

Loosdrechtse Plassen - simulaties luwte-effecten met verbeterd slibmodel

Loosdrechtse Plassen - simulaties luwte-effecten met verbeterd slibmodel

Auteur(s)

Pascal Boderie

Menno Genseberger

Loosdrechse Plassen - simulaties luwte-effecten met verbeterd slibmodel

Opdrachtgever	Waternet
Contactpersoon	Dhr. J. van Alphen
Referenties	Genseberger, M. (2020). Offerte veldmetingen, modelverbetering en scenario berekeningen Loosdrechse Plassen Kenmerk 11201773-006-ZWS-0003
Trefwoorden	3D-model, slib, zwevend stof, onderwater licht, extinctie, PAR, UITZICHT

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	09-03-2023
Projectnummer	11201773-006
Document ID	11201773-006-ZWS-0013
Pagina's	38
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Pascal Boderie	
	Menno Genseberger	

Samenvatting

Het Hoogheemraadschap Amstel, Gooi en Vecht (AGV) wil maatregelen treffen om de waterkwaliteit in de Loosdrechtse Plassen (LP) te verbeteren, zodat met name herstel van de waterplantenontwikkeling op de bodem van de plassen mogelijk wordt. Als maatregel om tot deze kwaliteitsverbetering te komen worden luwtestructuren overwogen. Hiermee wordt de opwerveling van slib onder invloed van door wind opgewekt golven beperkt. Dit kan het onderwaterlichtklimaat verbeteren doordat meer licht de waterbodem bereikt zodat waterplantengroei zich kan herstellen.

In eerder experimenteel onderzoek [1] is met een slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen de effectiviteit van luwtestructuren verkend. Om de onzekerheden in het slibmodel te verkleinen zijn onder andere hoogfrequente metingen op één locatie in de nabijheid van eiland 'Hoek' uitgevoerd en zijn ruimtelijk metingen verzameld [2]. Hiermee is in deze studie het slibmodel verder gekalibreerd. Volledige validatie van het slibmodel was niet mogelijk omdat daarvoor de meetperiode met consistente metingen te kort is door uitval van de wind- en lichtsensor. Het verbeterde slibmodel is toepasbaar voor de beoordeling van het effect van luwtestructuren omdat de voorspelde lichtuitdovingscoëfficiënt in de relevante range van waarden (1.5 tot 2 1/m) redelijk in lijn is met de gemeten waarden. Om de onzekerheid in het model verder te reduceren wordt aanbevolen om extra ruimtelijke validatie uit te voeren.

Het verbeterde slibmodel is toegepast voor de beoordeling van de effectiviteit van zes luwtevarianten. De referentieperiode is gelijk aan de meetperiode (januari t/m mei 2021). Het berekende effect van luwtemaatregelen (uitgedrukt in extra areaal met meer dan 4% bodemlicht, wat minimaal noodzakelijk is voor de ontwikkeling van waterplanten) is beperkt en is minder sterk dan berekend in 2009 [4], met name omdat de referentiesituatie helderder is. Voldoende licht op de waterbodem komt alleen voor in de ondiepere zones in het noorden en noordoosten van de plas, ook voor de zwaarste luwtevariant. De kansen om het potentieel geschikt areaal voor waterplanten te vergroten liggen vooral in de ondiepere zones aan de oostkant van de 1^e, 2^e en 3^e plas. Lokaal aanbrengen van luwtestructuren aan de oostkant (scenario 3b) heeft meer effect dan de draagvlakvariant (sc05). Luwtemaatregelen aan de oostkant zijn het meest effectief voor vergroting van het potentieel geschikt areaal voor waterplanten.

Er is een groot verschil in areaal met meer dan 4% licht op de bodem berekend tussen de winter- en voorjaarsperiode van 2021. In de winterperiode zorgt frequente opwerveling van slib in combinatie met traag bezinken voor langdurig troebel water. Luwtestructuren leiden in die omstandigheden wel tot meer helderheid maar niet tot voldoende extra areaal met meer dan 4% licht aan de bodem. De voorjaarsperiode van 2021 was relatief luw en in het model daardoor relatief helder, waardoor luwtestructuren een beperkt effect hebben. Het totaal areaal met meer dan 4% licht aan de bodem varieert van 223 ha (referentie) tot 279 ha voor de zware variant. In alle berekeningen (inclusief referentie) is al meer dan een kwart van het plasareaal potentieel geschikt voor ontwikkeling van waterplanten.

Het is te overwegen om het verbeterde slibmodel nog een keer toe te passen voor een langere en daardoor meer representatieve referentieperiode. Het gaat hier om het doorrekenen van (een beperkt aantal) varianten voor zo'n langere periode (bijvoorbeeld de recente jaren 2018-2021). Daarmee wordt de invloed die toevallige weersomstandigheden in de meetperiode (januari – mei 2021) op de resultaten hebben verkleind.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Motivatie	6
1.3	Leeswijzer	7
2	Metingen	8
3	Modelverbetering	11
3.1	Scope	11
3.2	Aanpak kalibratie	12
3.2.1	Simulatieperiode	12
3.2.2	Lokale forcering	12
3.2.3	Modelrooster	12
3.2.4	Stroming	13
3.2.5	Golfmodel	13
3.2.6	Instellingen golf- en stromingsmodel	14
3.2.7	Troebelheid en slib	15
3.2.8	Onderwater- en bodemlicht	17
3.3	Resultaten	18
3.3.1	Slib	18
3.3.2	Licht	19
3.4	Toepasbaarheid slibmodel	20
4	Modeltoepassing – scenario's	21
4.1	Beschrijving varianten	22
4.2	Beoordeling luwte effect varianten	24
4.2.1	Vergelijkingsmethode	24
4.3	Resultaten	25
4.3.1	De referentieperiodes	25
4.3.2	Effect van luwte in scenario's – ruimtelijk	29
4.3.3	Effect van luwte in scenario's – arealen	32
4.3.4	Conclusie effect luwtestructuren	33
5	Conclusie en aanbevelingen	34
5.1	Verbeterde slibmodel	34
5.2	Effectiviteit luwtestructuren	34
5.3	Aanbevelingen	35
	Referenties	36

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het Hoogheemraadschap Amstel, Gooi en Vecht (AGV) wil maatregelen treffen om de waterkwaliteit in de Loosdrechtse Plassen (LP) te verbeteren, zodat met name herstel van de waterplantenontwikkeling op de bodem van de plassen mogelijk wordt. Als maatregel om tot deze kwaliteitsverbetering te komen worden *luwtestructuren* overwogen waarmee de opwerveling van zwevende stof onder invloed van door wind opgewekt golven wordt beperkt en het onderwaterlichtklimaat kan verbeteren, waardoor meer licht de waterbodem bereikt. In samenhang met maatregelen gericht op het verminderen van de fosfaatbelasting waardoor algengroei vermindert, verwacht AGV dat de waterplantengroei zich kan herstellen.

Een beter lichtklimaat draagt bij aan de ontwikkeling van meer waterplanten op de waterbodem. Het lichtklimaat is afhankelijk van de mate van uitdoving van licht in de waterkolom. De mate van lichtuitdoving is gerelateerd, maar niet een-op-een gelijk aan, de hoeveelheid zwevend slib in de waterkolom. Vermindering van de zwevend slib concentratie draagt bij aan een verbeterd lichtklimaat. Een manier om dit te bereiken is stimuleren dat slib in de waterkolom sneller bezinkt (meer sedimentatie) en dat slib op de bodem minder vaak opwervelt (minder resuspensie). Een luwtestructuur draagt hieraan bij door (1) vermindering van de strijklengte waardoor golfkrachten afnemen en (2) beïnvloeding van stroming.

1.2 Motivatie

In eerder experimenteel onderzoek (Genseberger en Boderie, 2019 [1]) is met een eerste versie van een slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen de effectiviteit van luwtestructuren verkend. De studie heeft laten zien dat ongeveer 90% van het zwevend stof in Loosdrecht beïnvloed kan worden door een luwtemaatregel (luwtestructuren "I74" uit het gebiedsakkoord) maar dat circa 10% van het zwevend stof traag bezinkt, hierdoor minder door luwte wordt beïnvloed maar het lichtklimaat relatief sterk beïnvloedt. Onzeker is hoe deze verdeling doorwerkt in het onderwaterlichtklimaat. Om de onzekerheden in het slibmodel te verkleinen is onder andere hoog frequente monitoring op één locatie in de nabijheid van eiland 'Hoek' uitgevoerd [2].

Het doel van deze monitoring [2] was om de relatie tussen wind, waterbeweging, zwevend slib en lichtklimaat te kwantificeren zodat het slibmodel daarmee kan worden gekalibreerd en gevalideerd. Monitoring van het effect van luwte, gecreëerd door het eiland Hoek, is een (complexere) afgeleide doelstelling en beschreven in [2]. Deze rapportage beschrijft hoe op basis van de meetresultaten het bestaande slibmodel verbeterd en getoetst is zodat daarmee betrouwbaarder het effect van (luwte)maatregelen kan worden ingeschat. Met het verbeterde slibmodel is het effect van een aantal inrichtingsvarianten met luwtestructuren op het onderwater lichtklimaat doorgerekend.

Deze rapportage vormt tezamen met [2] het product van de opdrachtverlening [20].

1.3 Leeswijzer

In dit rapport worden kort de resultaten van de meetcampagne [2] samengevat en wordt aangegeven op welke manier een selectie van de metingen voor de verbetering van het slib model zijn gebruikt (hoofdstuk 2). Hoofdstuk 3 beschrijft de resultaten van het model en de manier waarop de kalibratie werd aangepakt. In hoofdstuk 4 is het verbeterde model toegepast door het effect van een zestal varianten van (combinaties) van luwtestructuren te berekenen. Daarbij wordt in essentie naar slib en onderwater licht gekeken en wordt kort vergeleken met inschattingen op basis van eerdere analyses [6]. Conclusies en aanbevelingen staan in hoofdstuk 5.

2 Metingen

Van 17 december 2020 tot en met 7 mei 2021 zijn continue metingen uitgevoerd op één locatie ten westen van het eiland Hoek in de Loosdrechtse Plassen. De metingen waren gericht op het in kaart brengen van de relatie tussen wind, waterbeweging, zwevend stof en de uitdoving van licht onder water. Op basis van deze meetgegevens kan het slibmodel van het gebied worden gekalibreerd en gevalideerd. Om zicht te krijgen op de variatie binnen de Loosdrechtse Plassen, zijn gedurende de meetperiode op twee momenten 16 locaties in de plas bemonsterd. Zie Figuur 1 voor de locaties waar is gemeten.

Tabel 1 geeft een overzicht van de variabelen die zijn gemeten, in de laatste kolom is aangegeven welke daarvan voor vergelijking met het model in deze rapportage worden gebruikt.

De meetreeks van met name de wind en de lichtmetingen vertoont door falen van de sensoren en of elektronica flinke gaten (uitval orde 30-50%) en het signaal van de troebelheid en lichtsensor is in de tijd niet stabiel door onder meer vervuiling.

Golfmetingen in relatie tot gemeten wind laten zien dat de meetpaal in de luwte ligt van zowel het eiland als een palenrij aan de zuidkant van het eiland. Voor de geëxponeerde windrichtingen is er een duidelijk verband tussen wind en golfhoogte en tussen golfhoogte en troebelheid. Door de keuze van de locatie van de meetpaal in de luwte van het eiland is daarnaast ook een indruk verkregen van de luwtewerking op golfhoogte. De relatie tussen golfhoogte en gemeten troebelheid ter plaatse van de meetpaal wordt een deel van de tijd beïnvloed door opwerveling elders in de plas. De dataset is daarmee geschikt voor evaluatie van het slibmodel.

Het lichtsignaal onder water (PAR) correleert redelijk met de troebelheid volgens de bovenste sensor. Uit continue lichtmetingen van PAR op drie dieptes op de meetpaal is het voor een deel van de meetperiode mogelijk gebleken een continue signaal van de lichtuitdoving (K_d -PAR) af te leiden. De foutenmarge in deze continue K_d is veel groter dan die van de handmatige veldmetingen op dezelfde locatie.

Ruimtelijke metingen van zwevend stof laten zien dat het enige tijd duurt voordat na een verstoring door wind de troebelheid toeneemt en bevestigen net als de gemeten troebelheid op de meetpaal dat het meerdere dagen duurt voordat het watersysteem na een verstoring weer helder is.

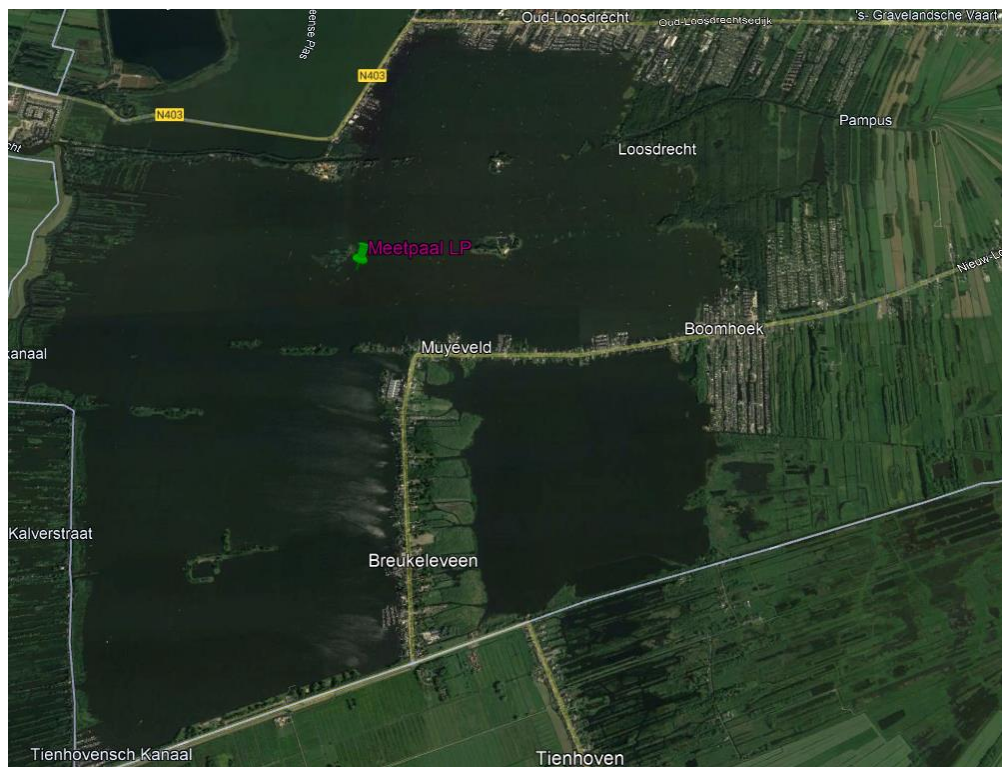
Voor verdere details en toelichting wordt verwezen naar de rapportage over de veldmetingen [2]

Tabel 1 Samenvatting veldmetingen

Bron ¹	Sensor	Variabele(n)	Diepte ^a	Gebruik ²
meetpaal	Lichtsensoren (LI-COR 192 met wisser)	PAR	25, 75 en 125 cm	
		Extinctie coëfficiënt Kd-PAR (1/m)	- dieptegemiddeld - 3 trajecten (25-75, 75-125, 125-175 cm)	Kd-PAR vs slibmodel (UITZICHT)
meetpaal	ADCP (Teledyne RiverPro)	Stroomsnelheid (m/s) stroomrichting (deg)	15 warnemingen gelijkmatige stappen (11 cm) over diepte verdeeld	stroomsnelheid en -richting vs FLOW
meetpaal	Windsensor (Gill, WindSonic)	Windsnelheid (m/s) windrichting (deg)	4,4 m boven water	Forcering van FLOW, WAVE
meetpaal	Multiprobe sensoren (Aqua TROLL 500)	Troebelheid (NTU) Temperatuur (°C) ORP (mV) pH (-log(H ⁺))	80 en 200 cm	Troebelheid vs DWAQ Temperatuur vs FLOW
	Drukopnemer (Druck PMP5003)	Golfhoogte: Hm0, Hrms (m) Golfperiode: Tp, Tm01, Tm-10 (s)	53 cm	Hm0 vs WAVE
ruimtelijk	Standaard meettechnieken Waternet	Zwevend stof (mg/l) Extinctie coëfficiënt (Kd-PAR)	30 cm	Zwevend stof en Kd-PAR vs DWAQ en UITZICHT
		DOC (mg/L) Chlorofyl en feofytine (ug/l) Doorzicht(m)		DOC, chlorofyl forcering UITZICHT

1: De meetfrequentie op de meetpaal is altijd hoger dan 1x per 20 minuten. De meeste signalen zijn teruggebracht tot een frequentie van een uur voor vergelijking met het slibmodel.

2: Het slibmodel (zie [1] en hoofdstuk 3) kent vier modelcomponenten: waterbeweging (FLOW), golfmodel (WAVE), het slibmodel (DWAQ) en de lichtmodule (UITZICHT).

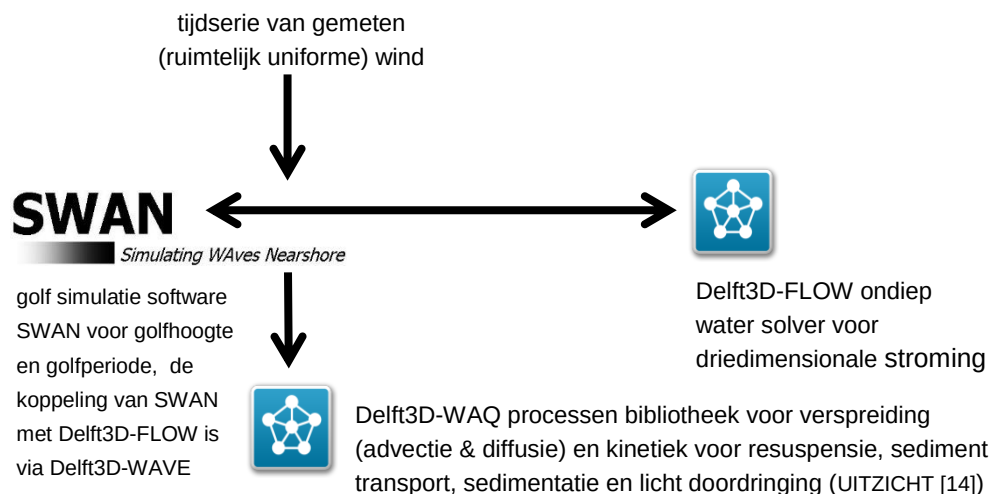


Figuur 1 Boven: locatie meetpaal met hoogfrequente continue metingen van variabelen zoals gemeld in Tabel 1. Onder bemonsteringslocaties steekmonsters (MBP071 is de locatie van de meetpaal met coördinaten 52°11'28.31"N en 5°3'50.86"E).

3 Modelverbetering

3.1 Scope

Het slibmodel bestaat uit een modelketen van een viertal modelcomponenten zoals beschreven in [1], deze keten wordt getoond in Figuur 2.



Figuur 2 Modellenketen in het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen.

Het slibmodel start met de berekening van windgedreven golven en waterstroming die worden geforceerd met een tijdserie van gemeten (ruimtelijk uniforme) wind. Golven en stroming hebben effect op de bodemschuifspanning en de opwerveling en het transport van slib. Bij sterkere wind zijn golfeffecten de belangrijkste oorzaak voor opwerveling. De opwerveling van slib vanaf de bodem wordt berekend uit de gecombineerde bijdrage van stroming en golven aan de bodemschuifspanning. Bodemschuifspanning werd niet gemeten. Het opgewervelde slib stroomt met het water mee en wordt zo verspreid over de waterkolom, zowel horizontaal als verticaal. Als gevolg van de zwaartekracht en na vorming van vlokken, kan dit vooral in de meer rustige gebieden/perioden sedimenteren. Tot slot bepaalt de hoeveelheid slib die in de waterkolom aanwezig is het doorzicht en de hoeveelheid licht die de waterbodem bereikt. Ten opzichte van het slibmodel dat in [1] is beschreven gebruiken we hiervoor de lichtberekening de spectrale lichtmodule UITZICHT [14] dat het lineaire lichtmodel vervangt.

In deze studie ligt de focus van de verbetering van het slibmodel op de verbetering van de Delft3D-WAQ processen en de modellering van het onderwaterlichtklimaat en minder op de componenten SWAN (spectrale golfmodule) en FLOW (stroming). Dat houdt in dat coëfficiënten van het slib- en lichtmodel zijn aangepast zodat de modeluitkomsten beter bij de metingen passen (kalibratie, zie volgende paragraaf). De modelcomponenten voor golven en stroming zijn zonder kalibratie, op basis van door experts ingestelde waarden, ingezet en (in beperkte mate) vergeleken met metingen. Op deze manier is met de beperkte middelen een balans gezocht tussen de modelcomponenten. Modelleren van slib en licht wegen daarbij zwaarder dan golven en stroming.

3.2 Aanpak kalibratie

3.2.1 Simulatieperiode

Het slibmodel is toegepast gedurende de periode dat de meetpaal operationeel was, van 17 december 2020 tot en met 5 mei 2021. De simulaties voor de hydrodynamica starten op 1 december 2020 zodat het model (ruim) voldoende tijd heeft om in te spelen op de voorkomende condities en resultaten niet beïnvloed worden door de keuze van de initiële condities. De tijdstap van de hydrodynamica is 2.5 min.

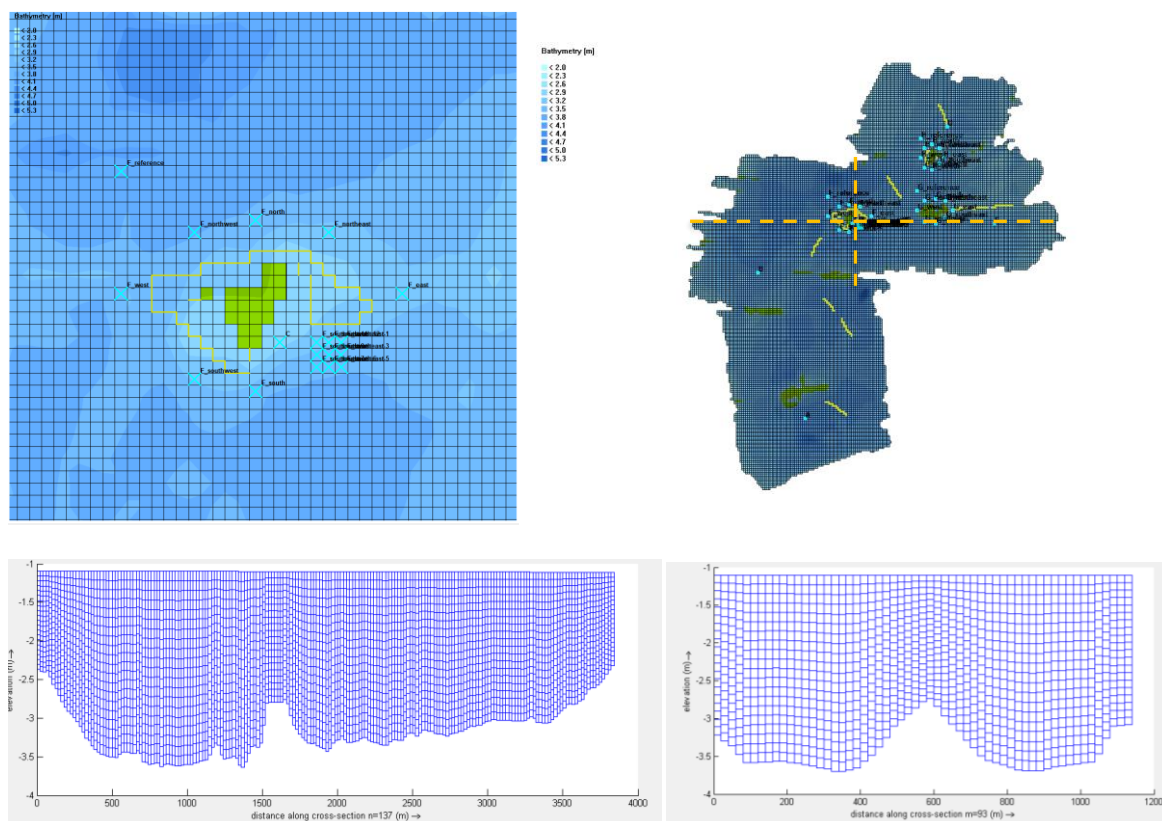
Modules voor stroming en golven zijn om de 60 minuten online gekoppeld. Het slibmodel draait daarna offline en gebruikt resultaten die ook om het uur zijn geschreven. Het slibmodel rekent voor dezelfde periode als de hydrodynamica.

3.2.2 Lokale forcering

Vanwege de problemen met de windmeter [2], ontbreken lokale windmetingen van 15-25 januari, van 18-23 februari en na 12 maart. Voor deze perioden is gebruik gemaakt van windmetingen die door het KNMI in het nabij gelegen De Bilt worden uitgevoerd (beschikbaar als gemiddelde wind per uur).

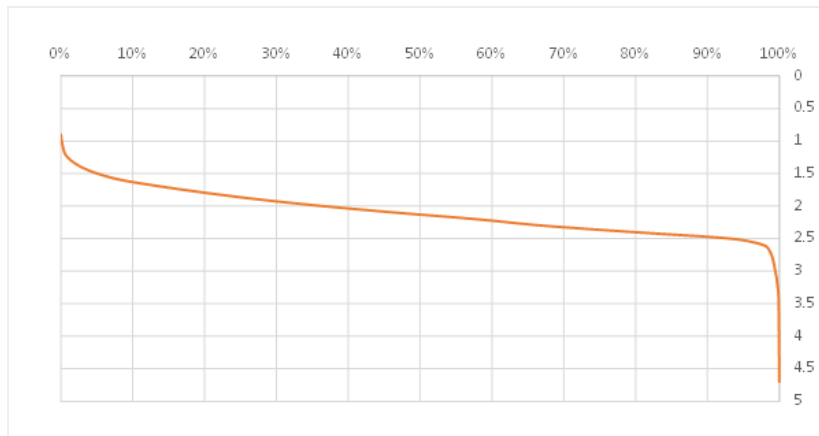
3.2.3 Modelrooster

Voor het hydrodynamische model is gebruik gemaakt van de Delft3D-FLOW module [15, 16] waarbij een rechthoekig rooster van 20 m x 20 m is gebruikt. In de verticale richting heeft het model 20 lagen die elk, onafhankelijk van de lokale diepte, 5% beslaan (sigma lagen, met variabele absolute dikte).



Figuur 3 Rekenrooster met eiland Hoek (linksboven) met palenrijen (geel) en observatiepunten (kruis), rechtsboven het hele domein met NZ en OW lijnen over de locatie van de meetpaal. Linksonder een verticale doorsnede (West-Oost) en rechts idem voor Noord-Zuid.

Merk op dat de bathymetrie in het model, opgezet in 2018 [1] op basis van bodemmetingen uit 2017 [21], afwijkt van de bathymetrie die in de MER studie in 2008 [3] is gebruikt. De mediane waarde is van 1.8 m naar 2.2 m gegaan. Het areaal ondieper dan 1.5 m is daardoor gedaald van 20 naar 5% van het totale areaal.



Figuur 4 Cumulatieve frequentieverdeling van de waterdieptes in de modelbathymetrie (hypsometrie).

3.2.4 Stroming

Voor de simulatieperiode is de gemeten wind op de Loosdrechtse Plassen aangevuld met gemeten wind van het KNMI. Voor de windweerstandscoefficiënt (drag coëfficiënt, Tabel 2) gebruiken we in beginsel standaard waarden. Kalibratie van de coëfficiënten is niet gedaan omdat (1) de onzekerheid in het windsignaal te groot is en (2) er geen gegevens van waterstandsopzet tijdens harde wind zijn (één meetpaal meetpunt, bovendien in het midden van het meer, voldoet daarvoor niet). Op basis van [17] hebben we wel, van de standaard Delft3D-FLOW waarden, de wind weerstand coëfficiënt voor lage windsnelheid verhoogd van 0.0013 naar 0.0019.

In de 3D-simulaties wordt de verticale turbulente viscositeit en de turbulente diffusiviteit berekend met behulp van het $k - \epsilon$ turbulentiemodel Zie [22] voor details van dit turbulentiemodel.

De bijdrage van stroming aan de bodem schuifspanning wordt berekend volgens de formulering:

$$\left| \overline{\tau_c} \right| = \frac{g \rho_0 \left| \overline{U} \right| \overline{U}}{C_{2D}^2}$$

met behulp van de White Colebrook benadering voor C_{2D} :

$$C_{2D}^2 = 18^{10} \log \left(\frac{12H}{k_s} \right)$$

Waarin H de waterdiepte (m) en k_s , de Nikuradse ruwheidslengteschaal die in het model van de LP een ruimtelijk uniforme waarde heeft.

3.2.5 Golfmodel

Simulaties van golven (SWAN, aangestuurd voor koppeling met Delft3D-FLOW door Delft3D-WAVE) en stromingen (Delft3D-FLOW) worden om prestatieredenen online (simultaan) uitgevoerd. De golfmodule SWAN simuleert de golfhoogte (H_{mo} [m]) en de golfperiode (T_m 1,0 [s]) op basis van de gemeten wind waarbij het onderscheidend vermogen van de windrichting op 10° is ingesteld ($NDir = 36$).

Golfkarakteristieken leiden tot een orbitaalsnelheid nabij de bodem (U_{orb} , [m/s]) waaruit de golfgemiddelde bodemschuifspanning (τ_w) ten gevolge van golven volgt die daarnaast afhankelijk is van de wrijvingscoëfficiënt f_w :

$$\left| \vec{\tau}_w \right| = \frac{1}{2} \rho_0 f_w U_{orb}^2$$

De golf wrijvingsfactor, f_w , wordt volgens [16] bepaald uit de golfperiode en een maat voor de bodemruwheid (k_s , de Nikuradse ruwheidslengteschaal) die in het model van de LP een ruimtelijk uniforme waarde heeft.

Dunne dammen en palenrijen zijn in het golfmodel opgenomen met overstroombuigte van -1.0 m dus orde 10 cm boven gemiddeld waterpeil. Transmissie van golfenergie door de dammen heen is daarmee mogelijk. Bij een golfhoogte van 0.3 m wordt orde 35% van de golfenergie doorgelaten, de rest reflecteert [18]. Voor berekening van de golfreflectie is uitgegaan van een coëfficiënt die past bij houten palenrijen. Alle dunne dammen zijn op dezelfde manier in het model opgenomen, er is geen ruimtelijke differentiatie in hoogte en materiaal. De eilanden in de Loosdrechtse plassen zijn opgenomen in de bathymetrie van het rekenrooster, dus als bodemhoogte boven water.

Er is in het model géén rekening gehouden met rietstroken of waterplanten in het water, deze dempen dus geen golvend en hebben geen invloed op de stroming. Dat kan echter wel belangrijk zijn als het grote arealen betreft.

De dunne dammen zijn via Delft3D-WAVE gedefinieerd op het SWAN rooster door ze 1:1 over te nemen vanuit het dunne dammenbestand van Delft3D-FLOW. Dat werkt goed maar kan efficiënter door niet de roostercellen te volgen maar door de dunne dammen te definiëren als rechte lijnen. Hierdoor vermindert het aantal dunne dammen.

3.2.6 Instellingen golf- en stromingsmodel

Tabel 2 Fysische modelinstellingen gebruikt voor LP.

Variabele	Value	Unit
Density Air	1.29	kg.m ⁻³
Density water	1000	kg.m ⁻³
Roughness, k_s	White Colebrook in both directions 0.05 and 0.05	m
BedFriction SWAN BedFricCoef SWAN	jonswap 0.067	
Wind drag coefficient	0.00195 at 0.0 m.s ⁻¹ 0.00723 at 100 m.s ⁻¹	-
Turbulence model	k(ε)	
Uniform horizontal eddy viscosity	0.5	m ² .s ⁻¹
Uniform horizontal eddy diffusivity	0.5	m ² .s ⁻¹
Minimum vertical eddy viscosity	1.0 10 ⁻⁵	m ² .s ⁻¹
Minimum vertical eddy diffusivity	1.0 10 ⁻⁵	m ² .s ⁻¹

3.2.7 Troebelheid en slib

De instellingen van het slib model zijn in beginsel gebaseerd op de instellingen zoals die bij de bouw ervan [1] waren afgeschat op basis van gegevens en een volledig gemengd model gerapporteerd in [3].

Startwaarden M_0 , M_1 , M_2 , V_{bur} , n , d_2 en P (zie Tabel 3) zijn in [1] gekozen voor:

- concentratieniveau in de waterkolom rond een gemiddelde slibconcentratie in de plas van circa 20 mg/l,
- ondergrens van circa 5 mg/l in de zomer; voorkomen van volledig uitzakken van de slibconcentratie gedurende langere luwe periode,
- piekconcentraties circa 90 mg/l en
- balans van verschillende processen in de bodemlagen zodat deze stabiel (in evenwicht) zijn (d.w.z. niet vol- of leeglopen).

In deze studie zijn dezelfde parameters gekalibreerd op basis van het verloop van gemeten troebelheid bij de meetpaal. De concentratie zwevende stof is gecorreleerd [2] met gemeten troebelheid (NTU) volgens: zwevende stof = $1.3 \cdot \text{Troebelheid (NTU)}$.

In Figuur 5 is een voorbeeld van het gemeten verloop van troebelheid (zwart) en een aantal modelresultaten die bij wijze van gevoeligheidsanalyse zijn uitgevoerd. Bij de kalibratie van het signaal wordt specifiek gelet op:

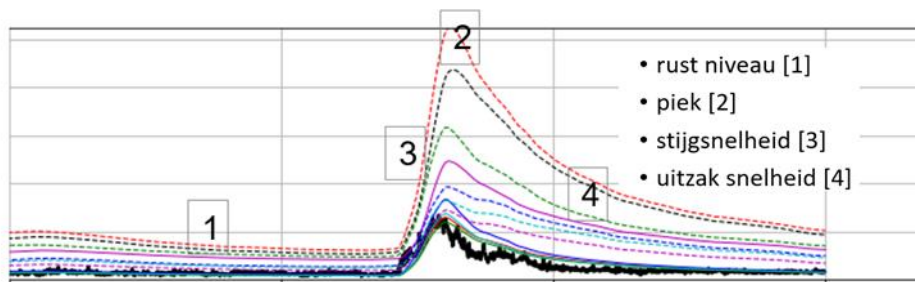
- [1] het slibniveau bij lage turbulentie (lage windsnelheid),
- [2] de maximale concentratie slib in het water tijdens de piek van de turbulentie,
- [3] de timing en snelheid waarmee de slibconcentratie toeneemt en
- [4] de snelheid waarmee de slibconcentratie na een onstuimige periode weer terugzakt naar het uitgangsniveau.

Tabel 3 geeft het overzicht van de gebruikte parameters in het verbeterde slibmodel en laat ook de startwaarden zien zoals gebruikt bij de bouw van het model [1].

De kritische bodemschuifspanningen voor beide slibfracties zijn verlaagd en daarmee wervelen beide fracties nog eerder (bij lagere gemodelleerde bodemschuifspanning) op. De waarden zijn relatief ten opzichte van de gemodelleerde bodemschuifspanning en daarmee puur een kalibratiegrootte die in dit geval aangeeft dat zónder deze verlaging het model het gemeten troebelheidssignaal niet altijd reproduceert en pieken mist.

De valsnelheden van grof en fijn (0.5 en 0.1 m/d) zijn ongewijzigd en opzichte van de waarden die bij de bouw [1] zijn geschat. De verhouding van de valsnelheden bepaalt ook ongeveer de verhouding van de beide slib fracties in het sediment.

Om die reden word ook in de bodem meer onderscheid gemaakt tussen grof en fijn slib, de verhouding grof/fijn is verhoogd van 1:1 naar 7:1.



Figuur 5. Voorbeeld van het verloop van gemeten turbulentie (zwarte curve) op de meetpaal en een scala aan simulaties van zwevend stof met het slibmodel (gekleurde lijnen).

Tabel 3 Parameter instellingen zoals gebruikt voor de scenario berekeningen.

parameter	start waarde	kalibratie waarde	eenheid	beschrijving
ws01	0.5	0.5	m/d	sedimentatiesnelheid 1e fractie
ws02	0.1	0.1	m/d	sedimentatiesnelheid 2e fractie
C0	25	2.5	mg/L	referentieconcentratie voor ws
f_1	1.0	1.0	-	exponent in flocculatie formulering 1e fractie
f_2	1.0	1.0	-	exponent in flocculatie formulering 2e fractie
M_0	150	150	g/m ² /d	0e orde resuspensie flux S1
	100	50	g/m ² /d	0e orde resuspensie flux S2
M_1	0.4	0.2	1/d	1e orde resuspensie flux S1
M_2	0.1	0.1	1/d	1e orde resuspensie flux S2
τ_{c1}	0.03	0.025	Pa	kritische schuifspanning erosie S1
τ_{c2}	0.2	0.12	Pa	kritische schuifspanning erosie S2
n	0.4		-	Porositeit
d2	0.05		m	dikte bodemlaag S2
Vbur	0.004	0.004	1/d	Snelheidsconstante begraving S1 naar S2
P	0.5		g/m ² /d	“productie” van zwevend stof/slib door erosie van diepere bodemlagen en/of oevers, constante die snelheid van productie aangeeft
nMa	0.024		m ^{1/3} /s	Manning ruwheidsfactor factor
m ₁	2	2.4	kg/m ²	Initiële hoeveelheden slib in sedimentlaag S1
m ₂	20	24	kg/m ²	Initiële hoeveelheden slib in sedimentlaag S2
	50%	87.5%	-	Initieel aandeel grof slib in sediment (beide lagen)

3.2.8 Onderwater- en bodemlicht

Het slibmodel berekent de uitdoving (absorptie) van inkomend licht met de wet van Lambert-Beer: de straling op diepte z gelijk is aan: $I_z = I_0 \exp(-Kd z)$ waarin I_0 en I_z respectievelijk de straling aan het wateroppervlak en op diepte z (m) in het water en Kd de extinctiecoëfficiënt (m^{-1}). Voor de straling aan het wateroppervlak wordt in plaats van gemeten straling (in $W \cdot m^{-2}$ met dag nachtritme) 100% aangenomen zodat na uitdoving onder water direct het restant licht aan de bodem volgt. De extinctiecoëfficiënt in deze formule is afhankelijk van de samenstelling van het water en kan met een eenvoudig lineair model worden berekend of fysisch meer realistisch met behulp van UITZICHT [14]. UITZICHT berekent de uitdoving voor elke golflengte van het voor planten relevant spectrum (PAR 400-800 nm) apart. Dat is nauwkeuriger want de wet van Lambert-Beer is alleen voor monochromatisch licht (één golflengte) geldig. UITZICHT houdt naast absorptie ook rekening met reflectie (scattering) van licht.

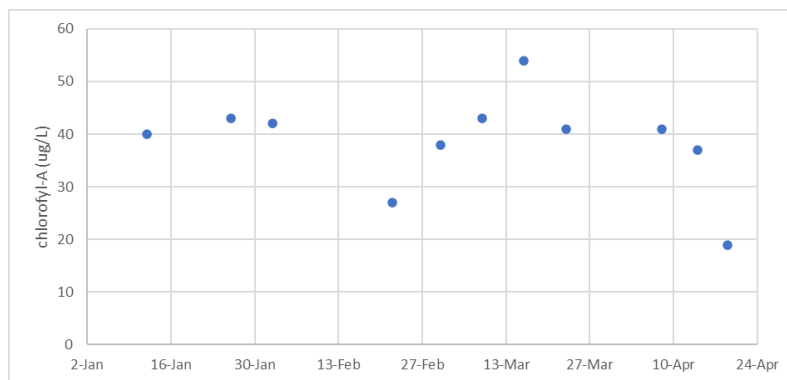
In het *lineair lichtmodel* [1] dragen beide in het model beschikbare slibfracties als volgt bij aan de totale extinctie coëfficiënt: $Kd = k_0 + \varepsilon_1 C_1 + \varepsilon_2 C_2$ waarbij ε de specifieke extinctie coëfficiënt (m^2/g) en C de concentratie slib (g/m^3). Daarbij wordt onderscheid gemaakt in detritus (dood algenmateriaal en veenresten) en anorganisch materiaal die door het slibmodel worden berekend. De bijdrage van andere optisch actieve stoffen (water, humus, algen) aan de extinctie wordt constant verondersteld en verdisconteerd in k_0 .

ε_1	0.08	m^2/g	specifieke extinctie coëfficiënt grove slibfractie
ε_2	0.3	m^2/g	specifieke extinctie coëfficiënt fijne slibfractie
k_0	0.5	m^{-1}	achtergrond extinctie

In *UITZICHT* moeten de met het slibmodel berekende slibfracties worden vertaald naar concentraties voor detritus en anorganische stof. Daarvoor gebruiken we: Detritus = $0.8 * C_1 + 1.0 * C_2$ en Gloeitest = $0.2 * C_1$. De fijne slibfracties (C_2) in het model bestaan dus voor 100% uit organisch materiaal, de grovere fractie (C_1) voor 80% uit organisch materiaal en 20% uit mineraal materiaal.

Voor de ontbrekende licht absorberende stoffen worden in *UITZICHT* constante waarden gebruikt die zijn afgeleid uit een dertigtal ruimtelijke metingen door Waternet in de periode 2020-2021. DOC varieerde niet heel sterk en is daarom als constante waarde (DOC = 7.5 mg/l) opgelegd. Voor chlorofyl zijn waarden gebruikt die variëren zoals afgebeeld in Figuur 6, tussen de punten interpoleert het model lineair. De chlorofylwaarden zijn gemeten ter plaatse van de meetpaal en worden in het verbeterde slibmodel ruimtelijk uniform toegepast.

Het slibmodel berekent het percentage licht aan de bodem met de wet van Lambert-Beer ($I(z)$ hierboven) op basis van berekende Kd in elke waterlaag van het model. Merk op dat bij de berekening uitgegaan wordt van 100% licht aan het wateroppervlak onafhankelijk van het tijdstip. Daglengte (dag-nacht) en weersomstandigheden spelen dus géén rol in het model bij de berekening van dit percentage en ervan afgeleide grootheden zoals het areaal met meer dan 4% licht op de bodem. In de verbeterde versie van het slibmodel is de module *UITZICHT* [14] gebruikt en niet meer het lineaire model.



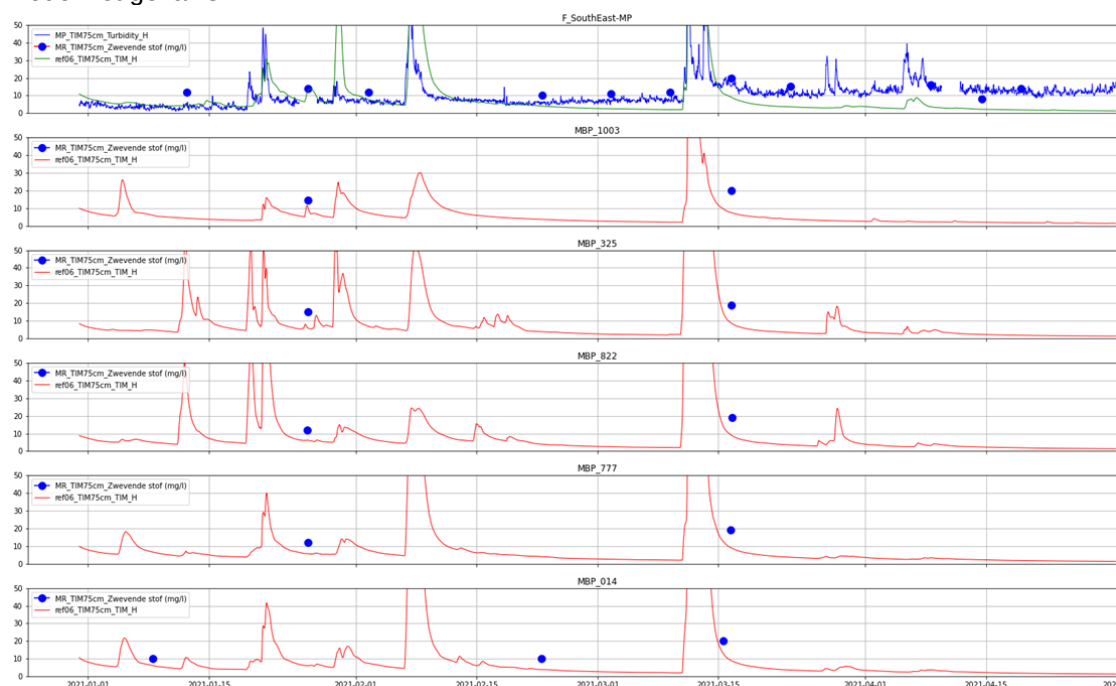
Figuur 6 Gemeten chlorofyl-A in 2020 op de locatie van de meetpaal

3.3 Resultaten

3.3.1 Slib

In Figuur 7 is te zien hoe het verbeterde slibmodel het gemeten zwend stof op de meetpaal beschrijft. Het model komt goed overeen met het signaal van de bovenste meetpaalsensor tot ongeveer half maart, daarna wordt het in het model te helder. De verhoogde turbulentie die op de meetpaal wordt gemeten in de laatste week van maart en halverwege april worden te zwak gereproduceerd in het model, dit is waarschijnlijk het gevolg van het gebruik van wind uit de Bilt in plaats van de lokaal gemeten wind.

In vergelijking met de ruimtelijke meetpunten onderschat het model de turbiteit, met name na de turbulente periode van 12 maart blijft de gemeten troebelheid langer hoog dan in het model het geval is.

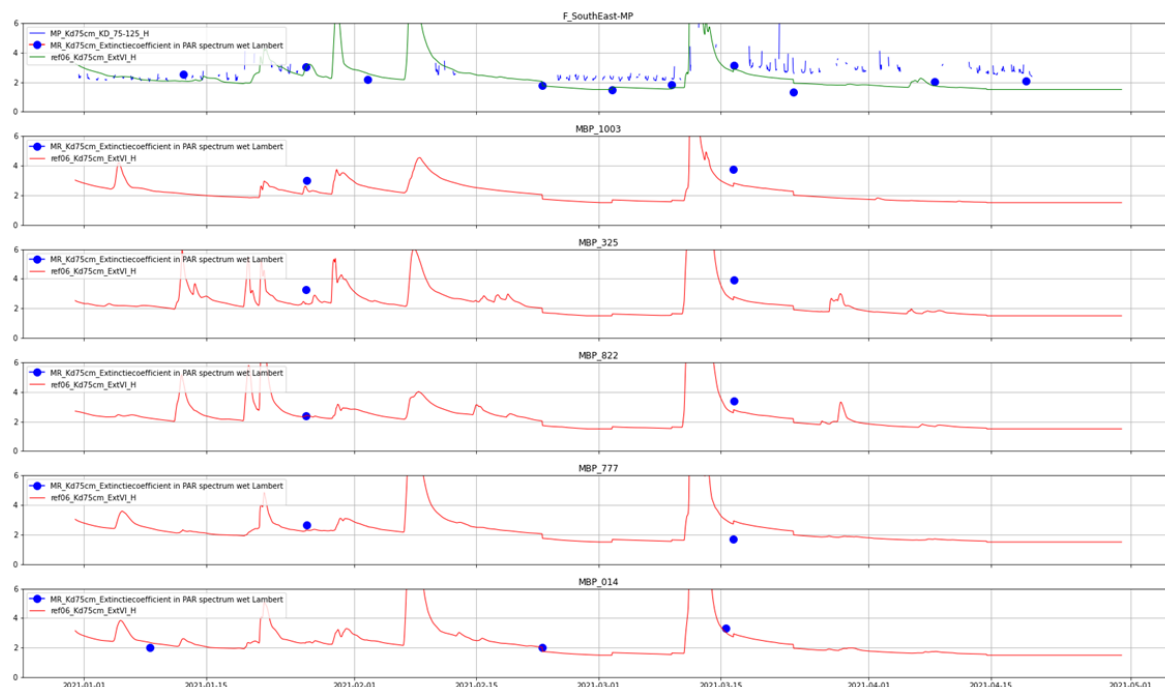


Figuur 7. Gemeten zwevend stof (mg/L) om op de meetpaal (blauwe lijn, bovenste sensor -75cm) en een aantal ruimtelijke meetpunten (zie Figuur 1). Gemodelleerd zwevend stof in groen (meetpaal locatie) en rood (overige locaties).

3.3.2 Licht

In Figuur 8 is te zien hoe het verbeterde slibmodel de gemeten extinctiecoëfficiënt K_d op de meetpaal beschrijft. Het model komt tot half maart goed overeen met de dieptegemiddelde K_d die van de lichtsensoren [2] op de meetpaal is afgeleid. Daarna is de op de meetpaal gemeten K_d hoger dan in het model. Het model stemt wél goed overeen met de K_d 's die ter plekke van de meetpaal door Waternet met hand zijn gemeten en die als betrouwbaarder worden gezien dan het meetpaal signaal [2]. De overeenstemming tussen model en metingen is voor het onderwaterlicht (K_d) beter dan voor troebelheid, dat lijkt logisch omdat het lichtklimaat voor een deel door (niet gemodelleerd) chlorofyl wordt bepaald.

In vergelijking met de ruimtelijke meetpunten is de berekende K_d redelijk voor de meetronde in januari maar vertoont net als bij de troebelheid voor de meeste punten een onderschatting voor de meetronde van 16 maart.

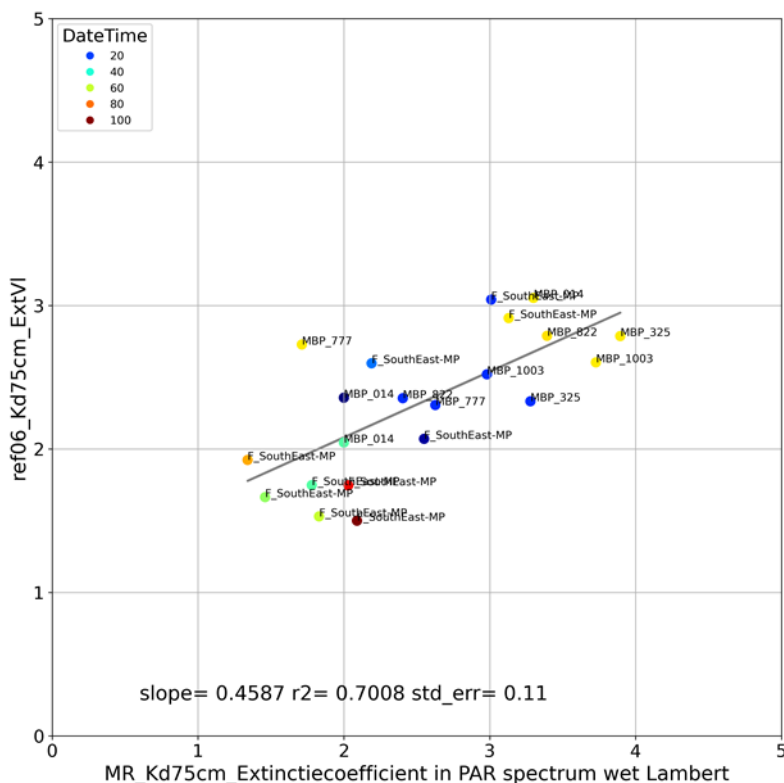


Figuur 8. Lichtextinctie coëfficiënt (K_d -PAR, 1/m) op basis van lichtmetingen op de meetpaal (blauwe onderbroken lijn) en op basis van lichtmetingen (punten) op een aantal punten uit het ruimtelijke meetnet (zie Figuur 1). Gemodelleerde K_d in groen (meetpaal locatie) en rood (overige locaties).

Figuur 9 laat het verband tussen de gemeten K_d van alle punten die tijdens de veldmetingen zijn bezocht en de met het verbeterde slibmodel berekende waarden zien. Het slibmodel (verticale as) voorspelt lagere K_d waarden dan die in het veld worden gemeten op 16 maart. Bovendien is de range van modelvoorspellingen beperkt tot 1.5-3.0 1/m terwijl de metingen een bredere range bestrijken van 1.5 tot 4 1/m.

De ruimtelijke variatie in K_d is in het veld (op basis van de 16 maart meetronde) dus groter dan in het model. Dat kan komen omdat de gebruikte chlorofyl waarde (50 $\mu\text{g/l}$ op 16 maart) niet representatief is voor alle locaties. Het kan ook zijn dat de bijdrage van slib aan het onderwaterlichtklimaat groter moet zijn dan nu op basis van de kalibratie op de meetpaal is aangenomen en dat een deel van het chlorofyl met zwevend stof is geassocieerd. De hoge chlorofyl-A waarde gemeten op 16 maart na een turbulente periode suggereert een bijdrage vanuit het sediment (zie Figuur 6).

Een correcte voorspelling van hoge K_d 's (groter dan 3 l/m) is in Loosdrecht niet direct van belang voor licht aan de bodem en daarmee is de onderschatting van het model in die range niet zo belangrijk voor de effectbepaling van luwtestructuren. In de voor 4% licht aan de bodem relevante range van K_d 's (1.5-2.0 l/m) is het model beter in lijn met de metingen en daarmee geschikt voor inzet voor beoordeling van het effect van luwtestructuren.



Figuur 9 Verband tussen lichtextinctie coëfficiënt (K_d -PAR, 1/m) uit alle veldmetingen (horizontale as) en berekend met het verbeterde slibmodel (verticale as). Labels geven de naam van het meetpunt aan (Figuur 1).

3.4 Toepasbaarheid slibmodel

- Het slibmodel is gekalibreerd op één locatie in de Loosdrechtse Plassen, met metingen op de meetpaal. Onafhankelijke validatie op die meetpaal locatie is niet mogelijk omdat daarvoor de meetperiode met consistente metingen door uit val van wind- en lichtsensor te kort is.
- Ruimtelijke validatie is gedaan op basis van twee meetrondes. Het verbeterde slibmodel voorspelt iets helderder water dan gemeten en laat minder ruimtelijke variatie zien dan in de meetpunten aanwezig is. Waarschijnlijk is dit het gevolg van de manier waarop de invloed van niet gemodelleerd chlorofyl is opgenomen in het model. De voorspelkracht van het model is bij gebrek aan een component die (het effect van luwte op) eutrofiering voorspelt beperkt.
- Het verbeterde slibmodel is toepasbaar om het effect van luwtestructuren te beoordelen omdat de voorspelde K_d 's in de relevante range van waarden (1.5 tot 2 $1/m$) redelijk in lijn zijn met de gemeten waarden. Omdat het model met name in het voorjaar (vanaf 15 maart) te helder is zal de beoordeling van het effect van luwte conservatief zijn (een onderschatting van het luwte effect).
- Het is niet uit te sluiten dat de overgang van lokaal gemeten wind naar wind gemeten op KNMI station de Bilt deze onderschatting verder vergroot.

4 Modeltoepassing – scenario's

De KRW doelstelling voor de Loosdrechtse plassen is een gezond aquatisch ecosysteem waarin onder andere voldoende areaal (>25%) begroeiing met waterplanten voorkomt. De huidige EKR score voor waterflora is 0.18, wat ontoereikend is.

Voor de vestiging van waterplanten is voldoende helder water waarin voldoende licht op de bodem valt een belangrijke randvoorwaarde. In de huidige situatie is het water te troebel door te veel algen en door teveel zwevend stof als gevolg van te frequente opwerveling.

De vraag die in dit hoofdstuk beantwoord wordt is of luwtestructuren in verschillende combinaties (4.1) de opwerveling van slib voldoende kunnen onderdrukken zodat de concentratie zwevende stof in het water min of meer blijvend zodanig verlaagd wordt dat een voldoende groot areaal van de plas voldoende licht aan de bodem ontvangt. De kans voor ontwikkeling van waterplanten is reëel wanneer tussen 1 en 10% van het natuurlijke daglicht de bodem kan bereiken [12, 13]. Als kritische grens voor de ontwikkeling van waterplanten wordt hier 4% licht op de bodem (gemiddeld over het voorjaar) gebruikt. Voor de berekening van arealen die kansrijk zijn voor ontwikkeling van waterplanten wordt dus een 'binaire' grens gehanteerd. Informatie om de berekeningsmethode te verfijnen ontbreekt. Voor de beantwoording van deze vraag wordt het verbeterde slibmodel gebruikt.

Het slibmodel houdt rekening met de kans op opwerveling van slib die door luwtestructuren verkleind wordt, met transport en bezinken van slib én het effect van slib op het onderwaterlichtklimaat. Het slibmodel beschrijft echter geen algen en opgelost organisch koolstof (DOC), die beide ook van belang zijn voor de helderheid. Het beïnvloedbare deel van de helderheid door luwtestructuren is in de modellering dus gelimiteerd tot het effect dat luwtestructuren hebben op slib.

Om op voorhand een inschatting van het maximale effect van luwte te krijgen, kijken we naar veldmetingen in de Loosdrechtse plassen in de periode 2020-2021 (een dertigtal punten uit de fysisch chemische bemonstering door Waternet). Als we aannemen dat de laagste waarden van de gemeten stoffen die licht absorberen horen bij van nature rustige omstandigheden dan zijn die waarden karakteristiek voor het best haalbare lichtklimaat door luwtemaatregelen (bij huidig plasvolume, nutriënten status, recreatie niveau etc.). In Tabel 4 zijn de 5-percentiel waarden van lichtabsorberende stoffen weergegeven. Met UITZICHT [14] is berekend dat onder die omstandigheden de lichtuitdoving (K_d -PAR) 1.3 1/m bedraagt en er op 2.1m diepte 6.5% licht beschikbaar is. Zwevend stof en gloeirest dragen in luwe omstandigheden maar beperkt bij aan de lichtuitdoving.

Om op een diepte van 2.1 m minimaal 4% licht te hebben moet de K_d -Par kleiner zijn dan 1.54. 1/m. De zwevend stof concentratie moet dan, bij overigens gelijkblijvende omstandigheden (Tabel 4) lager dan ongeveer 11 mg/l zijn.

Tabel 4 5-percentiel laagste waarden van stoffen die het onderwaterlicht beïnvloeden (gemeten in de Loosdrechtse Plassen op orde 30 locaties in de periode 2020-2021) en de daaruit met UITZICHT [14] berekende licht uitdoving coëfficiënt K_d -PAR (www.onderwaterlicht.nl).

			Bijdrage K_d
DOC	5	mg/L	0.28
chlorofyl-A	23	ug/L	0.71
zwevend stof	5	mg/L	0.12
gloeirest zwevend stof	20	%	0.03
water			0.17
K_d -PAR		1/m	1.3

4.1 Beschrijving varianten

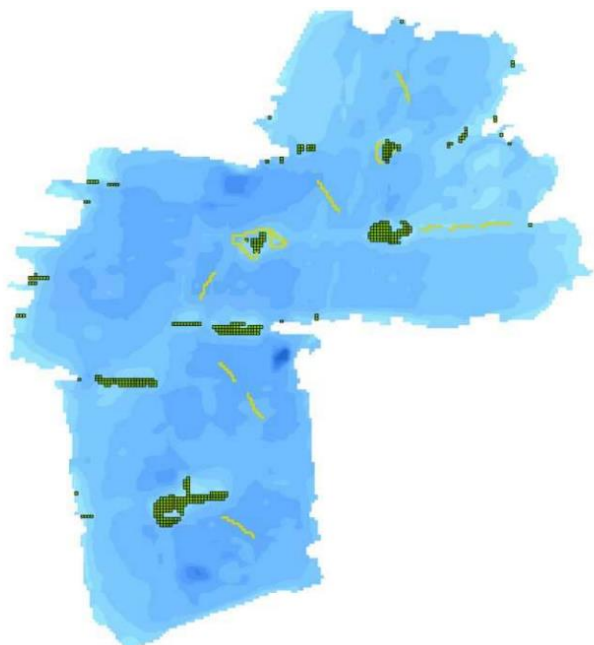
Er zijn zes varianten doorgerekend met het verbeterd slibmodel, te weten:

- de draagvlakvariant,
- de lichte variant,
- de lichte variant met aanpassingen,
- de zware variant en
- twee lokale varianten.

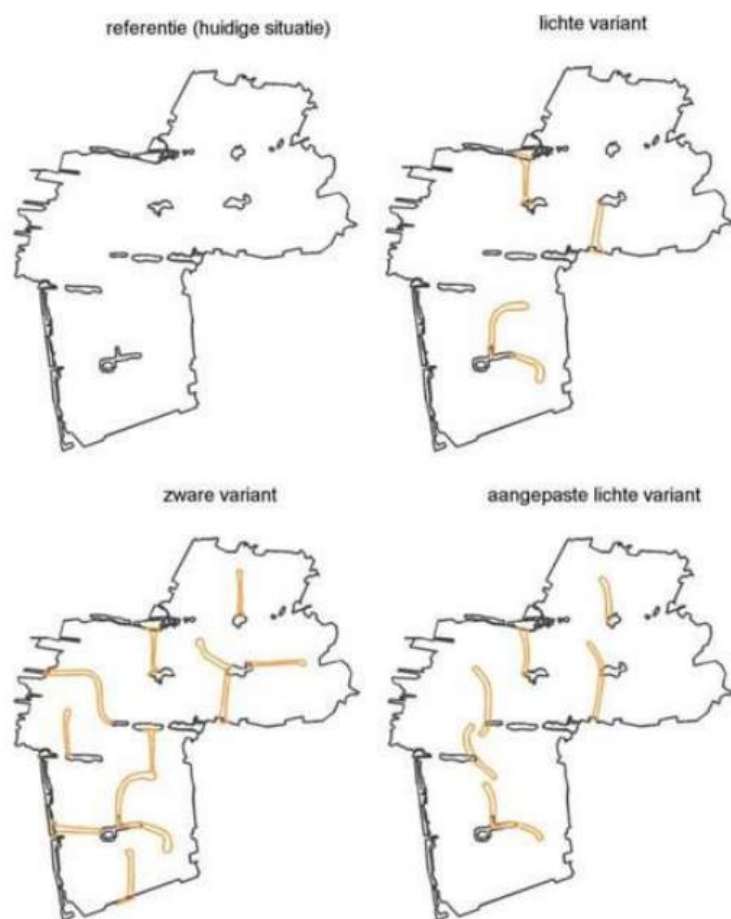
De draagvlakvariant (Figuur 10), zo genoemd omdat deze bij het opstellen van het gebiedsakkoord met vertegenwoordigers van de watersport is besproken, heeft de bestaande structuren (eilanden) die ook in de referentiesituatie voorkomen opgenomen de bodemligging van het model (groene vierkantjes). Daarnaast zijn zeven extra luwtestructuren opgenomen (lijnvormige luwtestructuren) die te zien zijn als gele lijnen.

De lichte variant, de lichte variant met aanpassingen en de zware variant (Figuur 11) zijn in [6] al doorgerekend met een eenvoudiger rekenmethodiek. Het aantal luwte elementen neemt in de drie varianten toe van 4 (lichte variant), naar 7 (lichte variant met aanpassingen) naar 10 (zware variant). De drie varianten geven inzicht in de gevoeligheid van het watersysteem voor luwtemaatregelen.

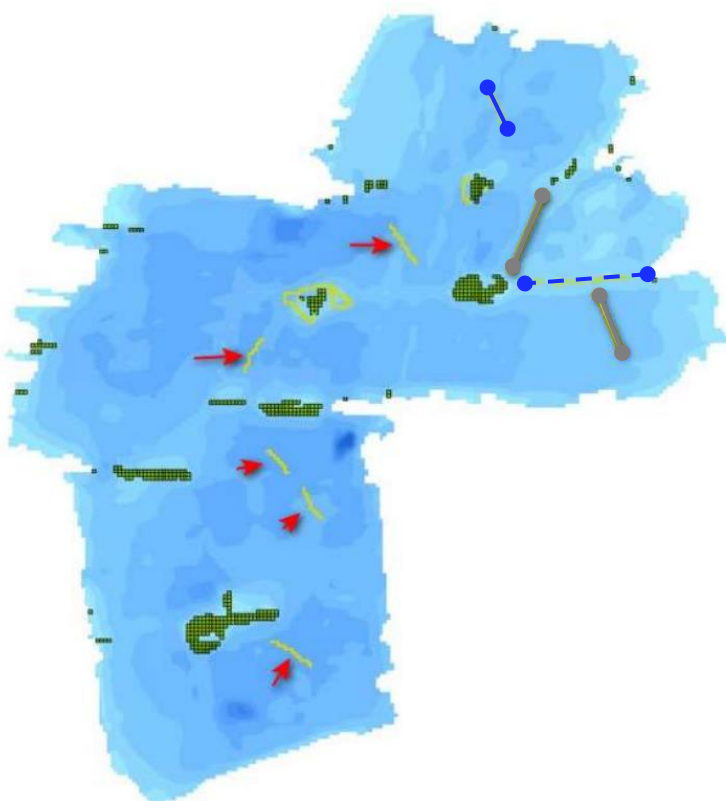
De lokale varianten (Figuur 12) concentreren zich op luwtemaatregelen aan de Oostkant van de plas (2^e en 3^e plas) waar het relatief ondiep is en waar het grootste deel van areaal met >4% licht op bodem in de referentiesituatie voorkomt. In variant 3a zijn er twee luwtestructuren, in variant 3b zijn er vier extra luwtestructuren aan de oostzijde toegevoegd.



Figuur 10 Luwtestructuren in de “draagvlak variant”(sc05).



Figuur 11 Luwtestructuren in de “verkenning van licht naar zwaar varianten”(licht, zwaar, aangepast licht).
Figuur overgenomen uit [6].



Figuur 12 Luvtestructuren in de “lokaal effect varianten”: lokaal_3a met 2 elementen (blauw) en lokaal_3b met 4 elementen (blauw en grijs). De elementen met rode pijl horen niet bij deze varianten.

4.2 Beoordeling luwte effect varianten

4.2.1 Vergelijkingsmethode

Het verbeterd slibmodel is afgeregeld voor de periode 1 januari 2012 tot 1 mei 2021. Dit is ook de periode die gebruikt wordt voor de beoordeling van het luwte-effect van de varianten. Daarvoor wordt de periode verdeeld in twee deelperioden van elk twee maanden die in de winter en in het voorjaar vallen en waarnaar verder als ‘winterperiode’ (1 januari 2021 – 1 maart 2021) en ‘voorjaarsperiode’ (van 1 maart tot 1 mei 2021) wordt gerefereerd.

Het slibmodel is verder ongewijzigd ten opzichte van de kalibratie zoals beschreven in 3.2.

De luvtestructuren zoals beschreven in (4.1) zijn in het model opgenomen als dunne dammen die door het golf- en stromingsmodel gezien worden en geen golven en geen stroming doorlaten.

Voor alle varianten zijn figuren gemaakt die in de toelichting van Tabel 5 genoemd worden. Voor al de genoemde variabelen zijn er ook figuren gemaakt van het verschil met de referentiesom waarvan in paragraaf 4.3 gebruik wordt gemaakt.

In paragraaf 4.3 wordt op basis van de gemiddelde hoeveelheid licht aan de bodem (als % van het licht aan het wateroppervlak, zonder onderscheid tussen dag en nacht) berekend hoeveel oppervlak (in ha) daaraan voldoet.

Tabel 5 Lijst van figuren (beschikbaar als digitale bijlage van dit rapport)

Filenaam ¹	Toelichting ²
MEAN_spr_Tau.png	Gemiddelde bodemschuifspanning [N/m ²]
gt003_spr_Tau.png	Fractie van de tijd dat de bodemschuifspanning >0.03 N/m ² [-], de kritische waarde voor de fijne slibfractie
gt012_spr_Tau.png	Fractie van de tijd bodemschuifspanning > 0.12 N/m ² [-], de kritische waarde voor de grove slibfractie
MEAN_spr_TIM.png	Totaal zwevend stof in toplaag van het water [mg/l]
MEAN_spr_RadBot.png	Gemiddelde hoeveelheid licht aan de bodem [% van het licht aan het wateroppervlak]
MEDIAN_spr_RadBot.png	Mediane waarde van hoeveelheid licht aan de bodem [%licht]
gt4_spr_RadBot.png	Percentage van de tijd dat licht aan de bodem > 4% is [%tijd]
CMN_gt4_spr_RadBot.png	Hoeveelheid licht aan de bodem in de periode dat hoeveelheid bodemlicht > 4% [%tijd]

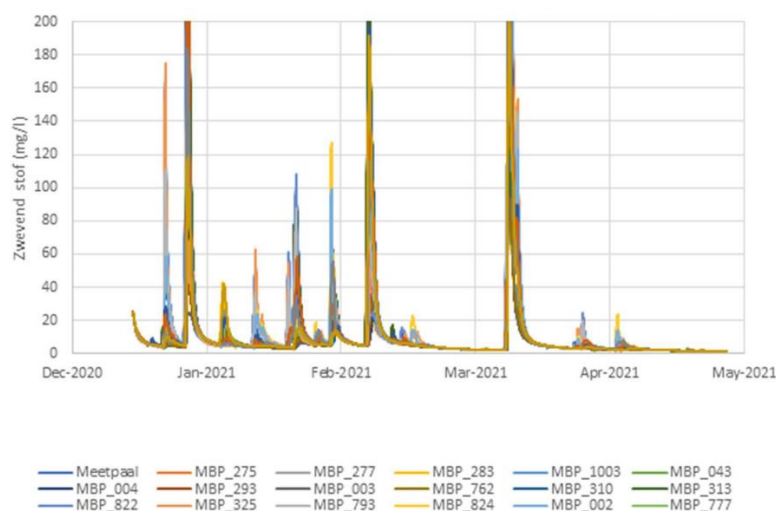
1) "spr": voorjaarsperiode, "win": winterperiode

2) voor alle variabelen is ook een figuur van het verschil met de referentieberekening beschikbaar (toevoeging "-ref" en "differente" in de filenaam)

4.3 Resultaten

4.3.1 De referentieperiodes

In Figuur 13 is te zien dat er in de winterperiode van 2021 acht onstuimige perioden zijn geweest waarin slib flink (concentraties hoger dan 20 mg/l) opwervelt; in de voorjaarsperiode (vanaf 1 maart) is het aantal perioden met zulke opwerveling beperkt tot drie.



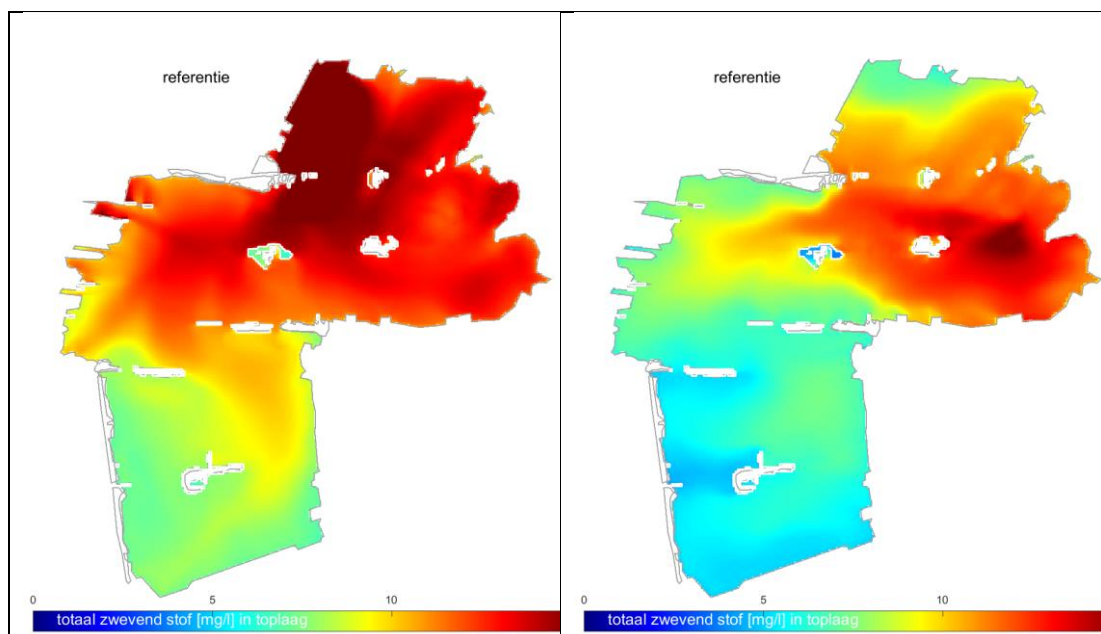
Figuur 13 Berekend zwevend stof in de referentieperiode (winterperiode en zomerperiode) voor de locaties waarop de meetrondes hebben plaatsgevonden (zie Figuur 1).

Daardoor is de gemiddelde slibconcentratie in de winter hoger is dan in het voorjaar (Figuur 14). In beide perioden is er gemiddeld meer slib aanwezig in de noord- en noordoostkant van de plas dan in het zuidelijke deel dat gemiddeld helderder is.

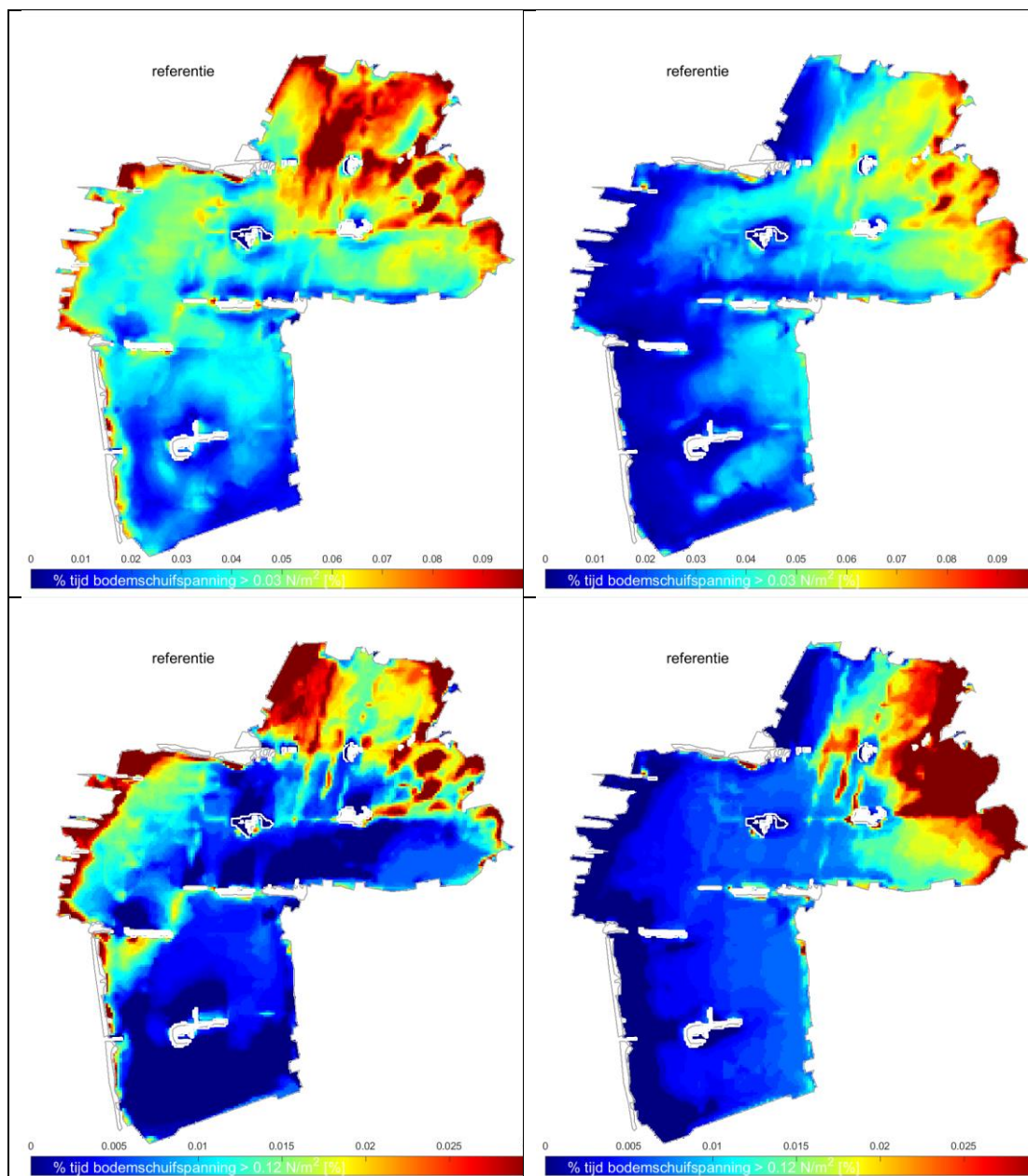
Die ruimtelijke slibpatronen komen overeen met de plaatsen waar de kritische grens van bodemschuifspanning voor de fijne en grove slib fractie overschreden wordt en slib vaker opwervelt (zie Figuur 15). In het model wordt gerekend met twee slibfracties: een lichte slibfractie, die al bij een lage schuifspanning aan de bodem ($> 0,03 \text{ N/m}^2$) opwervelt, en langzaam bezinkt en een grovere slibfractie die opwervelt bij een bodemschuifspanning van $> 0,12 \text{ N/m}^2$ en sneller bezinkt.

In de winterperiode is er een periode met oostenwind waardoor ook opwerveling aan de westoevers plaatsvindt (Figuur 15) en het slib zich in die periode vooral aan de westkant van de plassen ophoopt. Het voorjaar is een periode met minder wind en minder kans op opwerveling.

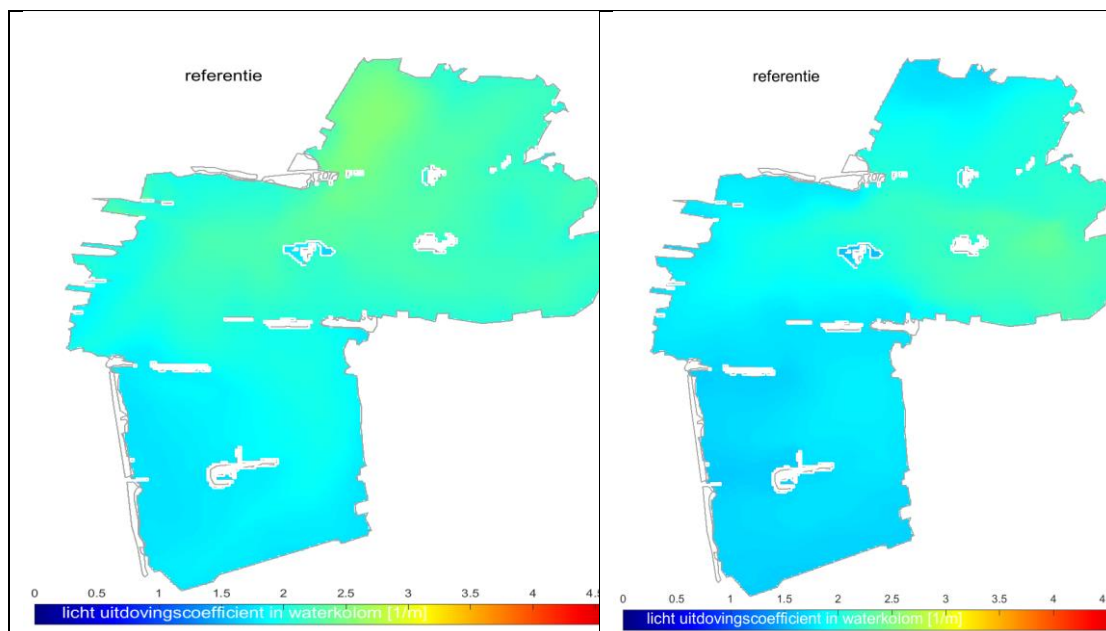
De patronen van de berekende lichtuitdovingscoëfficiënt K_d (de maat voor de uitdoving van licht onder water) komen overeen met de zwevend slib gehalten en zijn hoger in de winterperiode (zie Figuur 16). De met behulp van de K_d berekende hoeveelheid licht aan de bodem staat in Figuur 17. Dit is een percentage t.o.v. een vaste hoeveelheid licht aan het wateroppervlak (100%). In de berekende voorjaarsperiode was het water helderder en dringt meer licht tot op de bodem door, in grote delen meer dan de voor waterplantenontwikkeling benodigde 4%.



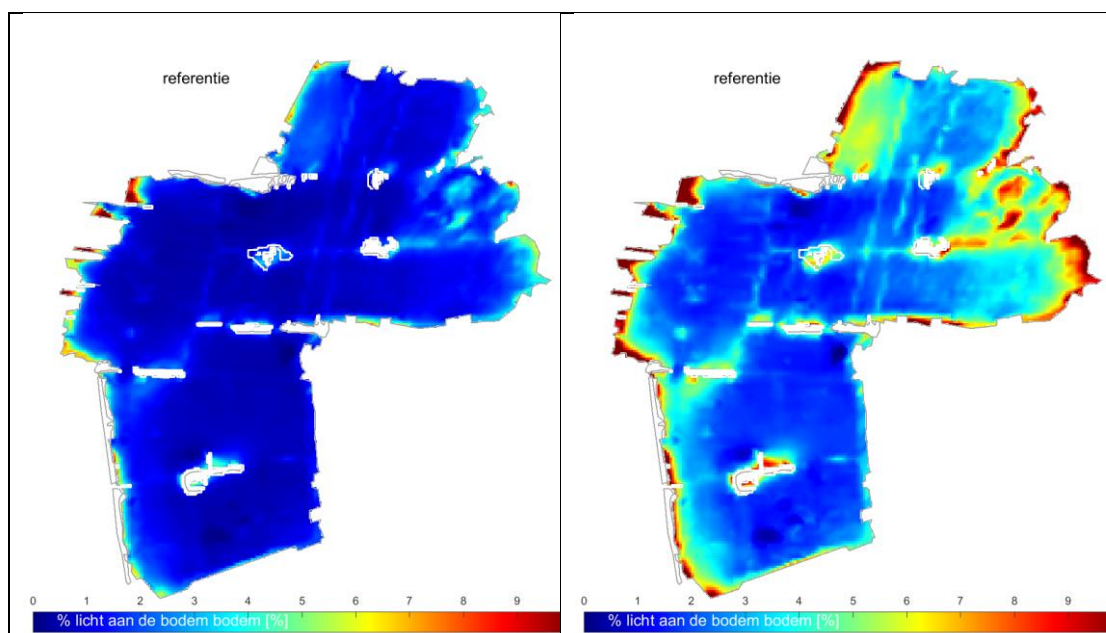
Figuur 14 Gemiddeld zwevend stof (berekend, mg/l) voor de winterperiode (links) en voorjaarsperiode (rechts).



Figuur 15 Kans op opwerveling van fijn (boven) en grof (onder) slib in de winterperiode (links) en voorjaars periode (rechts). Schaal voor fijn slib (boven) loopt van 0-0.1 (10% van de tijd dat de bodemschuifspanning $> 0.03 \text{ N/m}^2$ is). De schaal voor grof slib (onder) loopt van 0.03 (3% van de tijd dat de bodemschuifspanning $> 0.12 \text{ N/m}^2$ is).



Figuur 16 Lichtuitdovingscoëfficiënt (K_d -PAR, 1/m) in de winter- en voorjaarsperiode als gevolg van gemodelleerde zwevend stof (en opgedrukte gehalten chlorofyl en DOC).



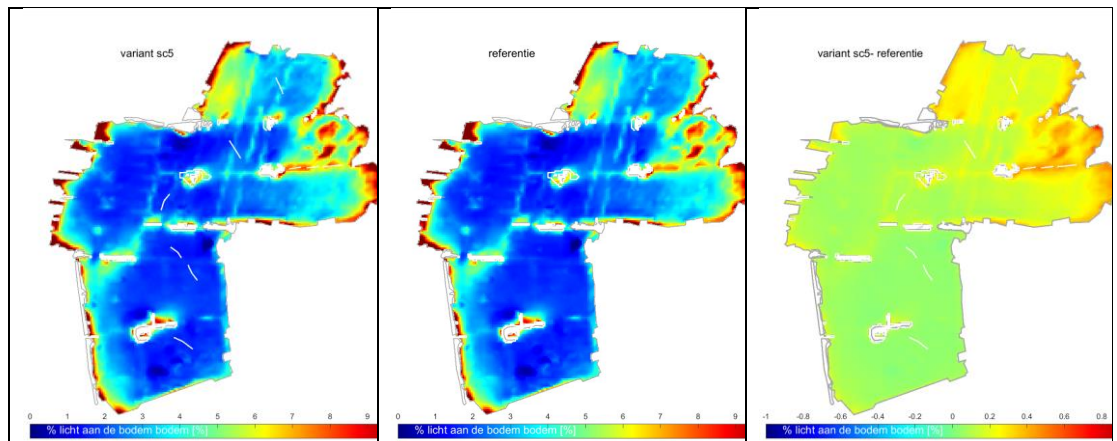
Figuur 17 Berekend gemiddeld percentage bodemlicht in de winterperiode (links) en zomerperiode (rechts).

4.3.2 Effect van luwte in scenario's – ruimtelijk

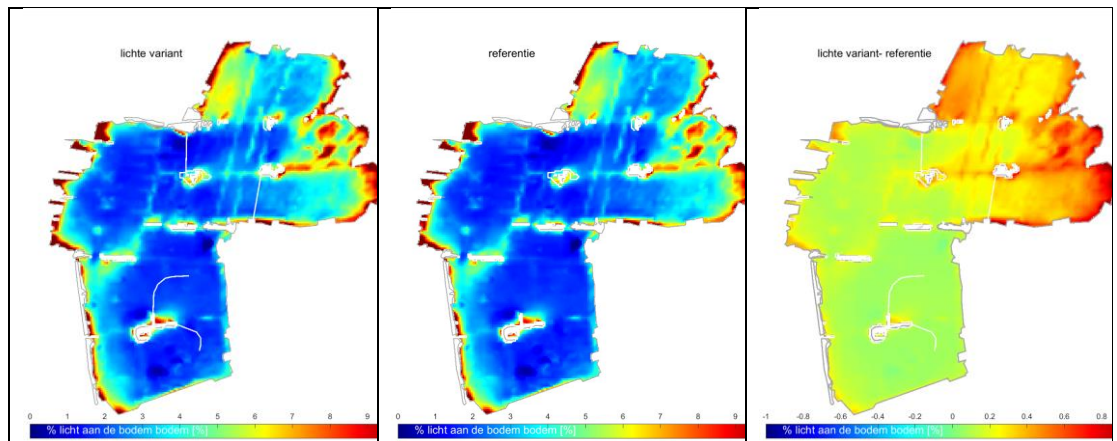
In Figuur 18 tot en met Figuur 23 staan links de ruimtelijke patronen van het percentage licht dat in de voorjaarsperiode de bodem bereikt voor achtereenvolgens de volgende varianten:

- de draagvlakvariant (sc5),
- de lichte variant,
- de lichte variant met aanpassingen,
- de zware variant en
- twee lokale varianten (3a en 3b).

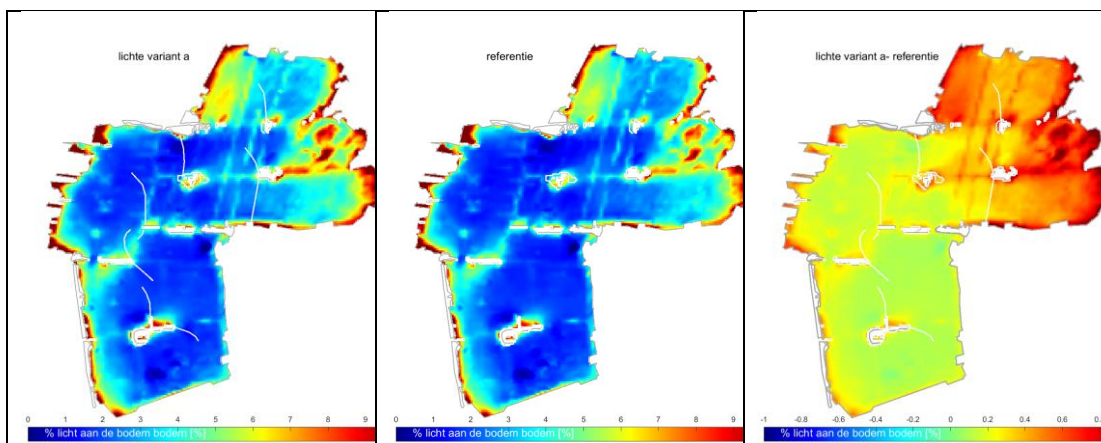
Het ruimtelijke patroon wordt vergeleken met het referentiescenario (midden) en om duidelijk te maken waar de, vaak kleine, verschillen optreden is ook een verschilplaatje getoond. Een positieve waarde in het verschilplaatje (rechts in de figuren) betekent een toename van de hoeveelheid licht aan de bodem ten opzichte van de referentie. Een verschil van +0.5% (een half procentpunt) betekent dat in die gebieden 4.5% in plaats van 4% licht de bodem bereikt.



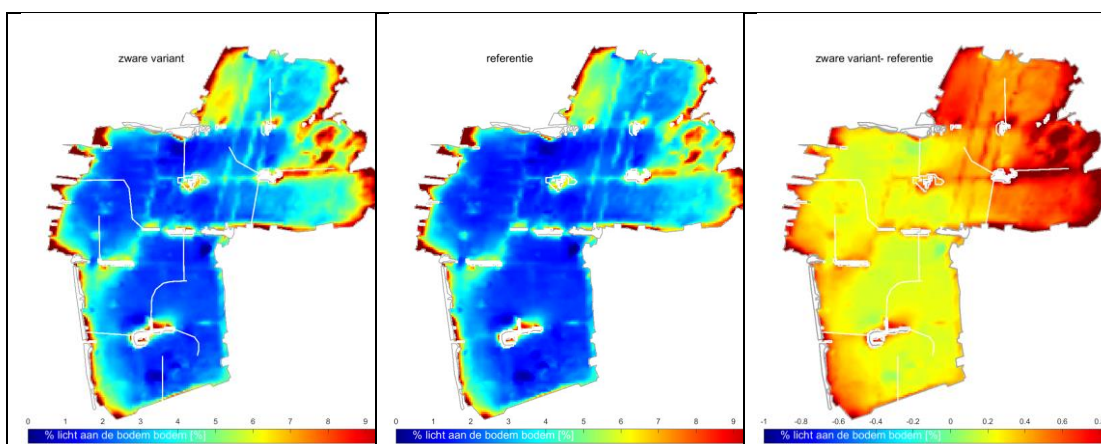
Figuur 18 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode – draagvlak variant. Scenario (links), referentie (midden) en verschil (rechts).



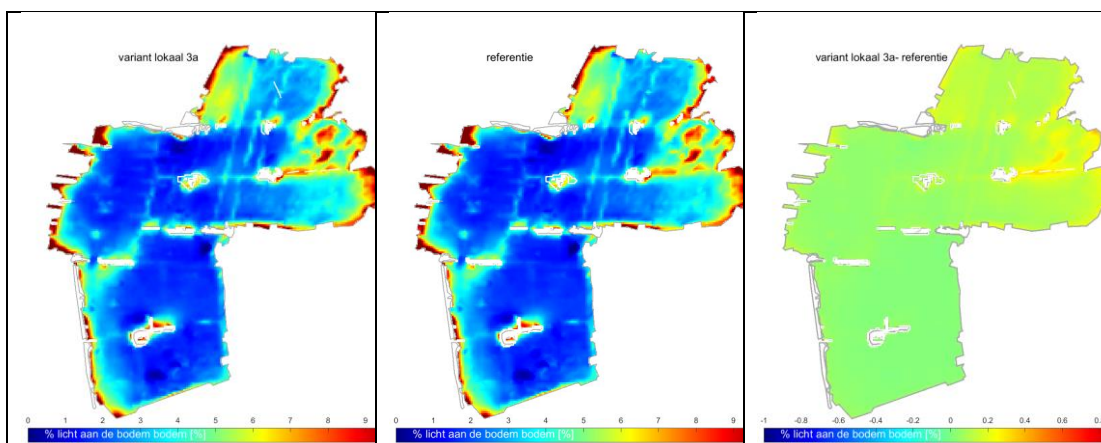
Figuur 19 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode - lichte variant. Scenario (links), referentie (midden) en verschil (rechts).



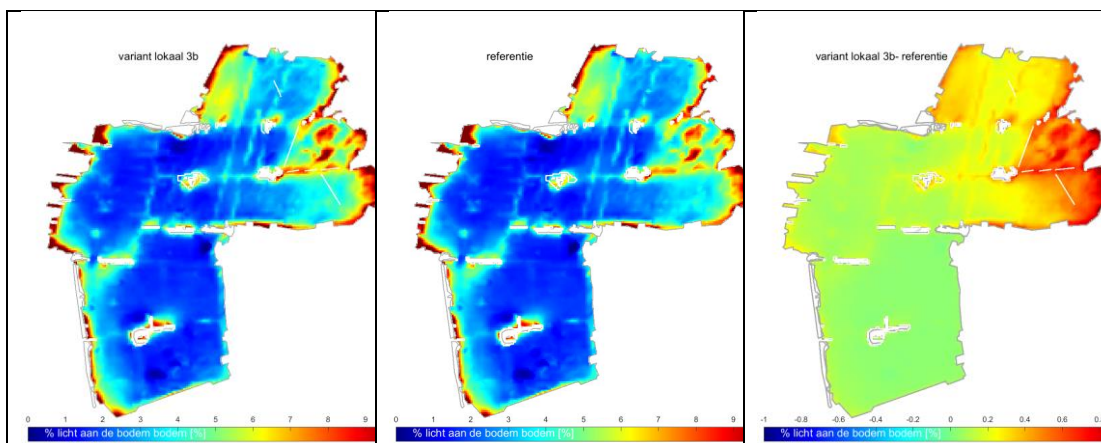
Figuur 20 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode – lichte variant met aanpassingen. Scenario (links), referentie (midden) en verschil (rechts).



Figuur 21 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode – zware variant. Scenario (links), referentie (midden) en verschil (rechts).



Figuur 22 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode – lokale variant a met 2 luwte elementen



Figuur 23 Percentage licht op de bodem in de voorjaarsperiode – lokale variant b met 4 luwte elementen. Scenario (links), referentie (midden) en verschil (rechts).

Het berekende effect van luwtemaatregelen is niet heel sterk want de gebruikte schaal (maximaal 0.8% punt extra licht) is absoluut gezien niet groot. Hoewel 0.8% weliswaar een klein effect is, betekent het ten opzichte van de referentie van 4% licht toch een toename tot 4.8%, dus 20% meer licht.

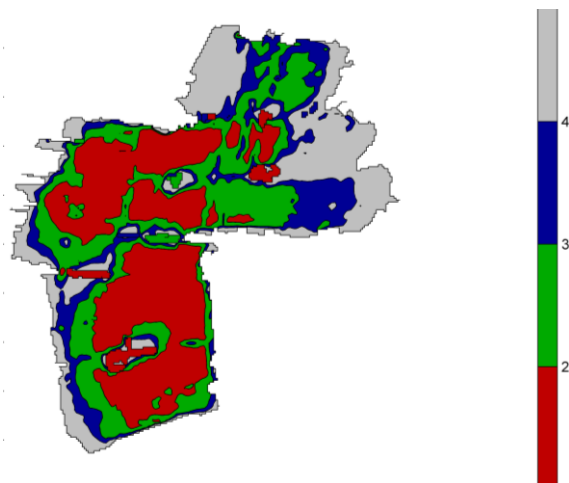
De resultaten zijn gezien de windcondities in de voorjaarsperiode begrijpelijk. Er was immers weinig wind en dus weinig opwerveling van slib en de plas was hierdoor in de referentiesituatie al behoorlijk helder. In die omstandigheden is er niet veel extra winst te behalen met luwtemaatregelen.

In 4.3.3 is ook het effect van luwtemaatregelen voor de winterperiode beschouwd. Omdat er in de gebruikte winterperiode meer wind en opwerveling van slib was, geven de simulaties wel een goed beeld van het effect van luwtemaatregelen hoewel dit voor de ontwikkeling van waterplanten minder relevant is dan de voorjaarsperiode.

In Figuur 22 en Figuur 23 is het effect van de twee lokale scenario's gepresenteerd. Het effect van lokaal scenario 3b is vanzelfsprekend groter dan dat van 3a. Lokaal scenario 3b laat een groter berekend effect zien dan de draagvlakvariant sc5 (zie ook in Tabel 6). Dat is een opvallend resultaat omdat hier met minder luwtestructuren meer effect bereikt wordt. Dit leidt tot de conclusie dat het effectiever is om luwte maatregelen gericht in te zetten op ondiepere locaties waar ze qua bodemlicht eerder en een groter effect sorteren.

Op plekken die al vrij helder zijn hebben luwtemaatregelen weinig effect omdat er al voldoende (>4%) licht is. Op plekken met een erg slecht lichtklimaat zijn luwtemaatregelen evenmin effectief omdat het lichtklimaat onvoldoende verbetert (blijft < 4%). Maar op plekken die hier tussenin zitten zijn luwtemaatregelen wel effectief, d.w.z. hierdoor veranderen deze gebieden van net niet geschikt in net wel geschikt. In Figuur 24 is aangegeven welke delen van de plas met een kleine toename van licht gaan voldoen aan het gestelde criterium van 4% (groen +2%, blauw +1%) en welke delen dat nu al zijn (grijs).

Op plekken nu niet voldoen (bv de groene en blauwe gebieden in Figuur 24) zijn luwtemaatregelen mogelijk wel effectief: ondanks dat ze (net niet) aan het 4% criterium voldoen neemt de hoeveelheid bodemlicht er relatief flink toe. Mogelijk geven de luwtemaatregelen dan net het zetje in de goede richting dat het systeem nodig heeft (met eventueel zichzelf versterkende effecten als waterplanten tot ontwikkeling komen en hierdoor nog meer luwte ontstaat).



Figuur 24 Percentage licht op de bodem (%) in de voorjaarsperiode in de referentie berekening.

4.3.3 Effect van luwte in scenario's – arealen

Het effect van alle scenario's is uitgedrukt in toename van het areaal met meer dan 4% licht op de bodem en is voor zowel de winter- als de voorjaarsperiode samengevat in Tabel 6.

In het model is het areaal >4% in de winter beperkt (24 ha) en dit neemt in de zware variant toe tot 57 ha, weliswaar ruim een verdubbeling maar ten opzichte van het totale plasareaal (orde 800 ha) nog steeds weinig. Het watersysteem blijft in feite troebel in de winterperiode. In de voorjaarsperiode is het areaal in de referentie al 223 ha (bijna 28% van het totale oppervlak). In de draagvlakvariant neemt het areaal >4% toe met 16 ha in de zware variant komt er 40 ha bij waardoor het totaal areaal >4% toeneemt tot 263 ha wat order 33% van het totale areaal is.

Het berekende effect van luwtemaatregelen uitgedrukt in een toename van het areaal met >4% licht op de bodem is dus niet heel groot. In de winter blijft het troebel door het grote aantal verstoringen (wind) in combinatie met het traag bezinken van het slib. In de voorjaarsperiode is het water in de referentiesituatie al over een groot areaal helder en is de toename als gevolg van luwtemaatregelen beperkt.

De voor de voorjaarsperiode 2021 berekende arealen met meer dan 4% licht aan de bodem liggen hoger dan eerder met een eenvoudiger methodiek berekend [6]. Daarbij valt vooral op dat de referentiesituatie met 223 ha ruim twee keer zo hoog is als de 100 ha uit [6]. Het areaal dat in deze studie voor de varianten berekend wordt ligt, afhankelijk van de zwaarte van de maatregel ook hoger dan in [6], bijvoorbeeld: de lichte variant aangepast was berekend op 200 ha en zware variant op 232 ha dit wordt respectievelijk 263 ha (+31%) en 279 ha (+20%). Door de veel helderdere referentie in deze studie zijn de minder zware varianten niet goed vergelijkbaar.

Het is te overwegen om het verbeterde slibmodel nog een keer toe te passen voor de referentie en (een beperkt aantal) varianten voor een langere periode van recente jaren (bijvoorbeeld 2018-2021) om daarmee minder invloed van de toevallige weersomstandigheden in de meetperiode (januari – mei 2021) te hebben.

Tabel 6 Areaal (ha) waar licht aan de bodem gemiddeld groter dan 4% is in de winterperiode: oppervlak in ha (kolom "ha"), toename ten opzichte van de referentie in ha (kolom "+ha (ref)") en procentuele toename areaal ten opzichte van de referentie (kolom "%(ref)") voor de winterperiode (boven) en voorjaarsperiode (onder).

scenario	seizoen	ha	+ha (ref)	%(ref)
ref	winter	24		
sc5	winter	32	8	32%
licht	winter	39	15	61%
licht_a	winter	54	30	123%
zwaar	winter	82	57	238%
lokaal_3a	winter	27	3	11%
lokaal_3b	winter	37	13	52%

scenario	seizoen	ha	+ha (ref)	%(ref)
ref	voorjaar	223		
sc5	voorjaar	238	16	7%
licht	voorjaar	252	30	13%
licht_a	voorjaar	263	40	18%
zwaar	voorjaar	279	56	25%
lokaal_3a	voorjaar	231	8	4%
lokaal_3b	voorjaar	249	26	12%

4.3.4 Conclusie effect luwtestructuren

Er is een groot verschil in areaal met meer dan 4% licht op de bodem tussen de winter- en voorjaarsperiode van 2021 berekend. In de winterperiode zorgt frequente opwerveling van slib in combinatie met traag bezinken voor langdurig troebel water. Luwtestructuren leiden in die omstandigheden wel tot meer helderheid maar niet tot voldoende areaal met meer dan 4% licht aan de bodem. De voorjaarsperiode van 2021 is van nature luw en in het model relatief helder waardoor luwtestructuren een beperkt effect hebben. Het totaal areaal met meer dan 4% licht aan de bodem in het voorjaar varieert van 223 ha (referentie) tot 279 ha voor de zware variant. In alle berekeningen (inclusief referentie) is al meer dan een kwart van het plasareaal potentieel geschikt is voor ontwikkeling van waterplanten.

Het berekende effect van luwtemaatregelen in het voorjaar (uitgedrukt in extra areaal met meer dan 4% bodemlicht) is beperkt en is minder sterk dan berekend in 2009 [4] met name omdat de referentiesituatie helderder is. Voldoende licht op de waterbodem komt in het voorjaar, ook in de zware variant, voornamelijk voor in de ondiepere zones in het noorden en noordoosten van de Loosdrechtse Plassen. De kansen om het potentieel areaal voor ontwikkeling waterplanten te vergroten liggen vooral in de ondiepere zones aan de oostkant van de 1^e, 2^e en 3^e plas.

Lokaal aanbrengen van luwtestructuren aan de oostkant (scenario 3b) heeft meer effect dan de draagvlakvariant (sc05). Luwtemaatregelen aan de oostkant zijn het meest effectief voor vergroting van het potentieel areaal voor waterplanten.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Verbeterde slibmodel

Het slibmodel is gekalibreerd op één locatie in de plas, met metingen vanaf de meetpaal. Onafhankelijke validatie op die meetpaal locatie is niet mogelijk omdat daarvoor de meetperiode met consistente metingen door uitval van de wind- en lichtsensor te kort is. Ruimtelijke validatie is alleen uitgevoerd op basis van twee meetrondes. Het verbeterde slibmodel voorspelt iets helderder water dan gemeten en laat minder ruimtelijke variatie zien dan in de meetpunten aanwezig is. Waarschijnlijk is dit het gevolg van de manier waarop de invloed van niet gemodelleerde chlorofyl is opgenomen in het model. De voorspelkracht van het model is bij gebrek aan een component die (het effect van luwte op) eutrofiering voorspelt beperkt.

Het verbeterde slibmodel is toepasbaar om het effect van luwtestructuren te beoordelen omdat de voorspelde K_d 's in de relevante range van waarden (1.5 tot 2 1/m) redelijk in lijn zijn met de gemeten waarden. Omdat het model met name in het voorjaar (vanaf 15 maart) te helder is t.o.v. waarnemingen, is de beoordeling van het effect van luwte conservatief (d.w.z. een onderschatting van het luwte-effect). Het is niet uit te sluiten dat de overgang van lokaal gemeten wind naar wind gemeten op KNMI station de Bilt deze onderschatting verder vergroot.

Aanbevelingen voor verdere validatie worden gedaan in 5.3.

5.2 Effectiviteit luwtestructuren

Uit de berekeningen blijkt dat er is een groot verschil in areaal met meer dan 4% licht op de bodem tussen de winter- en voorjaarsperiode van 2021. In de winterperiode zorgt frequente opwerveling van slib in combinatie met traag bezinken voor langdurig troebel water. Luwtestructuren leiden in die omstandigheden wel tot meer helderheid maar niet tot voldoende areaal met meer dan 4% licht aan de bodem. De voorjaarsperiode van 2021 is in het model relatief luw en helder, mogelijk ook door gebruik van de Bilt wind in plaats van lokaal gemeten wind, waardoor luwtestructuren een beperkt effect hebben. Het totaal areaal met meer dan 4% licht aan de bodem varieert van 223 ha (referentie) tot 279 ha voor de zware variant. In alle berekeningen (inclusief referentie) is al meer dan een kwart van het plas areaal dat potentieel geschikt is voor ontwikkeling van waterplanten.

Het berekende effect van luwtemaatregelen (uitgedrukt in extra areaal met meer dan 4% bodemlicht) is beperkt en is minder sterk dan berekend in 2009 [4], met name omdat de referentiesituatie helderder is. Voldoende licht op de waterbodem komt alleen voor in de ondiepere zones in het noorden en noordoosten van de plas, ook voor de zware variant. De kansen om het potentieel areaal voor ontwikkeling waterplanten te vergroten liggen vooral in de ondiepere zones aan de oostkant van de 1^e, 2^e en 3^e plas.

Lokaal aanbrengen van luwtestructuren aan de oostkant (scenario 3b) heeft meer effect dan de draagvlakvariant (sc05). Luwtemaatregelen aan de oostkant zijn het meest effectief voor de vergroting van het potentieel geschikte areaal voor waterplanten.

Hoewel de berekende toename van licht door maatregelen in het voorjaar beperkt is tot orde 1%, is zo'n verhoging ten opzichte van de referentie van 4% licht toch significant. Wat je als grens voor bodemlicht aanneemt bepaalt in belangrijke mate de ligging en omvang van de gebieden die in de referentie niet geschikt zijn voor waterplanten maar in de scenario's wel.

5.3 Aanbevelingen

Het is te overwegen om het verbeterde slibmodel nog een keer toe te passen voor een langere en daardoor meer representatieve referentieperiode (bijvoorbeeld de recente jaren 2018-2021) en (een beperkt aantal) varianten voor deze langere periode te berekenen. Daarmee wordt de invloed die toevallige weersomstandigheden in de meetperiode (januari – mei 2021) op de resultaten hebben verkleind.

Verdere validatie van het model leidt tot meer zekerheid over de betrouwbaarheid van de uitspraken die ermee worden gedaan. Voorgesteld wordt om:

- te controleren of patronen van 4% licht aan de bodem die het model voorspelt overeenstemmen met het vóórkomen van waterplanten, liefst gebaseerd op een waterplantenkartering van recente jaren
- te verifiëren of het model aanslibbing conform gemeten slibdiktes en van slibverdeling [19] laat zien en
- ruimtelijke patronen te valideren met remote sensing.

Verdere verbetering van het model kan door rietstroken die in het water aanwezig zijn op te nemen in het modelrooster zodat de demping op golven en de invloed op stroming beter worden gerepresenteerd. Deze verbetering is mogelijk als de ruimtelijke verspreiding van riet(stroken) bij Waternet bekend is.

Referenties

- [1] 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.
- [2] Roskam, G.D. en Boderie, P.M.A. (2021). Loosdrecht - Monitoring voor de validatie van het slibmodel. Deltares-rapport 11201773-006-ZWS-0007.
- [3] Uittenbogaard R., E. Penning en M. van der Vat, Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechtse Plassen - Expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater lichtklimaat, WL | Delft Hydraulics rapport Q4461.04, 2008.
- [4] Penning E., M. Genseberger, R. Uittenbogaard en G. van Geest, Aanvullingen bij Besluit-MER verdiepingen Loosdrechtse Plassen, Deltares rapport Q4700, 2009.
- [5] Penning W. E., R. Uittenbogaard, M. Ouboter, and E. Van Donk, Local deepening of large shallow peat lakes: A measure to improve their ecological status. *Journal of Limnology* 69, pp. 126-137, 2010. DOI: 10.4081/jlimnol.2010.126
- [6] Penning W. E., M. Genseberger, R. E. Uittenbogaard, and J. C. Cornelisse, Quantifying measures to limit wind-driven resuspension of sediments for improvement of the ecological quality in some shallow Dutch lakes, *Hydrobiologia* 2012. DOI 10.1007/s10750-012-1026-z
- [7] Kessel T. van, G.J. de Boer en P.M.A Boderie. Calibration Calibration suspended sediment model Markermeer, 2008. Deltares raport 120048.
- [8] Boderie, P., Smale, A and C.T. Thiange. Validation suspended sediment model Markermeer – version II & Application to silt screen. Deltares report 1201198-010 2012.
- [9] Vijverberg T., R. Knoben en P. Boderie, Resultaten Veldexperiment Luwtestructuur - Invulling kennisleemten en beantwoording onderzoeksvragen, HaskoningDHV rapport 9V6742.A2, 2013.
- [10] Roskam G.D. Resultaten experimenten Loosdrecht, Deltares memo 11201773-003-ZWS-0003, 2019.
- [11] Tauw, 2018. Veld- en analysegegevens Loosdrechtse Plassen ten behoeve van slibmodel Deltares, Tauw brief van M. van der Meer L001-1263469MVM-V02-nja-NL, 2018.
- [12] Van den Berg, M. S., H. Coops and J. Simons. Propagule bank buildup of *Chara aspera* and its significance for colonization of a shallow lake. *Hydrobiologia* 462: 9–17, 2001.
- [13] Middelboe, A.L and S. Markager (1997). Depth limits and minimum light requirements of freshwater macrophytes. *Freshwater Biology* (1997) 37, 553–568.
- [14] Buiteveld, H., 1995. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and Secchi depth. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 29(1) 55-65 (1995)
- [15] Stelling G. S., Van Kester J. A. T. M. On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep bottom slopes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 1994; 18(10):915–935.

- [16] Swart, D. H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Delft Hydraulics Publ. 1Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. 35:373–412
- [17] Wuest, A. and Andreas Lorke (2003). Small scale hydrodynamics in lakes. Applied Aquatic Ecology (APEC), Limnological Research Center, EAW31. 158. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220
- [18] SWAN. Zie scientific/technical documentation onder documentations op <https://swanmodel.sourceforge.io/> en dan “modelling of obstacles” voor GODA formuleringen voor golfreflectie en transmissie.
- [19] Tauw, Slibbalans. Bijlage 15 tabel 15.1
- [20] Genseberger, M. (2020). Offerte veldmetingen, modelverbetering en scenario berekeningen Loosdrechtse Plassen Kenmerk 11201773-006-ZWS-0003.
- [21] Hussem Consultancy, 2017. Rapportage resultaten inmeting Loosdrechtse plassen in opdracht van Tauw.
- [22] Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics (version: 3.15). Hoofdstuk 9.5.3 k-e turbulence model).

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