor de tijd dat ze bereikbaar zijn voor vogels afneemt. De voedselbeschikbaarheid voor steltlopers en andere watervogels wordt hierdoor verminderd wat in de toekomst kan leiden tot een afname in het voorkomen van deze soorten. Zandplaten, slikken en schorren zorgen tevens voor een natuurlijk damping tegen golven. Dijken met een aanzienlijk voorland worden minder belast. Door de verlaging van het voorland, veroorzaakt door de zandhonger in de Oosterschelde, wordt de levensduur van dijken verkort. Naast de gevolgen voor natuur en veiligheid, heeft de zandhonger ook een negatieve invloed op de landschappelijke waarden en sociaaleconomische belangen in het gebied. De zandhonger, in combinatie met zeespiegelstijging, zal op de langere termijn leiden tot een Oosterschelde met nauwelijks nog droogvallende platen, slikken en schorren.

1.2 Totstandkoming van deze studie: Natuur Impuls Oosterschelde

Natuurmonumenten streeft naar behoud, en waar mogelijk versterking, van de foerageer functie van de Oosterschelde voor steltlopers en andere soorten watervogels. Middels middelen beschikbaar gesteld door TenneT vanuit een compensatiemaatregel naar aanleiding van de bouw van een hoogspanningsverbinding tussen Vlissingen en Rilland wil Natuurmonumenten, in samenwerking met Rijkswaterstaat, onderzoeken of maatregelen mogelijk zijn in de Kom van de Oosterschelde die de negatieve effecten van de zandhonger kunnen tegengaan. Tijdens een aantal werksessies met Natuurmonumenten, Rijkswaterstaat, Wageningen Marine Research en NIOZ is gebrainstormd over de beste benutting van deze middelen, inclusief mogelijke meekoppelkansen. Op basis hiervan is een aantal mogelijke kansrijke opties geselecteerd, vooral gericht op het behoud van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Deze opties worden nader uitgewerkt in onderliggende studie.

Daarbij wordt uitdrukkelijk gekeken naar meekoppelkansen met reeds geplande ingrepen in het systeem. In de Oosterschelde dienen op regelmatige tijdstippen baggerwerkzaamheden uitgevoerd te worden t.b.v. het op diepte houden van havens en havengeulen en het op diepte houden van vaargeulen, bijv. ter hoogte van sluizen. Zo moet in de winter van 2020/2021 bij de Zandkreek zo'n 190.000 m³ gebaggerd worden om de dichtgeslibde vaargeul terug op diepte te brengen. Dit opgebaggerd sediment wordt normaliter in diepe putten in de Oosterschelde gedumpt, maar zou mogelijk ook

nuttig kunnen worden gebruikt in het systeem, bijv. ter bestrijding van de negatieve effecten van de zandhonger ('werk met werk'). Dit vraagt een omslag in denken, en vergt studie naar de korte en lange termijn effecten van zulke toepassingen. Uitgangspunt moet zijn dat het gebaggerde sediment in het systeem blijft en toegepast wordt voor het versterken van natuur en veiligheid. Enkel als dit niet gewaarborgd kan worden, kunnen andere oplossingen benut worden, bijv. het storten in diepe putten. Dan blijft het sediment weliswaar ook in het systeem maar zonder echte toegevoegde waarde. Dit uitgangspunt is door Rijkswaterstaat en Natuurmonumenten omarmd en er is overeengekomen om te onderzoeken hoe sediment dat vrijkomt bij allerlei onderhoudsbaggerwerkzaamheden van de Zandkreek optimaal ingezet kan worden voor natuurbehoud en -winst (*beneficial use of dredged sediments*). Meer specifiek wordt in deze studie onderzocht of het sediment dat in de Zandkreek vrijkomt mogelijk gebruikt kan worden voor verbetering van de natuurfuncties in de Kom van de Oosterschelde. Het gaat hierbij om een proef, waarvan geleerd kan worden. Indien succesvol, kan deze kennis benut worden voor opschaling dan wel frequenter herhalen van de ingreep.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project is onderzoek doen naar toepassingsmogelijkheden van (slibrijk) sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden t.b.v. natuurbouw in de Oosterschelde, waarmee een bijdrage geleverd kan worden aan het behoud dan wel versterking van het intergetijdengebied als foerageergebied voor steltlopers. Concreet gaat het hierbij om het benutten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden bij de Zandkreek in het kader van de Natuur Impuls Oosterschelde. Het onderzoek betreft een haalbaarheidstudie (variantenstudie), op basis van deskundigenoordeel en sedimentmodellering, waarbij gezocht wordt naar toepassingsmogelijkheden in de Kom van de Oosterschelde. De doelstellingen van dit project kunnen als volgt gedefinieerd worden:

- Het verkennen van de mogelijkheden voor behoud van intergetijdengebieden in de Kom van de Oosterschelde door het (op doellocatie en strategische locatie) suppleren van slibrijk sediment op intergetijdengebieden.
- Het maken van grofstoffelijke ontwerp(en) voor verkennende pilot(s) (max. 2 ontwerpen).
- Het opstellen van een monitoringsplan om inzicht te krijgen in de functionaliteit (morfologisch, ecologisch) van de voorgestelde sediment maatregelen en daarmee genereren van kennis over toepasbaarheid en effectiviteit van dit soort maatregelen.

Natuurmonumenten heeft als doel het behouden, en waar mogelijk versterken, van de foerageer functie van de Oosterschelde voor steltlopers en andere soorten watervogels. Om te bepalen of dit doel behaald wordt middels suppleren in de Kom van de Oosterschelde zijn de volgende vragen gedefinieerd:

- Hoofdvraag: Draagt storten/suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie of strategische locatie bij tot behoud of mogelijks versterking van het foerageerareaal in de Kom van de Oosterschelde (en daarmee aan Natura 2000-instandhoudingsdoelstellingen)? Deze beoordeling is gebaseerd op hoogte veranderingen, effecten op erosie en veranderingen van het 40-80% droogvallende areaal op korte en lange termijn na suppleren. Daarnaast wordt gekeken naar veranderingen in sedimentsamenstelling en voedselaanbod voor steltlopers.
- Nevenvraag: Draagt suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie of strategische locatie bij aan behoud van bestaande schorren?
- Nevenvraag: Is het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor natuurbouw en kustveiligheid een

duurzame en kostenefficiënte maatregel? Hier spelen zaken zoals verspreiding en verblijftijd van het sediment in het litorale habitat, maar ook mogelijke neveneffecten en kosten-baten i.v.m. uitvoering en aanleg.

1.4 Methodologie

De aanpak van de ontwerpstudie bestaat uit de volgende onderdelen:

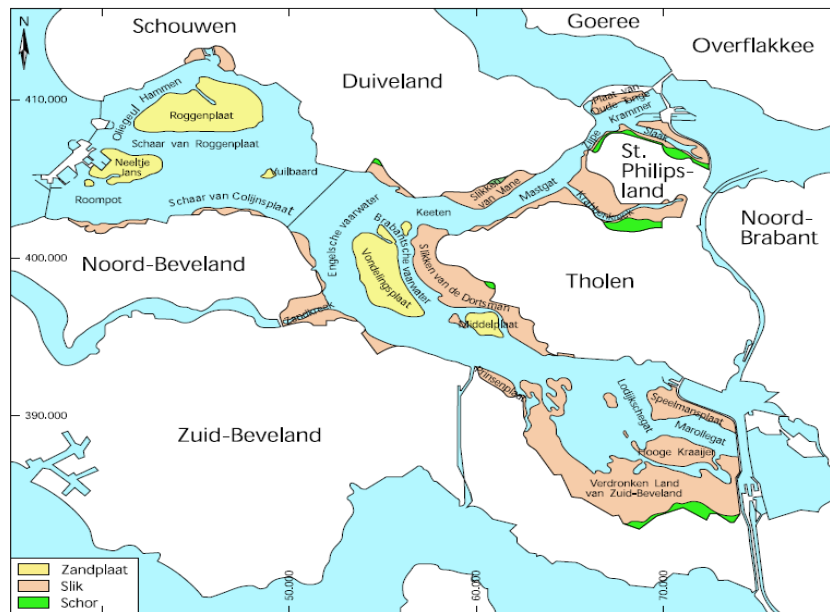
1. De beschikbare kennis, data en modellen van de Kom worden op hoofdlijnen geïnventariseerd en verzameld. Deze worden gebruikt voor een beschrijving van het morfologische en ecologische functioneren van de Kom van de Oosterschelde.
2. Op basis van een deskundigenoordeel, waarbij rekening gehouden wordt met ecologische, hydro-morfologische, economische (i.e. andere gebruiksfuncties) en uitvoeringstechnische aspecten, wordt een geschiktheidskaart gemaakt die aangeeft welke gebieden in de Kom geschikt zijn voor natuurbouw met sediment.
3. Uit de doelstellingen van Natuurmonumenten en de beschikbare kennis wordt een afwegingskader afgeleid om een objectieve en onderbouwde keuze mogelijk te maken voor suppletiealternatieven.
4. Voor vier suppletiealternatieven worden vervolgens berekeningen uitgevoerd van de slibverspreiding (zowel de invloed op de slibconcentratie in de waterkolom als de opslibbing van de bodem).
5. De verschillende suppletiealternatieven worden gewogen met behulp van het afwegingskader. Het toetsen aan de criteria gebeurt op basis van systeemkennis, modelresultaten en deskundigenoordeel. De twee best scorende suppletiealternatieven worden nader onderzocht.
6. De overgebleven twee suppletiealternatieven zijn nader onderzocht en getoetst aan uitvoeringstechnische aspecten en te behalen (natuur)rendement.
7. Tot slot neemt Natuurmonumenten in samenspraak met RWS, en met advies van de opdrachtnemers, een beslissing over het voorkeursalternatief waarvoor vervolgens een monitoringsplan wordt opgesteld.

Tijdens fase 1 zijn drie workshops en deskundigenbijeenkomsten georganiseerd, en zijn de eerste resultaten toegelicht tijdens een stakeholdersbijeenkomst. Zie Bijlage 1 voor een overzicht van deze bijeenkomsten.

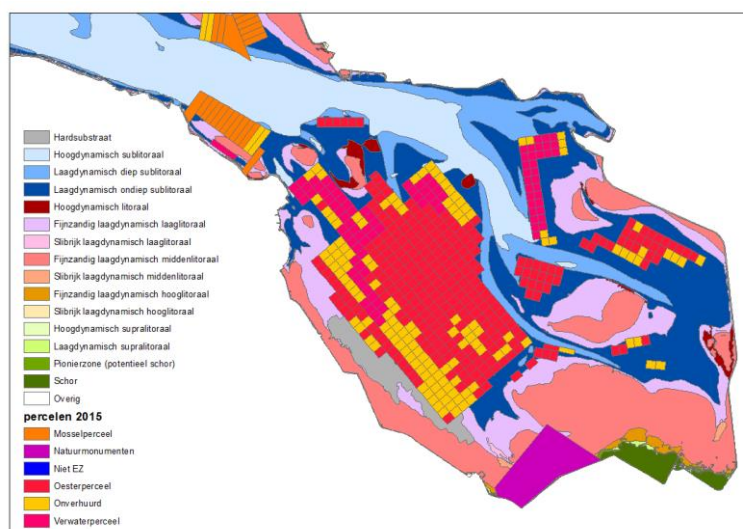
2 Studiegebied

2.1 Kom van de Oosterschelde

Het zoekgebied waar Natuur Impuls Oosterschelde zich op richt is het oostelijke deel, de Kom van de Oosterschelde. In de Kom van de Oosterschelde bevindt zich een aantal grote intergetijdengebieden waaronder Verdronken Land van Zuid-Beveland, Hooge Kraaijer, en Speelmansplaat (Figuur 1 en Figuur 2). Middels een quickscan worden de morfologische en ecologische kenmerken en trends van de Kom van de Oosterschelde beschreven, met een focus op het Verdronken land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de slikken nabij de Oesterdam.



Figuur 1. De Oosterschelde met situering van de kom.

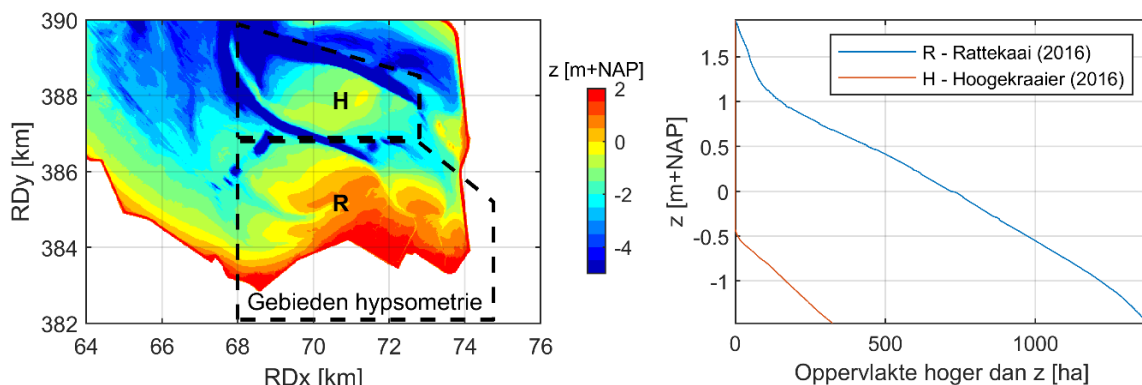


Figuur 2. Ecotopenkaart van de Kom van de Oosterschelde met aanduiding van de locatie van de schelpdierpercelen.

2.2 Morfologie

In de Kom van de Oosterschelde is het gemiddeld laagwater NAP -1,47m en gemiddeld hoogwater NAP +1,91m. De stroomsnelheden onder invloed van het getij zijn hier beperkt, mede door de aanwezigheid van de Oesterdam die het getijdeprisma beperkt. De stroomsnelheden in de geulen in het zoekgebied hebben een grootte tot $\sim 0,3 \text{ m s}^{-1}$ (De Vet et al., 2017). In de intergetijdengebieden zijn de snelheden nog lager. Door de beperkte stroomsnelheden zal wind de stroming op de intergetijdengebieden in de Kom substantieel versterken, zoals eerder al gedemonstreerd voor de Roggenplaat (De Vet et al., 2018).

Voor twee grote intergetijdengebieden (R: Rattekaai, onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland en H: Hooge Kraaijer) is gekeken naar de hoogteligging van het gebied middels hypsometrische curves (Figuur 3). Een hypsometrische curve geeft aan hoeveel oppervlakte er van een bepaalde hoogteklasse beschikbaar is. De hypsometrische curves duiden een duidelijk verschil tussen beide gebieden: daar waar de oppervlakten van Rattekaai onder NAP +1m relatief uniform verdeeld zijn over de hoogteklassen (relatief rechte lijn van de hypsometrische curve), is het areaal van Hooge Kraaijer slechts beperkt tot hoogteklassen onder NAP -0,5m. Hooge Kraaijer ligt dus veel lager dan Rattekaai, zoals ook zichtbaar is in de overzichtskaart van Figuur 3.



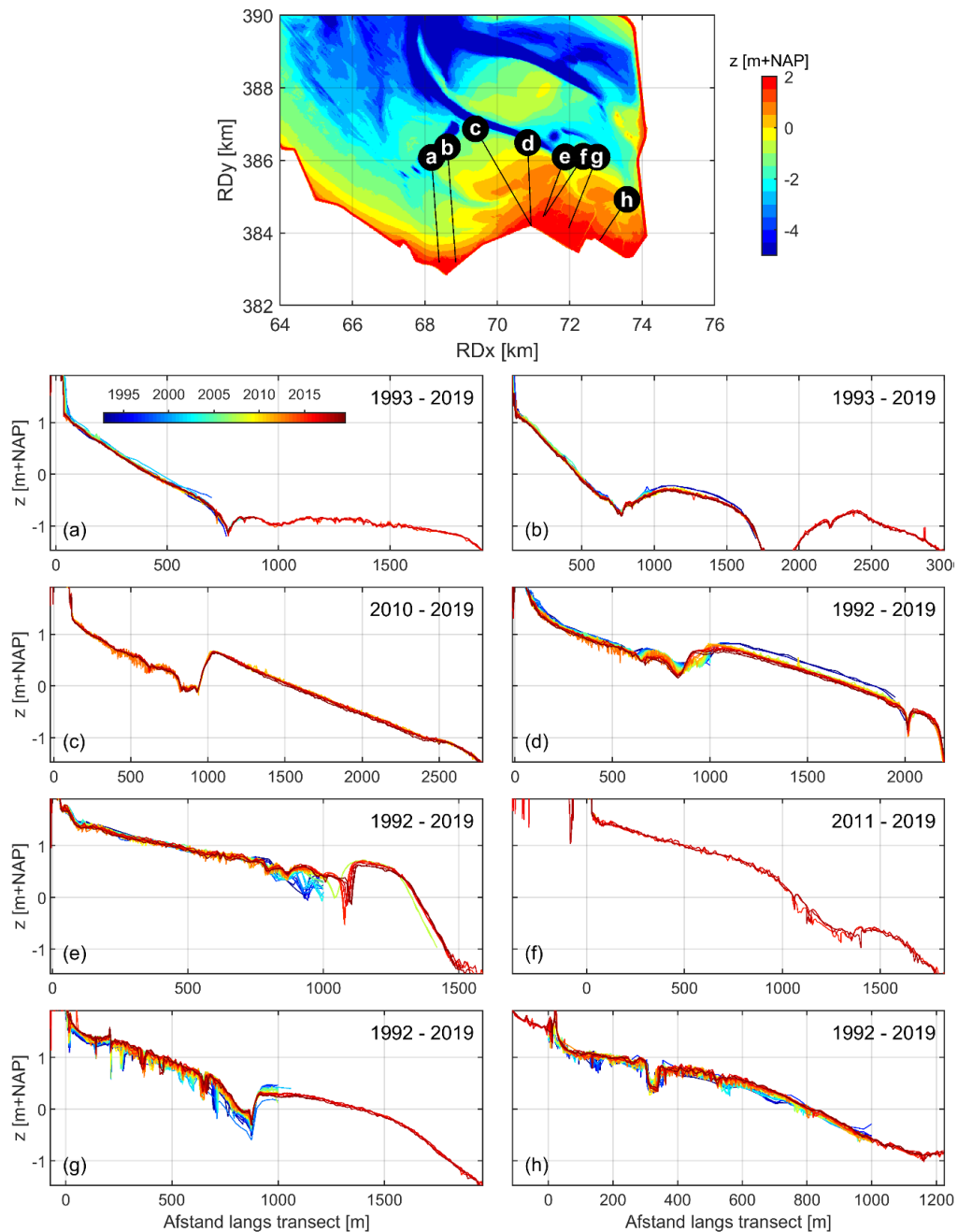
Figuur 3. Hypsometrische curves Rattekaai en Hooge Kraaijer. Links: overzichtskaart met de ligging van de intergetijdengebieden Rattekaai, onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (R) en Hooge Kraaijer (H). De achtergrond toont de vaklodings dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Hierin zijn ook de gebieden weergegeven waarvoor de hypsometrische curves zijn bepaald (R refereert naar Rattekaai, H naar Hooge Kraaijer). Rechts: hypsometrische curves voor beide intergetijdengebieden met de 2016 bodem. De hypsometrische curves zijn alleen bepaald voor delen van het intergetijdengebied die boven gemiddeld laagwater (NAP -1.47m) en onder gemiddeld hoogwater (NAP +1.91m) liggen.

In De Vet et al. (2017) is de ontwikkeling van de Hooge Kraaijer geanalyseerd. Hierin wordt getoond dat dit intergetijdengebied een behoorlijke erosie heeft ondergaan na voltooiing van de Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen eind jaren 80 van de vorige eeuw: een afname in de gemiddelde hoogte van ongeveer 20 cm, in oppervlakte van 30% en in sedimentvolume van 50% (tot 2013).

De morfologische ontwikkeling van het intergetijdengebied van Rattekaai is nader onderzocht middels analyse van de door Rijkswaterstaat gemeten bodemhoogte (RTK-dGPS) raaien. Het voordeel van RTK-dGPS raaien is dat deze een grotere nauwkeurigheid hebben ($\sigma \approx 3 \text{ cm}$) dan andere datasets zoals LiDAR ($\sigma \approx 15 \text{ cm}$). Door de ruime beschikbaarheid van deze raaien op Rattekaai ($n=8$, Figuur 4), kan een relatief compleet beeld van de ontwikkeling van de Rattekaai worden bepaald. Twee korte raaien (enkele honderden meters lang) zijn buiten beschouwing gelaten. De meeste raaien zijn sinds 1992/1993 bemeten, Raai C en Raai F waren pas respectievelijk in 2010 en 2011 geïntroduceerd. Het meetinterval was ongeveer een jaar. De raaien zijn niet in elk jaar

geheel gemeten, de delen die in Raai A, Raai B en Raai G het verst van de dijk af liggen zijn pas in de laatste jaren gemeten.

Voor de vier westelijke raaien (Figuur 4) heeft er erosie plaatsgevonden (voor Raai C is dit minder duidelijk door de kortere periode waarover gemeten is). Dit is in lijn met de algemene ontwikkeling van de intergetijdengebieden in de Oosterschelde gerelateerd aan de zandhonger: erosie sinds de aanleg van de Oosterscheldekering (1986). Tijdsgemiddelde erosiesnelheden tot ongeveer 1 cm per jaar zijn waargenomen. Het lijkt dat de erosiesnelheden in recente jaren wat minder waren. Daarentegen is de bodem relatief stabiel of zelfs aangroeiend voor de vier oostelijke raaien (Figuur 4). Vooral in Raai G is de aangroei duidelijk zichtbaar, lokaal met gemiddeld meer dan 1 cm per jaar. Op basis van de huidige data is het moeilijk te zeggen waardoor het verschil in erosie in het westen en sedimentatie in het oosten veroorzaakt wordt.



Figuur 4. RTK-dGPS raaien op het Rattekaai (onderdeel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland) intergetijdengebied. Boven: overzichtskaart met de ligging van de raaien. De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Onder: de acht relevante raaien zijn in a–h weergegeven. Raaien C en F worden pas sinds 2010/2011 gemeten (zie getallen rechtsboven in de deelfiguren). Bij Raaien A, B en G ontbreekt oude data voor het gedeelte het verste van de dijk (rechter stuk van de profielen).

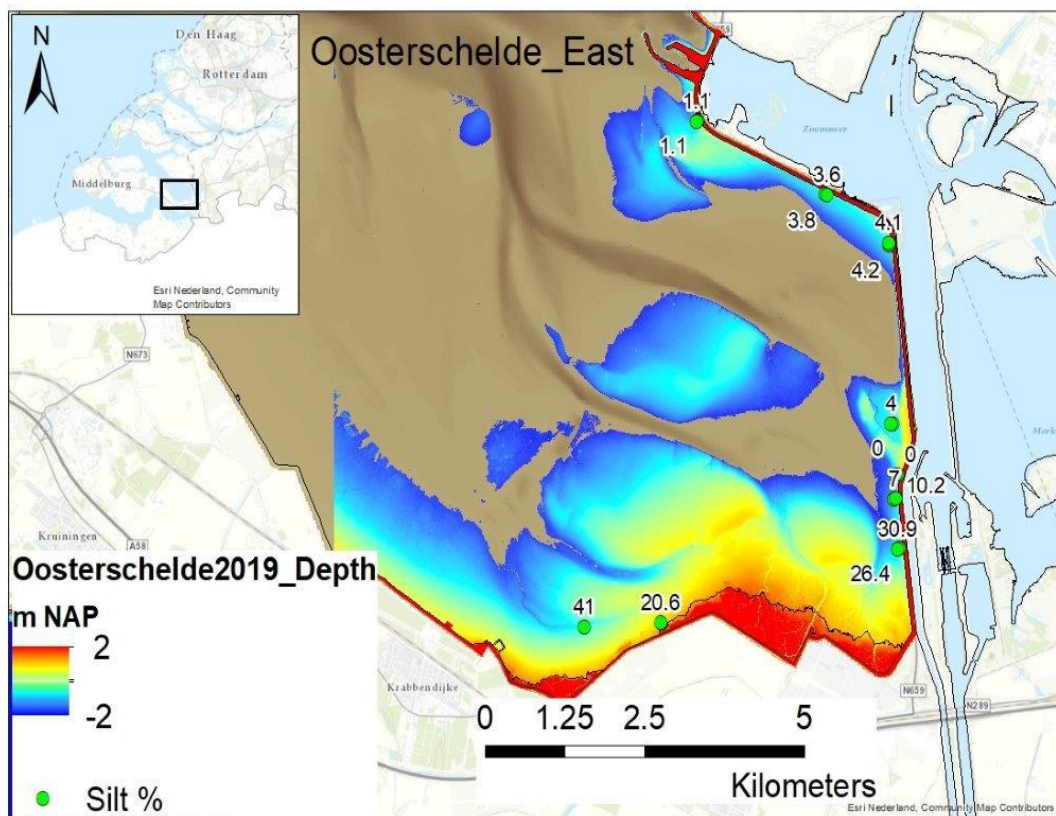
Analyse van de morfologische ontwikkeling voor de vier grote deelgebieden binnen de Oosterschelde, (west, midden, noordoost (d.i. noordelijk tak) en oost (d.i. kom)) uitgevoerd binnen de ANT studie (Troost en Ysebaert, 2011; de Ronde et al. 2013), laat zien dat de verdeling van arealen over de gehele droogvalduur gradiënt (dus alle bodemhoogteklassen) verschilt tussen de deelgebieden. Het grootste deel van de intergetijdengebieden in de kom bevindt zich lager dan 40% droogvalduur, terwijl de intergetijdengebieden in het noordoostelijke compartiment voor een groot deel langer dan 40% van de tijd droogvallen (Figuur 5). In de kom is het areaal 40-60% droogvalduur in de jaren afgenomen terwijl het areaal 0-40% droogvalduur is toegenomen.

Figuur 5 uit de Ronde et al. (2013) toont voor de vier deelgebieden van de Oosterschelde de voorspelde ontwikkeling in areaal van de verschillende droogvalduurklassen tot 2100 bij een zeespiegelstijging van 60cm. Verwacht wordt dat door de combinatie van zandhonger en zeespiegelstijging het totale areaal intergetijdengebieden het meest zal afnemen in het oostelijke deelgebied (de Kom) (40%) binnen de komende 50 jaar. De deelgebieden West en Noord nemen het minste af met ongeveer 25%. De lagere gebieden (<40% droogvalduur) nemen eveneens het meeste af in de Kom. Hoogste afname in de hogere gebieden zal plaatsvinden in het westen en na verwachting zal het areaal 60-100% droogvalduur in 2060 nagenoeg verdwenen zijn in dit deelgebied. Het areaal 40-80% droogvalduur is voor vogels het meest belangrijk (de Ronde et al. 2013). De achteruitgang van dit gebied is het grootst in het westelijke deelgebied (80%) en het minst in het oostelijke en noordoostelijke deelgebied (40%). In het midden neemt dit areaal af met 65%.

Figuur 5. Verloop in de tijd voor de vier deelgebieden van de arealen per droogvalduurklasse voor het scenario met gemiddelde zeespiegelstijging (60cm tot 2100) (de Ronde et al., 2013).

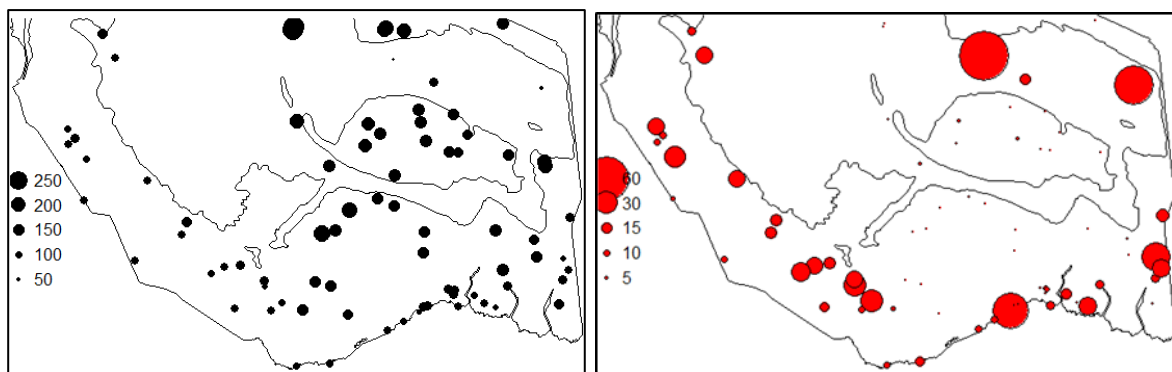
2.3 Sedimentsamenstelling

NIOZ heeft een aantal experimenten uitgevoerd in de Kom van de Oosterschelde waarbij ook gekeken is naar de sedimentsamenstelling. Figuur 6 geeft het slibgehalte (fractie <63µm) weer op een aantal locaties in de kom. Bij de Speelmansplaat en de Oesterdam suppletie zijn de slibgehalten laag (<5%). Het slibgehalte neemt langs de Oesterdam in zuidelijke richting toe, met max. 30.9% slib. Ook langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komen relatief hoge slibconcentraties voor.



Figuur 6. Slib concentraties (% <63 μm) op een aantal meetpunten in de Kom van de Oosterschelde. Bron: Jeroen van Dalen, NIOZ.

Dit is ook terug te zien in de sedimentmetingen die zijn verricht binnen de MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014 (Figuur 7). Langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komen relatief hoge slib concentraties voor terwijl er nauwelijks slib aanwezig is op de Hooge kraaijer. Daarmee is de Kom van de Oosterschelde één van de meest van nature slibrijke gebieden van de Oosterschelde, naast beschutte gebieden zoals de Zandkreek.

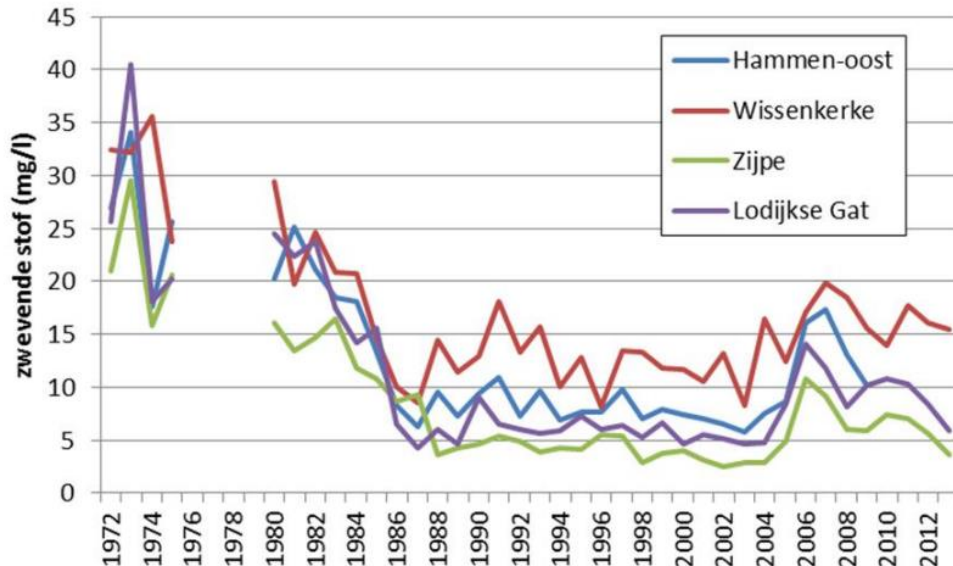


Figuur 7. D50 (links, in μm) en slib concentraties (rechts, % <63 μm) op een aantal meetpunten in de Kom van de Oosterschelde. Bron: MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014.

2.4 Zwevend stofconcentratie

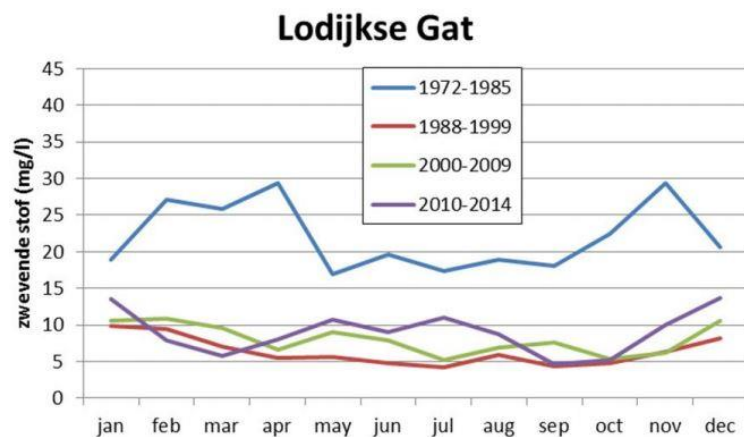
In dit rapport worden de effecten van de sediment maatregelen ook getoetst op doorwerking naar zwevende stofconcentraties. Deze resultaten worden gepresenteerd relatief t.o.v. een referentiesituatie. Om deze veranderingen te kunnen duiden en interpreteren is het goed om inzicht te hebben in de referentiesituatie voor de slibconcentratie in de waterkolom.

De Oosterschelde is voor Nederlandse begrippen een zeer helder watersysteem. Na de bouw van de stormvloedkering in 1987 is de gemiddelde zwevend stofconcentratie sterk afgenomen door de verminderde getijbeweging (Figuur 8). Voor de sluiting lag de jaargemiddelde concentratie in het westen en het oosten rond de 35 mg l⁻¹ en in het noorden rond de 30 mg l⁻¹. Na de sluiting is dit gemiddeld afgenomen tot rond de 15 mg l⁻¹ in het westelijk deel en rond de 10 mg l⁻¹ in het oostelijk deel (waar deze studie zich op concentreert). De noordelijke tak (gegevens van Zijpe) heeft nóg lagere concentraties (De Vries, 2014).



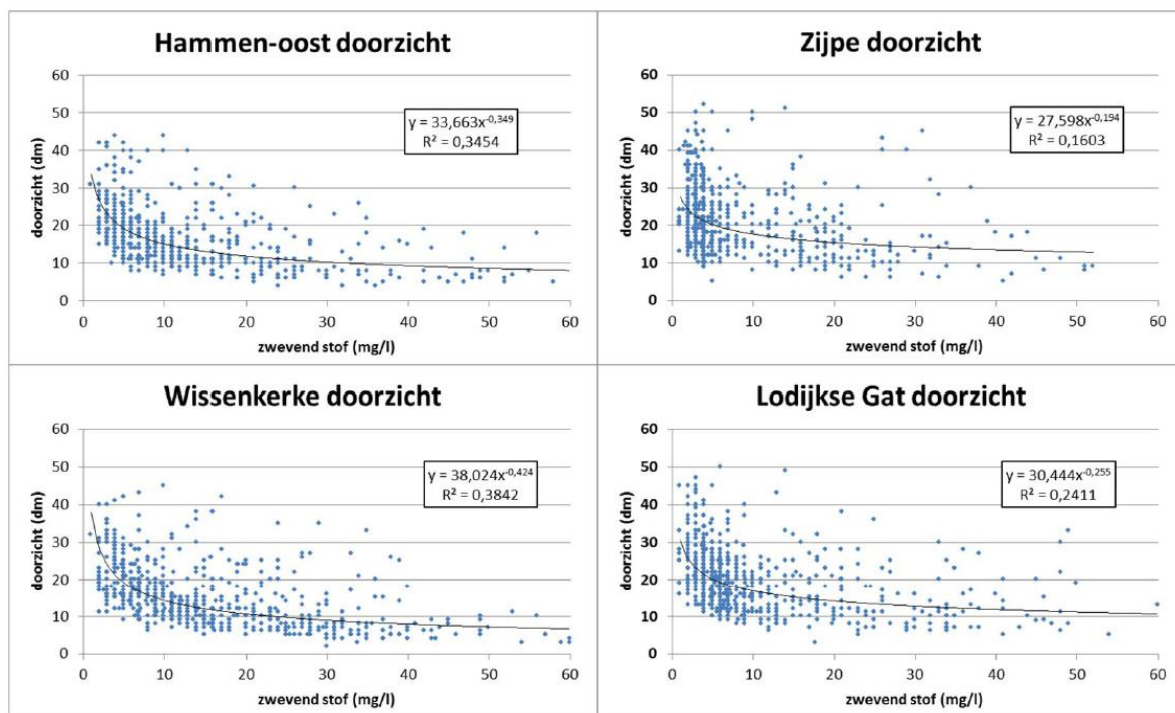
Figuur 8. Jaargemiddelde zwevende stofconcentraties op verschillende locaties in de Oosterschelde. De locatie Lodijkse Gat licht in de KOM van de Oosterschelde. Voor een overzicht van de locaties van deze meetpunten zie Figuur 11 (De Vries, 2014).

De slibconcentratie in het water varieert per seizoen, onder invloed van golfwerking en biologische terugkoppelingen. In het oostelijke deel (meetpunt Lodijkse Gat) varieert de slibconcentratie in de winter tussen de 10 en 15 mg l⁻¹ (Figuur 9). Deze metingen zijn laagfrequent. Op korte tijdschaal kan de slibconcentratie sterk variëren door resuspensie als gevolg van golfwerking. Deze variaties zijn niet zichtbaar in Figuur 9.

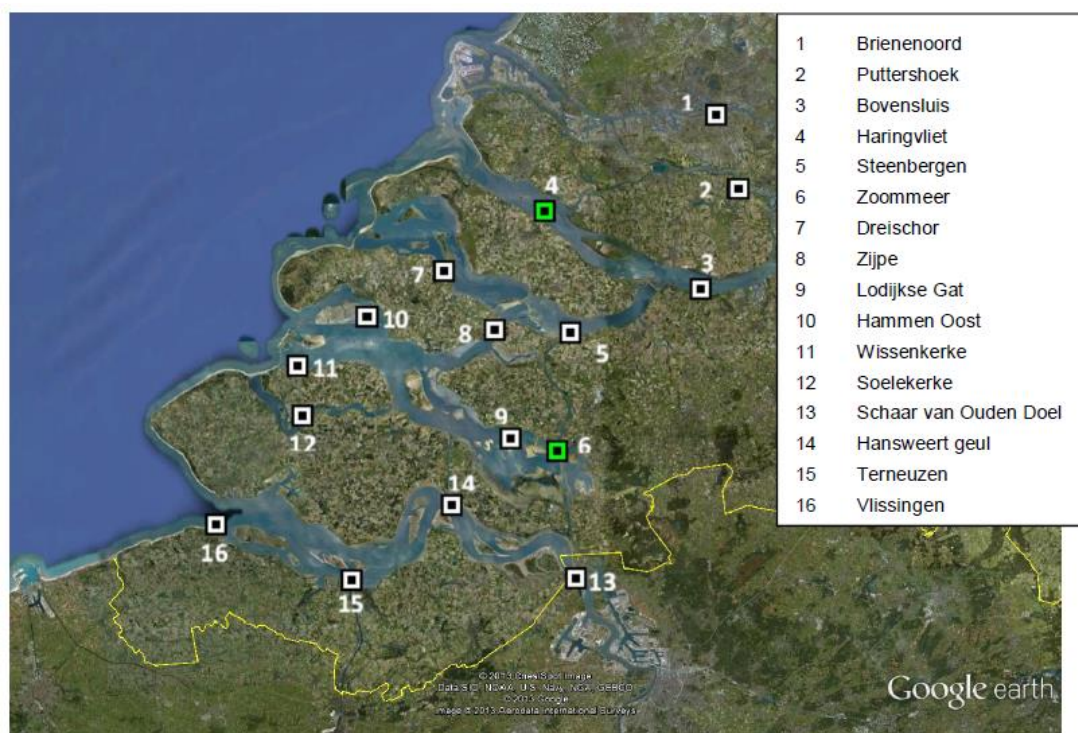


Figuur 9. Gemiddelde slibconcentraties in het oostelijke deel van de Oosterschelde per maand (De Vries, 2014).

Het effect van verhogen van de slibconcentratie op doorzicht is sterk afhankelijk van de referentiesituatie. In zeer helder water is het effect veel sterker dan in troebel water (Figuur 10). De locaties van de MWTL meetpunten zijn te vinden in Figuur 11.



Figuur 10. Relatie tussen doorzicht en zwevend stofconcentratie op vier MWTL locaties in de Oosterschelde (De Vries, 2014). Zie figuur 11 voor de locaties.



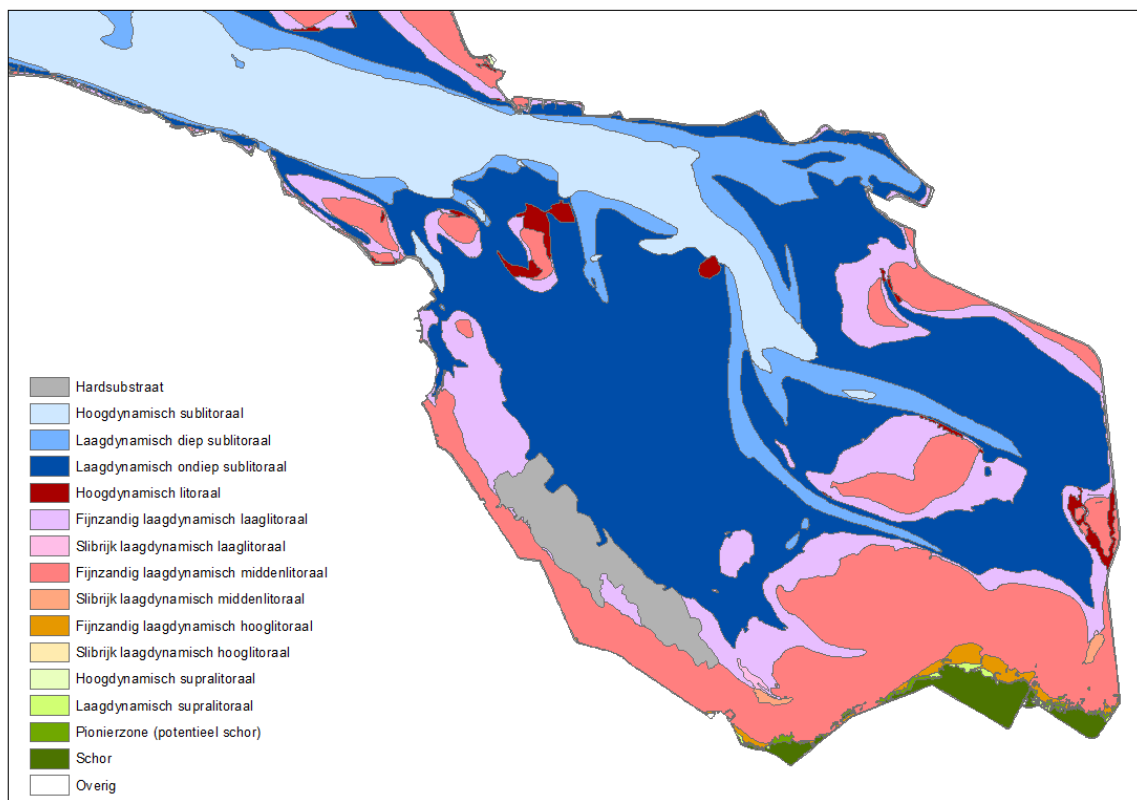
Figuur 11. Locaties van de MWTL meetpunten waarnaar gerefereerd wordt door De Vries (2014). Punten 8-11 zijn relevant voor deze studie.

Dit houdt in dat eventuele effecten van slibverspreiding in het oostelijk deel van de Oosterschelde eerder merkbaar zullen zijn op doorzicht dan in het westen. Daarnaast zal ook een keuze om alleen in de winterperiode te suppleren minder effecten geven op natuur- en gebruiksfuncties, hoewel dit per locatie dient geëvalueerd te worden. Zo zijn eventuele doorvertalingseffecten op primaire productie (algengroei) in de winter minimaal.

2.5 Ecologie

2.5.1 Ecotopen

De ecotopenkaart van 2016 laat zien dat de Kom van de Oosterschelde grotendeels uit laagdynamisch gebied bestaat, zowel litoraal als sublitoraal (Figuur 12). In het litorale overheerst het ecotoop fijnzandig laagdynamisch middenlitoraal. Hooglitoraal komt, op een kleine strook nabij de schorren van Roelshoek/Rattekaai na, nauwelijks voor. Slibrijk laagdynamisch middenlitoraal komt in een klein gebiedje voor bij de Oesterdam en nabij Roelshoek. Hoogdynamisch litoraal komt voor op de Oesterdam (als gevolg van de suppletie daar) en een klein stukje aan de noordrand van de Hooge Kraaijer. De Hooge Kraaijer, de grootste getijdenplaat in de Kom van de Oosterschelde, is een laaggelegen plaat met een relatief groot oppervlak aan fijnzandig laagdynamisch laaglitoraal.

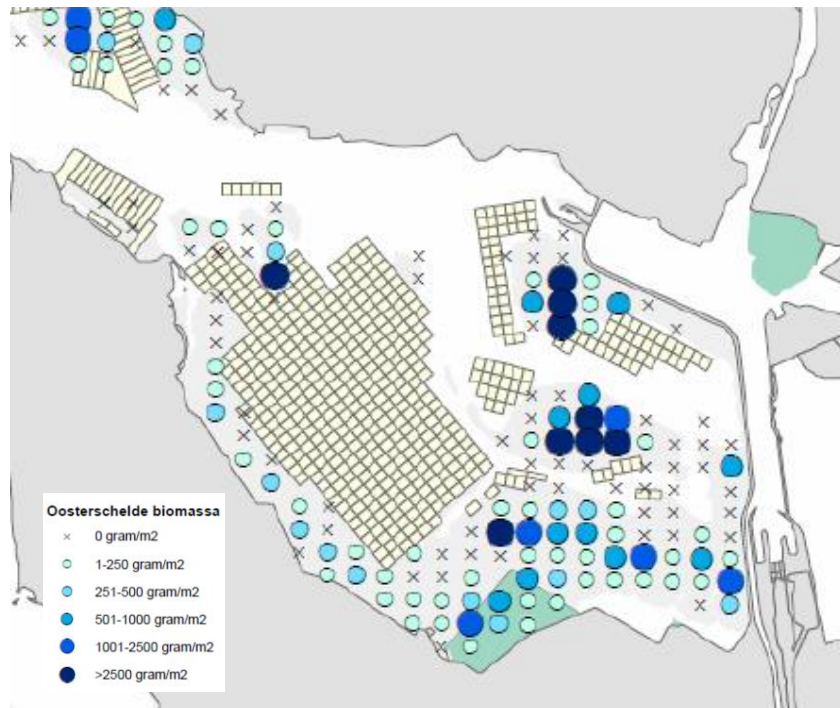


Figuur 12. Ecotopenkaart van de Kom van de Oosterschelde in 2016.

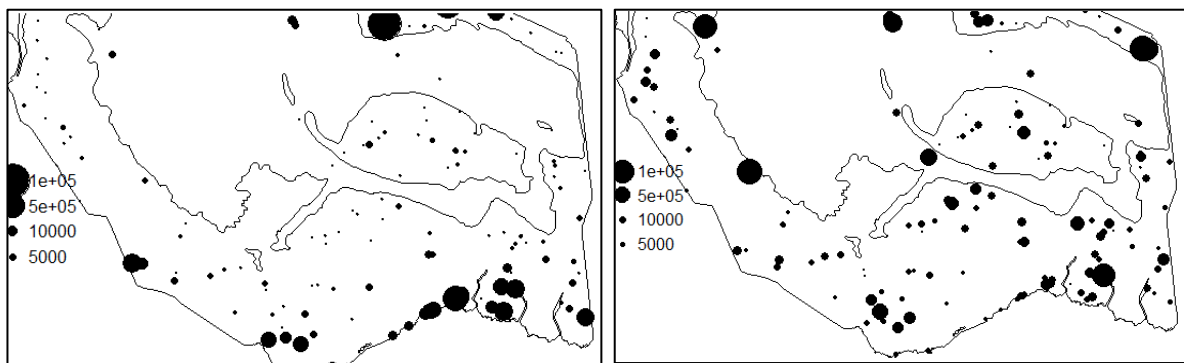
2.5.2 Benthos

Figuur 13 laat het voorkomen van kokkels zien in 2018 op basis van de WOT-survey (van Asch et al. 2018). Kokkels komen verspreid in het gebied voor, met de hoogste biomassa's op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, de Hooge Kraaijer en de Speelmansplaten. Ook bij de Oesterdam suppletie komen op basis van de WOT-survey weinig kokkels voor, hoewel uit meer gedetailleerde observaties lokaal hoge kokkel biomassa's bekend zijn (Boersema et al. 2018).

Figuur 14 toont dichtheden en biomassa van benthos verzameld tussen 2010 en 2014 binnen de MWTL monitoring. Hoge dichtheden worden geobserveerd langs de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (door voorkomen van grote aantallen wadslakjes). Lager gelegen delen van deze slikken laten aantallen zien vergelijkbaar met de Hooge Kraaijer.



Figuur 13. Het voorkomen van kokkels (biomassa in g versgewicht per m²) in de Kom van de Oosterschelde in 2018 (Bron: Kokkel survey, WMR, van Asch et al. 2018).



Figuur 14. Dichtheden (ind. m⁻²) (links) en biomassa (mg m⁻²) (rechts) in de Kom van de Oosterschelde. Bron: MWTL bodemdier bemonsteringen tussen 2010 en 2014.

2.5.3 Vogels

De kom is een belangrijk foerageergebied voor onder meer de bergeend, kanoet, bonte strandloper (Tabel 1) en zwarte ruiter. Een belangrijke voedselbron voor de bergeend, bonte strandloper en zwarte ruiter is het wadslakje (*Peringia ulvae*). Wadslakjes kunnen in zeer hoge aantallen voorkomen, met name in het hooglitoraal gebied (Troost en Ysebaert, 2011). Verwacht wordt dat een achteruitgang van dit hooglitoraal areaal direct effect zal hebben op de verdere achteruitgang van deze soorten.

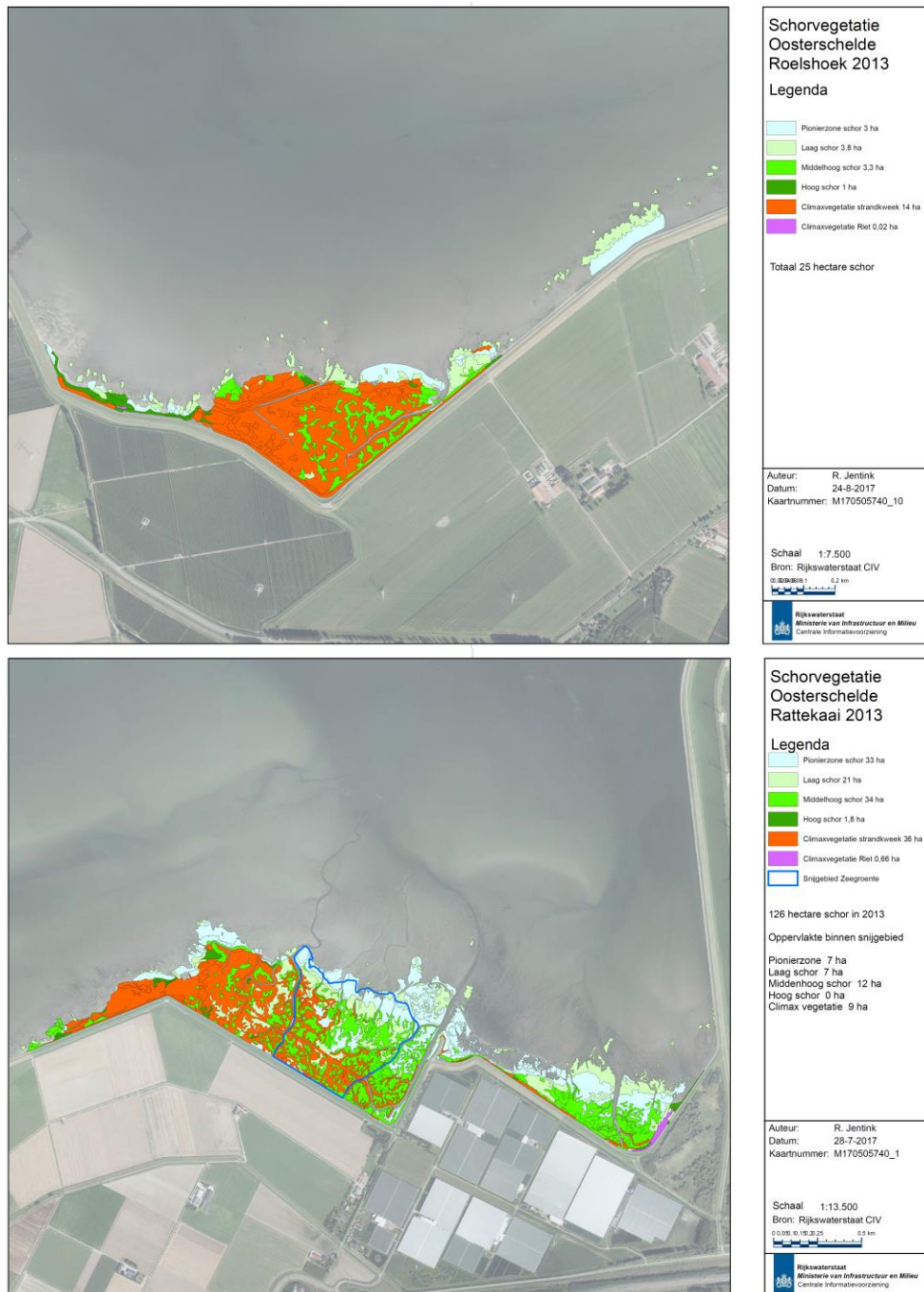
Tabel 1. Belang van de Kom van de Oosterschelde voor drie veel voorkomende vogelsoorten in de Oosterschelde. Verdeling per deelgebied (seizoengemiddelde gebaseerd op de periode 2006/2007-2010/2011).

	Seizoengemiddelde			
	West	Midden	Kom	Noordoost
Bergeend	536	385	818	297
Bonte Strandloper	3556	4691	6021	2881
Kanoetstrandloper	572	2151	2034	1674

Naar verwachting zal door erosie van de intergetijdengebieden, in combinatie met zeespiegelstijging, een plotselinge verandering optreden in de draagkracht voor steltlopers. Een dergelijke verandering zal moeilijk te herstellen zijn. Het totale areaal intergetijdengebied neemt de komende 50 jaar in deelgebied Oost (de Kom) het meeste af met ruim 40% (zie ook 2.2. Morfologie). Met name de areaalveranderingen voor de droogvalduurklasse 40-80 % is voor vogels in de Oosterschelde de meest belangrijke zone (de Ronde et al. 2013). Voor de gehele Oosterschelde is de achteruitgang van deze zone 56% in 2060 (de Ronde et al. 2013). De grootste achteruitgang is in het westen (80 %), in het gebied Midden neemt dit areaal met 65% af, terwijl de achteruitgang in de deelgebieden Oost en Noordoost ongeveer 40 % is (de Ronde et al. 2013). Door een combinatie van direct verlies aan areaal intergetijdengebied en het langzaam verlagen van de hogere delen in de Kom van de Oosterschelde, dreigt hier op termijn, net als in de andere delen van de Oosterschelde, een probleem te ontstaan voor de foerageer functie voor steltlopers (Troost en Ysebaert, 2011, de Ronde et al. 2013). Daarmee is de Kom van de Oosterschelde een voor de toekomst kwetsbaar gebied.

2.5.4 Schorren

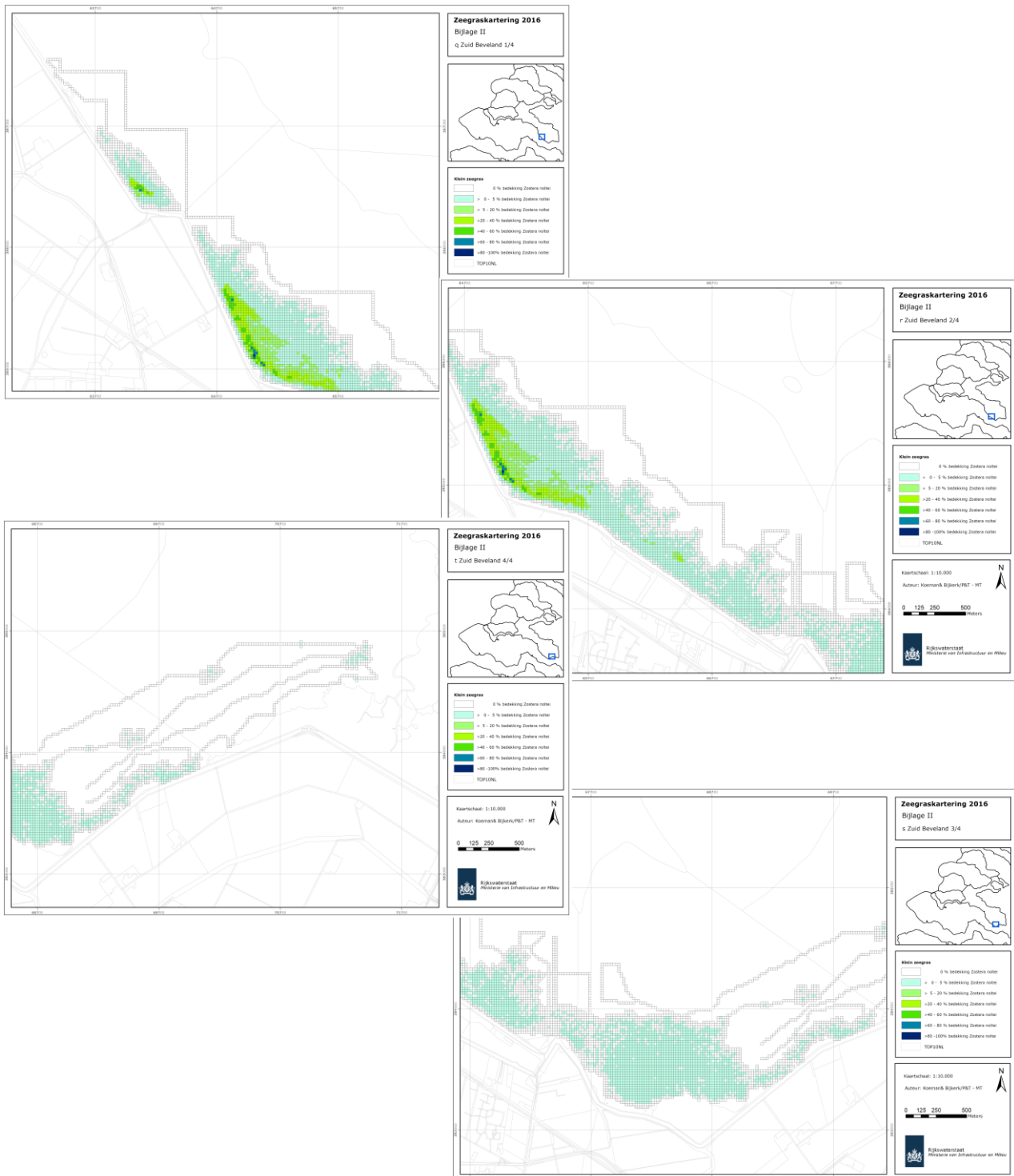
In Oosterschelde bevinden zich zo'n 465 ha aan schorren (situatie 2013, Jentink 2017). In de kom bevindt zich zo'n 25% van de schorren, met schorvegetaties langsheen het Verdrongen Land van Zuid-Beveland bij Roelshoek (25 ha) en Rattekaai (126 ha) (Figuur 15). Een deel van de schorren is verdedigd met een schorrandverdediging in de vorm van stenen dammetjes die voor het schor zijn aangelegd.



Figuur 15. Schorvegetaties bij Roelshoek (boven) en Rattekaai (onder) (Jentink, 2017). Voor de ligging van beide gebieden zie Fig. 13.

2.5.5 Zeegrasvelden

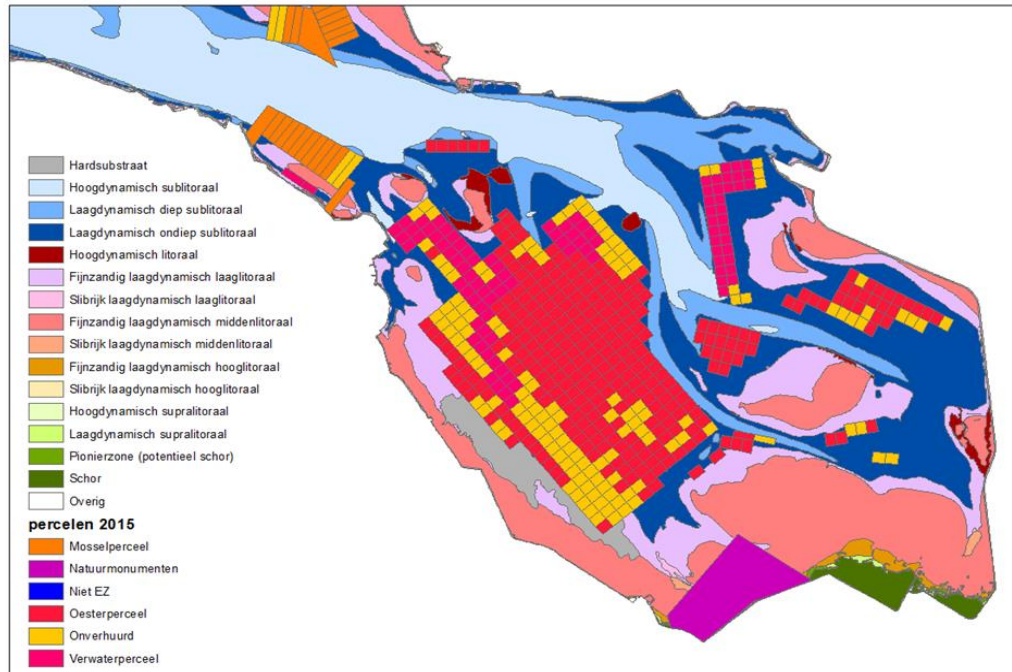
De Kom van de Oosterschelde is een belangrijk gebied voor klein zeegras. Langs het Verdrongen Land van Zuid-Beveland komt zo'n 184 ha klein zeegrasvelden voor (op een totaal in de Oosterschelde van 780 ha) (Koeman en Bijker, 2016) (Figuur 16), vooral in het noordwestelijke deel van het gebied. Op de Oesterdam suppletie komt sinds 2016 ook beperkt klein zeegras voor.



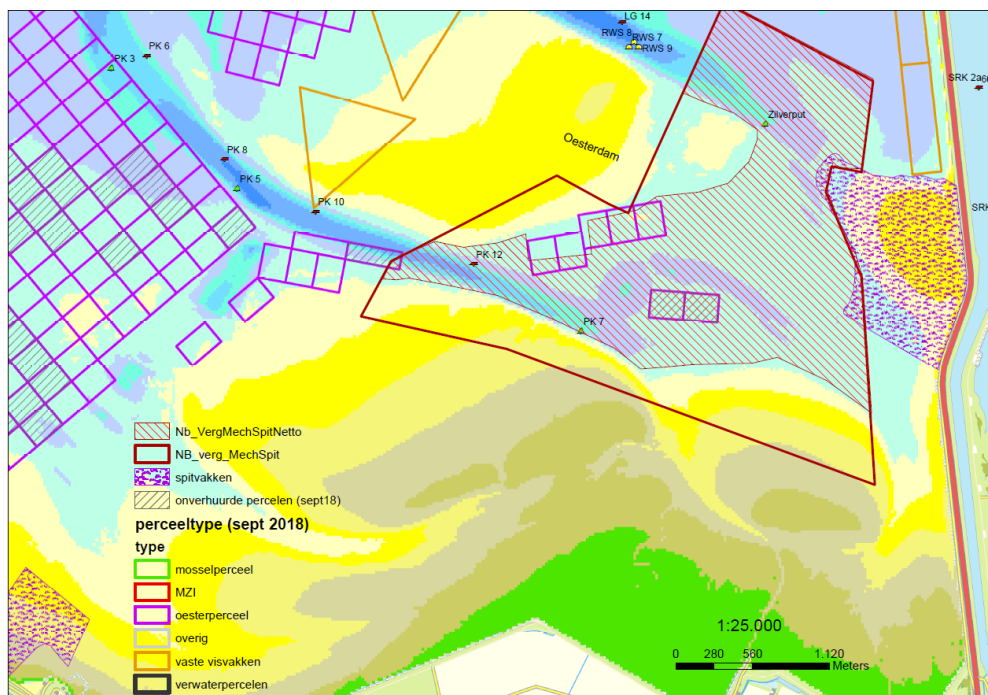
Figuur 16. Zeegrasvelden langs het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (Koeman en Bijker, 2016).

2.6 Functies/Menselijk gebruik

In de Kom bevinden zich geen percelen voor de kweek van mosselen. Wel verwateren kwekers hier hun mosselen op de verwaterpercelen voor ze ter consumptie verhandeld worden. In de kom liggen kweekpercelen voor oesters (Figuur 17). Daarnaast zijn er pierenspit gebieden op de intergetijdengebieden bij de Oesterdam en Roelshoek en vindt er mechanische pierenvisserij plaats (Figuur 18). Bij de Oesterdam suppletie bevindt zich ook een belangrijk surf- en kitesurfgebied en komen veel (dag)recreanten voor.



Figuur 17. Oester en mossel kweek- en verwaterpercelen. Onderliggende ecotopen kaart uit 2016.



Figuur 18. Pierenspit gebieden en vergund gebied voor mechanische pierenvisserij.

3 Afwegingskader

Uit de doelstellingen van Natuurmonumenten en de beschikbare kennis is een afwegingskader afgeleid om een objectieve en onderbouwde keuze mogelijk te maken voor natuurbouw met sediment in de Kom van de Oosterschelde. Natuurbouw met sediment kan op verschillende manieren. Wat het beste is – dat wil zeggen het meest voldoet aan de doelstellingen binnen de gestelde randvoorwaarden – zal afgewogen moeten worden. Hierbij hoort ook een beoordeling en afweging van de mogelijke neveneffecten. Een dergelijke afweging is waar mogelijk gebaseerd op kwantificeerbare indicatoren en waar nodig gebaseerd op kwalitatieve deskundigenoordelen. In beide gevallen dient de onderbouwing wetenschappelijk verantwoord te zijn, waarbij expliciteren van de mate van (on)zekerheid een belangrijke rol speelt.

Het algemene afwegingskader is afgeleid door 6 vragen te beantwoorden, waarbij literatuur en gesprekken met projectdeelnemers en experts als informatiebron zijn gebruikt:

1. Wat is het doel van de ingreep?
2. Voor welk type maatregel wordt gekozen?
3. Op welke manier wordt de maatregel uitgevoerd?
4. Welke type sediment is beschikbaar? Voor welk doelhabitat kan de maatregel worden uitgevoerd?
5. Welke andere menselijke gebruiken of andere omgevingsfactoren sluit een maatregel uit?
6. Technische beperkingen

Hieronder staan de vragen verder uitgewerkt.

3.1 Doel van de ingreep

Het doel van een Natuur Impuls Oosterschelde kan verschillend zijn. Binnen deze studie gaan we uit van natuurbehoud of natuurversterking van het intergetijdengebied in de Kom van de Oosterschelde. M.a.w., de focus is op het tegengaan van de negatieve effecten van de zandhonger in de Oosterschelde. Specifiek richt Natuur Impuls Oosterschelde zich op het behoud van eroderende slikken en zandplaten in de Kom van de Oosterschelde als foerageergebied voor steltlopers. Voor steltlopers is het foerageerareaal en de voedselbeschikbaarheid van belang. Voedselbeschikbaarheid wordt enerzijds bepaald door de aanwezige hoeveelheid (geschikt) voedsel (met name bodemdieren), en anderzijds door de beschikbare foerageertijd per laagwaterperiode. Door de zandhonger, in combinatie met zeespiegelstijging, neemt de beschikbare foerageertijd af in de Oosterschelde, en leidt dit op termijn tot een verkleining van de draagkracht van de Oosterschelde voor steltlopers en zullen de aantallen afnemen. Een ingreep richt zich dus met name het best op behoud van areaal en foerageertijd, en met name behoud van de droogvalduurklasse 40-80% lijkt hierbij belangrijk te zijn, omdat hier de biomassa aan voedsel voor vogels groot is en de vogels nog voldoende lang kunnen foerageren (de Ronde et al. 2013).

Natuurversterking focust zich op het veerkrachtiger maken van het natuurlijke systeem t.a.v. klimaatverandering, met name zeespiegelstijging. Randvoorwaarde voor natuurversterking is een lange termijn inspanning. De effecten van de zandhonger en zeespiegelstijging zullen zich in de toekomst verder manifesteren, en zullen, met het

huidige beheer van de Oosterschelde, blijvende inspanningen vragen voor het behoud van het intergetijdengebied.

3.2 Type maatregel

Het type maatregel gekozen binnen Natuur Impuls Oosterschelde is sediment (her)gebruiken als bouwstof voor natuurbouw en in eerste instantie sediment dat vrijkomt bij de geplande onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek.

3.3 Wijze van uitvoering

Natuurbouw ter behoud van intergetijdengebied middels sediment input kan op twee manieren uitgevoerd worden:

- Reallocatie naar een gewenste doellocatie:
 - Suppletie van een ondiep water/slik/zandplaat tot gewenste hoogte t.b.v. behoud foerageergebied steltlopers.
 - Suppletie van intergetijdengebied (slik) t.b.v. het creëren van schor.
- Reallocatie naar een strategische locatie:
 - Voeden van aanpalende slikken/zandplaten met sediment via natuurlijk sediment transport.
 - Voeden van aanpalende schorren met sediment via natuurlijk sediment transport.

De focus van deze studie richt zich op het behoud van foerageergebied voor steltlopers.

3.4 Doelhabitat i.r.t. beschikbaar sediment

Welk type sediment heb je nodig om het einddoel te bereiken, of andersom, welk type sediment kun je in welk type habitat benutten?

- Voor een suppletie op de doellocatie op een zandplaat of slik bepalen de lokale hydrodynamische condities en lokale sedimentsamenstelling welk type sediment het meest geschikt is. Beschutte slikgebieden zijn doorgaans wat slibrijker dan meer geëxponeerde zandplaten. Op slikken zie je vaak een gradiënt met hoogte, hogerop in het profiel wordt het sediment fijner. Als vuistregel kun je stellen dat gesuppleerd sediment dat de samenstelling van het lokale sediment benadert het meest geschikt is. Fijner sediment heeft het risico dat de fijne fractie snel uitgespoeld en getransporteerd wordt met de waterbeweging. Grover sediment kan dan weer ecologisch minder interessant zijn, door bijv. snellere uitdroging van het sediment. Overigens is dit een veel complexer proces en hangt van allerlei factoren af (cohesiviteit, bulk density, etc.). Mits golf reducerende maatregelen getroffen worden kan slibrijker sediment beschermd worden tegen uitspoeling.
- Voor het voeden van een slik of schor via natuurlijk sediment transport moet het sediment via de waterbeweging getransporteerd worden naar het gewenste intergetijdengebied. Sediment met te grove korrelgrootte bezinkt snel naar de bodem terwijl slib langer in de waterkolom blijft en daardoor verder getransporteerd kan worden. Onder normale omstandigheden heeft slibrijk sediment meer potentie om over grotere afstanden getransporteerd te worden, terwijl bij extremere omstandigheden (bijv. stormen) ook zandig materiaal kan getransporteerd worden. In van nature hoogdynamische gebieden kan ook zand getransporteerd worden.

3.5 Randvoorwaarden

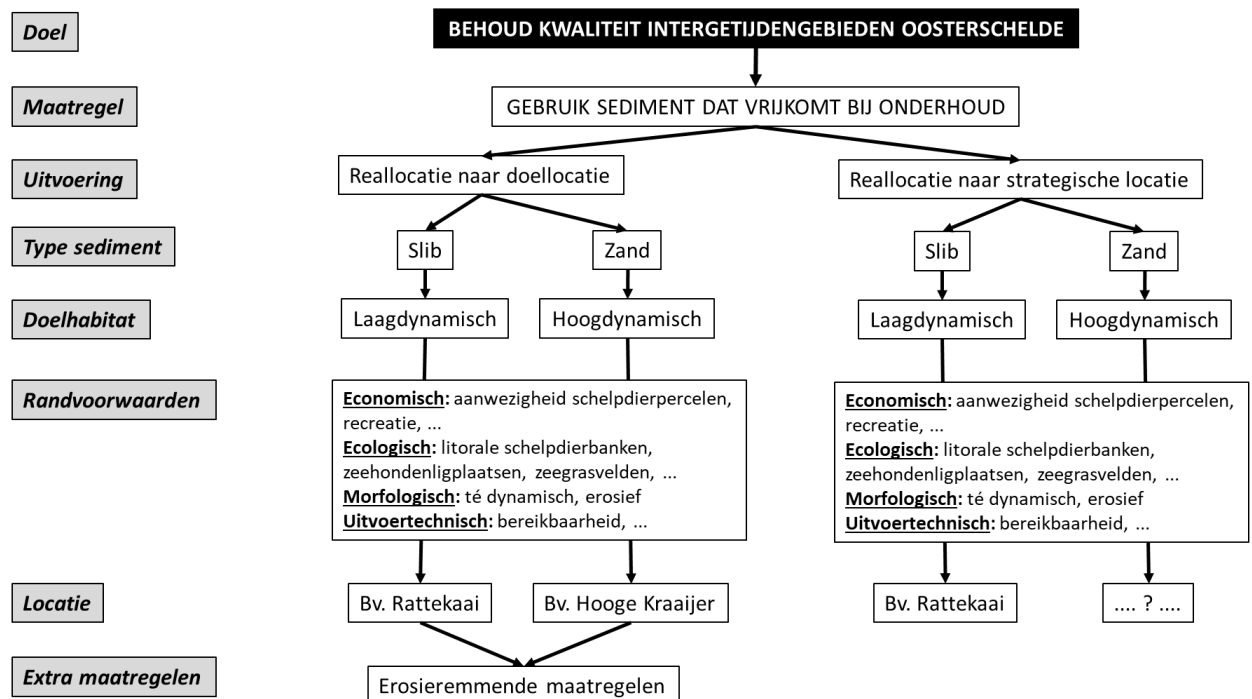
Bepaalde economische activiteiten of menselijk gebruik kunnen leiden tot aanpassing van een ingreep, dan wel volledig uitsluiten van een ingreep. Voorbeelden van economische activiteiten in de Kom van de Oosterschelde zijn (1) de aanwezigheid van kweekpercelen voor schelpdieren, (2) kreeftenvisserij, (3) mechanische pierenvisserij, en (4) weervisserij. (Tijdelijke) vertroebeling van het water kan bijvoorbeeld leiden tot negatieve effecten voor schelpdierkweek. Ook recreatieve functies kunnen belemmerend werken. In de Kom van de Oosterschelde bevinden zich gebieden voor pierensteken, zijn er windsurf en kitesurf locaties, duiklocaties en komen veel (dag)recreanten voor.

Naast socio-economische randvoorwaarden kunnen ook ecologische en morfologische randvoorwaarden spelen. Ecologische randvoorwaarden focussen zich bijvoorbeeld op het behoud van reeds aanwezige kwetsbare natuur, zoals zeegrasvelden, schelpdierbanken of zeehonden ligplaatsen. Morfologische randvoorwaarden kunnen zijn dat het gebied té dynamisch of erosief is voor de levensduur van de maatregel. Dit kan eventueel gemitigeerd worden door aanvullende maatregelen, bijvoorbeeld stabiliserende of golfremmende maatregelen. Verder zijn er nog cultuurhistorische randvoorwaarden zoals de aanwezigheid van verdronken dorpen.

3.6 Technische beperkingen

Een belangrijke randvoorwaarde is dat de maatregel technisch uitvoerbaar moet zijn. Daarbij horen ook de kosten die een maatregel met zich mee brengt (cost-benefit).

In onderstaand schema wordt als voorbeeld een uitgewerkt afwegingskader getoond voor een sediment ingreep in de Kom van de Oosterschelde:



4 Suppletievarianten

4.1 Sediment als bouwstof

Gedurende de laatste decennia is meer nadruk komen te liggen op het gebruik van sediment als grondstof binnen het waterbeheer en het natuurbehoud. Sinds begin 21ste eeuw wordt sediment ingezet als nature-based solution voor het creëren, herstellen en/of versterken van (de veerkracht van) habitats. Onder aquatische omstandigheden zijn toepassingen van sediment als nature-based solution onder meer afhankelijk van sedimentsamenstelling, lokale hydrodynamische omstandigheden (golven en stroming) en aanwezigheid van vegetatie. Golven kunnen sediment in suspensie brengen waarna stroming en golven sediment kan transporteren. Aanwezigheid van vegetatie kan leiden tot het invangen en vasthouden van sediment, maar ook andere zogen. Biobouwers zoals oesterriffen en mosselbanken kunnen sediment invangen en vasthouden. Het inzetten van sediment als nature-based solution vergt inzicht in lokale natuurlijke processen en natuurlijke variatie. Er is geen standaard oplossing die overal werkt, maatwerk is noodzakelijk.

4.1.1 Technieken

Afhankelijk van het beoogde doel, zijn er verschillende technieken in te zetten voor het aanbrengen, dan wel vasthouden van sediment t.b.v. behoud van (eroderend) intergetijdengebied:

- Reallocatie naar de doellocatie: sediment wordt getransporteerd en gepompt of gestort op de doellocatie, bijvoorbeeld een suppletie zoals uitgevoerd bij de Galgeplaat en Roggenplaat (Van der Werf et al., 2015; 2019).
- Reallocatie naar een strategische locatie: Sediment wordt op een strategische locatie gestort waarna lokale natuurlijke processen het sediment verder verspreiden naar de doellocatie, bijvoorbeeld de slibmotor Koehoal t.b.v. kwelderontwikkeling bij Harlingen (Baptist et al., 2019).

Combinatie van beide voorgaande technieken: in sommige gevallen wordt sediment gestort op een locatie met als doel lokaal het habitat te versterken maar op termijn ook het omliggende, niet gesuppleerde habitat te voeden. Een voorbeeld is de Oesterdam suppletie (

- Figuur 19) in de Oosterschelde t.b.v. behoud van slik als foerageergebied voor steltlopers (Boersema et al., 2018).
- Erosieremmende of invang bevorderende maatregelen: het natuurlijk vermogen sediment in te vangen en te behouden in het systeem verbeteren middels het aanleggen van structuren. Deze structuren kunnen natuurlijk (bijv. vegetatie, oesterriffen) dan wel artificieel (bijv. strekdammen) zijn. Voorbeelden zijn de strekdammen langs de Westerschelde ter bevordering van laagdynamisch intergetijden ontwikkeling of oesterriffen in de Oosterschelde t.b.v. behoud van slik.

Het grote verschil tussen reallocatie naar een doellocatie of strategische locatie zit zowel in de ruimtelijke als temporele component. Direct aanbrengen van sediment op de doellocatie brengt het sediment direct op de juiste locatie en gewenste (aanvangs)hoogte, en het ruimtebeslag beperkt zich in principe tot de gekozen oppervlakte. Lokaal is de ecologische schade tijdelijk groot maar na herstel heeft deze maatregel, afhankelijk van hoe lang het sediment blijft liggen, een vrij lange levensduur. M.a.w., een langetermijn rendement. Uiteindelijk zal het sediment, bij verderzetting van zandhonger en zeespiegelstijging, uit het gesuppleerde gebied verdwijnen, maar

mogelijk nog een hele tijd in het intergetijdengebied blijven. Daarmee kan het ook nog een voedende werking hebben op de rest van het intergetijdengebied.

Aanbrengen op een strategische locatie is een meer diffuus proces. Het sediment wordt lokaal op een locatie aangebracht waarna het zich verspreidt over een veel groter doelgebied. In hoeverre het doelgebied gevoed wordt hangt van velerlei factoren af, waaronder lokale getijdestromingen en golfwerking. Hierdoor is het moeilijker voorspelbaar of het sediment binnen het gewenste doelgebied terecht komt. Lokaal is er, net als bij suppleren op de doellocatie, een grote verstoring (i.e. op de locatie waar het sediment wordt neergelegd). Wordt het storten in het sublitoraal uitgevoerd, dan is de verstoring in het intergetijdengebied minimaal. Om het doelgebied over een langere, zeg meerdere jaren te voeden, zal er herhaaldelijk in de tijd moeten worden gesuppleerd.

Uiteraard zijn tussenvarianten tussen beide types varianten denkbaar. Algemeen kan gesteld worden dat zandig tot matig slibrijk sediment beter geschikt is voor gebruik op doellocatie, want zal beter ter plaatse blijven liggen, en zeer slibrijk sediment beter geschikt is op strategische locaties van waaruit het slib zich kan verspreiden naar een groter doelgebied. Maar dit wordt ook in belangrijke mate bepaald door de lokale omgevingscondities.

Daarnaast zijn bijkomende maatregelen denkbaar die het aangebrachte sediment langer kunnen vasthouden (voor het bijv. weer weg erodeert). Dit kunnen bijv. biogene structuren zijn zoals oesterriffen (zie voorbeeld bij Oesterdam suppletie, Figuur 19) of strekdammen (zie voorbeeld bij suppletie Schelphoek).



Figuur 19. Suppletie bij de Oesterdam met vier oesterriffen. Foto: Edwin Paree (RWS).

4.1.2 Natuur Impuls Oosterschelde

De samenstelling van het beschikbare sediment bepaalt in belangrijke mate de toepassingsmogelijkheden en er zal dus steeds gezocht moeten worden naar de meest geschikte toepassing (zie boven). Dit vereist maatwerk. In de meeste gevallen blijkt dat het te baggeren sediment bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor vaargeulen en havens uit relatief slibrijk zand bestaat, wat anders is dan het zandige sediment dat tot nu toe gebruikt wordt bij suppleties in de Oosterschelde. Dit is ook het geval voor het op te baggeren sediment uit de vaargeul in de Zandkreek.

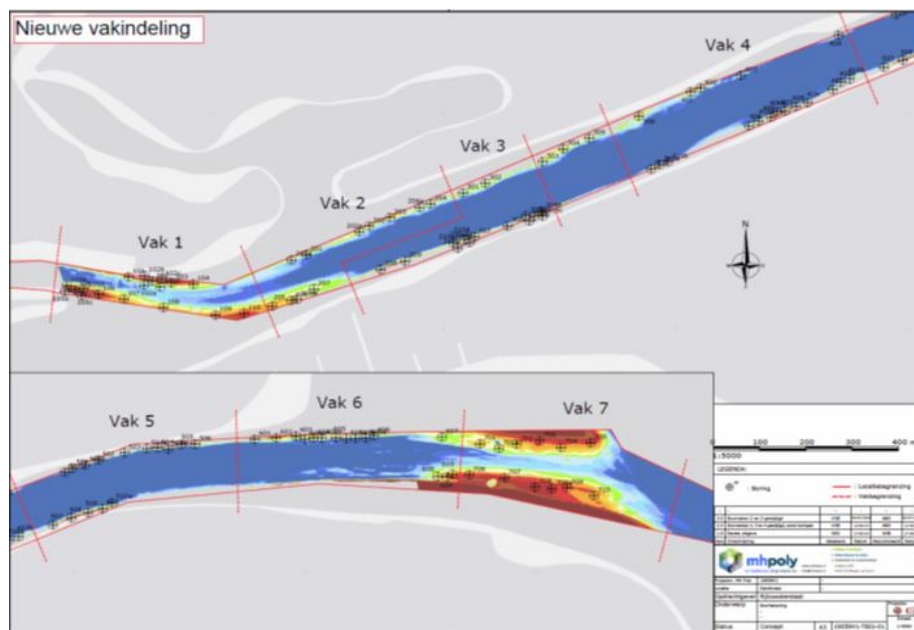
In tegenstelling tot bouwen met zand is bouwen met slibrijk sediment geen 'common practice' en bestaat er een grote kennislacune rondom het inzetten van slibrijk sediment voor natuurherstel. Nochtans zal in de toekomst vaker slibrijk sediment ter beschikking komen omwille van bovengenoemde activiteiten. Het gedrag van slibrijk sediment t.o.v. zand is anders en daarmee ook de morfologische en ecologische effecten. Slib vormt een belangrijke component voor het ecologisch functioneren van estuaria en kustgebieden. Dit uit zich op verschillende manieren. Slib komt enerzijds in suspensie in de waterkolom voor en anderzijds vormt het een belangrijk onderdeel van de sediment matrix van de waterbodem. Slib in suspensie bepaalt de troebelheid van het water en heeft daarmee effecten op primaire productie, maar ook op bijv. filter feeders (bijv. mosselen, oesters, kokkels) die afhankelijk zijn van het fytoplankton als voedsel. Voldoende slib in de waterkolom zorgt er bijv. ook voor dat schorren ophogen en kunnen meegroeien met zeespiegelstijging. Slibrijke sedimenten zijn cohesief en daardoor moeilijker te eroderen.

In de intergetijdengebieden ontwikkelen diatomeeën (kiezelwieren) zich goed op slibrijke sedimenten en maken op hun beurt sedimenten minder erosiegevoelig. Het microphytobenthos vormt tevens een belangrijke voedselbron voor heel wat bodemdieren (bijv. wadpier, nonnetje, slijkgarnaal, wadslakje, etc.). Op hun beurt vormen deze bodemdieren een belangrijke voedselbron voor heel wat vis- en vogelsoorten. In het algemeen kan gesteld worden dat fijnzandige/slibrijke sedimenten, in combinatie met relatief laagdynamische (m.b.t. getijdenstromingen en golven) omstandigheden, doorgaans een hoge primaire en secundaire productie kennen en als biologisch rijk kunnen gekenmerkt worden. Hier komen de grootste aantallen en biomassa's aan bodemdieren voor die het voedsel vormen voor steltlopers en andere soorten watervogels. Heel slibrijke en slappe bodems kunnen dan weer minder geschikt zijn voor bodemdieren, omdat bodemdieren zich moeilijk kunnen handhaven in dit type sedimenten, bijv. doordat gangenstelsels of kokers waarin de dieren leven niet kunnen gebouwd worden.

4.2 Beschikbaar sediment Zandkreek

Er zijn zeven vakken onderscheiden in de te baggeren zone in de Zandkreek (Figuur 20). Zintuigelijk wordt het sediment als volgt omschreven: "De te baggeren waterbodem bestaat ter plaatse van vak 1 t/m 7 uit slib. In vak 4 en 5 is in een aantal boringen ook zandlagen aangetroffen. De consistentie van het slib is beschreven als matig vast. Het aangetroffen zand in vak 4 en vak 5 is beoordeeld als matig fijn" (MH Poly, 2019). Een aantal foto's van het sediment, genomen tijdens de Navicula cruise op vrijdag 27 september door het NIOZ staat in Figuur 21.

Middels een aantal boringen per vak is de sedimentsamenstelling bepaald (Tabel 1). Het slibgehalte (% < 63 μm) varieert tussen 17,4 en 86,0%. In totaal is er maximaal 193.000 m^3 te baggeren sediment in de Zandkreek. Zestig procent hiervan (116.000 m^3) bestaat uit sediment met een slibfractie > 40%. Sediment met een hoge slibfractie bevindt zich in de vakken 1 t/m 5.



Figuur 20. De zeven vakken in de Zandkreek die gebaggerd dienen te worden.



Figuur 21. Indruk van de sedimentsamenstelling in de Zandkreek. Bron: NIOZ Navicula cruise, 27 september 2019.

Tabel 2. Sedimentsamenstelling van het te baggeren sediment in de Zandkreek. Bron: MH Poly, 2019.

Vak	Separaat monster	Hoofdgrondsoort	Monstertraject (m –wb)	<2 µm (%)	<16 µm (%)	<32 µm (%)	<63 µm (%)	<250 µm (%)
1	102-1		0 - 0,5	22,0	78,2	80,3	83,9	98,7
	102-2		0,5 - 1,0	45,4	69,7	77,4	86,0	99,0
	102-3		1,0 - 1,5	39,3	56,0	63,9	71,5	99,5
	102-4		1,5 - 2,0	25,2	37,5	43,3	50,7	99,4
2	204-1		0 - 0,5	20,2	33,0	41,7	53,4	99,6
3	309A-1		0 - 0,5	25,8	36,4	42,9	55,5	99,4
	309A-2		0,5 - 1,0	45,4	67,8	75,6	84,9	99,4
	309A-3		1,0 - 1,5	31,5	46,6	55,3	66,4	99,1
	309A-4		1,5 - 2,0	44,4	57,4	62,8	68,9	98,1
4	410-1		0 - 0,5	15,6	21,5	25,3	31,9	99,2
	410-2		0,5 - 1,0	25,0	36,4	41,8	50,3	98,7
5	504-1		0 - 0,5	15,6	21,3	25,1	31,8	99,2
	504-2		0,5 - 1,0	29,0	40,0	45,4	56,3	99,0
6	604-1		0 - 0,5	11,2	15,6	17,0	22,3	99,3
	604-2		0,5 - 1,0	14,7	23,6	26,9	33,6	98,8
7	703-1		0 - 0,5	9,2	11,7	14,4	17,4	99,4
	703-2		0,5 - 1,0	10,0	15,0	17,2	22,0	99,5
	703-3		1,0 - 1,5	16,8	23,8	27,2	34,4	99,3

De karakteristieke diameters van de zandfractie zijn bepaald door een lineaire interpolatie op een logaritmische schaal, zie Tabel 3. De gemiddelde D10, D50 en D90 van de zandfractie is 0.07, 0.13 en 0.23 mm, respectievelijk. Het betreft dus fijn zand.

Tabel 3. Karakteristieke diameters van de zandfractie. Bron: MH Poly, 2019.

Vak	Monster	Pzand (%)	D _{10,zand} (mm)	D _{50,zand} (mm)	D _{90,zand} (mm)
1	102-1	16	0.07	0.13	0.24
	102-2	14	0.07	0.13	0.24
	102-3	29	0.07	0.13	0.22
	102-4	49	0.07	0.13	0.22
2	204-1	47	0.07	0.13	0.22
3	309A-1	45	0.07	0.13	0.22
	309A-2	15	0.07	0.13	0.23
	309A-3	34	0.07	0.13	0.23
	309A-4	31	0.07	0.13	0.24
4	410-1	68	0.07	0.13	0.22
	410-2	50	0.07	0.13	0.23
5	504-1	68	0.07	0.13	0.22
	504-2	44	0.07	0.13	0.22
6	604-1	78	0.07	0.13	0.22
	604-2	66	0.07	0.13	0.22
7	703-1	83	0.07	0.13	0.22
	703-2	78	0.07	0.13	0.22
	703-3	66	0.07	0.13	0.22
gemiddeld		49	0.07	0.13	0.23

Tabel 4 geeft een overzicht van de te baggeren hoeveelheden en de gemiddelde slibpercentages per stortvak. Sommige stortvakken hebben een zeer slibrijk sediment, andere vakken duidelijk minder.

Tabel 4. Te baggeren volumes en gemiddeld slibgehalte per stortvak in de Zandkreek. Bron: Thijs van Kessel.

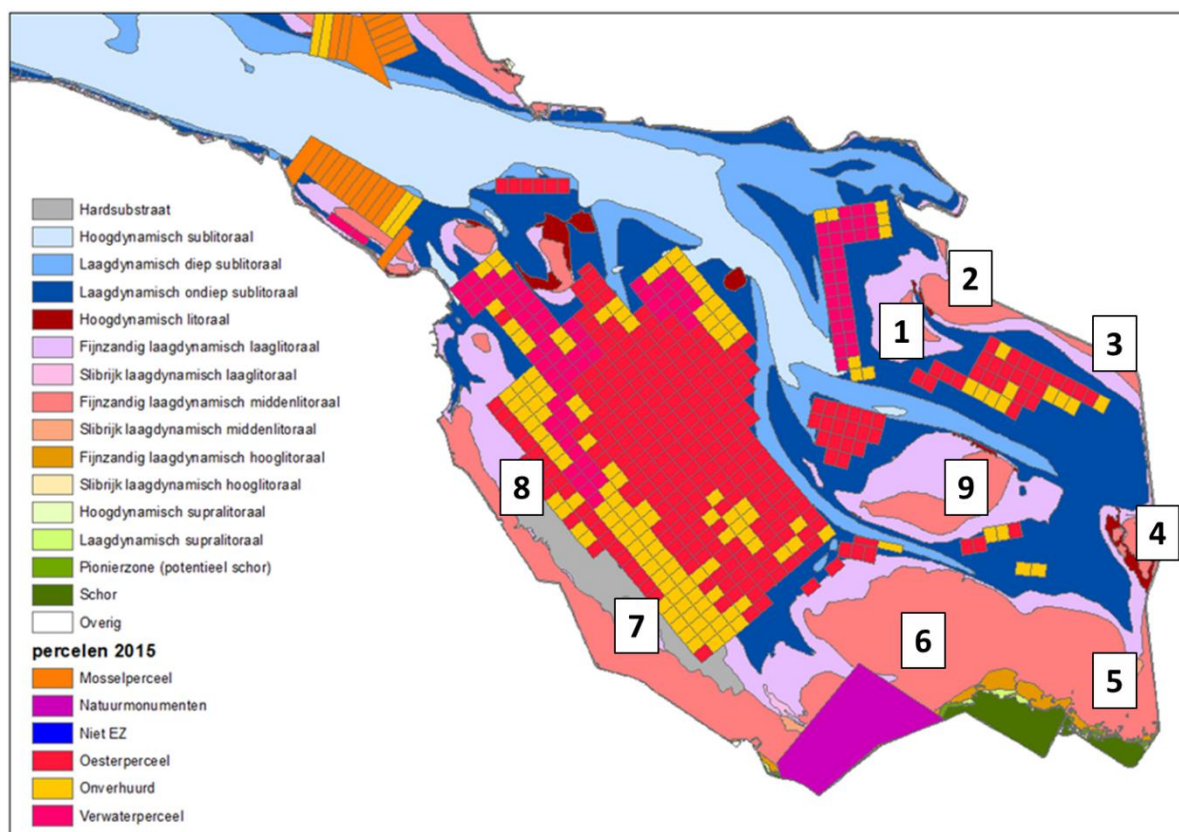
Stortvak	volume	%slib
1	21004	73
1	21467	73
2	6672	53
3	15927	69
3	6376	69
4	20374	41
5	24753	44
6	29296	28
7	47232	25

4.3 Mogelijke suppletiegebieden

De kaart in Figuur 22 geeft negen verschillende intergetijdengebieden weer in de Kom. Een lijst van potentiële gebieden die in aanmerking komen voor natuurbouw zijn tot stand gekomen tijdens de deskundigenbijeenkomst van 21 oktober 2019. Het moet benadrukt worden dat hier voor een conservatieve benadering is gekozen op basis van een deskundigenoordeel gebruik makend van beschikbare kennis, en er geen gedetailleerde analyses aan ten grondslag liggen. Dit betekent ook dat mogelijk gebieden die nu afvallen in potentie wel in aanmerking komen voor natuurbouw met sediment.

Hieronder wordt per gebied (Figuur 22), op basis van het afwegingskader, welke intergetijdengebieden al dan niet in aanmerking komen voor natuurbouw met sediment in het kader van Natuur Impuls Oosterschelde:

1. Op basis van zijn ligging een hoogdynamisch gebied. Natuurbouw middels slibrijk sediment zal op deze locatie mogelijks gepaard moeten gaan met extra golfreducerende/erosieremmende maatregelen. Door nabijgelegen verwaterpercelen voor mosselen, welke mogelijks negatieve effecten kunnen ondervinden van sedimentverspreiding, valt dit gebied af voor natuurbouw met sediment.
2. Door zijn ligging aan de lijzijde van gebied 1 is dit een minder hoogdynamisch gebied. Echter ligt ook dit gebied nabij verwaterpercelen die mogelijks negatieve effecten kunnen ondervinden van sedimentverspreiding en wordt dit gebied niet verder meegenomen in deze studie.
3. Door de nabijgelegen oesterpercelen bij de Speelmansplaat wordt ook dit gebied niet meegenomen in deze studie.
4. Omdat de Oesterdam recentelijk (2013) gesuppleerd is met 350.000 m³ sediment wordt dit gebied ook niet meegenomen.
5. Door zijn ligging is dit een laagdynamisch intergetijdengebied met schorren. Sedimentsamenstelling varieert van zandig tot slibrijk. Door zijn ligging, sedimenttype en heersende erosie wordt dit gebied als potentieel voor natuurbouw middels sediment ingeschat.
6. Dit deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland wordt ingeschat als laagdynamisch. Het gebied is onderhevig aan erosie. Sedimenttype varieert van zandig tot slibrijk. In het gebied zijn weinig medegebruikers aanwezig. Aan de noordrand in de Mosselkreek vindt mechanische pierenspitten plaats. Dit gebied wordt op basis van zijn ligging, sedimenttype, en nabijgelegen schor als potentieel gebied voor natuurbouw middels sediment ingeschat.
7. Dit deel van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland wordt gebruikt voor off-bottom schelpdier teelt. Tevens is het gelegen nabij oesterpercelen en zeegrasvelden. Sediment verspreiding kan mogelijks leiden tot negatieve gevolgen voor medegebruikers en natuur, waardoor dit gebied af valt.
8. Dit gebied is gelegen nabij oesterpercelen en valt om deze reden af voor natuurbouw.
9. De Hooge Kraaijer is een laag gelegen, zanderige, hoog dynamisch plaat onderhevig aan erosie. Door zijn lage liggen en zanderige sedimentsamenstelling is er een potentie voor natuurbouw middels zandig sediment in combinatie met erosieremmende maatregelen. Door de lage ligging is een grote hoeveelheid zand nodig om de plaat voldoende op te hogen. Het gebruik van slibrijk sediment is in dit dynamisch gebied minder aangewezen.



Figuur 22. Indicatie waar al dan niet natuurbouw met sediment mogelijk is in de Kom van de Oosterschelde (op basis van afwegingskader, zie tekst).

De focus komt op basis van deze quick screening te vallen op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland ((#5 en #6) en de Hooze Kraaijer (#9), het eerste gebied een groot slikkengebied met in de zuidoostelijke hoek een relatief groot schor, het tweede een grote zandplaat in de Kom van de Oosterschelde (Figuur 22). Beide gebieden verschillen wezenlijk.

4.3.1 Verdrongen land van Zuid-Beveland

Het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (waarvan de Rattekaai een onderdeel vormt) is een groot slikken- en schorrengebied. Hier heb je nog de volledige gradiënt van laaglitoraal naar hooglitoraal (zie paragraaf 2.2). Het grootste deel van het gebied bestaat uit fijnzandig laagdynamisch middenlitoraal. Kleine delen zijn gekarteerd als slibrijk. Ook de (beperkte) metingen laten een relatief hoog slibgehalte zien van het sediment.

Toepassingsmogelijkheden voor dit gebied:

Omwillen van zijn laagdynamische karakter komt dit gebied in aanmerking voor natuurbouw met slibrijk sediment, en kan gedacht worden aan reallocatie direct naar een eindlocatie (suppletie op het slik) of reallocatie naar een strategische locatie t.b.v. het voeden van het slik en schor (sedimentmotor). Afhankelijk van waar een suppletie komt te liggen, zijn mogelijks erosieremmende maatregelen wenselijk. Dit moet nader onderzocht worden. Sediment t.b.v. een sedimentmotor kan zowel onder de laagwaterlijn als boven de laagwaterlijn worden aangebracht. Welke meest efficiënt is moet nader onderzocht worden.

4.3.2 Hooge Kraaijer

De Hooge Kraaijer is een laaggelegen, zanderige getijdenplaat gelegen in de Kom van de Oosterschelde (zie 2.2. Morfologie). Een groot deel van de plaat wordt geclassificeerd als fijnzandig laagdynamisch laaglitoraal (droogvalduur < 25%). Het centrale deel bestaat uit fijnzandig laagdynamische middenlitoraal. Aan de noordzijde komt een smalle strook hoogdynamisch litoraal voor. Hooglitoraal ecotoop (droogvalduur > 75%) komt op deze plaat niet meer voor. Ondanks het feit dat het gebied grotendeels als laagdynamisch wordt aangeduid is het toch duidelijk een meer zandige plaat dan de slikken bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, met weinig slib in de bodem (zie 2.2. Morfologie). Dit wijst op een meer dynamisch karakter. Deze plaat is onderhevig aan sterke erosie en dreigt zijn foerageerfunctie voor steltlopers te verliezen in de nabije toekomst.

Toepassingsmogelijkheden voor dit gebied:

Omwillen van het meer dynamische karakter, het laaggelegen karakter van het gebied en de sterke erosieve trend lijkt een suppletie met zandig sediment, die de droogvalduur herstelt, het meest aangewezen. Hiervoor zijn grote hoeveelheden zand nodig.

4.4 Suppletievarianten

Natuur Impuls Oosterschelde wil gebruik maken van het sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek t.b.v. natuurbouw in de Kom van de Oosterschelde. Dit sediment heeft een overwegend slibrijk karakter, hoewel bepaalde te baggeren zones meer zandig sediment bevatten (vakken 6 en 7, zie 4.2). Het slibrijke karakter van het sediment maakt het geschikt voor toepassing als suppletie op doellocatie in relatief luwe gebieden of als sedimentmotor die als bron dient om een groter slikken- en schorregebied te voeden. Hiervoor lijkt het gebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland het meest geschikt. Het gebruik van slibrijk sediment is in het dynamische gebied van de Hooge Kraaijer minder aangewezen. Dit is tijdens de deskundigenbijeenkomst van 21 oktober 2019 nader uitgewerkt.

In eerste instantie gaan we uit van een suppletievolume van 100.000 m³.

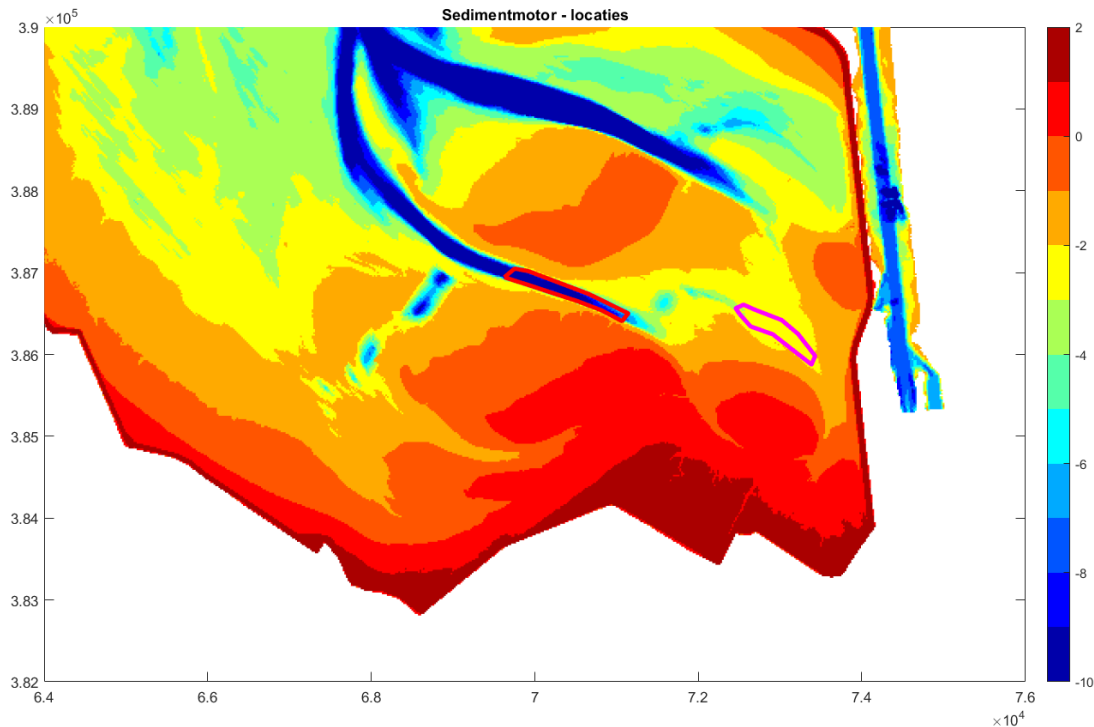
Twee typen alternatieven zijn uitgewerkt: 1) een sedimentmotor, 2) een sedimentsuppletie. Bij een sedimentmotor wordt het sediment op een strategische locatie gestort vanuit waar de slikken en schorren op een natuurlijke manier worden gevoed. Bij een sedimentsuppletie wordt het sediment direct op de doellocatie gestort.

Uitgangspunten zijn:

- De sedimentmotor wordt in het sublitoraal (i.e. dieper dan Gemiddeld Laag Water, GLW) aangebracht. Dit is mogelijk bevorderlijk voor de sedimentverspreiding en dit biedt uitvoer-technische voordelen. De sedimentmotor is gebaat bij relatief slibrijk sediment ter bevordering van de verspreiding.
- De sedimentsuppletie wordt in het litoraal aangelegd, i.e. direct op de gewenste plek, met relatief meer zandige specie zodat het langer blijft liggen en de ecologie zich kan herstellen.
- Om de footprint, het gebied dat bij aanleg verstoord wordt, in te perken is een zo groot mogelijke suppletiedikte gewenst. Voor de aanleg van de sedimentmotor of de suppletie is het niet mogelijk om "heel dik" te suppleren. Daarom wordt gekozen voor een suppletiedikte van 0.5 m, i.e. 20 ha gegeven het suppletievolume.
- Zoveel mogelijk het natuurlijke reliëf volgen ter bevordering van de stabiliteit van het aangebrachte sediment.

Er worden twee varianten van de sedimentmotor onderzocht om het effect van de locatie op de sedimentverspreiding in kaart te brengen (Figuur 23) :

- Aan het einde van de geul ten noorden van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, de Mosselkreek. Hier kan het sediment direct geklept worden. De lokale bodemligging is \sim NAP-10 m. Dit is de meest westelijke locatie die geschikt is voor een onderwatersuppletie. Verder naar het westen wordt ingeschat dat het meeste slib de geul instroomt en niet op het intergetijdengebied terecht komt.
- Gebied ten oosten hiervan, onder de Oesterdam. Hier kan het sediment met ondieper stekende schepen naar toe worden gebracht of via een persleiding vanaf het einde van de Mosselkreek naar toe worden gepompt. Lokale diepte \sim NAP -2-3 m; dit is beneden GLW (Figuur 23).
- Net als bij de suppletie is voor de sedimentmotor uitgegaan van een oppervlak van 20 ha met een dikte van 0.5 m.

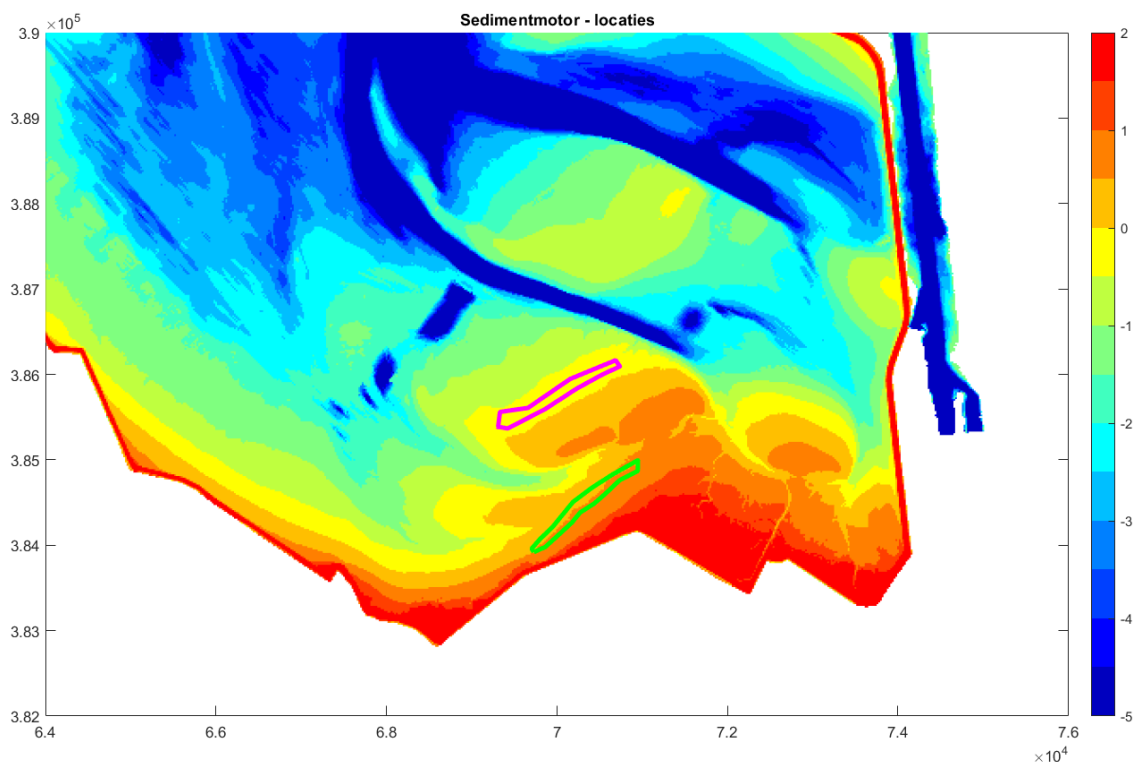


Figuur 23. Locaties sedimentmotor varianten: i) op \sim NAP-10m (rode polygoon), ii) op \sim NAP-2.5m (magenta polygoon).

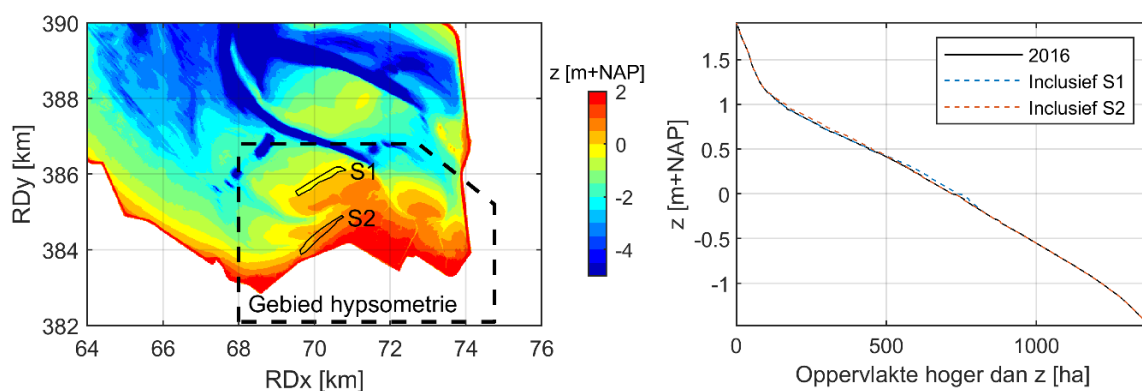
Bij de sedimentsuppleties zijn twee varianten geselecteerd voor een directe versterking van het areaal met 40-80 % droogvalduur (DVD) (Figuur 24):

- Bij de eerste variant, S1, is het uitgangspunt om direct waardevol areaal te creëren. De diepte die correspondeert met een DVD van 50% is \sim NAP -0,1 m. Vanaf deze diepte tot aan de contour "DVD50% -0,4m" wordt een sliblaag van 50 cm aangelegd. Dit is gekozen om een bestendig ontwerp te maken met een marge van 20 cm sediment i.v.m. de huidige erosie van de plaat (1cm per jaar). Zoeklocatie is het gebied ten zuiden van het doodlopen van de Mosselkreek, tegen een hogere rug op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland aan.
- Bij de tweede variant, S2, wordt de suppletie aangelegd t.b.v. het nabijgelegen schor, i.e. hoger en zuidelijker dan de eerste variant. De maximale aanleghoogte is tot 75-80% van de DVD (\sim NAP+1 m).

In Figuur 25 is de hypsometrische curve van het interessegebied gebied getoond, als ook de hypsometrische curves na toepassing van de suppletievarianten op het intergetijdengebied. De varianten met de stortingen in de diepere delen (onder gemiddeld laagwater) zijn niet getoond, omdat die niet direct de hypsometrie van het intergetijdengebied doen veranderen (alleen na transport naar het intergetijdengebied). Zoals zichtbaar vindt er bij variant S1 een toename in oppervlakte plaats tussen ongeveer NAP-0,1 m en NAP+0,4 m van 20 ha. Bij variant S2 is dit ook 20 ha, maar dan tussen ongeveer NAP+0,5 m en NAP+1,0 m.



Figuur 24. Locaties sedimentsuppletie varianten: i) diepere locatie tegen de rug op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (magenta polygoon), ii) hoger gelegen suppletie t.b.v. het schor (groene polygoon).



Figuur 25. Hypsometrische curves ontwerpen. Links: overzichtskaart met de ligging van de twee suppletiealternatieven op het intergetijdengebied. De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LiDAR) van 2016. Hierin is ook het gebied weergegeven waarvoor de hypsometrische curves zijn bepaald. Rechts: hypsometrische curves van (i) de 2016 bodem, (ii) de 2016 bodem na ophoging van S1 met 0,5 m en (iii) de 2016 bodem na ophoging van S2 met 0,5 m. De hypsometrische curves zijn alleen bepaald voor delen van het intergetijdengebied die boven gemiddeld laagwater (MLW = -1.47 m NAP) en onder gemiddeld hoogwater (MHW = +1.91 m NAP) liggen.

5 Sedimentverspreiding en neveneffecten

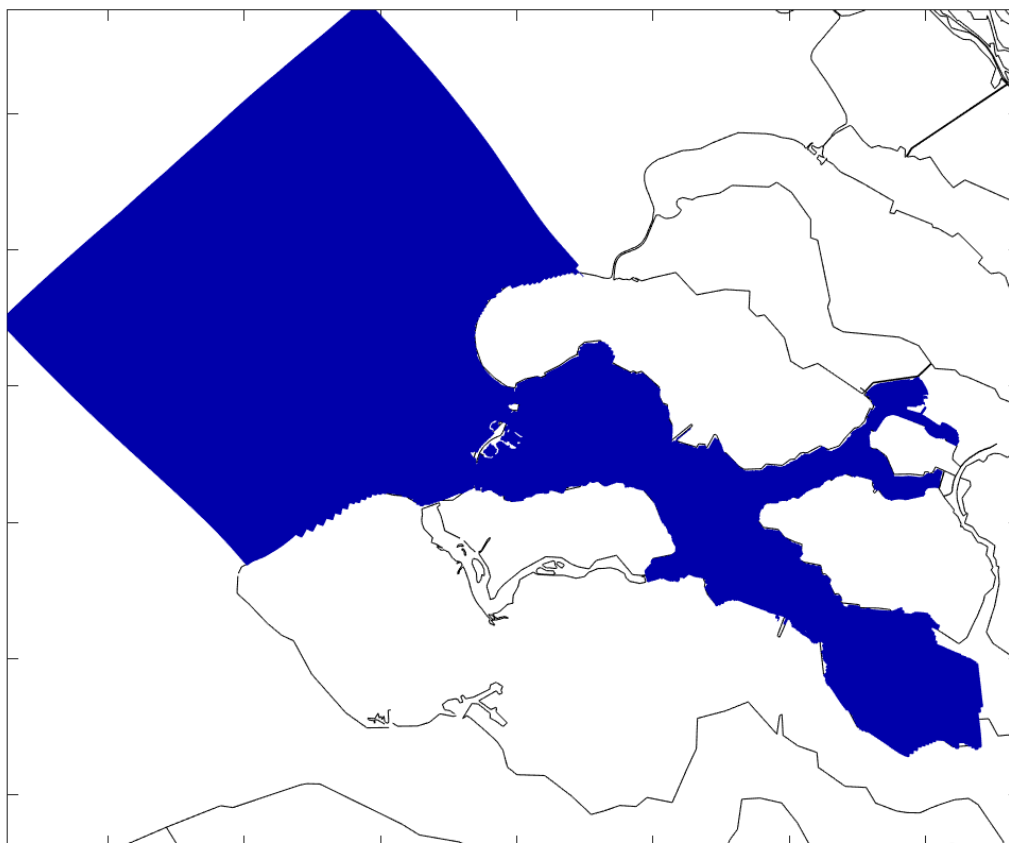
5.1 Slib

5.1.1 Aanpak

Voor de modellering is gebruik gemaakt van een bestaand slibverspreidingsmodel voor de Oosterschelde. Dit is eerder ook gebruikt voor de berekening van het nulalternatief zonder Natuur Impuls, namelijk de reguliere verspreiding van baggerspecie op diep water in de buurt van de Zandkreekgeul (Van Duren et al., 2019). Met het oog op de zelfstandige leesbaarheid van het huidige rapport worden de belangrijkste aspecten van dit model hieronder toegelicht.

Dit model beschrijft alleen de verspreiding van de fijne sedimentfractie ($< 63 \mu\text{m}$) en niet van de zandfractie. Voor de stabiliteit en initiële transportrichting van de zandfractie is een aparte analyse gemaakt (zie paragraaf 5.2).

Het slibmodel is gebaseerd op het hydrodynamische model ScalOost (5^e generatie). Dit is een model dat in het verleden veel gebruikt is voor verschillende doeleinden, goed gevalideerd is en in het beheer en onderhoudssysteem van RWS is opgenomen. Voor de modelscenario's is de 2D versie gebruikt. Het is weliswaar een versimpeling om met diepte-gemiddelde waarden te rekenen in plaats van met verticale profielen, maar de Oosterschelde kent geen stratificatie. Hierdoor is dit model redelijk goed bruikbaar om een eerste indruk te krijgen van slibverspreiding (Van Duren et al., 2019). Het rekendomein is weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26. Rekendomein ScalOost 5e generatie.

Het model bevat geen uitwisseling met het Veerse meer, maar dit heeft nauwelijks invloed op de verspreiding van baggerspecie. Na het storten zinkt het merendeel van de baggerspecie snel naar de bodem als een dichtheidsstroming. Een klein deel mengt echter direct op en wordt direct meegevoerd door de stroming. Het model bevat geen *near-field* effecten zoals sediment gedreven dichtheidsstromingen. Bij de definitie van de brontermen wordt rekening gehouden met dit *near-field* gedrag door 90% van de bronterm aan de bodem toe te kennen en 10% aan de waterkolom. De specie op de bodem kan (voor zover niet afgedekt door latere stortingen) weer eroderen onder invloed van stroming en golven en alsnog bijdragen aan vertroebeling. Slib dat gestort werd en vervolgens elders terecht komt kan dus in het model ook weer opwervelen en zich opnieuw verder verspreiden.

Golven worden in het model berekend met een SWAN-model, integraal gekoppeld aan de hydrodynamische modellering. In de ondiepe gebieden in de oostelijke Kom van de Oosterschelde is de invloed van wind en golven relatief belangrijk ten opzichte van getijstroming. De berekende periode voor stroming en golven is 1 september tot 1 december 2013. Het golf- en stromingsmodel wordt geforceerd met winddata voor dezelfde periode afkomstig van het KNMI-station Stavenisse. Randvoorwaarden m.b.t. waterstanden en stroomsnelheden voor deze periode zijn afkomstig van het DCSMv6-ZUNOV4-model. De slibverspreiding wordt ontkoppeld berekend van de hydrodynamica met Delft3D-WAQ. Voor slibverspreiding in de periode na 1 december wordt de hydrodynamica cyclisch hergebruikt, d.w.z. de hydrodynamica vanaf 1 september wordt weer gebruikt.

Het rooster is curvi-lineair en heeft een resolutie van ongeveer 100×200 m in de oostelijke Kom van de Oosterschelde. Dit geeft voldoende resolutie om elke verspreidingslocatie van 20 hectare uit circa 10 roosterzellen te laten beslaan. Het model heeft twee bodemlagen, waarvan de bovenste laag eigenschappen heeft die deze laag gemakkelijk laten eroderen terwijl de onderste laag meer 'geconsolideerd' is en minder makkelijk erodeert.

Het erosie- en verspreidingsgedrag van de specie kent diverse onzekerheden. Naast de bovengenoemde beperkingen m.b.t. *near-field* bedrag en resolutie kunnen worden genoemd:

- De erosie-eigenschappen van de specie. Deze hangen mede af van de toegepaste bagger- en storttechniek. Deze onzekerheid is ondervangen door verschillende berekeningen te maken voor de boven- en ondergrens van de erosie-eigenschappen. Deze grenzen zijn mede gebaseerd op erosie-onderzoek door het NIOZ op slibmonsters uit de Zandkreekgeul (zie bijlage 2);
- Variaties in wind- en golfdynamiek. Tijdens perioden met harde wind en hoge golven treedt veel meer transport op dan tijdens rustige perioden. De transportrichting is bovendien sterk afhankelijk van de windrichting. Dit is ondervangen door het transport uit te rekenen over een periode van 3 maanden, waarbij het effect van variaties in wind- en golfbelasting wordt uitgemiddeld.
- De depositie-eigenschappen van slib. De snelheid waarmee slib na erosie en transport weer wordt afgezet op de bodem hangt o.a. af van de valsnelheid en de consolidatie- of mengsnelheid van de bodem. In het huidige model is gerekend met 1 slibfractie met een netto depositiesnelheid van 0.1 mm s^{-1} . Ervaring op basis van eerdere bagger- en verspreidingsstudies leert dat een dergelijke waarde het depositiegedrag het dichtst benadert. Een kanttekening is dat de effecten van filtratie van water door schelpdieren niet is meegenomen in de slibmodellering. Door filtratie kan de netto depositiesnelheid hoger worden.

5.1.2 Vier scenario's

Alle vier locaties hebben een afmeting van 20 ha. Bij een suppletievolume van 100.000 m³ betekent dit een laagdikte van 0.5 m. Figuur 23 en Figuur 24 tonen respectievelijk de locaties van de twee slibmotoren en de twee suppleties, namelijk:

- slibmotor oost (smot1)
- slibmotor west (smot2)
- suppletie laag (psup1)
- suppletie hoog (psup2)

Voor de eerste reeks verkennende scenario's zijn de volgende uitgangspunten en modelinstellingen gebruikt:

- duur verspreiding: 2 maanden (storten van 15 november tot 15 januari)
- totale simulatieduur: drie maanden (tot 15 februari)
- verdeling over de verticaal, slibmotor: 10% uniform verdeeld over de waterkolom en 90% aan de bodem (waar vandaan het sediment kan resuspenderen)
- verdeling over de verticaal: suppletie: 100% aan de bodem (waar vandaan het sediment in resuspensie kan gaan)
- effectieve valsnelheid (depositiesnelheid): 0.1 mm s⁻¹
- kritische schuifspanning (tau_cr) voor erosie: 0.2 Pa (slibmotor en plaatsuppletie) of 0.4 Pa (slibmotor) en 0.8 Pa (plaatsuppletie)
- erosieparameter: 0.1 g m⁻² s⁻¹
- suppletievolume 100.000 m³
- slibpercentage 46%
- de omrekening van volume sediment naar massa slib is als volgt: 1 m³ sediment = 1000 kg sediment = 460 kg slib.

Er is gekozen voor een hogere tau_cr ("lagere erosiesnelheid") voor de plaatsuppletie (0.8 Pa) dan voor de slibmotor (0.4 Pa), ingegeven door de mogelijke sterkere consolidatie op de plaat door droogval.

Voor deze startscenario's is voor de slibmotor en plaatsuppletie een gelijk slibpercentage gebruikt, namelijk het gemiddelde percentage in de baggerspecie uit de Zandkreek. Hiermee is een onderlinge vergelijking van deze scenario's makkelijker.

5.1.3 Van vier naar twee scenario's

De resultaten van deze startberekeningen zijn besproken en beoordeeld tijdens de deskundigenbijeenkomst van 18 november 2019. Resultaten van de eerste reeks berekeningen worden getoond in Bijlage 3. Het gaat om de maximale weekgemiddelde concentratieverhoging in de waterkolom (in mg l⁻¹) en om de opslibbing op de bodem aan het einde van de berekening (in g m⁻²). Op basis van deze berekeningen is tijdens de deskundigenbijeenkomst van 18 november 2019 een selectie gemaakt van de scenario's die verder worden uitgewerkt. Dit zijn de oostelijke variant van de slibmotor (slibmotor oost nabij de Oesterdam) en de laaggelegen suppletie (suppletie laag).

De westelijke variant van de slibmotor (nabij de Mosselkreek) is afgefallen omdat hiervoor meer verlies optreedt naar de geulen (en dus minder slib beschikbaar komt voor de platen) en omdat mogelijk negatieve effecten optreden voor de oesterpercelen bij de Hooge Kraaijer. De hoge variant van de suppletie is afgefallen omwille van het feit dat dit een complexe uitvoering is (lange persafstand van hopper naar suppletielocatie), en dat daardoor naar verwachting het beschikbare budget onvoldoende is om hier 100.000 m³ baggerspecie te plaatsen en een veel kleinere plaatsuppletie te weinig meerwaarde voor de natuur heeft.

Resultaten van de tweede reeks berekeningen worden eveneens getoond in bijlage 3. Bovendien zijn voor deze berekeningen nabewerkingen met GIS uitgevoerd om de

resultaten te tonen in de context van de gebruiksfuncties. Deze figuren zijn hieronder in de hoofdtekst opgenomen.

In Tabel 5 staat de afweging die geleid heeft tot de selectie van de twee varianten.

Tabel 5. Afweging van de vier scenario's.

Doel/draagt bij aan	Slibmotor oost nabij Oesterdam	Slibmotor west in Mosselgeul	Suppletie laag in het litoraal	Suppletie hoog in het litoraal
Behoud dvd areaal Wat komt er terecht tussen de 40-80% dvd	+	0	++	+++
	Uitdrukken in hoeveel er in de geul/dvd klassen terecht komt.	Uitdrukken in hoeveel er in de geul/dvd klassen terecht komt. Komt meer in de geul terecht.	Direct aanbrengen in litoraal. Zand blijft liggen. Slib deels op het slik en deels in de geul.	Direct aanbrengen in litoraal. Zand blijft liggen en blijft langer in litoraal dan lage suppletie. Slib deels op het slik en deels in de geul.
Versterking van schor	+	0	+	++
	Mogelijk wat voeding van slib op de schorren.		Mogelijks wat voeding van slib op de schorren.	Slib komt duidelijk op het schor terecht.
Impact op ander gebruik	0	--	--	-
	geen negatieve effecten verwacht.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen.	Mogelijks impact op nabijgelegen oesterpercelen, maar minder dan slibmotor-west en de suppletie-laag.
Ecologische verstoring aanleg	-	-	--	--
	De stortlocatie wordt verstoord. Lokaal bodemleven gaat dood, maar geen direct effect op het foerageergebied voor vogels.	De stortlocatie wordt verstoord. Lokaal bodemleven gaat dood, maar geen direct effect op het foerageergebied voor vogels.	Lokaal bodemleven gaat dood, rechtstreeks foerageergebied voor vogels beïnvloed.	Lokaal bodemleven gaat dood, rechtstreeks foerageergebied voor vogels beïnvloed.
Kosten/CO2	€€	€	€€€	€€€€
	Minder goed bereikbaar dan slibmotor west, waardoor waarschijnlijk duurder.	Waarschijnlijk goedkoopst, door bereikbaarheid.	Specie moet geperst worden met hopper.	Specie moet geperst worden met hopper. Door grotere afstand wschl. booster nodig. Ook meer CO2 (uitstoot groter door booster).
Kennis opbouw	++	+	+++	+++
	Ondanks innovatief en potentieel interessant, bestaat risico dat effecten op de natuur mogelijks moeilijk meetbaar zijn. Verwachte effecten op het litoraal wel groter dan slibmotor west.	Ondanks innovatief en potentieel interessant, heerst de indruk dat effecten op de natuur mogelijks moeilijk meetbaar of zelfs niet meetbaar zullen zijn.	Kennisopbouw wordt groot geacht, innovatie met hergebruik van slibrijk sediment voor natuurbouw. Meeste effecten goed meetbaar. Grote toekomstige potentie.	Kennisopbouw wordt groot geacht, innovatie met hergebruik van slibrijk sediment voor natuurbouw. Meeste effecten goed meetbaar. Grote toekomstige potentie.

Potentie herhaalbaarheid (1x/5jaar)	Slib uit haventjes en beschutte vaargeulen meer geschikt voor slibmotor. Komen waarschijnlijk op meer regelmatige basis beschikbaar.	Slib uit haventjes en beschutte vaargeulen meer geschikt voor slibmotor. Komen waarschijnlijk op meer regelmatige basis beschikbaar.	Meer zanderig materiaal zoals b.v. afkomstig uit vaargeulonderhoud van Brabants-vaarwater meer geschikt voor suppleties. Komen waarschijnlijk op minder regelmatige basis beschikbaar.	Meer zanderig materiaal zoals b.v. afkomstig uit vaargeulonderhoud van Brabants-vaarwater meer geschikt voor suppleties. Komen waarschijnlijk op minder regelmatige basis beschikbaar.
Conclusie	Natuurwinst nog onzeker, maar innovatief (weinig ervaring wereldwijd met slibmotoren), technisch haalbaar, en interessant voor kennisopbouw. Dit scenario is geselecteerd voor nader onderzoek binnen Natuur Impuls.	Natuurwinst wordt klein geacht (rel. weinig slib richting litoraal), terwijl mogelijke negatieve effecten kunnen optreden op nabije oesterpercelen. Is om deze reden niet geselecteerd voor nadere uitwerking t.b.v. Natuur Impuls.	Natuurwinst relatief groot, technisch haalbaar, innovatief en interessant voor kennisopbouw. Dit scenario is geselecteerd voor nader onderzoek binnen Natuur Impuls.	Natuurwinst groot maar technische haalbaarheid is een vraagteken. Complex in uitvoerbaarheid waardoor kosten naar alle waarschijnlijkheid hoog zullen oplopen. Is om deze reden niet geselecteerd voor nadere uitwerking t.b.v. Natuur Impuls.

5.1.4 Gedetailleerde uitwerking twee scenario's

Voor de uitwerking van de overgebleven twee scenario's is een verschillend slibpercentage gehanteerd voor de plaatsuppletie en de slibmotor, namelijk 30% voor de plaatsuppletie en 64% voor de slibmotor. Dit zijn namelijk de slibpercentages van respectievelijk het meest zandige en het meest slibrijke deel van 100.000 m³ van de beschikbare baggerspecie uit de Zandkreek (zie 4.2). Deze differentiatie is doorgevoerd met als doel de twee verschillende scenario's te optimaliseren. Door met minder slibrijk sediment te werken voor de suppletie zal het sediment, met name de aanwezige zandfractie, veel langer blijven liggen op de suppletielocatie, terwijl de slibfractie zich sneller zal verspreiden. Aangezien het voor een slibmotor juist de bedoeling is dat de slibfractie zich verspreid over een groter gebied, zal een groter slibpercentage, en daarmee een groter volume slib, leiden tot meer verspreiding van slib in het gebied. Van de zandfractie is de verwachting dat die veel minder mobiel is en langer ter plaatse zal blijven liggen (zie §5.2).

In de tweede set berekeningen is de slibmotor ook doorgerekend met 190.000 m³ (d.w.z. alle beschikbare specie uit de Zandkreek, met logischerwijs een slibpercentage van 46%, die zich tussen de 30% (suppletie) en 64% (kleine slibmotor met 100.000 m³) bevindt). Voor deze variant is ook gerekend met een dikte van 0.5 m, waardoor de afmeting van deze slibmotor 38 ha bedraagt. Een overzicht van alle uitgevoerde berekeningen is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Overzicht van alle slibverspreidingsberekeningen t.b.v. Natuur Impuls Oosterschelde. De berekening met code R08Z6S03 is al eerder uitgevoerd in het kader van de Zandkreekstudie (Van Duren, 2019) en is hierin ter referentie opgenomen. smot = slibmotor; psub = suppletie

Code	Locatie	Volume (m ³)	Areaal (ha)	Slib (%)	Hoeveelheid slib (kT)	Kritische schuifspanning (Pa)
<i>Modelberekeningen vier scenario's</i>						
R08PH2_1_S01	smot1	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S01	smot1	100.000	20	46%	46	0.4
R08PH2_1_S02	smot2	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S02	smot2	100.000	20	46%	46	0.4
R08PH2_1_S03	psub1	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S03	psub1	100.000	20	46%	46	0.8
R08PH2_1_S04	psub2	100.000	20	46%	46	0.2
R08PH2_2_S04	psub2	100.000	20	46%	46	0.8
<i>Modelberekeningen twee scenario's</i>						
R08PH2_2_64_S01	smot1	100.000	20	64%	64	0.2
R08PH2_2_64_S02	smot1	100.000	20	64%	64	0.4
R08PH2_3_S01	smot1	190.000	38	46%	87	0.2
R08PH2_3_S02	smot1	190.000	38	46%	87	0.4
R08PH2_2_30_S03	psub1	100.000	20	30%	30	0.2
R08PH2_2_30_S04	psub1	100.000	20	30%	30	0.8
<i>Referentie</i>						
R08Z6S03	O10	190.000	5	46%	87	0.2

5.1.5 Resultaten berekening slibverspreiding en potentiële effecten

De belangrijkste modeluitvoer is de verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom t.g.v. de verspreidingen en de extra aan- of opslibbing van de bodem die hierdoor ontstaat. Deze uitvoer is ruimtelijk en op diverse tijdstippen beschikbaar. De hier getoonde resultaten zijn de effecten direct na aanleg van het storten van het sediment (na 2 maanden) en aan het einde van de berekening (na 3 maanden).

Het model geeft voor de sliblaag op de bodem de massa per vierkante meter (kg m^{-2}). Om in te kunnen schatten wat dit voor effecten op de bodem geeft moet deze waarde omgerekend worden naar de laagdikte van slib. Dit kan echter variëren, afhankelijk van de toestand van het slib. Voor net afgezet en nog niet geconsolideerd slib is de dichtheid lager en dus de laagdikte groter, dan voor slib dat geconsolideerd is.

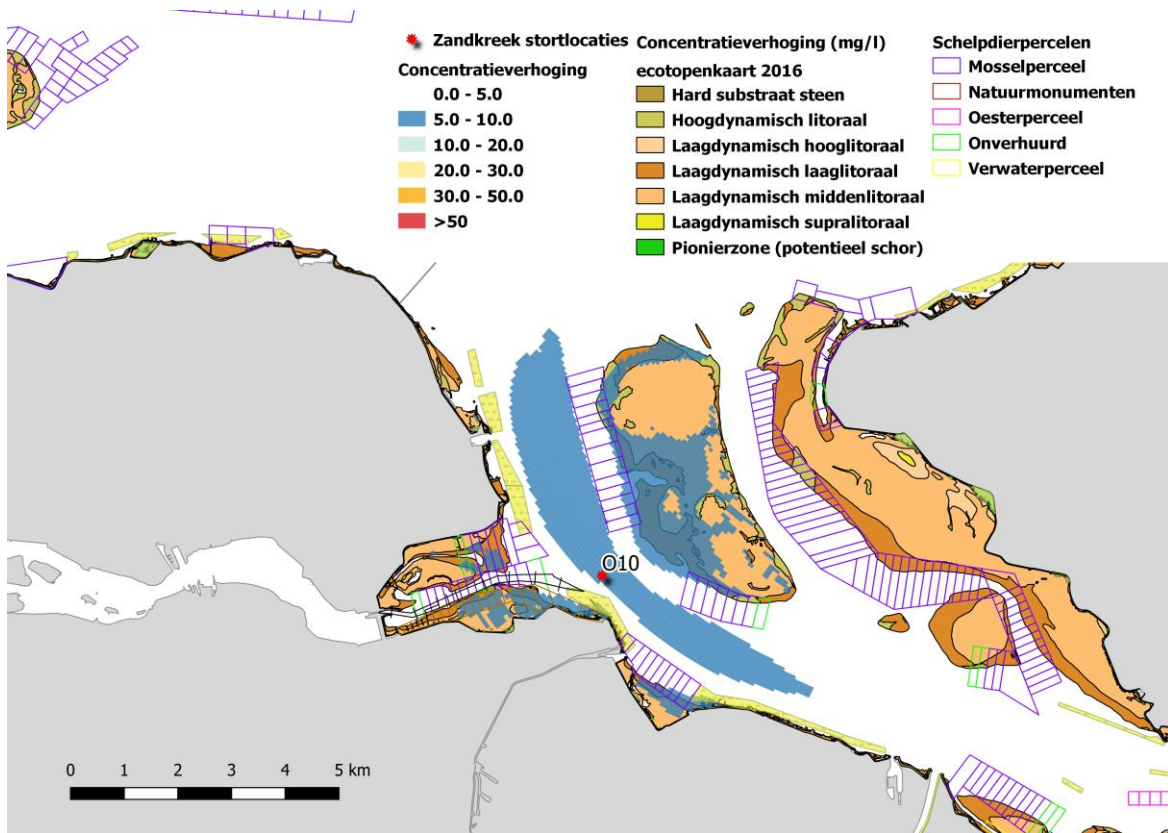
- Net afgezet slib: 1 kg m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 2,5 mm (droge bulkdichtheid van 400 kg/m^3).
- Geconsolideerd slib: 1 kg m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 1,25 mm (droge bulkdichtheid van 800 kg/m^3).

In de figuren is uitgegaan van net gestort slib, resulterend in de grootste laagdikte.

In de komende paragrafen worden de modelresultaten beschreven en een eerste indruk gegeven van de potentiële effecten op de omgeving (positief en negatief), met name effecten op de oesterpercelen. De onderliggende onderbouwing voor de effectbeoordeling is te vinden in eerdere rapportages m.b.t effecten van baggeren van enkele Oosterschelde havens (Van Duren et al., 2019a) en scenario's voor uitbaggeren van de Zandkreek, gebruikmakend van reguliere stortlocaties (Van Duren et al., 2019b). De effecten op natuur worden apart in hoofdstuk 6 beschreven. Effecten op waterkwaliteit van het aanwezige organische materiaal in de baggerspecie zijn niet meegenomen in de modelstudie. Volgens het waterbodemonderzoek is het percentage gemiddeld ca. 5% (percentages variëren tussen 2% en 7%). Vanwege dit relatief lage percentage wordt dit aspect niet als kritisch gezien en is in de modelstudie niet verder meegenomen.

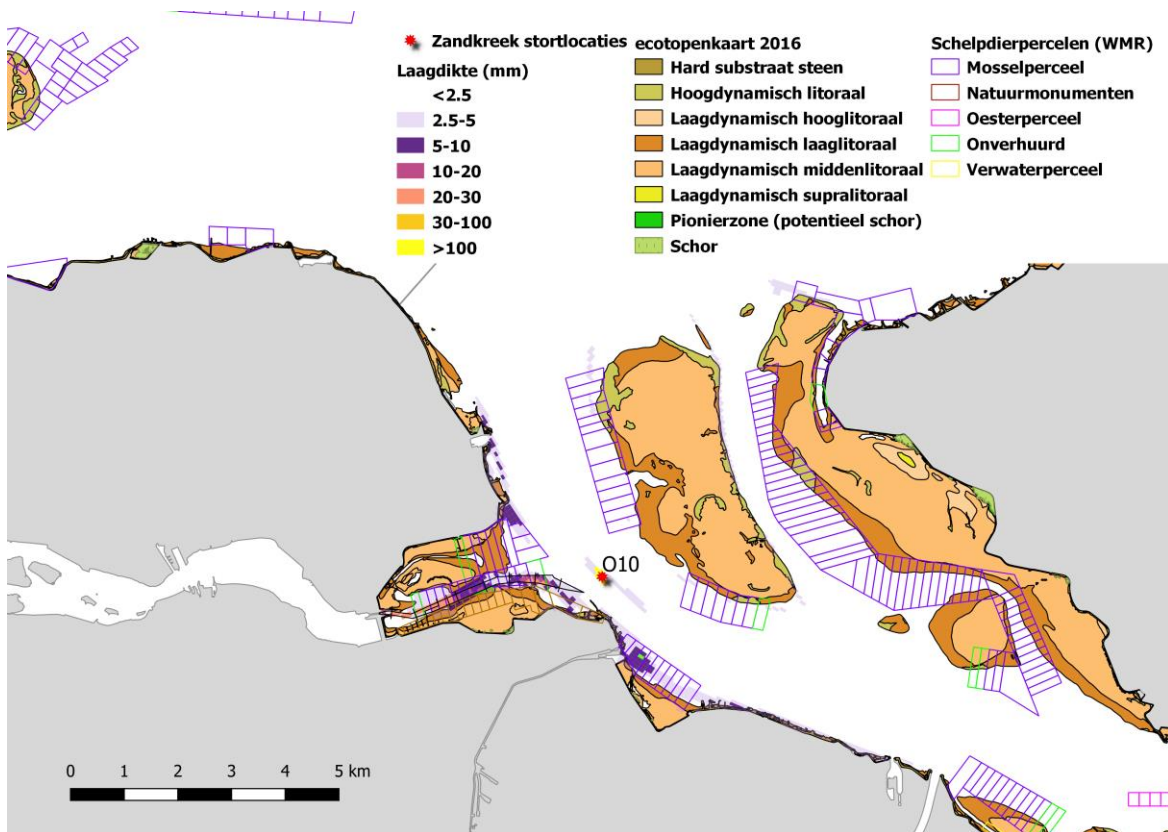
5.1.5.1 Resultaten referentie (R08Z6S03)

In dit scenario wordt alle beschikbare materiaal gestort in het stortvak O10 (Figuur 27). Dit was het scenario dat in een eerdere studie (waarin verschillende combinaties van storten in reguliere stortvakken werd onderzocht) de minste negatieve effecten op de omgeving gaf.



Figuur 27. Maximale weekgemiddelde concentratieverhoging in de waterkolom van scenario R08Z6S03.

In Figuur 27 is te zien dat dit scenario slechts in een beperkt deel een verhoging van de slibconcentratie geeft van tussen de 5 en 10 mg l⁻¹. Dit zijn effecten die vrijwel verwaarloosbaar zijn in termen van zowel natuur- als gebruikers functies (van Duren et al. 2019).

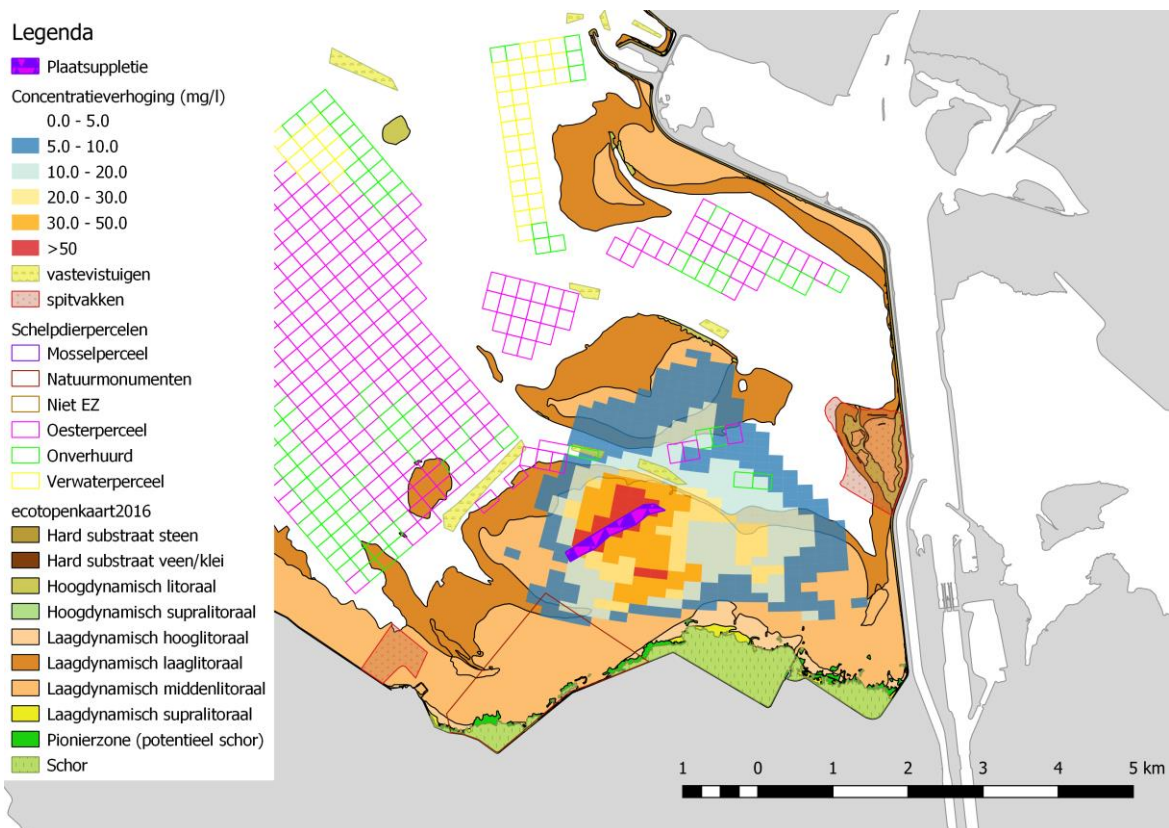


Figuur 28. Accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08Z6S03.

Ook de sliblaag die zich na 14 weken heeft afgezet op de bodem is alleen in de Zandkreek zelf (Figuur 28), rond de baggerlocatie rond de 30 mm dik en op gevoelige gebieden buiten de Zandkreek (het mosselperceel ten zuiden van de stortlocatie) is de accumulatie van slib net iets meer dan 3 kg m⁻². Dit komt overeen met een laagdikte van 8 mm ongeconsolideerd slib. Dit is een hoeveelheid die, als dit in één keer op een mosselbank terecht komt mogelijk wel schadelijk is. Verdere analyses hebben echter aangetoond dat de ophogingssnelheid niet meer is dan ongeveer 0.5 mm per week. Dit is een depositiesnelheid die ruim binnen de marges valt die mosselen aankunnen zonder negatieve effecten (Bijkerk, 1988).

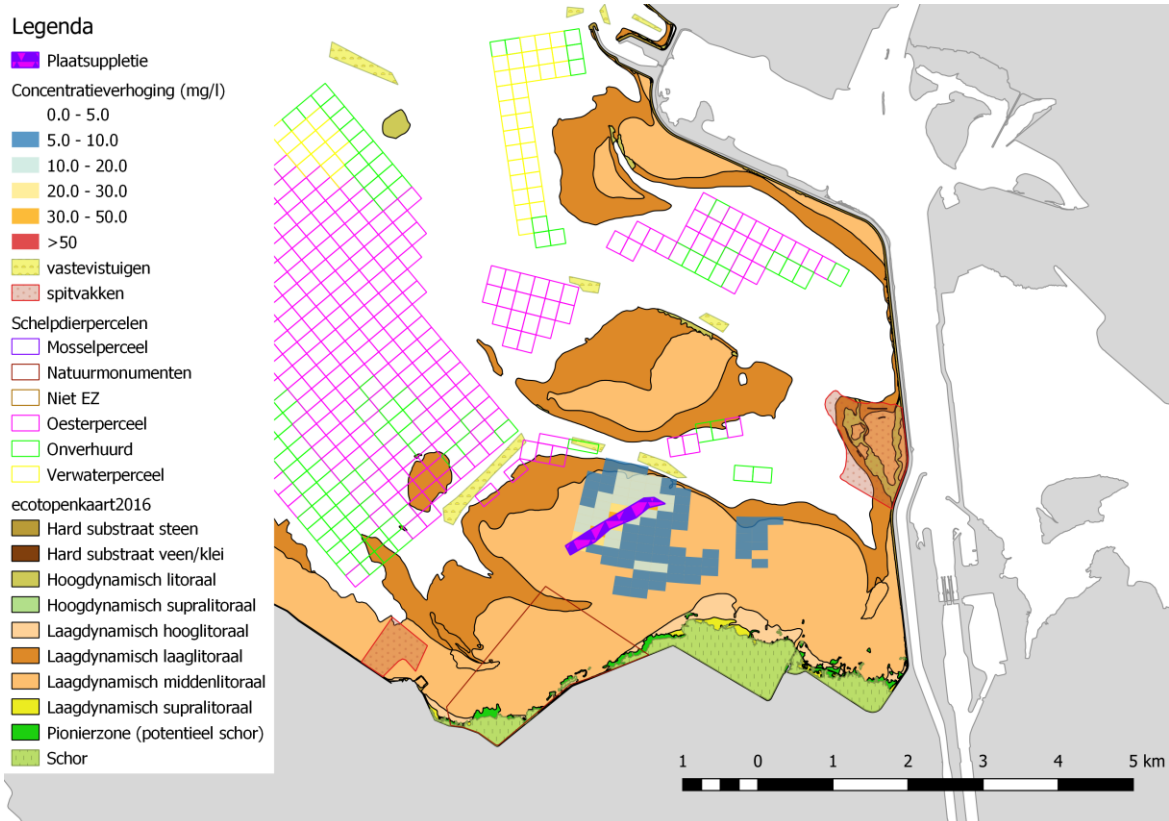
5.1.5.2 Resultaten suppletie (laag in het litoraal) met 30% slib

Van de verschillende plaatsuppletie scenario's wordt alleen het resultaat getoond van de simulatie met een volume van 100.000 m³ en 30% slibgehalte voor de suppletie die laag in het litoraal wordt aangebracht. Aangezien het de bedoeling is dat een plaatsuppletie relatief lang blijft liggen, ligt het niet voor de hand een suppletie uit te voeren met een hoger slibpercentage, als er materiaal met een lager percentage slib voorhanden is.



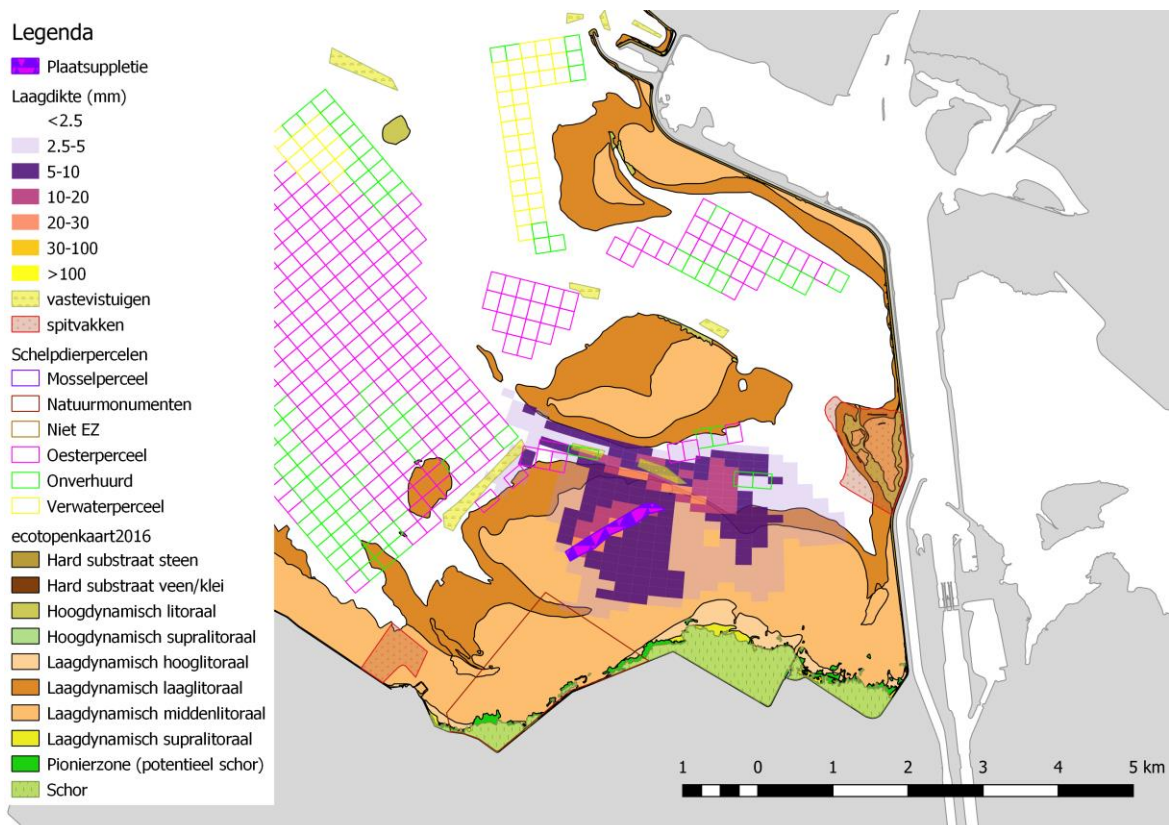
Figuur 29. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie met een lage kritische schuifspanning).

Figuur 29 toont het resultaat van de modelsimulatie voor een suppletie met een lage kritische schuifspanning en Figuur 30 het vergelijkbare scenario maar met een hogere kritische schuifspanning. De inschatting van experts is dat in werkelijkheid de waarden hier tussenin zullen liggen. Aangezien een plaatsuppletie uitgevoerd wordt door het opspuiten/persen van de baggerspecie, waarbij het zand-slibmengsel met water wordt vermengd, zal het werkelijke effect waarschijnlijk dichterbij Figuur 29 liggen dan bij Figuur 30.

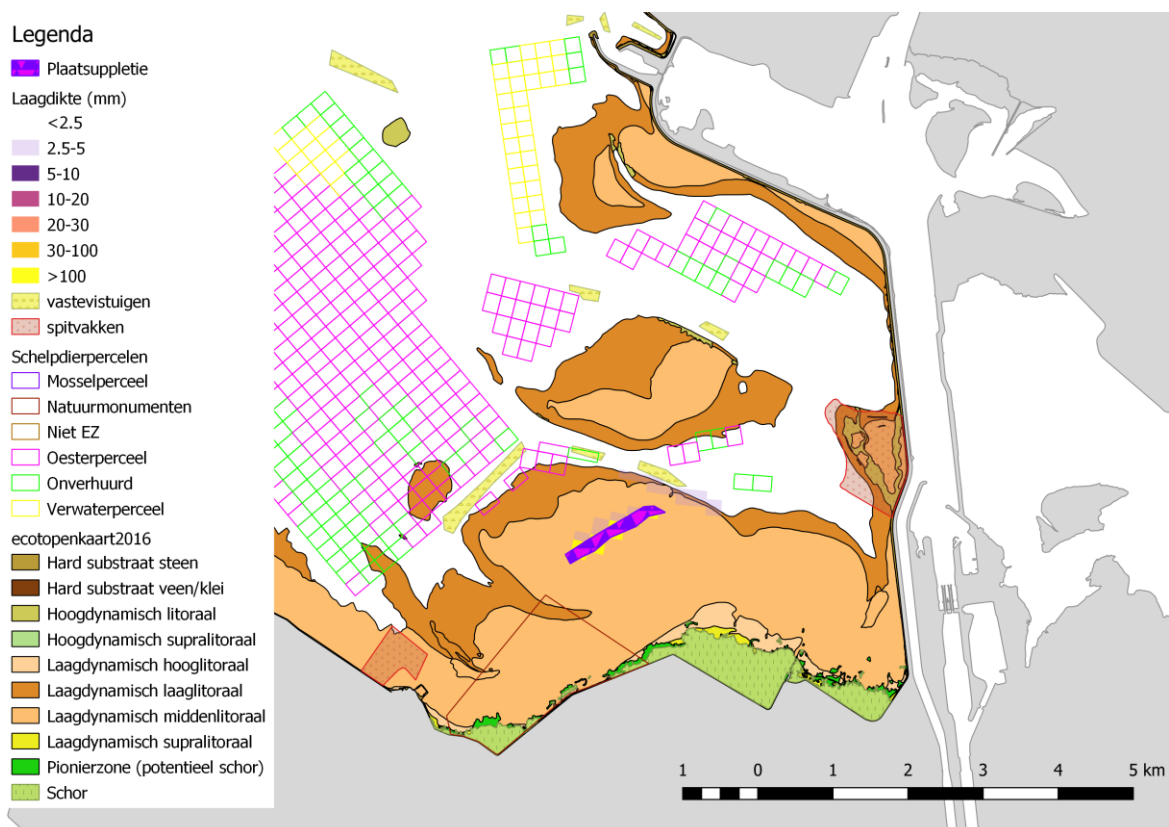


Figuur 30. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie met een hoge kritische schuifspanning).

In Figuur 31 en Figuur 32 wordt de berekende laagdikte weergegeven in de suppletiescenario's met hoge en lage verspreidingsnelheid. Bij de hoge kritische schuifspanning is zeer weinig verspreiding in de simulatieperiode waar te nemen. Bij de lage kritische schuifspanning komt er wat materiaal op en vlak in de buurt van oesterpercelen terecht, met een laagdikte van < 10 mm.

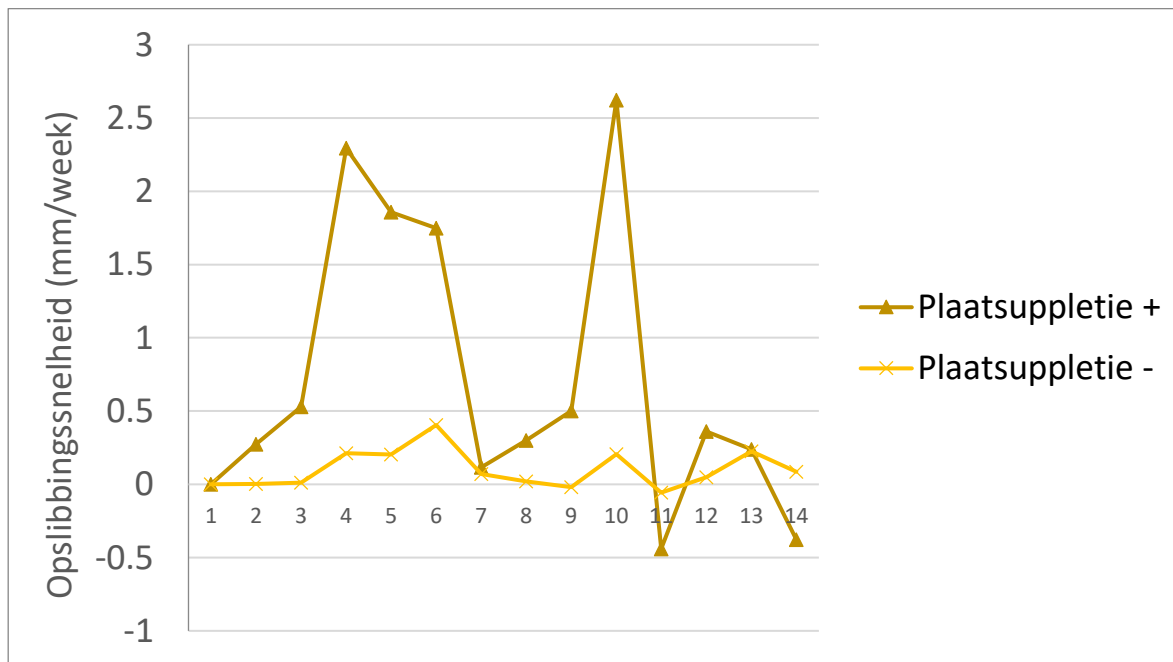


Figuur 31. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie met een lage kritische schuifspanning).



Figuur 32. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode in scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie met een hoge kritische schuifspanning).

De grootste hoeveelheid (op een perceel) komt op een onverhuurd perceel terecht. Hier is na 14 weken ongeveer een centimeter slib op terecht gekomen. De opslibbingssnelheid wisselt sterk per week, vooral omdat slibverspreiding hier sterk onderhevig is aan de wind. Echter in de gekozen periode komt de ophogingssnelheid ook op dit perceel net boven de 2.5 mm per week (Figuur 33). Een snelheid die oesters zonder problemen aan moeten kunnen (Bijkerk 1988).



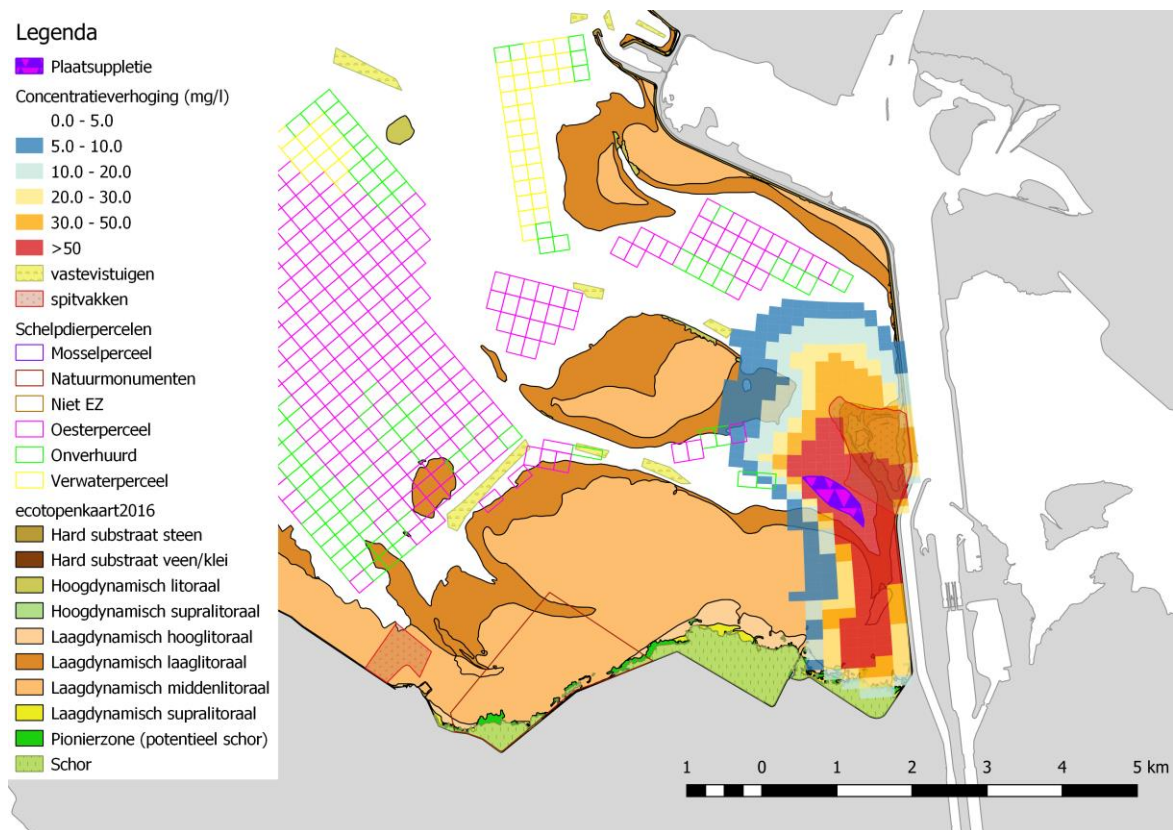
Figuur 33 Opslibbingssnelheden voor de gemodelleerde plaatsuppletie met hoge (+) en lage (-) verspreidings-snelheid. Op de x-as staan de 14 (gemodelleerde) weken.

5.1.5.3 Resultaten sedimentmotor met 64% slib

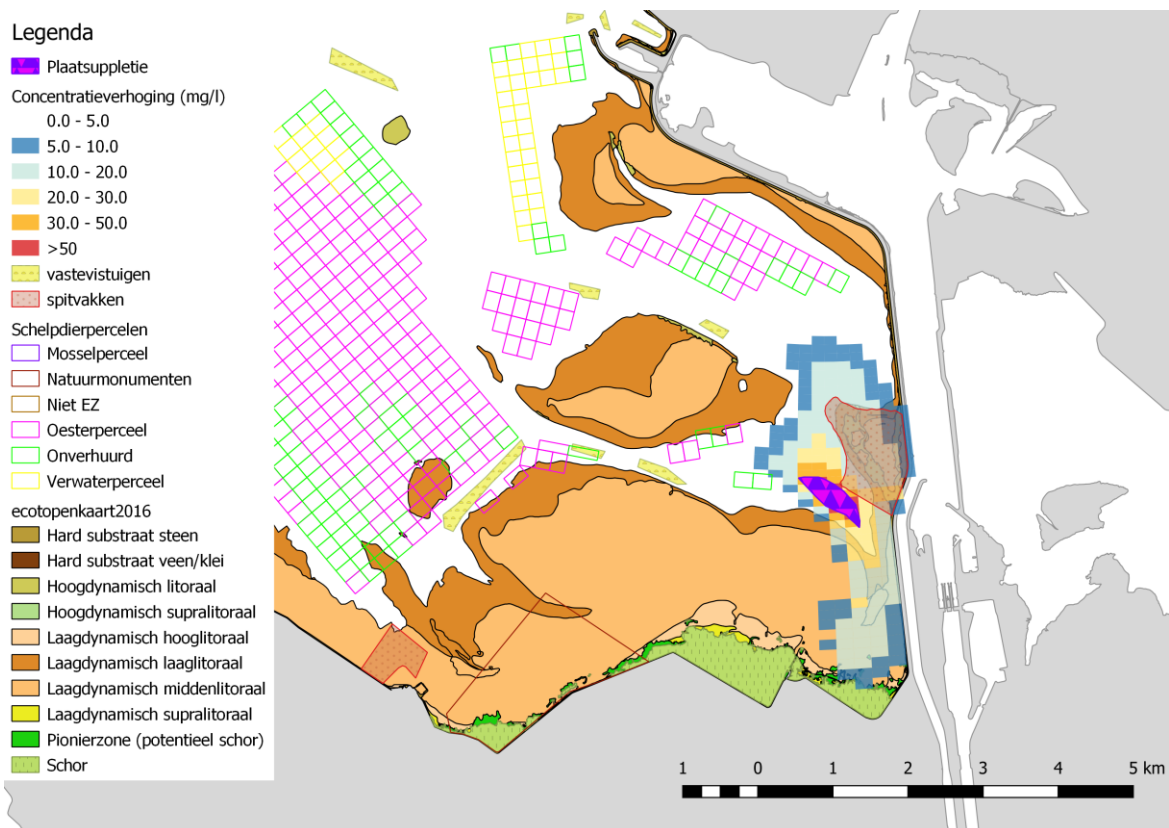
Van de verschillende sedimentmotorscenario's wordt alleen het resultaat getoond van de simulatie met een volume van 100.000 m³ en 64% slibgehalte. Bij een sedimentmotor (ofwel hier: slibmotor) is het de bedoeling dat materiaal relatief gemakkelijk verspreidt.

De slibmotorvarianten geven zoals verwacht een veel sterkere verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom dan de suppletie vanwege het grotere slibaanbod. De slibpluim strekt zich in deze simulatie uit langs de oostrand van de kom langs de Oesterdam. In het scenario met een lage kritische schuifspanning kunnen boven het litoraal langs de Oesterdam concentratieverhogingen voorkomen van meer dan 50 mg l⁻¹ (Figuur 34). Dit is een sterke verhoging die voor veel filter feeders negatieve effecten kan geven. In de variant met hoge kritische schuifspanning is de concentratieverhoging veel lager en komen de zeer hoge concentraties alleen voor vlak boven de stortlocatie (Figuur 35).

De slibmotor variant zal worden aangebracht ofwel met een kraanschip of door te "kleppen". Hierbij wordt het sediment niet sterk met water opgemengd en zal het zich meer geconsolideerd gedragen. Voor deze variant is dan ook de inschatting dat de uiteindelijke effecten meer richting Figuur 35 zullen gaan dan Figuur 34.



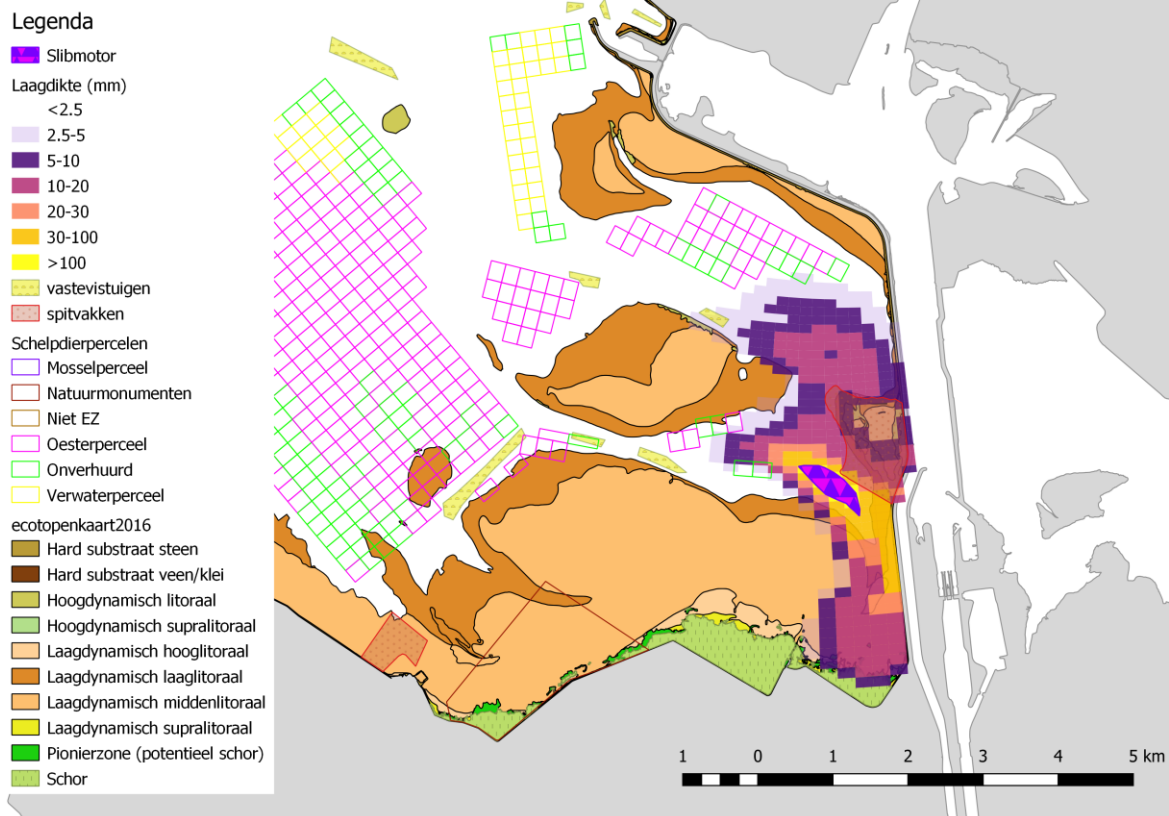
Figuur 34. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor met een lage kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.



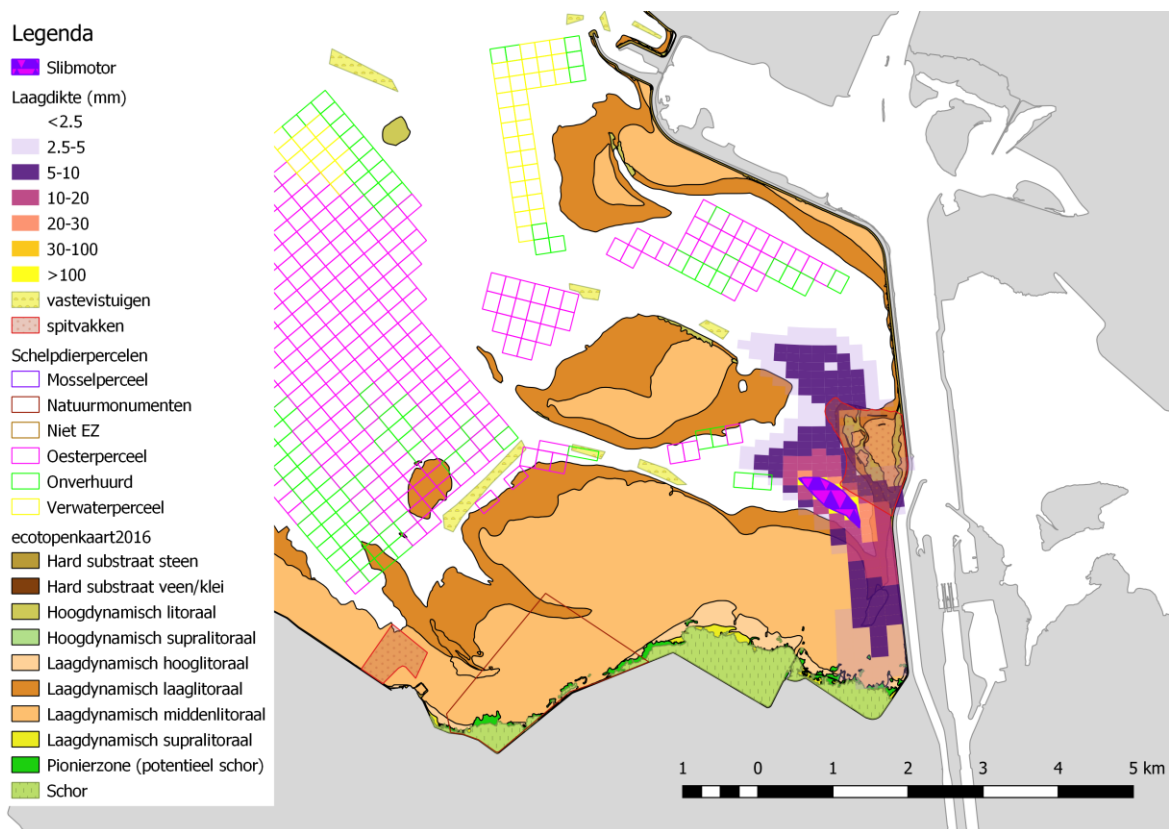
Figuur 35 Berekende verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor met een hoge kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

Figuur 36 toont de berekende laagdikte op de bodem in het slibmotor scenario met de lage kritische schuifspanning. Dit scenario geeft weinig effecten op schelpdierpercelen, maar veroorzaakt wel een zeer sterke opslibbing langs de rand van het intergetijdengebied. Op de rand van het pierensteekgebied komt 12 tot 20 kg m⁻² terecht. Verderop op het pierensteekgebied is dit veel minder (Figuur 36). Naar het zuiden toe verspreid het slib zich tot aan de rand van het schor. Aan de rand van het schor is de laagdikte beperkt tot 5 mm (niet geconsolideerd slib). Op de delen die dichter naar de rand van het slik liggen varieert de laagdikte tussen de 1 en 2 centimeter (5-10 kg m⁻²).

In het vergelijkbare scenario met hogere kritische schuifspanning is dit veel minder (Figuur 37). Langs het schor is de laagdikte beperkt tot enkele millimeters en alleen aan de rand van het slik komt een laag van 1-2 centimeter terecht. Ook langs de rand van het pierensteek gebied is de opslibbing veel minder groot en zal weinig problemen veroorzaken voor zowel bodemdieren als risico voor mensen om daar vast te komen zitten.



Figuur 36 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor met een lage kritische schuifspanning).

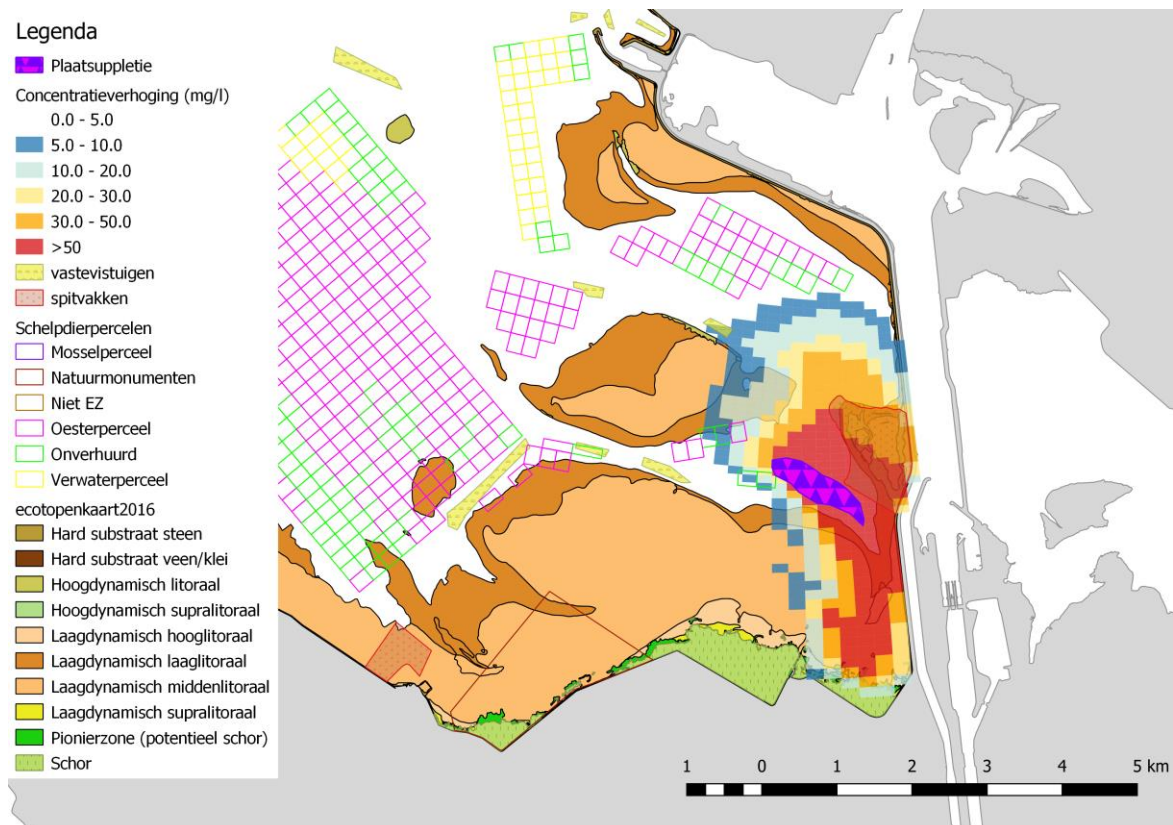


Figuur 37 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor met een hoge kritische schuifspanning).

5.1.5.4 Resultaten vergrootte sedimentmotor met 46% slib

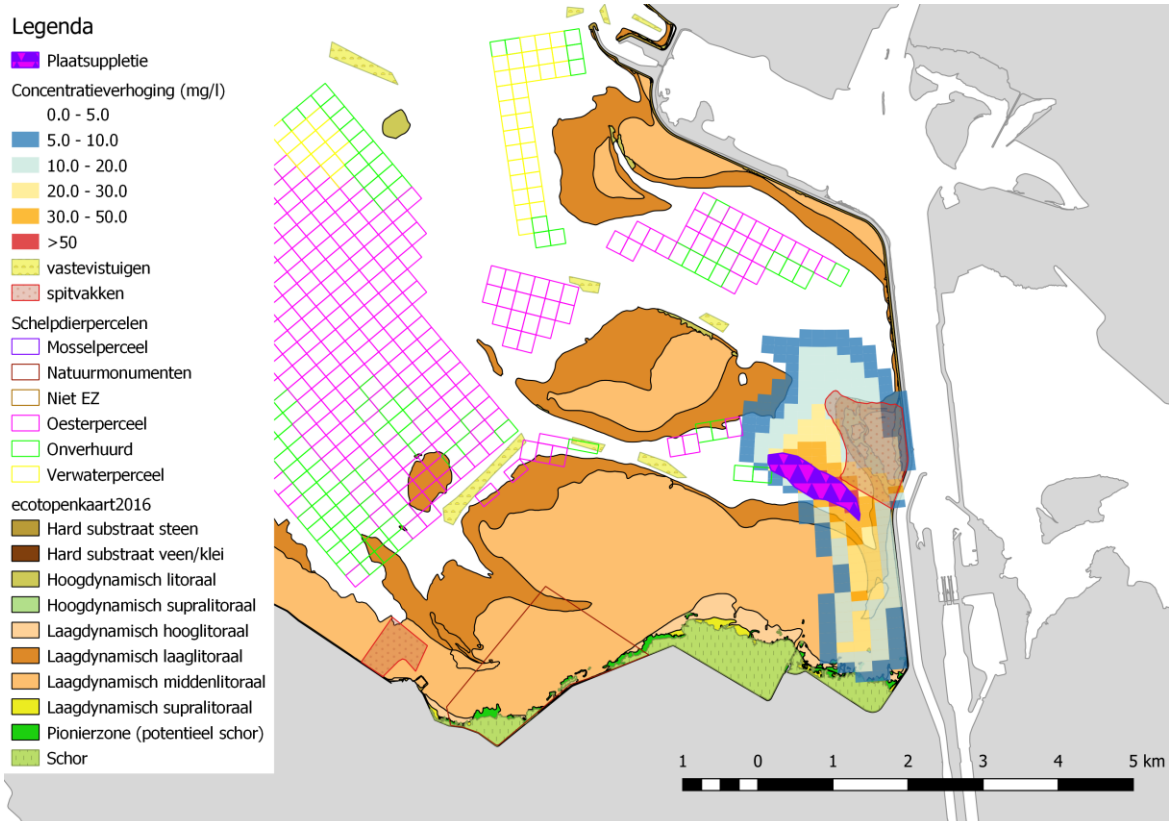
Indien alle baggerspecie van de Zandkreek wordt gebruikt voor een sedimentmotor is er geen keuzemogelijkheid voor een bepaalde slibconcentratie. Dit wordt dan automatisch de gemiddelde concentratie in de zandkreek.

De resultaten van de simulatie met een lage kritische schuifspanning zijn vrij vergelijkbaar met de resultaten van de kleinere slibmotor met 64% slib (38 ha t.o.v. 20 ha voor de kleine slibmotor). Enerzijds zit er minder slib in het mengsel, anderzijds is het oppervlak van waaruit slib verspreidt groter. De effecten op vertroebeling zijn iets groter en reiken iets verder dan in de R08PH2_2_64_S01-simulatie (Figuur 38). In de simulatie met de vergrote slibmotor komen ook boven enkele oesterpercelen verhoogde concentraties voor tussen de 10 en 15 mg l⁻¹. Een concentratie die niet meteen tot conditieverslechtering zal leiden zolang de effecten niet meer dan een paar weken aanhouden. Dat is niet het geval.



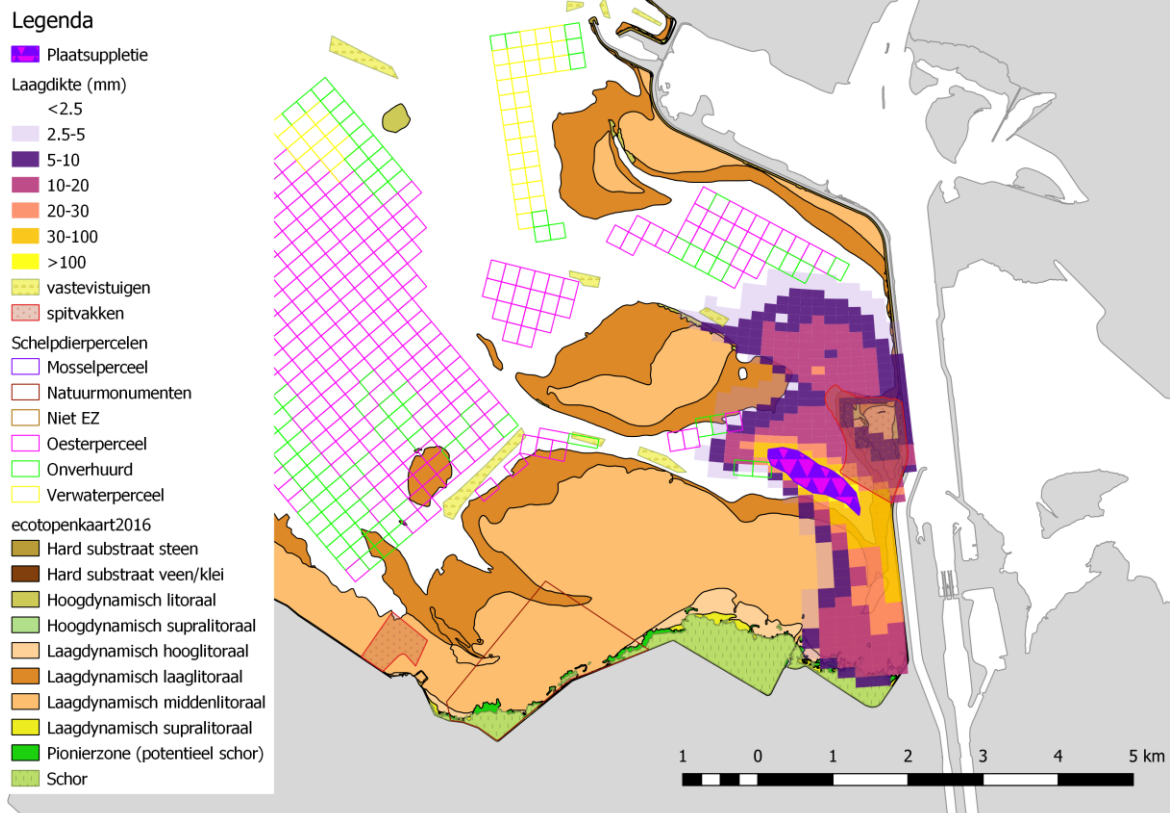
Figuur 38. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_3_S01 (vergrote slibmotor met een lage kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

In het scenario met de hogere kritische schuifspanning zijn de concentratieverhogingen aanmerkelijk minder (Figuur 39). Hier wordt vrijwel geen (minder dan 5 mg l⁻¹) verhoging berekend boven gevoelige gebieden zoals oesterpercelen en komen extreem hoge concentratieverhogingen (>50 mg l⁻¹) alleen voor pal boven de stortlocatie.

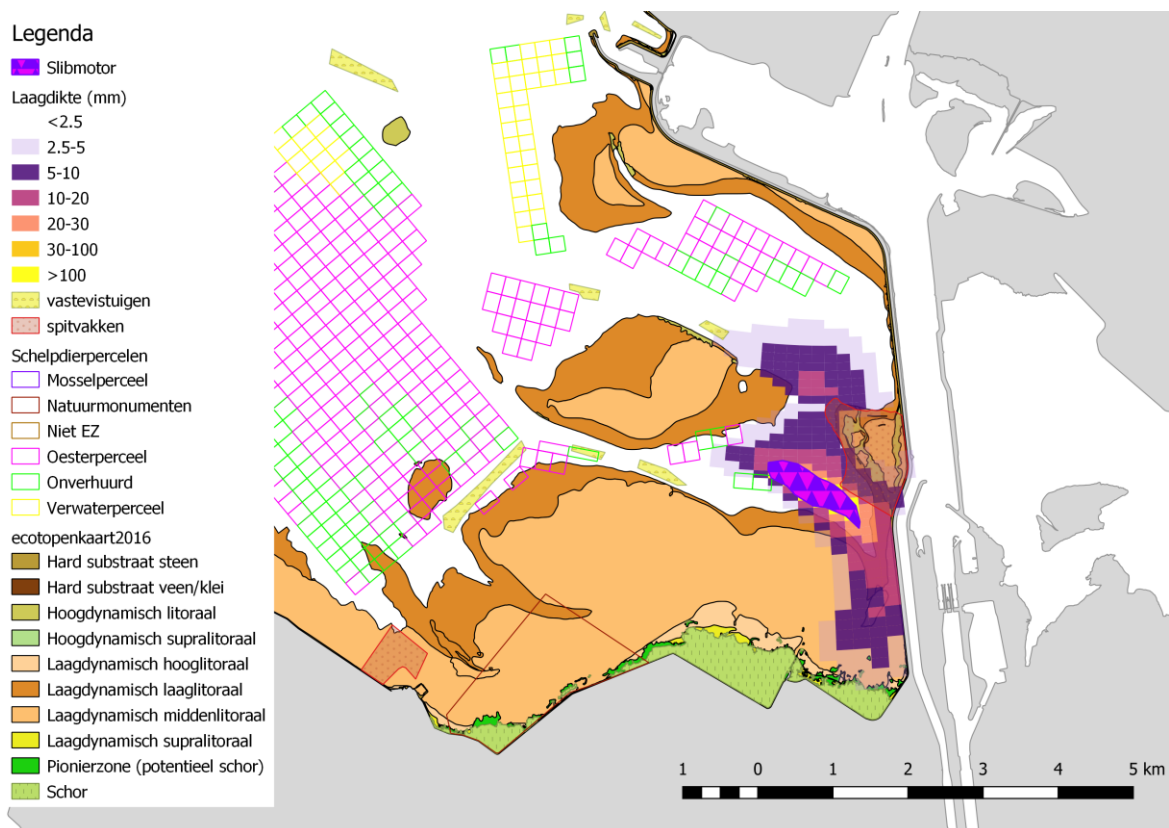


Figuur 39. Maximale weekgemiddelde verhoging van slibconcentratie in de waterkolom van scenario R08PH2_3_S02 (vergroete slibmotor met een hoge kritische schuifspanning). Weekgemiddelde van week 13 – de week met de hoogste concentraties in de waterkolom.

Ook op de bodem zijn de effecten van de vergroete slibmotor na 14 weken zeer vergelijkbaar met de kleinere slibmotor. Ook hier komt in de berekening met een lage kritische schuifspanning op de rand van het pierensteek gebied een behoorlijk dikke laag slib (Figuur 40) die mogelijk bepaalde bodemdier soorten kan verstikken. Door het slappe slib houdt dit mogelijk ook een klein risico in voor mensen die het gebied betreden. Er lijken geen problematische sliblagen te komen op verhuurde oesterpercelen. Op het onverhuurde oesterperceel dat precies op de rand van het stortgebied ligt kan wel materiaal terecht komen. Het model voorspelt alleen aan de rand van dit perceel een opslibbing van enkele centimeters, maar aangezien dit onverhuurde perceel exact op de rand van het stortgebied ligt, moet hier toch rekening gehouden worden met enig effect, vanwege modelonzekerheid en de precisie waarmee in de praktijk gestort kan worden. Hoewel de verspreiding in het scenario met de hogere kritische schuifspanning veel minder is (Figuur 41), geldt dit laatste ook voor dit scenario. In het scenario met de lage kritische schuifspanning komt er aan de rand van het schor aan de zuidkant van de slibmotor ongeveer 1 à 2 cm slib terecht. In het scenario met de hoge kritische schuifspanning is dit net boven de 2.5 mm. In het scenario met hoge verspreidingssnelheid komt er op een groot deel van het slik een laag van 1-3 cm. Aan de rand van het slik aan de zuidkant is dit nog meer. Daar komt tot 26 kg m⁻² ofwel een laag van 10 cm dik (ongeconsolideerd). In het scenario met lage verspreidingssnelheid is dit beperkt tot 2 à 3 cm op de rand en enkele millimeters tot een centimeter verder op het slik.

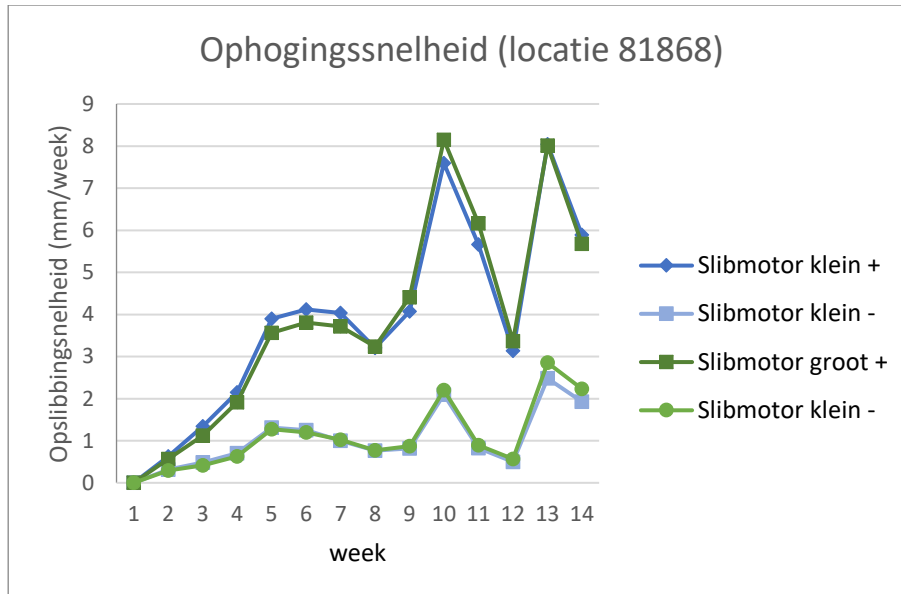


Figuur 40 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_3_S01 (vergroete slibmotor met een lage kritische schuifspanning).



Figuur 41 Berekende laagdikte van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode van scenario R08PH2_3_S02 (vergroete slibmotor met een lage kritische schuifspanning).

Op het zuidwestelijke puntje van het pierensteekgebied is de opslibbingssnelheid per week bepaald (Figuur 42). Beide slibmotorvarianten geven in de scenario's met lage kritische schuifspanning lokaal een opslibbingssnelheid van rond de 8 mm per week. Voor sommige biota (o.a. schelpdieren) kan dit tot verstikking leiden. De versies met de hoge kritische schuifspanning komen maximaal tot 3 mm per week ofwel iets meer dan een cm per maand. Voor sommige schelpdiersoorten begint dit kritisch te worden. De meeste andere biota hebben daar weinig problemen mee (Bijkerk, 1988).



Figuur 42 Opslibbingssnelheden op de zuidrand van het pierensteekgebied in de vier slibmotor scenario's. Scenario's met '+' zijn met lage kritische schuifspanning en scenario's aangeduid met '-' zijn met hogere kritische schuifspanning berekend.

5.1.6 Conclusies t.a.v. de scenario's en de effecten

Bij al deze scenario's is het goed te bedenken dat de modellen voor 14 weken gedraaid zijn. Aan het eind van de modelperiode ligt er nog steeds een hoeveelheid materiaal op de stortlocatie (afhankelijk van het scenario) van waaruit de verspreiding nog maanden lang verder zal gaan. Het effect van het verschil in kritische schuifspanning voor de verschillende scenario's kan ook vertaald worden naar wat er in de tijd gebeurt met de verspreiding op de bodem: in het geval van de hoge kritische schuifspanning heeft maar een beperkt deel van het beschikbare slib zich verspreid, in het geval van de lage kritische schuifspanning het overgrote deel van het beschikbare slib. M.a.w., het scenario met de lage kritische schuifspanning geeft een goede indicatie van de eindverspreiding van het slib.

Zeker voor de slibmotorvarianten waar een vrij dikke laag materiaal aan de rand van een gebied terecht komt waar mensen regelmatig lopen (pierenstekers) zal hier mogelijk rekening mee gehouden moeten worden. Een deel van het slib zal samen met het zandige materiaal consolideren en langere tijd vastgelegd worden, maar over verloop van tijd zal dit materiaal vrijkomen en ofwel onderwater ofwel litoraal terechtkomen.

In dit deel van de Oosterschelde is slibdynamiek zeer sterk beïnvloed door de golven en dus wind. Dit betekent dat de modelvoorspellingen sterk kunnen afhangen van de gekozen periode. In een veel kalmere periode zal verspreiding langzamer gaan, in een stormachtige periode zal verspreiding sneller gaan. In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar. Enerzijds is de modelinstelling met de lage kritische schuifspanning vrijwel zeker een worst-case benadering en is het niet waarschijnlijk dat verspreiding veel sneller zal verlopen. Ondanks dat moet toch ook met

deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

5.2 Zand

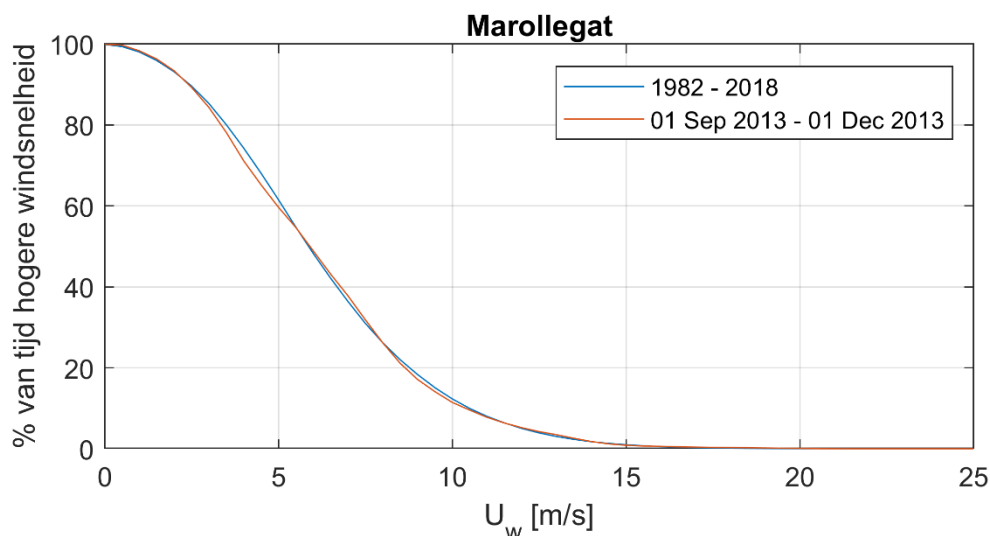
5.2.1 Aanpak

De zandtransporten ter plekke van de oostelijke sedimentmotor en de lage suppletie zijn berekend met de formules van Van Rijn (2007a,b). Deze transportformuleringen maken onderscheid tussen bodem- en suspensietransport, en nemen de invloed van stroming en golven mee. Het is een veel gebruikte formule gebaseerd op een grote hoeveelheid lab- en veldmetingen.

Er wordt gerekend met de karakteristieke korrelgroottes $[D_{10}, D_{50}, D_{90}] = [0,07 \text{ } 0,13 \text{ } 0,23] \text{ mm}$, op basis van de bodemonsters uit de Zandkreek (zie paragraaf 4.2).

Representativiteit van de rekenperiode 1 september tot 1 december 2013

De zandtransporten worden uitgerekend op basis van met Delft3D berekende waterbeweging voor de periode 1 september tot 1 december 2013 (zie paragraaf 5.1). Figuur 43 laat zien dat de windsnelheden bij het Marollegat (Kom van de Oosterschelde, ten noorden van de projectlocatie) gedurende deze periode niet sterk afwijken van een langjarige periode (1982-2018). De gesimuleerde periode kan dus als representatief worden beschouwd in termen van de grootte van de windsnelheid.



Figuur 43. Vergelijking windsnelheden bij het Marollegat gedurende de gesimuleerde periode (1 september – 1 december 2013) en gedurende een langjarige periode (1982-2018).

Effect van slib op erodeerbaarheid zand

De aanwezigheid van slib, in het bijzonder van kleideeltjes, oefent een cohesieve kracht uit waardoor zanddeeltjes moeilijker geërodeerd kunnen worden. Volgens Van Rijn (2007a) kan dit effect als volgt worden meegenomen:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{mud})^3 \tau_{cr,0} \quad (0.1)$$

met $\tau_{cr,0}$ de kritische schuifspanning van niet-cohesief zand (i.e. zonder slib), p_{mud} het percentage klei- en siltdeeltjes ($< 62 \mu\text{m}$) in de bodem en $\tau_{cr,bed}$ de kritische schuifspanning van zanddeeltjes in een bodem met slib. Deze vergelijking laat zien dat

de aanwezigheid van slib (in het bijzonder klei) zorgt voor een toename van de kritische bodemschuifspanning, i.e. het zand komt minder snel in beweging.

De berekende $\tau_{cr,0}$ voor zand met een D50 van 0,13 mm is 0,14 Pa. 30% slib zorgt volgens Vgl. (1.1) voor een toename met een factor 2,2, i.e. $\tau_{cr,bed} = 0,31$ Pa. De laatste waarde valt in de range van de kritische schuifspanning zoals gehanteerd in de slibberekeningen (0,2-0,8 Pa).

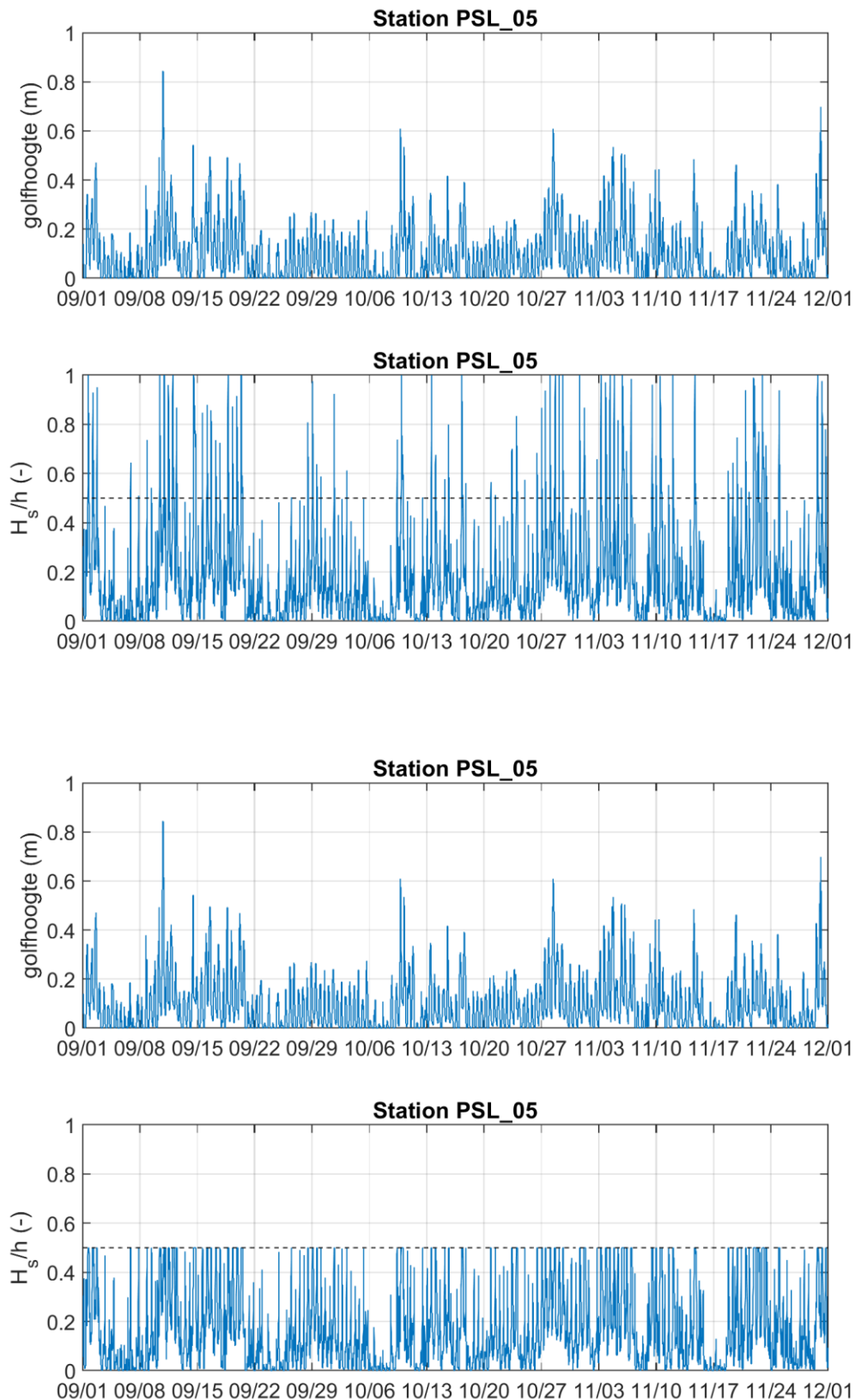
De lage kritische bodemschuifspanning voor zand is een bovengrens van de zandtransportberekeningen, de hoge kritische schuifspanning een ondergrens. Na aanleg zal de hogere $\tau_{cr,bed}$ representatief zijn door de aanwezigheid van slib. Pas na verloop van tijd, als het slib uitgespoeld wordt, zal de lagere $\tau_{cr,bed}$ meer representatief zijn.

Verhouding golfhoogte en waterdiepte

De golfhoogte wordt gelimiteerd door de waterdiepte. Uit metingen en modellen blijkt de verhouding tussen beide (γ) voor flauw-hellende intergetijdengebieden als in de Oosterschelde ongeveer 0,5 te zijn (De Vet et al., 2018), oftewel bij 1 m waterdiepte is de golfhoogte gelimiteerd tot 0,5 m.

De Delft3D berekeningen geven hogere golfhoogtes, met name rondom laagwater (**Error! Reference source not found.**). We hebben voor de zandtransportberekeningen de golfhoogtes afgekapt met $\gamma = 0,5$. De grootste golven traden op tijdens hoogwater, waardoor het effect van $\gamma = 0,5$ niet sterk zichtbaar is in de golfhoogtes, maar wel in de verhouding met de waterdiepte.

Het afkappen van de golfhoogtes met $\gamma = 0,5$ zorgt voor een afname van de zandtransporten bij de plaatsuppleties met ~20-30%. Dit effect is relatief beperkt omdat de hoogste golfhoogtes niet diepte-gelimiteerd zijn, want optreden tijdens hoogwater. De diepte-limitering van de golfhoogte heeft geen effect op de sublitorale sedimentmotor, vanwege de grotere waterdiepte.



Figuur 44. De berekende golfhoogte op een locatie ter plekke van de plaatsuppletie. Boven: niet afgekapt; onder: afgekapt met een $\gamma = 0,5$.

Onzekerheid zandtransportberekeningen

Een bron van onzekerheid wordt gevormd door de relatief lage resolutie van het SCALOOST model. Hierdoor is de ruimtelijke variatie in de berekende zandtransporten waarschijnlijk te laag. De hydrodynamische input komt van de SCALOOST berekeningen voor de referentiesituatie. Dit betekent dat het effect van de suppletie op de stroming,

golven en zandtransporten niet wordt meegenomen. Een typische onzekerheidsmarge van de brekende zandtransporten is een factor 2. Door middel van kalibratie op basis van veldmetingen zou de modelonzekerheid verkleind kunnen worden

Vertaling zandtransporten naar morfologische ontwikkeling

Om een idee te krijgen van de morfologische tijdschaal van de suppletie, is het analytische model van Ribberink (2004) toegepast. Dit berekent de verplaatsingssnelheid en uitdovingstijd van een kleine bodemverstoring op basis van netto zandtransporten:

$$c_{bed} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_0)h_0} \left\{ 3q_{b_0}^c + \frac{4q_{s_0}^c}{L_A^2 k^2 + 1} \right\}$$

$$T_{bed} = (1 - \varepsilon_0)h_0 \left\{ L_A k^2 \frac{4|q_{s_0}^c|}{L_A^2 k^2 + 1} + \frac{k^2 h_0}{\tan \varphi} |q_{b_0}^c| \right\}^{-1}$$

met $\varepsilon_0 = 0,4$ de bodemporositeit, h_0 de waterdiepte in de ongestoorde situatie, L_A de aanpassingslengte van het suspensietransport, $k = 2\pi / L_{bed}$ het golfgetal van de bodemverstoring met lengte L_{bed} , $q_{s_0}^c$ het netto suspensietransport in de ongestoorde situatie, $\tan(\varphi) = 0,63$ met φ de natuurlijke rusthoek van zand en $q_{b_0}^c$ het netto bodemtransport in de ongestoorde situatie. Hierbij wordt het eventuele effect van de bodemhelling op suspensietransport niet meegenomen.

Deze vergelijkingen laten zien dat een bodemverstoring sneller migreert en uitdooft bij grotere zandtransporten.

De aanpassingslengte van suspensietransport wordt berekend met:

$$L_A = \hat{L} \frac{u_0 h_0}{w_s}$$

met coëfficiënt $\hat{L} = 0,5$, u_0 is de stroomsnelheid in de ongestoorde situatie en w_s de valsnelheid van zand ($\sim 0,01 \text{ m s}^{-1}$). De diameter van een cirkel met het suppletieoppervlakte van 20 ha is genomen als karakteristieke lengte, i.e. ca. 500 m. In het geval van een relatief grote aanpassingslengte ($k \cdot L_A \gg 1$) draagt suspensietransport niet bij aan de morfologische ontwikkeling van de bodemverstoring. Dit is niet het geval bij de plaatsuppletie of de sedimentmotor, omdat deze relatief groot zijn. In het andere limietgeval, een hele kleine aanpassingslengte ($k \cdot L_A \rightarrow 0$), heeft suspensietransport geen invloed op de uitdoving, die dan volledig wordt bepaald door hellingseffecten op het bodemtransport. Ook hier is geen sprake van. Dit betekent dat zowel bodem- als suspensietransport bijdragen aan de morfologische ontwikkeling van de bodemverstoring, in belangrijke mate gekoppeld aan hoe groot deze transporten zijn.

Het analytische model is ontwikkeld op basis van de Bailard (1981) zandtransportformule, maar in dit rapport worden de transporten zoals berekend met Van Rijn (2007a,b) gebruikt.

Deze vergelijking is toegepast voor de instantane zandtransporten (elke 10 minuten). Hierna is gemiddeld over de periode van 3 maanden om een representatieve verplaatsingssnelheid en uitdovingstijd te bepalen.

Deze aanpak is een sterke versimpeling van de werkelijkheid. Zo is een belangrijke aanname dat de bodemverstoring klein is ten opzichte van de waterdiepte. Dit is niet

het geval voor een suppletie met een verstoring van ~ 0.5 m op een waterdiepte van 1-2 m. Daarnaast houden deze formules geen rekening met 2D effecten. Ook wordt gebruik gemaakt van de berekende zandtransporten met een grote onzekerheid, zoals beschreven aan het begin van deze paragraaf. Ondanks deze grote onzekerheid kan met deze formules op een simpele en snelle manier een eerste inschatting van de morfologische ontwikkeling worden gemaakt. Een meer realistische inschatting kan worden verkregen met een morfodynamische modelberekening, b.v. met de Delft3D software. Dit viel echter buiten de scope van deze studie.

5.2.2 Resultaten

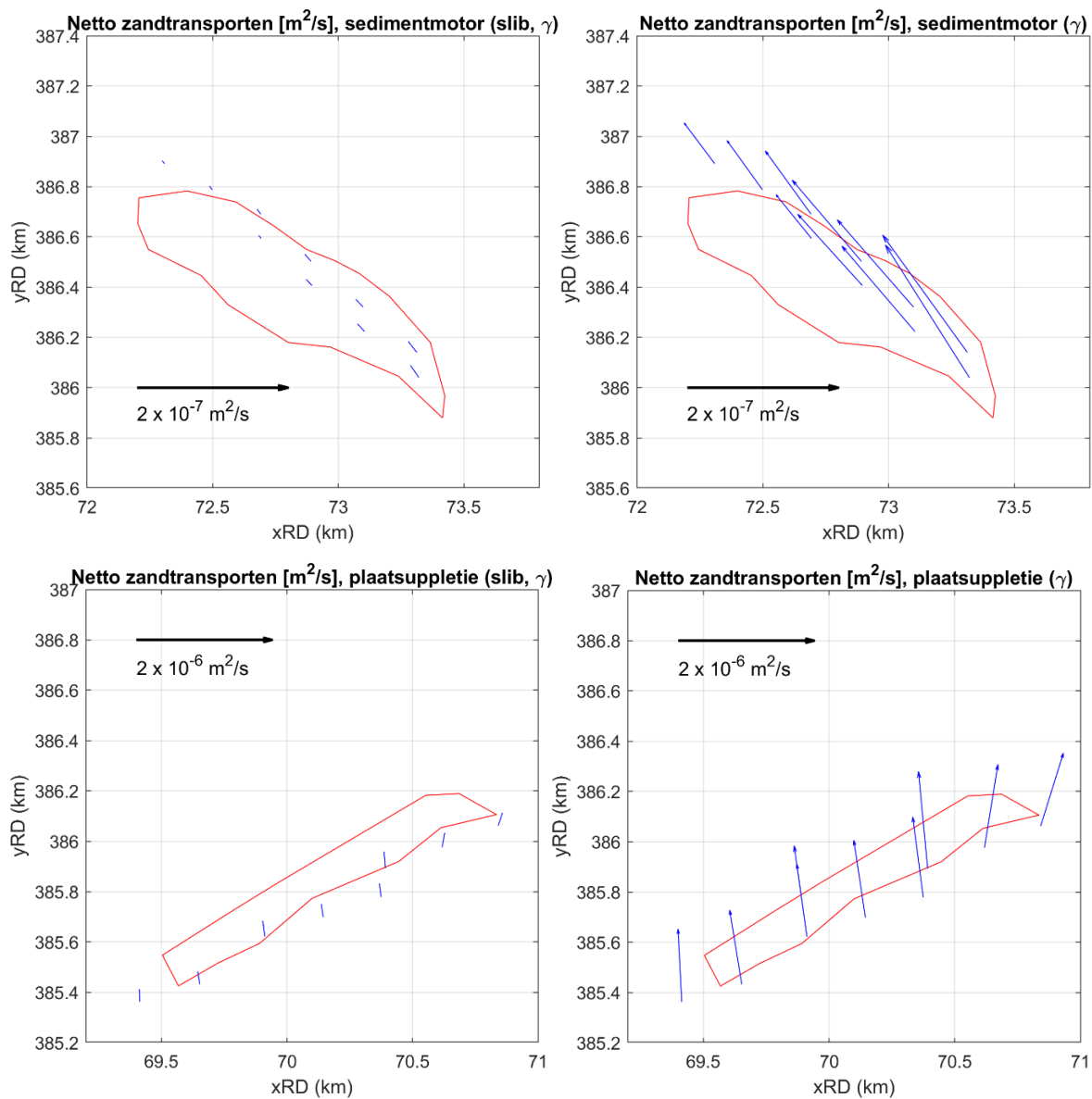
Figuur 45 toont de netto zandtransporten voor twee voorkeursvarianten: de oostelijke slibmotor (nabij de Oesterdam) en de noordelijker gelegen suppletie in het lage litoraal van de Rattekaai. De netto zandtransporten bij de suppletie zijn een orde van grootte groter dan bij de sedimentmotor. Dit komt door de sterkere golfwerking in het ondiepere water op het slik. De timing van de waterdiepte, golfhoogte en stroomsnelheid is bepalend voor de dominante, noordelijke richting van het netto zandtransport. Dit is goed zichtbaar rondom de storm op 10 september 2013 (Figuur 46). De hoogste golven vallen samen met de grootste waterdiepte (vloed), omdat de golfenergie dan minder gedempt wordt door de bodem. Deze golven woelen het sediment op dat door de noordoostelijke/noordwestelijke stroming wordt getransporteerd. De golven zijn dus erg belangrijk voor het zandtransport, omdat de getijstroming met maxima van $\sim 0,3$ m/s maar weinig zand mobiliseert.

De verhoogde kritische schuifspanning door de aanwezigheid van slib zorgt voor een aanzienlijke reductie van het netto zandtransport (\sim factor 12 voor de sedimentmotor, \sim factor 6 voor de suppletie). Dit komt doordat het dominante suspensietransport ongeveer schaalst met de bodemschuifspanning tot de macht 1,5 volgens de gehanteerde Van Rijn (2007b) transportformule. Dit zorgt er, in combinatie met de 2,2x verhoogde kritische schuifspanning en het feit dat op veel momenten in het getij relatief lage schuifspanning optreden (i.e. dicht tegen begin van beweging aan), voor dat het netto zandtransport zo sterk afneemt.

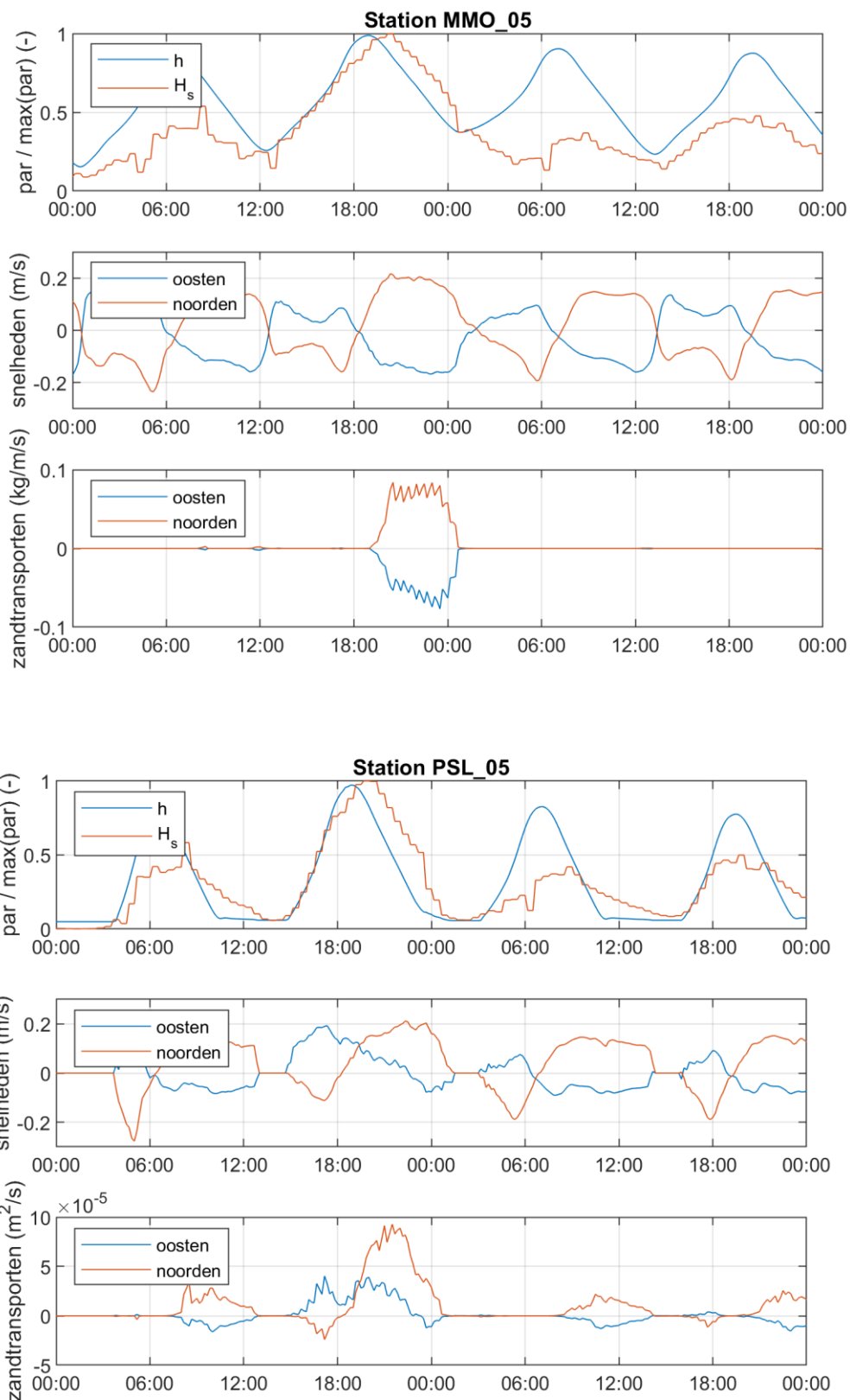
De berekende suspensietransporten zijn veel groter dan de bodemtransporten, vanwege de relatief kleine korrelgrootte ($D_{50} = 0,13$ mm). De morfologische ontwikkeling wordt dan ook bepaald door het suspensietransport. Als gevolg van de grotere transporten (en de kleinere waterdiepte) verplaatst de suppletie zich naar verwachting een stuk sneller dan de sedimentmotor, en deze zal ook naar verwachting veel sneller uitdoven:

	Verplaatsing (m/jaar)		Uitdovingstijd (jaar)	
	Suppletie	Sedimentmotor	Suppletie	Sedimentmotor
hoge taucr (na aanleg, door slib)	60-100	1-2	20-30	200-900
lage taucr (na verloop van tijd)	400-600	10-20	3-4	20-70

Het is belangrijk om aan te tekenen dat deze getallen onzeker zijn, met minimaal een factor 2 bandbreedte. Desondanks lijkt het zeer waarschijnlijk dat het zand op de plaat mobieler is dan in de geul ter plekke van de sedimentmotor.



Figuur 45. Berekende netto zandtransporten voor de oostelijke sedimentmotor (bovenste panelen) en de lagere plaatsuppletie (onderste panelen) met (linker panelen) en zonder (rechter panelen) slibeffecten, op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013.



Figuur 46. Berekende waterstanden en golfhoogtes (beiden genormaliseerd), stroomsnelheden en zandtransporten voor de periode 9-11 september 2013. De bovenste 3 panelen zijn bij de locatie van de oostelijke sedimentmotor, de onderste 3 zijn bij de lagere plaatsuppletie.

6 Sedimentverspreiding en effecten op het litorale habitat

6.1 Algemeen

Van de oorspronkelijke vier scenario's (twee suppleties in het litoraal en twee sedimentmotoren in het sublitoraal) zijn uiteindelijk twee scenario's geselecteerd die nader onderzocht zijn (zie boven): een suppletie laag in het litoraal en een oostelijke sedimentmotor nabij de Oesterdam. In dit hoofdstuk kijken we naar de effecten op het litoraal en wat het betekent voor natuur.

6.2 Twee scenario's: Suppletie Laag vs Slibmotor Oost

6.2.1 Verspreiding van de slibfractie (op het einde van de simulatieperiode)

Voor de suppletie (100.000 m³, 30% slib) met een lage erosiesnelheid verspreidt 7% (2 kton) van het gestorte slib zich vanuit de suppletie in drie maanden (met een minimale aanslibbing van 1 mm) (Figuur 47, Figuur 48 & Tabel 7). Van dit verspreide sediment bevindt 53% zich in het litoraal wat overeenkomt met 1 kton afzetting verspreid over 174 ha (gemiddelde laagdikte 1,6 mm).

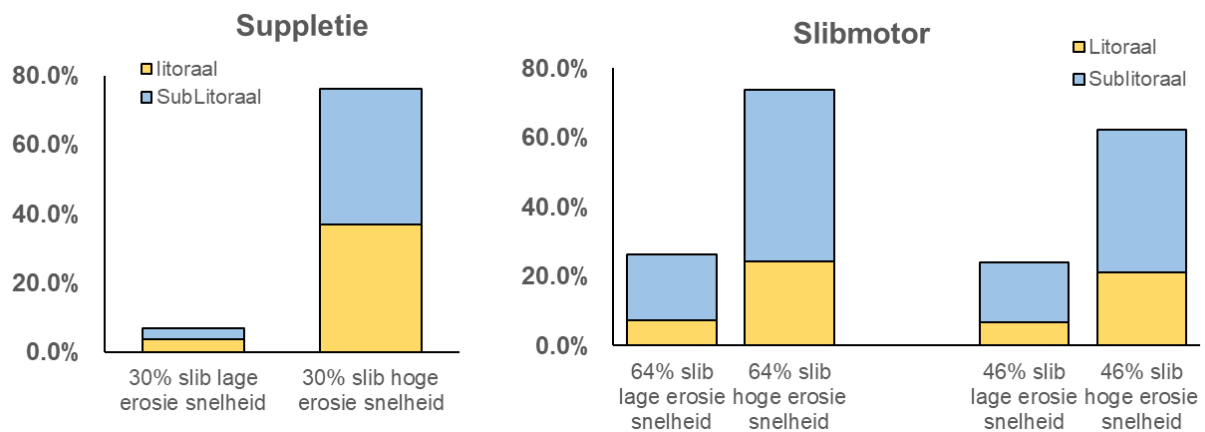
Voor een suppletie met een hoge erosiesnelheid verspreidt 76% van het slib zich vanuit de suppletie in drie maanden. Hiervan bevindt 49% zich in het litoraal wat overeenkomt met 11 kton afzetting verspreid over 782 ha (Figuur 47, Figuur 48 & Tabel 7).

Voor de slibmotor (100.000 m³, 64% slib) met een lage erosiesnelheid verspreidt 26% (Tabel 7) van het gestorte slib zich aan het einde van de simulatie (met een minimale aanslibbing van 1 mm). Hiervan komt 27% terecht in het litoraal, goed voor 5 kton verspreid over 273 ha met een gemiddelde aanslibbing van 4.2 mm (Tabel 7).

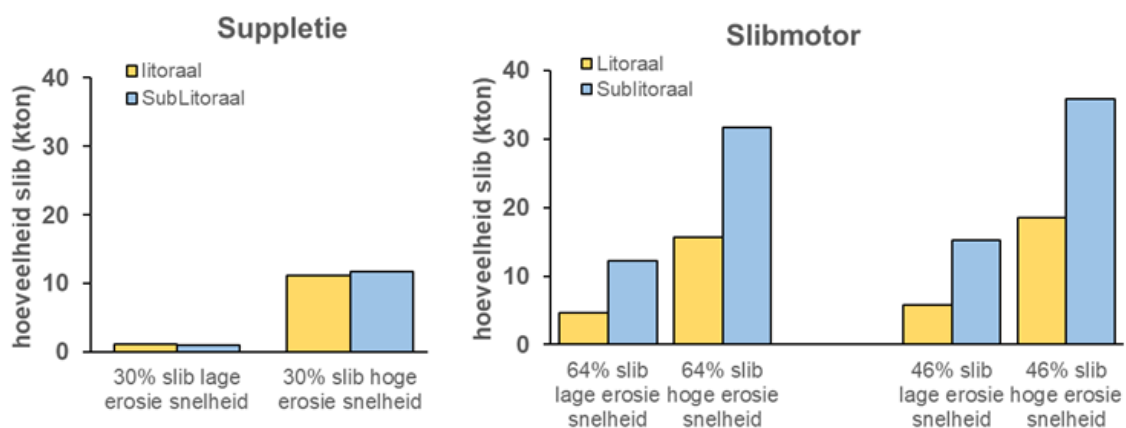
Voor de slibmotor met een hoge erosiesnelheid verspreidt 74% van het gestorte slib zich (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7). Hiervan komt 33% in het litoraal terecht, wat overeenkomt met 16 kton die verspreid wordt over 356 ha met een gemiddelde laagdikte van 10,9 mm.

Wanneer de volledig beschikbare 190.000 m³ uit de Zandkreek gebruikt wordt als slibmotor (slibpercentage van 46%) verspreidt bij een lage erosiesnelheid 24% van het slib zich (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7). Hiervan ligt 28% (6 kton) op het litoraal verspreid over 303 ha met een gemiddelde aanslibbing van 4.8 mm. Bij een hoge erosiesnelheid wordt 62% slib afgezet waarvan 34% (19kton) op het litoraal (verspreid over 393 ha met gemiddelde aanslibbing van 11.8 mm (Figuur 47, Figuur 48 en Tabel 7).

Wanneer alles in de diepe put O10 gestort wordt (46% slibpercentage), rekening houdend met een hoge erosiesnelheid, zal 38% van het slib zich verspreid hebben aan het einde van de modelberekening. Hiervan komt 5% (2 kton) in het litoraal terecht verspreid over 300 ha (gemiddelde aanslibbing van 1,5mm).



Figuur 47. Percentage van de slibfractie van het gedeponeerde sediment met een minimale laagdikte van 1 mm dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor: een suppletie van 100.000 m³ met een slibpercentage van 30% (links); een slibmotor van 100.000 m³ met een slibpercentage van 64% (midden); en een slibmotor van 190.000m³ met een slibpercentage van 46% (rechts). Voor alle varianten wordt de situatie met een lage en hoge erosiesnelheid weergegeven.



Figuur 48. Verspreiding van de slibfractie van het gedeponeerde sediment (met een minimale laagdikte van 1 mm) in kton dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor: een suppletie van 100.000 m³ met een slibpercentage van 30% (links); een slibmotor van 100.000 m³ met een slibpercentage van 64% (midden); en een slibmotor van 190.000m³ met een slibpercentage van 46% (rechts). Voor alle varianten wordt de situatie met een lage en hoge erosiesnelheid weergegeven.

De resultaten kunnen ook op een andere manier geïnterpreteerd worden. De verspreiding aan het einde van de modelberekeningen met een lage erosiesnelheid geeft de situatie weer wanneer maar een relatief klein deel van het slib zich vanuit de stortlocatie verspreid heeft, terwijl de berekeningen met een hoge erosiesnelheid de situatie schetsen waarbij het meeste slib (62-74%, Tabel 7) verdwenen is uit de oorspronkelijke stortlocatie en zich verspreid heeft. Opgemerkt dient te worden dat de vermelde laagdiktes ongeconsolideerd slib betreft, dat na consolidatie ongeveer de helft zal zijn.

Tabel 7. Kenmerken van de verschillende scenario's en hun effect op de slibverspreiding. Kenmerken van het gestorte sediment: Erosiegevoeligheid (τ_{cr} = kritische bodemschuifspanning), gestort volume (V_{tot}), bulkdensiteit (Bulk) en totale hoeveelheid gestort (M_{tot}), slibfractie (Slib) en hoeveelheid slib gestort (M_{slib}). Slibverspreiding na drie maanden: percentage slib (Spreid_tot) en hoeveelheid (M_{spreid_tot}), aandeel (Spreid_lit) en hoeveelheid (M_{spreid_lit}) van Spreid_tot M_{spreid_tot} dat op het litoraal terecht komt, het oppervlak (Ospreid_lit) dat met minimaal 1 mm slib bedekt wordt en de gemiddelde laagdikte (dZ).

	τ_{cr} (pa)	V_{tot} (m ³)	Bulk (kg/m ³)	M_{tot} (kton)	Slib (%)	M_{slib} (kTon)	Spreid_tot (%)	M_{spreid_tot} (kTon)	Spreid_lit (kton)	M_{spreid_lit} (kton)	Ospreid_lit (ha)	dZ (mm)
Suppletie	0.8	100000	1000	100	30%	30	7%	2	53%	1	174	1.6
	0.2	100000	1000	100	30%	30	76%	23	49%	11	782	3.5
Sedimentmotor_klein	0.4	100000	1000	100	64%	64	26%	17	27%	5	273	4.2
	0.2	100000	1000	100	64%	64	74%	47	33%	16	356	10.9
Sedimentmotor_groot	0.4	190000	1000	190	46%	87	24%	21	28%	6	303	4.8
	0.2	190000	1000	190	46%	87	62%	54	34%	18	393	11.8

6.2.2 Verspreiding van de zandfractie

De verspreiding van de zandfractie wordt in hoofdzaak bepaald door het suspensietransport. Als gevolg van de grotere transporten (en de kleinere waterdiepte) verplaatst de suppletie (~ 500 - 1000 m jaar⁻¹) zich naar verwachting een stuk sneller dan de slibmotor (~ 10 - 20 m jaar⁻¹). Beide transporten zijn in noord – noordwestelijke richting, m.a.w. richting de geulen. De zandfractie van de sedimentmotor zal dus maar beperkt op het litoraal terecht komen en dus weinig bijdrage leveren aan behoud of versterking van het litorale habitat. De suppletie ligt in het litoraal en de zandfractie (in dit scenario 70.000 m³) zal voor een periode van ~ 2 - 3 jaar blijven liggen en bij transport richting de geul ook nog meerdere jaren het lagere litoraal blijven voeden. De zandfractie van het litoraal draagt dus wezenlijk bij aan het behoud en versterking van het litorale habitat (zie ook 6.2.3).

6.2.3 Effecten op droogvalduur en (autonome) erosie van het intergetijdengebied

De lage suppletie wordt in het litoraal aangebracht en draagt daarmee direct bij aan het behoud en versterken van het litorale habitat met 20 ha. Met name vindt er een toename in oppervlakte plaats tussen ongeveer NAP- $0,1$ m en NAP+ $0,4$ m van 20 ha. Dit is in de droogvalduur zone van 40 - 80% , welke als belangrijke zone wordt geacht om in stand te houden voor de foerageerfunctie van het litorale habitat voor steltlopers (de Ronde et al. 2013). De slibmotor heeft dit effect niet. Lokaal worden er wel dikkere lagen slib afgezet die de droogvalduur zullen doen toenemen (tot max. 5 ha kent een opslibbing van > 5 cm), maar het grootste deel betreft verspreiding van een relatief dunne laag slib.

Zowel de lage suppletie als de slibmotor oost resulteert in de verspreiding van slib in het litoraal over een behoorlijk grote oppervlakte (782 ha voor de suppletie, 356 - 393 ha voor de slibmotor). Het betreft hier een relatief dunne laag, gemiddeld 3.5 mm voor de suppletie en 10.9 - 11.8 mm voor de slibmotor (ongeconsolideerd slib) (zie Tabel 7). De suppletie laat zien dat een groter oppervlakte met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel met een dunnere laag. Dit komt door het verschil in hydrodynamische condities. De bodemschuifspanningen op het slik zijn hoger en dus kan het slib verder verspreiden. Het kan bovendien alle kanten op; de oostelijke slibmotor is meer ingesloten en golfwerking is daar minder sterk.

Deze sliblaag kan dus bijdragen aan het afremmen van de erosie van het slik als gevolg van de zandhonger. Het westelijke deel van het Verdrongen Land Van Zuid-Beveland erodeert gemiddeld met zo'n 10 mm per jaar, in het oosten treedt geen noemenswaardige erosie op (zelfs accretie in bepaalde delen). Waar geen erosie optreedt kan de afgezette sliblaag dus bijdragen aan opbouw. Zoals eerder gesteld is de afgezette sliblaag over het algemeen zeer dun. Er kan dan ook gesteld worden dat hiermee tijdelijk (max. 1 - 2 jaren) de erosie kan worden afgeremd, en wil dit soort

maatregelen effectief zijn in het afremmen van de erosie of het laten groeien van het slik zullen ze om de 1-2 jaren dienen herhaald te worden.

6.2.4 Effecten op het bodemleven en foerageerfunctie voor vogels

In eerste instantie wordt alle bodemleven bedolven onder een laag sediment ter grootte van de footprint van de stort- of suppletie locatie. In het geval van de suppletie gaat het in deze studie om een halve meter op 20 ha (100.000 m³), in het geval van de slibmotor om 20 ha (100.000 m³) of 38 ha (190.000 m³). Bij zo'n sedimentdikte gaat alle bodemleven dood en het vraagt een zekere tijd (3-5 jaren) voor het bodemleven om zich te herstellen (d.i. uit ervaring met suppleties bij de Galgenplaat en Oesterdam). Dit wil niet zeggen dat al het eerste jaar na het storten/suppleren zich bodemdieren zullen vestigen, maar met name herstel van de biomassa vraagt meer tijd. Vaak wordt na verloop van tijd wel een gelijkaardige soortenrijkdom en biomassa bereikt als voorheen, maar is de soortensamenstelling of de dominantie van bepaalde soorten anders.

Het verschil tussen de suppletie en de slibmotor is dat de suppletie in het litoraal plaatsvindt en daar dus duidelijk een oppervlakte geen of weinig bodemleven zal hebben en daarmee dus ook tijdelijk minder geschikt zal zijn als foerageergebied voor steltlopers. De slibmotor ligt sublitoraal en beïnvloedt daarmee niet direct de foerageerfunctie voor steltlopers.

De slibfractie die zich verspreidt over het litoraal betreft grotendeels een dunne laag slib die zich zal consolideren en door bioturbatie deels zal ingemengd worden in het sediment, maar mogelijks ook deels wordt uitgespoeld door bioturbatie. Op het overgrote deel van het litoraal verwachten we geen negatief effect van dit extra slib op het bodemleven, maar juist eerder positief. Het slikkengebied bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland is al relatief slibrijk (zie paragraaf 2.2) en een extra input van slib wordt als positief beoordeeld: slibrijk sediment houdt het water beter vast en kent vaak een hoge primaire productie aan microfytobenthos, wat enerzijds een belangrijke voedselbron is voor heel wat soorten bodemdieren (dus potentieel meer bodemdieren), en anderzijds een extra stabiliserend effect heeft op het sediment waardoor het minder snel erodeert. Enkel waar de afgezette sliblaag wat dikker is (> 1 cm, afhankelijk van de sedimentatiesnelheid), kan lokaal het bodemleven negatieve invloed ondervinden omdat het bedolven raakt onder een laag fijn slib.

6.2.5 Effecten op de schorren

De modelresultaten zijn hier weinig onderscheidend en het is dan ook moeilijk in te schatten wat het effect op de schorren zal zijn. Vermoedelijk zal een relatief klein deel van het slib op de schorren terecht komen, dit zal aanzienlijker zijn voor de slibmotor oost dan voor de lage suppletie (zie ook Figuur 49).

7 Discussie en conclusie

7.1 Algemeen

In deze studie hebben we onderzocht of het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een meer duurzame bestemming kan krijgen, met toegevoegde waarde voor de natuur in de Oosterschelde. Meer specifiek is onderzocht of sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Zandkreek nuttig toegepast kan worden voor natuurbouw in de Kom van de Oosterschelde, met als doel het behoud van het litorale habitat voor foeragerende steltlopers. Het uiteindelijke zoekgebied dat geselecteerd is als kansrijk om een pilot uit te voeren betreft het slikkengebied van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Dit grote slikkengebied van zo'n 1350 ha is deels onderhevig aan erosie (westelijk deel, erosiesnelheden tot 10 mm per jaar), deels stabiel of zelfs licht aangroeiend (oostelijk deel). Het is van nature relatief slibrijk, zeker de hogere delen nabij de dijk en het schor. Het gebied kent nog een relatief groot oppervlak aan 50-80 % droogvalduur (zo'n 675 ha), maar een groot deel ligt ook laag (< 40% droogvalduur). In het algemeen is de verwachting dat, onder invloed van de zandhonger en zeespiegelstijging, het totale areaal intergetijdengebieden het meest zal afnemen in het oostelijke deelgebied (de Kom) (40%) binnen de komende 50 jaar en dat ook de lagere gebieden (<40% droogvalduur) eveneens het meeste zullen afnemen in de Kom (de Ronde et al. 2013). Op termijn zullen ook de hogere delen verdwijnen.

Het slikkengebied bij het Verdrongen Land van Zuid-Beveland heeft baat bij het in standhouden van deze droogvalduur verdeling, omdat dit gunstig is als foerageerhabitat voor steltlopers. Steltlopers zijn gebaat bij een litoraal habitat dat voldoende areaal aan droogvalduur klasse 40-80 % heeft, omdat dit de vogels in staat stelt voldoende lang te foerageren tijdens laagwater om in hun energiebehoefte te voldoen (de Ronde et al. 2013). Deze zone is nu nog in belangrijke mate aanwezig, dus grootschalige ingrepen (zoals bij de Roggenplaat) zijn nu nog niet aan de orde. Maar door het (regelmatig) aanbrengen van sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden (werk met werk) kan dit gebied gevoed worden met sediment waardoor op langere termijn de foerageerfunctie voor steltlopers kan behouden blijven.

In deze studie hebben we uiteindelijk twee type maatregelen in detail onderzocht: (1) een suppletie in het litoraal waarbij de minder slibrijke fractie van de specie die vrijkomt bij het baggeren van de Zandkreek wordt benut (100.000 m³, 20 ha, 30% slib), en (2) een slibmotor die wordt aangelegd in het sublitoraal met (a) de meer slibrijke fractie van de specie (100.000 m³, 20 ha, 64% slib) en (b) de totaal beschikbare te baggeren specie (190.000 m³, 38 ha, 46% slib). Voor beide type maatregelen zijn telkens twee scenario's onderzocht (vier in totaal), na selectie zijn er twee scenario's nader uitgewerkt: een suppletie laag in het litoraal op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, en een slibmotor helemaal in het oosten, grenzend aan de Oesterdam en het Verdrongen Land van Zuid-Beveland.

Beide scenario's zijn via modelberekeningen (slib- en zandverspreiding) en deskundigenoordeel verder uitgewerkt en beoordeeld.

7.2 Afweging tussen een suppletie en een slibmotor

Allereerst zijn de onderzochte maatregelen nooit eerder uitgevoerd in de Oosterschelde, en kunnen beide als innovatief worden beschouwd, met een groot potentieel voor kennisopbouw. Er is al wel de nodige ervaring met het suppleren van slikken en platen in de Oosterschelde, maar dit betrof steeds suppleren met zandig sediment met nauwelijks slib in. In deze studie betreft het slibrijk sediment, dat zich anders zal gedragen dan zand.

Tabel 8 vat de effecten op het litorale habitat van beide maatregelen samen. Hoewel begin condities verschillen tussen beide maatregelen (niet alleen in aanleg, maar ook in samenstelling van het sediment), kan toch een aantal duidelijke conclusies gemaakt worden:

1. Een suppletie in het litoraal draagt direct bij aan het ophogen/voeden van het litorale habitat (met 20 ha, 0.5 m hoog), en meer specifiek versterkt het de droogvalduur in de zone 40-80% waardoor deze zone langer in stand wordt gehouden. Dit is niet het geval voor de slibmotor die in het sublitoraal wordt aangelegd.
2. De zandfractie van de suppletie (in dit geval zo'n 70.000 m³) draagt met name bij aan de ophoging van het slik (zie punt 1). De verwachte verplaatsing is aanvankelijk ~60-100 m/jaar en na verloop van tijd 400-600 m/jaar in N richting en zal de suppletie binnen ~3-30 jaar afgevlakt cq. uitgedoofd zijn. De ondergrens van de verplaatsing en de bovengrens van de uitdovingstijd corresponderen met de situatie direct na aanleg; de aanwezigheid van slib vertraagt de morfologische ontwikkeling. De levensduur van de zandfractie van deze suppletie is korter dan de levensduur die voorspeld wordt voor bijv. de Roggenplaat suppleties. Dit heeft vooral te maken met het fijnere sediment dat in deze studie gebruikt wordt, maar ook met de lokale hydrodynamische omstandigheden (golfwerking). Het zand verplaatst zich richting de geul en zal dus het lagere litoraal meerdere jaren voeden met zand. De zandfractie van de slibmotor ligt bij aanvang sublitoraal en zal naar alle waarschijnlijkheid nauwelijks verspreiden in het litoraal, maar zal in het sublitoraal blijven liggen. De verspreiding vanuit de stortlocatie zal ook veel trager verlopen omwille van de kalmere hydrodynamische condities.
3. De slibfractie zal zich zowel bij de suppletie als de slibmotor verspreiden via de waterkolom en deels in het litoraal en deels in het sublitoraal op de bodem terecht komen. Qua efficiëntie verspreidt zich er meer slib naar het litoraal vanuit de suppletie dan vanuit de slibmotor (49% tegenover 33%). De absolute hoeveelheid die verspreidt is groter voor de slibmotor, omdat hier sediment is gestort met een grotere slibfractie dan de suppletie.
4. De suppletie laat zien dat een groter oppervlakte van het litoraal met slib bedekt raakt dan de slibmotor, maar dan wel een dunnere laag (Figuur 49). Dit komt door het verschil in hydrodynamische condities. De bodemschuifspanningen op de plaat zijn hoger en dus kan het slib verder verspreiden. Het kan bovendien alle kanten op; de oostelijk slibmotor is meer ingesloten en golfwerking is daar minder sterk.
5. De bijdrage van de slibfractie aan het ophogen van het litorale habitat is relatief klein, gaande van enkele mm's tot enkele cm's. Enkel lokaal zullen wat dikkere slibpakketten worden afgezet (vooral bij de slibmotor). Wel gaat het hier om een grote oppervlakte (Tabel 8). Éénmalig deze maatregel uitvoeren zal dus niet veel bijdragen aan de lange termijn erosie van dit gebied (zeker met versnelde zeespiegelstijging), maar bij regelmatig herhalen kan de slibfractie wel degelijk bijdragen aan het afremmen van de erosie van dit gebied. Met name in het oostelijk deel, waar nu geen erosie optreedt, zal de bijdrage naar verwachting het grootst zijn. Hier heeft de slibmotor een positief effect.

6. Extra slib in het litorale habitat van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland wordt als positief beoordeeld, omdat het naar alle waarschijnlijkheid de biologische rijkdom zal doen toenemen.
7. Conclusie: de suppletie draagt meer bij aan het in standhouden van het litorale habitat van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland dan een slibmotor.

Tabel 8. Samenvatting van de effecten van een slibmotor en suppletie op het litorale habitat. Resultaten tonen de simulaties met een hoge erosiegevoeligheid ($\tau_{cr} = 0.2 \text{ Pa}$), omdat dit beter weergeeft waar het slib uiteindelijk terecht zal komen, ongeacht de snelheid waarmee dit gebeurt.

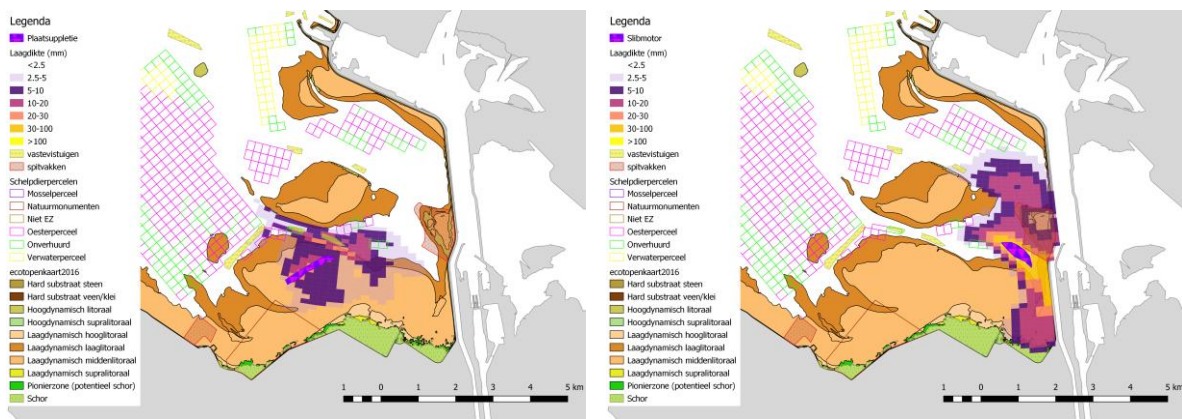
	Suppletie	Slibmotor
Kenmerken		
Bronlocatie	Litoraal	Subtidaal
Oppervlakte stortlocatie	20 ha	20 ha
Volume totaal	100.000 m ³	100.000 m ³
Volume slibfractie	30.000 m ³	64.000 m ³
Volume zandfractie	70.000 m ³	36.000 m ³
Effecten		
<u>Zandfractie</u>		
Oppervlakte in het litoraal direct na aanleg	20 ha	0 ha
Verplaatsing (m/jaar) (hoge τ_{cr} – na aanleg, door slib)	60-100	1-2
Verplaatsing (m/jaar) (lage τ_{cr} – na verloop van tijd)	400-600	10-20
Uitdovingstijd (jaar) (hoge τ_{cr} – na aanleg, door slib)	20-30	200-900
Uitdovingstijd (jaar) (lage τ_{cr} – na verloop van tijd)	3-4	20-70
Hoofdrichting van het netto zandtransport	N	NNW
<u>Zandfractie</u>		
Oppervlakte in het litoraal direct na aanleg	20 ha	0 ha
Duur aanwezig in stort-/suppletielocatie	2-3 jaar	20-30 jaar
Hoofdrichting van het netto zandtransport	N	NNW
<u>Slibfractie</u>		
Volume in het litoraal direct na aanleg	30.000 m ³	0 m ³
Volume in de stortlocatie nog aanwezig een maand na aanleg	7.200 m ³ (24%)	16640 m ³ (26%)
Volume/kton verspreid over het litoraal een maand na aanleg*	11k m ³ / 11 kton	16k m ³ / 16 kton
Volume/kton verspreid over het litoraal einde verspreiding**	15k m ³ / 15 kton	21k m ³ / 21 kton
Efficiëntie verspreiding slib naar litoraal***	± 49%	± 33%
Totale litorale oppervlakte beïnvloed (> 1mm)****	782 ha	356 ha
Gemiddelde aanslibbing in het litoraal een maand na aanleg	3.5 mm	10.9 mm
<u>Droogvalduur (DVD)</u>		
Bijdrage aan versterken 40-80% DVD	20 ha	0 ha
Duur van de bijdrage	5-10 jaar	0

* voor de suppletie: volume slib verspreid vanuit de suppletie in het litoraal

** : alle slib verdwenen uit stortlocatie en verspreid in omgeving (geïnterpoleerd)

*** : percentage van het slib dat in het litoraal terecht komt; overige in het sublitoraal

**** : oppervlakte van het litoraal dat beïnvloed wordt door slib dat zich verspreidt vanuit de bronlocaties op het einde van de simulatie



Figuur 49. Verspreiding van slib bij de suppletie (links) en slibmotor (rechts). Zie Tabel 8 voor kenmerken.

Het is interessant om te bekijken wat het effect zou zijn mocht een suppletie aangelegd worden met dezelfde kenmerken als de slibmotor, dus niet met 30% slib maar met 64% slib. Dit is verder niet gemodelleerd maar op basis van een deskundigenoordeel is de verwachting dat bij een groter slibvolume in de suppletie het oppervlakte dat beïnvloed wordt niet sterk zal veranderen; vooral de sliblaag zal dikker worden. Dit geldt voor het gebied dat überhaupt beïnvloed wordt (d.i. de footprint van de suppletie). De slibmotor geeft aan het einde van de levensduur $\sim 1,5$ cm aanslibbing over ~ 400 ha litoraal gebied. Bij de slibsuppletie met zelfde hoeveelheid slib zal dit $\sim 0,5$ cm zijn voor een ~ 800 ha (beide scenario's met hoge erosiesnelheid). Het totale volume slib in het litoraal is echter groter voor de suppletie, wat zichtbaar is in het % verspreid in het litoraal (~ 49 vs 33% , Tabel 7).

Wanneer we terug komen op de doelstellingen / vragen gesteld bij aanvang van dit project:

Hoofdvraag: Draagt storten/suppleren van slibrijk sediment op een doellocatie (suppletie) of strategische locatie (slibmotor) bij tot behoud of mogelijks versterking van het foerageerareaal in de Kom van de Oosterschelde (en daarmee aan Natura 2000-instandhoudingsdoelstellingen)?

Antwoord: Beide maatregelen hebben een positief effect op het litorale habitat van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland, zoals hierboven geschetst. De baten worden groter ingeschat voor de suppletie dan voor de slibmotor.

Nevenvraag: Draagt suppleren op een doellocatie of strategische locatie bij aan behoud van bestaande schorren?

Antwoord: De modelresultaten zijn hier weinig onderscheidend en het is dan ook moeilijk in te schatten wat het effect op de schorren zal zijn. Vermoedelijk zal een relatief klein deel van het slib op de schorren terecht komen, dit zal aanzienlijker zijn voor de slibmotor oost dan voor de lage suppletie (zie ook Figuur 49). De onderzochte maatregelen zullen dus vooral het slik beïnvloeden, en daarmee indirect het schor, want een hoog en breed voorland beschermt het schor tegen laterale erosie (Bouma et al. 2016; Ladd et al. 2019; Willemsen et al. 2020). Voor een groter effect op het schor zal het sediment beter hoger in het litoraal moeten worden aangebracht.

Nevenvraag: Is het gebruik van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden voor natuurbouw en kustveiligheid een duurzame en kostenefficiënte maatregel? Hier spelen zaken zoals verspreiding en verblijftijd van het sediment in het litorale habitat, maar ook mogelijke neveneffecten en kosten-baten i.v.m uitvoering en aanleg.

Antwoord: In essentie lijkt het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het

beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Een combinatie met golfbrekende structuren zal de effectiviteit verder vergroten. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. Het is gunstiger grotere hoeveelheden in een keer te storten, omdat het tijdsinterval waarop de suppletie herhaald dient te worden hiermee zal toenemen. De kosten die gepaard gaan met de aanleg van een suppletie dan wel slibmotor worden niet in detail behandeld in deze studie.

In vrijwel alle scenario's (suppletie, slibmotor, hoge of lage verspreidingssnelheid) lijken de effecten op de nabijgelegen oesterpercelen zeer beperkt tot verwaarloosbaar. Ondanks dat moet toch ook met deze resultaten voorzichtig worden omgegaan, ook omdat het model in dit deel van de Oosterschelde vrij grof is en de kleinere geulen en prieltjes niet meegenomen worden. Zeker omdat in sommige scenario's significante effecten net tot de rand van oesterpercelen komen, zal hier toch enige voorzichtigheid betracht moeten worden.

Hierbij dient nogmaals benadrukt te worden dat de modelsimulaties een relatief grote onzekerheid kennen en de resultaten dientengevolge met de nodige voorzichtigheid dienen geïnterpreteerd te worden.

Als laatste is het belangrijk te onderstrepen dat beide maatregelen innovatief zijn, met een groot potentieel voor kennisopbouw, welke in de toekomst ook bruikbaar zal zijn voor beheer in andere estuaria en kustgebieden, zowel in Nederland als wereldwijd. Intergetijdengebieden staan wereldwijd onder druk door menselijk handelen en klimaatverandering (met name zeespiegelstijging maar ook toename in stormfrequentie en – intensiteit), en zullen in de toekomst in toenemende mate moeten beschermd, dan wel ontwikkeld worden, omwille van de vele ecosysteemdiensten die deze habitats leveren. Een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitoringsprogramma.

Een aantal aanbevelingen zijn:

- Optimalisatie suppletie: lage suppletie wat hoger, zo hoog als technisch haalbaar is => zal leiden tot nog meer slib op het slik en langere levensduur van het zand op het litoraal.
- Optimalisatie suppletie: toch alle 190.000 m³ benutten voor de suppletie => groter effect van de slibfractie op het litoraal. Bij gebruik van grotere hoeveelheden baggerspecie moet wel een nieuwe effectberekening en evaluatie gemaakt worden.
- Golf reducerende maatregelen zullen zeker helpen om het slib en zand van de suppletie beter vast te houden.
- Naast toepassingen zoals voorgesteld hier: toepassing binnendijks onderzoeken in het kader van dubbele dijken en wisselpolders.

Fase 2: Definitief suppletie-ontwerp + monitoringsplan

1 Inleiding – Fase 2: definitief suppletie-ontwerp

Op basis van fase 1 en een bijeenkomst op zes januari 2020 (Bijlage 1) is besloten dat een suppletie op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland een geschikte invulling kan geven aan de Natuur Impuls Oosterschelde, daarbij gebruik makend van de onderhoudsbaggerspecie die vrijkomt bij het uitbaggeren van de vaargeul in de Zandkreek. Besloten is om een volgende fase in te gaan en de lage suppletievariant, zoals in fase 1 uitgewerkt, verder te optimaliseren qua ligging, opnieuw te modelleren voor slibpluimverspreiding en zandtransport, en daarbij een monitoringsplan op te stellen voor dit definitief ontwerp.

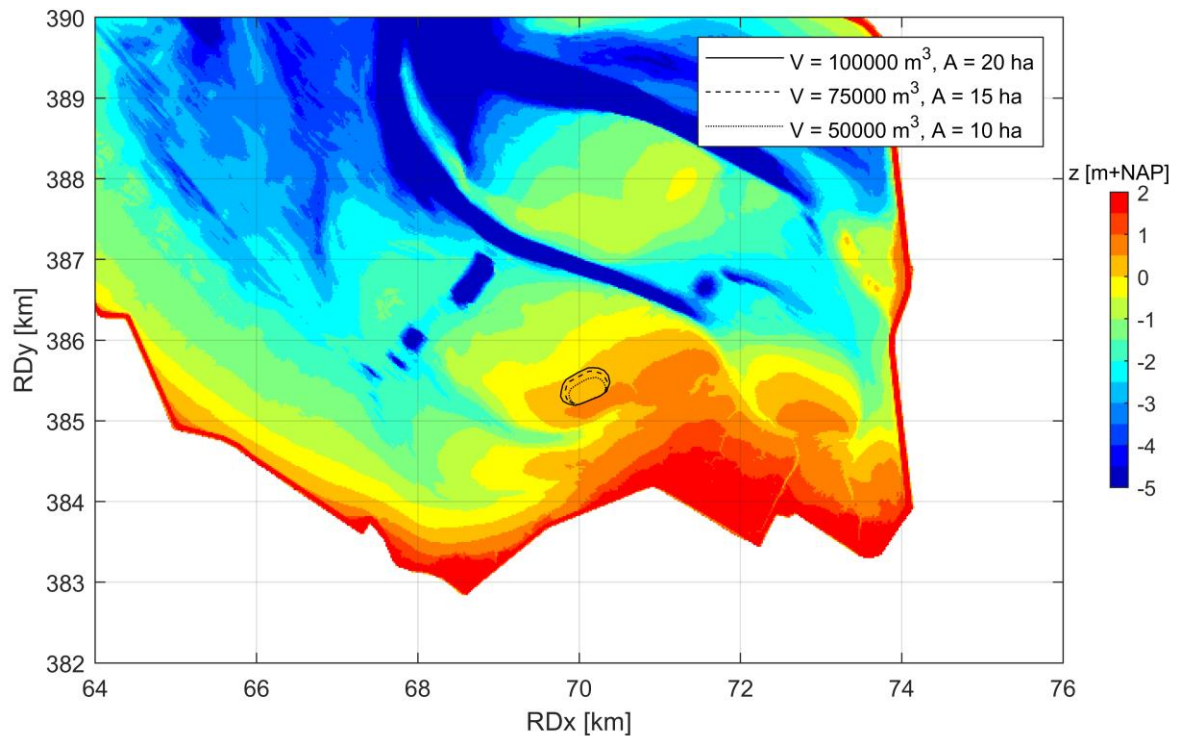
Op 27 januari 2020 heeft een deskundigenbijeenkomst (Bijlage 1) plaatsgevonden waarop de lage suppletievariant opnieuw is bekeken en een eerste schets gemaakt om deze qua ligging te optimaliseren. Deze voorkeursvariant (=definitief suppletie-ontwerp) is nader uitgewerkt door Deltares en wordt in fase 2 van dit rapport nader toegelicht, incl. het monitoringsplan.

2 Kenmerken definitief suppletie-ontwerp

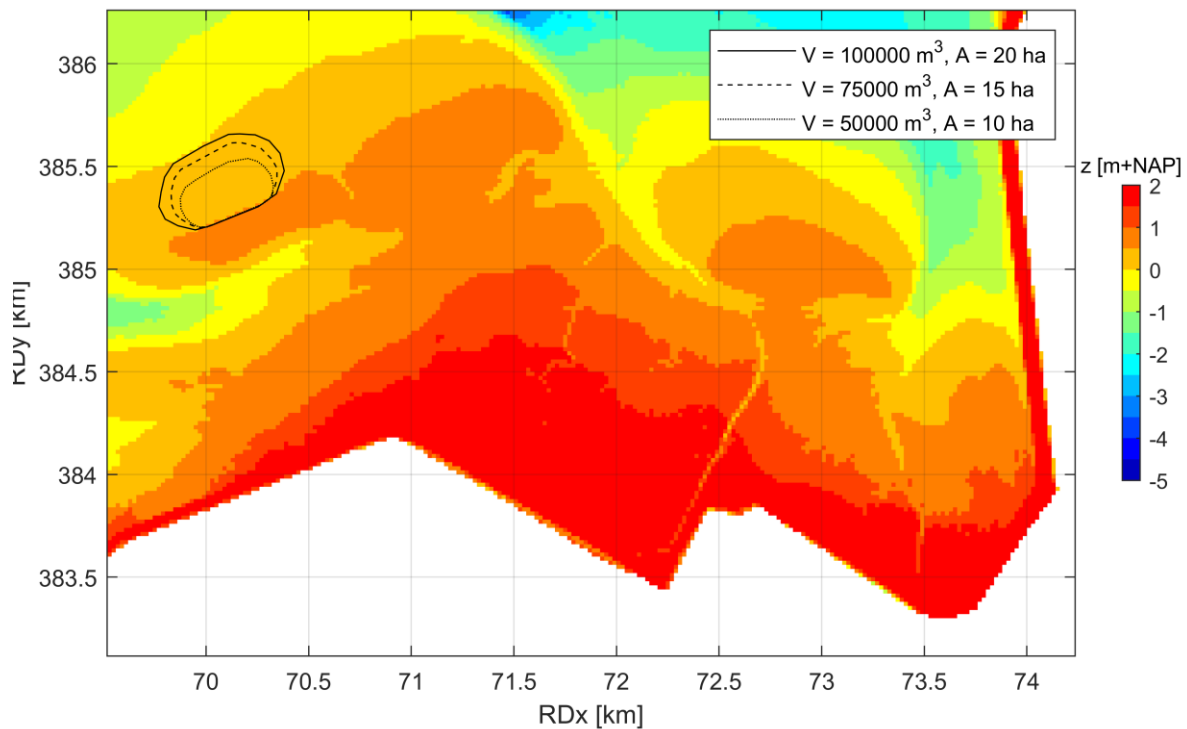
Op basis van de deskundigenbijeenkomst van 27 januari 2020 is een definitief ontwerp gekozen die weergegeven staat in Figuur 50 en Figuur 51. Als basis is de redeneerlijn uit fase 1 gebruikt. Aanvullende beschouwingen/criteria volgend uit de bijeenkomst zijn:

- er wordt één definitief ontwerp beschouwd;
- voor dit ontwerp zijn drie volumes ingetekend (50.000 m³, 75.000 m³ en 100.000 m³). Dit omdat het budget momenteel nog niet is vastgesteld;
- In het definitieve ontwerp wordt gerekend met 3 varianten met een suppletievolume van 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het totale baggervolume is echter groter, zodat een selectie van de specie moet worden gemaakt. Hierbij geldt dat het meest zandige deel van de specie (voornamelijk bij de overgang van de Zandkreek naar de Oosterschelde) het eerst in aanmerking komt voor de plaatsuppletie en dat het resterende meest slibrijke deel (voornamelijk achterin bij de sluis) wordt verspreid in de reguliere verspreidingslocatie O10.
- voor de dikte van de suppletie is vastgehouden aan 0.5 m (in lijn met fase 1):
 - dunner wordt onwenselijk geacht (hogere aanlegkosten en grotere verstoring (d.i. groter oppervlakte) van aanwezige bodemdieren);
 - dikker wordt ook onwenselijk geacht (grotere verstoring van de vorm/morfologie van het slik en mogelijke problemen met consolidatie);
 - uiteraard hoeft de 0.5 m niet exact gerealiseerd te worden. Gedacht kan worden om de aannemer in de uitvoering een marge te geven van +/- 20 cm, mits dit geen nadelige gevolgen heeft voor de ecologie. Bijvoorbeeld: grote vlaktes waar het water bij het droogvallen op vast blijft staan dienen voorkomen te worden;
- het ontwerp is gepositioneerd tussen de twee suppletievarianten op het slik van onze eerdere analyse (suppletie laag en suppletie hoog uit fase 1):
 - daarmee ligt het ontwerp nu hoger op de plaat dan de eerdere lage suppletievariant (met waarschijnlijk minder verlies naar de noordelijk gelegen geul (Mosselkreek), maar ligt het ontwerp wel nog dichterbij dan 2 km (max ~1.6 km) van de noordelijke geul (Mosselkreek) t.b.v. uitvoerbaarheid;
 - de afwateringskreek tussen de twee eerdere suppletievarianten wordt niet geblokkeerd. Dit ter minimalisatie van de hoeveelheid slib dat richting de westelijk gelegen oesterpercelen zal transporteren. Bovendien wordt suppleren op de ontwateringskreek ook onwenselijk geacht omdat het waarschijnlijk is dat het slik een nieuwe kreek zal vormen of de suppletie extra zal doen eroderen;
 - voor de zelfde hoogteligging zou het ontwerp ook iets in noordoostelijke richting verplaatst kunnen worden, maar dit wordt onwenselijk geacht omdat het verlies van sediment naar de noordelijke geul dan zal toenemen;
- net als voor de eerdere ontwerpen is aangehouden dat de hoogte van de suppletie na aanleg niet hoger mag zijn dan NAP+1.0 m (~75% droogvalduur). Met de dikte van 0.5 m is het ontwerp ingetekend op een bodem die nu niet hoger dan NAP+0.5 m ligt;
- er is gekozen voor een ontwerp met een meer gelijkwaardige lengte/breedte-verhouding (dus minder langwerpig), dit omdat dit waarschijnlijk in lagere uitvoeringskosten resulteert (kortere omtrek);

- het is een positieve bijkomstigheid dat het ontwerp doorkruist wordt door één van de reeds bestaande RTK-dGPS raaien van Rijkswaterstaat. Dit geeft een meerjarig inzicht in de lokale ontwikkeling van het slik in de T0 situatie.



Figuur 50. Hoogte kaart met positionering van de voorkeursvariant suppletie in de kom van de Oosterschelde. De drie verschillende contouren geven de ontwerpen weer voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³). De achtergrond toont de Vaklodingen dataset (Single Beam en LIDAR) van 2016.



Figuur 51. Zoom in op de voorkeursvariant suppletie voor drie volumes (50.000 m³, 75.000m³ en 100.000 m³).

3 Sedimentverspreiding definitief suppletie-ontwerp

3.1 Slibverspreiding definitief suppletie-ontwerp

3.1.1 Modelinput

Voor de modellering is gebruik gemaakt van een bestaand slibverspreidingsmodel voor de Oosterschelde. Het slibmodel is gebaseerd op het hydrodynamische model ScalOost (5^e generatie). Voor meer details zie paragraaf 5.1 van fase 1 van dit rapport en Van Duren et al. (2019).

Dit model beschrijft alleen de verspreiding van de fijne sedimentfractie (< 63 µm) en niet van de zandfractie. Voor de stabiliteit en initiële transportrichting van de zandfractie is een aparte analyse gemaakt (zie paragraaf 3.2 van fase 2).

Het definitieve ontwerp kent 3 varianten, namelijk een suppletie van 10, 15 of 20 ha afhankelijk van de kosten per m³ en het beschikbare budget om deze suppletie aan te leggen. Voor alle varianten is de dikte van de opgebrachte laag 0.5 m, zodat het gaat om een suppletievolume van respectievelijk 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het slibpercentage in het sediment bedraagt voor alle varianten 30% en de kritische schuifspanning voor erosie is 0.2 Pa. Dit geeft een bovengrens voor de verspreidingssnelheid van de slibfractie en een bovengrens voor de extra vertroebeling en snelheid van opslibbing buiten het suppletiegebied. In fase 1 is met zowel 0.2 Pa (lage kritische schuifspanning, hoge erosiesnelheid en snelle slibverspreiding) als 0.8 Pa (hoge kritische schuifspanning, lage erosiesnelheid en trage slibverspreiding) gerekend. De verspreiding aan het einde van de modelberekeningen met een lage erosiesnelheid geeft de situatie weer wanneer maar een relatief klein deel van het slib zich vanuit de stortlocatie verspreid heeft, terwijl de berekeningen met een hoge erosiesnelheid de situatie schetsen waarbij het meeste slib verdwenen is uit de oorspronkelijke suppletie en zich verspreid heeft.

De varianten zijn in Tabel 9 samengevat.

Tabel 9. Kenmerken van het definitieve ontwerp t.b.v. de modelberekeningen.

Code	Locatie	Volume (m ³)	Areaal (ha)	Slibpercentage (%)	Kritische schuifspanning (Pa)
<i>Modelberekeningen definitieve scenario's</i>					
R08PH2_2_30_S05_10ha	def	50.000	10	30%	0.2
R08PH2_2_30_S05_15ha	def	75.000	15	30%	0.2
R08PH2_2_30_S05_20ha	def	100.000	20	30%	0.2

De belangrijkste modeluitvoer is de verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom t.g.v. de verspreidingen en de extra aan- of opslibbing van de bodem die hierdoor ontstaat. Deze uitvoer is ruimtelijk en op diverse tijdstippen beschikbaar. De hier getoonde resultaten van de slibconcentraties in de waterkolom zijn de weekgemiddelde effecten vlak voor het einde van de aanlegperiode (week 9, na twee maanden) in de modelberekening) en enkele weken na afronding van de werkzaamheden (week 13, na

drie maanden). De slibpluim in week 9 geeft de hoogste concentraties in het water, in week 13 zijn de lokale concentraties lager, maar de verspreiding wat verder. Het model geeft voor de sliblaag op de bodem de massa per vierkante meter (kg/m^2) op het einde van de simulatieperiode (week 14). Om in te kunnen schatten wat dit voor effecten op de bodem geeft moet deze waarde omgerekend worden naar de laagdikte van slib. Dit kan echter variëren, afhankelijk van de toestand van het slib. Voor net afgezet en nog niet geconsolideerd slib is de dichtheid lager en dus de laagdikte groter, dan voor slib dat geconsolideerd is.

- Net afgezet slib: 1 kg.m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 2,5 mm (droge bulkdichtheid van 400 kg.m^{-3}).
- Geconsolideerd slib: 1 kg.m^{-2} geeft een laagdikte van ongeveer 1,25 mm (droge bulkdichtheid van 800 kg.m^{-3}).

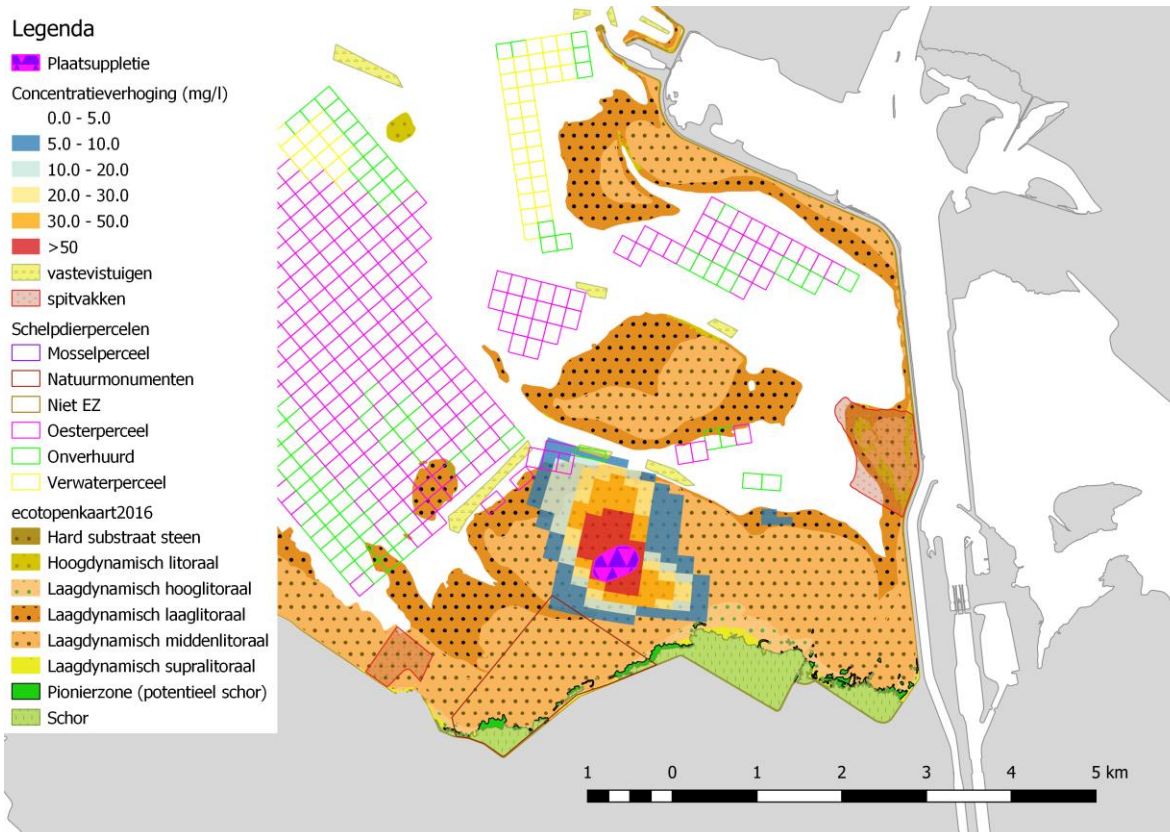
In de figuren is uitgegaan van net afgezet slib, resulterend in de grootste laagdikte. Dit geeft dus een "worst case" benadering van de mogelijke effecten op de omliggende oesterpercelen.

In de komende paragraaf worden de modelresultaten beschreven. De resultaten van het scenario met een plaatsuppletie van 20 hectare worden getoond. De resultaten voor de kleinere suppleties (10 en 15 Ha) zijn te vinden in Bijlage 4 en 5. Bij de varianten die zijn doorgerekend is tevens een analyse uitgevoerd op de potentiële natuur- en gebruikers functies volgens dezelfde methodiek als gebruikt in fase 1 (zie boven) en bij eerdere studies m.b.t. het storten van baggerslib in de Oosterschelde (Van Duren et al. 2019). Het gaat hierbij nadrukkelijk om de effecten op de omgeving t.g.v. slibverspreiding. Op de suppletielocatie zelf zal uiteraard de aanwezige biota in eerste instantie volledig verdwijnen. Effecten op de baggerlocatie zijn in deze studie niet meegenomen. Ook zijn effecten zoals verstoring van foeragerende vogels tijdens de werkzaamheden in deze sectie niet aan de orde.

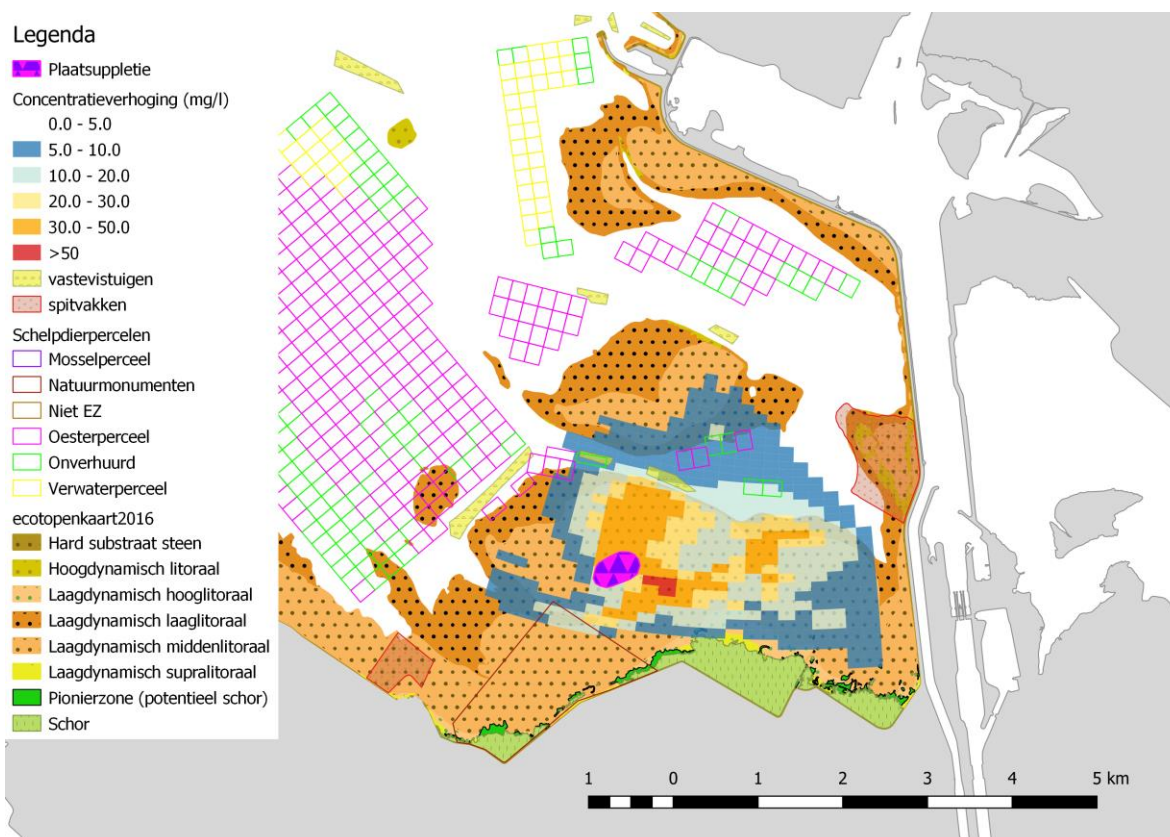
3.1.2 Modelresultaten definitief suppletie-ontwerp voor R08PH2_2_30_S05_20ha

Figuur 52 toont het resultaat van de modelsimulatie voor het definitieve ontwerp m.b.t. de verhoging van de weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van de suppletie (week 9, twee maanden simulatie). Ten opzichte van de eerder berekende variant 'lage suppletie' uit fase 1 (R08PH2_2_30_S03, zelfde kenmerken als definitief ontwerp, maar iets meer noordelijke locatie, zie fase 1 onderzoek), verloopt de verspreiding wat langzamer en is de maximale concentratieverhoging in de waterkolom lager. Bovendien spreidt de zone met een verhoogde concentratie zich wat minder ver uit rondom de suppletie. Dit is gunstig voor de mogelijke invloed op belendende oesterpercelen. Niettemin ondervinden enkele percelen ten noordwesten van de suppletie tijdelijk een concentratieverhoging van 5 tot 10 mg/l. Voor de suppletievarianten van 15 en 10 ha is deze invloed op de concentratie proportioneel kleiner.

Figuur 53 toont dezelfde resultaten tegen het einde van de berekening, namelijk ca. een maand na aanleg van de suppletie (week 13, drie maanden simulatie). Ook dan ondervinden enkele percelen een concentratieverhoging van 5 tot 10 mg/l, maar dit zijn andere, meer oostelijk gelegen percelen dan in week 9. Een verklaring voor deze verschillen is dat naast het getij ook windsnelheid en -richting een belangrijke invloed hebben op de verspreiding. Deze zijn sterk variabel.

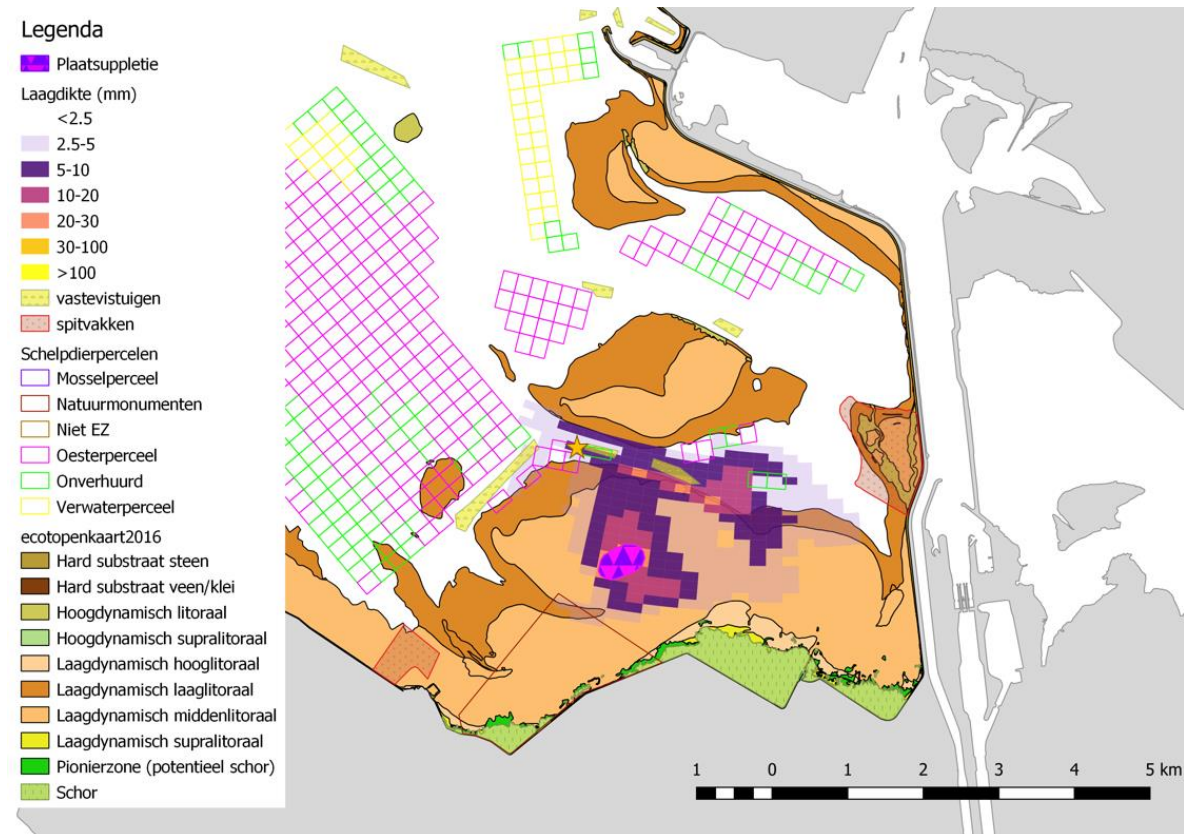


Figuur 52. Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van de suppletie (week 9) voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het gedeelte binnen de 'blauwe ring' geeft concentratieverhoging aan. De gestippelde oranje vlakken zijn het laagdynamisch litoraal.



Figuur 53. Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom in week 13 voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het gedeelte binnen de 'blauwe ring' geeft concentratieverhoging aan. De gestippelde oranje vlakken zijn het laagdynamisch litoraal.

Figuur 54 toont het resultaat van de modelsimulatie voor het definitieve ontwerp m.b.t. de verspreiding en accumulatie van het slib op de bodem één maand na de aanleg van de suppletie (week 14, drie maanden simulatie). Ten opzichte van de eerder berekende variant 'lage suppletie' uit fase 1 (R08PH2_2_30_S03, zelfde kenmerken als definitief ontwerp, maar iets meer noordelijke locatie, zie fase 1 onderzoek), verloopt de verspreiding wat langzamer en is de maximale dikte van de slibafzetting rondom de suppletielocatie kleiner. Dit is gunstig voor de mogelijke invloed op belendende mosselpercelen. Voor de suppletievarianten van 15 en 10 ha is deze invloed op de slibafzetting proportioneel kleiner.



Figuur 54. Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken) voor scenario R08PH2_2_30_S05_20ha (definitief suppletie-ontwerp van 20 ha). Het sterretje geeft aan waar de analyse voor de ophogingssnelheid is uitgevoerd.

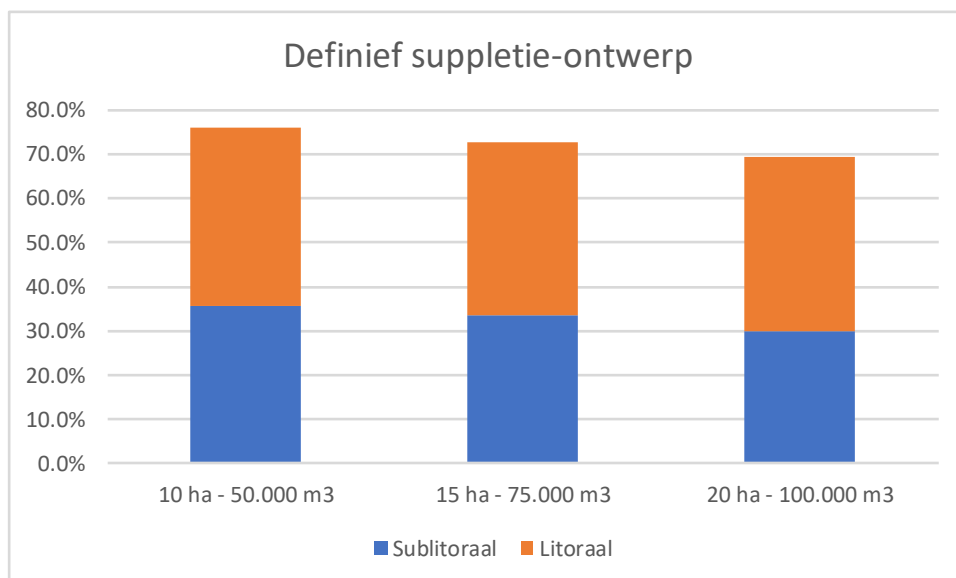
Tabel 10 toont de slibmassa en het areaal van de gebieden (buiten de suppletie zelf) met een dikte van opslibbing van meer dan 1 mm en meer dan 1 cm, zowel in het litoraal (> -1.47 m NAP) en het sublitoraal (< -1.47 m NAP). Hieruit blijkt dat de suppletie van 20 ha bijdraagt aan een opslibbing van meer dan 1 cm over 50 ha in het litoraal en over 52 ha in het sublitoraal. Een ophoging van meer dan 1 mm treedt over een veel groter gebied op, namelijk 792 ha in het litoraal en 659 in het sublitoraal. Nergens is de opslibbing meer dan 5 cm. Deze getallen zijn iets gunstiger, in de zin van de hoeveelheid slib dat in het litoraal terecht komt, dan voor de eerdere variant 'lage suppletie' (R08_PH2_2_30_S03, fase 1) die ter referentie ook in Tabel 10 is getoond. De verschillen voor laagdikte > 1mm zijn klein, maar voor een laagdikte > 1cm is het oppervlakte 3,5x groter bij het definitieve suppletie-ontwerp. Bij een suppletievolumen van 75.000 m³ is het areaal bedekt met een laagdikte > 1 cm gelijkaardig met de 'lage suppletie' uit het fase 1 onderzoek, bij een suppletievolumen van 50.000 m³ is het areaal bedekt met een laagdikte > 1 cm slechts de helft t.o.v. deze 'lage suppletie'.

Vanuit het definitief suppletie-ontwerp wordt 69-76% van het gestorte slib verspreid in drie maanden (met een minimale aanslibbing van 1 mm), afhankelijk van de hoeveelheid

gestorte baggerspecie (Tabel 10 en Figuur 55). Van dit verspreide sediment bevindt 53-57% zich in het litoraal wat overeenkomt met 12,1, 8,8 en 5,9 kton afzetting voor respectievelijk een suppletie van 100.000 m³, 75.000 m³ en 50.000 m³. De gemiddelde dikte van het verspreide slib is 3,1, 3,4 en 3,8 mm voor respectievelijk een suppletie van 100.000 m³, 75.000 m³ en 50.000 m³.

Tabel 10. Areaal met opslibbing voor respectievelijk een laagdikte > 1 mm en een laagdikte > 1 cm) voor het definitief suppletie-ontwerp voor de varianten 10 ha (50.000 m³), 15 ha (75.000 m³) en 20 ha (100.000 m³). In cursief is ter referentie ook de variant 'lage suppletie' (R08_PH2_2_30_S03) uit het fase 1 onderzoek opgenomen.

klasse	areaal (ha)	massa (kton)	areaal (ha)	massa (kton)
> 1 mm	litoraal		sublitoraal	
R08PH2_2_30_S05_20ha	792	12,1	659	10,7
R08PH2_2_30_S05_15ha	644	8,8	534	7,6
R08PH2_2_30_S05_10ha	485	5,9	366	4,5
<i>R08_PH2_2_30_S03</i>	<i>782</i>	<i>11,1</i>	<i>688</i>	<i>11,7</i>
> 1 cm	Litoraal		Sublitoraal	
R08PH2_2_30_S05_20ha	49,9	2,49	52,0	3,2
R08PH2_2_30_S05_15ha	20,6	1,12	28,7	1,6
R08PH2_2_30_S05_10ha	7,9	0,71	6,65	0,3
<i>R08_PH2_2_30_S03</i>	<i>17,0</i>	<i>0,81</i>	<i>66,8</i>	<i>4,1</i>



Figuur 55. Percentage van de slibfractie het gedeponeerde sediment met een minimale laagdikte van 1 mm dat zich verspreid op het einde van de simulatieperiode in het litoraal en sublitoraal areaal voor het definitief suppletie-ontwerp voor de varianten 10 ha (50.000 m³), 15 ha (75.000 m³) en 20 ha (100.000 m³).

3.1.3 Potentiële effecten

Bij de effecten van slibverspreiding is onderscheid gemaakt tussen effecten van verhoging van de slibconcentratie in de waterkolom en effecten van sedimentatie van slib op de bodem.

3.1.3.1 Waterkolom

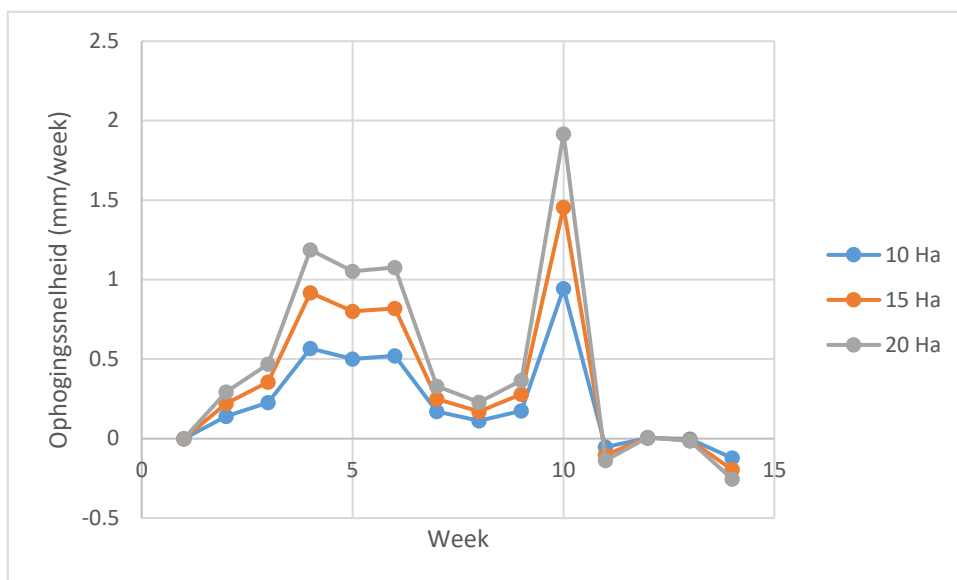
In Figuur 52 is te zien dat er lokaal zeer hoge concentraties slib in de waterkolom voorkomen vlak rond de suppletielocatie. Deze zeer hoge concentraties verdwijnen vrij snel (binnen 2 weken) na voltooiing van de werkzaamheden. Omdat er rond de locatie vrij veel fijn materiaal op de bodem ligt, kunnen in weken met veel wind, de concentraties in de omgeving af en toe weer verhogen, zoals te zien is in Figuur 53. Dit is een week met een aantal dagen met vrij veel wind, waardoor materiaal opwervelt en daarmee ook de weekgemiddelde concentraties verhoogd worden. In deze week komen op enkele oesterpercelen aan de zuidkant van de Hooge Kraaijer concentratieverhogingen van iets meer dan 10 mg/l voor. Dit zijn geen concentraties waarbij sterfte op kan treden bij oesters, maar enig effect op groeisnelheden kan niet helemaal worden uitgesloten. Het betreft wel een beperkt aantal percelen. Uit de eerdere studies is gebleken dat oesters en mosselen de meest gevoelige soorten zijn voor concentratieverhoging van slib in het water. Voor andere diersoorten wordt hier geen effect verwacht.

De gepresenteerde data zijn weekgemiddelden. Binnen deze weken zijn er wel enkele dagen dat concentratieverhogingen flink hoger kunnen liggen. Echter, een kortstondige periode (1 à 2 dagen) van verhoogde slibconcentraties kunnen schelpdieren over het algemeen goed doorstaan.

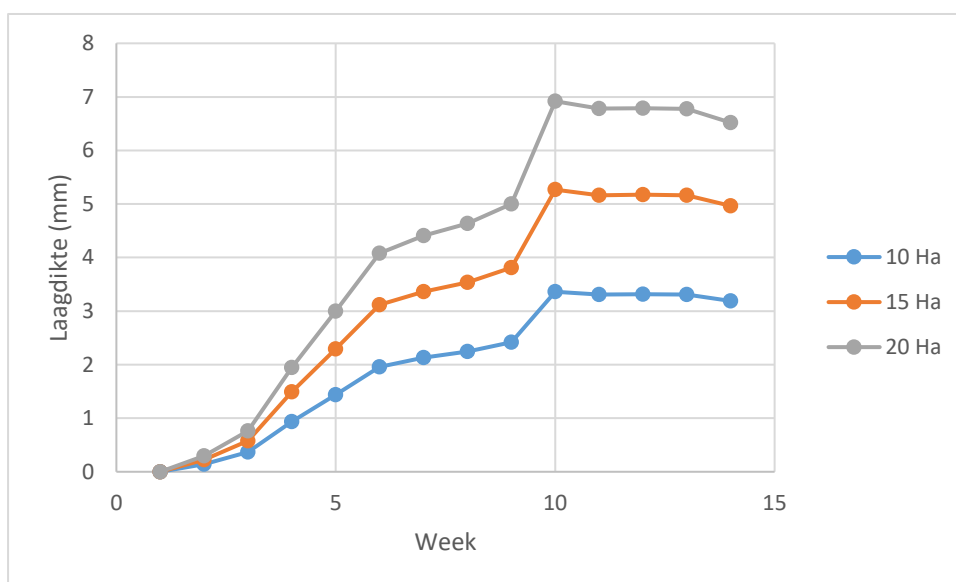
3.1.3.2 Bodem

In het scenario met een aangelegde suppletie van 20 hectare komen vlak in de buurt van de suppletie laagdiktes voor van enkele centimeters (Figuur 54, Tabel 10). NB: in dit model is alleen rekening gehouden met slib. Een deel van het zand zal zich ook over de bodem verspreiden rondom de suppletielocatie (zie verder). Ook langs de rand van het slik komt tot 10 kg slib per m² terecht wat overeenkomt met een laagdikte van 25 mm (2.5 cm) slib, over een tijd van 3 maanden. Er is slechts op een beperkt aantal oesterpercelen waar meer dan 2 kg/m² op terecht komt, overeenkomend met 5 mm ongeconsolideerd slib. In principe zijn dit hoeveelheden die voor oesters geen probleem vormen. Na 3 maanden zal een deel van het slib zijn geconsolideerd en de uiteindelijke laagdikte zal vermoedelijk minder zijn.

Uiteindelijk zijn opslibbingssnelheden belangrijker dan de uiteindelijke hoeveelheden die op een locatie terecht komen. Om zeker te zijn dat deze mate van opslibbing geen negatieve effecten zal hebben op deze oesterpercelen is voor alle drie de scenario's op één van de locaties een analyse gedaan op alle weekuitvoeren van het model (zie Figuur 54 voor locatie). Hiermee kan de snelheid waarmee slib op een bepaalde locatie accumuleert worden berekend. Figuur 56 toont de opbouw van de sliblaag op deze locatie. Figuur 57 toont de opslibbingssnelheid per week. Uit de literatuur blijkt dat schelpdieren in principe gemakkelijk om kunnen gaan met opslibbingssnelheden tot 1 cm /maand (Bijkerk 1988). De maximale snelheid bij het grootste scenario is 2 mm/week, dus nog minder dan 1 cm/maand. Alle andere weken zit de opslibbingssnelheid daar duidelijk onder. Dit houdt in dat dit geen probleem zou moeten opleveren voor de oesters op dit perceel. Op de andere percelen komt minder slib terecht, behalve op enkele onverhuurde percelen. Daar was de opslibbing vergelijkbaar.



Figuur 56. Laagdikte van gesedimenteerd slib over de modelperiode voor de drie scenario's



Figuur 57. Ophogingssnelheid per week op de aangegeven locatie.

3.1.3.3 Conclusies

M.b.t. de omgevingseffecten van slib, blijkt uit de modellen dat er in de directe omgeving van de suppletie (en uiteraard op de suppletielocatie zelf) effecten op het slib zullen plaatsvinden die tijdelijk negatief kunnen uitwerken voor de lokale bodemdierpopulaties en dus ook voor de waarde van het gebied als foerageergebied voor vogels. Het gebied waar meerdere centimeters materiaal terecht komt is beperkt. Wel zal er mogelijk langs de rand van het slib enige sterfte of verstikking van bodemdieren optreden. Omdat het gebied in oppervlak beperkt is zal het relatief snel rekoloniseren.

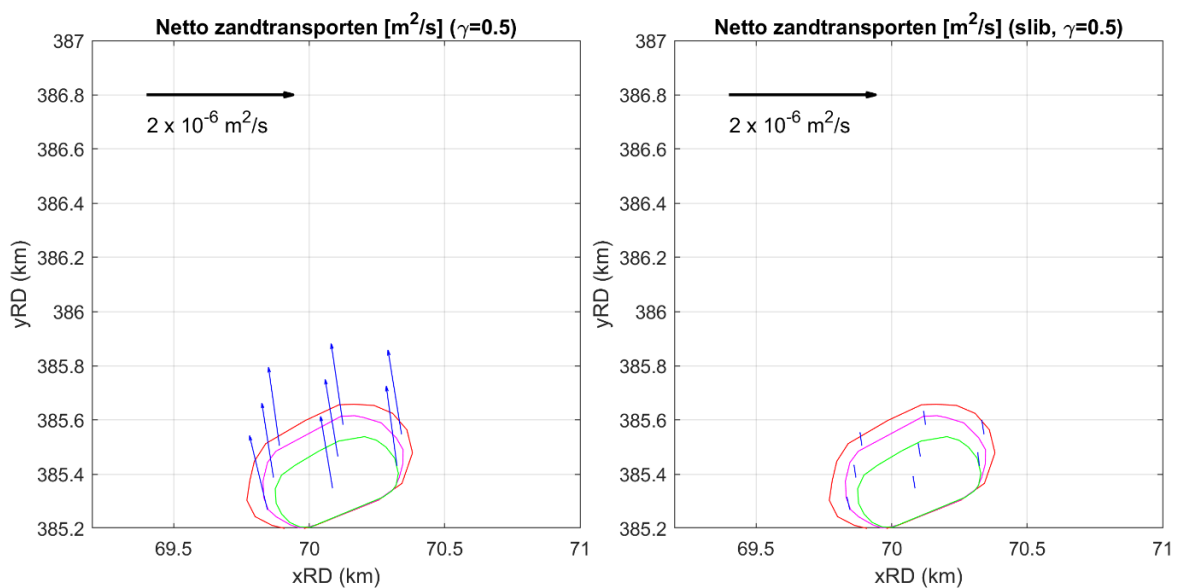
Op gebruiksfuncties lijkt er alleen een beperkt risico te zijn voor enkele oesterpercelen langs de Hoge Kraaijer. Dit speelt vooral rond de tijd van aanleg, wanneer slibconcentraties in het water zijn verhoogd. Effecten van opslibbing lijken nauwelijks significant.

3.2 Zandtransport definitief suppletie-ontwerp

Figuur 58 laat de berekende zandtransporten zien, met en zonder slibeffecten. De resultaten zijn erg vergelijkbaar met de eerder doorgekende plaatsuppletievariant, die een paar honderd meter naar het noorden lag (zie fase 1). De netto transporten zijn iets kleiner. Er is weinig verschil tussen de 8 verschillende locaties waarvoor het zandtransport is uitgerekend. De 3 varianten (20, 15, 10 ha) zijn dus niet onderscheidend. De verhoogde kritische schuifspanning door de aanwezigheid van slib zorgt voor een aanzienlijke reductie van het netto zandtransport (\sim factor 6), in lijn met de bevindingen in fase 1.

Als we dit vertalen naar de morfologische ontwikkeling van het zandige deel van de suppletie, volgens de eerder beschreven simpele aanpak, is de verwachte verplaatsing ~ 100 -500 m/jaar in NNO richting en zal de suppletie binnen ~ 4 -15 jaar afgevlakt cq. uitgedoofd zijn. De ondergrens van de verplaatsing en de bovengrens van de uitdovingstijd corresponderen met de situatie direct na aanleg; de aanwezigheid van slib vertraagt de morfologische ontwikkeling. Als de suppletie uitgedoofd is, ligt het zand niet direct in de geul; het is waarschijnlijker dat deze voor een aanzienlijk deel onderdeel is geworden van het intergetijdengebied.

Het is belangrijk om aan te tekenen dat deze getallen onzeker zijn, met minimaal een factor 2 bandbreedte.



Figuur 58. Berekende netto zandtransporten voor het definitief suppletie-ontwerp op basis van de berekende waterbeweging voor de periode 1 september – 1 december 2013. De lagere zandtransporten in de som met slib (rechts) worden veroorzaakt door de slibfractie die zorgt voor een hogere kritische bodemschuifspanning.

4 Conclusie definitief suppletie-ontwerp

Het definitief suppletie-ontwerp resulteert in een suppletie waarvan de zandfractie (70% van het volume) meerdere jaren een bijdrage zal leveren aan het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De zandfractie zal zich langzaam verspreiden in voornamelijk NNO richting. Van de slibfractie (30% van het volume) zal zo'n 70% uitgespoeld zijn drie maanden na aanleg. Hierbij dient in acht genomen te worden dat het slibmodel gedraaid is met een lage kritische schuifspanning voor het slib. Zo'n 55% van dit slib komt in het litoraal van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland terecht en zal zich over een groot gebied verspreiden. Concentratieverhoging van het slib in de waterkolom zal tijdelijk optreden, vooral ter hoogte van de suppletie zelf, maar uitdijend tot in de Mosselkreek. Ter hoogte van de oesterpercelen in de Mosselkreek zal de concentratieverhoging beperkt blijven en naar alle waarschijnlijkheid niet tot sterfte leiden van oesters. De slibafzetting op oesterpercelen lijkt nauwelijks significant.

De suppletie kan daarmee als een nuttige en zinvolle maatregel gezien worden om de effecten van de zandhonger in de Oosterschelde tegen te gaan, en zal meer bepaald bijdragen aan het behoud van het foerageerhabitat voor steltlopers ter hoogte van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. Uiteraard is er de verstoring van de aanleg, en zal tijdelijk het bodemleven ter hoogte van de suppletie en in een beperkte omgeving daarrond afsterven. Lokaal kan door grote slibafzetting ook verstikking van bepaalde biota optreden (bijv. schelpdieren). Net als bij eerdere suppleties is de verwachting dat de rekolonisatie van het bodemleven relatief snel zal verlopen. In hoeverre de samenstelling van de bodemdiergemeenschap anders zal zijn, omwille van het meer slibrijke sediment, is moeilijk te voorspellen.

In essentie lijkt dus het inzetten van slibrijk sediment dat vrijkomt bij onderhoudsbaggerwerkzaamheden een zinvolle maatregel die kan bijdragen aan het beschermen en behouden van de intergetijdennatuur (ofwel het litorale habitat) in de Oosterschelde, en daarmee ook de foerageerfunctie die dit habitat vervult voor steltlopers (Natura 2000). Zeker als dit op regelmatige basis herhaald wordt, telkens als er onderhoudsspecie vrijkomt, is dit een duurzame maatregel. Er zal telkens moeten gekeken worden welke maatregel waar uitgevoerd wordt, afhankelijk van de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment. Met het suppleren van slibrijke specie op een slik is nog geen ervaring opgedaan en een eventuele pilot dient dan ook gepaard te gaan met een gedegen en uitgebreid meerjarig monitorings- en onderzoeksprogramma. Het is de verwachting dat toepassing van golfdempende elementen de effectiviteit en duurzaamheid van de maatregel kan verhogen.

5 Aanbeveling aanleg definitief suppletie-ontwerp

In hoofdstuk 2 van Fase 2 is het definitief suppletie-ontwerp met de kenmerken beschreven. De locatie/contouren van de suppletie zijn hierin vastgesteld met daarvan uitwerkingen van diverse volumes gesuppleerd sediment. In aanvulling daarop worden in dit hoofdstuk aanbevelingen ten aanzien van de aanleg van het definitieve suppletieontwerp gemaakt:

- Bij de kenmerken van het definitieve ontwerp is beschreven dat, ten behoeve van de uitvoerbaarheid van het ontwerp, een marge van +/- 20 cm op de aanlegdikte van 50 cm noodzakelijk kan zijn. Als de aanlegdikte lokaal kleiner wordt dan orde 30 cm wordt de bijdrage aan de lange termijn doelstellingen van de suppletie te beperkt geacht. Ook moet voorkomen worden dat de suppletie op een te klein oppervlakte wordt uitgevoerd (dus met een te grote dikte), daarom wordt een aanlegdikte groter dan 70 cm ook onwenselijk geacht.
- Voorkomen moet worden dat de randen van de suppletie te steil worden uitgevoerd. Een gelijkmatige overgang van de suppletie naar de omliggende bodem is vanuit morfologisch en ecologisch perspectief wenselijk (zie ook Roggenplaat suppletie, van der Werf et al. 2019). Als richtlijn kan, net als bij de Roggenplaat, een helling van 1 op 50 worden genomen. Het is niet noodzakelijk dat de randen van de suppletie uniform met deze helling worden uitgevoerd. Gedacht kan worden deze helling als richtlijn naar de aannemer op te leggen, mits lokaal hellingen in ieder geval niet steiler worden dan 1 op 25. Flauwer maakt in principe niet uit, zolang er voldoende sediment binnen de contouren van het ontwerp terecht komt.
- De verwachting is dat de specie die geperst gaat worden op het slik relatief vloeibaar zal zijn omwille van het hoge watergehalte. Risico hiervan is dat tijdens de aanleg al een substantieel deel van het gesuppleerde sediment buiten de ontwerpcontouren terecht zal komen. Om tijdens de aanleg ongecontroleerd wegvloeien van het sediment te beperken wordt aanbevolen om eerst een ringdijk aan te leggen zoals ook bij de Galgeplaat suppletie is toegepast (Figuur 59). Dit dient niet zozeer om de oesterpercelen te beschermen, wel om het ontwerp zo goed mogelijk te kunnen realiseren. Gekozen kan worden om het al dan niet gebruiken van een ringdijk aan de aannemer over te laten. Waarschijnlijk is het praktischer een aanvullende eis te stellen aan het percentage van het gesuppleerde sediment dat na uitvoering nog binnen de ontwerpcontouren aanwezig is, bijvoorbeeld 80%. Het vaststellen van een eis omtrent de oppervlakte van de suppletie is dan niet nodig, deze volgt inherent uit bovenstaande bepaling in combinatie met de eis omtrent de aanleghoogte.
- Micro - macroreliëf kan een positieve uitwerking hebben op een meer diverse ontwikkeling van het bodemleven. Het gladstrijken van de suppletie hoeft dus niet in precisie te gebeuren. Grote vlaktes waar het water bij droogvallen op vast blijft staan dienen, zoals al bij het definitieve ontwerp beschreven, wel voorkomen te worden. Dit kan het gevolg zijn van te veel macroreliëf of een eventuele ringdijk die afstroming van water na aanleg beperkt.
- Specifiek voor wat de beschikbare baggerspecie uit de Zandkreek betreft, wordt aanbevolen, indien de hoeveelheid te suppleren sediment beperkend is, eerst de specie met de grootste zandfractie te benutten. Voor het definitieve ontwerp is gerekend met 3 varianten met een suppletievolume van 50.000, 75.000 en 100.000 m³. Het totale baggervolume is echter groter, zodat een selectie van de specie moet worden gemaakt. Hierbij geldt dat het meest zandige deel van de

specie (voornamelijk bij de overgang van de Zandkreek naar de Oosterschelde) het eerst in aanmerking komt voor de plaatsuppletie en dat het resterende meest slibrijke deel (voornamelijk achterin bij de sluis) wordt verspreid in de reguliere verspreidingslocatie O10.

Benadrukt wordt dat de uiteindelijke specificering van het ontwerp en onderliggende marges in het bestek mede afhangen van het budget. Nauwere eisen kunnen leiden tot hoge kosten of zelfs een niet uitvoerbaar ontwerp. Bovenstaande aanbevelingen zijn daarom geschreven vanuit het perspectief waarbinnen het ontwerp nog zinvol is binnen de gestelde doelstellingen. Het is aan de opdrachtgever om, wellicht na consultatie van een uitvoerende partij, definitieve uitvoeringseisen vast te stellen.



Figuur 59. Galgepaat suppletie met ringdijk waarbinnen het sediment geperst wordt.

6 Monitoringsplan definitief suppletie-ontwerp

6.1 Inleiding

In dit monitorings- en onderzoeksplan worden de plannen en de randvoorwaarden met betrekking tot de monitoring van de suppletie in het kader van Natuur Impuls (2020-2026) beschreven. Het doel van de monitoring van de Natuur Impuls suppletie is om antwoord te kunnen geven op de vraag of, middels een suppletie van slibrijk baggerspecie het intergetijdengebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland behouden kan blijven en de foerageerfunctie voor steltlopers gewaarborgd. Daarnaast moet de monitoring en het onderzoek ook meer generieke kennis ontwikkelen voor suppleren met slibrijk sediment in intergetijdengebieden. Optimalisatie en validatie van de hydromorfologische modellen vormen een wezenlijk onderdeel van het plan. Daarom is het monitoringsplan opgebouwd uit zogenaamde evaluatievragen en kennisvragen.

Voorliggend monitoringsprogramma gaat uit van een suppletie van 100.000 m³. Er wordt uitgegaan van een aanleg van de suppletie in de winter van 2020 – 2021, wat inhoudt dat er maar geringe tijd is voor een T0 bemonstering. Indien de suppletie met een jaar wordt uitgesteld kan de T0 monitoring worden uitgebreid in de tijd. Na aanleg wordt een monitoring van vijf jaren (2021 – 2025 of 2022 – 2026) voorzien. Naast tussentijdse evaluaties wordt in 2026 (of 2027) een eindrapport, incl. evaluatie, opgeleverd.

Voor het monitoringsplan is gebruik gemaakt van het monitoringsplan dat opgesteld is voor de Roggenplaat suppletie (Ysebaert et al. 2017). Het monitoringsplan is mede tot stand gekomen dankzij input van verschillende deskundigen van de betrokken kennisinstellingen en Rijkswaterstaat. De monitoring van de mogelijke effecten op gebruiksfuncties (bijv. de oesterkweek) vormt geen onderdeel van dit monitoringsplan.

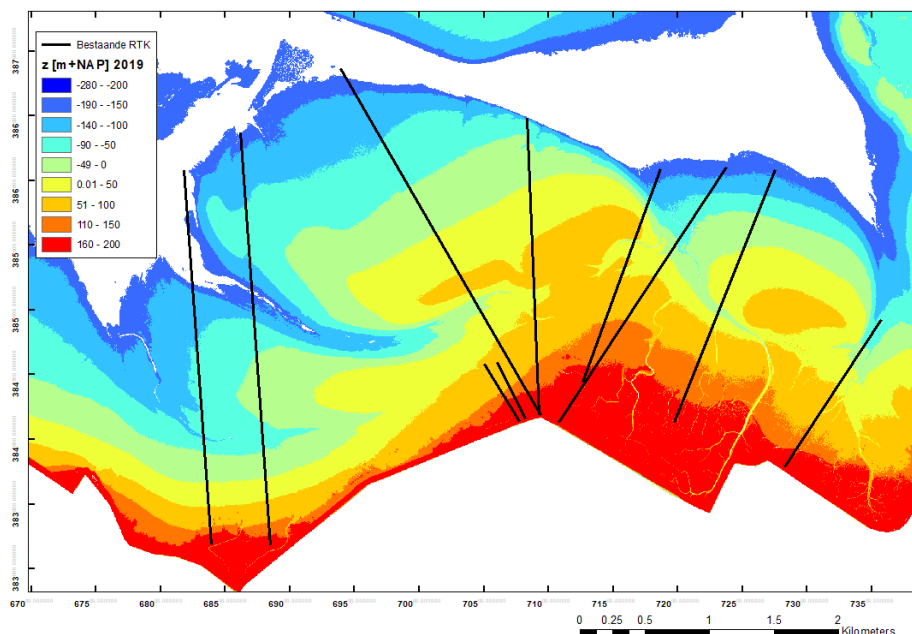
De exacte positie van de bemonsteringslocaties, raaien etc. zoals hieronder voorgesteld kunnen uiteraard nog wijzigen afhankelijk van de uiteindelijke realisatie van de suppletie. Op het moment dat het duidelijk wordt wat de hoeveelheden en omvang zijn van de suppletie kan het monitoringsplan verder gedetailleerd en geoptimaliseerd worden. Hierbij kan ook rekening gehouden worden met praktische zaken, zoals bijv. wat tijdens een laagwaterperiode haalbaar is.

De monitoring omvat de hydro-morfologische ontwikkelingen van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland en de suppletie, monitoring van de sedimenteigenschappen van de suppletie en de verspreiding ervan (incl. troebelheidsmetingen), ecologische monitoring van het bodemleven, zowel de rekolonisatie op de suppletie als de mogelijke effecten van de verspreiding van het sediment op het bodemleven, en monitoring van het gebruik van de suppletie door foeragerende steltlopers. De mogelijke effecten op schorren en zeegras worden door middel van visuele inspecties opgevolgd.

6.2 Hydro-morfologische ontwikkeling

6.2.1 Achtergrond

Er worden door Rijkswaterstaat jaarlijks waterpassingen uitgevoerd door middel van RTK (Real Time Kinematic) over vaste raaien in de Kom van de Oosterschelde (Figuur 60, zie ook Figuur 4). Om de drie jaar wordt er ook gebiedsdekkende LIDAR opname gemaakt van de hele Oosterschelde, de laatste heeft plaatsgevonden in 2019. Om een beeld te krijgen van de morfologische ontwikkeling na aanleg van de suppletie dienen aanvullende metingen uitgevoerd te worden middels RTK, LIDAR en sensoren. Modelberekeningen voorspellen een netto zandtransport in noordelijke richting (Figuur 58). Omdat berekende suspensietransporten veel groter zijn dan de bodemtransporten zal de morfologische ontwikkeling vooral bepaald worden door het suspensietransport. Naar verwachting zal het zandige gedeelte van de suppletie zich verplaatsen met honderden meters per jaar en binnen een paar jaar uitgedoofd zijn, echter zit er een grote onzekerheidsmarge in deze getallen (zie boven). De slibfractie zal zich veel sneller verspreiden en dit over een veel groter oppervlak.



Figuur 60. Overzichtskartaal met de ligging van RTK-dGPS raaien op het Verdrunken Land van Zuid-Beveland intergetijdgebied. De achtergrond toont de LIDAR van 2019.

6.2.2 Doel

Het doel van de aanvullende metingen is het goed in kaart brengen van de morfologische veranderingen in het intergetijdgebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland en in kaart brengen of en hoe het sediment (slib en zand) van de suppletie na aanleg zal verplaatsen. Dit gaat dan zowel om de migratiesnelheid, de migratierichting, en vormveranderingen. Hieronder wordt onderscheid gemaakt in gebied- en suppletie-specifieke evaluatie- en kennisvragen. Met het gebied bedoelen we het Verdrunken Land van Zuid-Beveland, zoals weergegeven in Figuur 60, incl. de aanpalende geulen zoals de Mosselgeul.

Gebied specifieke evaluatievragen:

1. Hoe verandert het areaal droogvalduur in de periode 2020-2025 op het intergetijdgebied van het Verdrunken Land van Zuid-Beveland?

Gebied specifieke kennisvragen:

2. Welke processen liggen aan de grondslag van de veranderingen in areaal droogvalduur op het intergetijdgebied Rattekaai?

- a. Wanneer (bijv. bij stormen) en waar treedt vooral erosie op?
- b. Hoe verplaatst het sediment zich over het Verdrongen Land van Zuid-Beveland?
- c. Hoe worden de niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) beïnvloed door de aanwezigheid van de suppletie?

Suppletie specifieke evaluatievragen:

- 3. Hoe ontwikkelt de suppletie zich morfologisch (zowel m.b.t. hoogteligging als samenstelling van de bodem)?

Suppletie specifieke kennisvraag:

- 4. Welke processen liggen ten grondslag aan de veranderingen in de suppletie?
 - a. Wanneer treedt vooral erosie op (bijv. bij stormen) en hoe verandert het erosiegedrag in de tijd onder invloed van veranderingen in de samenstelling en dichtheid?
 - b. Hoe verspreidt het sediment zich en waar gaat het gesuppleerde sediment naar toe: blijft het op het intergetijdengebied of wordt een deel afgevoerd naar de nabijgelegen geulen en het sublitoraal?
 - c. Ontstaan geulen nabij de suppletie?

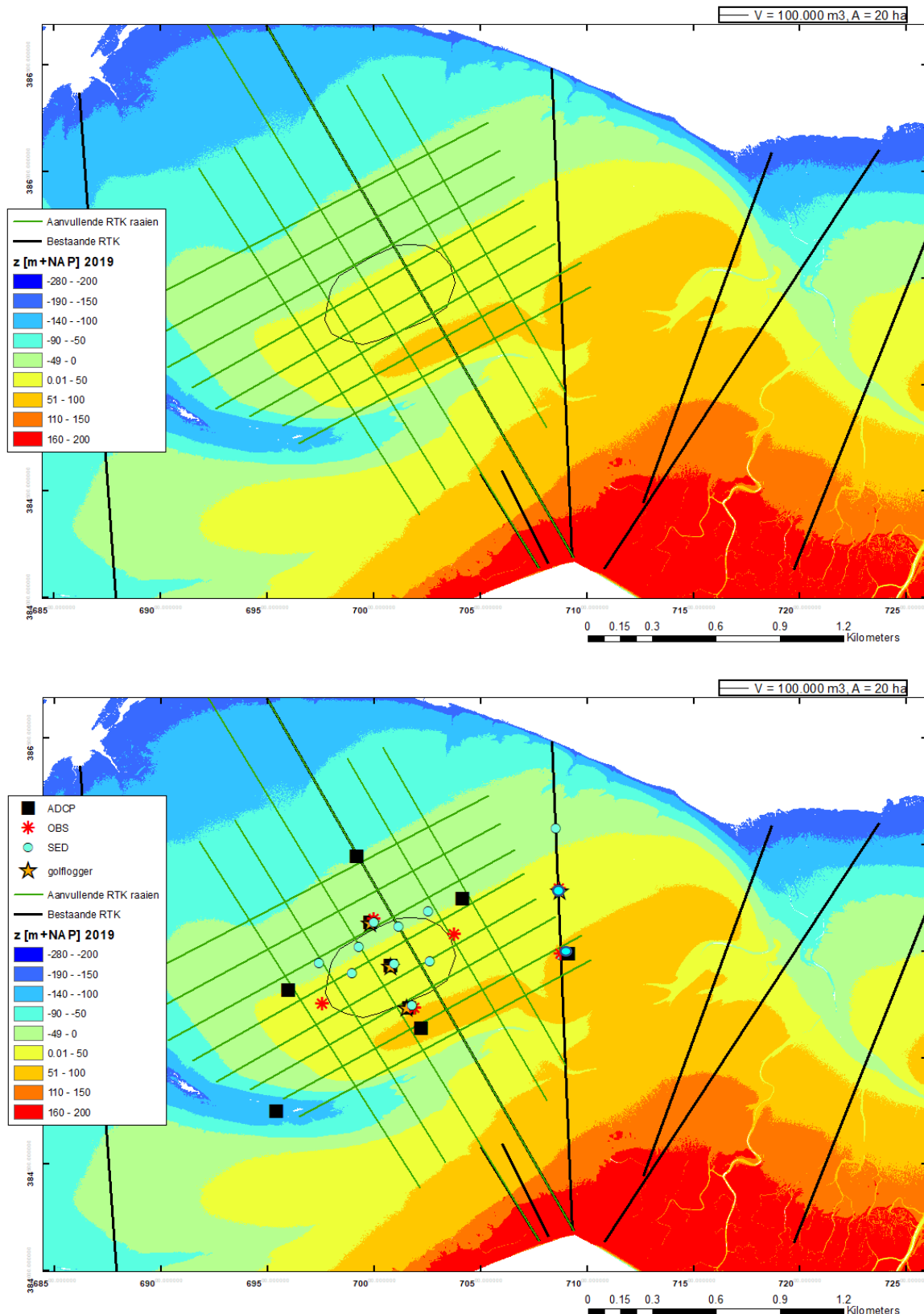
6.2.3 Methode

Voorgesteld wordt een combinatie van verschillende meetmethoden te gebruiken om alle aspecten te kunnen onderzoeken. LIDAR (resulteert in ruimtelijke kaarten met een grote ruimtelijke dekking maar relatief lage frequentie), drone, RTK (lijnmetingen) en SED sensoren (puntmetingen met een relatieve hoge frequentie) worden ingezet om de morfologie te bemeten (Tabel 11). Golfloggers (druksensoren) en stromingsmeters (ADCPs) worden ingezet om de hydrodynamische forceringen te meten. In combinatie hiermee worden troebelheidsmeters (OBS-en) ingezet om de slibconcentraties in de waterkolom te meten (en i.c.m. de ADCP het suspensietransport). Op tenminste 1 positie wordt een LISST ingezet in combinatie met een vlokcamera. Hiermee wordt de grootte en valsnelheid van de slibvlokken bepaald die sturend zijn voor slibtransport (zie §5.2). De bodemligging van de Oosterschelde wordt driejaarlijks opgemeten. Voor het intergetijdengebied wordt hiervoor gebruik gemaakt van LIDAR. LIDAR (Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging) is een meting van de afstand tussen vliegtuig of helikopter en het grondoppervlak, waarmee in combinatie met de plaatsbepaling van het vliegtuig de hoogte van het grondoppervlak kan worden gemeten. In 2019 is de laatste LIDAR meting uitgevoerd en de volgende staat gepland in 2022 en 2025. Aangezien de Roggenplaat de komende vijf jaren jaarlijks met LIDAR opgemeten wordt stellen we voor dit uit te breiden naar het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. We stellen ook voor om foto's en 3D metingen uit te voeren met een drone: T0, kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maand na de aanleg, 6 maand na de aanleg en vervolgens jaarlijks.

Aanvullend op de RWS RTK metingen (**Error! Reference source not found.**) worden er extra raaien ingelopen in de buurt van de suppletie (Figuur 61). RTK is een hoogtemeting welke een hoge nauwkeurigheid (ca 2 cm) in de verticaal oplevert. RTK metingen dienen uitgevoerd te worden voor de aanleg (T0), kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maanden na de aanleg, zes maanden na de aanleg, negen maanden na de aanleg, en vervolgens 3 keer per jaar (2022 en 2023) en 2 keer per jaar (2024 en 2025). De raaien zijn nog niet definitief in afwachting van het definitieve suppletievolume. De raaien worden zo gelegd dat de metingen gebruikt kunnen worden om morfologische veranderingen na aanleg van de suppletie in kaart te brengen.

Aanvullend worden SED sensoren ingezet om de temporele veranderingen van de suppletie goed te kunnen vatten, daar waar wij grote (meetbare) veranderingen verwachten (orde centimeters). SED sensoren hebben een nauwkeurigheid van 2 mm. SED sensoren worden bij laagwater geplaatst en kunnen een lange periode autonoom meten (tot > 1 jaar). Wel dienen de sensoren regelmatig schoongemaakt te worden ter

voorkoming van biofouling. De sensoren worden na de aanleg van de suppletie geplaatst, waarna ze in de maanden maart, mei, juni, juli, augustus, september, oktober en december gecontroleerd en schoongemaakt worden. Hierbij wordt de hoogte van de sensor gecontroleerd. In november worden de instrumenten meegenomen naar het lab en de data uitgelezen en de batterijen vervangen, waarna de instrumenten teruggeplaatst worden.



Figuur 61. Voorgestelde ligging van extra RTK raaien en meetsensoren. De zwarte raaien zitten in het bestaand programma van RWS. De groene lijnen zijn de aanvullende raaien. Rondom de suppletie worden ADCPs (zwarte vierkanten), SED sensoren (blauwe stippen), golfloggers (gele sterren) en OBS sensoren (rode asterisk) geplaatst.

Golf- en stromingsmetingen zullen op een aantal locaties uitgevoerd worden om de forcering achter de morfologische veranderingen in kaart te kunnen brengen. Daarnaast is het aan te bevelen om een waverider in de geul te plaatsen. Golfmetingen zullen continu gedaan worden tussen 2020 en 2025 zodat alle weersomstandigheden gemeten worden, inclusief stormachtige condities. De instrumenten worden uitgelezen en batterijen vervangen om de zes tot acht weken. Stroommetingen met ADCP's gedurende twee springtij/doodtij cycli zullen door RWS uitgevoerd worden in 2020 (voor aanleg) en 2021 (na aanleg). Additionele meting tijdens een storm is aan te bevelen.

Daarnaast zal ook de ontwikkeling van de bodemsamenstelling van de suppletie worden gevolgd. Hiertoe worden op de suppletie bodemonsters genomen en geanalyseerd, zie voor verdere details §5.2.

Tabel 11. Fysische metingen t.b.v. morfologische ontwikkelingen. Groen: extra metingen t.b.v. monitoring Natuur Impuls. Oranje: reguliere RWS metingen. De metingen worden in een bepaald kwartaal (Q) uitgevoerd en nemen 1-2 meetdagen per kwartaal in beslag. LIDAR in combinatie met Roggenplaat.

	2020		2021				2022				2023				2024				2025			
Q	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
LIDAR																						
RTK reg.																						
RTK extra																						
SED																						
Golven																						
Stroming																						
Drone																						
Sediment																						

6.2.4 Resultaat

Gedetailleerde hoogtemetingen op de plaat. Door de metingen van verschillende momenten met elkaar te vergelijken kan worden onderzocht hoe de suppletie verandert en in welke richting het sediment migreert. Middels stroming en golfmetingen kan onderzocht worden welke factoren mogelijk ten grondslag liggen aan migratie van de suppletie, in combinatie met modellen om sedimenttransporten en bodemontwikkeling af te schatten en te interpreteren. Dit draagt bij aan het begrip van deze suppletie, maar ook aan een verdere optimalisatie van toekomstige suppletieprojecten.

6.3 Sediment- & suspensietransportmetingen

6.3.1 Achtergrond

Na aanleg van de suppletie wordt verspreiding van slib richting het omliggende intergetijdengebied verwacht. Deze aanvoer kan direct gemeten en gekwantificeerd worden door een optische deeltjes teller (OBS = optical back scatter) in samenhang met een stromingsmeter (Figuur 61). Hierbij is het van belang is dat de korrelgrootteverdeling van het slib (die het verband bepaalt tussen lichtverstrooiing massaconcentratie) bekend is. Verder wordt als gevolg van suspensietransport, op basis van modelberekeningen, morfologische veranderingen in de orde van 2-10 mm verwacht (**Error! Reference source not found.**). Dit valt binnen de onnauwkeurigheidsmarge van de RTK-metingen en vraagt om aanvullende morfologische metingen. Verwacht wordt dat toevoer van slibrijk sediment door suspensietransport effect heeft op het slibgehalte en sedimentsamenstelling van de bodem. Grootste veranderingen worden voornamelijk in de bovenste centimeters verwacht.

6.3.2 Doel

Het doel is het goed in kaart brengen van de erosieflux van slib vanaf de suppletie en het resulterende suspensietransport in de waterkolom en richting de bodem in het gebied nabij de suppletie.

Evaluatievragen:

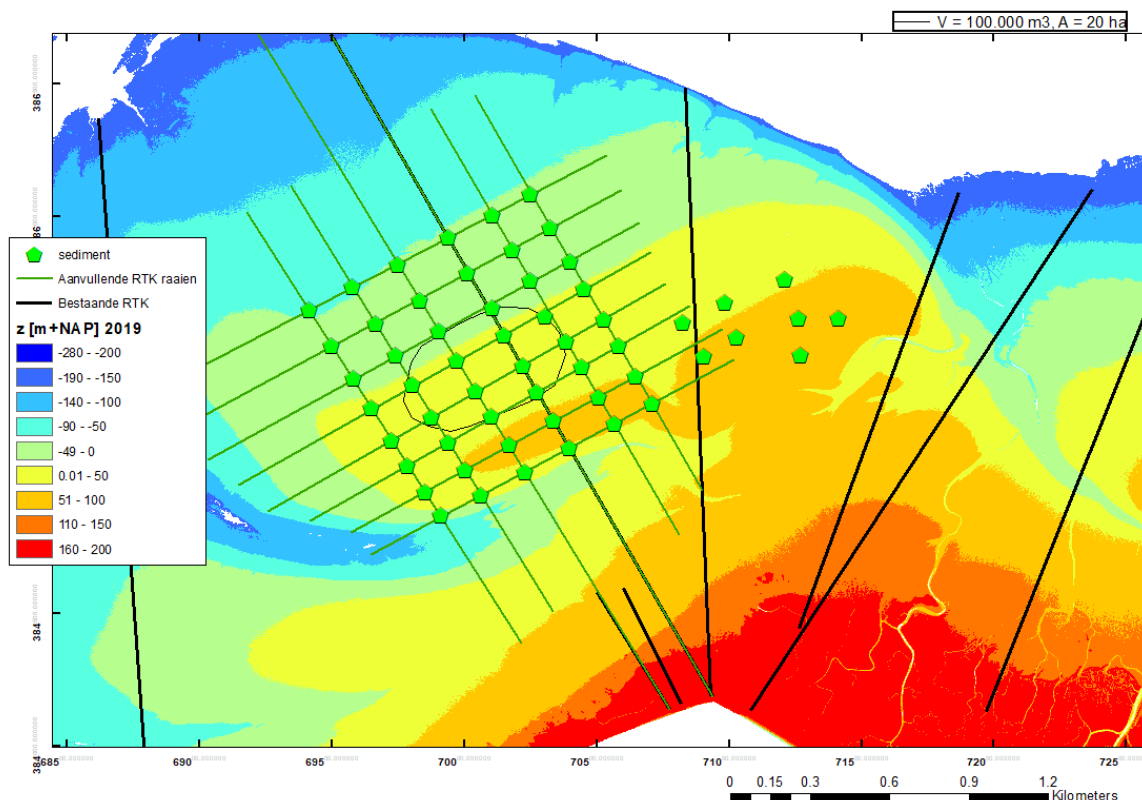
5. Hoe verandert suspensietransport de sedimentsamenstelling van het intergetijdengebied?

Kennisvragen:

6. Hoe groot is de erosieflux van slib en hoe ontwikkelt deze zich in de tijd?
7. In welke richting vindt suspensietransport plaats?
8. Welke processen liggen aan de grondslag aan suspensietransport?
 - a) Wanneer en waar treedt suspensietransport vooral op (bijv. bij stormen)?
 - b) Hoe hangt dit af van de erosie-eigenschappen van de suppletie?
 - c) Wat is de invloed van de eigenschappen van het gesuspendeerde materiaal (denk aan seizoensdynamiek in vlokvorming o.i.v. zout, temperatuur en organisch materiaal).
9. Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door suspensietransport na aanleg van de suppletie?

6.3.3 Methode

Verandering van sediment samenstelling door suspensietransport van het slibrijke sediment wordt voornamelijk in de bovenste centimeters verwacht. Grootste effect verwachten we te meten in de eerste centimeter. De bovenste centimeter wordt bemonsterd voor slibgehalte, korrelgrootteverdeling en organisch stofgehalte bepalingen. Tevens zal de top 3 cm bemonsterd worden voor slibgehalte, korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte en bulkdichtheid. Sediment monsters worden genomen op vaste locaties voor de aanleg (T0), kort na de aanleg, 1 maand na de aanleg, 3 maanden na de aanleg, zes maanden na de aanleg, negen maanden na de aanleg, en vervolgens 3 keer per jaar (2022 en 2023) en 2 keer per jaar (2024 en 2025) (Figuur 62, Tabel 11). Op enkele plekken op de suppletie zullen kernen van 0.5 m worden gestoken om de dikte van de actieve laag te bepalen (t.g.v. fysische en biologische omwerking) en om de ontwikkeling van de dichtheid en sterkte in de tijd te bepalen. Op deze plekken zal ook de erosiebestendigheid van de toplaag worden bepaald. Dit kan (afhankelijk van beschikbaarheid) plaatsvinden met een in-situ erosiemeter of d.m.v. monsternamen en erosiemetingen in het lab. Erosiebestendigheid zal gemeten worden kort na de aanleg, na 1 maand, na drie maanden en na een jaar. Daarnaast worden in-situ sterkteprofielen van de slibrijke suppletielaag (0.5 m) bepaald met een hand-vane. Ter plekke van de golflogger op de suppletie zal ook de waterspanning in de bodem worden gemeten op 10, 30 en 50 cm diepte. Dit geeft belangrijke informatie over de invloed van de golven op de bodem, de consolidatiesnelheid na aanleg van de suppletie en de doorlatendheid van de bodem. Hiermee wordt de ontwikkeling van de stabiliteit van de bodemlaag gevolgd i.c.m. de bodembemonstering.



Figuur 62. Voorgestelde locaties voor sedimentbemonstering.

6.3.4 Resultaat

Ruimtelijke ontwikkeling in slibgehalte en korrelgrootteverdeling op de plaat. Door de metingen van verschillende momenten met elkaar te vergelijken kan worden onderzocht hoe het suspensietransport na aanleg van de suppletie effect heeft op de sedimentsamenstelling van het omliggende gebied. De ontwikkeling van het slibgehalte en de bodemhoogte op de suppletie geeft in combinatie met de SED, RTK en LIDAR metingen inzicht in de tijdspanne waarin de suppletie een bron van slib is. Erosiemetingen kunnen hieraan ook bijdragen.

Inzicht in het suspensietransport rondom de suppletie. De waargenomen bodemveranderingen zijn het cumulatieve effect van sedimenttransporten in de beschouwde periode. Op basis van ADCP- en OBS-metingen wordt vastgesteld onder welke condities de dominante transporten plaatsvinden. Op basis van de LISST en vlokcamera i.c.m. laboratoriumanalyse van water- en bodemonsters wordt vastgesteld in hoeverre er sprake is van een seizoen dynamiek in de slibeigenschappen als vlok grootte en valsnelheid.

Beide resultaten dragen bij aan het begrip van de stabiliteit van de slibrijke suppletie en haar invloed op de omgeving. Deze resultaten zijn ook zeer nuttig om de bestaande verspreidingsmodellen te valideren en de huidige grote onzekerheden in het ontwerp van dergelijke suppleties te verkleinen.

6.4 Ecologische ontwikkeling suppletie - bodemdieren

6.4.1 Achtergrond

Na aanleg van de suppletie zijn alle bodemdieren begraven onder een 50 cm dikke sediment laag. Voorgaande suppleties (Galgenplaat, Schelphoek en Oesterdam) lieten zien dat het herstel van de bodemdiergemeenschap enkele jaren duurt, en dat er mogelijk een andere bodemdiergemeenschap ontwikkelt omdat de fysische

omstandigheden op de suppletie veranderd zijn (droogvalduur, sedimentsamenstelling). In tegenstelling tot de Galgenplaat, Schelphoek, Oesterdam en Roggenplaat suppleties zal de geplande suppletie meer slib bevatten. Dit kan leiden tot een andere ontwikkeling in bodemdiergemeenschap. In slibrijke bodems leven andere soorten dan in zandbodems en slib speelt een rol in de stabiliteit van de bovenste laag van het intergetijdengebied. Hierdoor heeft het een effect op de vestiging en overleving van organismen die afhankelijk zijn van stabiel sediment. Slib kan ook indirect effecten hebben op de bulkdichtheid, zuurstofgehalte, nutriëntengehalte en organische fractie van de bodem. Slib heeft ook een ecologische eigenschap als voedselcarrier.

6.4.2 Doel

Het doel is het goed in kaart brengen van de bodemdiergemeenschap voor aanleg van de suppletie en het herstel na aanleg van de suppletie.

Evaluatievraag:

10. Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de suppletie?

Kennisvraag:

11. Is de ontwikkeling van de bodemdieren gerelateerd aan, droogvalduur, hydrodynamiek, sedimentdynamiek, slibgehalte, etc.?

6.4.3 Methode

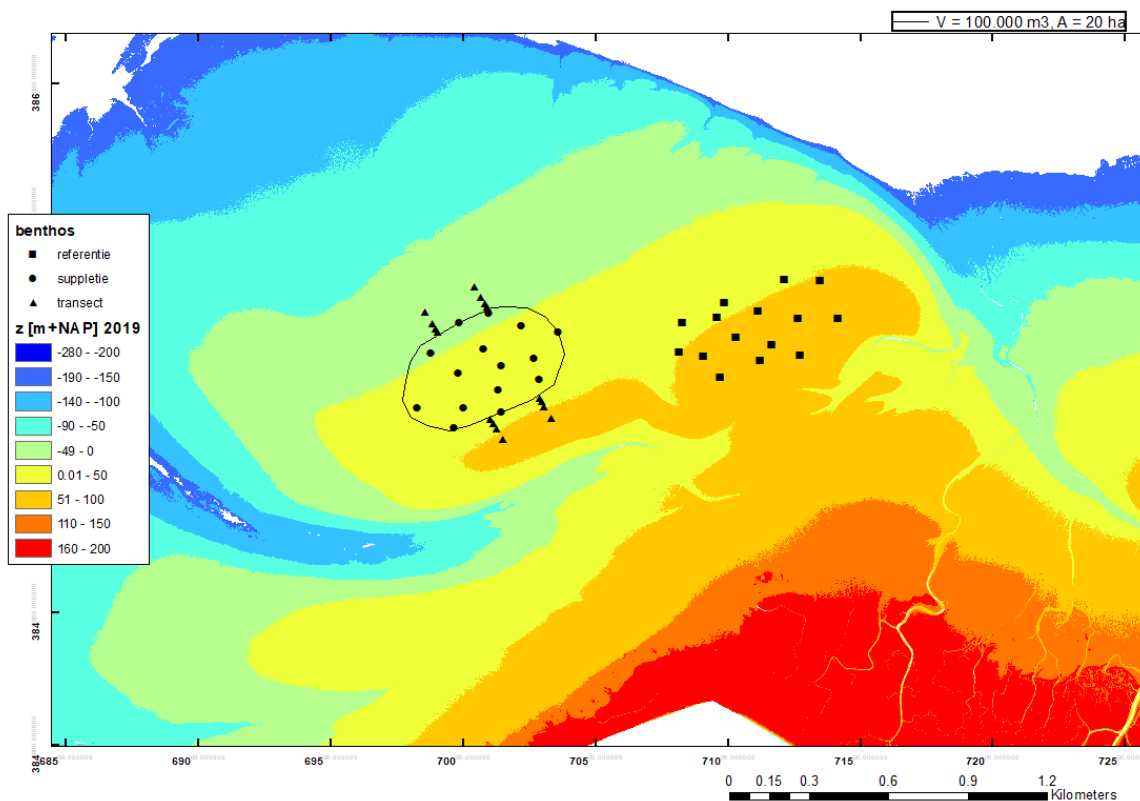
Bemonstering wordt uitgevoerd middels drie steekbuizen van 10cm in diameter, 35 cm diep te steken en gepoold te zeven over een 1 mm zeef in het veld. Het gezeefde materiaal wordt naar het lab gebracht en gefixeerd met formaline voor verdere verwerking. In het lab worden bodemdieren op naam gebracht en dichtheid en biomassa per punt bepaald. Tevens worden er sedimentmonsters genomen voor het bepalen van bulkdichtheid, slibgehalte, korrelgrootteverdeling en organisch stof (zie paragraaf 6). Als maat van voedselbeschikbaarheid voor bodemdieren wordt chlorofyl-a bemonsterd middels een gepoolde sample van 3 spuitjes van de top 1 centimeter van het sediment. Daarnaast wordt de dikte van de geoxideerde laag bepaald met een duimstok in het veld. Binnen de contouren van de suppletie wordt er op 15 random locaties bemonsterd (Figuur 63). Als referentie wordt een gebied ter grootte van de suppletie ten oosten van de suppletie geselecteerd. Bij het selecteren van dit gebied is rekening gehouden met de verwachte hoogte na aanleg van de suppletie. Ook hier zijn random 15 locaties geselecteerd. We hanteren dus een BACI aanpak (Before-After-Control-Impact) waarbij bemonsterd wordt voor (2020) en na aanleg van de suppletie (2021, 2022, 2023, 2024 en 2025) op dezelfde punten. Tevens zullen er op vaste afstanden tot de rand (10, 50, 100 en 200 m) van suppletie contouren bemonsterd worden. De bemonsteringen gebeuren in het najaar (tweede helft september, begin oktober), behalve het eerste jaar waar ook in het voorjaar (mei-juni) zal bemonsterd worden om de eerste rekolonisatie van bodemdieren in kaart te brengen (Tabel 12). Kort na de aanleg van de suppletie worden de locaties tevens bezocht om na te gaan of er nog bodemleven aanwezig is na aanleg.

6.4.4 Resultaat

Het effect van de suppletie op rekolonisatie en ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap op de suppletie. Door de BACI aanpak kan worden onderzocht hoe de bodemdiergemeenschap zich herstelt na de impact. Middels abiotische metingen (slibgehalte, korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte, chlorofyl-a, etc.) kan onderzocht worden welke factoren mogelijk ten grondslag liggen aan de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap. Dit draagt bij aan het begrip van deze suppletie, maar ook aan een verdere optimalisatie van toekomstige suppletieprojecten.

Tabel 12. Meetmomenten van de benthos ontwikkeling. Groen: extra metingen t.b.v. monitoring Natuur Impuls. De metingen worden in een bepaald kwartaal (Q) uitgevoerd en neemt 1-2 meetdagen per jaar in beslag.

	2020		2021				2022				2023				2024				2025				
Q	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Benthos																							
Quick scan																							



Figuur 63. Locaties voor het uitvoeren van de benthos bemonstering.

6.5 Vogels

6.5.1 Achtergrond

De suppletie zal aanvankelijk niet geschikt zijn als foerageergebied voor vogels en het terug geschikt worden hangt voor een groot deel af van de rekolonisatie van de bodemdieren. Maar ook vorm en het slibgehalte van de suppletie kan mogelijk een rol spelen in de geschiktheid van het foerageerhabitat. Daarom is het nuttig om laagwatertellingen uit te voeren van de suppletie en het referentiegebied waar ook bodemdieren bemonsterd worden.

6.5.2 Doel

Het doel is de geschiktheid in kaart te brengen van de suppletie als foerageerhabitat voor steltlopers.

Evaluatievraag:

1. Wat is de geschiktheid van de suppletie als foerageerhabitat voor steltlopers?

Kennisvraag:

2. Hoe is het gebruik door vogels van de suppletie gelinkt aan het herstel van het bodemleven en/of abiotische kenmerken van de suppletie?

6.5.3 Methode

Laagwatertellingen worden uitgevoerd volgens de methode zoals eerder gebruikt door Zwarts et al. (2011) in de Oosterschelde. Er worden telvakken uitgezet ter hoogte van de suppletie en in het referentiegebied waar ook het benthos wordt bemonsterd. Tellingen gebeuren vanuit een centraal punt. De vogels worden geobserveerd vanuit een schuilhut boven op een platte boot. De boot vaart naar de waarnemingsplek tijdens hoogwater. De schuilhut wordt opgebouwd ruim voordat de vogels arriveren en weer afgebroken als de vogels vertrokken zijn. We stellen voor de tellingen uit te voeren in de maanden oktober t/m maart, mei en augustus.

6.5.4 Resultaat

Inzicht in hoe de suppletie gebruikt wordt als foerageerhabitat voor steltlopers in vergelijking tot het niet gesuppleerde slik.

6.6 Schorren en zeegras

De effecten op de aanwezige schorren en zeegrasvelden worden klein ingeschat door de relatief grote afstand van de suppletie tot deze habitats. Voorgesteld wordt om wel een visuele inspectie en opname uit te voeren naar de kwaliteit van deze habitats.

6.7 Evaluatie

Evaluatie van de monitoring vormt een essentieel onderdeel van het monitoringsplan. Het primaire doel van het vergaren van de monitoringsdata is evalueren hoe de morfologie, ecologie en slibgehalte van de suppletie en de omgeving zich feitelijk ontwikkelen. Hiertoe dienen de opgestelde evaluatievragen. Daarnaast kan de data ook bijdragen aan de ontwikkeling van kennis voor de toepassing van gebaggerd slibrijk materiaal voor suppleties op intergetijdengebieden. Dit laatste is een belangrijk neven doel voor dit project, omdat het voor het eerst is dat dergelijk slibrijk materiaal in deze vorm direct op een intergetijdengebied wordt toegepast. Hiertoe dienen de kennisvragen. Deze kennisontwikkeling wordt in ieder geval noodzakelijk geacht tot het niveau waarop deze bijdraagt aan een meer gefundeerde toekomstige herhaling van een dergelijke slibrijke suppletie in de Oosterschelde.

Omdat het voorzien is dat na 5-10 jaar mogelijk weer slibrijk materiaal beschikbaar is voor een dergelijke suppletie, is het aan te raden binnen dit monitoringsproject niet alleen de evaluatievragen te beantwoorden maar direct ook de noodzakelijke kennisontwikkeling op te pakken. Dit zorgt er voor dat de pilotstatus van dit project goed benut wordt en dat eventuele toekomstige suppleties tijdig voorzien zijn van een verder verfijnde onderbouwing.

Verschillende fasen van het monitoringsproject worden gedefinieerd. In de eerste fase worden de metingen uitgevoerd. Deze metingen moeten vervolgens worden opgewerkt van de ruwe meetgegevens naar zinvolle parameters (bijvoorbeeld drukdata naar

golfddata). Met behulp van deze opgewerkte data kunnen de analyses worden uitgevoerd om de evaluatie- en kennisvragen te beantwoorden. Het kan waardevol zijn om met behulp van de data de berekeningen/rekenmodellen uit de ontwerpfase te valideren en aan te scherpen. Dit zodat voor toekomstige ontwerpen preciezere voorspellingen kunnen worden gemaakt van bijvoorbeeld de migratiesnelheid van een dergelijke suppletie.

De voorziene looptijd van de monitoring is 5 jaar. Om eerste lessen te kunnen trekken en om eventueel de monitoring nog bij te sturen, wordt voorgesteld om naast een eindrapportage ook toe te werken naar een tussenrapportage halverwege de monitoringscampagne.

Met de hier beschreven aanpak draagt de suppletie niet alleen bij aan de ecologische meerwaarde op de gesuppleerde locatie, maar ook aan het verder verfijnen van het beheer van het estuarium op de lange termijn. Dit is in lijn met de opzet van eerdere pilotstudies binnen de Oosterschelde en zorgt er voor dat alle waarde uit de geïnvesteerde middelen wordt gehaald.

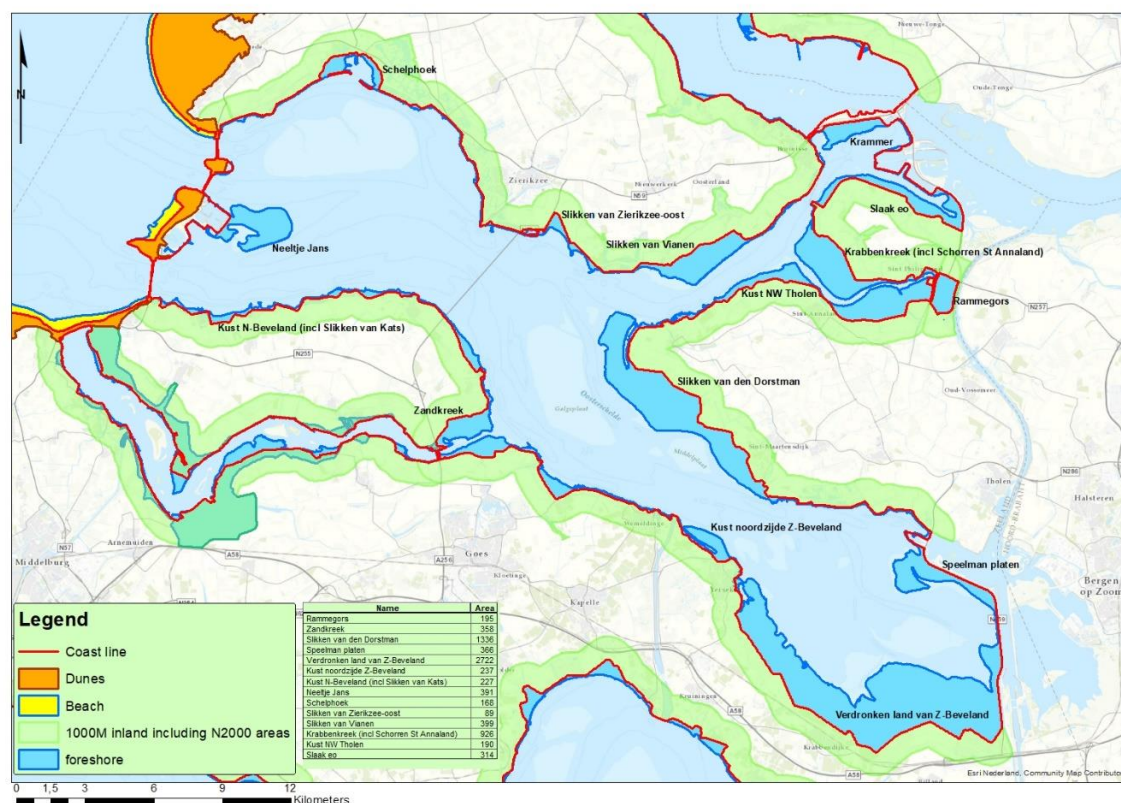
7 Mogelijkheden voor opschaling

7.1 Inleiding

In het project *Natuur Impuls* krijgt baggerspecie uit de vaargeul van de Zandkreek een zinvolle herbestemming op de slikken van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland in de Kom van de Oosterschelde. Het helpt de effecten van de zandhonger in dit gebied, nl. de langzame erosie van het slik, enigszins te verkleinen. Door de uitvoering van dit project wordt voor het eerst ervaring opgedaan met het suppleren van gebaggerd slibrijk sediment in de Oosterschelde. Misschien biedt dit een nieuwe vorm van sedimentbeheer waarin voortaan het gebaggerd sediment uit havens en vaargeulen niet meer gedumpt wordt in diepe geulen of putten maar op intergetijdengebieden t.b.v. natuurbehoud of -ontwikkeling. Dit hoofdstuk verkent alvast de mogelijkheden om het project *Natuur Impuls* op te schalen en werk-met-werk te maken.

In deze verkenning naar herbestemming van gebaggerd sediment ligt de focus niet op de grote zandplaten in de Oosterschelde, waarvoor al ruime ervaring met suppleties bestaat, maar op de slikken langs de oevers, een gebied met een totale oppervlakte van 7918 ha (Figuur 64).

Allereerst is in kaart gebracht waar en hoeveel baggerspecie er periodiek beschikbaar komt om de bevaarbaarheid van de Oosterschelde op peil te houden. Er is een inschatting gemaakt van het bruikbare sediment volume, dat wil zeggen, het deel van de baggerspecie dat geschikt is voor het geleidelijk ophogen van de slikken. Vervolgens is het bruikbare sediment volume vergeleken met de zandhonger van de slikken langs de oevers van de Oosterschelde. Tenslotte worden suggesties gedaan voor een uitvoeringsprogramma rond baggerwerk in de Oosterschelde.



Figuur 64. Slikken (foreshores) in de Oosterschelde.

7.2 Hoeveelheid en type baggerspecie

Door de aanleg van de stormvloedkering is de stroomsnelheid en het slibgehalte in het water gedaald zodat er tegenwoordig minder sedimentatie plaats vindt en er zodoende niet veel gebaggerd hoeft te worden. Het uitdiepen van vaargeulen en (jacht-)havens gebeurt op incidentele basis wanneer daar directe aanleiding toe is. Op sommige locaties vindt het baggerwerk om de 4-5 jaar plaats, in andere gevallen pas na 20-30 jaar. De samenstelling van de baggerspecie varieert van zand tot zeer slibrijk materiaal met een lage dichtheid.

Door RWS (Frank Gijzel, Robin Bal) is op basis van de vergunningverlening voor baggerwerk in de afgelopen 30 jaar, een inventarisatie uitgevoerd naar de hoeveelheid gebaggerd sediment in de Oosterschelde. De resultaten zijn samengevat in Tabel 13.

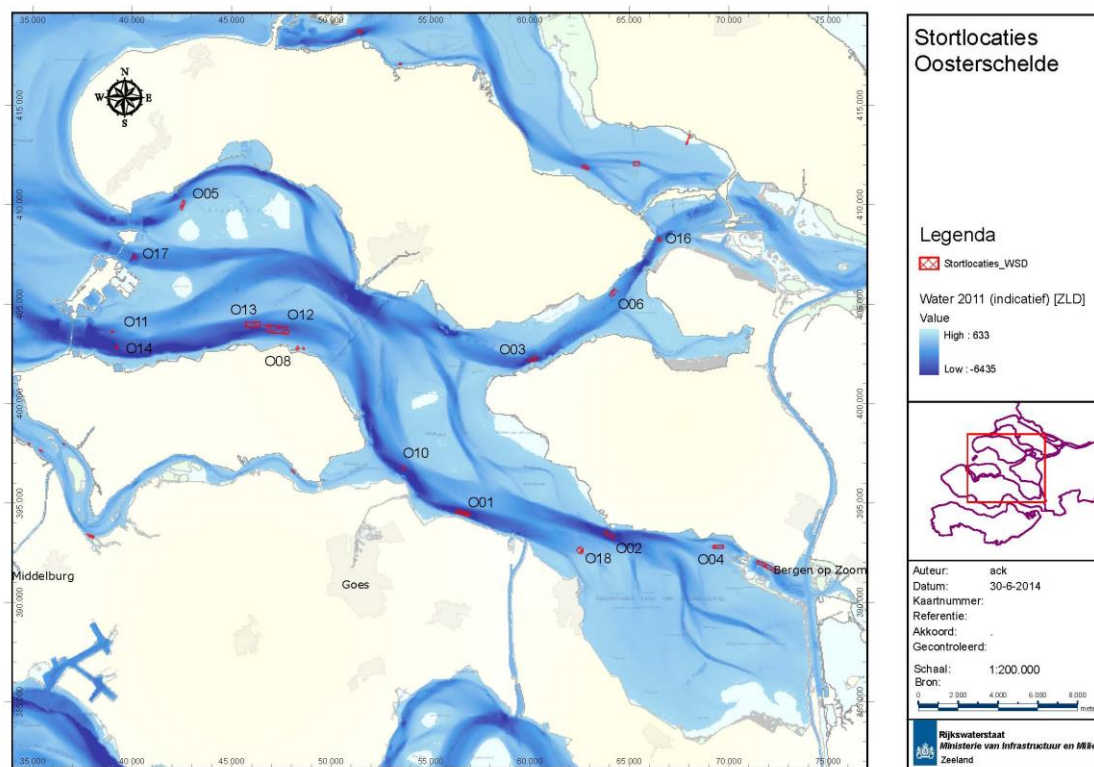
Tabel 13. Gebaggerde volumes sediment uit vaargeulen en havens in de Oosterschelde (periode 1990 – 2020) en een inschatting van het volume aan geschikt sediment voor het ophogen van slikken.

	jaar laatst gebaggerd	jaar nieuw gepland baggerwerk	Frequentie (1: jaar)	volume (m3)	1= geschikt 0 = te hoog slib%	Geschikt volume (m3)	Geschikt volume, gemiddeld per 10 jaar (m3/10 jaar)	Opmerking
Vaargeulen								
Keeten Mastgat Zijpe (Kramm)	1995	2030	35	75000	1	75000	21429	
Zandkreek	1995	2020	25	125000	1	125000	50000	frequentie wordt opgeschroef conform regulier beheer en onderhoud. Inschatting ca. 1 x / 15 - 20 jaar en dan ca. 50 - 75.000 m3.
Kanaal door Z-Beveland	2008	2028	20	50000	1	50000	25000	
Brabantsch Vaarwater/Witte	2008	2025	17	150000	1	150000	88235	
Krabbenkreek	2009	2023	14	50000	1	50000	35714	
Oosterschelde West	2000	2035	35	50000	1	50000	14286	
Totaal vaargeulen							234664	
Havens								
Buinnisse			4	500	0	0	0	
Burghsluis			5	3000	0	0	0	
Colijnsplaat			3	10000	0	0	0	pijp over dijk + storten
Goes			4	500	0	0	0	Incl Goese sas
Jacobahaven	1990	2020	30	66317	1	66317	22106	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Stavenisse			3	3000	0	0	0	
Gorishoek			3	500			0	
Kats			5	1000	0	0	0	
Roompot			5	2500	0	0	0	
St Annaland			3	10000	0	0	0	
Tholen			4	500	0	0	0	langs Rijn-Scheldekanaal
Wemeldinge			3	5000	0	0	0	
Yerseke			4	10000	0	0	0	inclusief Verswatergeul
Zierikzee			4	2500	0	0	0	
Neeltje Jans betonhaven	1990	2020	30	58819	1	58819	19606	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Noordland Binnenhaven	1990	2020	30	323035	0	0	0	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Roggenplaat haven	1990	2020	30	167115	1	167115	55705	haven RWS, frequentie wordt opgevoerd naar 1 x / 5 jaar, hoeveelheden zullen minder worden
Totaal havens							97417	
Overall							332081	

7.3 Geschikt sediment volume

Baggerspecie met een hoog slibpercentage heeft doorgaans een te lage dichtheid en weinig cohesie voor een zinvolle toepassing op intergetijdengebieden. Uit de inventarisatie (Tabel 1) blijkt dat:

- Baggerspecie uit havens vaak een te hoog slib percentage (>40-50%) heeft en daarom minder geschikt is voor het geleidelijk ophogen van slikken. Bovendien zijn de volumes aan havenslib klein en daardoor de verwachte kosten relatief hoog. Dit materiaal kan beter op de bestaande stortlocaties in de geul (Figuur 65) verspreid worden. Een alternatief is het toepassing op land, bijv. in dubbelde dijken om gebieden geleidelijk op te hogen of in een kleirijperij, maar heeft als bezwaar dat de sedimentbalans van het watersysteem nog meer wordt verstoord;
- Sediment uit de vaargeulen in alle gevallen geschikt materiaal is. Het gaat om relatief grote volumes zandig sediment waarmee intergetijdengebieden opgehoogd kunnen worden. Een voorbeeld van deze toepassing is het gebruik van 0,15 Mm³ zand uit de vaargeul van het Brabants vaarwater in 2009 dat werd aangebracht op de Galgeplaat (dus in dit geval niet op een slik);
- Gemiddeld over een periode van 10 jaar het geschikte sediment volume uit vaargeulen en havens ca. 0,2 resp. 0,1 Mm³ is; in totaal dus 0,3 Mm³ per decennium.



Figuur 65. Stortlocaties voor baggerspecie in de Oosterschelde.

7.4 Aandeel in de sediment balans

De erosie (zandhonger) en zeespiegelstijging bepalen de zogenaamde accommodatie ruimte voor sediment op de slikken langs de oevers, een gebied met een totale oppervlakte van 7918 ha (Figuur 64). Uitgaande van een scenario met een erosie en zeespiegelstijging van resp. 2 en 2 mm per jaar wordt de totale zandhonger geschat op 3,2 Mm³ per decennium. Dit volume kan in de toekomst wijzigen naarmate de snelheid van erosie en zeespiegelstijging verandert.

Het geschikt sediment volume van 0,3 Mm³ per decennium kan in theorie dus ca. 10 % voorzien in de sedimentvraag van de slikken en voorlanden langs de oevers van de Oosterschelde. Om de sedimentbalans van deze gebieden kloppend te krijgen is, uitgaande van het genoemde scenario, ca. 2,9 Mm³ per 10 jaar nodig uit zandwinlocaties gelegen in de geulen van de Oosterschelde of elders.

In een vervolg op deze verkenning zou het areaal aan slikken nog verder gespecificeerd worden door rekening te houden met:

- De fourageer functie voor vogels, zoals de zogenaamde 'vogelkerngebieden' uit de ANT studie (De Ronde et al, 2013);
- De toekomstige opgave voor waterveiligheid. Sedimentsuppleties versterken het voorland en kunnen, afhankelijk van de locatie en het faalmechanisme in kwestie, een (deel-) oplossing bieden bij het beheer & onderhoud van dijken.

7.5 Uitvoeringsprogramma rond baggerwerk

Geconcludeerd wordt dat het volume aan baggerspecie in de Oosterschelde een kleine maar structurele bijdrage kan leveren bij natuurbouw van slikken en voorlanden langs de oevers. Op basis van de ervaringen in het Natuur Impuls project kan worden nagegaan of het idee van herbestemming van baggerspecie op slikken ook daadwerkelijk goedkoper uitvalt dan een reguliere suppletie met zand uit een zandwinlocaties zijn. Mocht dit positief uitvallen dan is het zinvol om een uitvoeringsprogramma op te stellen voor het reguliere baggerwerk in de Oosterschelde t.b.v. de bereikbaarheid voor de beroepsscheepvaart en recreatievaart en dit te koppelen aan de instandhouding van intergetijdengebieden (werk-met-werk).

In het contract met een marktpartij voor het uitvoeren van de baggerwerkzaamheden zullen bepalingen moeten worden opgenomen over zowel het baggerwerk (timing, diepte etc.) als over de verspreiding met het gebaggerde sediment op de intergetijdengebieden (locaties, hoogteligging, tijd van het jaar, eventuele bijkomende erosie remmende maatregelen, etc.).

Uit kostenoverweging zal de vaarafstand tussen bagger- en stortlocatie niet te groot moeten zijn. Als vuistregel kan een maximale vaarafstand van ~10-15 km worden aangehouden. Zo kan baggerwerk in de Krabbenkreek dus het best benut worden op de intergetijdengebieden in de Krabbenkreek, baggerwerk ten westen van de Zeelandbrug alleen binnen het westelijk deel van de Oosterschelde toegepast worden etc.

Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. Dit certificaat is geldig tot 15 december 2021. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV GL.

Literatuur

- van Asch, M. Brummelhuis, E.B.M. , Ende, D. van den , Troost, K. , Zweeden, C. van. (2018). Het kokkelbestand in de Nederlandse kustwateren in 2018. *IJmuiden : Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO) (CVO report 18.011)*.
- Bailard, J.A. (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *J. Geophys. Res.* 86: 10938. doi:10.1029/JC086iC11p10938
- Baptist, M.J., T. Gerkema, B.C. van Prooijen, D.S. van Maren, M. van Regteren, K. Schulz, I. Colosimo, J. Vroom, T. van Kessel, B. Grasmeijer, P. Willemsen, K. Elschot, A.V. de Groot, J. Cleveringa, E.M.M. van Eekelen, F. Schuurman, H.J. de Lange, M.E.B. van Puijenbroek (2019). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor'. *Ecological Engineering*, 127: 312-323. (<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.019>)
- Bijkerk, R. (1988). "Ontsnappen of begraven blijven: de effecten op bodemdieren van een verhoogde sedimentatie als gevolg van baggerwerkzaamheden," Rep. No. T-460. Koeman en Bijkerk Ecologisch advies, Haren.
- Boersema, M.P., J. van der Werf, J.N. Salvador de Paiva, A.M. van den Brink, L. Soissons, B. Walles, T.J. Bouma, P.L.M. de Vet, T.J.W. Ysebaert, E. Paree, M. Bijleveld, E. van Zanten, K van Westenbrugge, J. Stronkhorst, D. de Jong (2018). Oesterdam sand nourishment: Ecological and morphological development of a local sand nourishment. *Vlissingen: Centre of Expertise Delta Technology*, 78.
- Bouma, T.J., J. van Belzen, T. Balke, J. van Dalen, P. Klaassen, A.M. Hartog, P.M.J. Herman. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnol. Oceanogr.*, 61 (6) (2016), pp. 2261-2275, 10.1002/lno.10374.
- Consortium Arcadis-Technum (2007). "Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Baggeren en storten." Antwerp, Belgium (in Dutch).
- van Duren, L. A., van Kessel, T., and Kamermans, P. (2019a). "Modelstudie verspreidingsstrategie baggerspecie Oosterschelde," Rep. No. Deltares 11203112-002-ZKS-0004. Deltares, Delft.
- van Duren, L. A., Cado van der Lelij, J. A., Hanssen, J., Gaytan Aguilar, S., and Van Kessel, T. (2019b). "Modelstudie Effecten Slibpluim Zandkreek," Rep. No. 11203112-002-ZKS-0004. Deltares, Delft.
- Koeman en Bijkerk B.V., 2016. Zeegraskartering MWTL 2016 Oosterschelde en Westerschelde. Rijkswaterstaat, CIV, Delft.
- Ladd, C.J.T., M.F. Duggan-Edwards, T.J. Bouma, J.F. Pagès, M.W. Skov. (2019). Sediment supply explains long-term and large-scale patterns in salt marsh lateral expansion and erosion. *Geophys. Res. Lett.* 46(20): 11178-11187. <https://dx.doi.org/10.1029/2019gl083315>.

-
- MH Poly. (2019). Waterbodemonderzoek – project Zandkreek te Kats. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Zee & Delta. MH Poly Consultants & Engineers. Documentcode 19059V1 RA01 versie 3.0.
- Ribberink, J.S. (2004). Migration and infill of trenches in the marine environment: an analytical engineering model. SANDPI report, University of Twente, The Netherlands.
- van Rijn, L.C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves, I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 649-667.
- van Rijn, L.C. (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 668-389.
- de Ronde, J.G., Mulder, J.P.M., Van Duren, L.A., Ysebaert, T.J.W., 2013. Eindadvies ANT Oosterschelde, Deltares rapport 1207722-000-ZKS-0010.
- Troost, K., T. Ysebaert (2011). ANT Oosterschelde: Long-term trends of waders and their dependence on intertidal foraging grounds, Report number C063/11, Imares Yerseke.
- de Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, Z.B. Wang (2017). The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt. *Geomorphology*, 281: 31-42.
(<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.031>)
- de Vet, P. L. M., B.C. van Prooijen, R.A. Schrijvershof, J.J. van der Werf, T. Ysebaert, M.C. Schrijver, Z.B. Wang (2018). The importance of combined tidal and meteorological forces for the flow and sediment transport on intertidal shoals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123: 2464–2480.
- de Vries, I. (2014). Waterkwaliteiten Deltawateren. Datarapport Oosterschelde. Delft: Deltares.
- van der Werf, J., Reinders, J., Van Rooijen, A., Holzhauer, H., Ysebaert, T. (2015). Evaluation of a tidal flat sediment nourishment as estuarine management measure. *Ocean & Coastal Management*, 114: 77-87.
- van der Werf, J., De Vet, L., Boersema, M., Bouma, T., Nolte, A., Schrijvershof, R., Soissons, L., Stronkhorst, J., Van Zanten, E., Ysebaert, T. (2019). An integral approach to design the Roggenplaat intertidal shoal nourishment. *Ocean & Coastal Management* <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.023>
- Willemsen, P. W. J. M. , Borsje, B. W., Vuik, V., Bouma, T. J. , & Hulscher, S. J. M. H. (2020). Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal engineering*, 156, [103628].
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103628>
- Ysebaert T., van der Werf J., de Vet L., Bouma, T.J. 2017. Monitoringsplan Roggenplaat suppletie. Centre of Expertise Delta Technology, Wageningen Marine Research rapport.
- Zwarts, L., Blomert, A.-M., Bos, D., & Sikkema, M. (2011). Exploitation of intertidal flats in the Oosterschelde by estuarine birds. Rapport Altenburg & Wymenga.

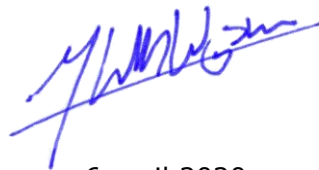
Verantwoording

Rapport C038/20
Projectnummer: 4313100113

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: Jeroen Wijsman
Senior onderzoeker

Handtekening:



Datum: 6 april 2020

Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager Integratie

Handtekening:



Datum: 6 april 2020

Bijlage 1 Natuur Impuls bijeenkomsten

Voorafgaand aan de hieronder vermelde bijeenkomsten zijn voorbereidende bijeenkomsten geweest met Natuurmonumenten, RWS, WMR en NIOZ op 24 mei, 3 juli, 27 augustus en 2 september 2019.

Datum	Aanwezig
23-09-2019	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf en Lodewijk de Vet
Start bijeenkomst (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
21-10-2019	WMR: Tom Ysebaert en Brenda Walles Deltares: Jebbe van der Werf, Jill Hansen, Thijs Kessel en Lodewijk de Vet
Ontwerp sessie (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst NIOZ: Tjeerd Bouma RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel en Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
18-11-2019	WMR: Tom Ysebaert en Brenda Walles Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs Kessel en Amrit Cado van der Lelij
Workshop (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst NIOZ: Tjeerd Bouma RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten, Jan de Kam en Herman Reekers Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
06-12-2019	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf en Luca van Duren
Stakeholders bijeenkomst (Yerseke)	RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel en Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
06-01-2020	WMR: Tom Ysebaert RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten, Frank Gijzel, Yuri de Nooijer, Jan de Kam
Bijeenkomst (Goes)	Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
27-01-2020	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs van Kessel, Lodewijk de Vet
Workshop (Bergen op Zoom)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Alice van Goudswaard, Eric van Zanten Natuurmonumenten: Frans van Zijderveld en Mark Mandemakers
02-03-2020	WMR: Tom Ysebaert Deltares: Jebbe van der Werf, Thijs Kessel, Lodewijk de Vet, Luca van Duren
Workshop (Delft)	HZ: Joost Stronkhorst RWS: Alice van Goudswaard, Frank Gijzel, Robin Bal Natuurmonumenten: Mark Mandemakers

Bijlage 2 Resultaten metingen kritische erosiesnelheid sediment Zandkreek (Jaco de Smit – NIOZ)

Meetprotocol

De kritieke snelheid voor het begin van beweging van verschillende sedimenten uit de Zandkreek is gemeten in een stroomgoot die de beweging van golven op de bodem nabootst.

Sediment was op 5 locaties in de Zandkreek bemonsterd, met een gradiënt van slikkig met een klein percentage zand (locatie 1, 2 en 3) tot zeer slikkig (locatie 4 en 5). Per locatie is de kritieke snelheid van 3 sedimentmonsters gemeten. Er zijn twee metingen gedaan per sedimentmonster; 1) direct na mengen van het sediment en 2) na twee dagen laten consolideren.

Elk sedimentmonster is eerst opnieuw gemengd, vanwege de tijd tussen bemonstering en de stroomgootmetingen. Na het mengen is een sedimentmonster genomen. Hiervan zijn de bulkdichtheid en de korrelgrootte gemeten. Omdat sommige monsters erg vloeibaar waren was het onmogelijk om steeds precies dezelfde hoeveelheid te nemen. Daarom is de bulkdichtheid als volgt berekend:

$$BD = \rho_w \left[1 - \frac{m_{droog}}{m_{nat}} \right] + \rho_s \frac{m_{droog}}{m_{nat}}$$

m_{droog} en m_{nat} zijn respectievelijk de droge en natte massa van het sedimentmonster (g), en ρ_w en ρ_s zijn respectievelijk de dichtheid van water (1000 kg m^{-3}) en het sediment (2650 kg m^{-3}).

Het sediment is voorzichtig in een bak geschept en glad afgestreken, waardoor de ruwheid alleen afhankelijk is van het type sediment (zie Foto 1).

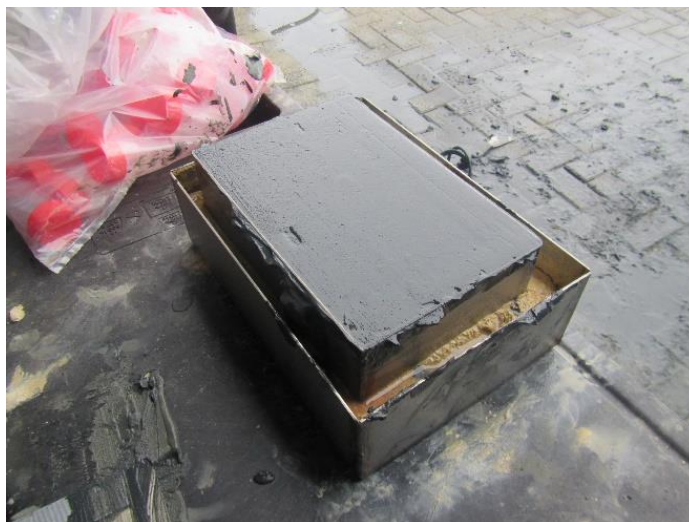
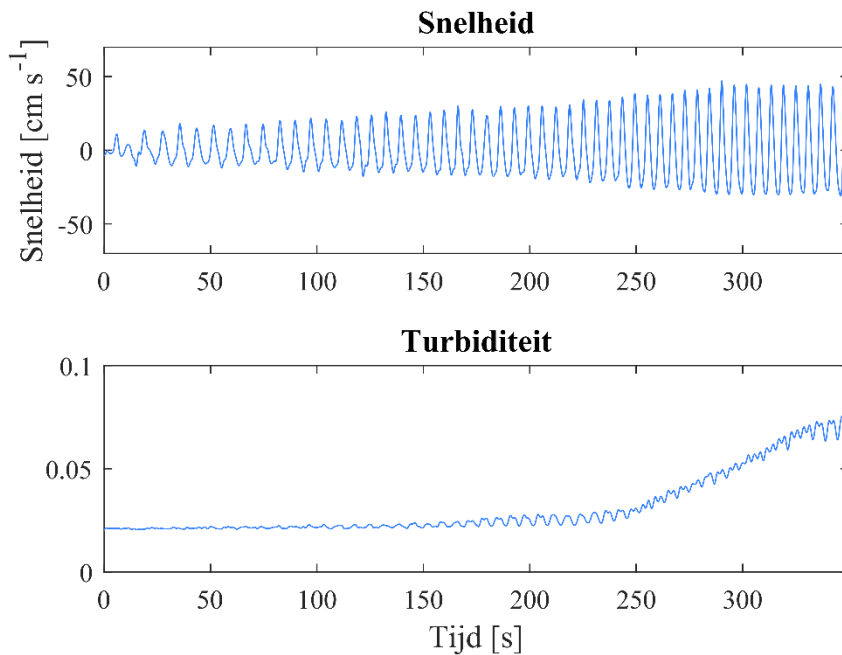


Foto 1. Een sedimentmonster voordat deze in de stroomgoot wordt geplaatst.

Vervolgens is de bak van onderuit de stroomgoot ingedrukt, waardoor er een vlakke bodem ontstaat met het sedimentmonster in het midden. De golfsnelheid in de stroomgoot werd langzaam opgevoerd totdat het sediment in suspensie kwam, waarbij snelheid en turbiditeit continu zijn gemeten (zie Figuur 1).



Figuur 1. Ruwe meetresultaten. Na 250 seconden wordt de kritieke snelheid bereikt en neemt de turbiditeit toe.

Uitrekenen bodemschuifspanning (BSS)

Omdat de vlakke bodems tot hoge kritieke snelheden leiden is de kritieke bodemschuifspanning (BSS_{cr}) uitgerekend. Deze waarden kunnen namelijk ook gerelateerd worden aan bodems met reliëf, of andere typen golven dan die van de stroomgoot. De BSS_{cr} ($N\ m^{-2}$) is als volgt berekend (Van Rijn 1993):

$$BSS_{cr} = \frac{1}{2} \rho_w f_w u_{cr}^2$$

u_{cr} is hier de kritieke snelheid ($m\ s^{-1}$) en f_w is een dimensieloze wrijvingsfactor die als volgt is uitgerekend (Soulsby 1997):

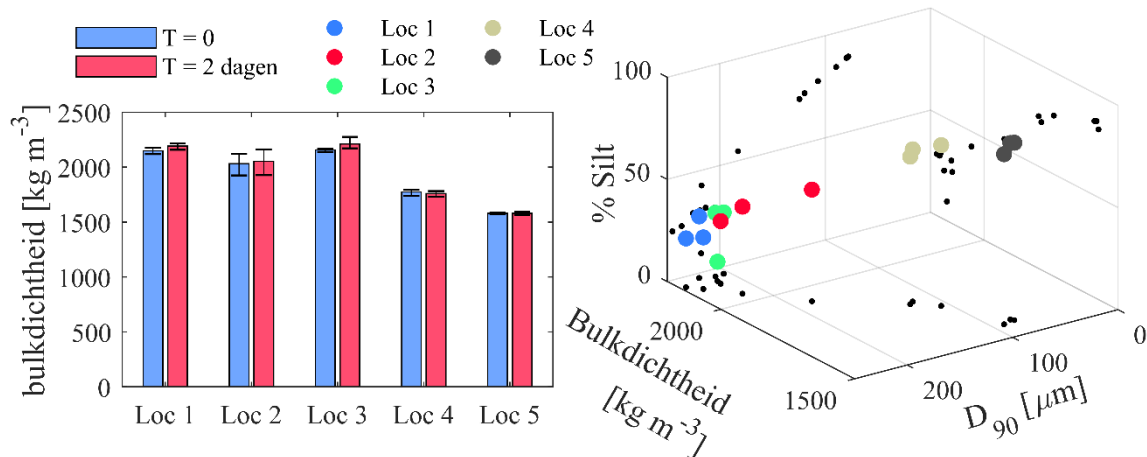
$$f_w = 1.39 \left(\frac{A}{\frac{1}{30} ks} \right)^{-0.52}$$

waar A de lengte van de orbitaalbeweging is (m) en ks de ruwheid van de bodem (m), hier berekend als $2.5D_{50}$ (gemiddelde korrelgrootte).

Resultaten

Sedimenteigenschappen

De sedimentmonsters bestaan in essentie uit twee groepen (zie Figuur 2): 1) Locaties 1 en 3, waarvan de bulkdichtheid gemiddeld 2150 kg m^{-3} is, het silt (i.e. slib) percentage gemiddeld 25 %, en de D_{90} gemiddeld $225 \mu\text{m}$, en 2) locaties 4 en 5, met een gemiddelde bulkdichtheid van 1670 kg m^{-3} , een gemiddeld silt percentage van 80 %, en een gemiddelde D_{90} van $100 \mu\text{m}$. Een van de sedimentmonsters van locatie 2 valt tussen deze twee groepen in. De andere twee monsters komen overeen met locaties 1 en 3.

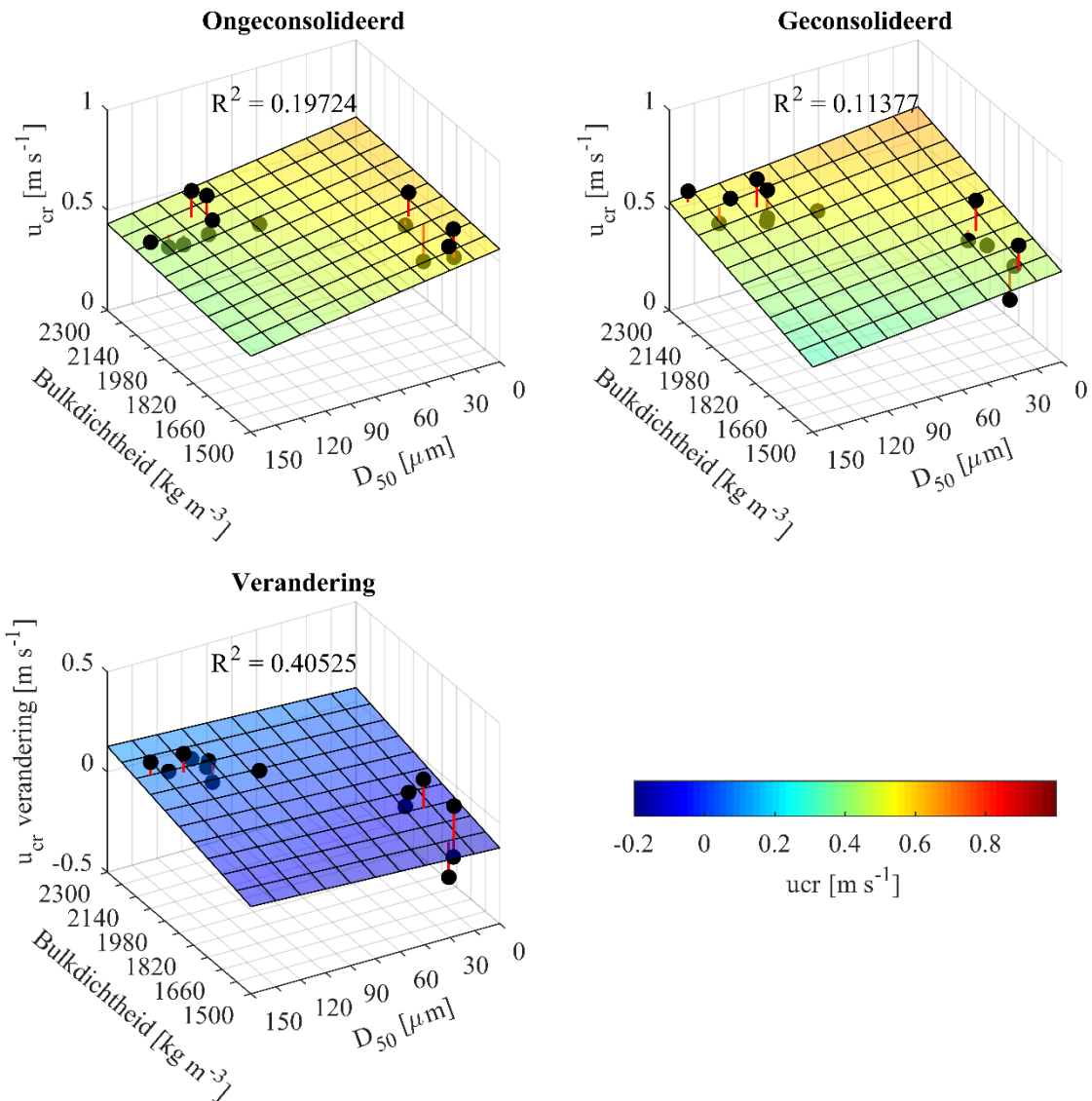


Figuur 2. Sedimenteigenschappen. Links de bulkdichtheid direct na mengen en na 2 dagen consolideren. Rechts de relaties tussen bulkdichtheid, D_{90} , en silt percentage. De zwarte puntjes geven de 2-D relaties weer.

Na twee dagen consolidatie is de bulkdichtheid van locaties 1 en 3 licht toegenomen, van 2150 kg m^{-3} naar 2200 kg m^{-3} . De bulkdichtheid van de slikkige sedimenten is ongewijzigd gebleven. De zandige sedimenten klonken in (er lag een laagje water op de sedimentmonsters), terwijl de slikkige sedimenten juist uitdroogden (de toplaag van het sediment was zuurstofrijk). Hoe zandiger het sediment, hoe hoger de bulkdichtheid ($p = 7 \times 10^{-9}$) en hoe sneller de consolidatie ($p = 0.0033$).

Stroomgootmetingen

De gemiddelde \pm SD kritieke orbitaalsnelheid (u_{cr}) die in de stroomgoot is gemeten is $0.52 \pm 0.11 \text{ m s}^{-1}$. In Figuur 3 zijn de relaties tussen bulkdichtheid, D_{50} en u_{cr} weergegeven. Er is sprake van een sterke correlatie tussen de bulkdichtheid en de andere sedimenteigenschappen, deze was het minst voor D_{50} die daarom is geplot, waardoor de R^2 -waardes laag zijn (alle meetpunten vallen op één bulkdichtheid – D_{50} lijn). Wat opvalt is dat de u_{cr} voor alle types sediment ongeveer gelijk is, maar dat na 2 dagen consolidatie de u_{cr} van de sedimenten met een hoge bulkdichtheid is toegenomen (gem. $0.47 \text{ m s}^{-1} \rightarrow$ gem. 0.54 m s^{-1} , $p = 0.02$) terwijl die van de sedimenten met een lage bulkdichtheid juist is afgenomen (gem. $0.55 \text{ m s}^{-1} \rightarrow$ gem. 0.48 m s^{-1} , $p = 0.31$).

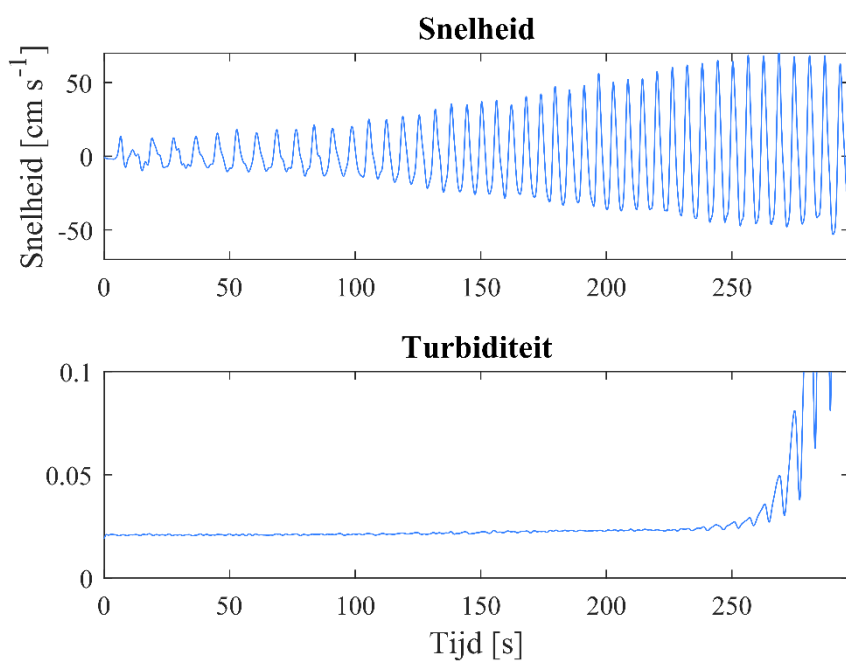


Figuur 3. Relaties tussen bulkdichtheid, D_{50} en u_{cr} voor de ongeconsolideerde en geconsolideerde sedimentmonsters. De derde figuur geeft de verandering in u_{cr} weer. De fits zijn lineair. De rode lijnen geven de afwijkingen aan, en de grootte van de punten geeft de ruwheid aan (grotere punten = hogere ruwheid). Van één van de geconsolideerde sedimentmonsters kon de u_{cr} niet gemeten worden.

De toename van de erosiegevoeligheid van de slikkige sediment komt doordat er een wat drogere zuurstofrijke laag vormde met kleine scheurtjes erin, welke vooral aan de randen van de core ontstonden bij het omhoog drukken in de stroomgoot. Dit zorgde voor een stochastisch karakter in de erosie van het sediment. Zodra er een klein stukje van deze laag loskwam werd de rest er als het ware afgestroopt, waarbij veel sediment in suspensie kwam (zie Foto 2 en Figuur 4). Hierdoor nam de u_{cr} van deze sedimenten gemiddeld genomen af, ook al was de toplaag zelf zeer stabiel.



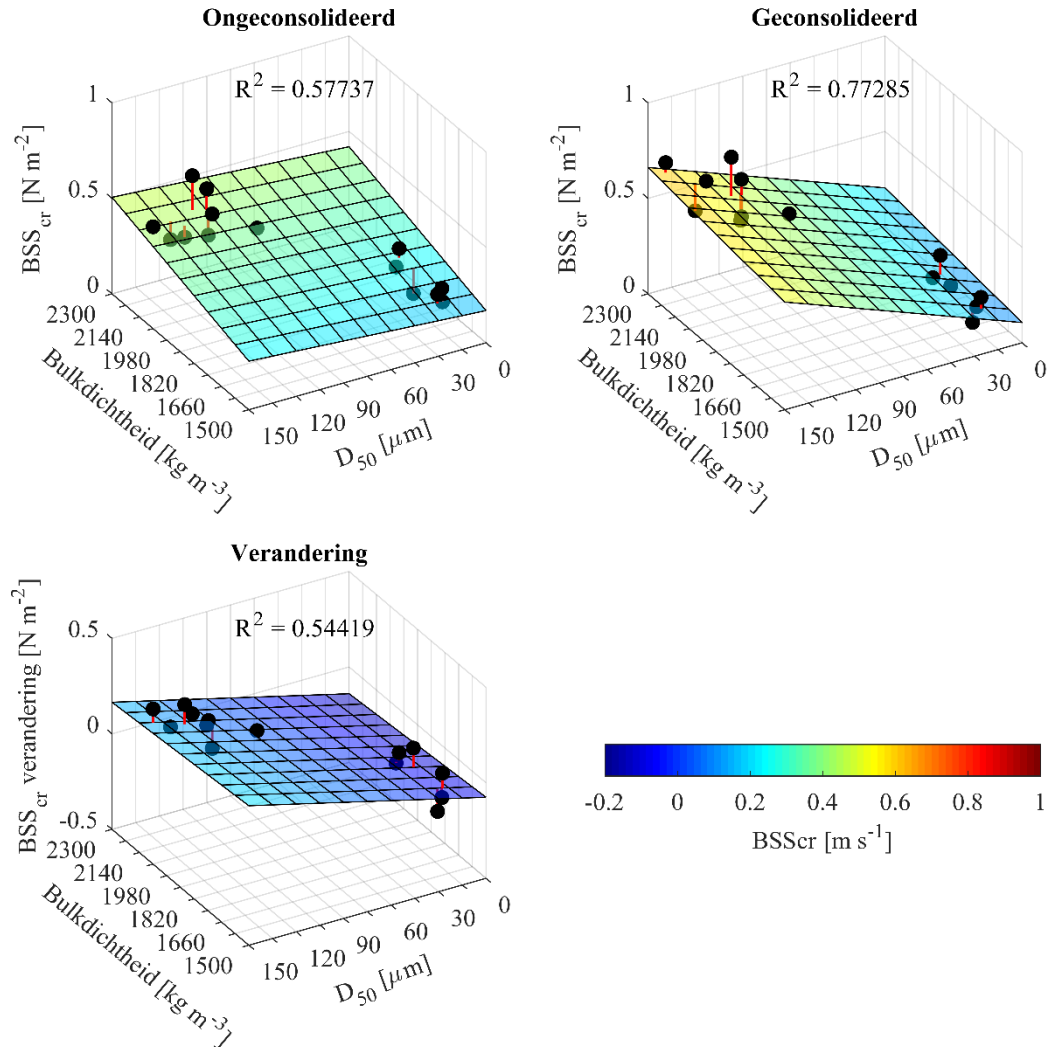
Foto 2. Afstropen van de toplaag van een geconsolideerd sedimentmonster.



Figuur 4. Stochastisch karakter van de kritieke snelheid voor suspensie. De maximale snelheid is op 240 seconden ingezet, maar pas na 270 seconden schiet er een deel van de toplaag los, waardoor er ineens veel erosie optreedt.

Bij het omrekenen naar BSS_{cr} ontstaan er, overeenkomend met de sedimenteigenschappen, twee groepen (Figuur 5). Van de zandige sedimenten is de BSS_{cr} $0.44 \pm 0.11 \text{ N m}^{-2}$ en van de slikkige sedimenten is dit $0.23 \pm 0.07 \text{ N m}^{-2}$. Vanwege de lage D_{50} van de slikkige sedimenten is de ruwheid van deze bodems ook laag, waardoor de BSS_{cr} lager is ook al is de u_{cr} hetzelfde. In een realistische situatie waar de ruwheid van de bodem afhangt van het bodemreliëf zullen de zandigere sedimenten dus (veel) stabiel zijn.

De BSS_{cr} van de ongeconsolideerde sedimenten hangt vooral af van de bulkdichtheid, terwijl die van de geconsolideerde sedimenten juist meer afhangt van de D_{50} . Dit houdt in dat de verandering in BSS_{cr} na consolidatie voor de slikkige sedimenten niet het resultaat is van een veranderende bulkdichtheid, maar van andere processen zoals de vorming van de droge, zuurstofrijke toplaag.



Figuur 5. Zelfde als figuur 3, maar omgerekend naar BSS_{cr} .

Discussie

Overwegingen interpretatie meetresultaten

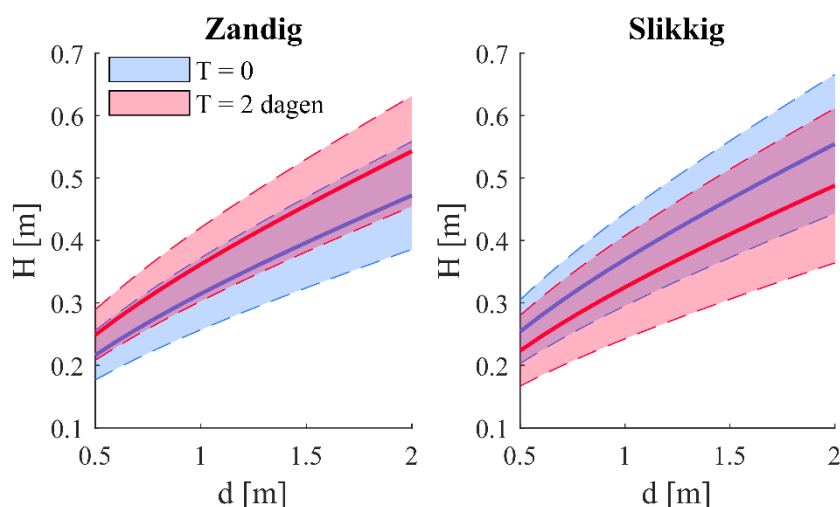
Voor interpretatie van deze resultaten moet met een aantal dingen rekening gehouden worden:

1. Voor consistentie zijn de sedimentmonsters steeds glad afgestreken. Dit zorgt ervoor, vooral met slijkgig sediment, dat de ruwheid zeer laag is. Hierdoor zijn hoge snelheden nodig om het sediment in suspensie te krijgen. Dit maakt de onzekerheid in de berekening van de BSS_{cr} groter.
2. De golfbeweging in de stoomgoot bootst de beweging na van niet-brekende golven, met minimale verticale waterbewegingen. In de brekerzone zullen door de sterke turbulentie veel minder sterke golven nodig zijn om het sediment in suspensie te brengen.
3. Het sediment is geconsolideerd in een bak die aan de zijkanten en onderkant is afgesloten. Hierdoor kan het grondwater niet wegstromen, waardoor de consolidatie van vooral de slijkgige sedimenten langzamer gaat dan in werkelijkheid.
4. Er zat geen benthos in het sediment, terwijl deze een sterk effect hebben op de erodeerbaarheid van sedimenten met een hoge silt fractie zoals die uit de Zandkreek.

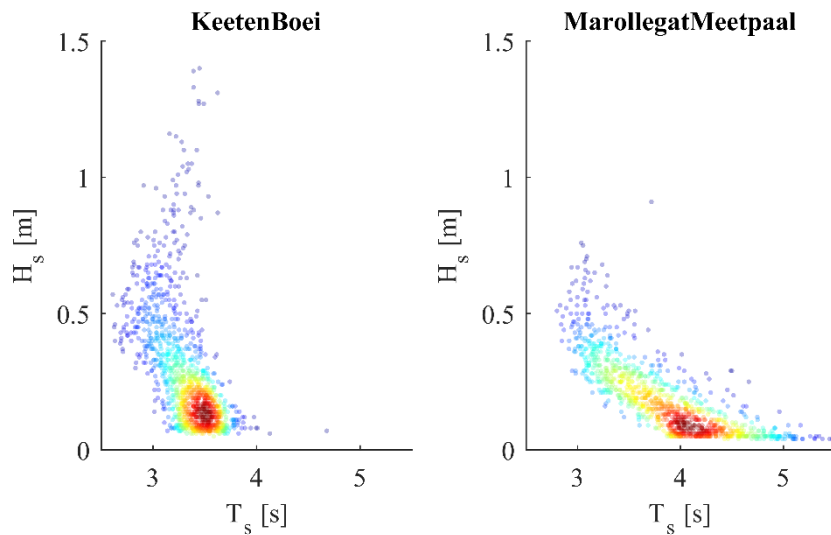
Vergelijking met golfdata Oosterschelde

De u_{cr} en BSS_{cr} waarden die zijn gemeten komen vallen binnen het kader van de hydrodynamica in de Oosterschelde. Figuur 6 laat de waterdiepte-golfhoogte lijn zien waarop erosie optreedt, benaderd met lineaire golftheorie. Tijdens opkomend en afgaand water (waterdiepte 0.5 m) valt de benodigde golfhoogte voor resuspensie tussen 0.17 en 0.31 meter voor zowel zandig als slijkgig sediment. Tijdens hoogwater (waterdiepte 1.5-2 meter) is de golfhoogte voor resuspensie gemiddeld 0.5 meter. De variatie in u_{cr} wordt echter uitvergroot bij het omrekenen naar golfhoogte op grotere dieptes in absolute zin, waardoor de standaardafwijking groot is.

Deze diepere golven zijn goed te vergelijken met tijdseries van meetboeien, welke zijn geplot in Figuur 7. Hieruit kunnen we opmaken dat de sedimenten stabiel zullen zijn onder de meest voorkomende golfcondities.



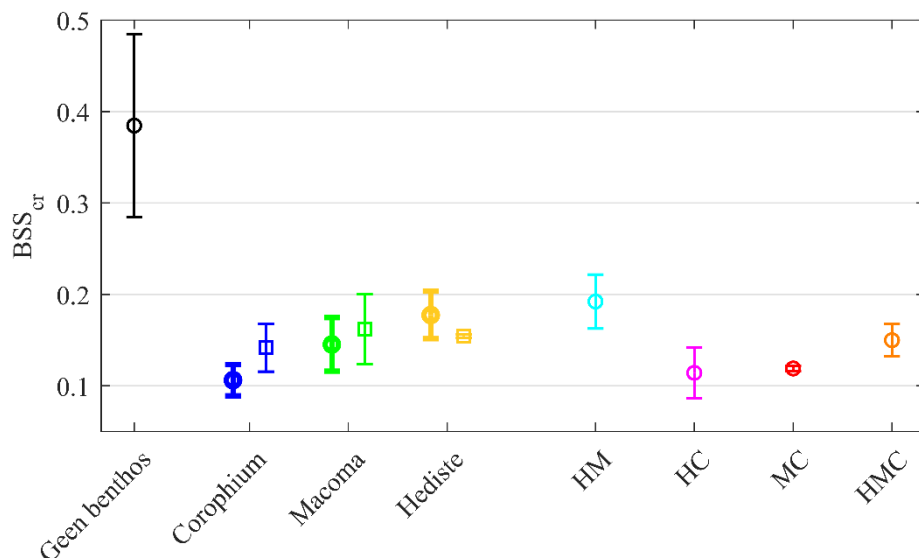
Figuur 6. Waterdiepte-golfhoogte grafieken voor zandig en slijkgig sediment voor en na consolidatie. De dikke lijnen geven het gemiddelde aan, het gearceerde deel is de standaardafwijking.



Figuur 7. Significante golfperiodes en hoogtes tussen 2015 en 2019 in de Oosterschelde. De kleur geeft de dichtheid aan. Rood = golven die vaak voorkomen en blauw = golven die zelden voorkomen.

Vergelijking met andere stroomgootexperimenten met benthos

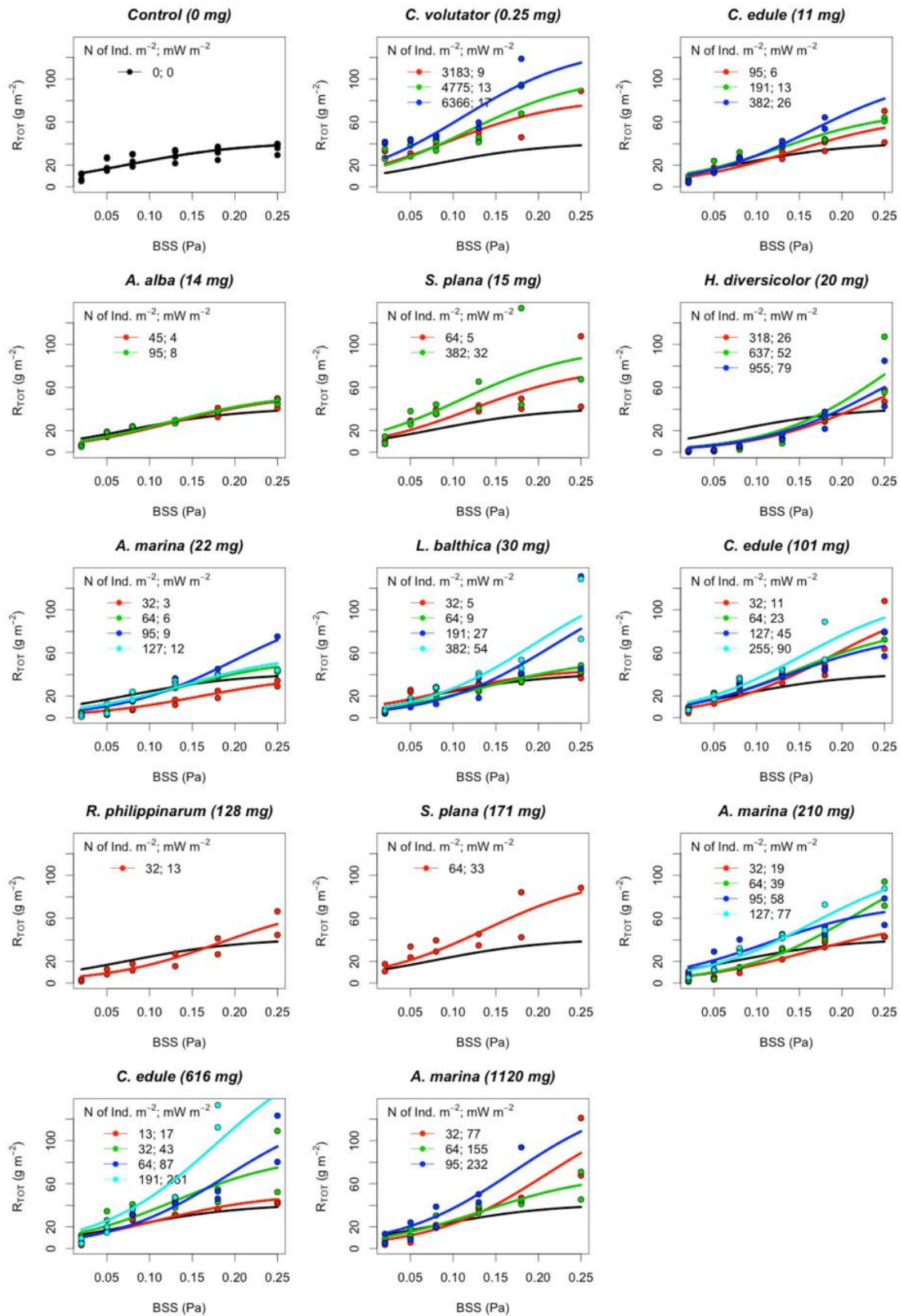
Met dezelfde stroomgoot zijn ook metingen gedaan met waarin verschillende soorten(mengsels) en biomassa's van benthos zijn toegevoegd. Het sediment voor deze metingen kwam van een andere locatie, maar is qua eigenschappen ($D_{50} = 48 \mu\text{m}$, siltpercentage = 70 %, bulkdichtheid = 2100 kg m^{-3}) vergelijkbaar met de slikkigere sedimenten van de Zandkreek, hoewel de bulkdichtheid hoger lag. De BSS_{cr} zonder benthos is gemiddeld 0.39 N m^{-2} , wat vergelijkbaar is met de waarden van de sedimenten uit de Zandkreek met vergelijkbare bulkdichtheid (zie Figuur 8 en Figuur 5). Wanneer benthos worden toegevoegd neemt de BSS_{cr} af met een factor 2 tot 3 (u_{cr} neemt dus af met een factor 1.4-1.7), afhankelijk van de soort(combinatie) en de biomassa.



Figuur 8. BSS_{cr} voor verschillende benthos soorten(combinaties).

Cozzoli et al. 2019 hebben metingen gedaan in een unidirectionele stroomgoot (Figuur 9) met sediment dat meer vergelijkbaar is met het zandige sediment uit de Zandkreek ($D_{50} = 120 \mu\text{m}$ en het siltpercentage was 12 %). De erosiegevoeligheid van dit sediment neemt ook toe wanneer benthos worden toegevoegd. De BSS_{cr} is in deze studie niet specifiek gemeten, maar de hoeveelheid materiaal in suspensie voor een bepaalde BSS . Als we de BSS_{cr} definiëren als het punt waarop de hoeveelheid materiaal in suspensie

exponentieel toeneemt en hoger is dan de controlemetingen zonder benthos zijn deze vergelijkbaar met de BSS_{cr} metingen uit deze studie ($< 0.1 \text{ N m}^{-2}$ voor *Corophium* sp., $\sim 0.14 \text{ N m}^{-2}$ voor *Limecola (Macoma) balthica*, en $\sim 0.18 \text{ N m}^{-2}$ voor *Hediste diversicolor*).

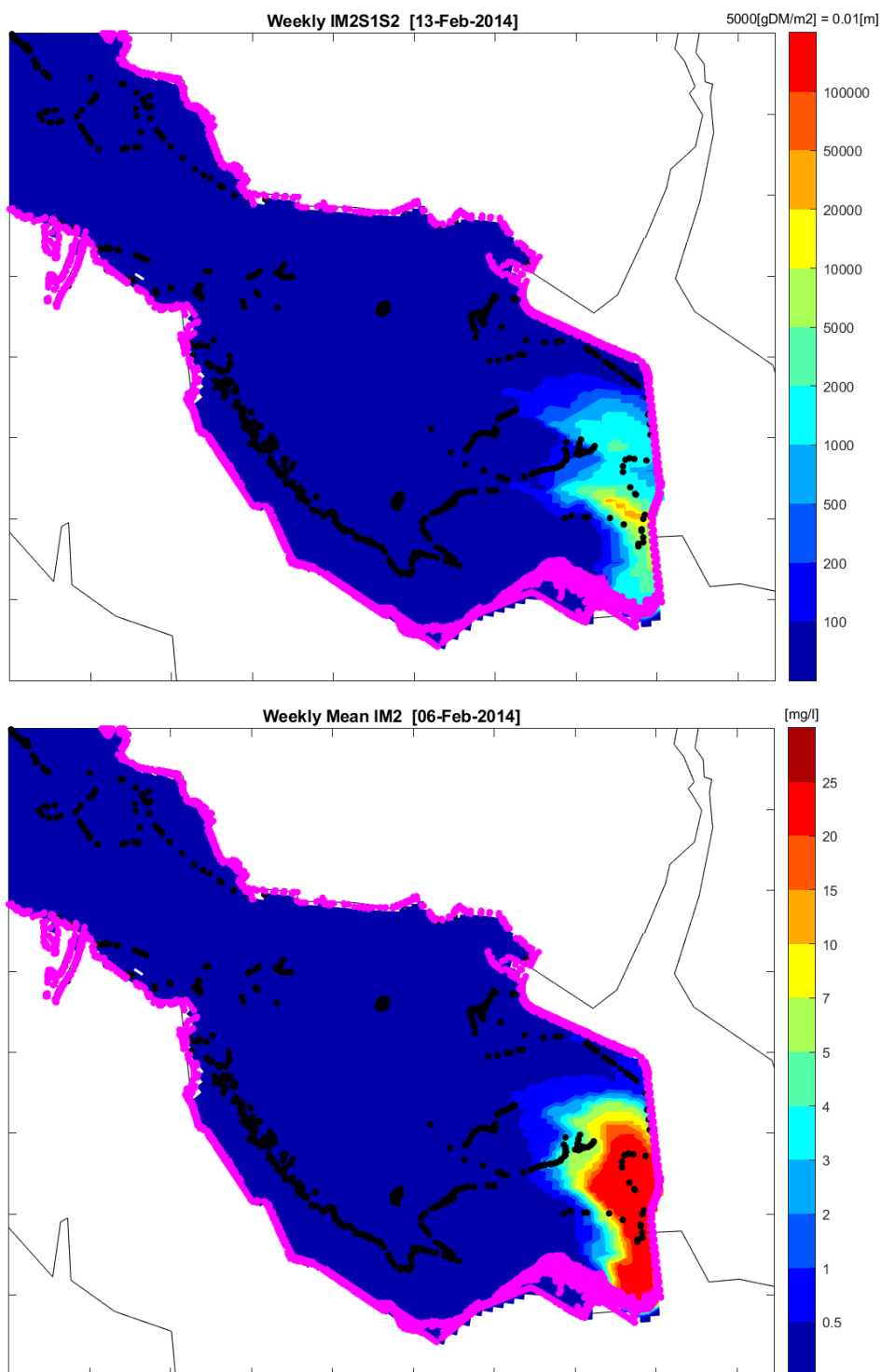


Figuur 9. Relaties tussen BSS en resuspensie voor verschillende soorten en dichtheden benthos (Cozzoli et al. 2019).

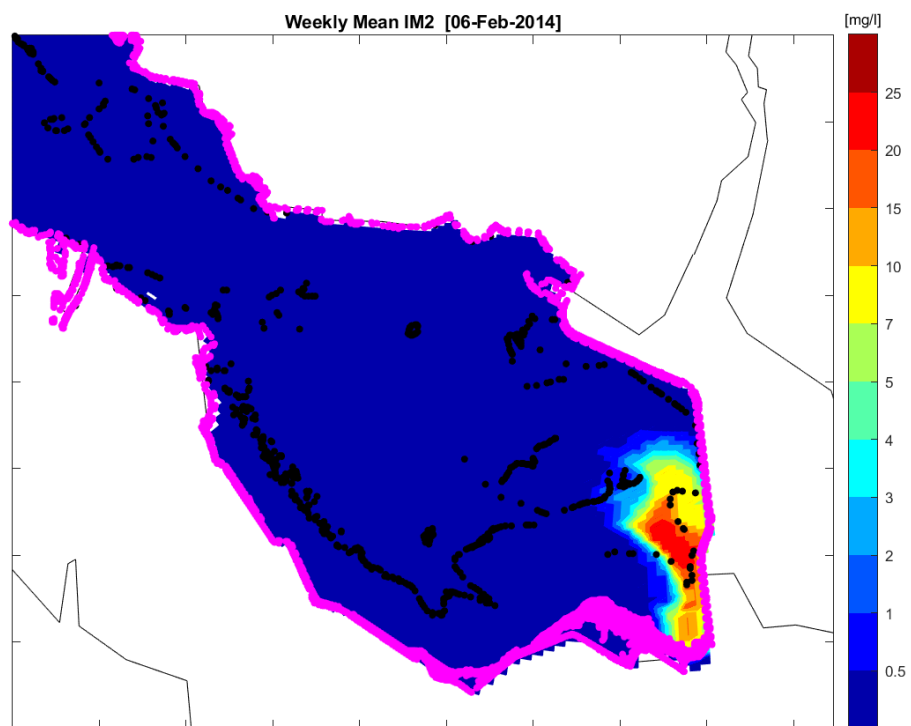
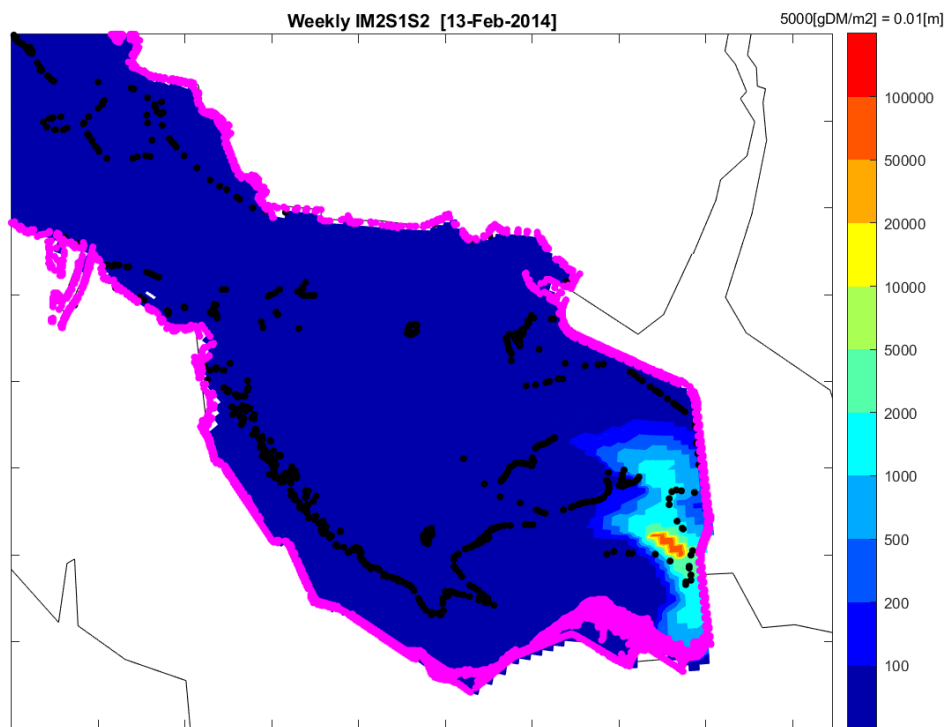
Bijlage 3 Resultaten van scenarioberekeningen

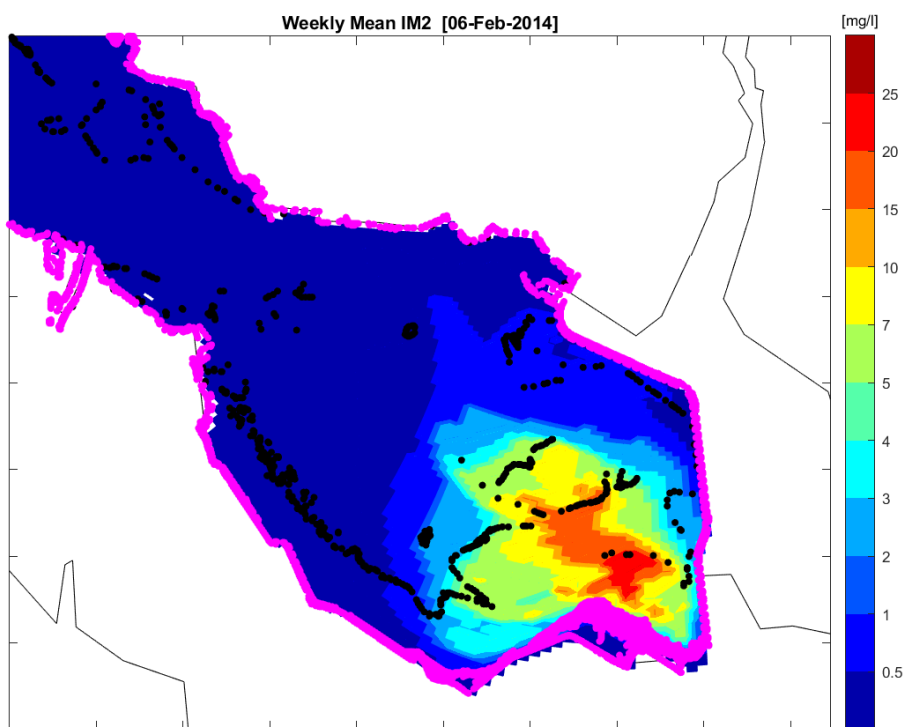
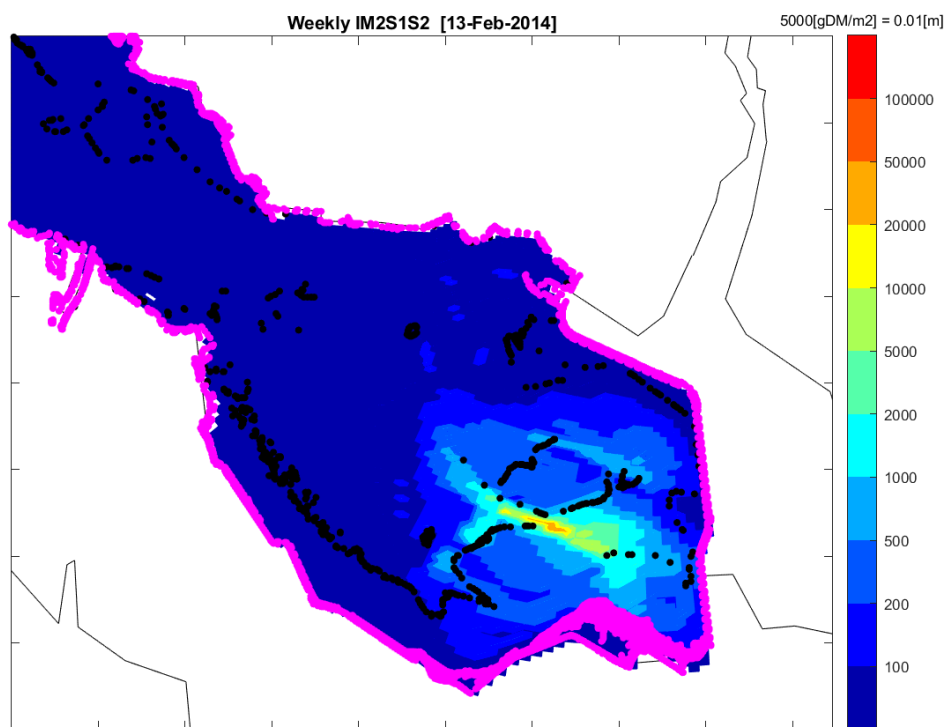
Getoond is de opslibbing na 3 maanden (in g/m², 5000 = 1 cm) en de maximale weekgemiddelde concentratieverhoging (in mg/l) t.g.v. de verspreiding. Hoogwaterlijn roze, laagwaterlijn zwart

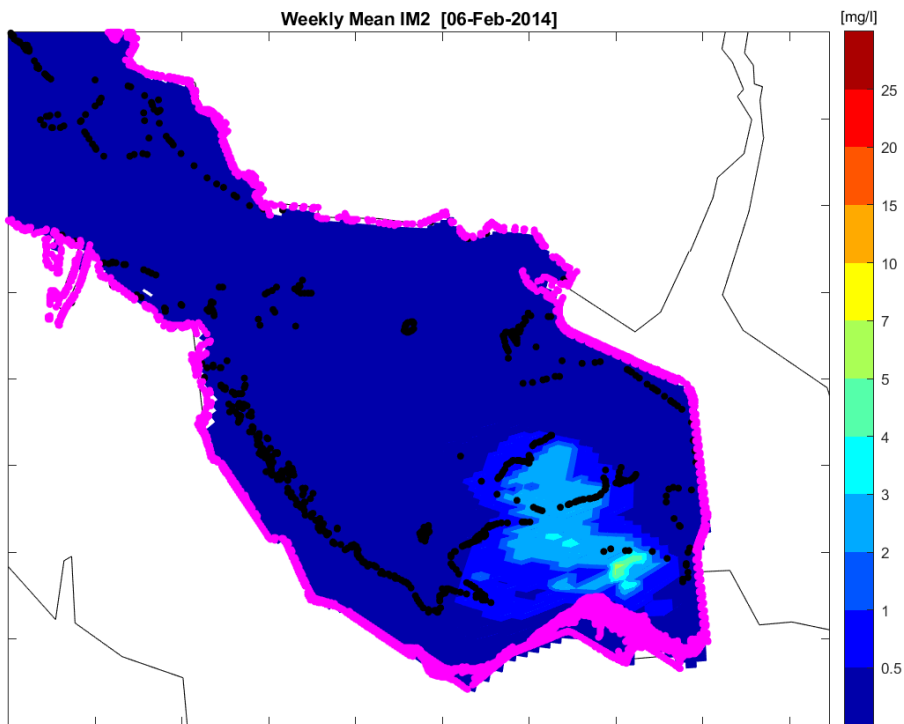
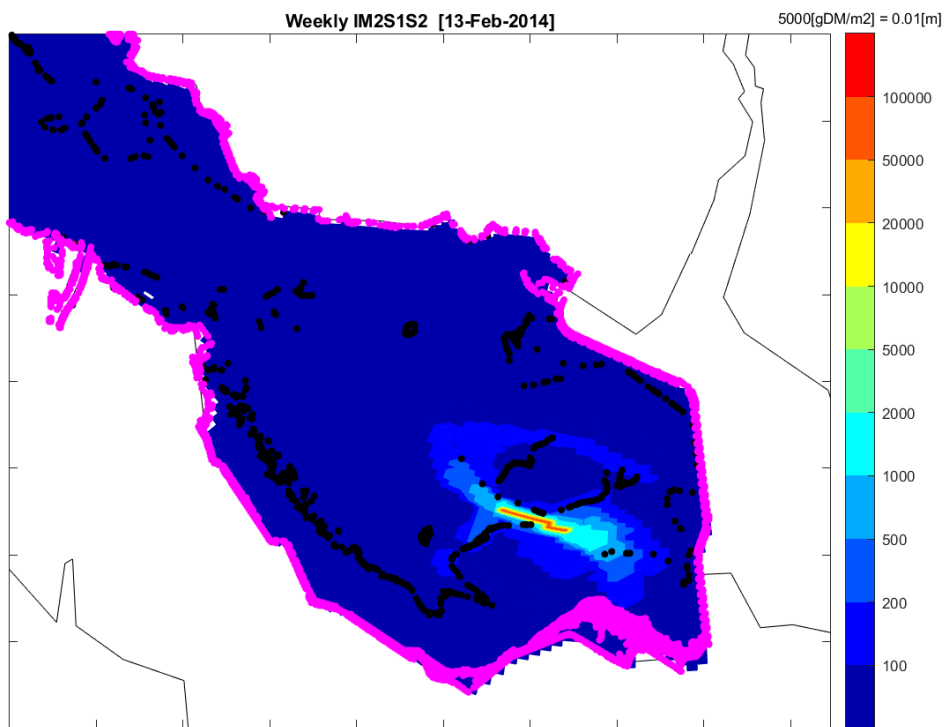
Scenario R08PH2_1_S01 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



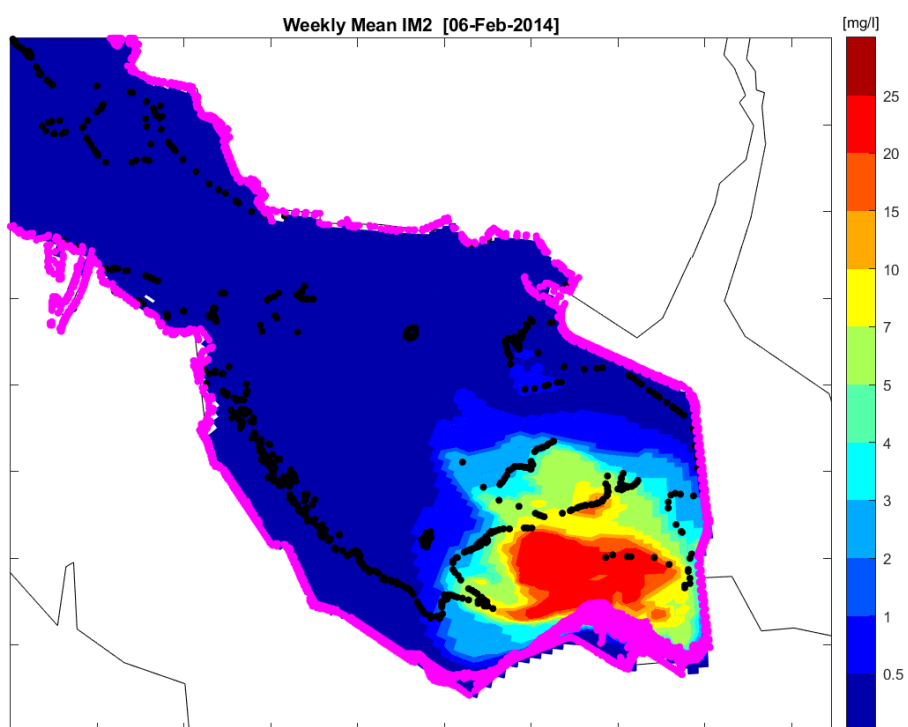
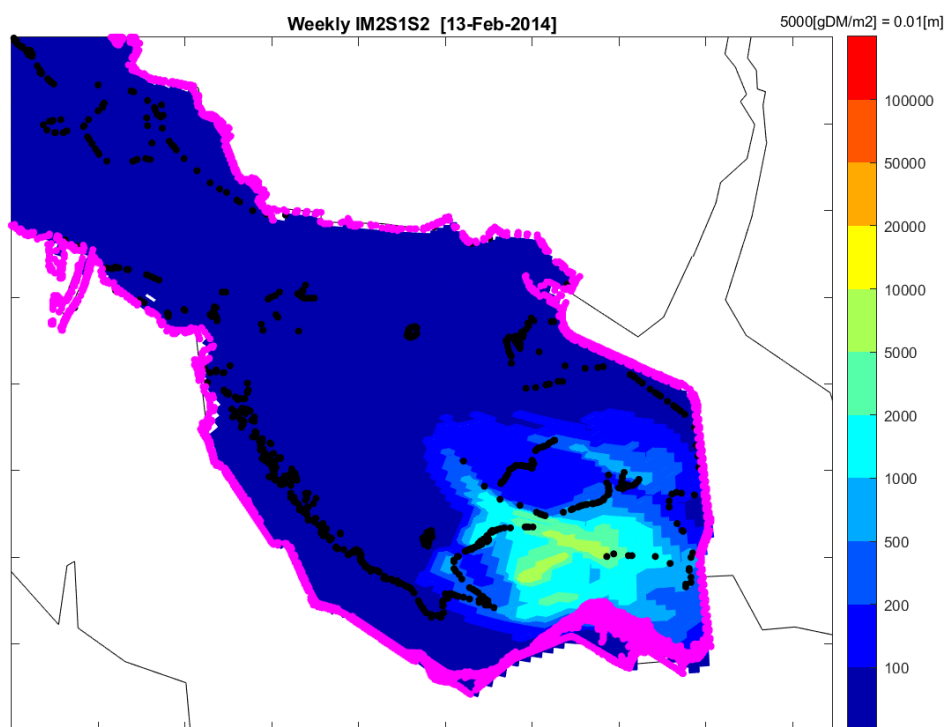
Scenario R08PH2_2_S01 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.4 Pa)



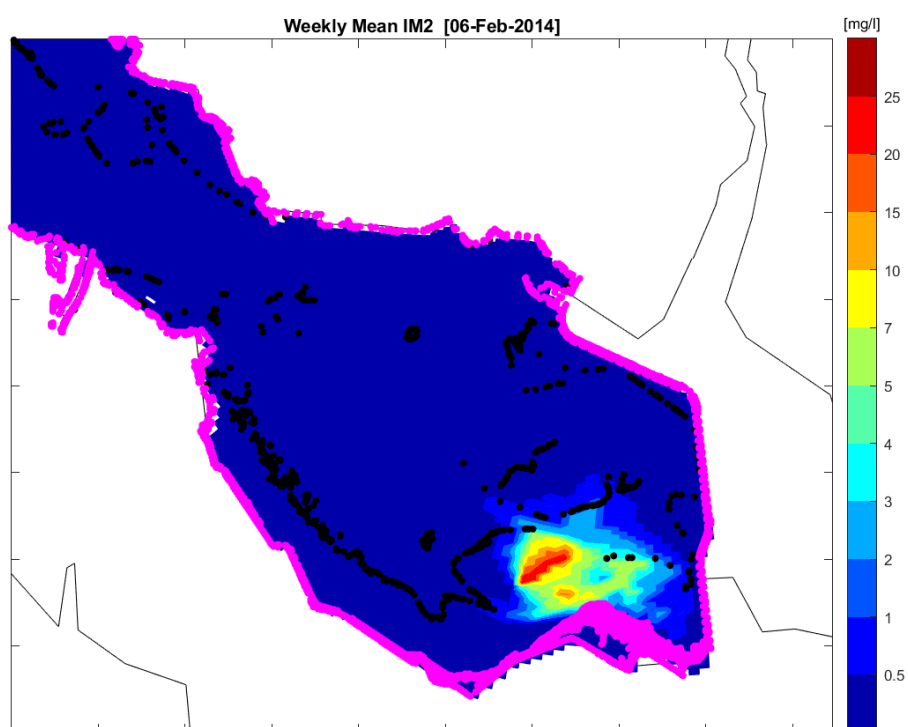
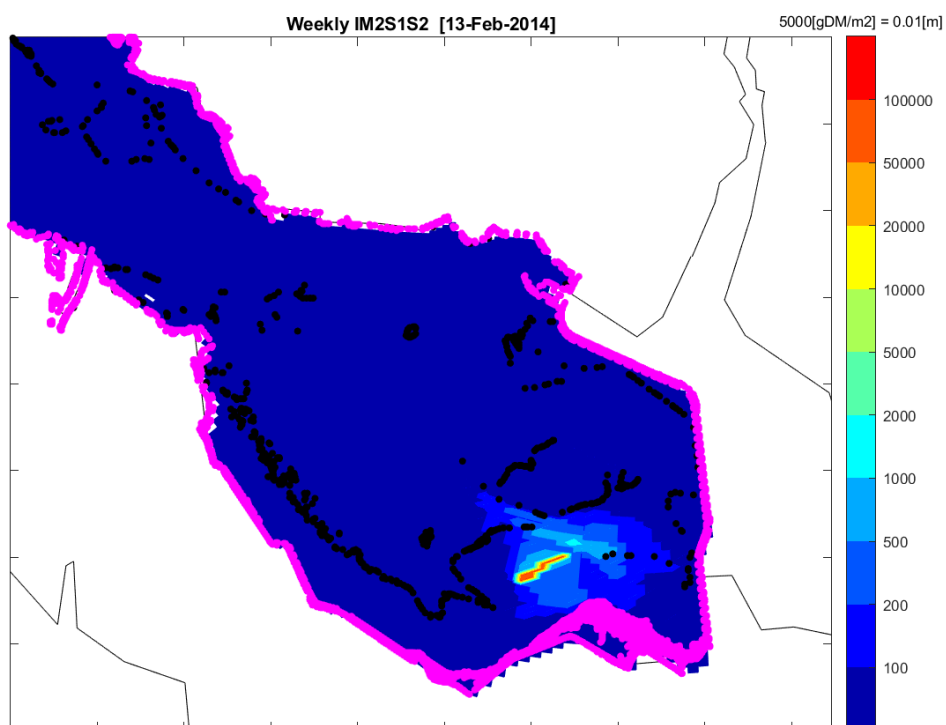




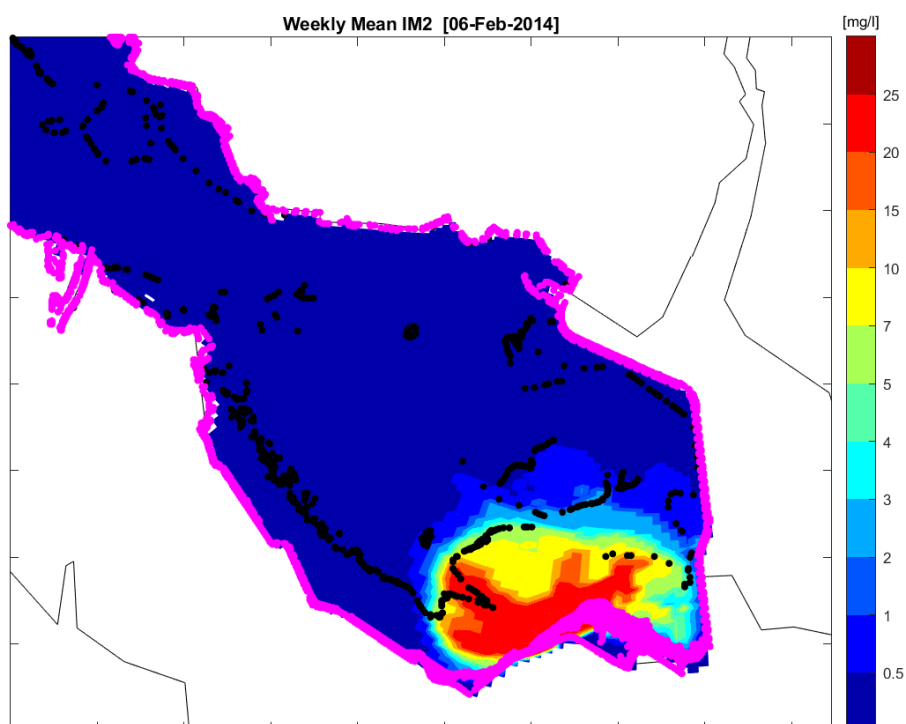
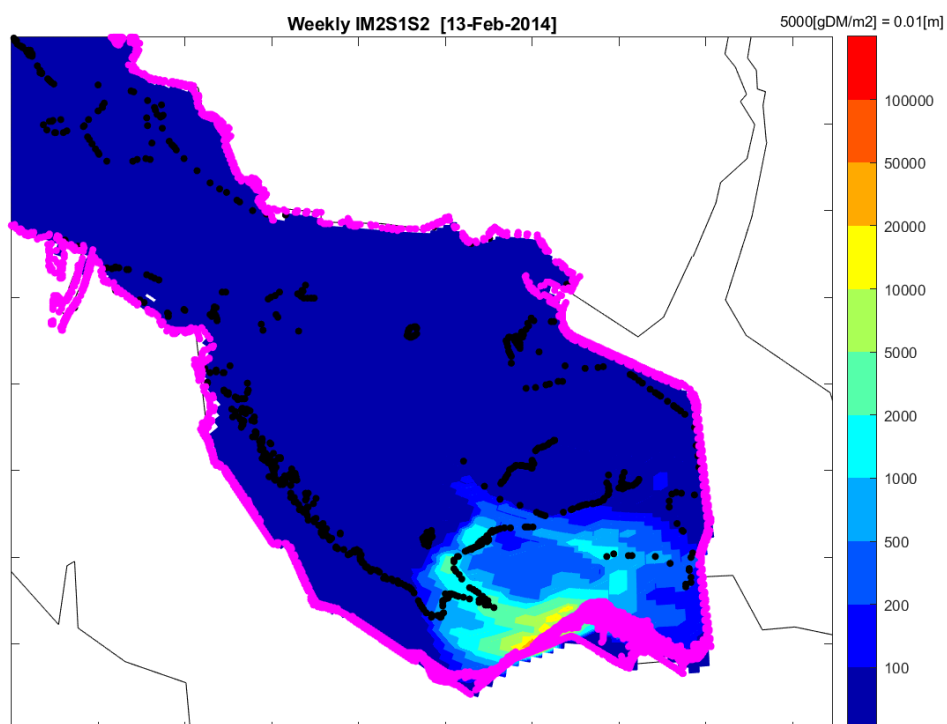
Scenario R08PH2_1_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



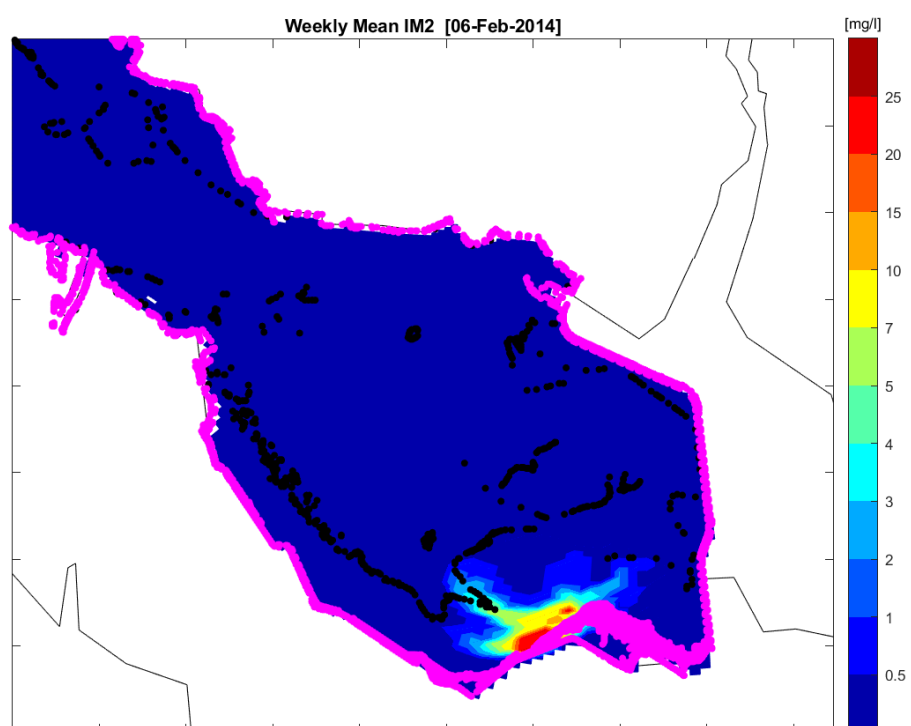
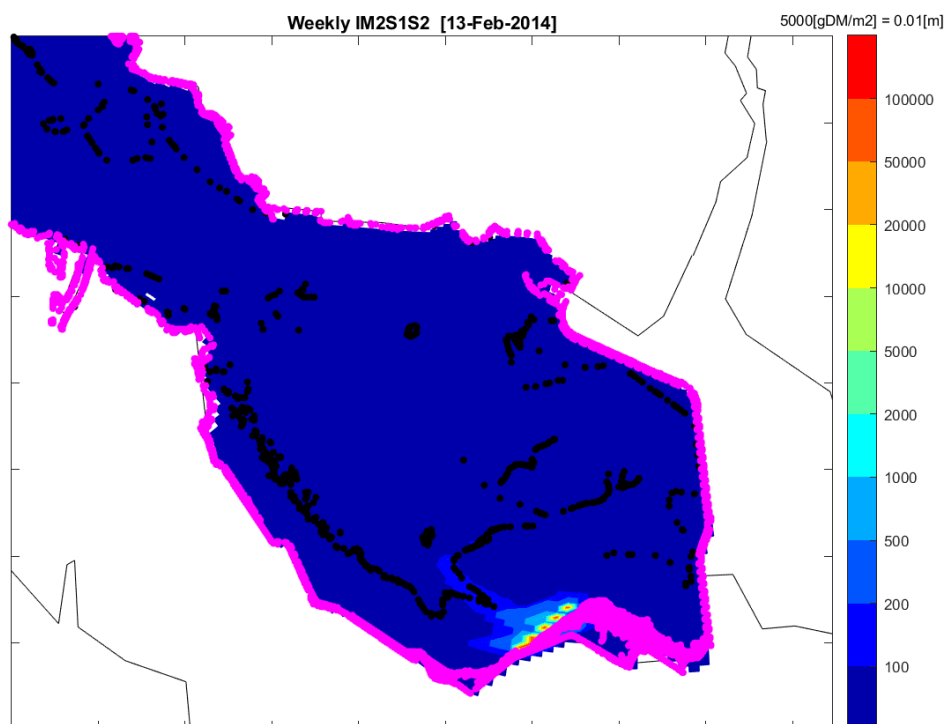
Scenario R08PH2_2_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.8 Pa)



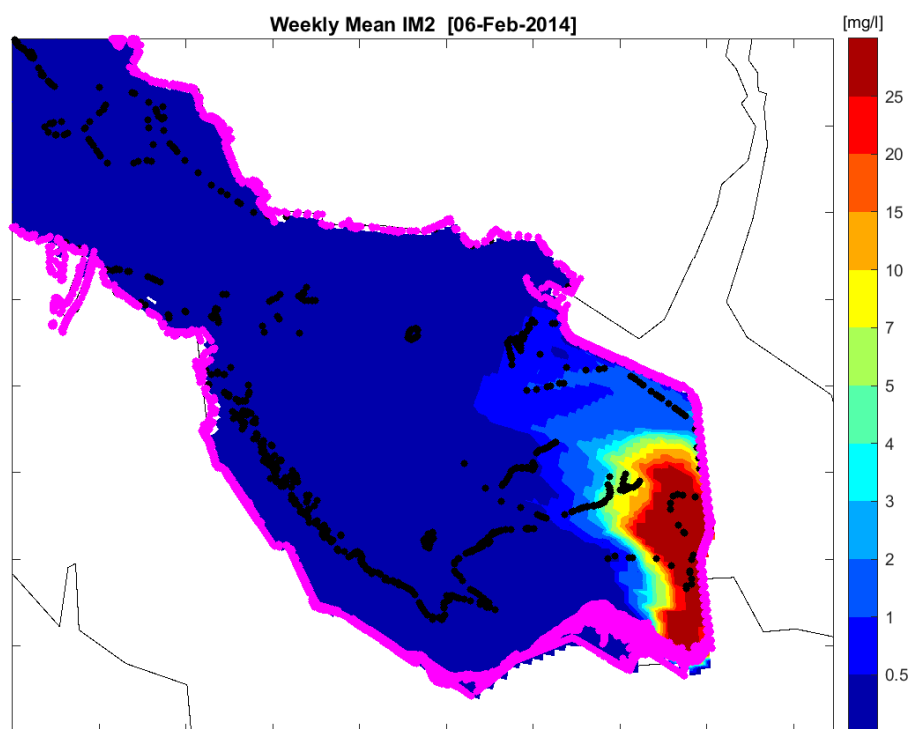
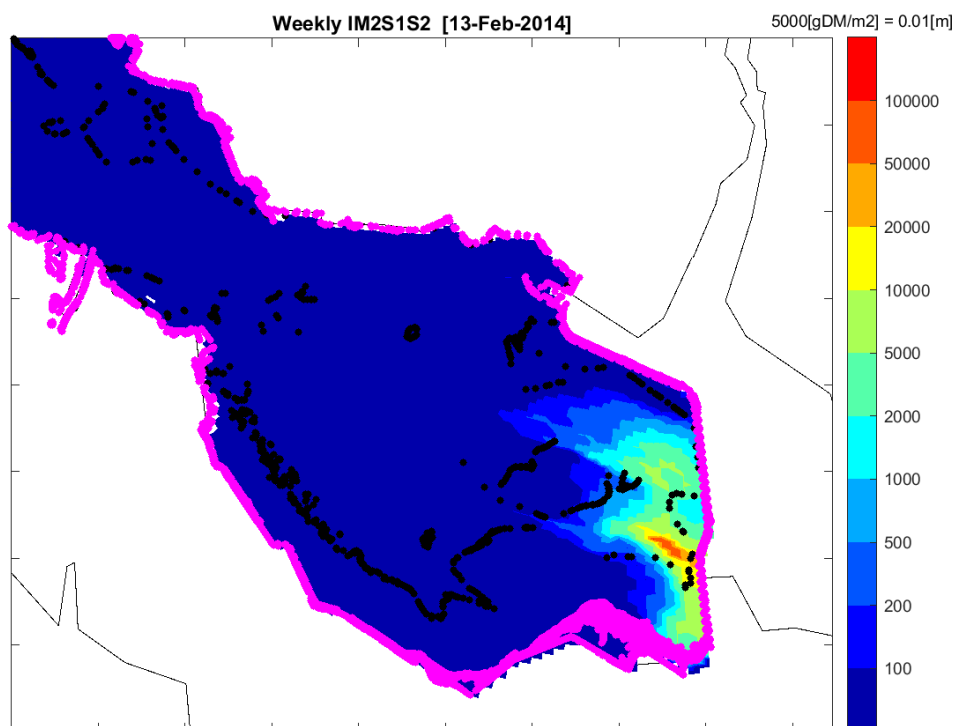
Scenario R08PH2_1_S04 (plaatsuppletie 2, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



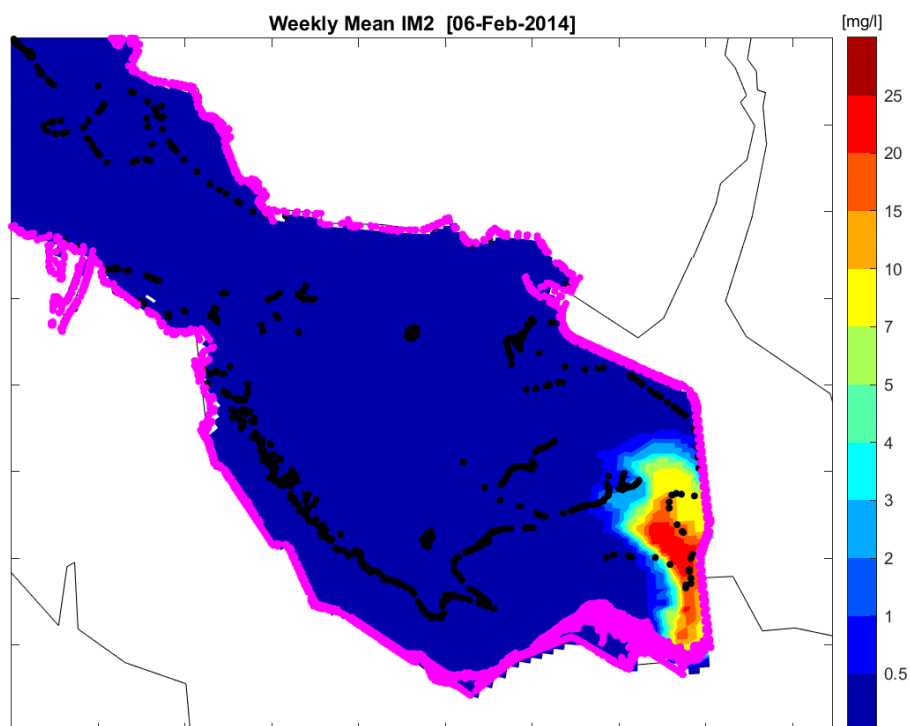
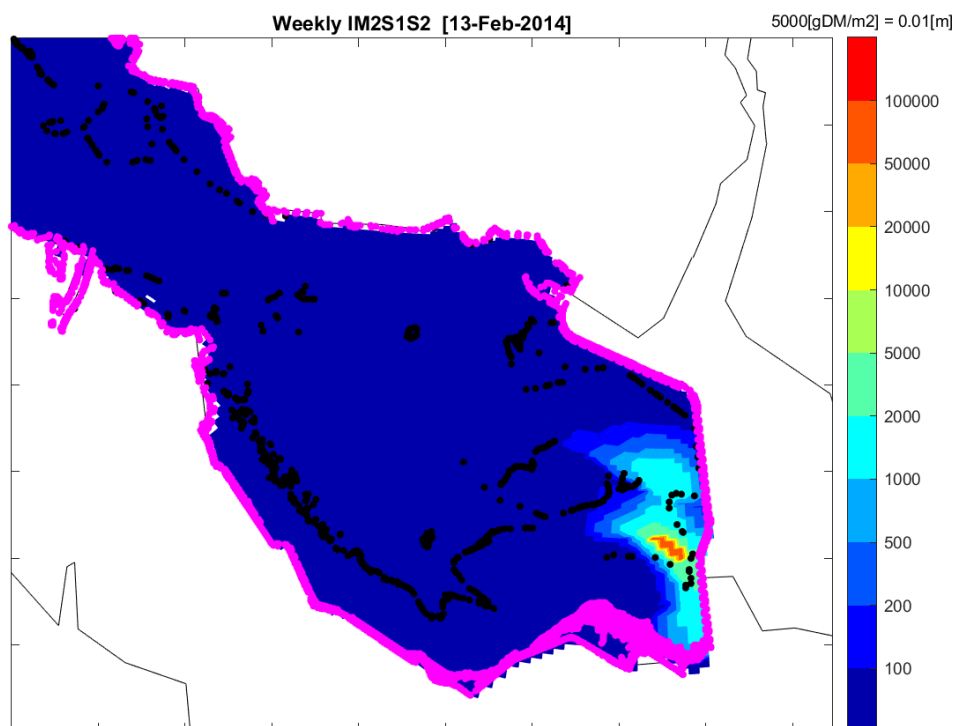
Scenario R08PH2_2_S04 (plaatsuppletie 2, 100.000 m³, 20 ha, 46% slib, tau_crit = 0.8 Pa)

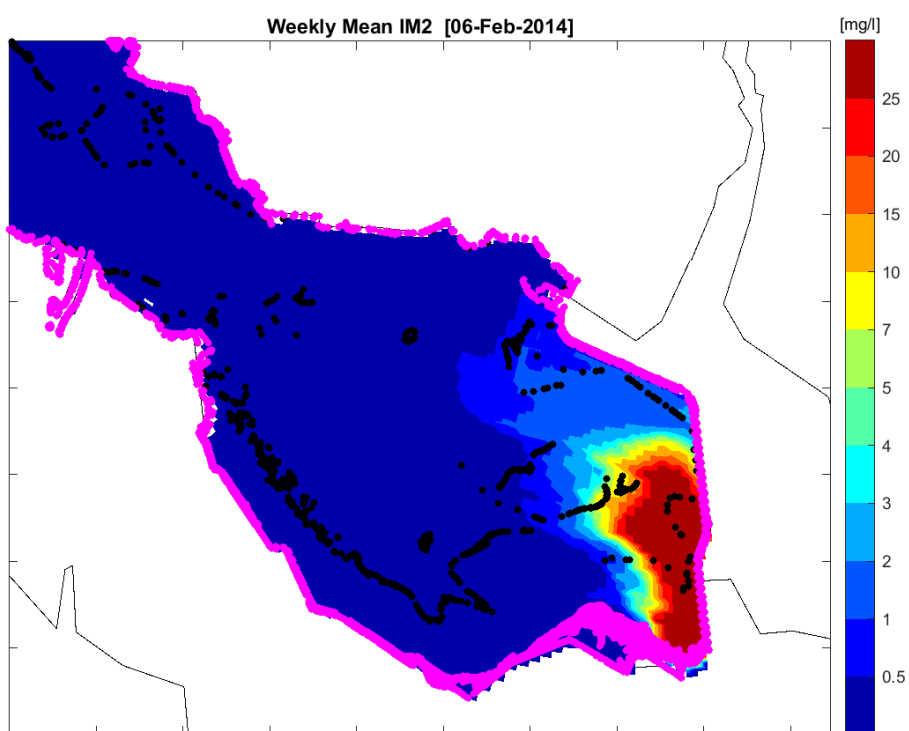
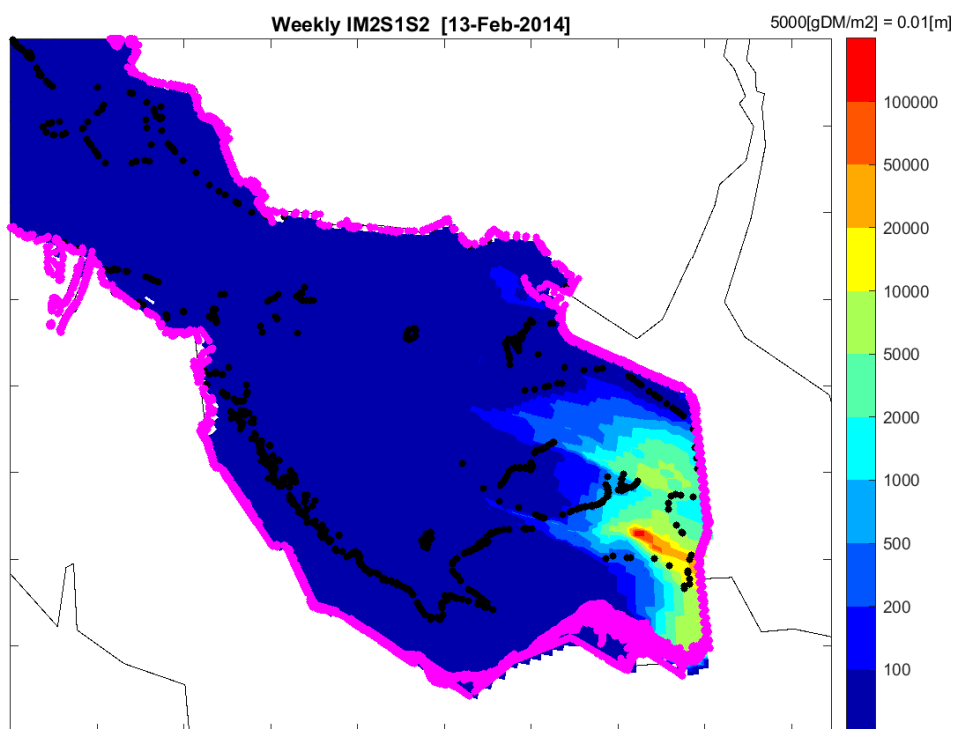


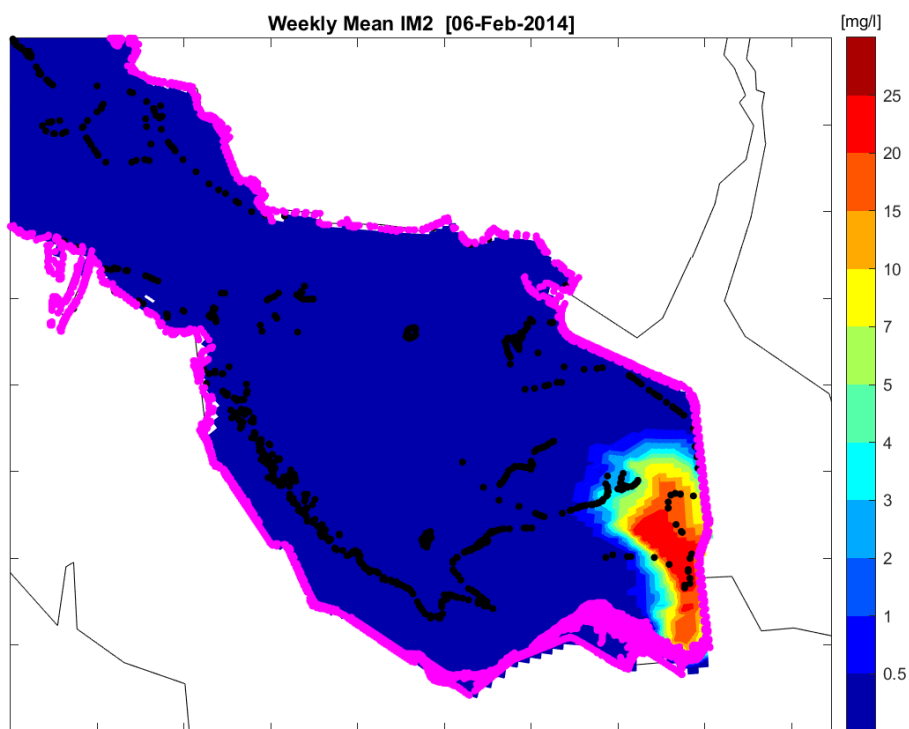
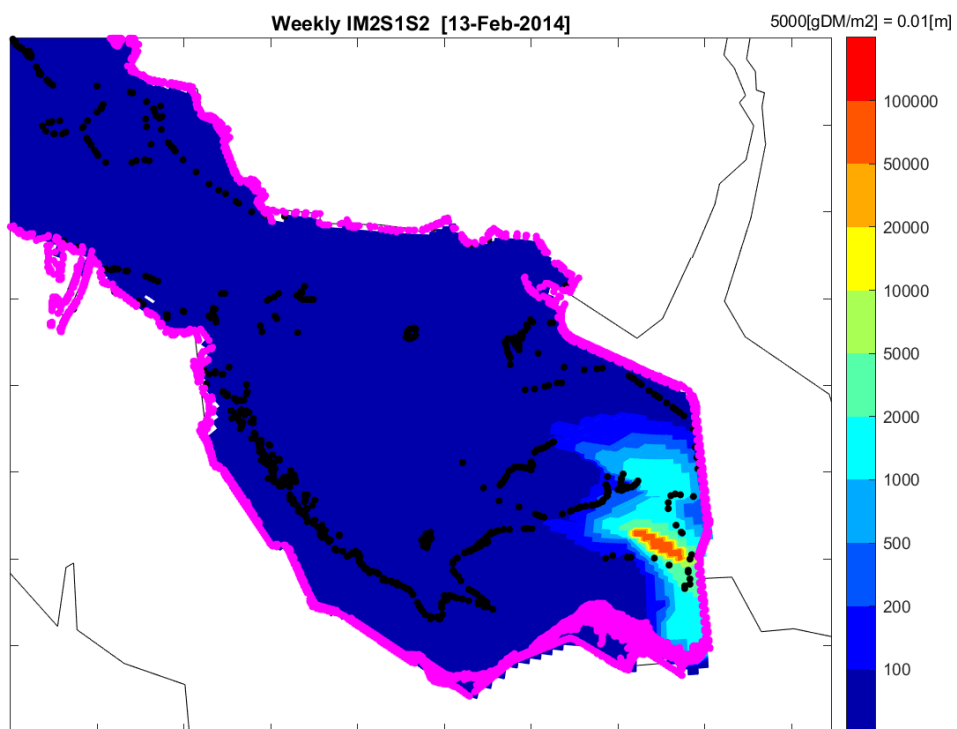
Scenario R08PH2_2_64_S01 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 64% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



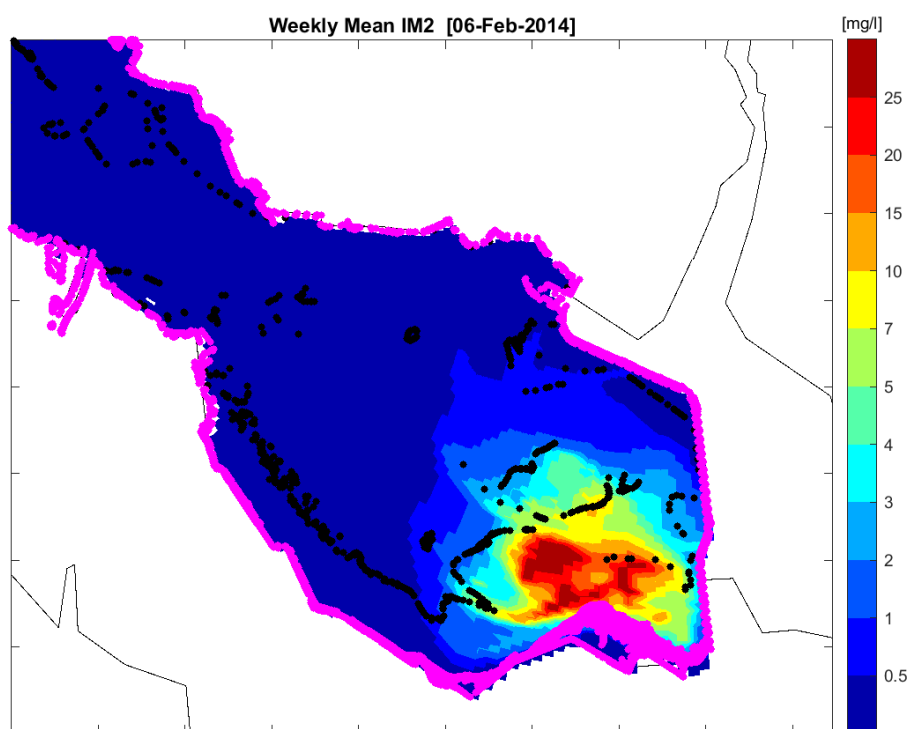
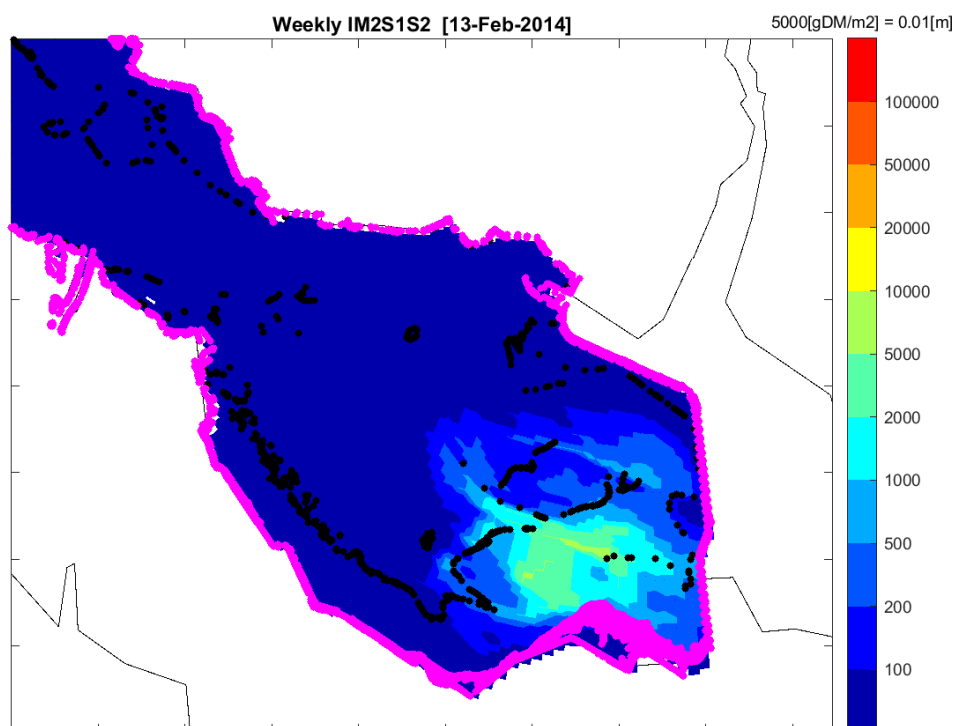
Scenario R08PH2_2_64_S02 (slibmotor 1, 100.000 m³, 20 ha, 64% slib, tau_crit = 0.4 Pa)



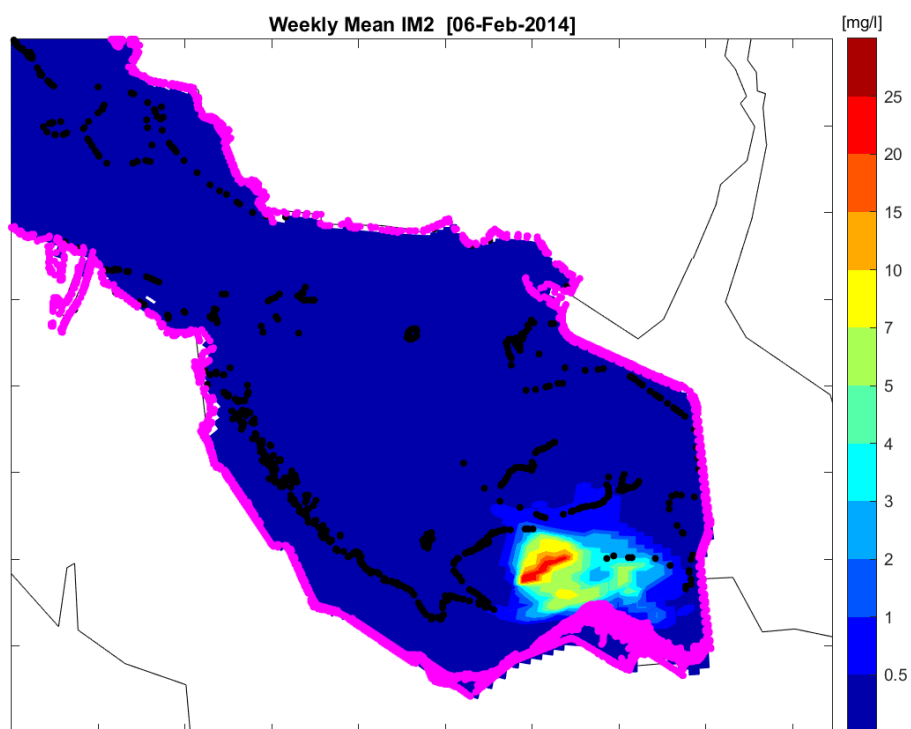
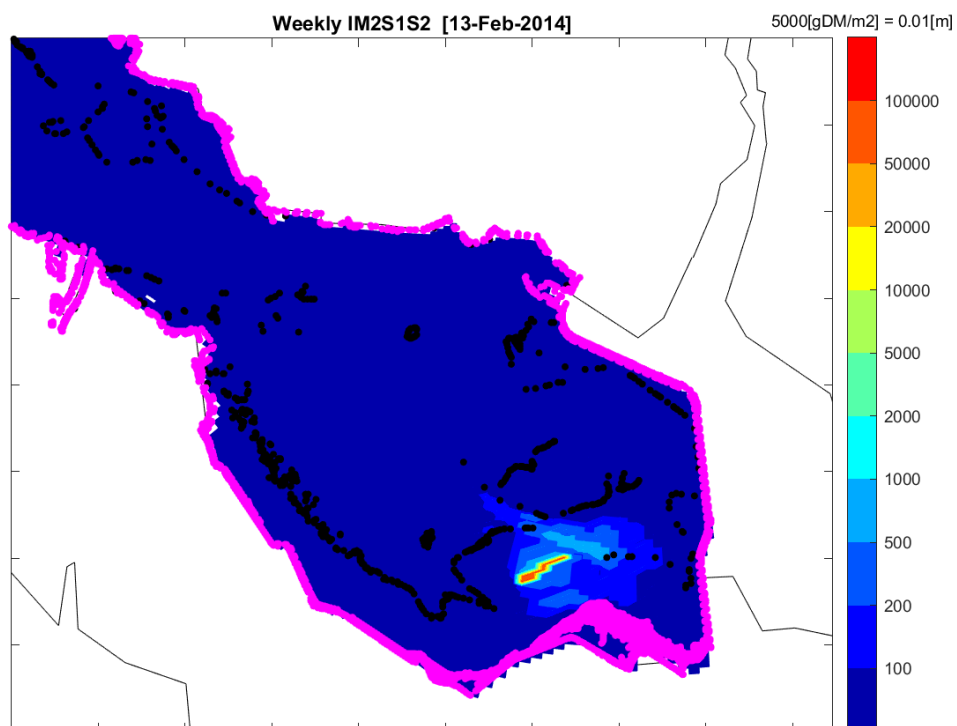


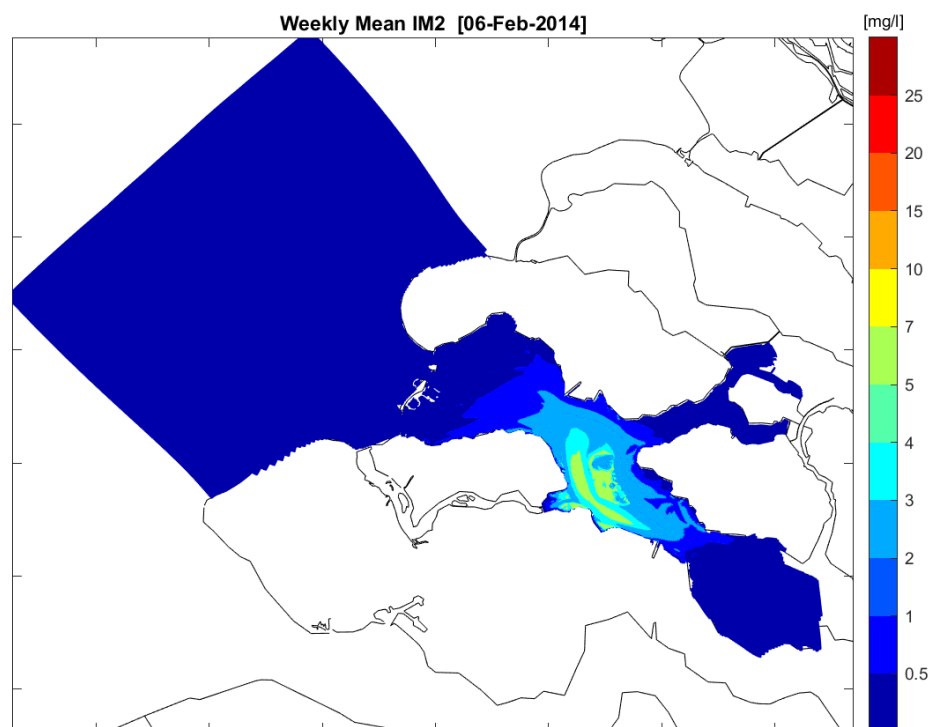
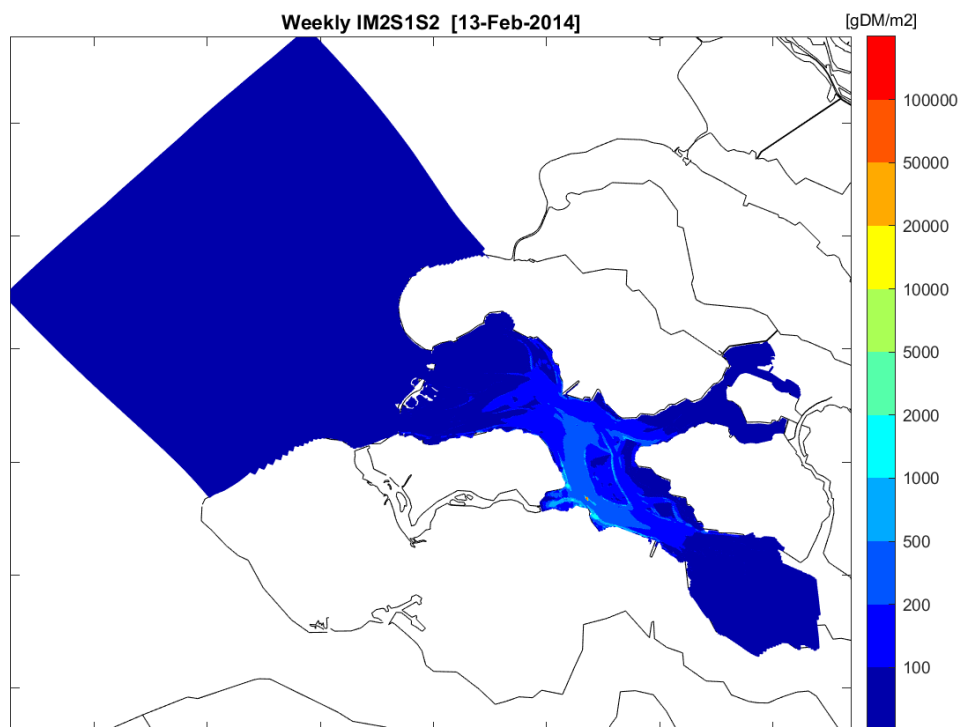


Scenario R08PH2_2_30_S03 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 30% slib, tau_crit = 0.2 Pa)



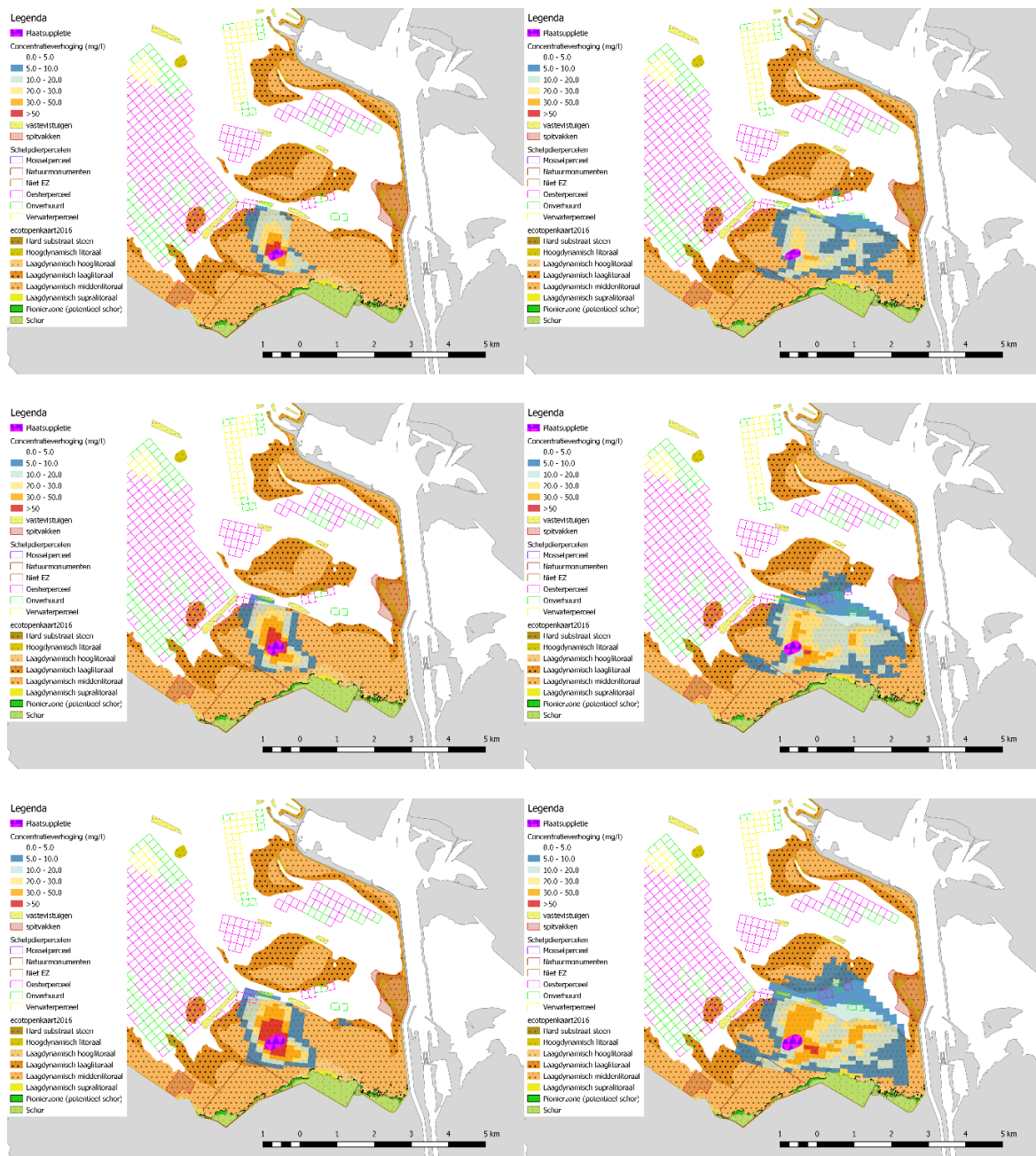
Scenario R08PH2_2_30_S04 (plaatsuppletie 1, 100.000 m³, 20 ha, 30% slib, tau_crit = 0.8 Pa)





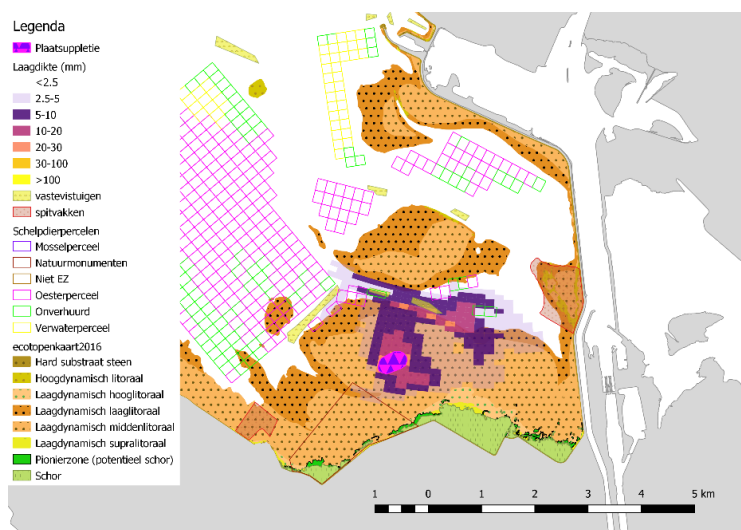
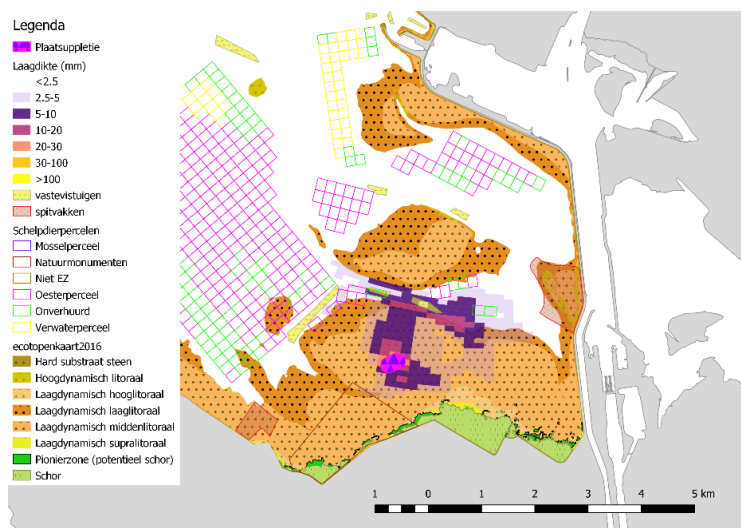
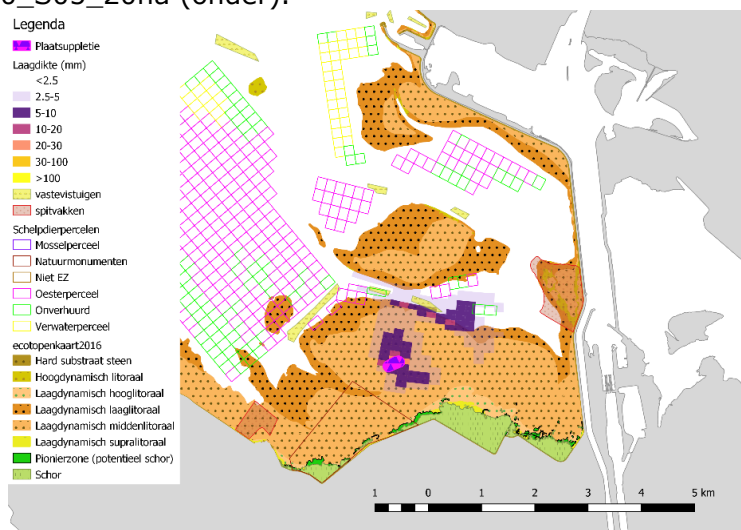
Bijlage 4

Berekende verhoging van weekgemiddelde slibconcentratie in de waterkolom direct na aanleg van het definitieve suppletie-ontwerp (week 9, linkse figuren) en na 13 weken (rechtse figuren) voor scenario R08PH2_2_30_S05_10ha (top), R08PH2_2_30_S05_15ha (midden) en R08PH2_2_30_S05_20ha (onder).



Bijlage 5

Berekende accumulatie van slib op de bodem op het einde van de simulatieperiode (na 14 weken) voor het definitieve suppletie-ontwerp voor scenario R08PH2_2_30_S05_10ha (top), R08PH2_2_30_S05_15ha (midden) en R08PH2_2_30_S05_20ha (onder).



Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 09 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekers adres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden

Wageningen Marine Research levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'
