

Slibdynamiek Marker Wadden

invloed op Markermeer



Slibdynamiek Marker Wadden

invloed op Markermeer

Auteur(s)

Jill Hanssen

Menno Genseberger

Bob Smits

Slibdynamiek Marker Wadden

invloed op Markermeer

Opdrachtgever	lenW
Contactpersoon	Sacha de Rijk
Referenties	KPP project KI01 2021
Trefwoorden	Markermeer, Marker Wadden, slib, model

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	23-11-2022
Projectnummer	11206800-003
Document ID	11206800-003-BGS-0002
Pagina's	42
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Jill Hanssen	
	Menno Genseberger	
	Bob Smits	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Jill Hanssen	Valesca Harezlak	Bianca Peters	
	Menno Genseberger			
	Bob Smits			

Samenvatting

De aanleg van de Marker Wadden beïnvloedt via luwtewerking en sedimentatie van slib de slibdynamiek in het Markermeer. De verwachting is dat hierdoor meer slib wordt ingevangen, en er minder slib wordt opgewerveld, waardoor de troebelheid lokaal afneemt. De vraag is hoe groot deze afname is en hoe groot het gebied is waarin deze afname optreedt.

In dit rapport worden het sedimenttransport en de sedimentatie in het Markermeer als gevolg van de Marker Wadden, de slibgeul en zandwinputten gekwantificeerd door middel van een model en vergeleken met metingen in het Markermeer in het jaar 2020. Hiermee worden de twee hoofdvragen beantwoord, namelijk:

1. Hoe snel wordt slib ingevangen in de slibgeul en hoe kan dit worden benut?
2. Hoeveel slib wordt afgezet in de luwte van Marker Wadden en wat is de invloed van de slibonttrekking in de luwte, slibgeul en zandwinputten op de slibdynamiek in het Markermeer?

De combinatie van meten en modelleren is hiervoor noodzakelijk omdat de slibdynamiek sterk variabel is afhankelijk van de windsnelheid en -richting en de historie hiervan. Om het effect van Marker Wadden hieruit af te leiden zou er op veel plaatsen langdurig moeten worden gemeten. Dit was praktisch niet haalbaar en daarom is de effectanalyse mede gebaseerd op een slibmodel van het Markermeer waarin de aanwezigheid van Marker Wadden en winputten kan worden aan- en uitgezet bij verder identieke omstandigheden.

Uit deze analyse blijkt dat de meeste extra invang van slib plaatsvindt in de winputten en hiernaast ook in de luwte achter Marker Wadden en in mindere mate in de slibgeul. Volgens het model wordt ca. 100 kton per jaar ingevangen, volgens waarnemingen is dit wellicht zelfs ruim het dubbele. Dit slib is afkomstig uit de bodem elders in het Markermeer, met name ten zuidwesten, zuiden en zuidoosten van Marker Wadden. Deze getallen omtrent netto sedimentatie zijn onzeker gegeven beperkingen van het model, de ruimtelijke dekking van de dichtheidsmetingen van de afzettingen en van de resolutie van de bodempeilingen.

Op de schaal van het Markermeer leidt deze extra invang van slib en luwtewerking tot een beperkte verlaging van de slibconcentratie (enkele mg/l), maar binnen een straal van ca. 5 km rondom Marker Wadden is de concentratieverlaging aanzienlijk (gemiddeld 3 – 10 mg/l). Dit effect is sterk afhankelijk van de optredende windsnelheid en -richting en daarmee seizoensafhankelijk, waarbij het effect van de Marker Wadden het grootste is in de winter wanneer het harder waait.

Tegenover deze concentratieverlaging na aanleg staat een tijdelijke en plaatselijke concentratieverhoging tijdens aanleg. Op remote sensing beelden zijn tijdens aanleg af en toe slibpluimen zichtbaar die niet verklaard kunnen worden door de dan opgetreden windaandrijving. Vermoedelijk zijn deze gerelateerd aan aanlegwerkzaamheden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	KIMA Thema 1	6
1.2	Doel	6
1.3	Methode	6
1.4	Opzet van het rapport	7
2	Overzicht metingen	8
2.1	Waterkolom	8
2.2	Bodem	9
3	Modelopzet	12
3.1	Structuur	12
3.2	Bathymetrie	12
3.3	Hydrodynamica	12
3.4	Sedimenttransport	12
3.5	Modelscenario's	14
4	Modelverificatie	15
4.1	Model en veldmetingen	15
4.1.1	Kalibratie van de metingen	15
4.1.2	Meetframe	15
4.1.3	Meetpalen	17
4.2	Vergelijking met remote sensing beelden	18
5	Scenario's met en zonder Marker Wadden	21
5.1	Invloed Marker Wadden na aanleg	21
5.1.1	Jaargemiddelde	21
5.1.2	Jaarlijkse erosie en depositie	24
5.1.3	Storm en luwe condities	25
5.1.4	Temporele effecten	32
5.1.5	Sediment budgetten	34
6	Discussie en conclusie	37
6.1	Model kalibratie en validatie	37
6.2	Effect van de Marker Wadden	37
6.3	Slibpluimen	38
7	Referenties	39
A	Details van aanpassingen modelrooster, bodem en gemiddelde waterstand	40

1 Inleiding

1.1 KIMA Thema 1

Het kennis- en innovatieprogramma Marker Wadden (KIMA) omvat 3 hoofdthema's, namelijk

Thema 1: Bouwen met slib en zand

Thema 2: Ecosysteem van waarde

Thema 3: Gouvernance

Thema 1 bestaat uit 3 subthema's, namelijk

1.1 Bouwen met slib

1.2 Zandige randen

1.3 Invloed van Marker Wadden op de slibdynamiek van het Markermeer

Het huidige rapport bespreekt de resultaten m.b.t. Thema 1.3 slibdynamiek.

1.2 Doel

De aanleg van de Marker Wadden beïnvloedt via luwtewerking en sedimentatie van slib de slibdynamiek in het Markermeer. De verwachting is dat hierdoor de troebelheid lokaal afneemt, de vraag is in welke mate en wat de reikwijdte is van de afname.

Voor de Marker Wadden is een slibgeul gegraven met een dubbel doel, namelijk om het sediment afkomstig uit deze geul te gebruiken voor de eerste fase van de aanleg van de Marker Wadden en daarnaast om het ingevangen slib in de slibgeul te gebruiken voor onderhoud van Marker Wadden of bij de aanleg van vervolgfases. Behalve de slibgeul zijn ook enkele winputten gemaakt om over voldoende zand en slib te beschikken om Marker Wadden te kunnen aanleggen.

In dit rapport worden het sedimenttransport en de sedimentatie in het Markermeer als gevolg van de Marker Wadden, de slibgeul en zandwinputten (Figuur 2-1) gekwantificeerd door middel van een model en vergeleken met metingen in het Markermeer in het jaar 2020. Hiermee worden de twee hoofdvragen van het subthema slibdynamiek beantwoord:

1. Hoe snel wordt slib ingevangen in de slibgeul en hoe kan dit worden benut?
2. Hoeveel slib wordt afgezet in de luwte van Marker Wadden en wat is de invloed van de slibonttrekking in de luwte, slibgeul en zandwinputten op de slibdynamiek in het Markermeer?

Om dit doel te realiseren wordt een bestaand Markermeer model 2016 (Harezlak et al., 2016) aangepast door bathymetrie te actualiseren en de Marker Wadden hierin op te nemen. Bovendien wordt de hydrodynamica ook geactualiseerd naar het jaar 2020 ten behoeve van een vergelijking met metingen.

1.3 Methode

Een modelstudie met een geactualiseerd Markermeer model is toegepast om het korte en lange termijn effect van de Marker Wadden in het Markermeer te kwantificeren. Voor deze studie zijn simulaties gemaakt van de slibdynamiek van het Markermeer met en zonder de Marker Wadden voor het jaar 2020. Dit is vlak na de aanleg van de Marker Wadden. Het model is gevalideerd met turbiditeitsmetingen in het jaar 2020 op een aantal locaties (zie

Hoofdstuk 4). Daarna is het model gebruikt om de effecten van de Marker Wadden te kwantificeren. Door middel van simulaties met en zonder de Marker Wadden zijn de effecten op de sediment concentraties in de waterkolom en in de sedimentatie van slib op bodem vergeleken op verschillende tijdschalen, namelijk per seizoen en jaargemiddeld. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de sedimentatie in de slibgeul en winputten rondom Marker Wadden en in de luwtezone hierachter.

1.4 Opzet van het rapport

De opzet van dit rapport is als volgt. In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht van de metingen gegeven van de slibdynamiek in het Markermeer. Hoofdstuk 3 bespreekt de opzet en actualisatie van het model. Het onderwerp van Hoofdstuk 4 is modelverificatie, waarbij metingen en berekeningen met elkaar worden vergeleken. In Hoofdstuk 5 worden de modelscenario's met en zonder Marker Wadden met elkaar vergeleken om het effect van Marker Wadden op de slibdynamiek te kwantificeren. Tenslotte geeft Hoofdstuk 6 de belangrijkste conclusies en discussiepunten weer.

2 Overzicht metingen

2.1 Waterkolom

In het jaar 2020 is een meetcampagne uitgevoerd op verschillende plekken in het Markermeer met een verplaatsbaar meetframe waarbij sediment concentraties op basis van turbiditeit zijn gemeten in het Markereer (HKV, 2020). De locaties betreffen de slibgeul, rand van de slibbeul, in de luwte zone ten noorden van de Marker Wadden. Als aanvullende data wordt gebruik gemaakt van de meetpaal ten oosten van de Marker Wadden en in het midden van het Markermeer (RWS 2020) (Figuur 2-1). Tabel 2-1 bevat een overzicht van de meetlocaties, meetfrequentie en periode waarin het betreffende instrument heeft gemeten.

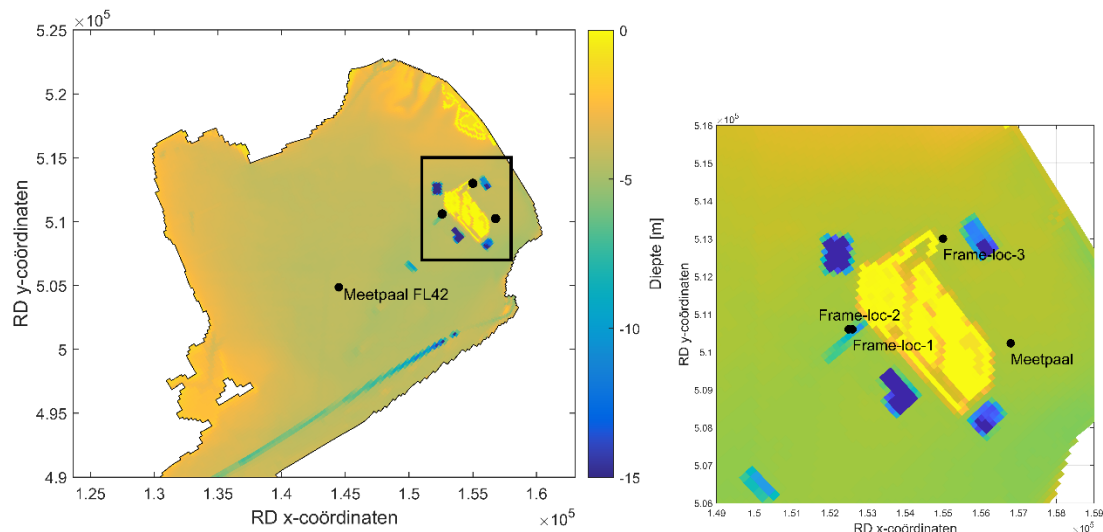
De metingen op rand van en in de slibgeul zijn verricht om de mate van aanslibbing te bepalen. Daarnaast is in de luwte van de Marker Wadden de turbiditeit gemeten om te bepalen welke invloed de luwte heeft op de troebelheid van het water. Ten oosten van de Marker Wadden staat een meetpaal die het gehele jaar turbiditeit heeft gemeten. In het midden van het Markermeer staat eveneens een meetstation dat het gehele jaar turbiditeit meet.

Naast deze hoogfrequente metingen met troebelheidsensoren is in het kader van de reguliere RWS-monitoring (MWTL) een aantal meetpunten in het Markermeer laagfrequent bemonsterd. Voor de analyse van deze metingen zie Noordhuis et al. (2021).

Voor een ruimtelijk dekken beeld van de troebelheid aan de oppervlakte zijn remote sensing gegevens beschikbaar. Deze worden in beknopte vorm gepresenteerd in §4.2 en in uitgebreidere vorm in een apart rapport (Dionisio et al., 2021).

Tabel 2-1 Meetstation met locatie (Rijksdriehoek-coördinaten) en meetperiode.

Instrument	Locatie	RD-coördinaten (x, y)	Meetperiode	Meet-frequentie [min]
Meetframe loc 1	Slibgeul	152600, 510600	Sept 2019 – Jan 2020	60
Meetframe loc 2	Geulrand	152500, 510600	Jan 2020 – Apr 2020	60
Meetframe loc 3	Luwte Marker Wadden	155000, 523000	Apr 2020 – Aug 2020	60
Meetpaal	Turbiditeit	156790, 510233	Jan 2020 – Jul 2020	10
Meetstation FL42	Turbiditeit	145000, 505000	Jan 2020 – Jul 2020	10



Figuur 2-1 Markermeer met bodemhoogte, Meetstation FL42 en Marker Wadden. Rechts: Marker Wadden met zandputten, slibgeul, meetmeeframe locaties en locatie van de meetpaal. De kleurenbalk voor de diepte geldt voor beide panelen.

2.2 Bodem

Behalve metingen in de waterkolom zijn ook metingen aan en in de bodem uitgevoerd. De verwachting is immers dat de Marker Wadden leiden tot lokaal veranderende sedimentatie- en erosiepatronen. In de luwte achter Marker Wadden, in de slibgeul en in de winputten neemt sedimentatie toe. Met bodempeilingen is vast te stellen hoeveel extra sedimentatie optreedt. Met bodembemonstering en lab-analyse is vast te stellen in welke mate de bodemsamenstelling (b.v. de verhouding tussen zand en slib of de dichtheid) verandert onder invloed van Marker Wadden. Deze bodembemonstering is gerapporteerd door Roskam (2016, 2019 en 2020) en de bodempeilingen door Multiswath (2020).

Hier worden alleen de belangrijkste conclusies van de bodempeilingen en bodemonderzoek samengevat. Uit de bodempeilingen blijkt dat (zie ter illustratie Figuur 2-2).

- Over ruim 2 jaar (van 6 oktober 2018 tot 3 december 2020) bedraagt de aanslibbing in de slibgeul 30 tot 70 cm vanaf de ZW-punt (diepte ca. -7.5 m NAP) tot de NO-punt (diepte ca. -13.5 m NAP).
- Over dezelfde periode bedraagt de aanslibbing in de winputten (diepte ca. -22 m NAP) ca. 150 cm.
- Over dezelfde periode bedraagt de aanslibbing in de luwte achter Marker Wadden (diepte ca. -4 m NAP) ca. 5 tot 10 cm.
- Over dezelfde periode bedraagt de erosie ten zuidoosten van Marker Wadden (diepte ca. -4 m NAP) ca. 5 cm.

Uit het bodemonderzoek blijkt dat:

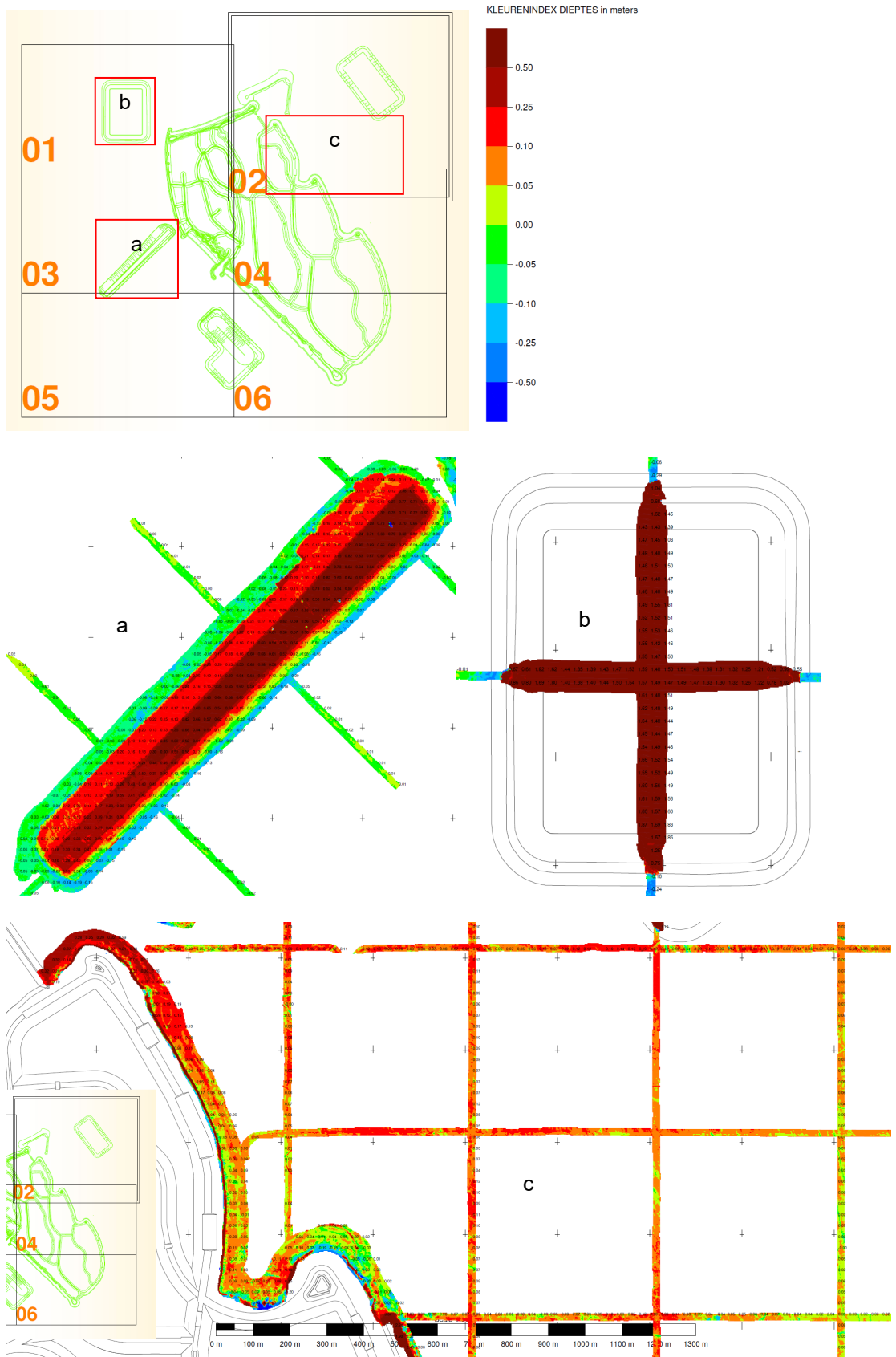
- In de luwte achter de Marker Wadden neemt de dikte van de zogenaamde 'flufflaag' toe. Dit is een laagje dun, slibrijk materiaal. Ook wordt de bodemsamenstelling slibrijker.
- Ten westen, zuiden en zuidoosten van de Marker Wadden neemt de dikte van de sliblaag juist af. De bodemsamenstelling wordt hier zandiger. Dit komt doordat de extra sedimentatie elders van ergens anders van de Markermeerbodem vandaan moet komen. De import van slib via de zoetwatertoevoer is immers zeer gering, qua slibbalans is het Markermeer bijna een gesloten systeem, zeker op de korte termijn.
- De dichtheid en sterkte van het slib dat wordt ingevangen in de slibgeul en winputten is laag. De bulkdichtheid bedraagt ca. 1100 kg/m^3 en het drogestofgehalte zo'n 15%.

- De bodem elders met een reguliere diepte van ca. -4 m NAP heeft een veel hogere sterkte en dichtheid.

Op basis van deze bodempeilingen in combinatie met metingen van de dichtheid van de afzettingen wordt de totale invang van slib in de geul, winputten en luwte achter Marker Wadden in Tabel 2-2 gekwantificeerd. Deze bedraagt ca. 300 kton per jaar waarvan het merendeel in de winputten terecht komt.

Tabel 2-2 Uit bodempeilingen afgeleide invangsnelheid van slib

Gebied	Aanslibbing (cm/jaar)	Droge dichtheid (kg/m ³)	Sedimentatieflux (kg/m ² /jaar)	Areaal (ha)	Totale aanslibbing kton/jaar
Slibgeul	40	160	64	25	16
Winputten	80	160	128	200	256
Luwte	5	400	20	300	60
Totaal					332



Figuur 2-2 Diepteverandering over de periode 6 oktober 2018 tot 3 december 2020. Details uit peilingkaarten a) slibgeul b) winput en c) luwte achter de Marker Wadden (Multiswath, 2020).

3 Modelopzet

3.1 Structuur

Het Markermeermodel bestaat uit een hydrodynamisch 3D model (Delft3D Flow, 2021) en een 3D sedimenttransport model (DelWAQ, 2019). Het hydrodynamische model en sedimenttransport model zijn beide curvi-lineaire modellen met 7 lagen in de verticaal. Stroomsnelheden, (wind)golven en bodemschuifspanningen volgen uit het Delft3D Flow model. Deze uitvoer parameters zijn invoerparameters in het DelWAQ model. Met dit model wordt het transport van twee slibfracties in het Markermeer berekend.

3.2 Bathymetrie

Voor deze model studie is als basis het Marker Wadden model 2016 (Harezlak et al., 2016) gebruikt. Dit model is eerder al gekalibreerd en gevalideerd. Voor de huidige studie is de bathymetrie van dit model geactualiseerd en zijn ook de Marker Wadden toegevoegd op basis van gemeten bodemdata door Boskalis. Naast de eilanden zijn ook de zandwinputten en de slibgeul opgenomen in het model (Figuur 2-1). De bathymetrie wordt voor zowel het Delft3D Flow model als het DelWAQ model gebruikt.

3.3 Hydrodynamica

In het Markermeer verschillen de waterstanden in ruimte en tijd door (wind)golven en in- en uitgaande debieten bij verschillende gemalen. In dit model zijn deze debieten geschematiseerd in vier punten met een in- en uitvoer van water (namelijk de Houtribsluizen, Krabbersgatsluizen, Edam en Hollandse Brug). Het resulterende Markermeer peil is gevalideerd met data van het 2020. De resultaten van de validatie zijn toegevoegd in Appendix A. KNMI wind data (KNMI 2020) was invoer ten behoeve van de windgolven in het model.

De berekende bodemschuifspanning volgt uit de combinatie van stroming, golven en bodemruwheid. In het Markermeer varieert de bodemruwheid door met name bodemschelpen. Gelijk aan het model van 2007 is de bodemruwheid bepaald op basis van de schelpenkaart (Van Kessel et al., 2009).

3.4 Sedimenttransport

Het DelWAQ model berekent sedimenttransport in het Markermeer en de uitwisseling van sediment met de bodem voor het jaar 2020. De focus van deze studie is sedimenttransport en daarom worden morfologische veranderingen buitenbeschouwing gelaten en blijft de bathymetrie in het model constant tijdens de simulatie. De sedimenthoeveelheid in de bodem kan wel toe- en afnemen, d.w.z. sedimentatie en erosieprocessen worden meegenomen maar er is geen terugkoppeling naar de waterbeweging omdat het model niet ontwikkeld is voor lange termijnmorfologie, maar voor de slibdynamiek op de tijdschaal van enkele jaren. Een schematisatie van de waterkolom, bodem en bijbehorende fluxen is weergegeven in Figuur 3-1.

Materiaal dat sedimenteert kan lang of kort op de bodem blijven liggen afhankelijk van de materiaaleigenschappen en hydrodynamica. Dit wordt geschematiseerd d.m.v. twee karakteristieke bodemlagen. De bodemlaag (S2) en daarboven een flufflaag (S1) (Figuur 3-1). Sediment in deze flufflaag erodeert sneller dan sediment in de bodemlaag, waardoor de kritische schuifspanning voor erosie lager is.

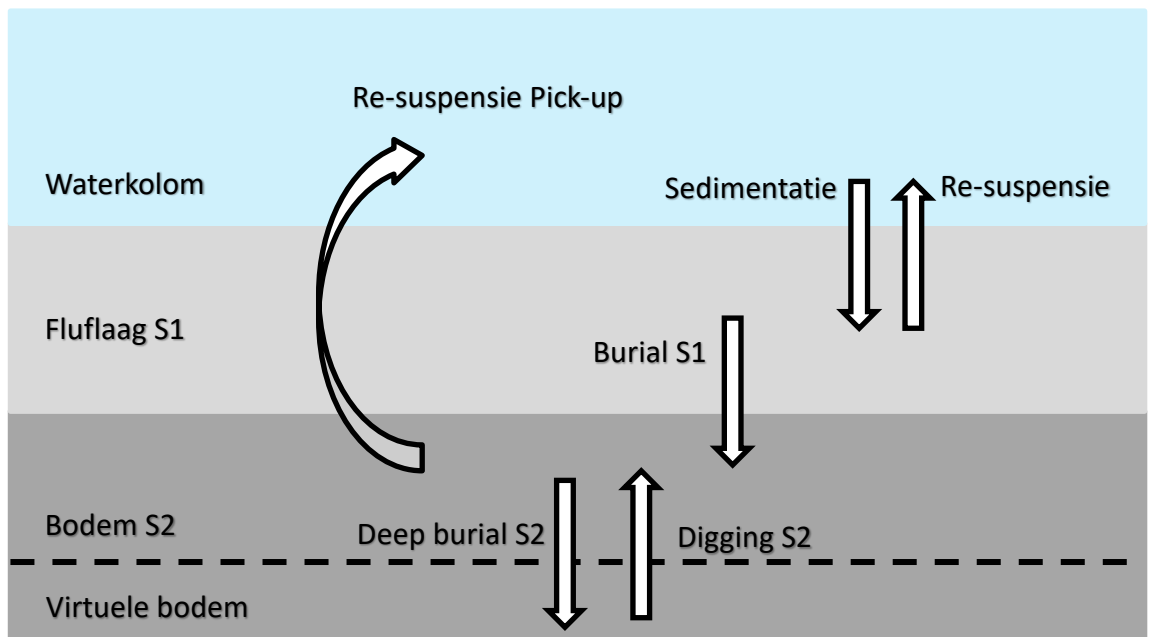
Naast de twee verschillende bodemlagen, worden ook twee verschillende sedimentfracties meegenomen om zo het sediment in het Markermeer, dat uit verschillende fracties bestaat, te simuleren. De twee sedimentfracties, Inorganisch Materiaal 1 (IM1) en Inorganisch Materiaal 2 (IM2) zijn qua eigenschappen gelijk met uitzondering van de valsnelheid die voor IM1 5× hoger is dan voor IM2 (Tabel 3-1 - Tabel 3-3).

Materiaal uit de waterkolom sedimenteert naar de flufflaag volgens:

$$D = w_s C$$

D is de sedimentatie (of depositie) [g/m²/d], w_s is de valsnelheid van het materiaal [m/d] en C [g/m³] de concentratie.

IM2 wordt geschematiseerd als een kleinere korrel dan IM1 en heeft een lagere valsnelheid dan IM1 (Tabel 3-1). De aanpak is gelijk aan de modellering in 2016.



Figuur 3-1 Model schematisatie en fluxen tussen waterkolom, flufflaag (S1) en bodem (S2).

Materiaal kan resuspenderen vanuit de flufflaag en de bodemlaag. De resuspensie flux E_1 [g/m²/d] vanaf flufflaag S1 wordt berekend met

$$E_1 = \min(M_0, M_1 \times m) \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr,S1}} - 1 \right)$$

M_0 en M_1 zijn nulde en eerste orde resuspensieconstanten en m is de hoeveelheid slib in de flufflaag [g/m²]. τ_b is de optredende bodemschuifspanning [N/m²] en $\tau_{cr,S1}$ [N/m²] is de kritische bodemschuifspanning voor erosie van flufflaag S1. De optredende bodemschuifspanning wordt berekend in het Delft3D Flow model en wordt rechtstreeks gebruikt in het DelWAQ model. Als de flufflaag dun is, wordt de erosieflux beperkt door de beschikbare hoeveelheid slib. Als de flufflaag dik is, is de erosieflux hiervan onafhankelijk.

De resuspensie flux E_2 [g/m²/d] vanuit de bodemlaag S2 wordt berekend volgens:

$$E_2 = p_2 F_{pick-up} \rho_s \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g D_{50} \right)^{0.5} D_*^{0.3} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr,S2}} - 1 \right)^{1.5}$$

$F_{pick-up}$ [-] is een kalibratie factor. ρ_s en ρ_w zijn de dichtheid van sediment (2600 [kg/m³]) en water (1000 [kg/m³]), respectievelijk. D_{50} is de korrelgrootte [m] en D^* de gereduceerde korrelgrootte [-] volgens van Rijn et al. (1993), p_2 is het percentage slib in de bodem en $\tau_{cr,S2}$ de kritische schuifspanning voor erosie van laag S2. De kritische schuifspanning voor erosie en de kalibratie factoren zijn per laag gedefinieerd in Tabel 3-2 en Tabel 3-3. De waarden zijn gebaseerd op de waarden zoals gebruikt in het gekalibreerde Markermeer model 2016.

Vanuit de flufflaag S1 wordt materiaal getransporteerd naar de bodemlaag S2 d.m.v. de "burial flux" B_1 . De snelheid waarmee dit gebeurt bepaalt hoe snel slib na depositie weerstand tegen erosie opbouwt. Dit wordt ingesteld via parameter VBurS1 (Tabel 3-2) volgens de uitdrukking:

$$B_1 = VBurS1 \times m.$$

De bodemlaag kan in het model verzadigd raken, bijvoorbeeld door continue sedimentatie in geulen en putten. 'Overtollig' sediment wordt dan naar beneden weggedrukt naar een virtuele derde bodemlaag via het proces 'deep burial'. Hiernaast is ook een constante en uniform 'digging' term aan het model toegevoegd als slibbron veroorzaakt door de zeer langzaam voortschrijdende erosie van de kleibodem in gebieden waarin deze aan de oppervlakte komt (Tabel 3-3). De fluxen van en naar de virtuele bodem worden opgenomen in de berekening van erosie en depositie voor een sluitende massa balans. In dit rapport wordt naar "vaste bodemlaag" gerefereerd voor de massa/m² in de bodemlaag S2 + de virtuele laag.

Tabel 3-1 Eigenschappen van het sediment (IM1 en IM2) in de waterkolom

Waterkolom	IM 1	IM 2
Valsnelheid sediment [m/d]	2.0	0.4

Tabel 3-2 Eigenschappen van het sediment (IM1 en IM2) in de flufflaag S1

Flufflaag		
Berekening bodemschuifspanning, Chezy	Manning formula	Manning formula
$\tau_{cr,S1}$ Re-suspensie [N/m ²]	0.07	0.07
M0 [g/m ² /d]	86.4	86.4
M1[m/d]	0.4	0.4
VBurS1 [1/d]	0.04	0.04

Tabel 3-3 Eigenschappen van het sediment (IM1 en IM2) in de bodemlaag S2

Bodemlaag		
$\tau_{cr,S2}$ Re-suspensie [N/m ²]	0.14	0.14
$F_{pick-up}$ [g/m ² /d]	1E-9	1E-9
ZDigS2 [g/m ² /d]	2.74	2.74

3.5 Modelscenario's

Om de invloed van de Marker Wadden te kwantificeren zijn verschillende scenario's gemodelleerd met en zonder de Marker Wadden. Op basis van de resultaten wordt per scenario een vergelijking gemaakt. De scenario's betreffen een jaargemiddelde, een stormconditie en een windluwere conditie.

4 Modelverificatie

De model instellingen in het Marker Wadden model 2020 zijn gebaseerd op eerder gekalibreerde en gevalideerde modellen (REF). Vervolgens is het model geverifieerd voor het jaar 2020. De modelresultaten zijn vergeleken met metingen van de verschillende meetlocaties in het Markermeer (tijdreeks) en Remote Sensing data (RS-data) op specifieke tijdstippen (gehele Markermeer).

4.1 Model en veldmetingen

4.1.1 Kalibratie van de metingen

Bij twee meetstations is de turbiditeit gemeten in Nephelometric Turbidity Unit (NTU). Op het meetframe was een multiparameterprobe (MPP) gemonteerd. Dit is een optisch instrument dat ook de turbiditeit meet in NTU. Een hoge waarde betekent een hoge sedimentconcentratie. Deze gemeten NTU waarden zijn op basis van watermonsters vertaald naar sediment concentraties in mg/l. Op 2 juni 2020 zijn watermonsters genomen nabij het meetframe. De concentratie (een gemiddelde op basis van 3 monsters) was 9.01 mg/l. en tijdens de monsternamen werd 11.7 NTU gemeten. Deze waarden werden gebruikt als kalibratie voor het meetframe. Ook voor de meetpaal is een vergelijkbare kalibratie uitgevoerd. Voor de metingen met het meetframe en de meetpalen verschilt de kalibratie curve, zie Tabel 4-1.

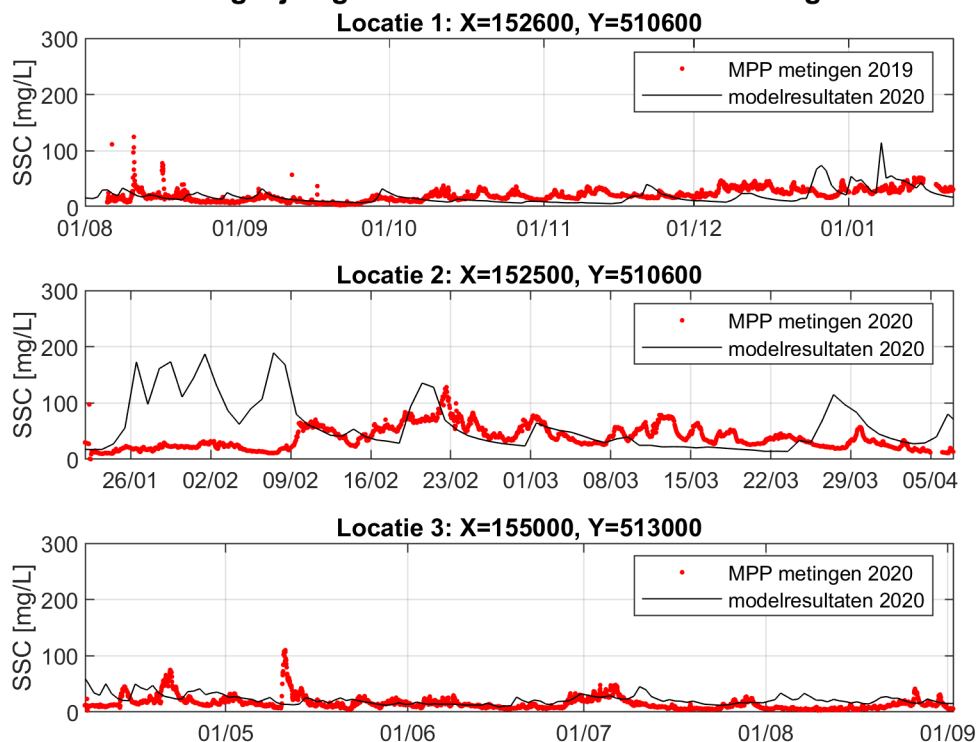
Tabel 4-1 Kalibratieparameter van het meetframe op basis van monsternamen in het Markermeer en de meetpaal op basis van historische data.

Instrument	Kalibratie
Meetframe	1 mg/l = 1.3 NTU
Meetpaal	1 mg/l = 0.2 NTU

4.1.2 Meetframe

Figuur 4-1 toont de gemeten sediment concentraties in de water kolom in rood gedurende de drie periodes dat het meetframe in de geul stond (Locatie 1), aan de rand van de geul stond (Locatie 2) en achter de Marker Wadden stond (Locatie 3). Gedurende deze periodes is de concentratie gemeten op 30 – 70 cm van de bodem. De zwarte lijn zijn de modelresultaten voor de sediment concentratie bij de bodem.

Vergelijking modelresultaten met MPP-metingen



Figuur 4-1 Gemeten concentraties door het meetmeetframe (rode punten) en concentratie op basis van modelresultaten (zwarte lijn) tijdens drie periodes op drie locaties. In de geul, op de rand van de geul en in de luwte ten noorden van de Marker Wadden.

In de periode september 2019 tot en met eind januari 2020 stond het meetframe op Locatie 1 (in de slibgeul). De model simulatie is gemaakt voor 2020. Voor deze eerste locatie worden daarom alleen ter indicatie de modelresultaten van 2020 getoond t.o.v. metingen uitgevoerd in 2019. De orde grootte van de slibconcentratie (variatie in y-richting) blijkt hieruit te voldoen, zonder dat de tijdsafhankelijkheid (variatie in x-richting) overeenkomt, want de weersomstandigheden waren in verschillende jaren natuurlijk niet identiek. Desalniettemin corresponderen model en gemeten data naar behoren. Alleen de piek begin januari komt dus bijgelijkerwijs niet overeen met de metingen.

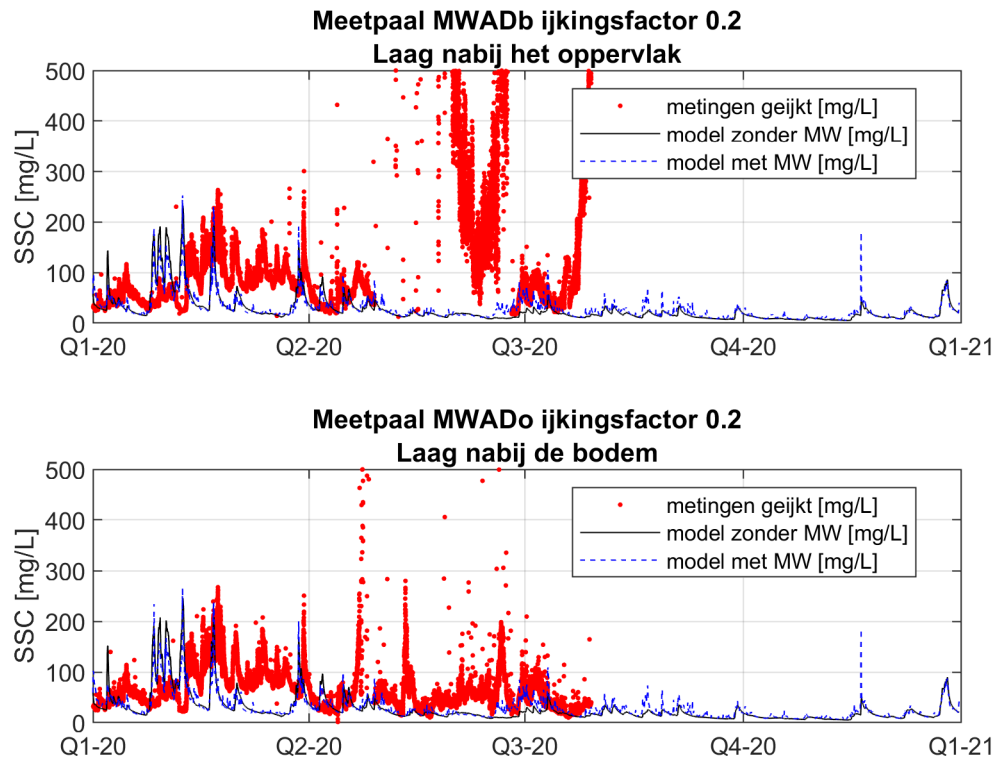
Voor Locatie 2 (rand van de slibgeul), waar wel metingen voor 2020 aanwezig zijn, zijn de modelresultaten in de eerste twee weken (26 jan – 9 feb) een factor 10 hoger dan de gemeten waarden. De daarop volgende periode komen de metingen en modelresultaten nagenoeg overeen. Ook de piek in sedimentconcentraties rond 20 februari is terug te zien in het model.

De rand van de geul is een dynamisch gebied door het grote verschil in bodemhoogte. Het rekenrooster in dit model ligt niet exact in lijn met de locatie van de geul. Daarnaast is de roostergrootte ook grover dan slechts de rand van de geul. Deze factoren hebben invloed op de berekende sedimentconcentraties.

Tijdens de derde meetperiode (Locatie 3, luwte) komen de gemeten concentraties van Locatie 3 en de modelresultaten nagenoeg overeen. De piek gemeten halverwege mei is niet gesimuleerd door het model. Omdat deze piek niet samenvalt met een piek in de windsnelheid, heeft deze piek in troebelheid een andere oorzaak die niet in het model is opgenomen, zoals baggerwerkzaamheden of spui van troebeler water uit de compartimenten.

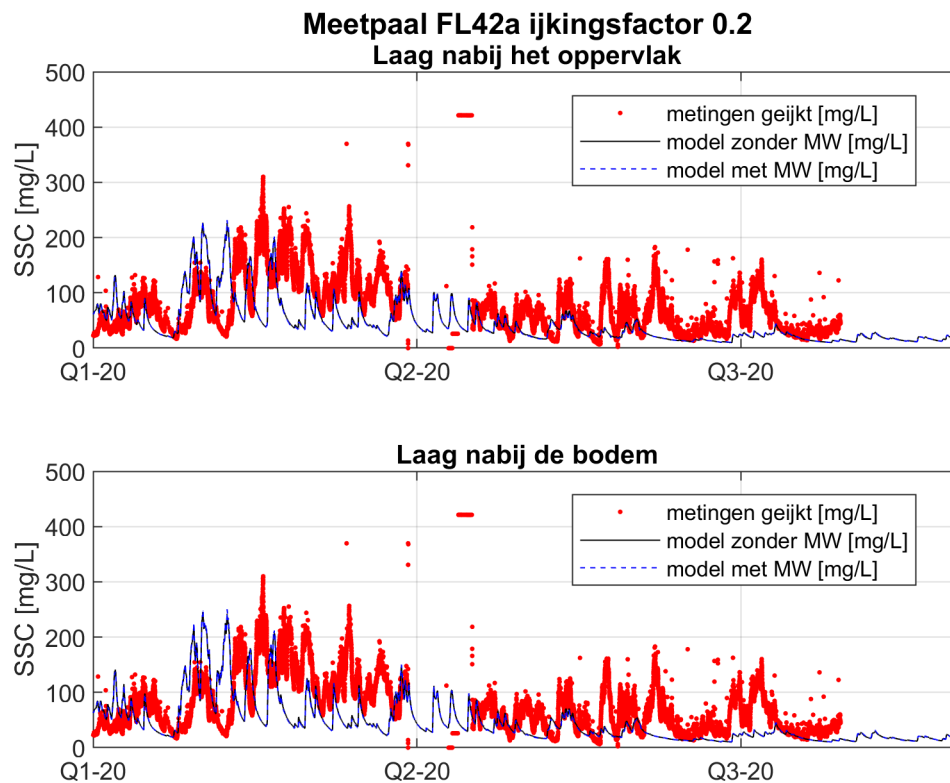
4.1.3 Meetpalen

Voor de locatie ten oosten van de Marker Wadden verschillen de gemeten concentraties bij de bodem en bij het oppervlak (Figuur 4-2). In de eerste helft van kwartaal 1 (Q1) overlappen de modelresultaten en de metingen. In de tweede helft zijn de gemeten waarden bij het oppervlak en de bodem twee keer hoger dan de modelresultaten. Halverwege kwartaal 2 (Q2) zijn er vrijwel geen meetdata. In het tweede en begin van het derde kwartaal overlappen de modelresultaten en de metingen bij de bodem. Bij het oppervlak komen de metingen niet overeen. Door de grote verschillen in de metingen bij het oppervlak en bij de bodem en de uitschieters in concentratie bij het oppervlak, zijn de metingen bij het oppervlak hoogstwaarschijnlijk incorrect. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door aangroei op de sensoren.



Figuur 4-2 Gemeten concentraties door de meetpaal ten oosten van de Marker Wadden (rode punten) en concentratie op basis van modelresultaten exclusief de Marker Wadden (zwarte lijn) en inclusief de Marker Wadden (blauwe lijn).

Voor de meetpaal in het midden van het Markermeer zijn de verschillen tussen de modelresultaten en de gemeten concentraties aan het oppervlak als bij de bodem ook klein. De modelresultaten volgen hetzelfde patroon als de gemeten concentraties zowel. Aan het eind van kwartaal 1 (Q1) zijn de modelresultaten lager dan de gemeten concentraties.



Figuur 4-3 Gemeten concentraties door de meetpaal in het midden van het Markermeer (rode punten) en concentratie op basis van modelresultaten exclusief de Marker Wadden (zwarte lijn) en inclusief de Marker Wadden (blauwe lijn).

4.2 Vergelijking met remote sensing beelden

Beschikbare satellietbeelden (Sentinel 2) van de Marker Wadden, in 2020, zijn vergeleken met de modelresultaten. De zwevende stof in het oppervlakte water is te zien in de satellietbeelden (RS data) door het filteren van specifieke golflengtes van licht (Villars et al., 2019). Het resultaat van de filterprocedure is te zien in Figuur 4-4 en Figuur 4-6 voor 15 april en 19 september 2020, respectievelijk.

De sediment patronen die volgen uit de RS data zijn vergeleken met de modelresultaten van 15 april en 9 september 2020 (zie Figuur 4-5 en Figuur 4-7). Voor beide dagen is een vergelijking gemaakt voor 1) het Marker meer en voor 2) het gebied rond de Marker Wadden.

De modelresultaten tonen een zelfde patroon als de RS data op de schaal van het Markermeer voor beide data. De uitzondering is de pluim rond de Marker Wadden. De concentraties zijn wel lager dan de concentraties die volgen uit de RS data.

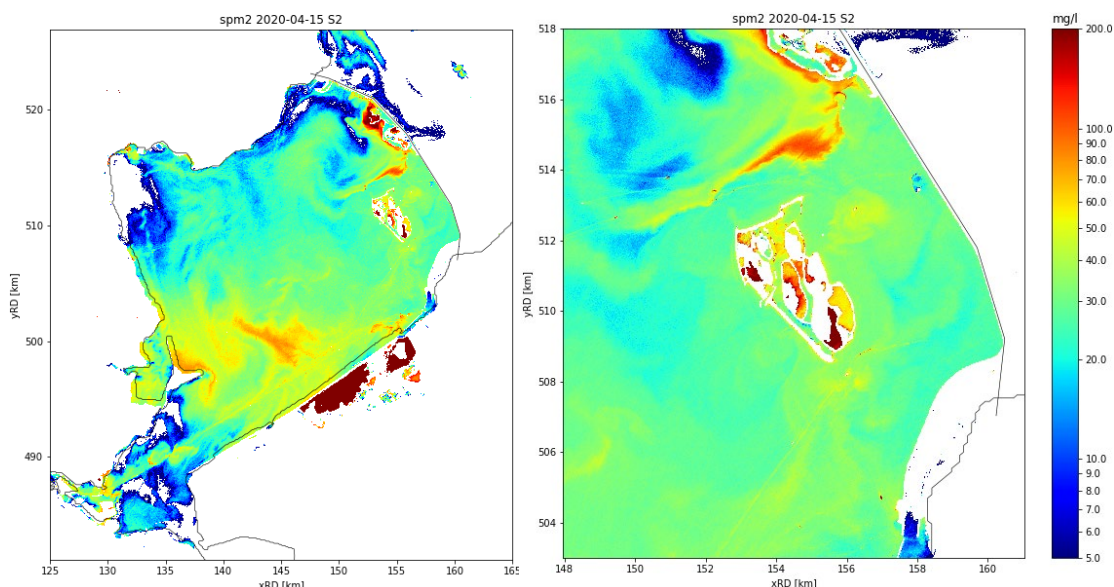
15 april 2020

De RS data tonen hoge sediment concentraties, groter dan 60 mg/l, rond Trintelzand (noorden Markermeer) en in het midden van het Markermeer. Rond de Marker Wadden worden maximale concentraties van 50 mg/l geobserveerd. Het model toont ook hogere concentraties, 25 – 30 mg/l, in het midden van het Markermeer. De krul in het noorden van het Markermeer is zichtbaar op de RS beelden en in het model. Aan de noordzijde van de Marker Wadden zijn de concentraties volgens het model lager +/- 20 mg/l lager.

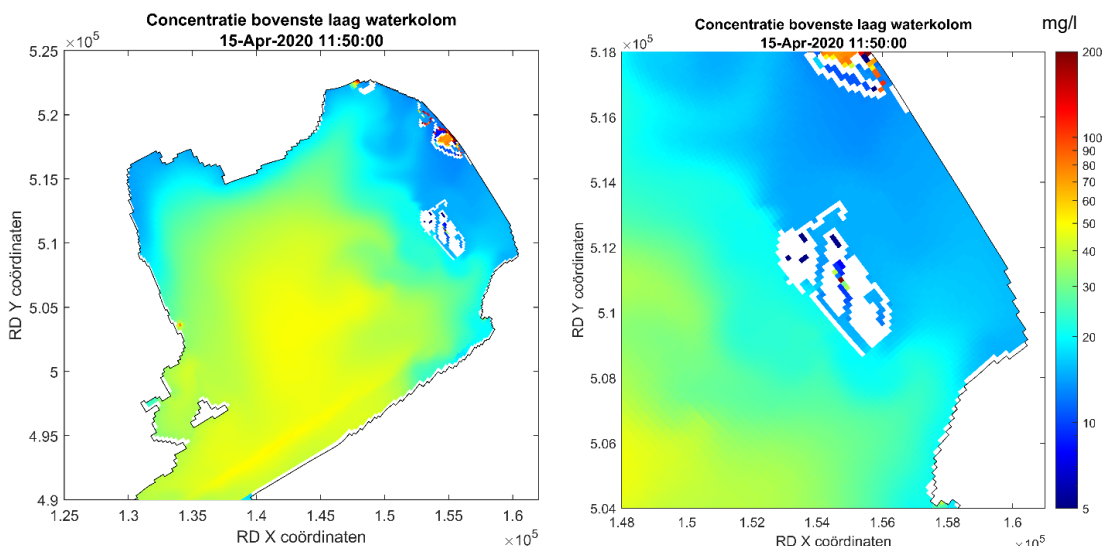
19 september 2020

De RS data laten hoge concentraties (tot 100 mg/l) zien in het zuidwestelijk deel van het Markermeer. Ook ten noorden van de Marker Wadden is er een strook van concentraties tot 50 mg/l. In het model zien we ook de hogere concentraties in het zuidwestelijk deel (40 – 50 mg/l).

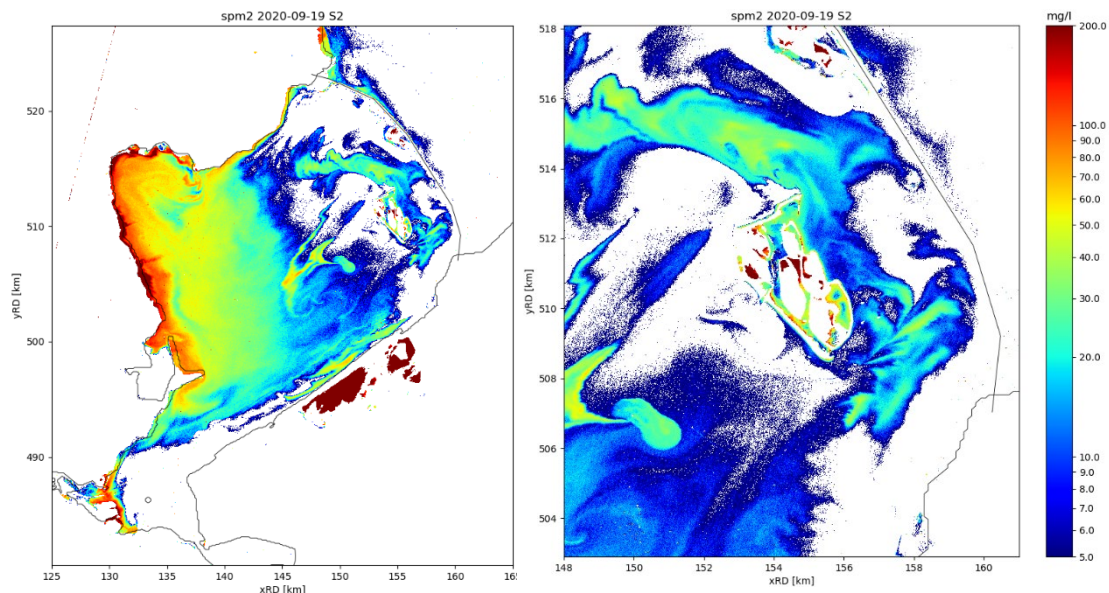
De concentratie verschillen rond de Marker Wadden kunnen het gevolg zijn van baggerwerkzaamheden die in september zijn uitgevoerd. Deze effecten zijn wel te zien op de RS beelden maar baggerwerkzaamheden zijn niet opgenomen in het model. Hoge concentraties als gevolg van baggeren zijn daardoor niet zichtbaar in de modelresultaten. Daarnaast is mogelijk is ook de roosterresolutie rond de Marker Wadden te beperkt om op detail niveau de concentraties rond de Marker Wadden te analyseren.



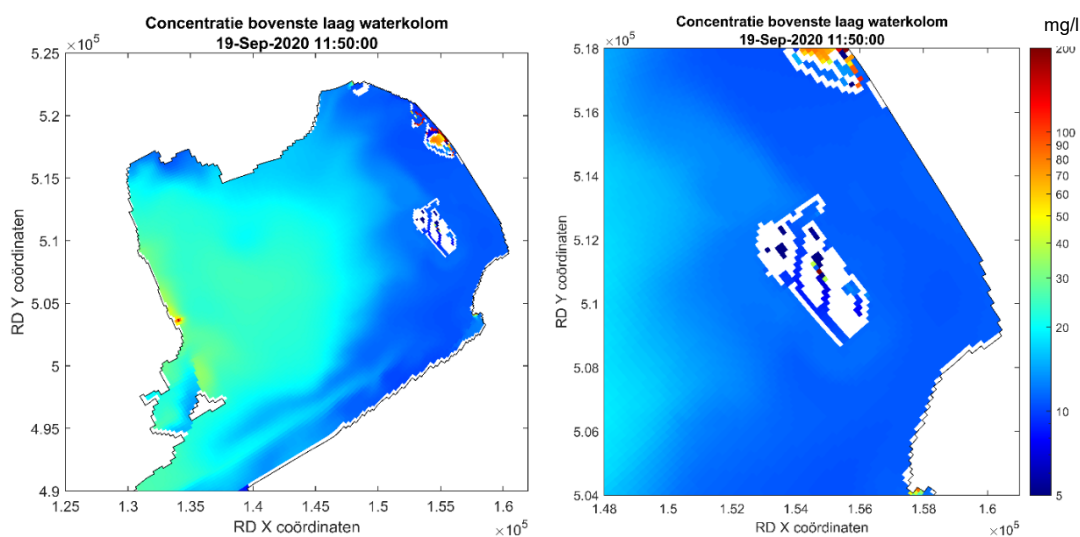
Figuur 4-4 Sediment concentratie in oppervlakte water op basis van na bewerkte Remote Sensing beelden 15 april 2020. Links: Markermeer. Rechts: detail Marker Wadden



Figuur 4-5 Sediment concentratie in oppervlakte water (bovenste rekenlaag) op basis van model 15 april 2020. Links: Markermeer. Rechts: detail Marker Wadden



Figuur 4-6 Sediment concentratie in oppervlakte water op basis van na bewerkte Remote Sensing beelden 19 september 2020. Links: Markermeer. Rechts: detail Marker Wadden.



Figuur 4-7 Sediment concentratie in oppervlakte water (bovenste rekenlaag) op basis van model 19 september 2020. Links: Markermeer. Rechts: detail Marker Wadden.

5 Scenario's met en zonder Marker Wadden

Het effect van de Marker Wadden op de slibconcentraties (mg/l) en massa (kg/m²) in het Markermeer zijn beoordeeld op basis van de metingen en de modelsimulaties. De metingen in Hoofdstuk 4 geven informatie over de lokale veranderingen en variaties in de slibconcentraties maar geven niet voldoende informatie voor het gehele Markermeer. Met de modelstudie worden de ruimtelijke effecten van de Marker Wadden onderzocht. De invloed van de Marker Wadden op de sediment concentraties is gekwantificeerd per scenario (jaarlijksgemiddelde, storm conditie en windluwere conditie). Aanvullend is de slibvang in de luwte zone, slibgeul en zandwinputten berekend.

5.1 Invloed Marker Wadden na aanleg

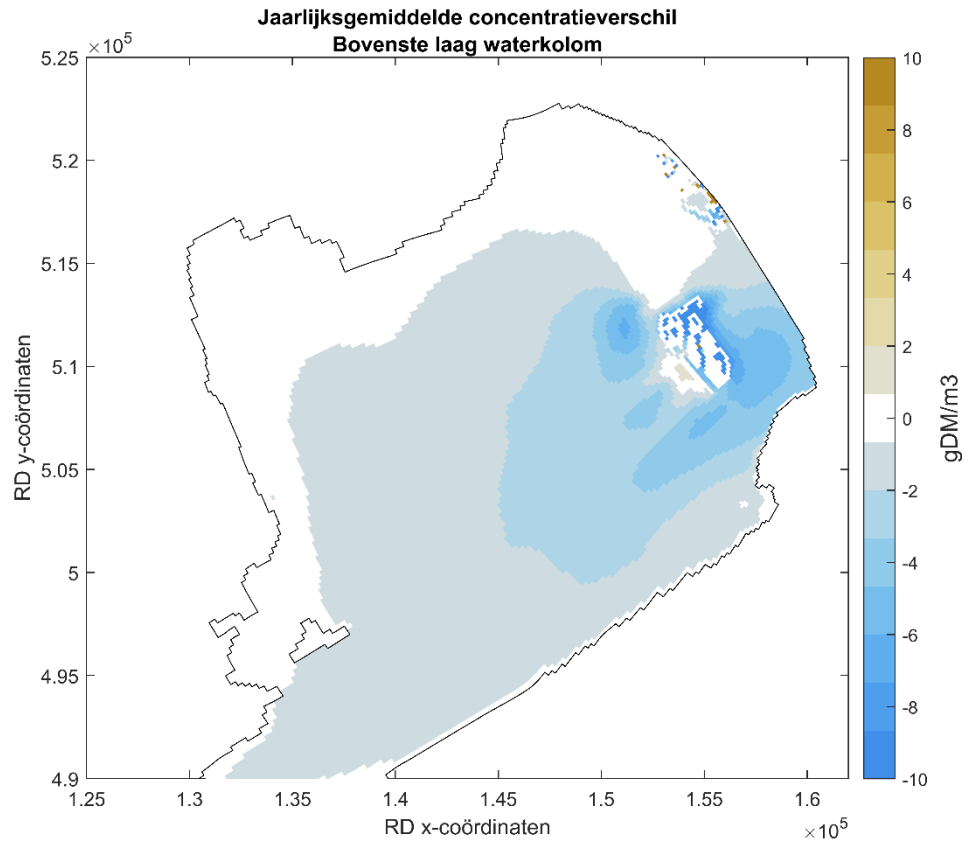
Voor ieder scenario is de situatie met en zonder de Marker Wadden gemodelleerd voor het jaar 2020. In de volgende paragrafen worden per scenario het verschil tussen de simulatie met en zonder Marker Wadden getoond voor 1) de concentratie in de water kolom, 2) de massa in flufflaag (S1) en 3) de vast bodemlaag (Laag S2 + Virtuele laag).

5.1.1 Jaargemiddelde

Voor de situatie met Marker Wadden en zonder Marker Wadden is het jaar 2020 gesimuleerd. Op basis van de resultaten zijn de jaargemiddelde slib concentraties (van beide fracties) in de waterkolom en de massa/m² slib in de flufflaag en in de vaste bodemlaag berekend. Het concentratie/ massa verschil tussen beide situaties is gepresenteerd in Figuur 5-1 – Figuur 5-11.

Voor de waterkolom worden alleen de resultaten van de bovenste laag van de waterkolom gepresenteerd. In dit onderzoek bleek dat de resultaten in de bovenste en onderste laag van de waterkolom vrijwel identiek zijn voor de jaargemiddelde en maandgemiddelde resultaten. We beschouwen de verschillen in concentratie in de waterkolom uniform over de verticaal, voor deze gemodelleerde ruimte- en tijdschalen.

Ten noorden van de Marker Wadden is een luwte gebied ontstaan. Daarnaast zijn de slibgeul en zandwinputten lokale luwte zones. In deze gebieden neemt sedimentatie toe en erosie af door een afname van de hydrodynamische forcering. Door hogere depositie en lagere erosie fluxen neemt de concentratie in de waterkolom af. Dit volgt ook uit de resultaten van Figuur 5-1. De afname is het grootst in een straal van 5 km rond de Marker Wadden (3 – 10 g/l). In de rest van het Markermeer nemen de concentraties 0 – 3 g/l af.



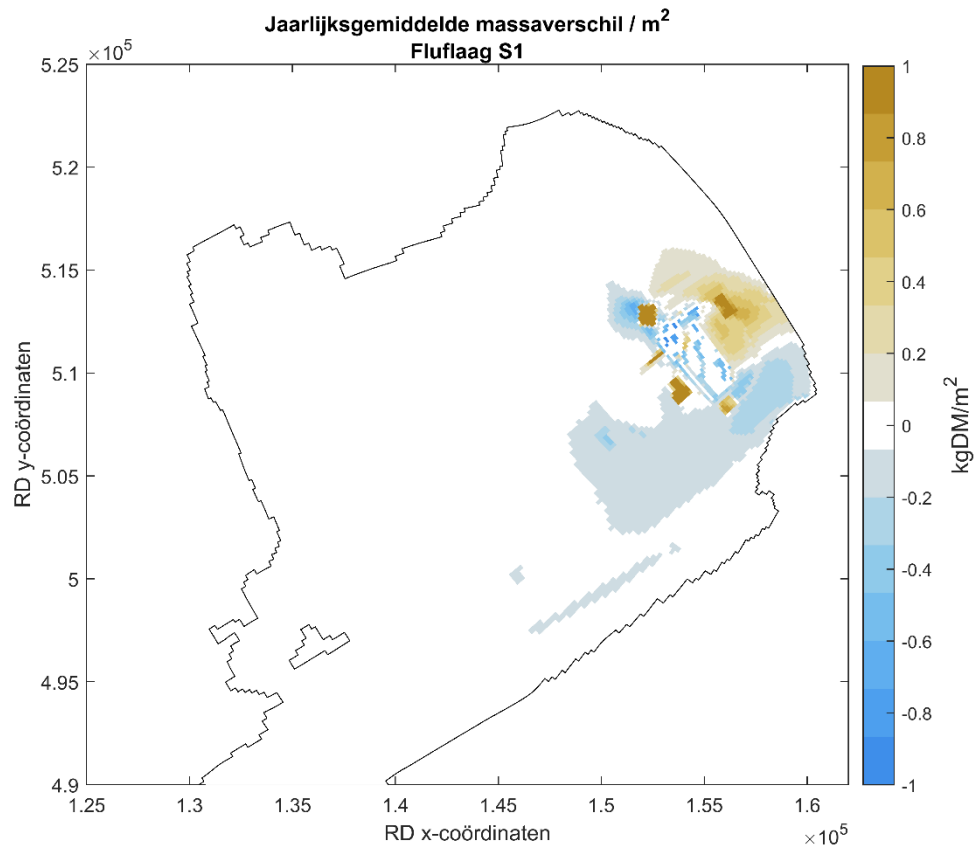
Figuur 5-1 Verschil in jaarlijksgemiddelde concentratie tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de bovenste laag van de waterkolom. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden.

Voor de flufflaag S1 is een toename van slib in de luwte van de Marker Wadden, de zandputten en in de slibgeul (Figuur 5-2). Aan de zuid- en oostzijde neemt de massa/m² af.

Ten noorden van de Marker Wadden in het luwte gebied leidt tot een toename van slib in de flufflaag die varieert tussen de 0.2 - 1 kg/m². De slibgeul en zandwinputten zijn zeer diepe delen (10 - 15 m dieper) waar de stroming nog nauwelijks invloed heeft op de bodem. Materiaal kan eenvoudig bezinken en wordt ook minder snel geërodeerd. Ook hier is een toename van de slibmassa in de bodem (meer dan 1 kg/m²).

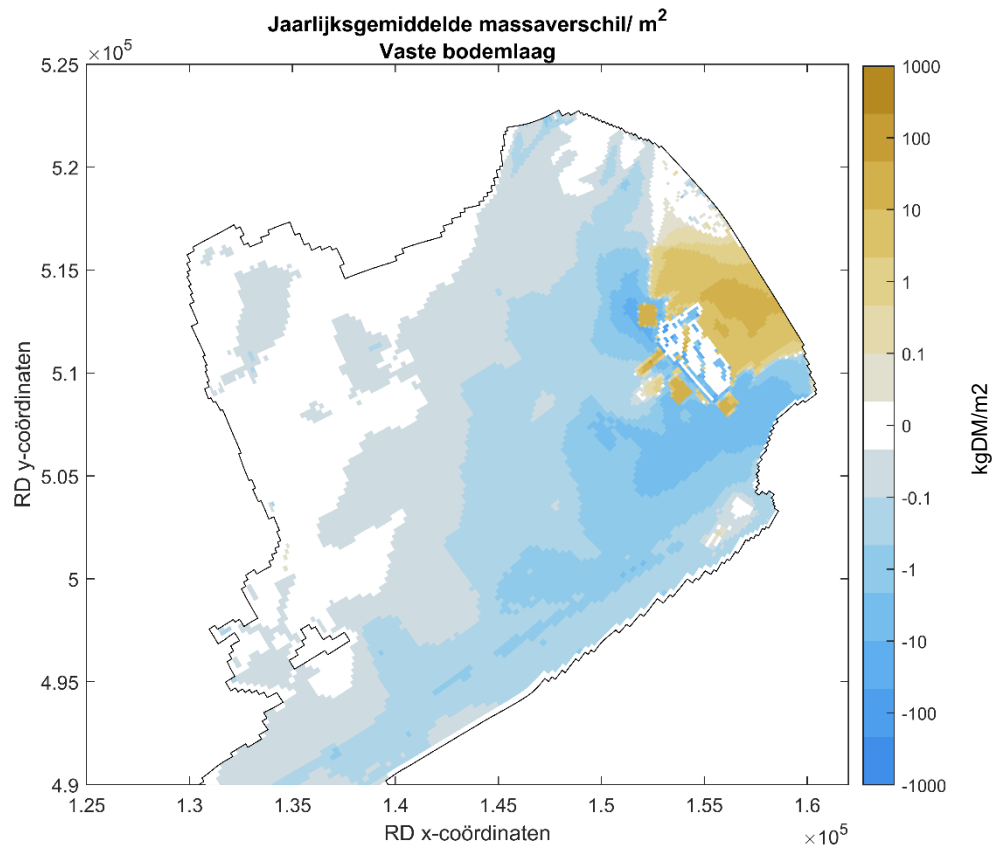
Door de aanleg van de Marker Wadden moet de stroming om de Marker Wadden heen. Oostelijk van de Marker Wadden is de doorstroom breedte versmald wat leidt tot hogere stroomsnelheden en meer erosie en neemt de massa in de flufflaag af (0 – 0.4 kg/m²).

Aan de zuidzijde van Marker Wadden tussen de slibgeul en de zandputten is er eveneens een afname van de massa in de flufflaag. Doordat meer materiaal sedimenteert in de zandwinputten is de concentratie in de waterkolom lager t.o.v. de situatie zonder de Marker Wadden. Hierdoor kan minder slib sedimenteren in deze gebieden en neemt de massa in de flufflaag af (0.5 kg/m²).



Figuur 5-2 Verschil in jaarlijksgemiddelde massa /m² tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de flufflaag S1. Oranje is een toename, blauw is een afname van de massa /m² als gevolg van de Marker Wadden.

Net zoals voor de flufflaag maar dan versterkt is te zien voor de vaste bodemlaag (S2 + Virtueel) de massa in de bodem toeneemt in de luwte van de Marker Wadden, de zandwinputten en in de slibgeul (meer dan 100 kg/m²) door een toename van sedimentatie en afname erosie door de Marker Wadden (Figuur 5-3). Aan oostzijde is er een afname van slib in de bodem 0.5 – 2 kg/m² door de hogere stroomsnelheden en aan de zuidzijde is er een afname van slib in de bodem omdat er minder materiaal in suspensie is. In midden van het Markermeer is er ook een afname te zien van de massa slib in de vaste bodem (tot 0.5 kg/m²). De patronen zijn gekoppeld aan de bodemruwheid van het Markermeer.

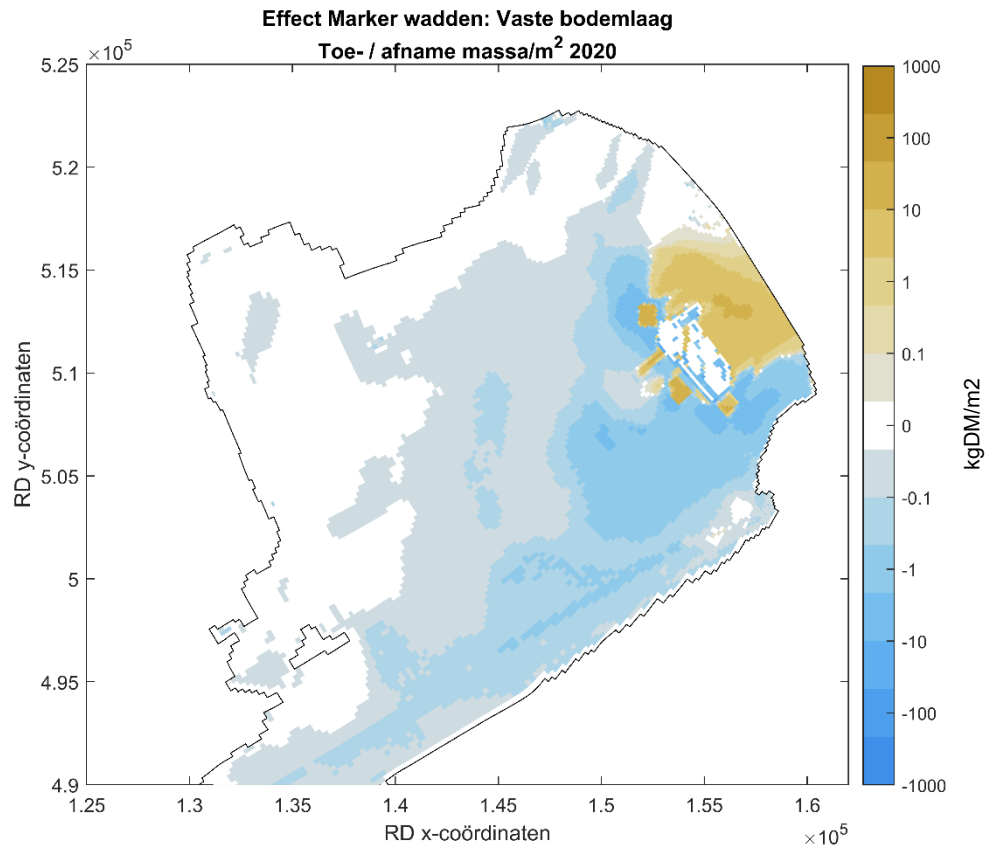


Figuur 5-3 Verschil in jaarlijksgemiddelde massa /m² tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de vaste bodemlaag. De schaalbalk is logaritmisch. Oranje is een toename, blauw is een afname van de massa /m² als gevolg van de Marker Wadden.

5.1.2 Jaarlijkse erosie en depositie

De erosie en depositie leidt tot een toe-/ afname van de totale massa/m² in de vaste bodemlaag. Door de Marker Wadden, slibgeul en zandwinputten zijn er verschillen in erosie en depositie patronen. Het verschil in toe-/ afname is berekend voor de situatie met en zonder de Marker Wadden in het jaar 2020 (Figuur 5-4).

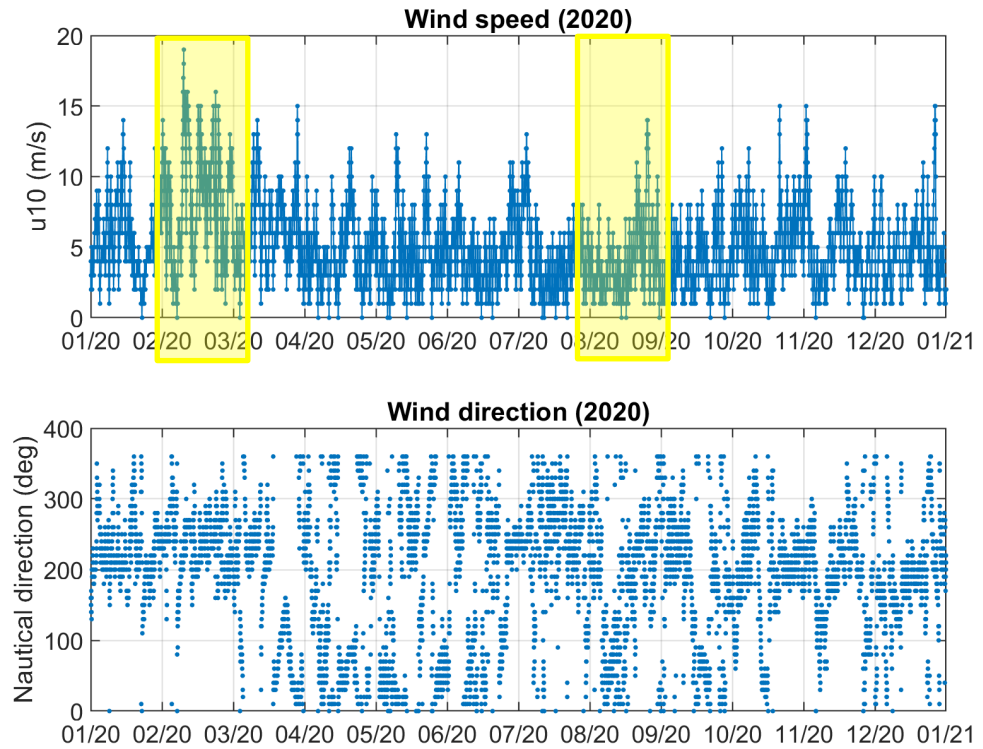
In het luwte gebied, zandwinputten en in de geul is er een toename tot 100 kg/m² slib. Er is een afname van slib in de vaste bodemlaag aan de oostzijde van de Marker Wadden (10 kg/m²) en in het zuidoosten van het Markermeer (0.1 - 10 kg/m²). Deze gebieden van toe/ -afname van de massa in de vaste bodem komen overeen met de jaarlijksgemiddelde resultaten zoals gepresenteerd in paragraaf 5.1.1.



Figuur 5-4 Vershil in de toe-/ afname van massa/m² in de vaste bodemlaag in 2020. De schaalbalk is logaritmisch. Oranje is een toename, blauw is een afname van de massa /m² als gevolg van de Marker Wadden.

5.1.3 Storm en luwe condities

Voor de seizoenseffecten van stormen en wind luwe periodes zijn twee maanden onderzocht; februari met hoge windsnelheden (Figuur 5-5, linker geel vlak) en augustus met relatief rustige weerscondities (Figuur 5-5, rechter geel vlak).

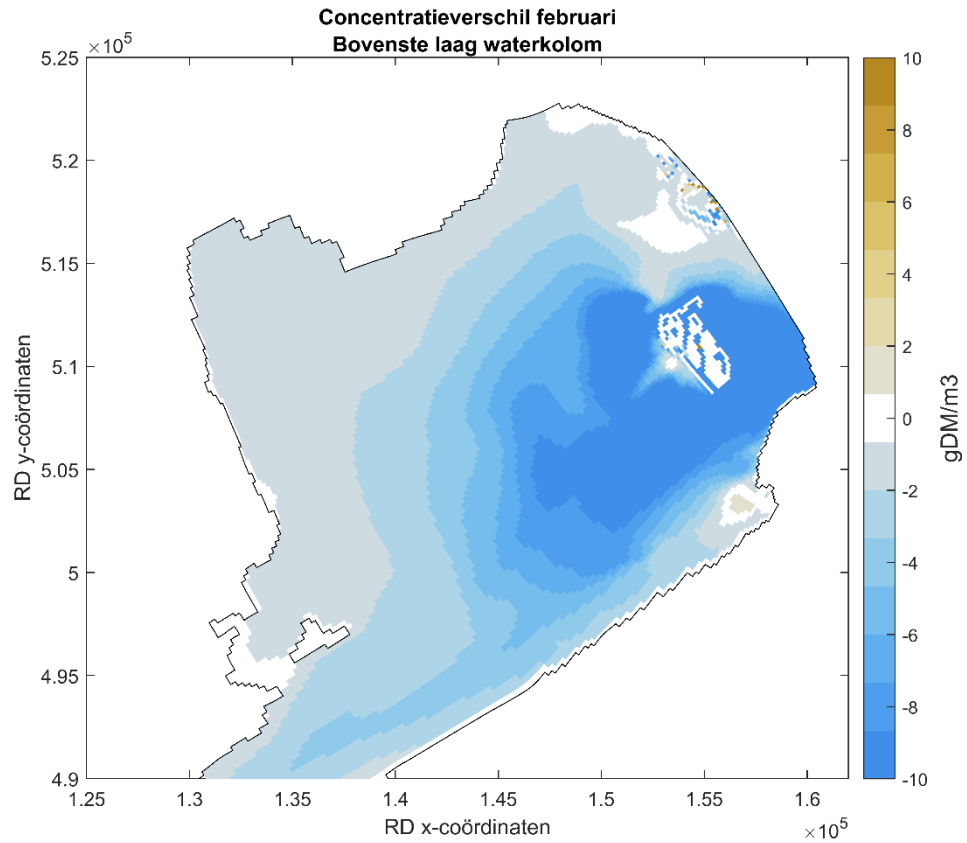


Figuur 5-5 Windsnelheid (bovenste paneel) en windrichting (onderste paneel) voor het jaar 2020. Gele vlakken duiden de maanden februari en augustus.

Voor de twee weercondities is de situatie met en zonder Marker Wadden vergeleken met betrekking tot sedimentconcentratie en massa/m². Hiervoor zijn de verschillen in sedimentconcentratie voor de waterkolom en verschil in massa/m² in de flufflaag S1 en vaste bodemlaag (bodemlaag S2+Virtueel) geplot in Figuur 5-6 – Figuur 5-10.

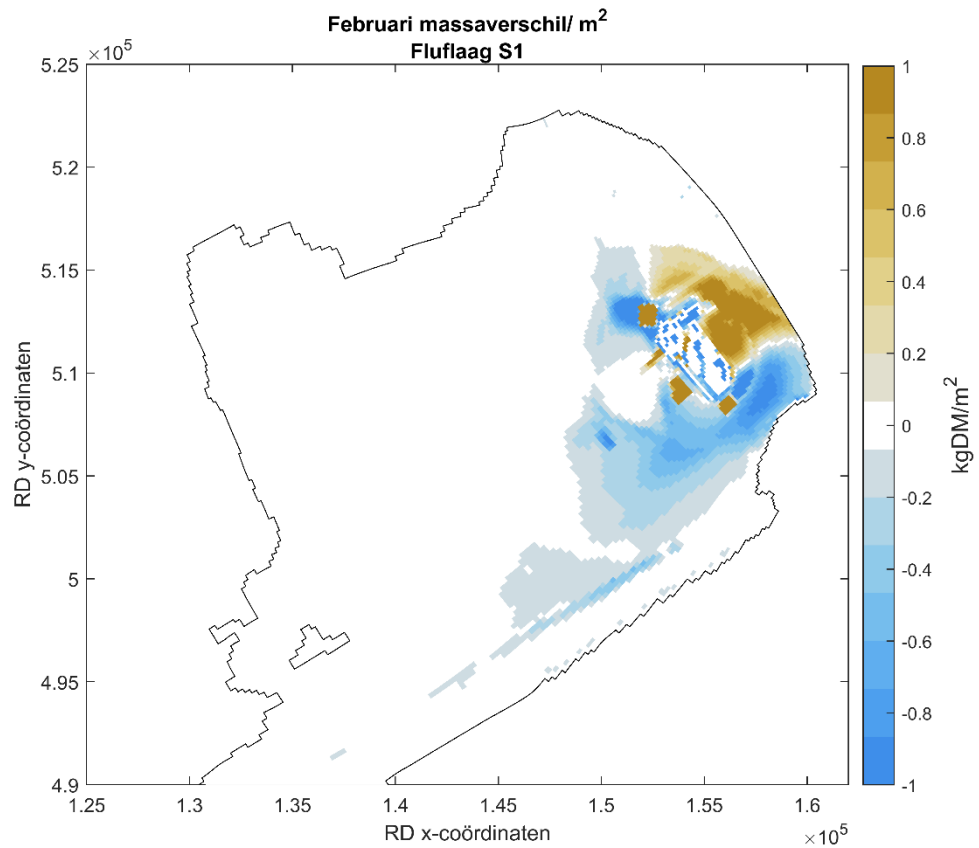
Februari: Stormcondities

Tijdens stormcondities worden de effecten van de Marker Wadden extra benadrukt. Stormcondities leiden tot hogere stroomsnelheden en bodemschuifspanningen waardoor slib sneller erodeert. Zonder de Marker Wadden zou meer materiaal eroderen in het luwte gebied rond de Marker Wadden en ter plaatse van de Marker Wadden. Tijdens de stormconditie is het invloedgebied en het concentratieverschil groter dan het jaarlijksgemiddelde verschil in sedimentconcentratie (vergelijking Figuur 5-1 en Figuur 5-6). In het gehele Markermeer nemen de concentraties in de waterkolom af. In straal van 30 km rond de Marker Wadden nemen de concentraties 4 – 10 g/l af (Figuur 5-6).



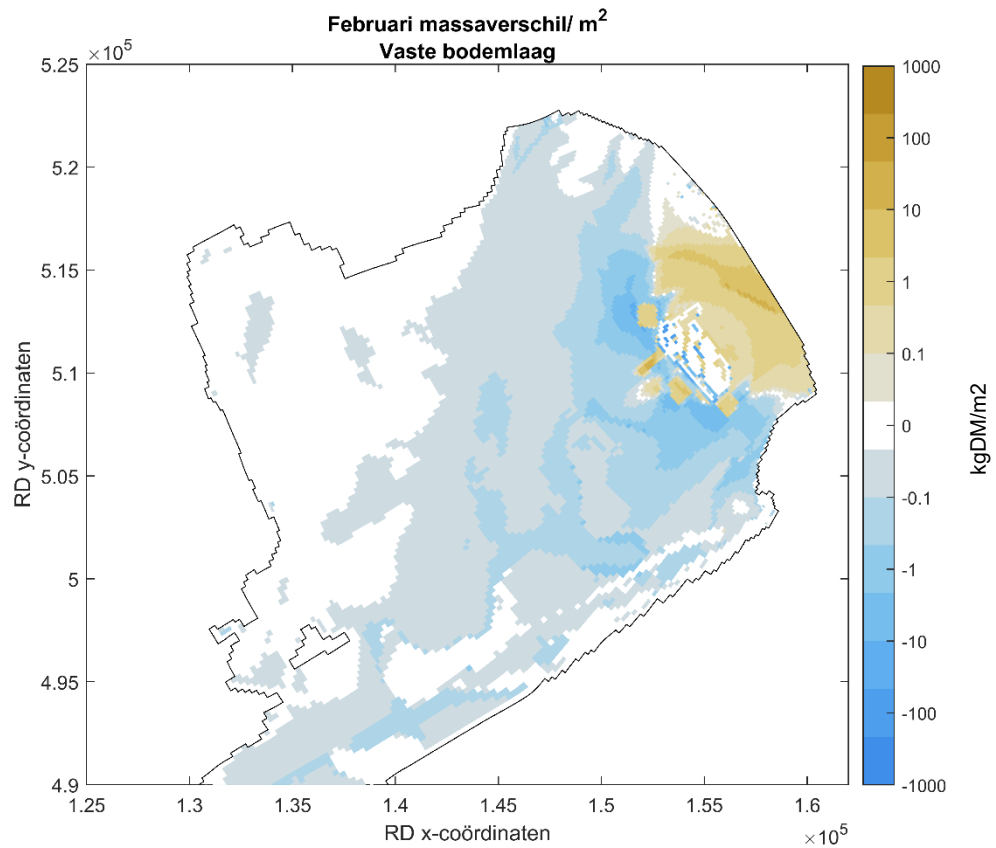
Figuur 5-6 Verskil in de gemiddelde concentratie van februari 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de bovenste laag van de waterkolom. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden.

De luwte aan de noordzijde van de Marker Wadden zorgt voor sedimentatie en erosie aan de zuidoostzijde van de Marker Wadden (zie ook de jaarlijksgemiddelde resultaten). Tijdens stormcondities wordt dit verschil in de flufflaag versterkt (Figuur 5-7). Er is een factor twee meer erosie aan de zuidoostzijde en sedimentatie aan de noordzijde.



Figuur 5-7 Verschil in de gemiddelde massa /m² van februari 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de flufflaag S1. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden.

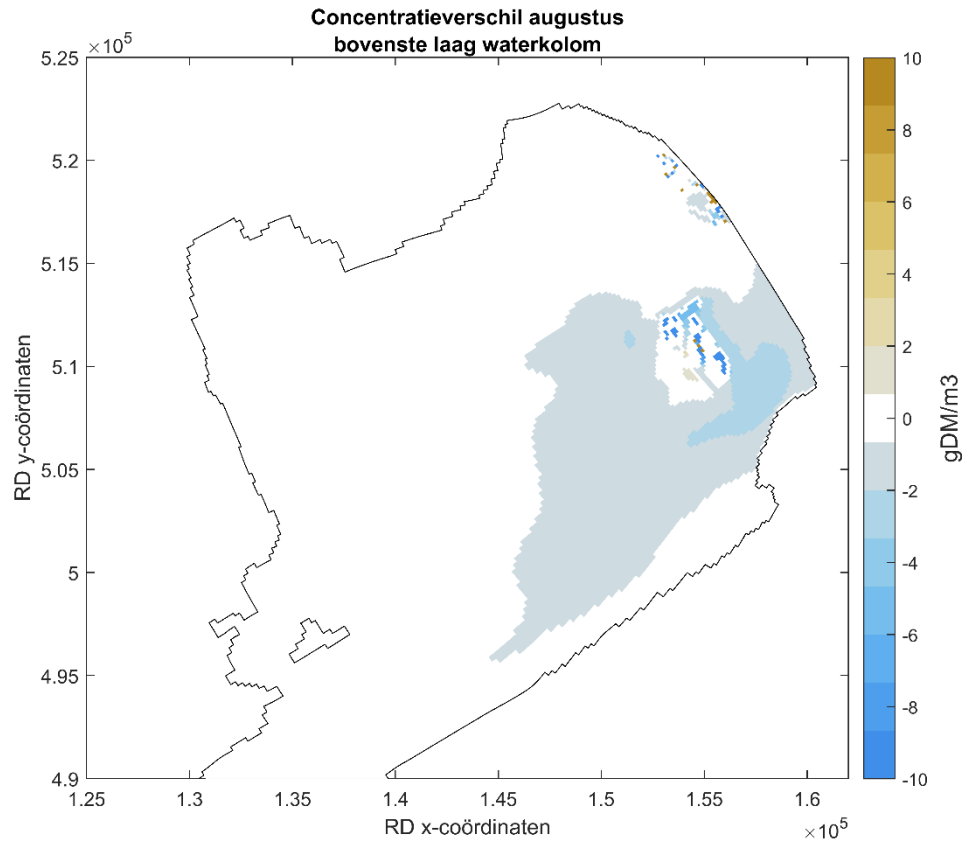
Voor de vaste bodemlaag zijn de verschillen door de Marker Wadden ook duidelijk zichtbaar (Figuur 5-8). In vergelijking met de jaargemiddelde verschillen (Figuur 5-3) is het sedimentatie gebied aan de noordzijde van de Marker Wadden groter. Zonder de Marker Wadden erodeert dit gebied veel sneller tijdens stormcondities in vergelijking met een luwe periode. De aanleg van de Marker Wadden voorkomt (deels) deze erosie waardoor het luwte effect sterker is tijdens storm condities.



Figuur 5-8 Verschil in de gemiddelde massa /m² van februari 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de vaste bodemlaag. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden

Augustus: windluwe condities

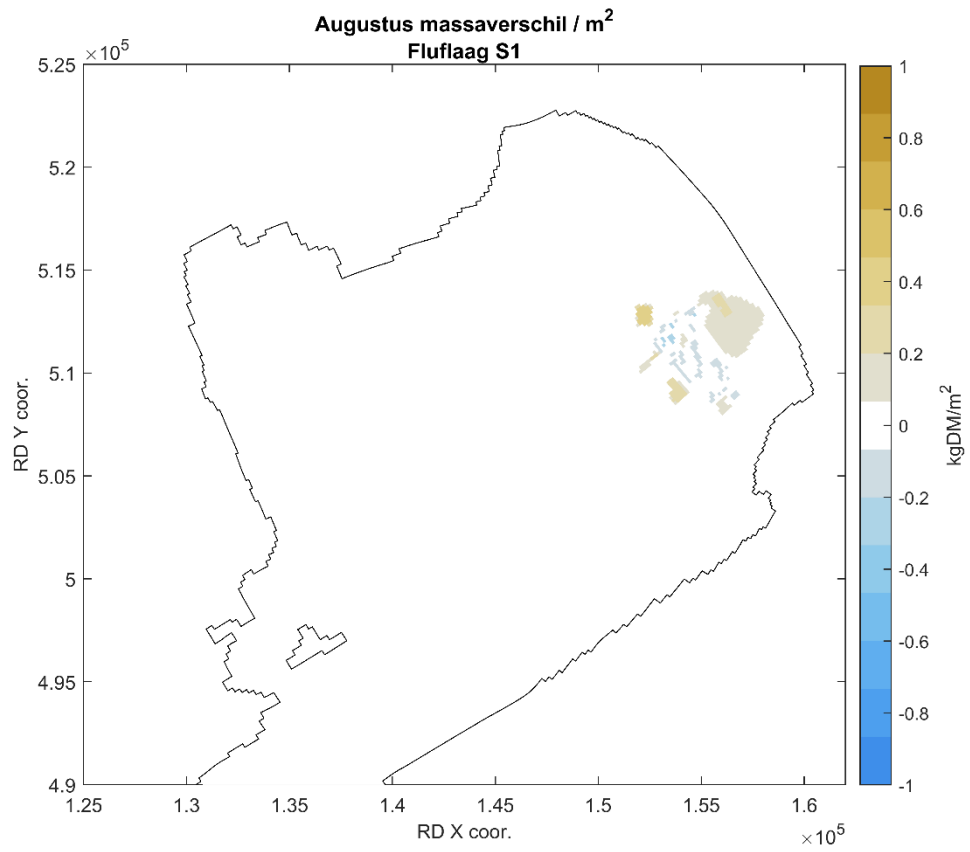
Voor windluwe condities is het concentratieverschil in de waterkolom klein tussen een situatie met en zonder de Marker Wadden (Figuur 5-9). Zonder wind is er minder erosie in het Markermeer en nemen concentraties in de waterkolom af doordat sedimentatie dominantier wordt. Het effect van de Marker Wadden wordt dan verkleind. Tijdens windluwe condities is ook het invloedsgebied van de Marker Wadden kleiner in vergelijking met de jaargemiddelde verschillen.



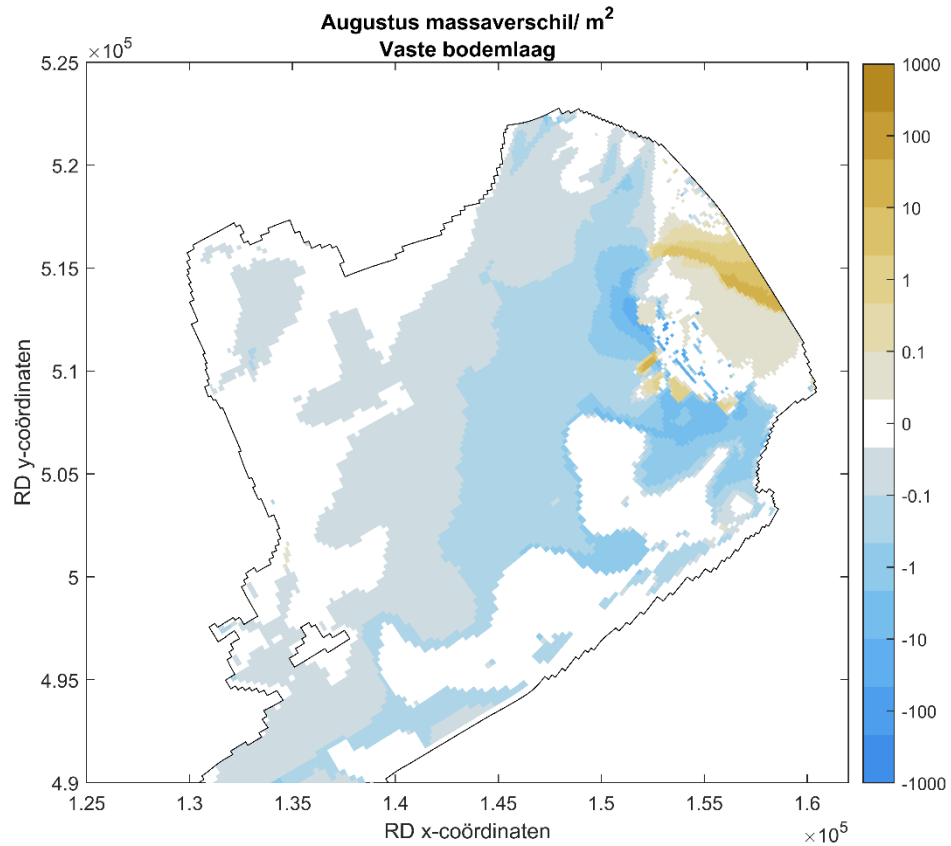
Figuur 5-9 Verschil in de gemiddelde concentratie van augustus 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de bovenste laag van de waterkolom. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden.

Hetzelfde geldt voor het verschil in slib in de flufflaag; het effect van de Marker Wadden is kleiner voor windluwe condities. Door de windluwe omstandigheden wordt in beide simulaties evenveel materiaal geërodeerd van/ gesedimenteerd op de bodem (Figuur 5-10). Wel is te zien dat door de aanleg van de Marker Wadden meer slib sedimenteert in de zandwinputten en de slibgeul rond de Marker Wadden (0.6 kg/m^2).

Het patroon van verschil in massa/m² in de vaste bodemlaag is tijdens windluwe periodes ongeveer gelijk aan het jaargemiddelde verschil. Alleen in het luwte gebied aan de noordzijde is er minder sedimentatie ten opzichte van het jaargemiddelde omdat het effect van de Marker Wadden tijdens luwe condities kleiner is.



Figuur 5-10 Verschil in de gemiddelde massa /m² van augustus 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de flufflaag S1. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden.

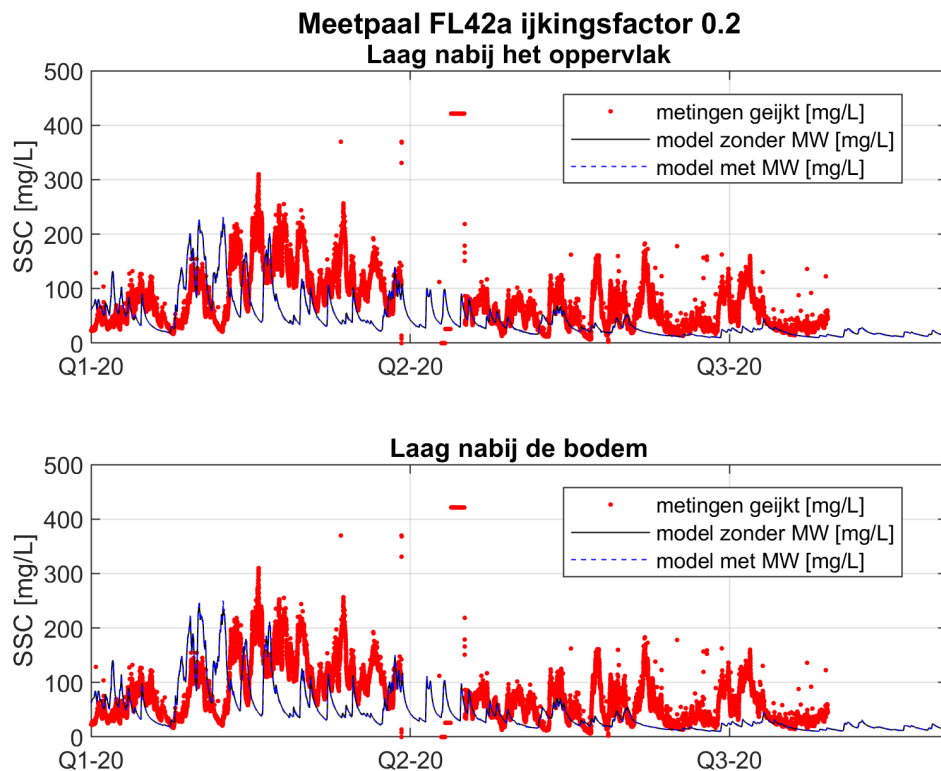


Figuur 5-11 Verschil in de gemiddelde massa /m² van augustus 2020 tussen de situatie met en zonder Marker Wadden in de vaste bodemlaag. Oranje is een toename, blauw is een afname van de concentratie als gevolg van de Marker Wadden

5.1.4 Temporele effecten

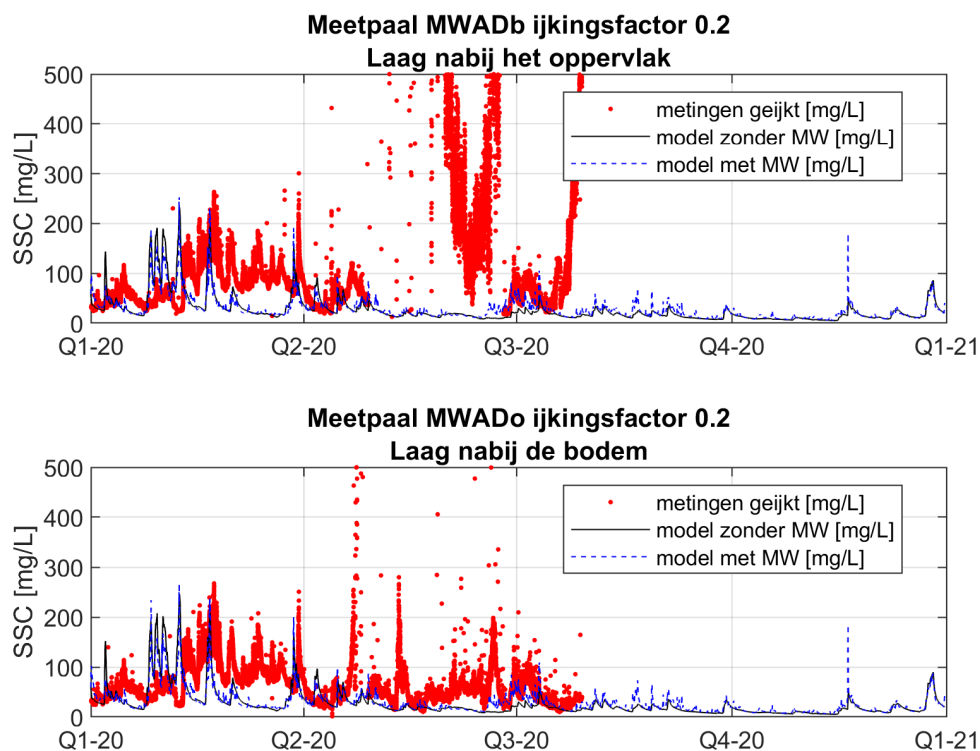
Behalve ruimtelijk kunnen de effecten van de aanleg van Marker Wadden ook op één punt als functie van de tijd worden beschouwd. In Figuur 5-12 en Figuur 5-13 tonen het op de vaste meetstations (resp. Markermeer midden en de meetpaal achter Marker Wadden) de gemeten slibconcentratie in aanwezigheid van Markerwadden (want jaar 2020) en de berekende slibconcentratie met en zonder Marker Wadden (want in het model kan Marker Wadden worden 'uitgezet').

Voor de meetpaal in het midden van het Markermeer zijn er slechts zeer kleine verschillen (meestal <1%) tussen de modellen met en zonder Marker Wadden (Figuur 4-3). Beide modelresultaten volgen het patroon van de gemeten resultaten. De sensor nabij het oppervlak werd in Q2 en Q3 verstoord door vermoedelijke aangroei, waardoor de metingen aan het einde van Q2 en in de loop van Q3 niet langer betrouwbaar lijken. Het is dus niet gezegd dat het model in deze periodes een onderschatting geeft. Op basis van de modelresultaten kan geconcludeerd worden dat de Marker Wadden een gering effect hebben op de concentratie zwevende stof in het midden van Markermeer.



Figuur 5-12 Gemeten concentraties door de meetpaal in het midden van het Markermeer (rode punten) en concentratie op basis van modelresultaten exclusief de Marker Wadden (zwarte lijn) en inclusief de Marker Wadden (blauwe lijn).

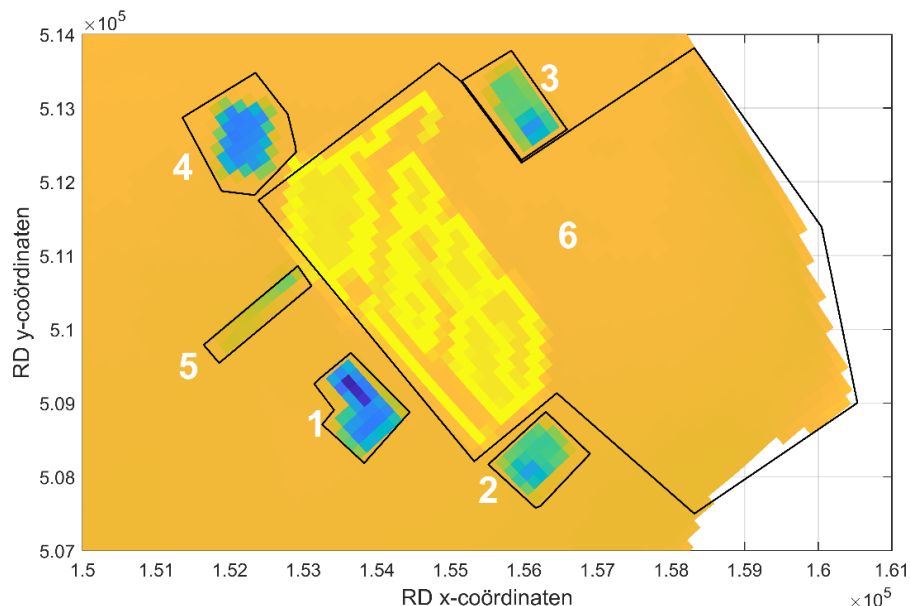
Voor de meetpaal ten oosten van de Marker Wadden volgen de modelresultaten met en zonder Marker Wadden hetzelfde patroon. Echter zijn in kwartaal 3 (Q3) is ook te zien dat de concentraties met Marker Wadden hoger zijn dan zonder. Dit effect is niet te zien Q1 en Q2 wanneer de gemiddelde concentratie in beide modellen hoger is door stormen. De Marker Wadden leiden wel tot meer erosie en hogere sediment concentraties ten oosten van de Marker Wadden maar dit is alleen zichtbaar wanneer er geen stormen optreden.



Figuur 5-13 Gemeten concentraties door de meetpaal ten oosten van de Marker Wadden (rode punten) en concentratie op basis van modelresultaten exclusief de Marker Wadden (zwarte lijn) en inclusief de Marker Wadden (blauwe lijn).

5.1.5 Sediment budgetten

Eén van de deelvragen van dit onderzoek is kwantificeren hoeveel slib wordt ingevangen in de luwte van het Markermeer, de slibgeul en zandputten (interesse gebieden). Voor ieder interesse gebied is een apart balansgebied (Figuur 5-14) gemaakt en zijn per interessegebied de verticale sedimentfluxen bepaald in de waterkolom de flufflaag en vaste bodemlaag voor de situatie met en zonder Marker Wadden. Tabel 5-1 en Tabel 5-2 toont de massa slib (in miljoen kilogram ofwel kton) die sedimenteert, erodeert en het resultaat per balansgebied voor het jaar 2020.



Figuur 5-14 Overzicht van de gebieden waarvoor de sediment concentraties in de water kolom en massa in de bodem zijn berekend met en zonder de Marker Wadden. 1 – 4 zijn de zandwinputten, 5 is de slibgeul en 6 is de luwte achter de Marker Wadden. De nummering is gerelateerd aan de nummering in de tabellen.

Tabel 5-1 Sedimentatie en erosie zonder de Marker Wadden in de gebieden waarin voor het scenario met Markerwadden de zandwinputten, de slibgeul en de luwtezone achter Marker Wadden liggen. In het scenario zonder Marker Wadden zijn deze nog niet aanwezig.

	Sedimentatie [kton]	Erosie [kton]	Netto [kton]
1) Put zuid	8.0	-6.2	1.8
2) Put oost	6.0	-4.0	2.0
3) Put noord	11.7	-7.4	4.3
4) Put west	17.3	-10.1	7.2
5) Geul	5.2	-6.9	-1.7
6) Luwte	276	-133	143

Tabel 5-2 Sedimentatie en erosie met de Marker Wadden in de zandwinputten, de slibgeul en in de luwte. De laatste kolom is de toename van slib t.o.v. de situatie zonder Marker Wadden.

	Sedimentatie [kton]	Erosie [kton]	Netto [kton]	Toename [kton]
1) Put zuid	25.2	-2.1	23.1	21.3
2) Put oost	9.2	-1.4	7.8	5.1
3) Put noord	26.9	-0.8	26.1	21.8
4) Put west	38.0	-5.0	33.0	25.8
5) Geul	8.6	-5.5	3.1	4.8
6) Luwte	223	-54.6	168	25

Zonder de aanleg van de Marker Wadden was er sedimentatie in ieder gebied behalve in de geul (Tabel 5-1). Met name in het noordoostelijk deel van de Marker Wadden (nu de luwte

achter de Marker Wadden) was de sedimentatie als 2 ordes groter dan in de andere gebieden.

Voor alle gebieden is er een toename van het slib (Tabel 5-2). De zandwinputten (1-4) hebben een diepte van meer dan 15 - 30 m. Op deze dieptes is de invloed van stroming en zeker golven sterk gereduceerd en kan slib eenvoudiger bezinken en nauwelijks meer eroderen.

De berekende aanslibbingssnelheid volgens Tabel 5-2 is voor de slibgeul en winputten ca. een factor 3 lager dan de waargenomen aanslibbingssnelheid (zie Tabel 2-2). Voor de luwtezone achter Marker Wadden geldt dit niet, hiervoor is de berekende aanslibbingssnelheid juist ca. een factor 3 hoger dan de waargenomen aanslibbingssnelheid.

De Marker Wadden zorgen voor een kleine afname van de bruto sedimentatie in het luwtegebied door de gemiddeld lagere concentraties. De erosie is een orde kleiner in het luwte gebied. Het resultaat is een toename van netto sedimentatie in het luwtegebied van ca. 25 kton/jaar.

6 Discussie en conclusie

In deze studie werd onderzoek gedaan naar de effecten van de Marker Wadden op de slibconcentraties in het Markermeer en de slibvang in de luwte zones. De metingen en modeldata vullen elkaar. Waar de metingen detail informatie geven over lokale effecten kan met het model de effecten van de Marker Wadden op het gehele Markermeer berekenen.

6.1 Model kalibratie en validatie

Het hydrodynamisch model is gekalibreerd op basis van vier debieten en het waterpeil van het Markermeer omdat ten tijde van de modelontwikkeling niet de actuele data van alle debieten in het Markermeer van 2020 beschikbaar was. Op basis van gedetailleerde data van debieten kan het hydrodynamisch model beter gekalibreerd worden.

Voor de slibgeul en de zandwinputten zijn er in het bestaande model (2016) verdiepingen aangebracht. Daarnaast zijn de Marker Wadden gemodelleerd als "droge roosterzellen". De modelresolutie is laag ($200 \times 200 \text{ m}^2$) ten opzichte van de grote van de zandwinputten, de slibgeul en de kanalen tussen de eilanden van de Marker Wadden.

Ondanks de lage resolutie is het model in staat om lokaal gemeten sediment concentraties te reproduceren (zie Figuur 4-1 - Figuur 4-7). Voor het Markermeer geldt dat het model de waargenomen patronen van hoge en lage concentraties kan reproduceren. Voor stormcondities worden de verschillen tussen model en gemeten waardes groter. Dit is mogelijk omdat het model is gekalibreerd voor gemiddelde weersomstandigheden. Voor stormcondities zijn er verschillen in kalibratie factoren waardoor het model minder goed presteert.

Ook is een goede overeenkomst gevonden tussen de metingen rond de Marker Wadden en de modelresultaten. Met name in het luwte gebied achter de Marker Wadden zijn de resultaten nagenoeg gelijk. De verschillen tussen metingen nabij de slibgeul en het model zijn groter. De oorzaak hiervan is mogelijk de roosterresolutie (in het model $200 \times 200 \text{ m}^2$). De slibgeul heeft een breedte van één gridcel in het model. Hierdoor is er in het model een scherpe overgang tussen de oorspronkelijke bodem van het Markermeer en de bodem van de slibgeul en ontstaan er andere gradiënten in stroomsnelheden en sedimenttransport dan in werkelijkheid voorkomen. Ook de locatie van het meetframe op de rand van de geul kon in het model niet exact worden gereproduceerd door de roosterresolutie.

Om een betere vergelijking te maken tussen model en metingen nabij/ in de slibgeul is een bathymetrie met een hogere resolutie noodzakelijk. Aanvullend is een kleinschalig model een beter middel voor de vergelijking van de hoog dynamisch processen bij de geul.

6.2 Effect van de Marker Wadden

De Marker Wadden hebben concentratie verlagend effect op de waterkolom in het Markermeer. Doordat meer slib sedimenteert in de luwte van de Marker Wadden, de zandwinputten en slibgeul, neemt de concentratie in de waterkolom af. Dit effect is het hoogst nabij de Marker Wadden, 6 – 10 g/l en het effect zwakt af verder in het Markermeer tot een minimale afname van minder dan 2 g/l.

In het geval van stormcondities wordt het effect van de Marker Wadden versterkt; zowel de grootte als de omvang van het invloedsgebied neemt toe. De sedimentatie in de luwte en in de zandwinputten neemt toe en de erosie ten oosten van de Marker Wadden neemt toe. Voor kalmere condities dan het jaarlijksgemiddelde neemt het effect van de Marker Wadden af.

Met name in de luwte achter de Marker Wadden en in de zandwinputten ten noorden, westen en zuiden van de Marker Wadden wordt een aanzienlijk deel van het slib ingevangen. In totaal wordt 104 kton slib extra vastgelegd t.o.v. de situatie zonder Marker Wadden, waarvan 74 kton in de zandwinputten, 5 kton in de slibgeul en 25 kton in het luwtegebied achter de Marker Wadden (zie Tabel 5-2). De grootste toename van het vastleggen van slib is in de zandwinputten omdat hier de bodemschuifspanningen het meest zijn afgenomen door het verdiepen van de bodem.

De toename van 104 kton slib door de Marker Wadden is theoretisch beschikbaar voor het onderhoud van het gebied. In de praktijk is alleen het slib in de geul en winputten makkelijk beschikbaar te maken voor onderhoud (d.w.z. 79 kton). De veel dunnere laag over een veel groter gebied in de luwte achter Marker Wadden is moeilijk winbaar. Deze getallen hebben een flinke onzekerheidsmarge gegeven beperkingen van het model, de ruimtelijke dekking van de dichtheidsmetingen van de afzettingen en van de resolutie van de bodempeilingen.

Behalve de extra sedimentatie van slib in de geulen, putten en luwte achter Marker Wadden zijn er ook gebieden waar juist extra erosie van slib optreedt. De extra sedimentatie moet immers ergens vandaan komen en de import van slib via de zoetwateraanvoer is zeer gering. De bron van de extra sedimentatie is dus de bodem elders in het Markermeer. Uit zowel de bodemmetingen (diepte en verhouding zand/slib) als de modelresultaten blijkt dat het slib voornamelijk afkomstig is uit het gebied ten westen, zuiden en zuidoosten van Marker Wadden. Illustratief is dat de slibvangst in de (zuid)oostelijke put veel kleiner is dan in de noordelijke put, terwijl omvang en diepte vergelijkbaar zijn.

6.3 Slibpluimen

In dit model zijn niet de effecten van baggeren gemodelleerd. De slibpluimen die bij baggeren ontstaan kunnen een effect hebben op de concentraties in de waterkolom zoals ook te zien is in de Remote Sensing data. Lokaal kan dit leiden tot concentraties in de water kolom die 5 – 10 keer hoger zijn dan de achtergrond waarden. Daarnaast is het nu niet duidelijk hoe lang deze verhoogde concentraties een rol spelen.

Om meer inzicht te krijgen in de lokale en ruimtelijke effecten van baggeren in vergelijking tot de luwte werking van de Marker Wadden wordt aangeraden om in een vervolgstudie ook baggerwerkzaamheden op te nemen in het model en te vergelijken met remote sensing data of de beschikbare datasets van het meetframe en de meetpaal in combinatie met een logboek van baggerwerkzaamheden.

7 Referenties

Delft3D-FLOW, 2021. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics. Version 3.15. https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf

Dionisio et al., 2021. Rapportage remote sensing.

D-WATER QUALITY, 2019. Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes. Version 5.06. <http://www.askdelft3d.com/data/ueditor/php/upload/file/20190218/1550457669640083.pdf>

HKV (2020). NTU turbidity data. ASCII data. Retrieved from <https://thredds.dmhoutribdijk.nl/thredds/catalog/MEETFRAME/catalog.html>

KNMI (2020). KNMI wind data: snelheid en richting voor meetstation Lelystad. CSV Data. Retrieved from <https://www.daggegevens.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens>

Multiswath (2020). Kwartaalpeilingen Marker Wadden. Oktober 2018, juni 2019, mei 2020, december 2020,

Noordhuis et al. (2021). Rapportage helder-troebelplan.

Roskam, G.D. (2016). Resultaten 0-monitoring slibbodem Marker Wadden. Deltares notitie 1230048-001-GEO-0001.

Roskam, G.D. (2019). Monitoring slibbodem rondom Marker Wadden – 2019. Deltares notitie 11204558-002-ZWS-0001.

Roskam G.D. (2020). Monitoring slibbodem rondom Marker Wadden – 2020. Deltares notitie 11203732-012-ZWS-0002.

RWS (2020). NTU turbidity data. ASCII data.

Villars, M.T., Eleveld, M.A., Gaytan Aguilar, S. (2019). Remote sensing waterkwaliteit Markermeer : methode-ontwikkeling voor monitoring met Sentinel-2. Deltares report 11202200-004-GEO-0002

Kessel, T. van, G.J. de Boer, P.M.A. Boderie (2009). Calibration suspended sediment model Markermeer. Deltares report Q4612.

A Details van aanpassingen modelrooster, bodem en gemiddelde waterstand

Het hydrodynamisch model van het Markermeer modelleert de waterbeweging van het jaar 2020. De stroming en golven worden aangedreven door de wind, dit geldt ook voor de scheefstand. Variaties in het gemiddelde waterpeil (en dus het watervolume in het Markermeer) worden echter bepaald door in- en uitstroming door sluisen. Een viertal sluisen in het Markermeer zorgen voor een verandering van het gemiddelde Markermeerpeil in het model (Figuur A-1). Het model is gekalibreerd op basis van waterstanden uit 2020¹. Deze aanpak is eerder toegepast bij de kalibratie van het oorspronkelijke hydrodynamische model (Van Kessel et al., 2009).

Omdat de debieten per sluis onbekend zijn worden deze berekend op basis van gemeten waterstanden bij de sluisen. Het Markermeerpeil wordt berekend door middel van de waterstanden bij vier sluisen omdat iedere sluis een aandeel heeft in het Markermeerpeil:

$$\text{Markermeerpeil} = 0.28 * h_{\text{hollandse brug}} + 0.30 * h_{\text{Edam}} + 0.20 * h_{\text{Krabbersgatsluizen zuid}} + 0.22 * h_{\text{houtribsluizen zuid}}$$

h is de waterstand bij de sluis in m NAP. De waterstandsdata is afkomstig uit MATROOS en heeft een meetfrequentie van 1/10 min. De data werd gecorrigeerd voor wind effecten. De wind kan leiden tot lokaal hogere of lagere waterstanden die niet representatief zijn voor het Markermeer. Voor deze correctie is een lopend gemiddelde over vier dagen gebruikt. Het onbekende debiet per sluis is de verandering van de waterstand vermenigvuldigd met het invloedsgebied van de sluis. Dit invloedsgebied is een percentage van het oppervlak van het Markermeer, gelijk aan de percentages van de waterstanden. Per sluis is dit percentage:

$$Q_{\text{hollandse brug}} = 0.28 * \text{markermeerpeil} * A_{\text{markermeer}}$$

$$Q_{\text{Edam}} = 0.30 * \text{markermeerpeil} * A_{\text{markermeer}}$$

$$Q_{\text{Krabbersgatsluizen zuidg}} = 0.20 * \text{markermeerpeil} * A_{\text{markermeer}}$$

$$Q_{\text{houtribsluizen zuid}} = 0.22 * \text{markermeerpeil} * A_{\text{markermeer}}$$

Waarbij Q het debiet is in m^3/s en A het oppervlak in m^2 .

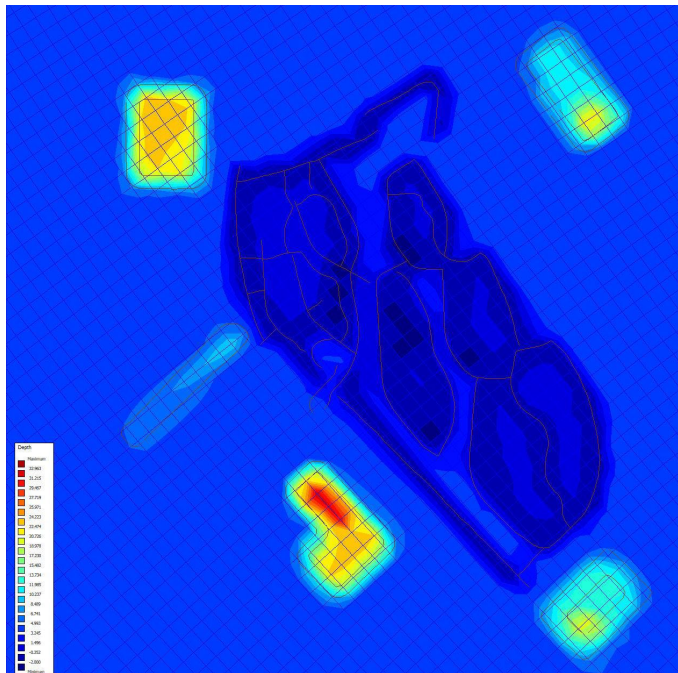


Figuur A-1 Marker en vier sluislocaties die het waterpeil bepalen in het hydrodynamisch model

¹ Tijdens de modelkalibratie waren de debietgegevens van sluisen in het Markermeer van het jaar 2020 nog niet beschikbaar.

De windaandrijving voor het model is geactualiseerd voor het jaar 2020, waarbij de gemeten uurgemiddelde windsnelheid en -richting van het KNMI-meetstation 249 (Berhout) is gebruikt, zie <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>.

Tevens is de bathymetrie aangepast aan de bouw van de Marker Wadden, de slibgeul en de zandwinputten. Ook flankerende ontwikkelingen zoals Trintelzand zijn geïmplementeerd. Zie Figuur A-2 voor lokale aanpassingen in en rondom Marker Wadden. De roosterresolutie is te grof om lokale details van de stroming tussen de compartimenten weer te geven, maar is wel voldoende om het grootschalige effect van Marker Wadden, de slibgeul en de putten op de luwtewerking, sedimentatie en opwerveling van slib te berekenen.



Figuur A-2 Lokale aanpassingen van de bodemligging na aanleg van Marker Wadden, de slibgeul en zandwinputten.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl