

Maatregelen sliboverlast Loosdrechtse Plassen



Maatregelen sliboverlast Loosrechtse Plassen

Auteur(s)

Pascal Boderie
Thijs van Kessel

Maatregelen sliboverlast Loosrechtse Plassen

Opdrachtgever	Waternet
Contactpersoon	de heer Van Alphen
Referenties	waterschap AGV/Waternet kenmerken: Project/WO: P01.1936/005/500, Bestelnummer: 509811
Trefwoorden	veenplas, slib, zwevend stof, golven

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	23-02-2023
Projectnummer	11201773-007
Document ID	11201773-007-ZWS-0004
Pagina's	37
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Pascal Boderie	
	Thijs van Kessel	

Samenvatting

In de Loosdrechtse Plassen is naast troebelheid ook de sedimentatie van slib een belangrijk aandachtspunt i.v.m. het onderhoud van jachthavens en toegangsheuven. In deze studie, die een vervolg is op een eerdere studie naar vertroebeling, staat de aanslibbingsproblematiek centraal. Het doel van deze studie is om op basis van het beschikbare slibmodel in combinatie met lokale waarnemingen en expert-kennis de huidige slibdynamiek die leidt tot slibaanwas in havens en toegangsheuven inzichtelijk te maken en om de effectiviteit te beoordelen van maatregelen om deze slibaanwas te verminderen.

Voor de huidige situatie (d.w.z. zonder maatregelen) worden hiermee de volgende vragen beantwoord:

1. Hoeveel slib is er in beweging?
2. Waar treedt voornamelijk opwerveling van slib op en waar sedimentatie?
3. Hoe groot is de jaarlijkse slibaanwas in havens? En onder welke condities treedt deze op?

Vervolgens wordt de werking van mogelijke maatregelen besproken om de slibaanwas te verminderen en wordt de effectiviteit hiervan zo goed mogelijk gekwantificeerd. Het gaat hierbij om de volgende maatregelen:

1. Putten;
2. Palenrijen (twee varianten);
3. Bellenschermen;
4. Bezanden.

De eerste drie maatregelen beogen slib af te vangen of tegen te houden voordat het bezinkt in de haven. Bezanden beoogt de opwerveling van slib tegen te houden.

De effectiviteit van de eerste drie maatregelen is beperkt door de zeer lage valsnelheid van slib onder gemiddelde condities. De effectiviteit is groter voor een slibfractie met hogere valsnelheid, maar deze fractie is slechts een beperkt deel van de tijd aanwezig in de waterkolom, namelijk tijdens en kort na stormachtig weer. Bezanden is op korte termijn weliswaar effectief (mits volledig ruimtelijk dekkend uitgevoerd), maar is kostbaar en slechts tijdelijk werkzaam, omdat zich geleidelijk boven de zandlaag een nieuwe 'flufflaag' van slib vormt.

Een aanbeveling is om de valsnelheid van slib en de aanwas van slib in havens in de Loosdrechtse Plassen te meten onder verschillende omstandigheden. Deze gegevens zijn goed bruikbaar om het slibmodel uitgebreider te valideren, met name om vast te stellen of de bijdrage van de slibfractie met een hogere valsnelheid in het model wordt onderschat.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Aanpak	7
2.1	Onderdeel 1: huidige slibaanwas	7
2.2	Onderdeel 2: effectiviteit van maatregelen	7
2.3	Modelscenario's	8
2.4	Benodigde gegevens	11
2.5	Eerdere studies	11
2.6	Overleggen	11
3	Huidige slibaanwas	12
3.1	Hoeveel slib is er in beweging?	12
3.2	Waar treedt opwerveling en sedimentatie op?	17
3.3	Hoe groot is de jaarlijkse aanwas?	20
4	Effectiviteit van maatregelen	21
4.1	Slibvangputten	21
4.2	Palenrijen	24
4.2.1	Westkant	24
4.2.2	Havenmondingen	26
4.3	Bellenschermen	28
4.4	Bezanden	32
5	Discussie	33
6	Conclusies	34
A	Referenties	36

1 Inleiding

Deltares heeft in 2020-2021 voor Waternet en de Provincie Noord-Holland een studie uitgevoerd naar het effect van luwtmaatregelen op de troebelheid en de doorvertaling naar licht in de Loosdrechtse Plassen. Hiertoe zijn o.a. veldmetingen uitgevoerd om de troebelheid rondom een bestaande luwtstructuur (eiland) in kaart te brengen onder invloed van de wind- en golfcondities [1]. Ook is een rekenmodel opgezet van de waterbeweging, slibdynamiek en het lichtklimaat in de Loosdrechtse Plassen [2] dat gevalideerd is met de veldmetingen. Dit model is recent toegepast om het effect van diverse luwtmaatregelen op het lichtklimaat te berekenen [2b].

Naast troebelheid is ook de sedimentatie van slib een aandachtspunt i.v.m. het onderhoud van jachthavens en toegangseuulen. Daarom is er een vervolgstudie uitgevoerd waarin deze problematiek centraal staat. Deze rapportage is daarvan het eindresultaat. Het doel van deze studie is om op basis van het beschikbare slibmodel in combinatie met lokale waarnemingen en expert-kennis de huidige slibdynamiek die leidt tot slibaanwas in havens en toegangseuulen inzichtelijk te maken en om de effectiviteit te beoordelen van maatregelen om deze slibaanwas te verminderen.

2 Aanpak

Deze studie bestaat uit twee onderdelen, namelijk:

- Onderdeel 1: beschrijving van de huidige slibdynamiek en -aanwas;
- Onderdeel 2: effectiviteit van maatregelen om de slibaanwas te verminderen.

De aanpak van deze twee onderdelen wordt hieronder uitgewerkt.

2.1 Onderdeel 1: huidige slibaanwas

Het eerste onderdeel is bedoeld om de huidige slibdynamiek in de Loosdrechts Plassen inzichtelijk te maken en te kwantificeren. De volgende vragen over de slibdynamiek en -aanwas worden hiermee beantwoord voor de huidige situatie (d.w.z. zonder maatregelen):

1. Hoeveel slib is er volgens het model in beweging in de Loosdrechtse Plassen?
2. In welke deelgebieden treedt voornamelijk opwerveling van slib op (als gevolg van golven) en waar voornamelijk sedimentatie?
3. Hoe groot is de jaarlijkse aanwas van slib in de havens bij de oevers van de Loosdrechtse Plassen? Onder welke condities treedt de meeste aanwas van slib op?

De eerste twee vragen kunnen met het bestaande model worden beantwoord, met de kanttekening dat de huidige modelkalibratie gericht is op troebelheid. De berekende sedimentfluxen zijn waarschijnlijk een ondergrens, omdat een zwaardere slibfractie die weinig bijdraagt aan troebelheid maar wel aan sedimentatie vermoedelijk ondervertegenwoordigd is in het model. Omdat het verspreidingsgedrag van zwaardere slibfracties vermoedelijk afwijkt van dat van lichtere fracties, wordt een extra zwaardere fractie aan het model toegevoegd om dit te onderzoeken. Herkalibratie van het slibmodel met de extra fractie en op basis van baggergegevens valt buiten de scope van dit project.

Voor de derde vraag speelt de resolutie van het numerieke rooster een belangrijke rol. Het huidige model geeft de ruimtelijke verspreiding van de slibconcentratie, sedimentatie en erosie weer, maar ingezoomd op specifieke havens is de huidige resolutie waarschijnlijk onvoldoende (b.v. wanneer een geul te smal is om op het rooster te worden weergegeven of wanneer bepaalde kleinschalige elementen zoals palenrijen die de lokale stroming en golven beïnvloeden niet in het huidige model zitten). Daarom wordt voor de bepaling van de slibaanwas in havens het model alleen gebruikt om het aanbod van slib als functie van wind- en golfcondities te berekenen. Hoeveel hiervan sedimenteert in de havens is afhankelijk van de sterkte van de uitwisseling en luttewerking en wordt bepaald met rekenregels [4-6]. Vanwege het grote aantal (kleine) havens in de Loosdrechtse Plassen wordt deze analyse niet per haven maar per deelgebied gemaakt.

2.2 Onderdeel 2: effectiviteit van maatregelen

Mede op basis van de inzichten uit onderdeel 1 komen in onderdeel 2 vragen aan bod over de effectiviteit van maatregelen om aanslibbing in havens tegen te gaan. Beschouwde maatregelen zijn slibvangen, palenrijen, bellenschermen en bezanding. Deze vragen zijn specifiek:

1. Hoe diep moet een geul zijn om effectief slib af te vangen, zodanig dat het bij wind vanuit een andere kant niet alsnog weer opwervelt?

2. Hoe diep moet een geul zijn als er geen windgedreven golven zijn die opnieuw voor erosie zouden kunnen zorgen?
3. Hoe effectief is een palenrij aan de westkant van de Loosdrechtse Plassen die stroming tussen de palen doorlaat, maar de energie uit de golven haalt waardoor deze voor minder resuspentie achter de palenrij zorgen?
4. Hoe effectief is een tijdelijke dichte palenrij voor een havenmondning?
5. Hoe effectief is een bellenbaan in de havenmondning tijdens storm?
6. Is bezanden van de waterbodembodem zinvol om aanslibbing in jachthavens te beperken?

Vragen 1 en 2 worden beantwoord door middel van een analytische berekening van de golfgedreven bodemschuifspanning als functie van golfhoogte, -periode en geuldiepte. Een dergelijke analyse is eerder uitgevoerd voor geulen en putten, o.a. in het Markermeer [3]. Een gedetailleerde berekening van golven en stroming in geulen vraagt om lokale verfijning van het rekenmodel. Dit is buiten de scope van de huidige studie en daarom wordt de bovengeschetste analytische aanpak gevolgd.

Voor vraag 3 is het huidige model geschikt (met de kanttekening over de grovere slibfractie zoals eerder genoemd en mits de palenrij zich uitstrekt over meerdere roosterzellen). Hierbij wordt een luwtestructuur ingebracht die alleen werkzaam is voor golven en niet voor stroming. Hierdoor wordt inzichtelijk gemaakt wat een dergelijke maatregel doet t.o.v. de huidige situatie voor de troebelheid, de sedimentfluxen en de netto sedimentatie en erosie in het gebied.

Vragen 4 en 5 gaan om een lokale situatie waarvoor het huidige model waarschijnlijk onvoldoende resolutie heeft. Wel kan het huidige model worden gebruikt om de representatieve condities m.b.t. stroming en golven bij de havenmondning af te leiden en te gebruiken voor een lokale analyse van de slibblast en het effect van afschermingsmaatregelen hierop. Hiervoor zijn bestaande rekenregels die al vaker zijn toegepast voor jachthavens en toegangsgeluiden in ondiepe plassen. De verschillende processen die de slibblast veroorzaken worden hierbij gekwantificeerd [4-7].

Voor vraag 6 is een korte analyse gemaakt m.b.t. de invloed van de grootte van het bezande oppervlak op de slibconcentratie en aanslibbing en de duur van dit effect. Immers door oevererosie, de import van zwevend stof van elders en bodmerosie (van niet afgedekte delen) zal op den duur toch weer een sliblaag ontstaan op de zandige bodem.

Bovenstaande analyse mondt uit in een advies over de effectiviteit van deze maatregelen en hierbij worden ook mogelijke andere maatregelen benoemd. Kwantificering van het effect van mogelijke andere dan onder 1-6 genoemde maatregelen vallen echter buiten de scope van dit project.

2.3 Modelscenario's

De hiervoor geschetste aanpak is gebaseerd op een combinatie van expertkennis en modelanalyse. De volgende modelscenario's zijn daarbij beschouwd:

- Een referentiescenario voor de jaren 2019, 2020 en 2021.
- Een scenario met een palenrij in het westelijke deel van de Loosdrechtse Plassen.
- Een scenario met enkele putten.

Het referentiescenario wordt gebruikt om de huidige slibdynamiek in kaart te brengen, o.a. hoeveel slib afhankelijk van wind- en golfcondities op transport is en waar dit wordt afgezet. Dit scenario wordt ook gebruikt om stromingscondities en slibconcentraties te bepalen voor enkele representatieve havenmondningen.

Deze gegevens zijn nodig voor een expertoordeel over de effectiviteit van lokale maatregelen als palenrijen en bellenschermen voor een reductie van de lokale sliblast.

De scenario's met respectievelijk de westelijke palenrij en de putten worden gebruikt om de invloed van deze respectievelijke maatregelen te kwantificeren op de slibfluxen in de Loosdrechtse Plassen en de sliblast voor jachthavens.

Het slibmodel voor de Loosdrechtse plassen [2, 2b] berekent ruimtelijke en temporele patronen van slib in water en bodem. Hierbij vindt t.g.v. bodemschuifspanning door stroming en golven, verticale menging en sedimentatie uitwisseling plaats van slib tussen water en bodem (bestaande uit een makkelijk op te wervelen flufflaag en een moeilijker op te wervelen onderlaag). Door stroming wordt het slib in horizontale richting getransporteerd en verspreid over de plassen. Voor deze studie is een derde grovere slibfractie toegevoegd (valsnelheid $1 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$) in de veronderstelling dat daarmee aanslibbing beter beschreven kan worden.

De netto bron van slib die in het model gebruikt wordt is afkomstig van veenafslag en primaire productie. De hoeveelheid daarvan is gebaseerd op [8]. De slibalans van die studie gaat uit van 120 tonC/jaar voor de algenproductie en 180 tonC/jaar voor veenafslag, samen 300 tonC/jaar. Omgerekend naar droge stof is dat $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$ uitgaand van 2.5 g droge stof per gram koolstof en een plasvolume (in het model) van 850 ha: $300 \text{ tonC/jaar} \cdot 10^6 \text{ g/ton} \cdot 2.5 \text{ gDS/gC} \cdot 1/850 \text{ ha} \cdot 10^{-4} \text{ ha/m}^2 \cdot 1/365 \cdot \text{jaar/dag} = 0.2 \text{ g DS/m}^2/\text{d}$. Deze hoeveelheid wordt ruimtelijk en temporeel homogeen toegevoegd aan de bodem in het model (modelparameter ZDigS2DM = 0.2).

De initiële hoeveelheden slib in het model voor de twee bodemlagen S1 (flufflaag) en S2 (onderlaag) en de drie slibfracties m1 (fijn), m2 (middel) en m3 (grof) zijn weergegeven in Tabel 1. De totale hoeveelheid slib in het model bedraagt 55 kg/m^2 . De initiële zwevend stof concentratie (respectievelijk 20, 5 en 2 mg/l) zijn ten opzichte van de totale hoeveelheid slib in het model verwaarloosbaar.

Een productie van $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$ is equivalent met $0.1 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$, dus minder dan 1% van de initiële hoeveelheid slib.

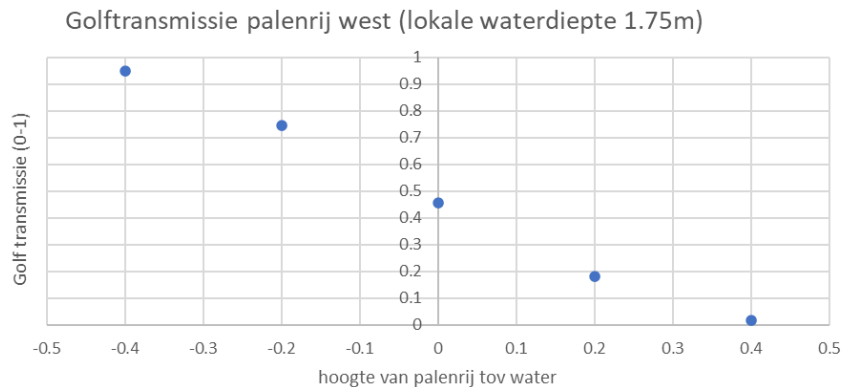
Tabel 1: Initiële hoeveelheden slib van model in kg/m^2 per bodemlaag, totaal voor bodem en per fractie.

fractienaam	fractiesoort	massa flufflaag S1 [kg/m^2]	massa onderlaag S2 [kg/m^2]	totale massa over beide bodemlagen [kg/m^2]
m ₂	fijn	0.25	2.5	2.75
m ₁	middel	1.75	17.5	19.25
m ₃	grof	3.0	30.0	33.0
	totaal over alle fracties	5.0	50.0	55.0

De referentie simulatie bestrijkt 3 jaar (2019-2021) en is vanuit de initiële condities twee keer achter elkaar doorgerekend. Alleen van de doorgestarte berekening worden resultaten getoond.

Voor het scenario met palen aan de westkant van de plas is aangenomen dat deze de golfenergie deels doorlaten (transmissie), het niet doorgelaten deel wordt gereflecteerd (de som van transmissie en reflectie is gelijk aan 1, er vindt geen absorptie van golfenergie plaats).

Met de formuleringen van Goda (1967, zie [14]) is hieronder een voorbeeldberekening gemaakt. Het deel van de golfenergie dat doorgelaten wordt is afhankelijk van eigenschappen van het gebruikte materiaal, de significante golfhoogte en de hoogte van de palen t.o.v. het waterniveau en waterdiepte, zie Figuur 1. Aangenomen is dat de palen 20 cm boven water uitsteken en daarmee is volgens de curve in Figuur 1 de doorlatendheid voor golfenergie 20%, de rest wordt gereflecteerd.

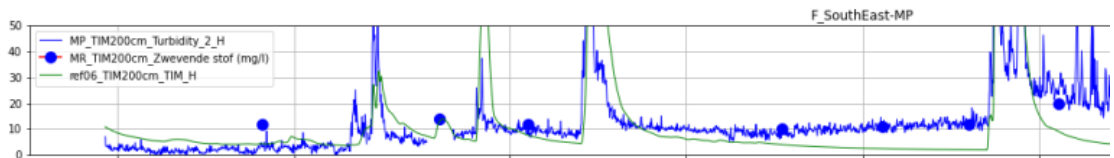


Figuur 1: Golftransmissie door een palenrij als functie van de hoogte van de palenrij t.o.v. de waterstand.

Met het model is ook beknopt gekeken naar de aanslibbing in verdiepingen. Daartoe zijn bestaande verdiepingen (dieper dan -4 m +NAP, dus 3 m onder waterbodenniveau) in de referentiesom verder verdiept (in drie simulaties met 1, 3 en 5 m tot respectievelijk 4, 6 en 8 m onder de waterbodem). In deze berekeningen kan het verschil in aanslibbing met de referentie worden vergeleken. Het betreft één keer doorgestarte jaarsommen voor 2020.

Het gekalibreerde model gerapporteerd in [2b] (zie Figuur 2) heeft een hoge productie (5 g/m²/d). De nieuwe berekeningen hebben een 25 keer lagere productie (0.2 g/m²/d), maar hierdoor verandert de berekende slibconcentratie in de waterkolom nauwelijks. Dit komt doordat zowel de lage als de hoge productie met van 0.2 - 5 g/m²/d = 0.1 - 2 kg/m²/jaar klein zijn t.o.v. de initiële hoeveelheid slib in de bodem (55 kg/m²). Tijdens de duur van de berekeningen (tot enkele jaren) verandert de totale hoeveel slib in de bodem dus niet noemenswaardig. Wel neemt t.g.v. herverdeling van het bodemslib in de plassen t.o.v. de begincondities de achtergrondconcentratie slib geleidelijk af, waardoor kwantitatieve beoordeling van modelscenario's op een tijdschaal langer dan ca. 1 jaar slechter wordt.

Het doel van deze studie is niet een vernieuwde kalibratie maar een expert analyse van de slibdynamiek om zo maatregelen om de slibaanwas te reduceren te bepalen, waarbij het bestaande model wordt gebruikt als hulpmiddel.



Figuur 2: Resultaat modelkalibratie. Berekende (groene lijn) t.o.v. gemeten (blauwe lijn en punten) slibconcentratie (mg/l) Zie [2b].

2.4 Benodigde gegevens

Lokale waarnemingen zijn belangrijk ter ondersteuning van het begrip en de kwantificering van de slibdynamiek in de Loosrechtse Plassen. Het gaat om o.a. zwevenstofconcentratie in de waterkolom als functie van windsnelheid en -richting, aanslibbingssnelheid in luwtezones, baggergegevens (waaruit conversie van droge stof naar m^3 afgeleid kan worden) en kaarten over bodemhoogteveranderingen (bodempeilingen).

Ten behoeve van deze studie zijn de volgende gegevens aangeleverd door Waternet of de provincie Noord-Holland:

- Overzichts- en detailkaarten met actuele bodempeilingen.
- Informatie over samenstelling van de slib/veenbodem [9]. Monsters zijn genomen tussen net aangelegde legakkers. Citaat uit [9]: “Uit het watergehalte in de bodemmonsters kan worden afgeleid dat het gewicht aan water in de monsters 5 tot 9 keer zo groot is als het gewicht aan droge stof. De bodemmonsters bestaan dus voornamelijk uit water en voor een klein deel uit droge organische stof. Het watergehalte is in alle monsters hoger dan de vloeigrens. Daarom wordt geconcludeerd dat alle monsters zich in de vloeibare fase bevinden”.
- Informatie over slibaanwas in gegraven putten voor zandwinning [10]. Deze bedraagt circa 5 cm per jaar in diepe putten. Bij een droge dichtheid van circa 100 kg/m^3 gaat dit om een sedimentatieflux van circa $5 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$.

Helaas is geen formele informatie beschikbaar over de snelheid van aanslibbing in jachthavens. De indruk is dat deze havens over het algemeen ‘vol’ zitten met slib en dat de extra accumulatie hierdoor beperkt is. Er wordt in havens relatief weinig volume gebaggerd (een paar honderd m^3/jaar bij de havenmond).

2.5 Eerdere studies

Dit is niet de eerste studie naar de slibdynamiek in de Loosrechts Plassen en naar de effectiviteit van maatregelen om de sliblast en troebelheid te verlagen. Eerdere studies waren o.a. [1, 2, 4, 5 en 7]. Bij de beschrijving van de huidige slibdynamiek en de beoordeling van de effectiviteit van maatregelen is de analyse zoals gepresenteerd in het volgende hoofdstuk mede gebaseerd op deze eerdere studies, maar is deze geactualiseerd voor de huidige toestand en mogelijke maatregelen.

2.6 Overleggen

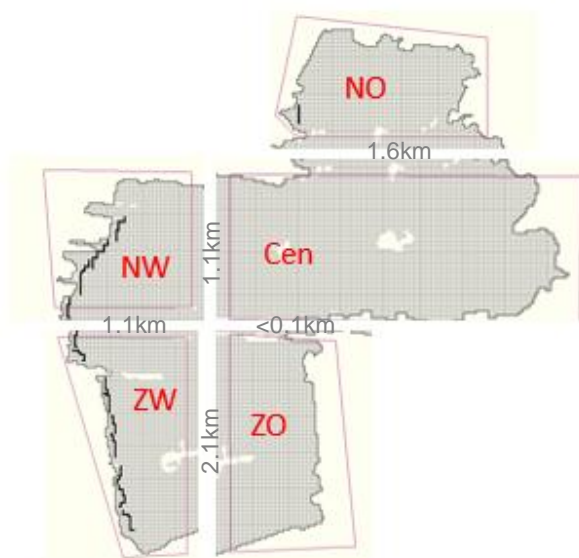
Deze studie is uitgevoerd conform de in de offertefase geschetste aanpak. Tussentijds is regelmatig overleg geweest tussen Deltares als uitvoerder en Waternet en de provincie Noord-Holland als opdrachtgevers. Op basis hiervan zijn de werkwijze, de wijze van presentatie van de resultaten en prioritering van en de mate van detail benodigd voor de beoordeling van maatregelen verder aangescherpt.

3 Huidige slibaanwas

3.1 Hoeveel slib is er in beweging?

De oppervlakte van het modeldomein van de Loosdrechtse Plassen in het model bedraagt 850 ha. De totale hoeveelheid slib waarmee we starten is 55 kg/m^2 . Dat is totaal ca. 500 kton waarvan 10% ofwel 50 kton aanwezig is in de flufflaag, d.w.z. makkelijk op te wervelen. Bij $100 \text{ kg droge stof/m}^3$ komt dit overeen met circa 0.5 miljoen m^3 dun (bagger)slib wat indien uniform verdeeld over de plassen een laagdikte heeft van ca. 6 cm. Op de meest stormachtige dagen wanneer de zwevend stof concentratie orde 200 mg/l is, vertegenwoordigt de hoeveelheid slib in de water kolom minder dan 1% van de totale hoeveelheid die in het model aanwezig is en minder dan 10% van de initiële hoeveelheid fluff. Bij een zwevend stof concentratie van 200 mg/l en een totaal watervolume van ca. 20 miljoen m^3 is er dan circa 4 kton (droge stof) zwevend stof aanwezig in de waterkolom, wat overeenkomt met circa 40.000 m^3 dun (bagger)slib.

Kwantificering van de hoeveelheid slib in beweging vindt plaats door de uitwisselingen tussen vooraf gedefinieerde balansgebieden in het model in kaart te brengen. Figuur 3 toont deze gebieden, namelijk Cen(traal), NO, NW, ZO, ZW en het gebied achter Palenrij West.



Figuur 3: Gebieden in de Loosdrechtse Plassen waarvoor het slibmodel balansen berekend met de uitwisselingslengtes tussen de gebieden.

In Figuur 4 en Figuur 5 worden de resultaten van deze berekening getoond als fluxen (slibstromen) in respectievelijk a) ton droge stof slib in de bodem per hectare per kwartaal en b) ton droge stof in zwevend stof in het water per kwartaal .

In Figuur 4 staan processen die relevant zijn voor de slibbalans in de bodem. Aan de bovenkant van de balans termen die slib aan de bodem toevoegen (m.n. sedimentatie in bruin en een beetje productie in groen) aan de onderkant processen die slib uit de bodem verwijderen, te weten resuspensie/erosie uit de twee bodemlagen (in rood en donkerbruin). Merk op dat begraving naar diepere (> 5cm) lagen (in geel) niet voorkomt).

In Figuur 5 staan processen die relevant zijn voor de slibbalans in het water. Aan de bovenkant van de balans termen die slib uit het water van het balansgebied toevoegen, zoals erosie (rood) uit de bodem en toestroom uit andere gebieden (blauwtint per balansgebied). Aan de onderkant processen die slib uit de waterkolom van het balans gebied verwijderen zoals sedimentatie (bruin) naar het sediment en uitstroom naar andere gebieden (blauwtint per balansgebied). De balans termen voor sedimentatie en erosie komen overeen/zijn dezelfde als de termen in Figuur 4. Uit Figuur 5 blijkt per balansgebied het relatieve belang van de uitwisseling met het sediment ten opzichte van het horizontaal transport.

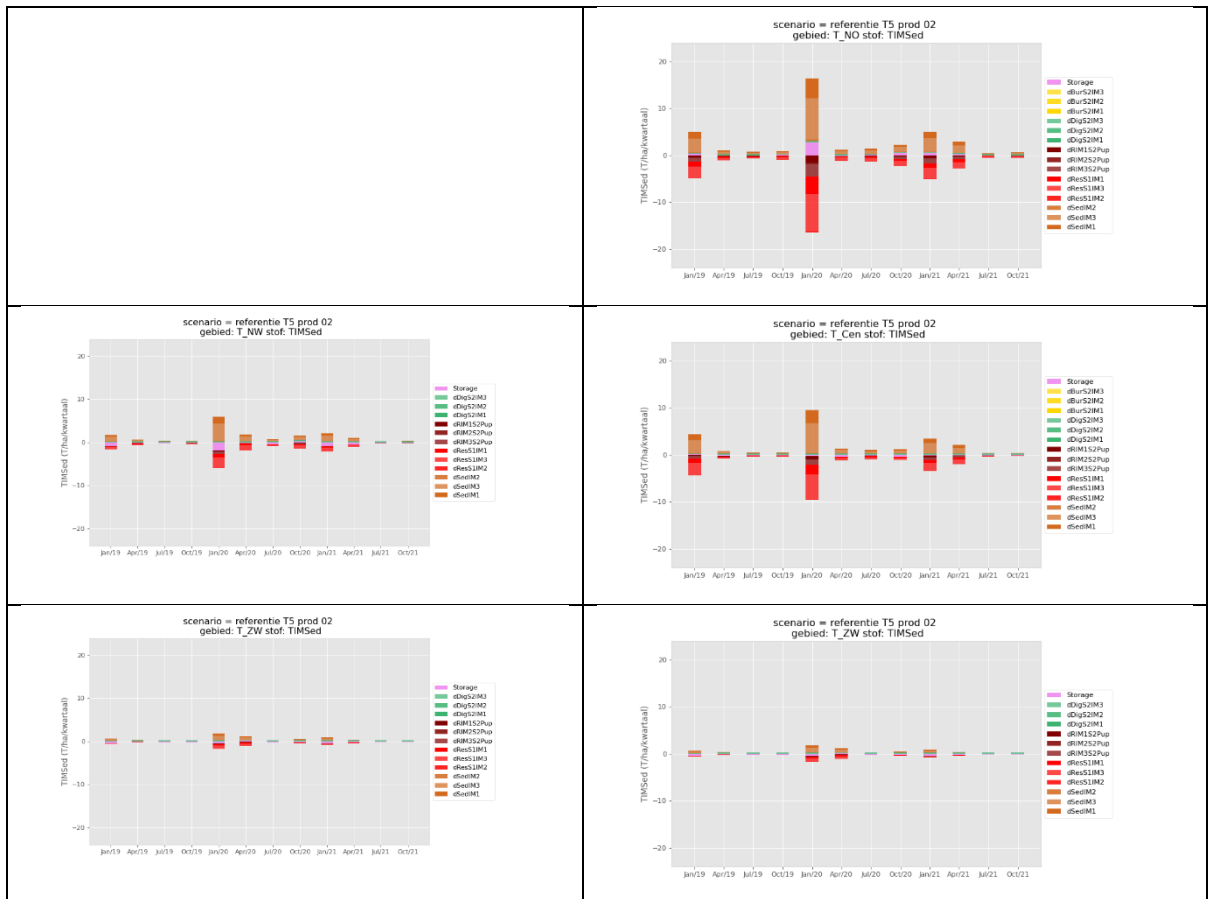
Hieruit blijkt o.a.:

- Het grootste deel van het transport vindt plaats in het eerste- (Q1) en tweede kwartaal (Q2) van het jaar, wanneer er het meeste wind is. Jaarvrachten worden voor ca. driekwart in Q1 gerealiseerd (gebaseerd op berekeningen voor 2020 en 2021).
- Patronen voor verschillende jaren (2019-2021) zijn vergelijkbaar maar op details verschillend door afwijkende windcondities.
- De orde-grootte van de slibflux is 2000-4000 ton/kwartaal (Figuur 5). De grootte is afhankelijk van het uitwisselingsoppervlak per balansgebied en daarom groter voor het 'Cen(traal)' gebied. Uitwisselingslengtes van de balansgebieden zijn voor NO, Cen, NW, ZW, ZO resp. 1.6, 2.7, 2.2, 3.2 en 2.1 km, de uitwisselingslengtes tussen de gebieden staan in Figuur 3. Grosso modo is het slibtransport circa 1-1.5 ton/kwartaal per strekkende meter.
- Voor gebied NW is te zien dat de uitwisseling met Centraal veel groter is dan met ZW (gelijke uitwisselingslengte). Het oost-west transport is dominant ten opzichte van het noord-zuid transport voor dit gebied. Voor gebied ZW is de uitwisseling met ZO groter dan met NW maar zou de flux geschaald zijn naar de grotere uitwisselingslengte dan zijn ze ongeveer gelijk. Voor gebied ZW zijn oost-west en noord-zuid transporten dus in balans.

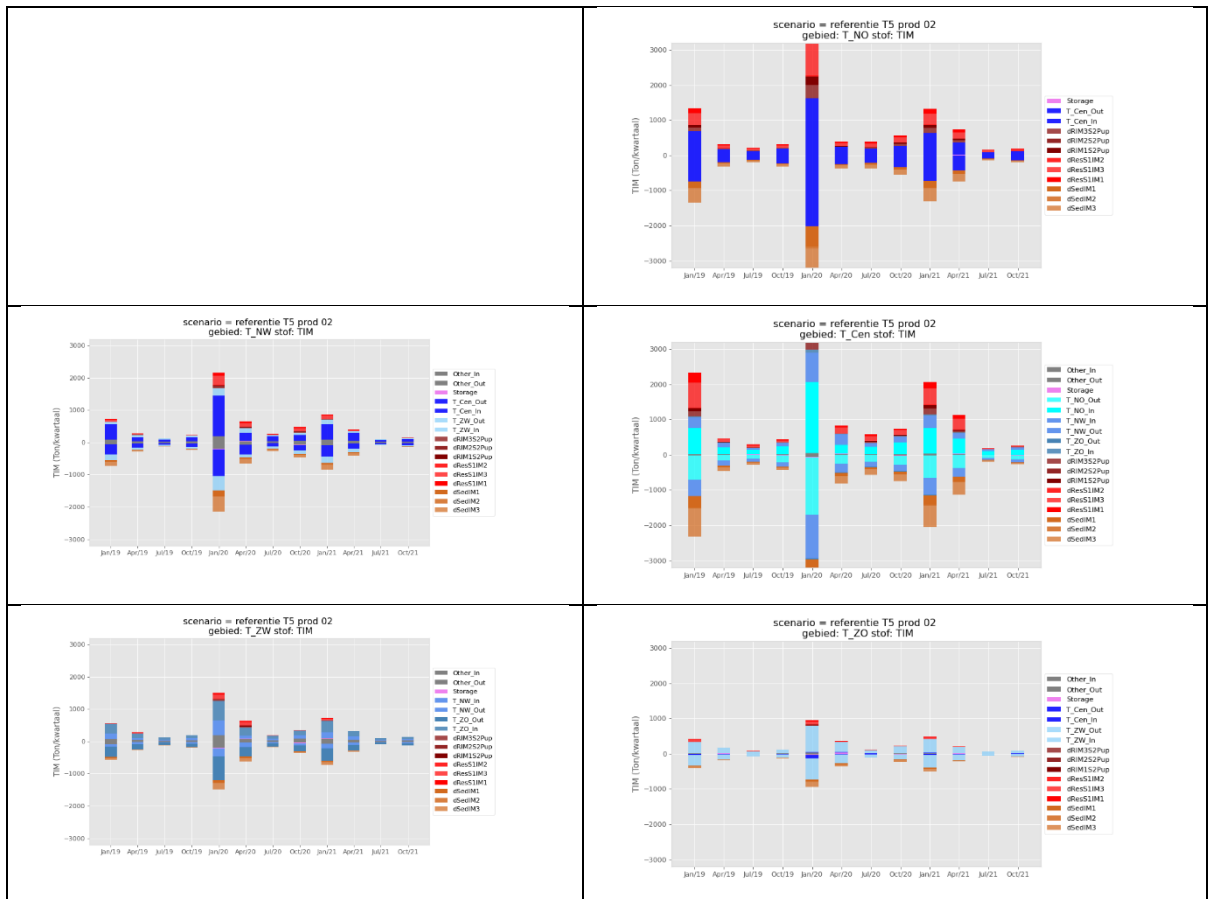
Figuur 6 toont de ruimtelijke verdeling van de momentane slibconcentratie in de Loosdrechtse Plassen voor verschillende windrichtingen en -snelheden in 2021 berekend met het gekalibreerde slibmodel (met twee slibfracties). Hieruit blijkt dat opwerveling door windgedreven golven en stroming niet leidt tot een uniforme concentratieverhoging, maar tot sterke concentratiegradiënten. De locatie van het optredende maximum hangt sterk af van de windrichting en de grootte van het maximum hangt bovendien af van de windsnelheid. Aan de bovenwindse oever(s) treden de laagste concentraties op en aan de benedenwindse oever(s) de hoogste. De laagste concentraties treden op onder kalme omstandigheden en bedragen slechts enkele mg/l, terwijl bij harde wind tijdelijk en lokaal de concentraties kunnen oplopen tot meer dan 100 mg/l.

Figuur 7 toont de ruimtelijke verdeling van de winter- en voorjaarsgemiddelde slibconcentratie in 2021. Door de tijdsmiddeling zijn de concentratiegradiënten sterk uitgesmeerd en afgezwakt, wel is er nog een duidelijk verschil tussen de concentratie in het noordelijke en zuidelijke deel, waarbij de slibconcentratie in het noordelijke deel gemiddeld hoger is. Dit wordt zoals eerder al opgemerkt veroorzaakt door een gemiddeld hogere bodemschuifspanning en daardoor sterkere opwerveling.

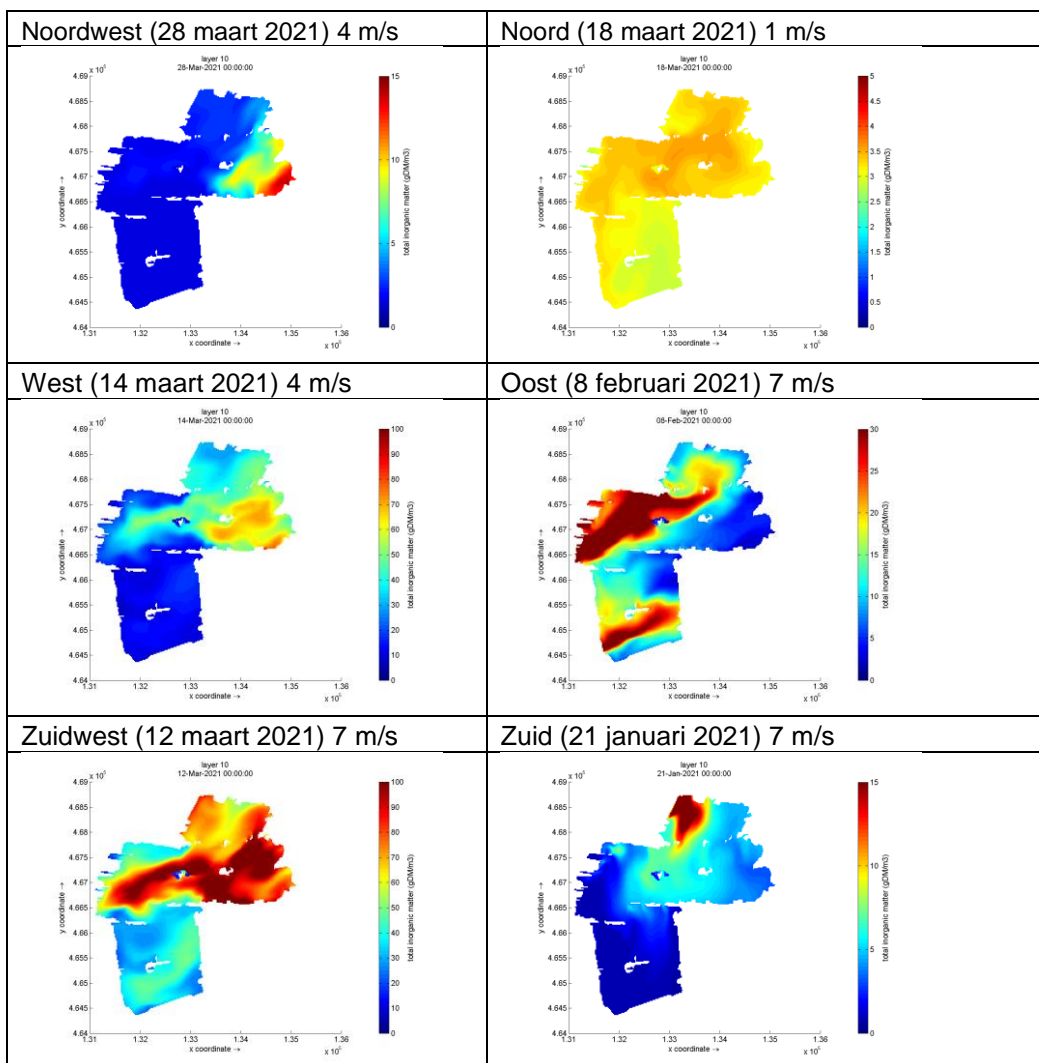
Figuur 8 toont de berekende instantane slibconcentratie nabij de oppervlakte voor de periode 2019 – 2022 bij locatie Meetpaal Zuid-Oost. Hieruit blijkt eens te meer de sterke variabiliteit van de slibconcentratie. Tijdens rustige periode is de achtergrondconcentratie laag (enkele mg/l), maar tijdens perioden met veel wind neemt de slibconcentratie t.g.v. opwerveling in korte tijd sterk toe. Hierna neemt de concentratie ook weer snel af, maar sedimentatie duurt enkele dagen t.o.v. enkele uren zoals bij opwerveling.



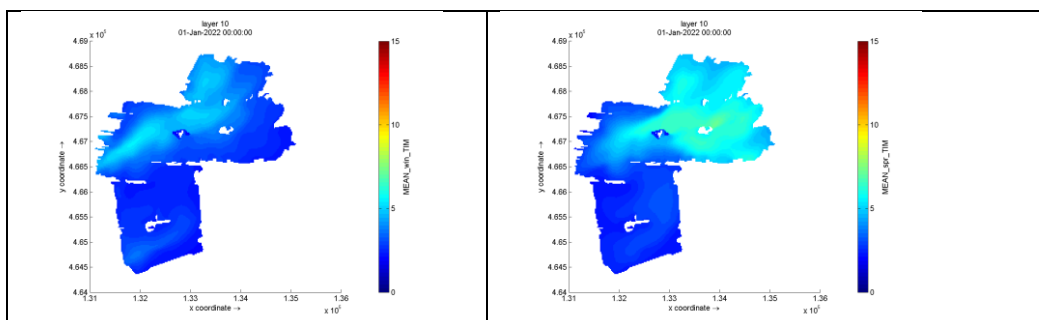
Figur 4: Sediment fluxen (ton/(ha.kwartaal)) voor de balansgebieden uit het model.



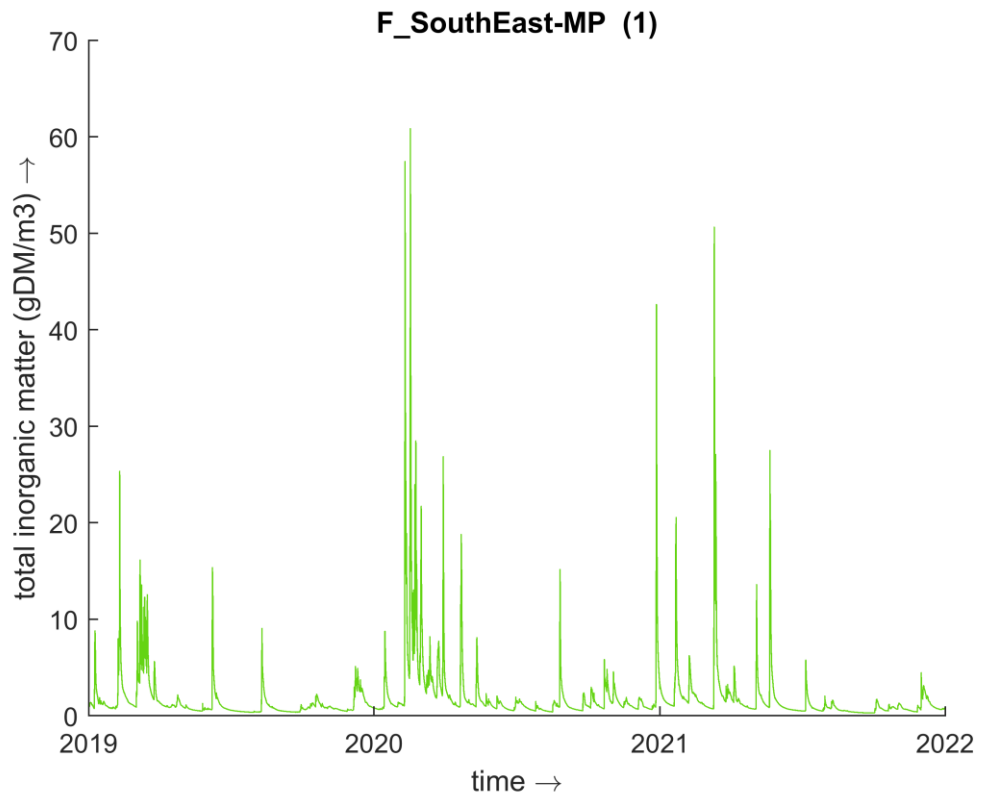
Figur 5 Slib (zwevende stof) fluxen (ton/kwartaal) voor de balansgebieden uit het model



Figuur 6: Slibconcentraties onder verschillende (wind)condities (momentopnamen) in mg/l, halverwege de waterkolom.



Figuur 7: Winter- en voorjaarsgemiddelde slibconcentraties 2021 halverwege de waterkolom. Links: winter. Rechts: voorjaar.



Figuur 8: Berekende instantane slibconcentratie in de periode 2019 – 2022 nabij de oppervlakte voor locatie Meetpaal Zuid-Oost.

3.2 Waar treedt opwerveling en sedimentatie op?

Figuur 9 toont de waargenomen sliblaagdikte in de Loosdrechtse Plassen. Van oost naar west neemt de sliblaagdikte duidelijk toe. De bodem van de oostelijke oever is overwegend zandig met weinig tot geen slib. De bodem van de westelijke oever is daarentegen zeer slibrijk met in een groot gebied sliblaagdiktes van meer dan 20 cm, lokaal oplopend tot 100 cm of zelfs meer. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de dominante zuidwestelijke wind die aan de bodem een retourstroming van water en slib in tegenovergestelde richting veroorzaakt, waarna het slib zich afzet in de relatieve luwte van de bovenwindse westelijke oever. Het model bevestigt dit, zie Figuur 10.

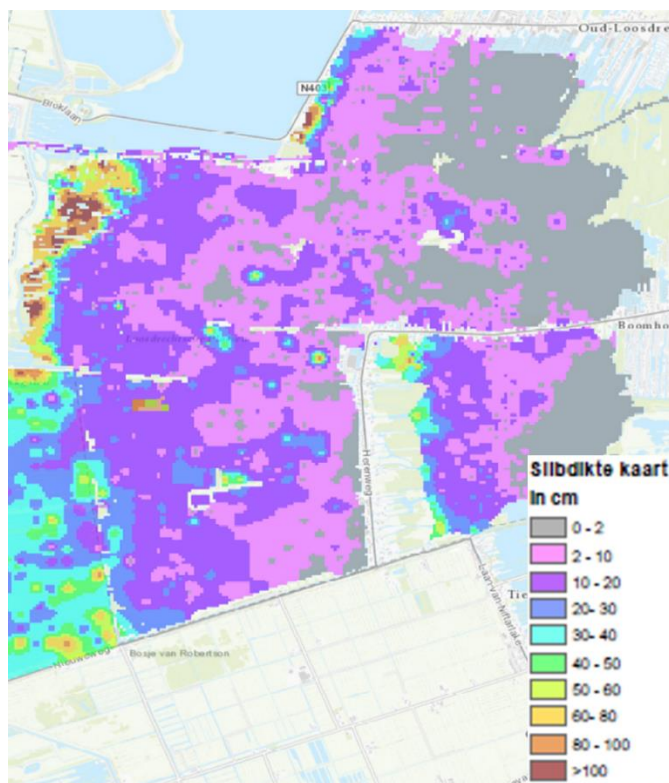
Figuur 11 toont ruimtelijke (model)kaartjes waarin gebieden met netto opwerveling en sedimentatie te zien zijn cumulatief over een jaar (eindbodem – beginbodem). Deze gebieden zijn persistent tussen de drie simulatiejaren 2019, 2020 en 2021. De meeste accumulatie van slib vindt plaats in de luwte bij eilanden en oevers. De gemiddelde accumulatie is circa 0.3 kg/m²/jaar ofwel 3-4 kiloton/jaar geïntegreerd over de oppervlakte waar sedimentatie plaatsvindt (dit is op 2/3 van de gehele vijf plassen). Een aanwas van 0.3 kg/m²/jaar komt overeen met een sliblaag van 1 cm in 3 jaar (uitgaande van bagger met 10% droge stof). Lokaal kan in luwtegebieden waarin resuspensie verwaarloosbaar is de aanwas nog wat hoger zijn.

Dit beeld is niet consistent met Figuur 9, waarin van oost naar west een geleidelijk toenemende sliblaagdikte is te zien. Deze gemiddelde sliblaagdikte zegt echter weinig over de jaarlijkse accumulatie, hiervoor is een verschilkaart nodig.

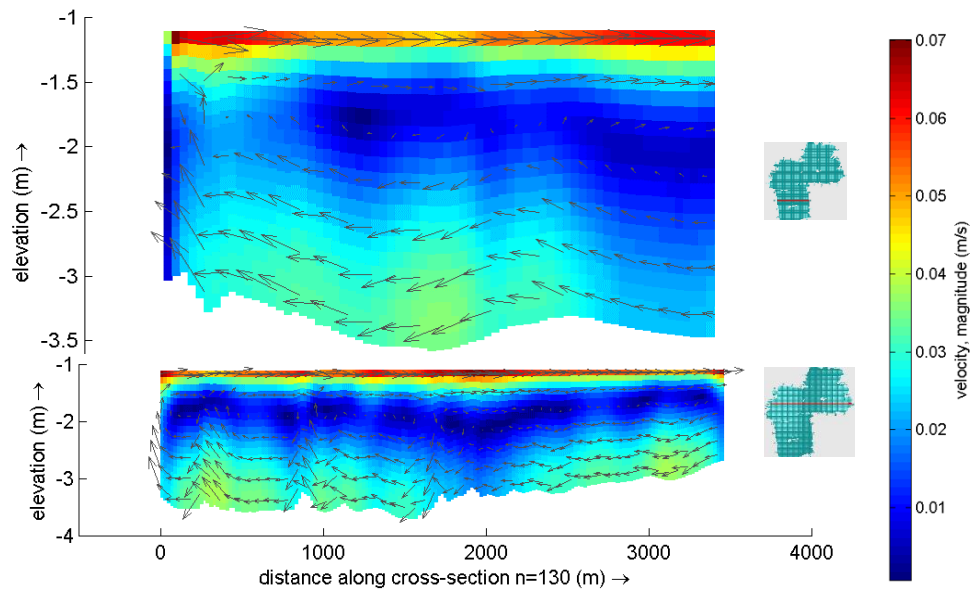
Uit Figuur 11 blijkt ook dat de hoeveelheid sedimentatie van jaar tot jaar nogal kan verschillen. In 2020 vindt beduidend meer sedimentatie en opwerveling plaats dan in 2019 en 2021, wat verklaarbaar is door een winderige winter- en voorjaarsperiode. Behalve in de tijd is er ook ruimtelijk sprake van variatie. De cumulatieve opwerveling en sedimentatie is in het zuidelijke deel van de plassen duidelijk minder dan in het noordelijke deel, doordat in het noordelijke deel de bodemschuifspanning gemiddeld hoger is en er meer herverdeling van slib optreedt van geëxponeerde naar luwe zones.

Zonder productieterm verdwijnt slib langzaam naar de diepere en luwere delen van het model. Omdat het geen morfologisch model is blijven die delen ondanks aanslibbing luw waardoor aanslibbing doorgaat (in werkelijkheid wordt de bodem geleidelijk hoger en neemt de erosiefrequentie toe). Het model is dus continu slib (dat initieel uniform is aangebracht, orde 0.5 m) aan het herverdelen met b.v. consistente erosie in het noordoosten. Deze herverdeling veroorzaakt een geleidelijke afname van de achtergrondconcentratie slib zoals vermeld bij de modelopzet (§2.3).

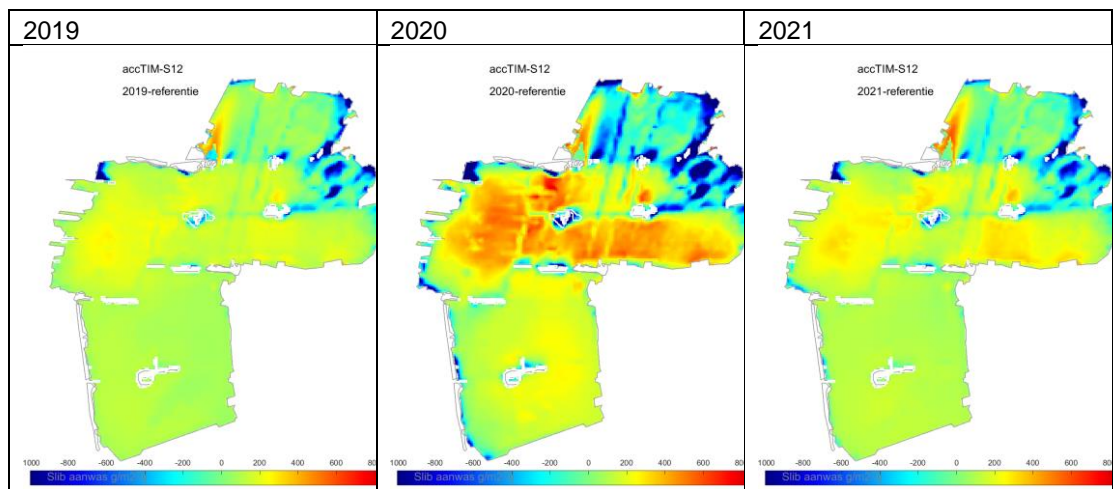
Figuur 12 toont de cumulatieve aanslibbing over drie jaar. Deze bedraagt in luwtegebieden circa 1 kg/m^2 , equivalent met de eerder genoemde 1 cm aanwas. Lokaal kan dit getal hoger zijn, b.v. in diepe putten of goed afgeschermd jachthavens, mede door processen die niet zijn opgenomen in het huidige model zoals flocculatie, opwerveling door scheepvaart en dichtheidsstromingen aan de bodem. Opvallend is dat het model geen sedimentatie berekent langs de meest westelijke rand van het model. Door de ondiepte langs de oevers is de bodemschuifspanning in het model geregeld voldoende hoog voor opwerveling en is er sprake van een evenwicht tussen sedimentatie en opwerveling, en treedt er in een strook vlak langs de oevers zelfs netto erosie op.



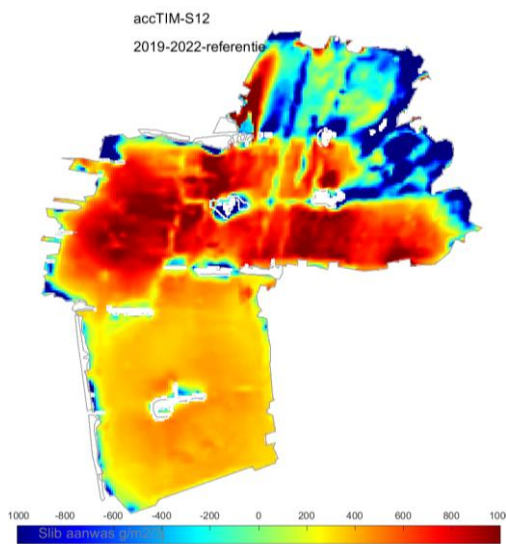
Figuur 9: Waargenomen dikte van de sliblaag op de bodem van de Loosdrechtse Plassen [9].



Figuur 10: Berekende stroomsnelheden bij westenwind op twee raaien.



Figuur 11: Berekende netto aanwas door sedimentatie en resuspensie over 2019, 2020 en 2021 (schaalmaximum is $1.0 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$). Productieterm $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$.



Figuur 12: Berekende netto aanwas door sedimentatie en resuspensie cumulatief over 2019 - 2021 (schaalmaximum is 1.0 kg/m^2). Productieterm $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$

3.3 Hoe groot is de jaarlijkse aanwas?

Op basis van de modelresultaten voor een productieterm van $5 \text{ g/m}^2/\text{d}$ is de jaarlijkse aanwas in luwtegebieden ca. 2.5 kg/m^2 . In laagdikte is 2.5 cm , aangenomen dat dit slib waterrijk is, een hoog gehalte organisch materiaal bevat en slecht consolideert, resulterend in een lage droge stof concentratie van ca. 100 kg/m^3 . In jachthavens is de aanwas vermoedelijk groter, zodat het model de aanwas onderschat. Wel is het aannemelijk dat in het model de aanwas optreedt over een groter gebied dan volgens waarnemingen. De totale aanwas van 18 kton/jaar is bij een droge dichtheid van baggerspecie van 100 kg/m^3 equivalent met een volume van $180.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$, dit is vermoedelijk (veel) meer dan wat jaarlijks in alle jachthavens van de Loosdrechtse Plassen gecombineerd wordt gebaggerd.

Op basis van de modelresultaten voor een productieterm van $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$ is de jaarlijkse aanwas in luwtegebieden ca. 0.3 kg/m^2 . In laagdikte is, aannemende dat dit waterrijke slib met een hoog gehalte organisch materiaal een gelconcentratie heeft van ca. 100 kg/m^3 en slecht consolideert, 0.3 cm . In jachthavens is de aanwas vermoedelijk aanzienlijk groter, zodat bij deze modelinstelling de lokale aanwas sterk kan worden onderschat. De totale aanwas van 3 kton/jaar is bij een droge dichtheid van baggerspecie van 100 kg/m^3 equivalent met een volume van $30.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$, een deel hiervan zal uiteindelijk terechtkomen in de jachthavens van de Loosdrechtse Plassen.

We hebben nu een brede range van slibaanwas op basis van de bandbreedte voor slibproductie van 0.2 tot $5 \text{ g/m}^2/\text{d}$, resp. aanslibbing van 0.3 tot 2.5 cm/jaar . Door middel van een historische analyse van de bodemligging van de Loosdrechtse Plassen in combinatie van de waargenomen aanwas in luwtegebieden als (goed afgeschermd) jachthavens of diepe putten kan worden vastgesteld welke instelling voor de slibproductie de meest realistische is. Op basis van de waargenomen aanslibsnelheid van voormalige zandwinputten is een aanslibbing van enkele cm/jaar realistischer dan enkele mm/jaar .

In volledig luwe gebieden kan alleen sedimentatie optreden en geen opwerveling (in jachthavens kan er door schroefstralen overigens toch opwerveling optreden – in dat geval zijn die dus niet volledig luw). De netto sedimentatieflux is dan gelijk aan de bruto sedimentatieflux S gegeven door het product van de sedimentconcentratie C en de valsnelheid w_s : $S = w_s \times C$. De gemiddelde sedimentconcentratie aan de bodem bedraagt orde 10 mg/l (tijdens luwe perioden minder, maar tijdens stormachtige perioden veel meer) en de valsnelheid orde 1 m/d . Het product hiervan is een sedimentatieflux van $10 \text{ g/m}^2/\text{d} = 3.5 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$. Dit is ongeveer gelijk aan de waarde die met het model wordt gevonden met een productieterm van $5 \text{ g/m}^2/\text{d}$. Maar indien de valsnelheid en/of de sedimentconcentratie bij de bodem wordt onderschat, is de bovengrens voor de aanwas hoger. Bovendien wordt de bijdrage van scheepvaart en mogelijke bodeminstabiliteit of dichtheidsstroming bij geulranden niet meegenomen in het model. Deze factoren kunnen leiden tot een versnelde aanwas.

4 Effectiviteit van maatregelen

4.1 Slibvangputten

De effectiviteit van slibvangputten is bepaald met een analytische methode in combinatie met modelberekeningen. Tabel 2 toont de bodemschuifspanning t.g.v. windgolven als functie van windsnelheid en putdiepte voor verschillende strijklengtes volgens een analytische methode [13].

Tabel 2: Bodemschuifspanning (Pa) als functie van windsnelheid en putdiepte (t.o.v. waterpeil) voor verschillende strijklengtes. Rode getallen geven het mogelijke optreden van resuspensie aan.

strijklengte 500 m

	putdiepte (m)	4	6	8	10	12	15	20
windkracht (Bft)	windsnelheid (m/s)	bodemschuifspanning (Pa)						
4	7							
5	10	0.001						
6	12	0.004	0.000					
7	15	0.014	0.001	0.000				
8	20	0.051	0.009	0.002	0.000			
10	25	0.116	0.029	0.008	0.002	0.001		
11	30	0.189	0.063	0.020	0.007	0.002	0.000	

strijklengte 1000 m

	putdiepte (m)	4	6	8	10	12	15	20
windkracht (Bft)	windsnelheid (m/s)	bodemschuifspanning (Pa)						
3	5							
4	7	0.001						
5	10	0.008	0.001					
6	12	0.021	0.003	0.000				
7	15	0.052	0.010	0.002	0.000			
8	20	0.135	0.041	0.012	0.004	0.001		
10	25	0.239	0.095	0.036	0.014	0.005	0.001	
11	30	0.351	0.166	0.076	0.034	0.015	0.005	0.001

strijklengte 2000 m

	putdiepte (m)	4	6	8	10	12	15	20
windkracht (Bft)	windsnelheid (m/s)	bodemschuifspanning (Pa)						
2	2							
3	5	0.001						
4	7	0.006	0.000					
5	10	0.033	0.006	0.001				
6	12	0.065	0.015	0.004	0.001			
7	15	0.131	0.042	0.013	0.004	0.001		
8	20	0.263	0.116	0.050	0.021	0.009	0.002	
10	25	0.400	0.214	0.111	0.056	0.029	0.010	0.002
11	30	0.530	0.323	0.189	0.109	0.062	0.027	0.006

De rode getallen in Tabel 2 geven waarden van de bodemschuifspanning waarbij in principe opwerveling mogelijk is ($\tau_c > 0.02$ Pa; conform de eerdere opwervelingsexperimenten die in het lab zijn uitgevoerd [1]). Hieruit blijkt dat voor putten die in de luwte van oevers of eilanden liggen, een putdiepte van 8 tot 10 m voldoende is om resuspensie door windgedreven golven niet te laten optreden. Bij een putdiepte van 6 m treedt enige resuspensie op bij storm (10 Bft).

In putten van 8 – 10 m diep die middenin de Loosdrechtse Plassen liggen kan al vanaf windkracht 8 Bft resuspensie optreden. Om dit te voorkomen moeten de putten tenminste 12 m diep zijn en tenminste 15 m indien ook bij storm geen resuspensie mag optreden.

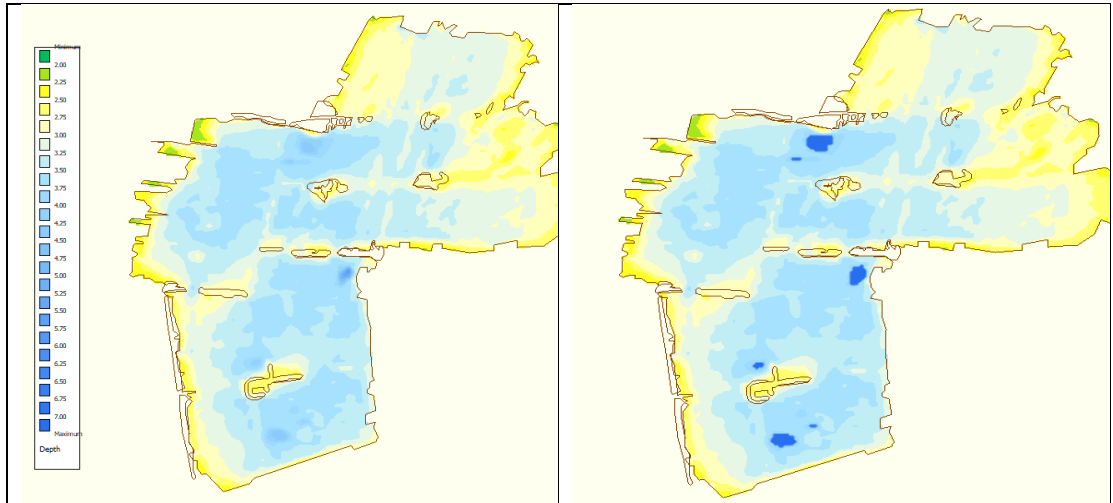
Putten zijn effectief om slib in te vangen waardoor elders minder slib beschikbaar is voor aanwas (b.v. in jachthavens). De vraag is hoe groot een put moet zijn en tot op welke afstand gelegen om aanslibbing elders effectief te verminderen.

Model

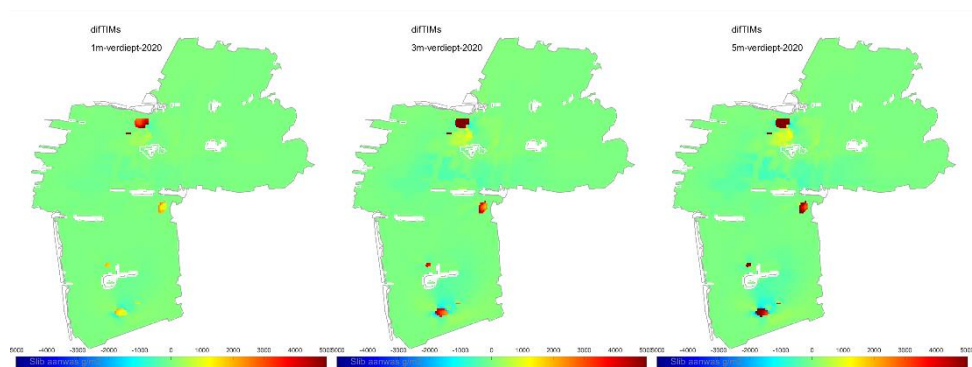
Om dit verder te onderbouwen en het effect van de putten op de omgeving te kwantificeren zijn ook modelberekeningen gemaakt waarin ten opzichte van de referentie de bodem lokaal is verdiept, zie Figuur 13. Het gaat om drie simulaties met 1, 3 en 5 m verdieping van bestaande putten tot respectievelijk 4, 6 en 8 m onder de waterbodem. Het areaal van de verdiepte putten is 5.5 ha, ongeveer 0.6% van het plasoppervlakte.

Uit Figuur 14 volgt dat de bruto sedimentatie (die in diepe putten gelijk is aan netto sedimentatie omdat opwerveling hierin niet optreedt) ongeveer $5 \text{ kg/m}^2/\text{jaar} = 50 \text{ ton/ha/jaar}$ bedraagt. Als wordt gesteld dat voor een significant effect op de concentratie 10% van flufflaag moet worden afgevangen, betekent dit dat een flink deel van de plassen (orde 10%) moet worden verdiept en dat kleine putten alleen een lokaal effect hebben. De berekende sedimentatieflux van $5 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$ komt goed overeen met de waargenomen sedimentatieflux in voormalige zandwinputten, zie §0.

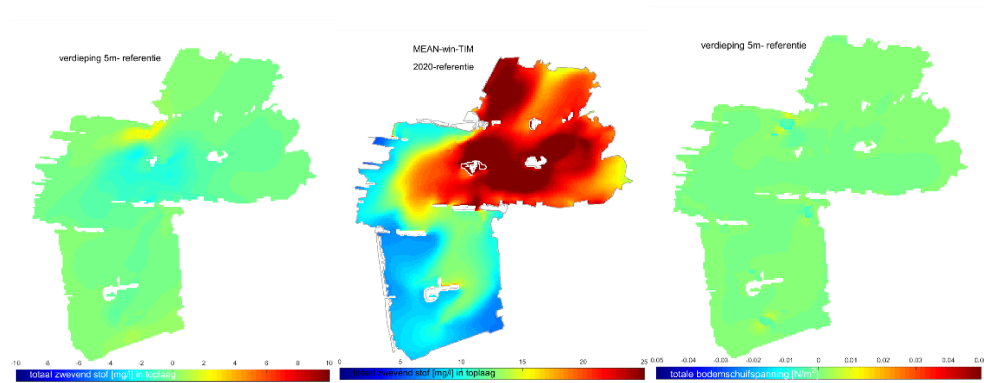
Dit wordt bevestigd door Figuur 15. Het berekende effect van de grootste verdieping is beperkt (gemiddeld voor de winterperiode enkele mg/l), zie Figuur 15 (links) wat een relatief klein (<10%) effect is in vergelijking met de berekende slibconcentratie (midden). Bovendien is in Figuur 15 (rechts) ook te zien dat de verdiepingen tot een verhoging van de bodemschuifspanning buiten de verdieping leidt waardoor daar erosie op gaat treden. In het zuidelijke deel zijn de effecten van verdieping kleiner. Dit komt doordat de noordelijke put door zijn grootte en ligging in een gebied met gemiddeld hogere slibconcentratie meer slib invangt dan de zuidelijke putten.



Figuur 13: Aangepaste bathymetrie. Links origineel van de referentie, rechts nadat delen dieper dan 3 m zijn verdiept tot 8 m onder waterbodem (in die figuren is de bodem t.o.v. NAP, waterstand -1.1 m +NAP)



Figuur 14: Verschil in aanslibbing in de bodem voor verdiepte minus referentie (na een jaar, 5 kg/m²/jaar) voor een verdieping van +1 m (links), +3m (midden) en +5 m (rechts).



Figuur 15: Verandering van de slibconcentratie in de waterkolom t.g.v. de verdiepingen (+5m) (links), ten opzichte van de gemiddelde slibconcentratie in de winter (midden). Rechts het verschil in bodemschuifspanning als gevolg van de verdiepingen.

4.2 Palenrijen

4.2.1 Westkant

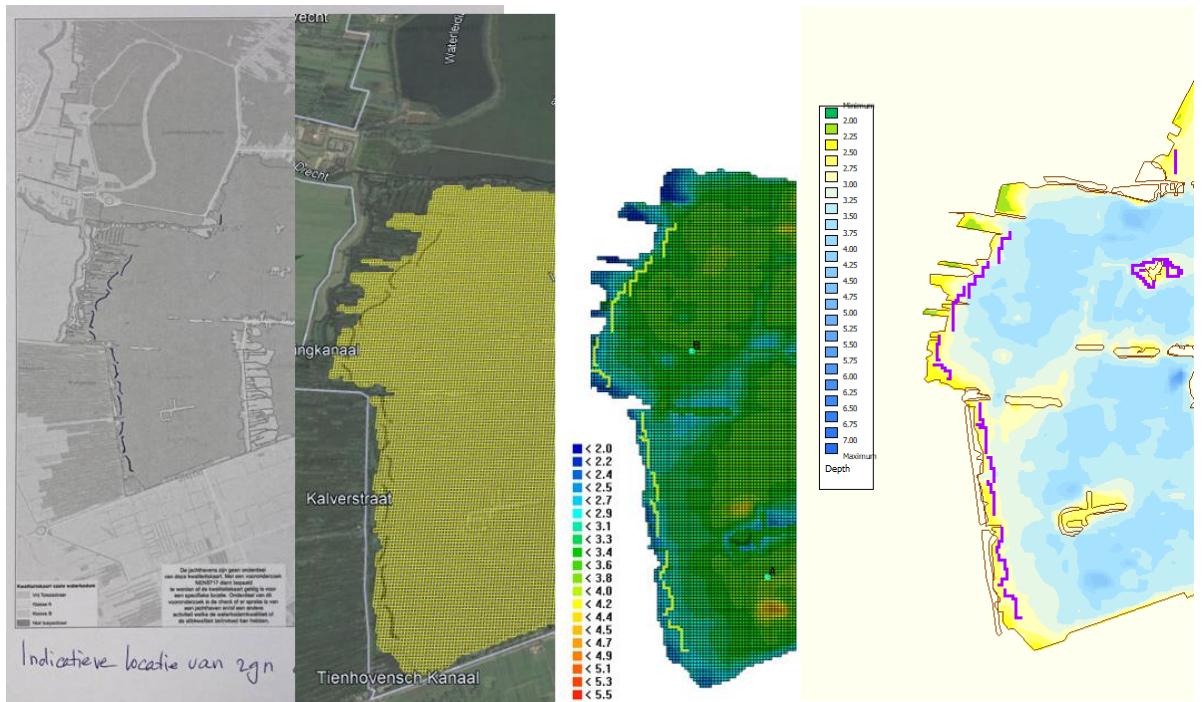
Een palenrij aan de westkant van de plassen (zie Figuur 16) vermindert de lokale resuspensie en vergroot de lokale depositie. De vraag is hoe groot de uitstralende werking is van deze maatregel. Vermoedelijk leidt de palenrij tot een vermindering van de aanslibbing in jachthavens in de directe omgeving, maar is het effect verder weg beperkt. Deze vraag wordt beantwoord door inzet van het slibmodel, waarbij een scenario met palenrij wordt vergeleken met een scenario zonder palenrij.

In het model zien we dat de palenrij de bodemschuifspanning tussen en in de nabijheid van de palenrij een beetje verlaagt (Figuur 17 linksboven). De palenrij is gedeeltelijk (20%) golf doorlatend waardoor reflectie van golven op de palenrij wat verder er vandaan tot verhoging van de bodemschuifspanning leidt. Het effect van de palenrij op zwevend stof (Figuur 17 rechtsboven) in het model is nihil.

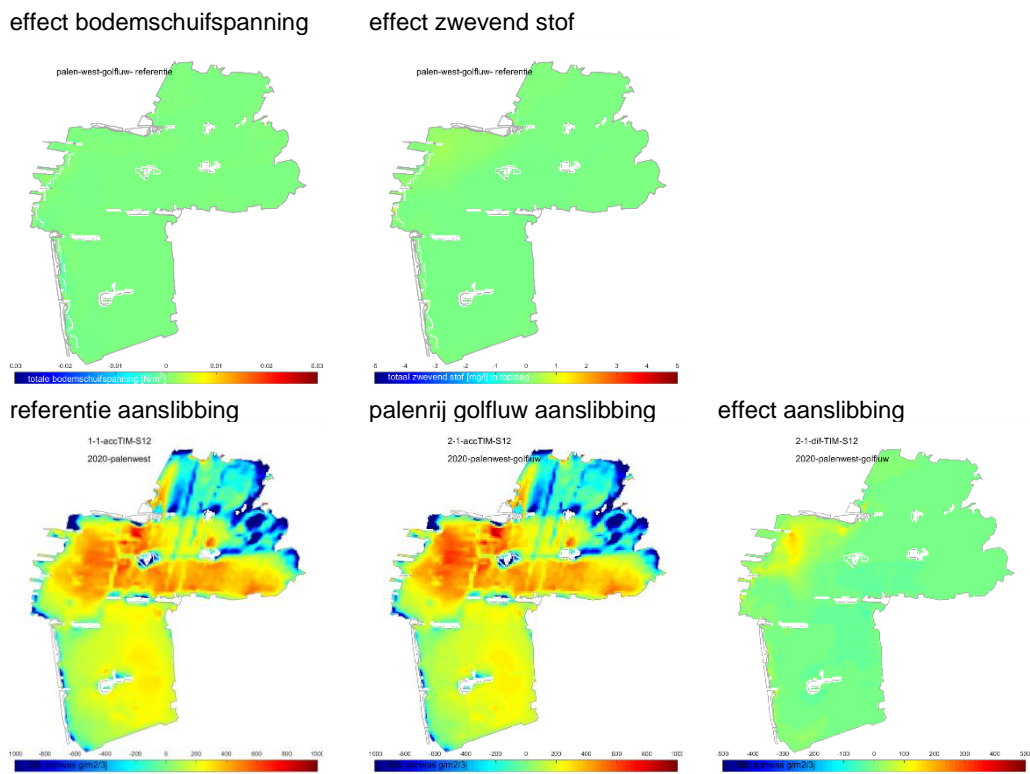
In het model zien we in de referentie (Figuur 17 linksonder) aan de westoever aan het eind van het jaar minder slib dan aan het begin. Dat zien we ook na 3 jaar rekenen. In het model erodeert de westoever dus als gevolg van ondiepte. Door het aanbrengen van de palenrij (Figuur 17 midden onder) verandert dit beeld op het oog nauwelijks. Het verschil tussen beide scenario's (Figuur 17 rechtsonder) laat een beetje (orde 100 g/m²/jaar) netto aanwas zien als gevolg van de palenrij.

Indien de palenrij volledig golf-reflecterend wordt verondersteld, verandert dit beeld (zie Figuur 18). Achter de palenrij is het effect op de bodemschuifspanning groter (Figuur 18 linksboven) en wordt in dit geval wel slib ingevangen (Figuur 18 midden en rechts onder), hetgeen leidt tot een verlaging van de slibconcentratie in de Loosdrechtse Plassen. De hoeveelheid ingevangen slib is echter te klein om een wezenlijk concentratie-verlagend effect te bewerkstelligen.

Naast het (geringe) effect op de slibconcentratie elders kunnen ook lokale effecten een argument zijn voor de aanleg van een palenrij, b.v. ter voorkoming van oevererosie.



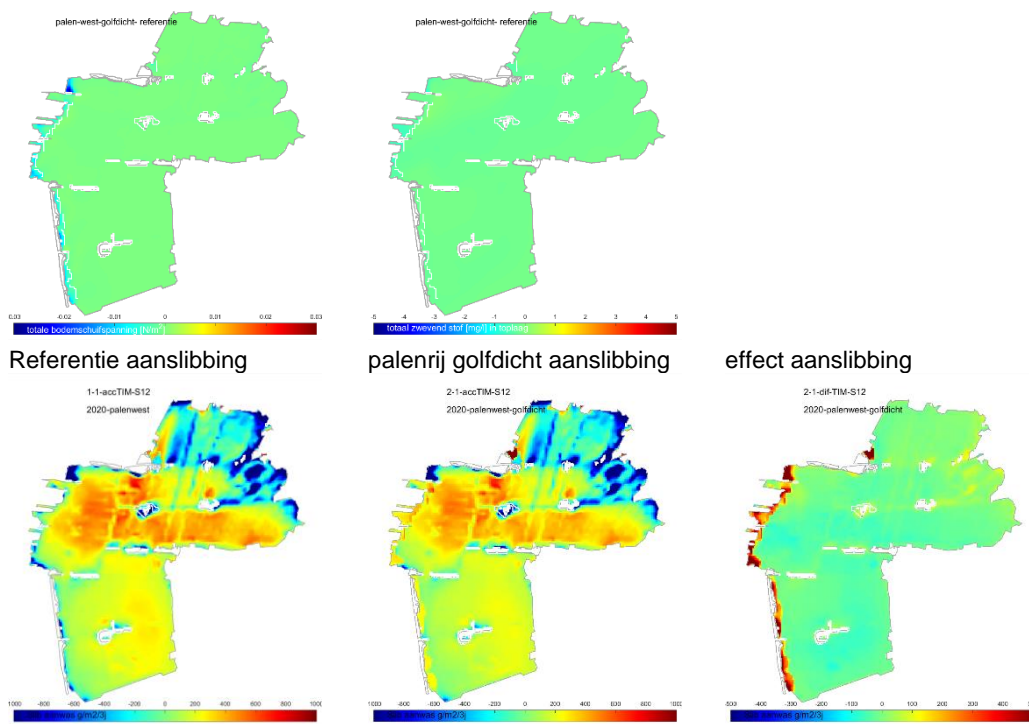
Figuur 16: Schets van palenrij zoals geïmplementeerd in het modelscenario palenrij – west (links de schets, midden in GoogleMaps en rechts in het rooster van het slibmodel met bodemligging (-1.1 m +NAP)



Figuur 17: Verandering bodemschuifspanning door de 20% golf doorlatende palenrij (linksboven) en verandering van de slibconcentratie daardoor (rechtsboven) en het effect op slibaanwas (g/m^2 per jaar) in de bodem in de referentie (linksonder) en met de palenrij (midden onder) en het verschil in aanwas a.g.v. de palenrij (rechtsonder) voor simulatiejaar 2020.

effect bodemschuifspanning

effect zwevend stof



Figuur 18: Verandering bodemschuifspanning door de **golfdichte** palenrij (linksboven) en verandering van de slibconcentratie daardoor (rechtsboven) en het effect op slibaanwas (g/m^2 per jaar) in de bodem in de referentie (linksonder) en met de golfdichte palenrij (midden onder) en het verschil in aanwas a.g.v. de palenrij (rechtsonder) voor simulatiejaar 2020.

4.2.2

Havenmondingen

Havens zijn typisch lager gelegen dan de omgeving zodat schepen niet worden blootgesteld aan sterke stroming en golven. Soms is de locatie van nature al laag, vaak wordt extra luwte gecreëerd door de aanleg van golfbrekers, strekdammen etc. Door deze luwtewerking zijn havens van nature effectieve slibvangen waarin in veel gevallen regelmatig baggeronderhoud noodzakelijk is.

Eerder is deze onderhoudsproblematiek al uitgebreid geanalyseerd, ook voor de Loosdrechtse Plassen [4-5]. De aanwas van slib in havens is het product van aanvoer en invang. Met maatregelen kan er worden gepoogd beide of één van beide termen te verminderen. De aanvoer kan worden verminderd door het slib al eerder af te vangen (b.v. in diepe putten of achter palenrijen zoals hiervoor besproken), of door de uitwisseling tussen de plas en de haven te verminderen. Door een haven volledig af te sluiten wordt de uitwisseling (en dus sedimentatie) nul, maar dit is niet mogelijk in combinatie met toegankelijkheid voor schepen. Wel kan de uitwisseling worden gereduceerd, maar hoe effectief dit is hangt samen met het percentage slibvangst. Als dit al zeer hoog is, betekent minder uitwisseling ook minder aanslibbing, maar bij een laag percentage leidt minder uitwisseling in veel gevallen tot een hoger percentage slibvangst en neemt het product van aanvoer en invang nauwelijks af. Minder uitwisseling betekent immers een grotere verblijftijd van water in de haven en meer gelegenheid voor slib om uit te zakken. Voor zeer fijn slib kan zelfs het omgekeerde effect optreden, namelijk dat een verminderde uitwisseling leidt tot een toename van de slibvangst. Dit kan b.v. het geval zijn als bij de huidige uitwisseling de stroomsnelheid in de haven nog voldoende is om deze zeer fijne fractie niet te laten bezinken, maar als dit bij een verminderde uitwisseling wel gebeurt. Het effect van maatregelen kan dus verschillend uitpakken voor fijne en grove slibfracties.

In Bijlage A van [5] wordt een rekenmethode gepresenteerd om de sedimentconcentratie c_h en aanslibbing S_h in een haven te berekenen als functie van het uitwisselingsdebiet Q , de valsnelheid w_s , havenareaal A en sedimentconcentratie in de plas c_p .

Uit een balans tussen aanvoer en sedimentatie geldt voor een stationaire situatie:

$$Q (c_p - c_h) = w_s c_h A$$

Hieruit volgt:

$$c_h = Q c_p / (w_s A + Q) \text{ en } S_h = w_s c_h A = c_p / ((1/Q) + (1/w_s A))$$

Het invangpercentage P gedefinieerd als de verhouding tussen sedimentatie en aanvoer is dan:

$$P = S_h / Q c_p = 1 / (1 + Q/w_s A)$$

Hieruit volgt dat voor kleine uitwisseling en grote valsnelheid P naar 1 gaat, d.w.z. volledige invang. Voor $Q/w_s A \gg 1$ geldt $P \approx w_s A / Q$, d.w.z. de invang is evenredig met de valsnelheid en omgekeerd evenredig met de uitwisseling.

De bovenstaande formuleringen worden toegepast voor de Loosdrechtse Plassen met de volgende kengetallen op basis van de modeluitvoer:

- Stroomsnelheid $U = \text{ca. } 0.1 \text{ m/s}$ (zie Figuur 19)
- Slibconcentratie aan bodem $c_p = \text{ca. } 50 \text{ mg/l}$ (zie Figuur 6, Figuur 20 en Figuur 21)
- Waterdiepte $h = 2 \text{ m}$
- Breedte havenmonding $B = 50 \text{ m}$
- Oppervlakte haven $A = 5 \text{ ha} = 50.000 \text{ m}^2$
- Valsnelheid slib: $w_s = 1 \text{ m/d} = 0.01 \text{ mm/s} = 10^{-5} \text{ m/s}$

Hieruit volgt dat $Q = U B h = 10 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 0.047$; $S_h = 0.024 \text{ kg/s} = 751 \text{ ton/jaar} = 15.0 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$. Vanwege de lage valsnelheid is P met 4.7% laag. Indien de uitwisseling met een factor 2 zou worden verminderd (bijvoorbeeld door een palenrij) geeft dit $Q = U B h = 5 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 0.091$; $S_h = 0.022 \text{ kg/s} = 717 \text{ ton/jaar} = 14.3 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$.

Bij de huidige lage valsnelheid is een luwtezone voor de havenmonding om te voorkomen dat slib de havenmonding bereikt, de haven instroomt en daar voor slibaanas zorgt niet effectief.

Vlak na stormen is de typische valsnelheid vermoedelijk hoger en is de luwtezone mogelijk effectiever. Opwervelingsexperimenten in het lab van bodemslib uit de Loosdrechtse Plassen tonen aan dat het merendeel van het opgewerkte slib een valsnelheid heeft van meer dan 10 m/d [12]. Indien de valsnelheid niet 1 maar 10 m/d bedraagt, geldt:

$Q = U B h = 10 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 0.33$; $S_h = 0.167 \text{ kg/s} = 5256 \text{ ton/jaar} = 105.0 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$. Vanwege de hogere valsnelheid is P met 33% ook hoger. Indien de uitwisseling met een factor 2 zou worden verminderd (bijvoorbeeld door een palenrij) geeft dit $Q = U B h = 5 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 0.50$; $S_h = 0.125 \text{ kg/s} = 3942 \text{ ton/jaar} = 78.8 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$. Hierbij wordt opgemerkt dat slib met een hoge valsnelheid slechts kort in suspensie is en dat de zeer grote sedimentatieflux per jaar daarom een vertekend beeld geeft.

Voor een hogere valsnelheid wordt de effectiviteit van maatregelen dus groter, dus kort na stormen kan een palenrij wel een deel van de zware (d.w.z. snel sedimenterende) slibfractie afvangen.

Er wordt opgemerkt dat de voor $w_s = 1$ m/d analytisch berekende sedimentatieflux van 15 kg/m²/jaar aanmerkelijk hoger is de met het numerieke model berekende gemiddelde sedimentatieflux van ca. 2.5 kg/m²/jaar. Dit komt doordat de jaargemiddelde bodemconcentratie in het model lager is dan 50 mg/l en er -uitgezonderd zeer luwe gebieden- af en toe toch opwerveling kan plaatsvinden.

Een palenrij vlakbij de havenmond is dus niet effectief voor fijn slib. Indien in een zeer groot gebied voor de huidige havenmond luwte wordt gecreëerd kan wel veel slib worden afgevangen voordat het de haven bereikt (veel grotere A). Dit betekent echter een verplaatsing en niet een oplossing van het probleem (aanwas in de luwtezone voor de haven i.p.v. in de haven) en door het vergrote areaal neemt de totale aanwas zelfs toe i.p.v. af. Bovendien vraagt dit om een investering in aanleg en onderhoud van de palenrij en is er mogelijk sprake van hinder voor scheepvaart en wordt het open karakter van de plassen wellicht aangetast.

4.3 Bellenschermen

Bellenschermen zijn potentieel effectief voor het opheffen van gelaagdheid en door gelaagdheid optredende dichtheidsstromingen. Gelaagdheid kan optreden door verticale gradiënten van temperatuur, saliniteit en slibconcentratie. Saliniteit speelt in de volledig zoete Loosdrechtse Plassen geen enkele rol, en door de beperkte waterdiepte is de invloed van temperatuurgadiënten op de (rest)stroming zeer beperkt: windgedreven stroming is veruit dominant. Qua slib is de concentratie in de waterkolom onder normale condities (veel) te laag om sedimentgedreven dichtheidsstromingen op te wekken. Bovendien is de valsnelheid van het slib zo laag dat de slibconcentratie aan de bodem nauwelijks hoger is dan aan de oppervlakte.

Een mogelijke uitzondering is tijdens stormen, wanneer de slibconcentratie flink kan toenemen, ook van fracties met een hoge(re) valsnelheid. In het Markermeer is dit wel waargenomen [11], al is de strijklengte hier veel groter en is een directe vergelijking met de Loosdrechtse Plassen hierdoor niet goed mogelijk. Tijdens stormen is de windgedreven stroming echter zo sterk dat deze mogelijke dichtheidsgedreven stromingen domineert (en er hierdoor met een bellenschermen weinig aan is te doen). In de uren tot dagen na stormen wanneer golven en stroming weer zijn afgenomen en het slib uitzakt zou transport door dichtheidsstroming wel een (waarschijnlijk beperkte) rol kunnen spelen en zouden bellenschermen kunnen voorkomen dat slibrijk water via de bodem een haven instroomt.

Bellenschermen zijn dus slechts een beperkte tijd van het jaar potentieel effectief, hun jaargemiddelde effectiviteit (d.w.z. de procentuele vermindering van de jaarlijkse sliblast) wordt laag ingeschat omdat ze tijdens stormen en tijden langere periodes met rustiger condities (wanneer opwerveling door scheepvaart vermoedelijk ook bijdraagt aan de sliblast) vermoedelijk weinig effectief zijn. Niettemin kunnen ze in de overgang tussen windrijke en -luwe perioden effectief zijn, wanneer de stroming en golven al zijn afgenomen maar er nog wel veel slib in de waterkolom aanwezig is.

Een voordeel is ook dat de aanleg- en energiekosten gunstig kunnen uitvallen doordat de openingen van de jachthavens typisch smal zijn (zie Figuur 23) en het aantal operationele uren per jaar niet groot is. De kosten van al in jachthavens operationele bellenschermen (o.a. Almere Haven) zijn hierbij een leidraad.

Bovendien wordt de toegang voor scheepvaart niet gehinderd en is het een lokaal goed zichtbare maatregel (indien in bedrijf of permanent via een informatiebord).

Voor een betere onderbouwing van de effectiviteit zijn metingen van stroomsnelheid en slibconcentratie over de verticaal in een havenmonding noodzakelijk, of een kleinschalige pilot met een bellenscherm.

Figuur 19 toont de stroomsnelheid voor verschillende windcondities. Bij een windsnelheid van 7 m/s loopt de stroomsnelheid lokaal op tot meer dan 0.1 m/s, terwijl bij een windsnelheid van 4 m/s de stroomsnelheid beperkt blijft tot ca. 0.05 m/s. Bij een windsnelheid van 1 m/s is de stroomsnelheid nog lager, ca. 0.02 m/s.

De onder deze condities optredende slibconcentraties zijn gegeven in Figuur 6. Figuur 20 en Figuur 21 geven inzicht in de gelaagdheid van slibconcentratie, d.w.z. de concentratiegradiënt tussen oppervlakte en bodem. Onder de hierin getoonde condities (zuidwestelijke wind, 7 m/s) is de slibconcentratie aan de bodem ongeveer 50% hoger dan aan de oppervlakte. Onderdrukking van uitwisselingsstroming met een bellenscherm is dan potentieel effectief. Tijdens rustige condities is de gelaagdheid veel minder, zie Figuur 22 (zuidwestelijke wind, 4 m/s).

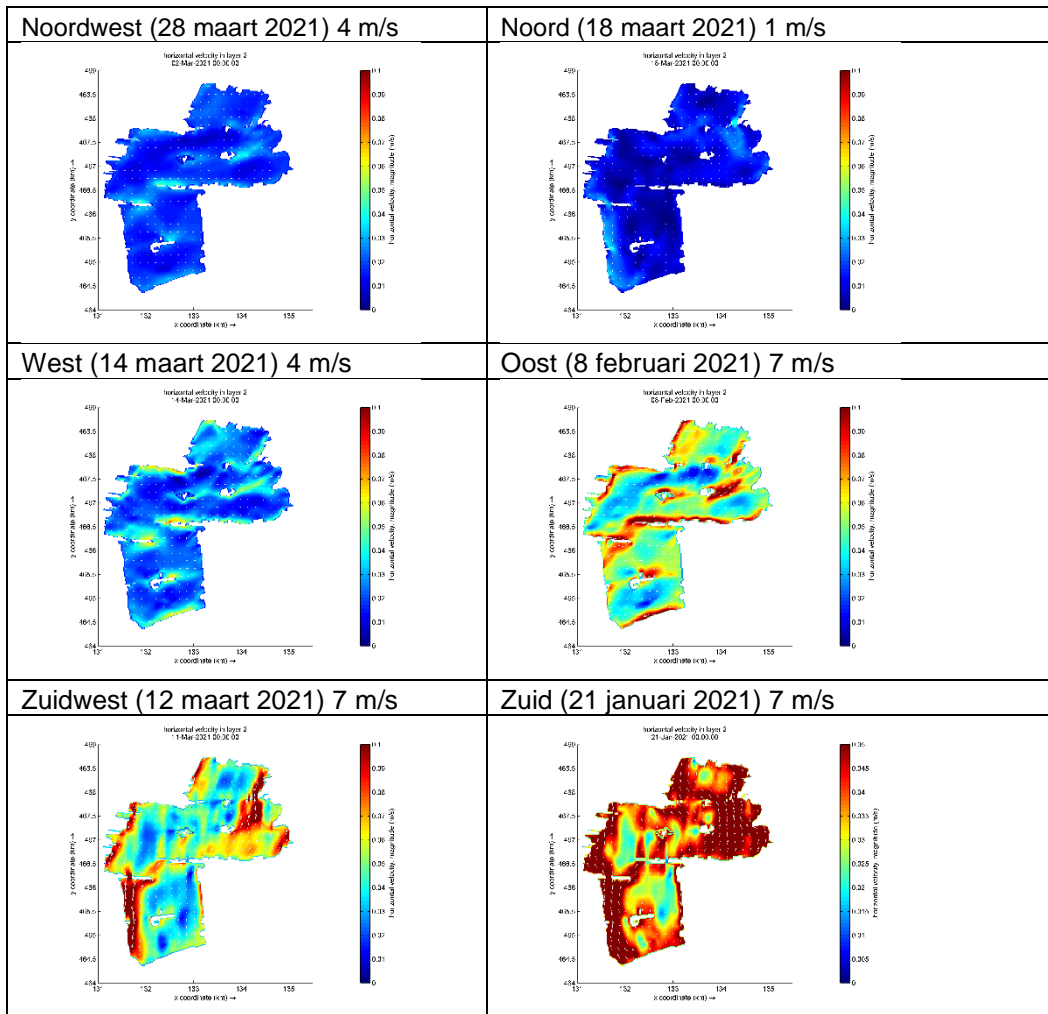
In Tabel 3 wordt deze analyse samengevat. De duur van een effectieve werking van een bellenscherm wordt geschat op ca. 28 dagen per jaar op basis van het windklimaat. Tabel 4 toont het benodigde luchtdebiet voor een bellenscherm voor een waterdiepte van 2 m voor verschillende lengtes, afhankelijk van de locatie en oriëntatie van het bellenscherm. Enkele voorbeelden hiervan zijn gegeven in Figuur 23.

Tabel 3: Overzicht werking bellenscherm

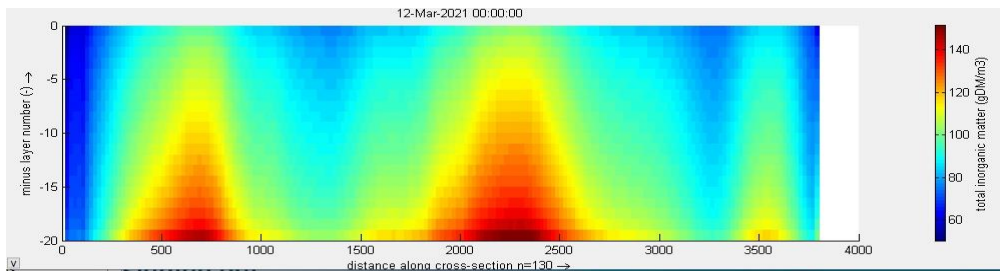
Periode	Aantal dagen	Effectiviteit	Oorzaak
Veel wind > 8 m/s (5 Bft)	8	slecht	Bellenscherm kan uitwisseling onvoldoende blokkeren
Overgang (4 Bft)	28	goed	Slibfractie met hoge valsnelheid aanwezig, bellenscherm kan uitwisseling voldoende blokkeren
Weinig wind < 5.5 m/s (3 Bft)	329	slecht	Alleen fijn slib in suspensie, geen gelaagdheid, minder uitwisseling leidt niet tot minder sedimentatie

Tabel 4: Benodigd luchtdebiet voor bellenscherm voor verschillende locaties en lengtes (zie Figuur 23) voor waterdiepte 2 m.

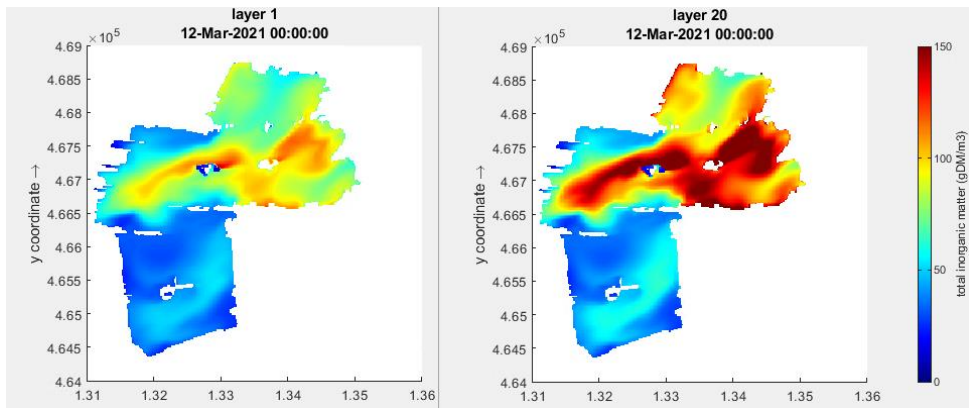
Locatie bellenscherm	Lengte [m]	Luchtdebiet in [L/s]	Luchtdebiet in [m ³ /s]
Havenmonding	6	1.68	0.0017
Rood lijn	20	5.60	0.0056
Groen lijn	45	12.61	0.0126



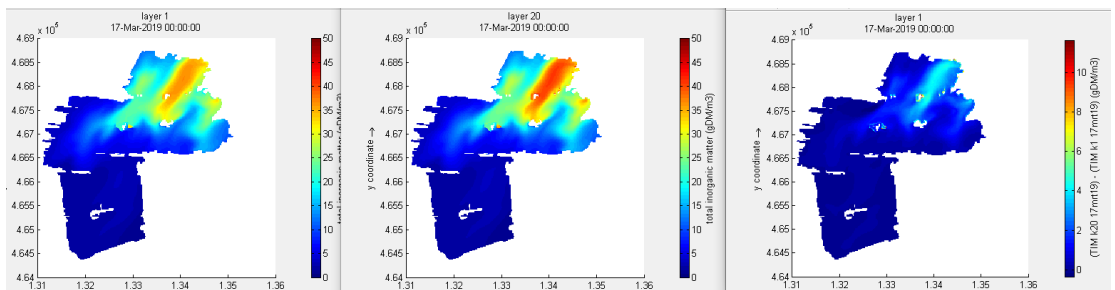
Figuur 19: Stroomsnelheid in m/s op een aantal specifieke momenten met verschillende windsnelheden en -richtingen conform Figuur 6.



Figuur 20: Gelaagdheid over traject (als in Figuur 3) ontstaat door erosie als gevolg van variaties in bodemligging.



Figuur 21: Gelaagdheid ruimtelijk als verschil tussen onderste en bovenste waterlaag. Wind ZW 7 m/s en tijdens de voorafgaande dag uurwaarden tot ZW 14 m/s (7 Bft).



Figuur 22: Gelaagdheid ruimtelijk als verschil zwevende stof concentratie tussen onderste (midden) en bovenste (links) waterlaag hier op 17 maart 2019. Verschil (rechts)aan de bodem 5 mg/l hoger t.o.v. van 35mg/l in de toplaag.



Figuur 23: Schets van mogelijke posities voor bellenscherm.

4.4 Bezanden

Bezanden is op korte termijn een effectieve maar kostbare maatregel. Om te voorkomen dat de bezande bodem na verloop van tijd opnieuw wordt afgedekt met een mobiele sliblaag dienen alle slibbronnen te worden weggenomen. De belangrijkste slibbron op de korte termijn, namelijk de bodem zelf, valt weg na bezanden, mits bezanden volledig ruimtelijk dekkend wordt uitgevoerd. Dit is kostbaar en bovendien kan door lokale erosie door b.v. schroefstralen, bodemberoering etc. toch weer een deel van de oorspronkelijke bodem bloot komen te liggen. Overige bronnen zoals oevererosie en de aanvoer van slibrijk water van elders zijn door bezanden niet of nauwelijks te beïnvloeden, hetgeen de geleidelijke 'herbesmetting' versterkt. Tenslotte verandert bezanden ook het ecologische karakter van de Loosdrechtse Plassen, hetgeen problematisch kan zijn vanuit natuurdoelstellingen en -wetgeving.

De slibproductie t.g.v. oevererosie en de aanvoer door petgaten zal geleidelijk zorgen voor de vorming en aangroei van een nieuwe flufflaag aan de bodem bovenop de aangebracht zandlaag. Dit zorgt op den duur weer voor vertroebeling. De snelheid waarmee deze flufflaag weer aangroeit wordt bepaald door de productieterm van slib. Indien deze van $0.2 \text{ g/m}^2/\text{d}$ bedraagt, betekent dit dat na 1 jaar 73 g/m^2 , hetgeen bij opwerveling in 2 m diep water een maximale concentratieverhoging van 37 mg/l geeft. Dit betekent dat er na 1 jaar nog altijd veel minder fluff aan de bodem zit en tijdens storm kan worden opgewerveld dan in de huidige situatie. Maar op een termijn van 5 – 10 jaar zal dit effect grotendeels zijn uitgewerkt.

De hoge kosten in combinatie met ecologische neveneffecten en beperkte werkingsduur maken deze optie weinig aantrekkelijk, hoewel de effectiviteit op korte termijn goed is, mits correct uitgevoerd.

5 Discussie

Uit de analyse van de slibdynamiek in de Loosdrechtse Plassen volgt hoeveel slib er afhankelijk van de windcondities opwervelt en waar dit vervolgens naartoe stroomt en wordt afgezet. Ook volgt hieruit wat de effectiviteit is van maatregelen om de aanwas van slib op ongewenste plekken zoals in jachthavens te verminderen.

Aannames over de valsnelheid van slib spelen hierbij een belangrijke rol. Vanwege de geringe dynamiek is de valsnelheid van zwevend slib in de Loosdrechtse Plassen gemiddeld zeer laag (minder dan 1 m/d), maar in perioden met harde wind is de valsnelheid vermoedelijk veel groter omdat dan ook grovere slibfracties kunnen worden opgewerveld [12].

Dit is van belang voor de beoordeling van de effectiviteit van slibreducerende maatregelen, doordat slib met een hoge valsnelheid veel makkelijker is af te vangen dan slib met een lage valsnelheid. In het numerieke model is hiermee rekening gehouden door de toevoeging van een grovere slibfractie, maar mogelijk is de valsnelheid hiervan nog te laag. Een hogere valsnelheid zou er bij de huidige modelinstellingen toe leiden dat deze fractie nauwelijks en slechts zeer kort opwervelt. Door herkalibratie kan dit worden ondervangen door de depositiesnelheid (d.w.z. de snelheid waarmee slib zich vanuit de onderste waterlaag afzet op de bodem) te verlagen ten opzichte van de valsnelheid (d.w.z. de snelheid waarmee slib zich door de waterkolom naar beneden beweegt). Hierdoor blijft deze slibfractie langer onderin de waterkolom aanwezig en kan over een grotere afstand worden getransporteerd en sterker bijdragen aan sedimentatie in luwtezones.

In het huidige numerieke model is door de lage val- en opwervelingssnelheid de uitwisseling tussen water en bodem beperkt, hetgeen in combinatie met een initieel slibpakket met een dikte van enkele decimeters leidt tot een lange verblijftijd in de bodem (vele jaren). Het model kan daarom niet worden doorgerekend tot dynamisch evenwicht en de modelkalibratie is alleen geldig voor de eerste paar jaar na T0, waarna de berekende achtergrondconcentratie van slib geleidelijk afneemt en niet meer goed overeenkomt met waarnemingen. Een kwantitatieve beoordeling van modelscenario's voor slibreducerende maatregelen is daarom alleen voor de eerste paar jaar mogelijk.

Tijdens rustige condities speelt de mogelijke onderschatting van het transport van een zware slibfractie geen rol doordat het nog in de waterkolom aanwezige slib een zeer lage valsnelheid heeft. Onder deze omstandigheden is het zeer lastig om met lokale en kleinschalige maatregelen de slibaanwas te verminderen. Alleen zeer grootschalige ingrepen op systeemniveau zijn dan effectief, zoals luwtestructuren of diepe putten die een groot deel van de oppervlakte van de Loosdrechtse Plassen bestrijken. Dergelijke ingrepen zijn kostbaar en tasten bovendien het huidige karakter van de plassen aan.

Een beperking bij de beoordelingen van maatregelen is dat de huidige slibaanwas in jachthavens of andere luwtezones niet goed bekend is. De aanbeveling is om deze beter in kaart te brengen. Wel is de historische slibaanwas in voormalige zandwinputten bekend en het model reproduceert de waargenomen aanwas goed.

6 Conclusies

Teruggrijpend op de hoofdvragen van deze studie zijn de conclusies

Omtrent de huidige slibaanwas

1. Hoeveel slib is er in het model in beweging?

Dit hangt sterk af van de windcondities. Per kwartaal is het slibtransport over de grenzen van deelgebieden circa 2000 – 4000 ton. Dit is equivalent met circa 1 – 1.5 ton per strekkende meter per kwartaal.

2. In welke gebieden treedt voornamelijk opwerveling van slib op (als gevolg van golven) en waar voornamelijk sedimentatie (in de huidige situatie)?

Ook dit hangt sterk af van de windcondities. De meeste accumulatie van slib vindt plaats in de luwte bij eilanden en oevers. Gemiddeld genomen is er meer opwerveling aan de noord-oostelijke oever en sedimentatie aan de noordwestelijke oever. In het zuidelijke deel van de plassen is de dynamiek wat minder vanwege de kleinere strijklengte. Langs de westelijke oever treedt hier in het model geen slibaanwas meer op omdat de bodemschuifspanning daarvoor te hoog is vanwege de geringe diepte.

3. Hoe groot is de jaarlijkse aanwas van slib in de havens bij de oevers van de Loosdrechtse Plassen in de huidige situatie zonder maatregelen en onder welke condities treedt de meeste aanwas op?

De jaarlijkse aanwas is circa 2.5 kg/m², hetgeen equivalent is met een laagje waterig, ongeconsolideerd slib van enkele cm. De meeste aanwas treedt op na afloop van windrijke periodes. De genoemde aanwas is representatief voor fijn slib met een lage valsnelheid. Mogelijk wordt de bijdrage van een grovere slibfractie die sneller sedimenteert onderschat, zowel in de beschikbare metingen als in het numerieke model. Bovendien kunnen ook dichtheidsstromingen en opwerveling door scheepvaart bijdragen aan de aanwas. De werkelijke aanwas kan dus groter zijn, maar er zijn onvoldoende waarnemingen beschikbaar om dit te verifiëren.

Omtrent effectiviteit van maatregelen

1. Hoe diep moet een geul zijn om effectief slib af te vangen, zodanig dat het bij wind vanuit een andere kant niet alsnog weer opwervelt?

Dit is afhankelijk van de lokale strijklengte maar een put van 8 tot 10 m diep (t.o.v. de waterstand) is afdoende om opwerveling te voorkomen.

2. Hoe diep moet een geul zijn als er geen windgolven zijn die opnieuw voor erosie zouden kunnen zorgen?

Zonder windgolven is een putdiepte van enkele meters t.o.v. de omringende bodem al voldoende om slib in te vangen, tenzij de lengte-breedteverhouding van de put groot is en de lange zijde is georiënteerd in de windrichting. De put (of eigenlijk: geul) kan dan stroming aantrekken. Hoewel diepe putten effectief slib invangen, is het benodigde areaal om de hoeveelheid zwevend slib in de plassen merkbaar te verlagen erg groot (>10%).

3. *Hoe effectief is een palenrij aan de westkant die stroming tussen de palen doorlaat, maar de energie uit de golven haalt?*

Hierdoor wordt lokaal achter de palenrij meer slib vastgelegd en wordt lokale opwerveling onderdrukt. Dit resulteert in een lokale verlaging van de slibconcentratie en het slibtransport. Het effect op grotere schaal is echter klein, in op afstand gelegen jachthavens neemt de sliblast nauwelijks af. Maar indien een palenrij ook een lokaal belang dient (b.v. vermindering van oevererosie) is het kleine plusje elders een extra argument in de afweging.

4. *Hoe effectief is een tijdelijke dichte palenrij voor een havenmondning?*

Deze maatregel is niet effectief tenzij een zeer groot gebied voor de havenmondning wordt afgeschermd. Dit komt door de lage valsnelheid van het slib onder gemiddelde condities.

5. *Hoe effectief is een bellenbaan in de havenmondning tijdens storm?*

Tijdens storm is een bellenbaan niet effectief omdat een bellenbaan een sterke windgedreven stroming niet goed kan tegenhouden. Maar na een storm, wanneer de stroming afneemt maar het opgewervelde slib nog niet is bezonken, is een bellenbaan vermoedelijk wel effectief.

6. *Is bezanden van de waterbodem zinvol om aanslibbing jachthavens te beperken?*

In principe wel omdat een volledig met zand afgedekte waterbodem opwerveling van slib effectief onderdrukt. Maar praktisch gezien is het moeilijk en kostbaar om gebiedsdekkend te bezanden. Bovendien zal zich door de productie van nieuw slib geleidelijk toch weer een nieuwe flufflaag op de zandbodem vormen, waarna opwerveling en slibaanwas weer toeneemt. Dit is dus een tijdelijke maatregel.

Voor meer detail en discussie over deze antwoorden zie Hoofdstuk 3, 4 en 5.

Uit het onderzoek volgen de volgende aanbevelingen:

- Vergelijking van de modelresultaten m.b.t. sedimentatiesnelheid met waarnemingen van de sedimentatiesnelheid in jachthavens, toegangsgoulen en/of luwtegebieden. Door middel van een historische analyse van de bodemligging van de Loosdrechtse Plassen in combinatie van de waargenomen aanwas in luwtegebieden zoals (goed afgeschermd) jachthavens of diepe putten kan worden vastgesteld welke instelling voor de slibproductie de meest realistische is.
- Indien op basis hiervan herkalibratie wenselijk blijkt, kan de verblijftijd en het transport van een slibfractie met een hoge(re) valsnelheid worden vergroot door de depositiesnelheid (d.w.z. de snelheid waarmee slib zich vanuit de onderste waterlaag afzet op de bodem) te verlagen ten opzichte van de valsnelheid (d.w.z. de snelheid waarmee slib zich door de waterkolom naar beneden beweegt). Hierdoor blijft deze slibfractie langer onderin de waterkolom aanwezig en kan over een grotere afstand worden getransporteerd en sterker bijdragen aan sedimentatie in luwtezones.

A Referenties

- [1] Roskam, G.D. en Boderie, P.M.A. (2021). Loosdrecht - Monitoring voor de validatie van het slibmodel. Deltares-rapport 11201773-006-ZWS-0007.
- [2] Genseberger, M. en P.M.A Boderie (2019) Bouw slibmodel Loosdrechtse Plassen en verkennende simulaties voor pilot luwte-effecten. Deltares-rapport 11201773-004-ZWS-0003.
- [2b] Boderie en Genseberger (2022). Loosdrechtse Plassen - simulaties luwte-effecten met verbeterd slibmodel. Deltares rapport 11201773-006-ZWS-0011.
- [3] Kessel, T. van (2013). Notitie omgevingsfactoren aanslibbing geulen Markerwadden. Deltares memo 1207623.
- [4] Weck, A.W. van der, J.M. Cornelisse, C. Kranenburg, N.M.M. de Wit (1997). Vermindering aanslibbing jachthavens. WL Delft Hydraulics rapport Z1036.
- [5] Holland, G, S. van Schijndel, M. Bijvelds (2000). Vermindering aanslibbing jachthavens. Havens aan meren en plassen. WL Delft Hydraulics rapport Z2374.
- [6] Eysink, W.D. (2004). SILTHAR version 4.2 - a mathematical program for the computation of siltation in harbour basins: user manual WINDOWS-PC program. WL Delft Hydraulics rapport 8.6250.
- [7] Schijndel, S. van en T. van Kessel (2001). Effecten doorgang Zandeiland 2 op water- en golfbeweging Vinkeveense Plassen. WL Delft Hydraulics rapport Q3045.
- [8] Ellis Penning, Menno Genseberger, Rob Uittenbogaard en Gerben van Geest (2009). Aanvullingen bij Besluit-MER verdiepingen Loosdrechtse Plassen, Deltares rapport Q4700.
- [9] Indikkingssnelheid veenslib en stabiliteitsmetingen (2018). Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners B.V.
- [10] Uittenbogaard R.E., W.E. Penning, M.P. van der Vat (2008). Bijdrage MER - verdiepingen Loosdrechtse Plassen : expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater lichtklimaat. WL Delft Hydraulics rapport Q4461.04.
- [11] Vijverberg, T. J.C. Winterwerp, S.G.J. Aarninkhof & H. Drost (2010). Fine sediment dynamics in a shallow lake and implication for design of hydraulic works. Ocean Dynamics DOI 10.1007/s10236-010-0322-2.
- [12] Roskam, G. (2019). Resultaten experimenten Loosdrecht. Deltares memo 11201773-003-ZWS-0003.
- [13] Kessel, T. van en M. Vonk (1999). Handboek zoetwaterslib. WL Delft Hydraulics rapport T2289/T2343.
- [14] Sections 2.5.1 and 2.52 on Transmission and Reflection of SWAN Scientific and Technical Documentation. Cycle III version 41.41 (2022). Delft University of Technology. (<https://swanmodel.sourceforge.io/download/zip/swantech.pdf>).

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