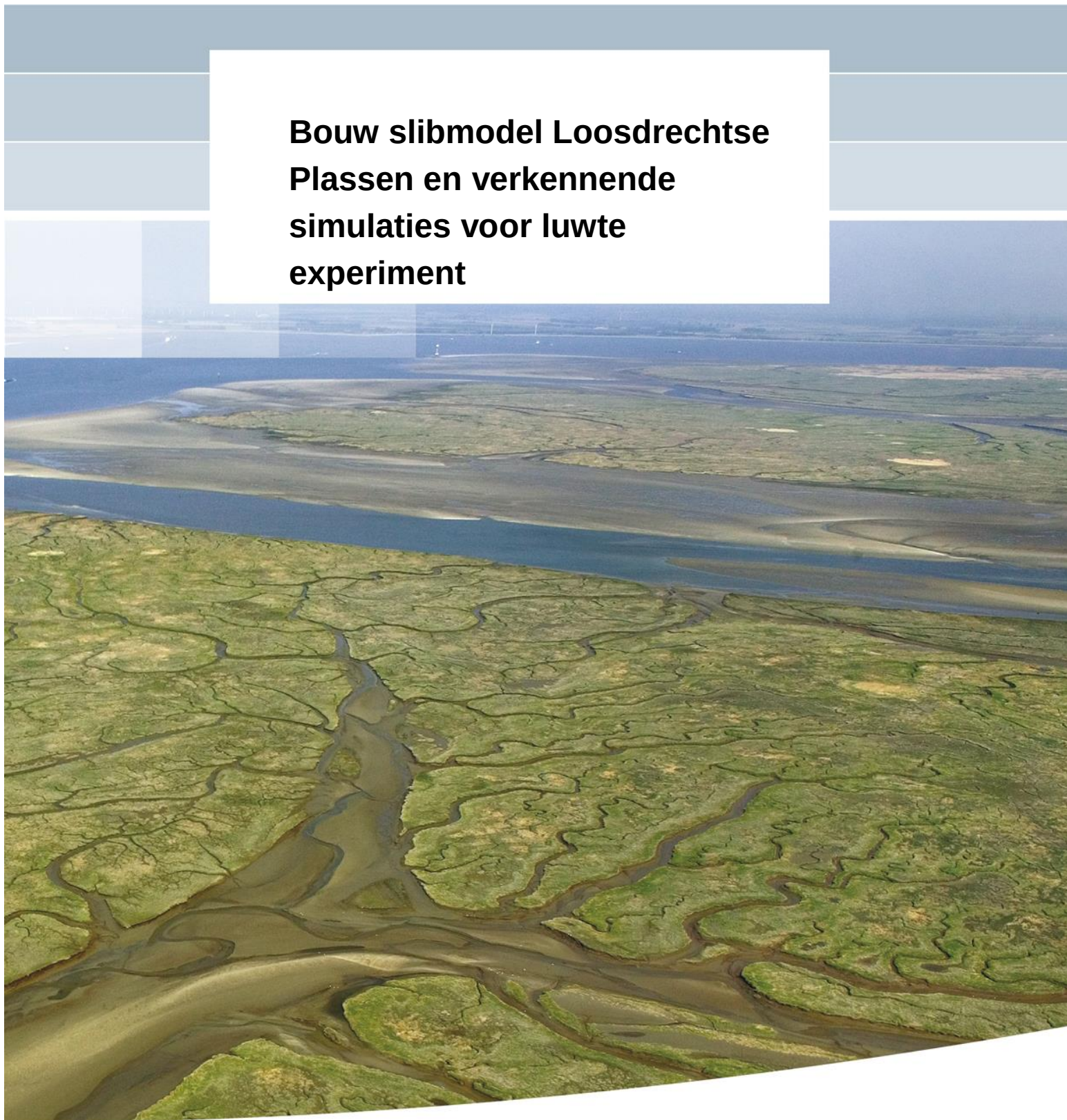


**Bouw slibmodel Loosdrechtse
Plassen en verkennende
simulaties voor luwte
experiment**



Bouw slibmodel Loosdrechtse Plassen en verkennende simulaties voor luwte experiment

Menno Genseberger
Pascal Boderie

Titel

Bouw slibmodel Loosdrechtse Plassen en verkennende simulaties voor luwte experiment

Opdrachtgever

Waternet

Project

11201773-004

Kenmerk

11201773-004-ZWS-0007

Pagina's

100

Trefwoorden

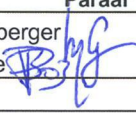
zwevend stof, slib, lichtklimaat, veenplas

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de opzet van een eerste versie van een slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen en verkennende scenarioberekeningen ter ondersteuning van een pilot luwtestructuren. Gegeven het huidige model, met de meest plausibele modelinstellingen voor de slibprocessen, lijken luwtestructuren wel effect te sorteren. Echter, dit is nu niet voldoende zeker te onderbouwen met het slibmodel vanwege de mate van onzekerheid in de dominante processen voor vertroebeling en de modelinstellingen hiervan. De zekerheid zal daarvoor vergroot moeten worden door het slibmodel beter te kalibreren en valideren op basis van de veldmetingen.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.1	augustus 2019	Menno Genseberger Pascal Boderie		Thijs van Kessel		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Leeswijzer	1
2 Opzet slibmodel	3
2.1 Introductie, doel en beperkingen toepassing slibmodel	3
2.2 Slibmodel op hoofdlijnen	3
2.3 Meerwaarde slibmodel ten opzichte van eerdere strijklengte aanpak en slibbalans methodiek	5
2.4 Gebied, randvoorwaarden en discretisatie	5
2.5 Eerste verificatie eerste stap slibmodel	6
3 Gemodelleerde slibprocessen in meer detail	7
3.1 Concepten en beschrijving	7
3.2 Gegevens basis modelinstelling	10
3.3 Parameter gevoeligheden	12
4 Scenarioberekeningen	17
4.1 Beschouwde scenario's	17
4.2 Resultaten scenarioberekeningen	17
4.2.1 Bodemschuifspanning	18
4.2.2 Zwevend stof	18
4.3 Licht	20
5 Conclusies en aanbevelingen	21
6 Referenties	23
A Resultaten labexperimenten Loosdrecht	25
A.1 Aangeleverde sedimentkolommen	25
A.2 Uitvoering opwervings- en sedimentatie-experimenten	25
A.3 Resultaten experimenten	26
A.3.1 Opwervelingsexperimenten	26
A.3.2 Sedimentatie van opgewerveld materiaal	28
A.3.3 Samenstelling toplaag (door Tauw) en opgewerveld materiaal	29
A.4 Conclusies	31
A.4.1 Conclusies	31
A.5 Bijlage: Overige data opwervelingsexperiment	32
B Programma van eisen pilot luwte-effecten Loosdrechtse Plassen	37
B.1 Doel en opbouw	37
B.2 Achtergrond en onderbouwing luwtestructuur op hoofdlijnen	37
B.2.1 Experimenteel onderzoek gedrag zwevend slib	39
B.2.2 Mogelijke meetlocaties	40
B.2.3 Te monitoren effecten	42
B.2.3.1 Nagaan functioneren luwtestructuur binnen systeem aan noordoostkant eiland	42

B.2.3.2 “Nice to have”: referentie aan zuidwestkant eiland	42
B.2.3.3 Aanvullend rondom eiland en voor Loosdrechtse Plassen	42
B.2.3.4 Toelichting voor nagaan effect luwtestructuur op lichtklimaat in waterkolom	43
B.2.3.5 Meetperiode	43
B.3 Informatie over aanleg luwtestructuur op hoofdlijnen	43
B.4 Monitoringsstrategie op hoofdlijnen en kostenschatting	45
B.4.1 Monitoringsstrategie	45
B.4.2 Kostenschatting (excl. BTW)	46
B.4.3 Survey’s	48
B.4.4 Totale kostenschatting monitoring effectiviteit luwtemaatregel	48
B.5 Referenties	49
C Modelopzet	51
D Gevoeligheidsanalyse modelparameters	59
E Resultaten scenario berekeningen bodemschuifspanning	69
F Resultaten scenario berekeningen zwevend stof	88
G Resultaten scenario berekeningen licht	100

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Dit rapport beschrijft de opzet van een eerste versie van een slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen en verkennende scenario berekeningen daarmee. Dit werk is uitgevoerd door Deltares in opdracht van Waternet. Waternet is samen met de Provincie Noord-Holland betrokken bij het gebiedsakkoord voor de Oostelijke Vechtplassen waarin onder meer de hoeveelheid zwevend stof in de Loosdrechtse Plassen aangepakt moet worden. Het plan is om daarvoor een pilot luwtestructuren uit te voeren. Het slibmodel is bedoeld ter ondersteuning daarvan om:

- hiermee verkennende berekeningen uit te voeren (locatie en afmeting luwtestructuur),
- aan de hand van metingen uit de pilot het slibmodel verder te verbeteren en
- het slibmodel vervolgens te gebruiken om resultaten uit de pilot luwtestructuren op te schalen naar uiteindelijk te implementeren luwtemaatregelen om de hoeveelheid zwevend stof daadwerkelijk te verminderen.

Echter, door ontbreken van voldoende veldwaarnemingen is voor de eerste opzet van het slibmodel onvoldoende zeker wat de dominante factor is in de slibdynamiek voor de Loosdrechtse Plassen: resuspensie van bodemslib door golven, oevererosie en/of vlokvorming in de waterkolom. Dit was aanleiding de vraag te stellen of niet beter eerst een luwte experiment gedaan kan worden door het verrichten van metingen rond een van de bestaande eilanden (met het eiland als luwtestructuur). Met deze metingen kan het slibmodel aangescherpt worden en beter van te voren ingeschat worden of het principe van een luwtestructuur specifiek werkt in de Loosdrechtse Plassen (zonder al een grotere investering te doen in een luwtestructuur voor de pilot).

Gezien bovenstaande ontwikkelingen is de oorspronkelijke opdracht in onderling overleg tussen Deltares en Waternet gewijzigd. Het voorliggende rapport dient ter verdere afweging van de vervolgstappen in dit proces. Voor de volledigheid zijn twee eerdere memo's van Deltares ter ondersteuning van het op te zetten slibmodel en de/het uit te voeren pilot luwte structuur/luwte experiment opgenomen in bijlage A en B van dit rapport.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport dient zowel als een beschrijving (documentatie) van een modelopzet als inhoudelijke onderbouwing van te nemen vervolgstappen. Daarom is gekozen een algemene beschrijving van het slibmodel te geven in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt dieper ingegaan op belangrijke slibprocessen. Daarbij worden de belangrijkste onzekerheden in de modelinstellingen benoemd, deze onzekerheden zijn het gevolg van het ontbreken van voldoende veldmetingen. Effecten van deze onzekerheden op de modeluitkomsten worden inzichtelijk gemaakt door een gevoeligheidsanalyse. Voor de nu meest plausibele waarden van deze modelinstellingen (op basis van de nu beschikbare kennis en gegevens) zijn al wel scenarioberekeningen uitgevoerd ter verdere onderbouwing van waar gemeten zou moeten worden, deze worden gerapporteerd in hoofdstuk 4. Afgesloten wordt in hoofdstuk 5 met een advies voor de vervolgstap: het uitvoeren van specifieke veldmetingen. Door dit toe te spitsen op slib/zwevend stof kan dit met een kleinere inspanning verricht worden dan het oorspronkelijk meetplan voor de pilot luwte structuur/luwte experiment (integraal opgenomen in bijlage B).

2 Opzet slibmodel

2.1 Introductie, doel en beperkingen toepassing slibmodel

Voor een verdere kwantificering van de effecten van luwte spelen de volgende vragen. Hoe werkt vermindering van de bodemschuifspanning (als gevolg van minder windinvloed) door op de hoeveelheid slib in de waterkolom en op de hoeveelheid licht dat de bodem bereikt? Hebben luwte maatregelen een (significant) effect op slib en licht? Het slibmodel is behulpzaam bij de inrichting van een luwte-experiment (locatie en omvang) en bij het aanscherpen van het bij zo'n experiment horende meetplan.

Voor de Loosdrechtse Plassen is een slibmodel opgezet naar analogie met het slibmodel zoals dat is ontwikkeld voor het Markermeer. Met de beschikbare gegevens en expert kennis is het ingericht om het slibgedrag in de Loosdrechtse Plassen zo goed mogelijk te beschrijven. Met name door gebrek aan hoogfrequente veldmetingen van slib is het op dit moment niet mogelijk om de resultaten van het model te valideren. Het voorlopige slibmodel is vervolgens gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse van de belangrijkste modelinstellingen waarmee de variaties in slibgehalte zijn gekwantificeerd. In dit hoofdstuk wordt de algemene opzet van het slibmodel besproken. Het volgende hoofdstuk gaat verder in op de specifieke modelinstellingen voor het slib gevolgd door een gevoeligheidsanalyse.

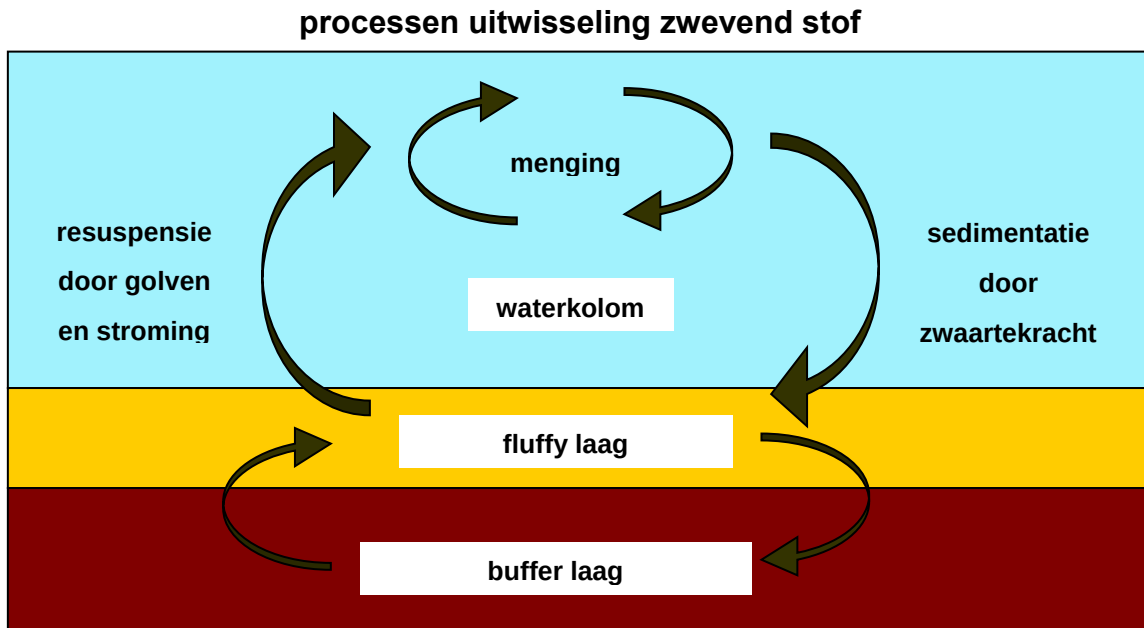
2.2 Slibmodel op hoofdlijnen

Zie Figuur 2.1 voor een schematische weergave van de processen die in het slibmodel worden gesimuleerd. Bij de modelberekeningen worden hiervoor achtereenvolgens twee stappen doorlopen:

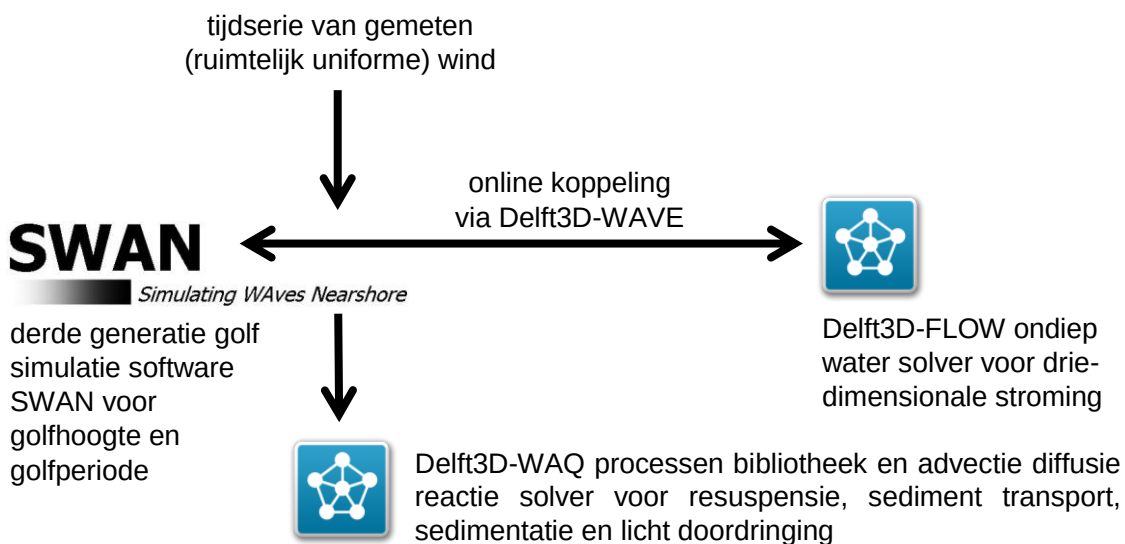
1. In de eerste stap worden windgedreven golven en waterstroming uitgerekend op basis van een tijdserie van gemeten (ruimtelijk uniforme) wind. Deze hebben effect op de bodemschuifspanning en het transport van slib. Bij sterkere wind zijn golfeffecten de belangrijkste oorzaak voor opwerveling van slib.
2. De tweede stap combineert de bijdragen van stroming en golven aan de bodemschuifspanning, vertaalt deze naar resuspensie/opwerveling (vanuit het sediment), berekent het transport van slib en de sedimentatie (als gevolg van de zwaartekracht, vooral in de meer rustige gebieden/perioden).

Voor het simuleren van deze processen wordt een modellenketen gebruikt, zie Figuur 2.2:

1. De eerste stap gebruikt Delft3D-FLOW [1] (software voor het oplossen van ondiepwatervergelijkingen) voor het berekenen van waterbeweging in drie dimensies uurlijks tweewegs gekoppeld via Delft3D-WAVE [1] aan SWAN [2] (derde generatie golf simulatie software SWAN voor golfhoogte en golfperiode) voor het simuleren van windgedreven golven.
2. De tweede stap gebruikt Delft3D-WAQ [1] (software voor het oplossen van advection-diffusie-reactie vergelijkingen met een uitgebreide proces definities voor waterkwaliteit en ecologie) voor het bundelen van de bijdrage van stroming en golven op de resuspensie, simuleren van slibtransport en sedimentatie en de doorberekening naar doorzicht in drie dimensies.



Figuur 2.1 Schematische weergave van processen die in het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen worden gesimuleerd (voor omschrijving fluffy en buffer laag: zie einde sectie 2.4).



Figuur 2.2 Modellenketen in het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen.

2.3 Meerwaarde slibmodel ten opzichte van eerdere strijklengte aanpak en slibbalans methodiek

Ten opzichte van de eerder voor de Loosdrechtse Plassen gebruikte strijklengte aanpak [3, 4] voor golfeffecten neemt SWAN in de eerste stap meer aspecten mee in de berekening (o.a. refractie en variabele diepte). Verder wordt in de strijklengte aanpak alleen gekeken naar de kans op opwerveling van slib. Het slibmodel rekent in de tweede stap effectief uit hoeveel slib opwervelt, hoeveel meegevoerd wordt in de waterkolom door stroming en hoeveel weer neerzakt.

Ten opzichte van de slibbalans methodiek [5] rekent het slibmodel transport en ruimtelijke gradiënten uit, met de slibbalans methodiek werd een gemiddeld evenwicht tussen sedimentatie en erosie berekend op basis daarvan een (jaar)gemiddelde troebelheid.

2.4 Gebied, randvoorwaarden en discretisatie

Het beschouwde gebied bestaat uit de eerste t/m vijfde plas van de Loosdrechtse Plassen. Zie Figuur C.1 in bijlage C. In deze figuur worden ook de observatiepunten A t/m H getoond zoals gebruikt in het slibmodel.

De dynamiek van het watersysteem die met de eerste stap door het slibmodel wordt berekend, hangt af van de geometrie van het gebied (vorm en diepte) en wat op de randen van het gebied (landgrenzen, aangrenzend water, wateroppervlak en bodem) gebeurt (lozingen, onttrekkingen, waterstand, wind, ruwheid). Voor de opzet van het slibmodel is alleen datgene meegenomen wat het meest bepalend is voor de dynamiek.

Voor de ruimtelijk variërende diepte zijn samples gebruikt van metingen van GEO-XYZ uit 2016, hierop is een uniforme correctie van 30 cm toegepast (zie Figuur C.2 in bijlage C). Bij de scenarioberekeningen zijn 4 scenario's bekeken waarbij drie bestaande eilanden fictief in het model zijn weggehaald, hiervoor is ter plekke van deze eilanden de bodem verlaagd tot het diepte niveau rondom het betreffende eiland (zie Figuur C.3 in bijlage C). Eilanden in luwtestructuren worden in Delft3D-FLOW gemodelleerd door het gebruik van zogenaamde droge cellen (als het eiland/de luwtestructuur daar tenminste de helft van het oppervlak bedekt) en dunne dammen (als de bedekking daar minder dan de helft is). In SWAN wordt voor de representatie van eilanden en luwtestructuren gebruik gemaakt van polygonen die gebieden geheel uitsluiten (eiland) of gedeeltelijk afschermen voor golfinvloeden.

In eerste instantie zijn geen lozingen/onttrekkingen op de randen opgelegd en is een uniforme initiële waterstand van NAP -1.10 m gebruikt (dit komt overeen met de gemiddelde waterstand). Op de bodem is een uniforme ruwheid opgelegd die overeenkomt met de ruwheid van veen.

Voor de opzet voor het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen is dezelfde windtijdreeks over het jaar 2006 gebruikt als standaard gebruikt voor het Markermeer slibmodel. Deze tijdreeks is representatief voor een gemiddeld jaar, met zowel harde wind in het voorjaar als rustige perioden in de zomer. Zie Figuur C.4 en Figuur C.5 in bijlage C. In Figuur C.5 wordt de windrichting alleen getoond als de windsterkte minstens 8.0 m/s (5 Bft) is, dit om een indruk te krijgen van de overheersende windrichting op het moment dat er opwerveling van slib optreedt. In een later stadium zal nagegaan moeten worden welk specifiek wind meetstation (in de omgeving van de Loosdrechtse Plassen of op de plassen zelf) het meest geschikt is voor toepassingen met het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen.

Het beschouwde gebied is in de horizontale richting bedekt door een vierhoekig rekenrooster met rekencellen van 20 m x 20 m. Deze benodigde resolutie en bijbehorende rekentijdstap is bepaald door een kleine studie naar het convergentiegedrag van waterbeweging en golven (zie Figuur C.6 en Figuur C.7 in bijlage C als voorbeeld). Voor het bepalen van de resolutie is ook de geometrie van de plassen meegenomen en de eilanden daarin. In de verticale richting worden 7 rekenlagen voor de waterkolom gebruikt waarbij de onderste de bodem volgt en de bovenste het wateroppervlak (zogenaamde sigma lagen). De bodem van de plas ([7], [8, 9]) bestaat uit een slappe (fluffy) modderlaag die uit veen en detritus [10] bestaat. In het slibmodel

representeert bodemlaag S1 het materiaal in de de fluffy laag die zich bovenop het sediment, de buffer laag (S2) bevindt (zie ook Figuur 2.1 en sectie 3.1).

2.5 Eerste verificatie eerste stap slibmodel

Er zijn geen meetgegevens beschikbaar van stroomsnelheden en significante golfhoogte in de Loosdrechtse Plassen. Daarom is als een eerste verificatie in deze studie een vergelijking gemaakt van de bodemschuifspanning zoals die met de eerder gebruikte strijklengte-aanpak werd berekend en zoals die nu in het slibmodel door Delft3D gekoppeld aan SWAN wordt berekend. Zie daarvoor Figuur C.8 (referentie) en Figuur C.9 (scenario 5 is het scenario "I74" dat in het gebiedsakkoord is meegenomen) in bijlage C. Voor de vergelijking kijkt de lezer in beide figuren in eerste instantie naar het 3^e plaatje (strijklengte) en 5^e plaatje (slibmodel) waarin de resolutie (20m) en kritische bodemschuifspanning 0.1 Pa gelijk zijn. Door vergelijking is te zien dat de bodemschuifspanning van het slibmodel en van de strijklengte aanpak in dezelfde range van overschrijdingsfrequenties zitten (0-15%). Verschillen komen enerzijds door de andere en meer gedetailleerde aanpak (zie ook sectie 2.3) en anderzijds doordat instellingen van o.a. de vergeleken periode niet helemaal overlappen. Te zien is verder dat de patronen van het slibmodel bij een grenswaarde van 0.03 Pa (vierde plaatje) beter overeenstemmen met de strijklengte aanpak (derde plaatje) dan met een grenswaarde van 0.1 (vijfde plaatje). Verschil tussen beide aanpakken komt door een aantal redenen. Enerzijds worden in het slibmodel golven beter gemodelleerd, hierdoor komt ondermeer achter een luwtestructuur/eiland minder luwte voor dan bij de strijklengte aanpak. Ten tweede neemt het slibmodel wel een variabele diepte mee, hierdoor is ondermeer luwte in ondiepe delen (rondom eilanden en langs de (oost)oevers van de plas) kleiner. Ten derde berekent het slibmodel hoeveel slib wordt opgewerveld, meegevoerd en weer bezinkt. De strijklengte aanpak berekent alleen de kans op opwerveling en houdt daarbij geen rekening met de werkelijke hoeveelheid slib op de bodem. In de berekeningen voor scenario 5 (scenario "I74" uit het gebiedsakkoord) laten resultaten van de strijklengte aanpak grotere luwten zien achter luwtestructuren (derde plaatje in Figuur C.9) dan die van het slibmodel (vierde en vijfde plaatje). Ook is het effect te zien in de resultaten van het slibmodel (vierde en vijfde plaatje) van het beter modelleren van golven en meenemen van de variabele diepte (minder hoekige maar juist meer vloeiende patronen door de betere golfmodellering en meer overschrijding van de kritische bodemschuifspanning in ondiepe zones in de noordoost hoek). Omdat de strijklengte aanpak geen opwerveling, transport van zwevend stof en sedimentatie uitrekent, is een verdere vergelijking met het slibmodel niet mogelijk.

De voorspellende kwaliteit van de eerste stap van het slibmodel hangt vooral af van een goede representatie van de geometrie en meest bepalende randvoorwaarden in het model (zie begin sectie 2.4). Voor de Loosdrechtse Plassen denken we dat dit voor de eerste modelopzet met de gebruikte dieptegegevens, de roosterresolutie en het alleen meenemen van windforcering voldoende is. Omdat voor de eerste stap dezelfde specifieke instellingen zijn gebruikt als in het slibmodel van het Markermeer, dat daarvoor wel is gevalideerd met meetgegevens, is de verwachting dat de eerste stap daarmee redelijk goed in het model zit. Daarom is bij de opzet van het slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen, in eerste instantie, vooral aandacht besteed aan de tweede stap, in het bijzonder de specifieke modelinstellingen voor het slib. De eigenschappen van slib zoals bezinksnelheid en erodiegevoeligheid kunnen in de Loosdrechtse Plassen immers afwijken van die in het Markermeer. Dit komt in het volgende hoofdstuk aan bod.

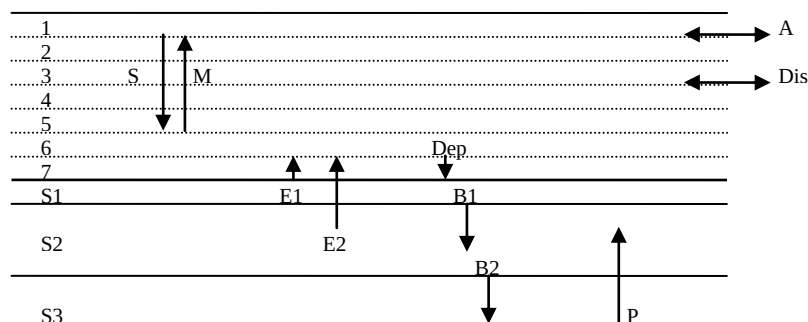
3 Gemodelleerde slibprocessen in meer detail

Figuur 2.1 in hoofdstuk 2 geeft schematisch de processen in het slibmodel weer. In dit hoofdstuk wordt meer in detail ingegaan op de gemodelleerde slibprocessen. Figuur 3.1 geeft deze uitwerking schematisch weer, termen in deze figuur worden in sectie 3.1 achtereenvolgens toegelicht. Sectie 3.2 gaat in op gegevens die zijn gebruikt als basis voor de modelinstellingen. Sectie 3.3 sluit af met resultaten van een gevoeligheidsanalyse voor de belangrijkste parameters waarvoor nog niet de exacte te gebruiken waarden bekend zijn.

3.1 Concepten en beschrijving

Gesuspenderde deeltjes in de waterkolom van de Loosdrechtse Plassen bestaan vnl. uit organisch materiaal zoals detritus en slechts voor een beperkt deel uit anorganisch materiaal. In dit rapport gebruiken we hiervoor door elkaar de termen zwevend stof en slib. Het model beperkt zich tot dat deel van het zwevend stof dat het doorzicht in het water beperkt, dat zijn de kleinere zwevende deeltjes met afmetingen in de orde van 1-10 μm , deze worden ook refractair detritus genoemd. We onderscheiden twee slibfracties, fijn en heel fijn met verschillend gedrag. Laboratoriumonderzoek (deze studie, zie bijlage A) laat zien dat het organische stofgehalte varieert tussen 27 en 77% en een minerale fractie die varieert tussen minder dan 1 en 22% kleiner dan 63 μm . Daarmee is de variatie in samenstelling van de toplaag van het sediment groot en het materiaal grotendeels organisch.

De bodem van de plas ([7], [8, 9]) bestaat uit een slappe (fluffy) modderlaag die uit veen en detritus [10] bestaat. De toplaag blijkt zeer ijl met een concentratie van slechts ca. 42 gC/L. In werkelijkheid, bij lage turbulentie beweegt deze vloeibare fluffy laag als een verdunde maar nog steeds dichte moddernevel over de bodem met een laagdikte van hooguit enkele decimeters, bij hogere turbulentie breken vlokken in deze vloeibare laag op tot kleinere deeltjes die dan, door hun geringe valsnelheid, ontsnappen uit de moddernevel en tot hoog in de waterkolom mengen. In het slibmodel representeert bodemlaag S1 het materiaal in de fluffy laag die zich bovenop het sediment (S2) bevindt. In het huidige model beweegt deze laag niet. Het sedimentmodel met Delft3D-WAQ bestaat uit 7 horizontale zogenaamde σ -lagen (eerste laag volgt het wateroppervlak, de laatste laag volgt de bodem) in het meer die de waterkolom voorstellen, dit is gelijk aan de laagverdeling van het waterbewegingsmodel met Delft3D-FLOW, en 3 lagen die de bodem voorstellen. De laagverdeling is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Er zijn onafhankelijk van de waterdiepte altijd 7 waterlagen. De pijlen geven sedimentfluxen weer, die hierna achtereenvolgens worden toegelicht.



Figuur 3.1 S=sedimentatieflux, M=opwaartse mengflux, Dep=Depositieflux, E=erosieflux (E1 uit S1 en E2 uit S2), B=Begravingsflux (B1 uit S1 en B2 uit S2) en P=productieflux. A= advectieve flux (aan- of afvoer slib via stroming) en Dis = dispersieve flux (aan- of afvoer via dispersie)

In de verticaal van de waterkolom bestaat een dynamisch evenwicht tussen bezinking en menging. Bij evenwicht ontstaat het verticale concentratieprofiel van het Rouse-type (een logaritmsch profiel van toenemende slibconcentratie met waterdiepte dat het gevolg is van een dynamisch evenwicht tussen de sedimentatiesnelheid en verticale opwaartse menging als gevolg van turbulentie). Doordat turbulentie als gevolg van stroming en golven varieert in de tijd en ruimte past het verticale concentratieprofiel zich steeds aan deze omstandigheden aan. Door beperkingen in de sedimentatie- en erosiesnelheid van slib ijlt het concentratieprofiel dus steeds na op het evenwichtsprofiel. De verticale mengcoëfficiënt is afgeleid van de hydrodynamische berekeningen met behulp van $k-\varepsilon$ turbulentiemodel. De bezinkflux S wordt berekend volgens $S = w_s C$, waarbij w_s bezinkingsnelheid is en C de slibconcentratie is. Om flocculatie tussen deeltjes tijdens bezinking te kunnen beschrijven, wordt in het slibmodel een concentratie-afhankelijke formulering voor de bezinkingsnelheid gebruikt:

$$w_s = w_{s0} (C/C_0)^f.$$

Hierin is w_{s0} de bezinkingsnelheid voor $C = C_0$ en de exponent f kan per slibfractie verschillen ($f = f_1$ en $f = f_2$ voor respectievelijk slibfractie 1 en 2). Twee sedimentfracties worden toegepast met de verschillende eigenschappen: $w_{s01} = 0.5$ m/d en $w_{s02} = 0.1$ m/d en $C_0 = 25$ mg/l. Deze beschrijving van de vlokvorming is een vereenvoudiging van de theorie uit [5]. De bezinkingsnelheden worden later toegelicht. Kalibratie ervan kan door (1) waargenomen verticale sedimentconcentratieprofielen te reproduceren en (2) waargenomen sedimentconcentratie / afnamesnelheden te reproduceren tijdens rustig weer na een periode van ruw weer.

De depositieflux van waterlaag 7 naar sedimentlaag S1 wordt uitgedrukt door: $Dep = w_s C_{L7}$. Merk op dat er geen kritische schuifspanning voor depositie wordt toegepast. Bij evenwicht wordt de depositieflux gecompenseerd door de erosieflux, die kan werken op beide sedimentlagen S1 en S2 :

$$E1 = M_1 (\tau/\tau_{crit1} - 1) = M_1 \tau_{e1},$$

$$E2 = p_2 M_2 (\tau/\tau_{crit2} - 1)^{3/2} = p_2 M_2 \tau_{e2}.$$

Laag S1 wordt gekenmerkt door zijn kritische schuifspanning voor erosie τ_{crit1} en resuspensiecoëfficiënt M_1 . Laag S2 wordt gekenmerkt door zijn kritische schuifspanning voor erosie τ_{crit2} en resuspensie constante M_2 . Meestal is laag S1 veel gemakkelijker erodeerbaar dan laag S2: $\tau_{crit1} < \tau_{crit2}$, beide volgen uit laboratoriumexperimenten dan wel uit kalibratie na veldexperimenten. Conceptueel representeert laag S1 de dunne makkelijk erodeerbaar fluffy materiaal bovenop het meer vaste sediment, terwijl laag S2 het sediment (bed) zelf vertegenwoordigt, waarin fijne deeltjes kunnen worden opgeslagen. De fractie fijne deeltjes p_2 in laag S2 wordt berekend uit m_2 , de totale sedimentmassa per vierkante meter in laag S2, volgens $p_2 = m_2 / d (1-n) \rho$, waarbij n de porositeit van het bed is, d de dikte van laag S2 en ρ de dichtheid van de vaste stof. De maximale slibfractie p_2 is één. Slibdeeltjes komen in S2 terecht door begraving van uit S1. Deze term (B1) wordt uitgedrukt als: $B1 = m_1 V_{bur}$. De snelheid van begraving van S1 naar S2 schaal linear met de beschikbare sedimentmassa m_1 . Indien nodig wordt overtollig materiaal begraven in de diepe sedimentlaag S3 om deze bovengrens van S2 te handhaven, aangezien d constant is. De begravingsterm in het model vertegenwoordigt een parameterisatie van processen zoals consolidatie en bioturbatie.

De resuspensiecoëfficiënt M_1 hangt af van de dikte van de fluflaag S1. Als de dikte onder de gebruikelijke ruwheidshoogte van het sediment blijft, wordt er naar verwachting geen deklaag gevormd. In dit geval is het onrealistisch om een nulde-orde resuspensie aan te nemen, d.w.z. een resuspensie die onafhankelijk is van de hoeveelheid beschikbaar sediment. In dat geval is een resuspensie van de eerste orde meer realistisch, d.w.z. een waarde die linear schaal met de hoeveelheid sediment per vierkante meter in laag S1. Dit resulteert in de volgende uitdrukking voor M_1 : $M_1 = \min(m_1 M_1', M_0)$, waar M_1' en M_0 respectievelijk de eerste en nulde orde resuspensie parameters zijn. Overgang tussen beide modi voor erosie treedt op voor m_1

$= M_0/M_1 \cdot$. Met $M_0 = 50 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ en $M_1 \cdot = 0.1 \text{ d}^{-1}$ dit treedt op bij $m_1 = 500 \text{ g/m}^2$, wat overeenkomt met een fluffy laag met een dikte van 0.25 (1.25) cm, uitgaande van een concentratie van 200 (40) kg/m^3 . Dus, de resuspensieparameters (M_1 en M_2) die in de berekening van de erosie E1 en E2 (voor respectievelijk S1 en S2) worden gebruikt zijn dus in principe modelinvoer uitgedrukt in $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ tenzij er te weinig materiaal voor resuspensie in een laag resteert dan wordt de resuspensie het product van een fractie $M_1 \cdot$ (0.1 d^{-1}) van de resterende massa m_1 (g.m^{-2}) in de laag.

Typisch zal de fluffy laag sneller eroderen dan de tweede laag. Pas wanneer S1 uitgeput raakt (zoals tijdens een storm), wordt erosie van de tweede laag de dominante erosieterm. Daarom geldt voor de parameterinstellingen dat geïntegreerd in de tijd, $E1 > E2$.

Tenslotte kan een productieterm P worden toegepast, die sediment van de diepe laag S3 naar S2 overbrengt. Deze term werd in het Markermeemodel gebruikt om rekening te houden met de langzame erosie van geologische afzettingen (zoals Zuiderzeeklei). In de Loosdrechtse plas is netto productie het resultaat van algengroei en -sterfte, veenafslag, mineralisatie en verversing. In het model wordt niet expliciet rekening gehouden met productie en afbraak van organisch materiaal.

Op korte tijdschaal speelt deze term een ondergeschikte rol, maar op lange tijdschalen kan deze term significant worden: geleidelijk neemt de sedimentmassa in het modeldomein (en daarmee de gesuspendeerde hoeveelheid slib in het water) toe of af totdat P gelijk is aan B2 (begroeiing van sediment van laag S2 naar diepe laag S3). Op langere termijn verzamelt slib zich in de luwe delen en wordt daarmee onttrokken aan 'rondzeven' in de waterkolom. Daarom vind enige aanvulling plaats om de gemiddelde concentratie op peil te houden.

Naast verticale fluxen is het horizontaal transport van in het water aanwezig slib ook belangrijk. Horizontaal transport wordt veroorzaakt door advectie $A = UC$ en dispersie $Dis = -D_{hor} dC / dx$. Zowel de snelheid U als de horizontale dispersie D_{hor} zijn afgeleid van het hydrodynamische model en variëren in tijd en plaats.

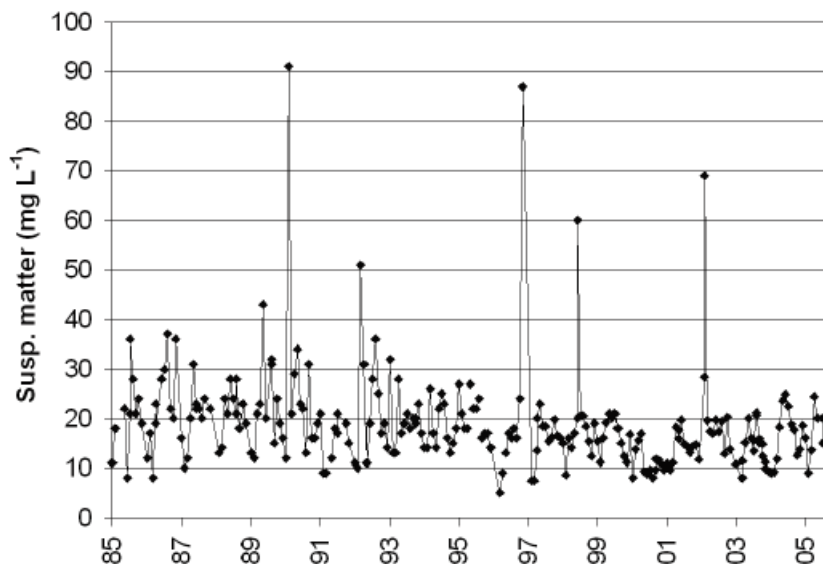
Met de hierboven beschreven formuleringen zijn de meest essentiële processen van horizontaal transport (stroming en menging), verticaal transport (sedimentatie en opwerveling) en interactie met de bodem (depositie, erosie c.q. resuspensie, begraving en productie) van fijn slib opgenomen. Vanzelfsprekend zijn het vereenvoudigingen van een veel complexere realiteit. Ook zijn sommige processen helemaal niet inbegrepen: Er wordt geen sediment-dichtheid koppeling toegepast, het model is in deze vorm daarom niet geschikt om bodemslib onder invloed van zwaartekracht te laten stromen, bijvoorbeeld richting een put. Bij vlokvorming wordt alleen rekening gehouden met een basisvorm, uitgaande van een lineair verband tussen de totale gesuspendeerd slibconcentratie en de bezinksnelheid.

Het slibmodel berekent de bijdrage van slib aan de uitdoving van licht onder water met een eenvoudige benadering. Voor de uitdoving (absorptie) van inkomend licht op diepte z geldt dat de straling op diepte z gelijk is aan: $I_z = I_0 \exp(-k z)$ waarin I_0 en I_z respectievelijk de straling aan het wateroppervlak en op diepte z(m) in het water (W.m^{-2}) en k de extinctiecoëfficiënt (m^{-1}). De extinctiecoëfficiënt in deze formule is afhankelijk van de samenstelling van het water. Van de fracties die bijdragen aan de totale extinctie van licht door absorptie wordt enkel detritus (dood algenmateriaal en veenresten) en anorganisch materiaal door het slibmodel berekend. De bijdrage van andere optisch actieve stoffen (water, humus, algen) aan de extinctie wordt constant verondersteld (k_0). Voor de totale extinctie coëfficiënt geldt $k = k_0 + \varepsilon_1 C_1 + \varepsilon_2 C_2$ waarbij ε de specifieke extinctie coëfficiënt (m^2/g) en C de concentratie slib (g/m^3). Bij gebrek aan bovengenoemde gegevens heeft toepassing van de module UITZICHT [11] op dit moment geen meerwaarde.

3.2 Gegevens basis modelinstelling

De instellingen van het slib model zijn in beginsel gebaseerd op de instellingen zoals die in het slibmodel voor het Markermeer zijn gebruikt [12]. Op basis van de 1DV-kalibratie methode die daarin beschreven is zijn waarden voor M_0 , M_1 , M_2 , V_{bur} , n , d_2 en P aangepast om:

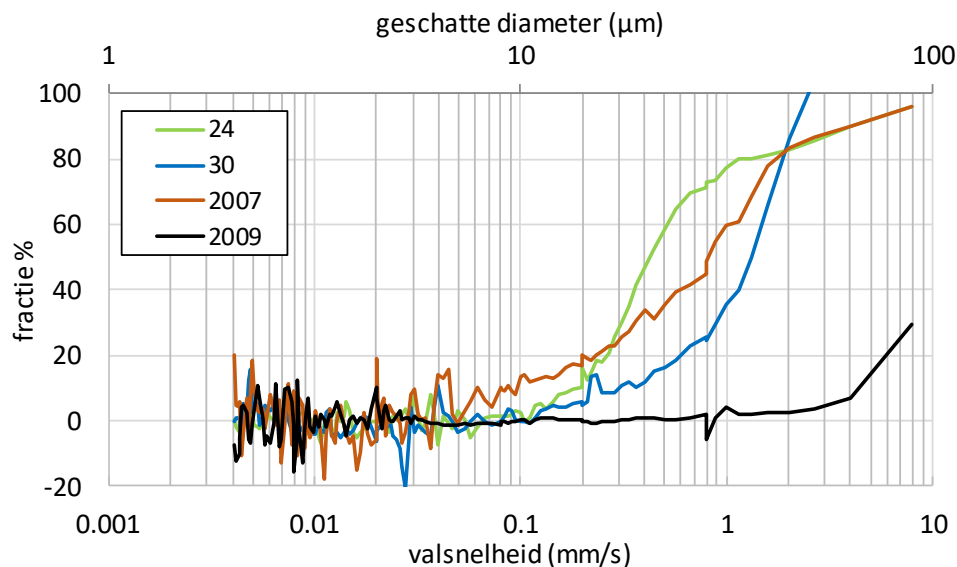
- concentratieniveau in de waterkolom rond een gemiddelde slib concentratie in de plas van orde 20 mg/l, die is gebaseerd op de (enige ons) beschikbare meting van zwevend stof [5, 6], zie Figuur 3.2.
- behoud een zekere (minimaal 5mg/l) concentratie in de zomer en voorkom volledig uitzakken van de slibconcentratie gedurende langere luwe periode
- piek concentraties orde 90 mg/L
- balans van verschillende processen in de bodemlagen zodat deze stabiel (in evenwicht) zijn (niet vol- of leeglopen).



Figuur 3.2 Tijdsreeks van zwevende stofconcentraties (mg/L) Loosdrecht voor periode 1985-2005.

Op basis van de kolomproeven is de waarde voor de kritische bodemschuifspanning (τ_{c1}) gekozen als 0.03 N/m² tussen de gerapporteerde waarden voor kolom24 (0.02) en kolom30 (0.05). Zie Appendix A.

In de kolomexperimenten heeft 10% van het slib een valsnelheid lager dan 0.2 mm/s (17 m/d). Veel lagere valsnelheden kunnen met deze opstelling niet goed worden gemeten. Valsnelheden in deze orde grootte zijn representatief voor relatief grote (geflocculeerde) deeltjes (diameter 20 – 50 μ m). Met zulke grote valsnelheden (deze bereiken de bodem van de 2m diepte plas in orde 3 uur) zijn gemeten concentraties slib in rustige perioden niet te verklaren. Het slib in de waterkolom moet daarom uit veel kleinere, in natuurlijke omstandigheden niet makkelijk bezinkende deeltjes bestaan.



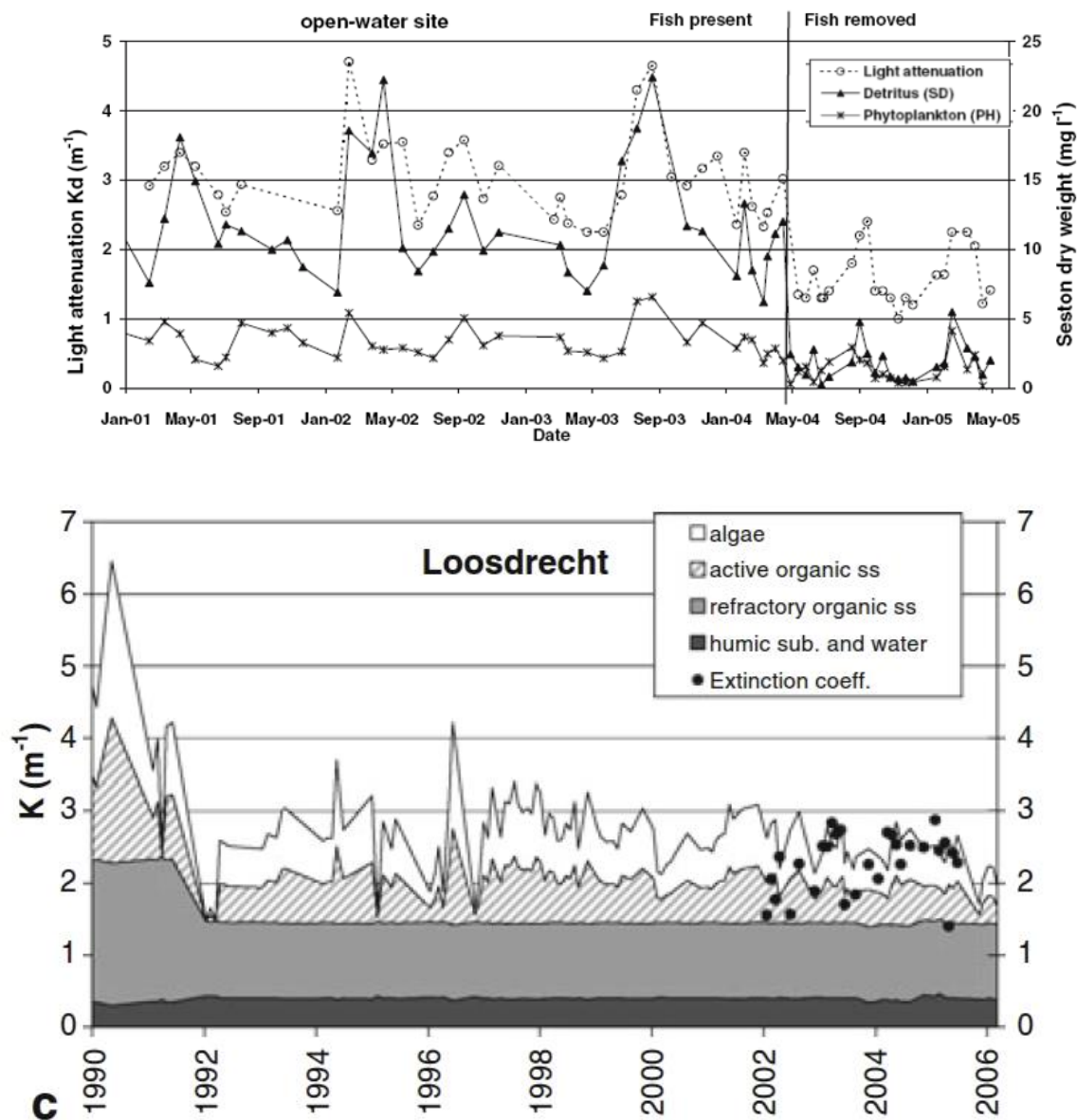
Figuur 3.3 Sedimentatiesnelheid van het ongewervelde materiaal (klomproef, deze studie). De valsnelheid is gemeten en de deeltjesgrootte via de wet van Stokes berekend onder de aanname dat de dichtheid van de deeltjes 2.5 kg/L is. Indien deeltjesgrootte berekend wordt voor organisch materiaal met een dichtheid van 1.1 kg/L leidt dit tot diameters die bijna een factor 4 groter zijn ($\sqrt{\frac{2.5 - 1.0}{1.1 - 1.0}}$).

In eerdere studies [13, 14] werd een uiterst geringe valsnelheid van ca. 0.1 m/dag gebruikt. [5] verklaart aan de hand van de theorie van flocculatie c.q. vlokvorming, en ondersteund door o.a. centrifuge experimenten in het laboratorium, zulke extreem lage schijnbare valsnelheden. De flocculatietijd in het merendeel van de waterkolom in de Loosdrechtse Plassen bedraagt ca. 20 dagen. Uitgaande van 20 dagen flocculatietijd en 2 m waterdiepte volgt voor de equivalente valsnelheid $w_{eq}=0.1$ m/dag. Deze equivalente valsnelheid heeft dus geen relatie met de fysische valsnelheid van de vlokken te maken, deze moeten, zoals ook in deze studie gemeten, in de orde-grootte 1 mm/s zijn.

Uit de boorkernen van die door Tauw [8] zijn geanalyseerd leiden we uit de ruimtelijke verdeling van de slibdikte af waar sediment accumuleert. Dit patroon kan bij wijze van validatie worden vergeleken met het modelresultaat (variabele fijne slibfractie in laag S2, p2) nadat het model enige tijd is ingespeeld.

In de Loosdrechtse Plassen is de netto "productie" [5] geschat op 0.1 g/m²/d (160 tC/jaar) op basis van een gemiddelde slibconcentratie van 4 mgC/L. Dit is de netto bijdrage van vier balans termen (te weten productie van detritus algen en door veenafslag verminderd met mineralisatie en verversing). In het slibmodel wordt een veel hogere waarde gebruikt (5 g/m²/d) omdat we nu naar een jaarsimulatie kijken met, in het voor en najaar, hogere slibconcentraties.

Schattingen van de coëfficiënten voor het onderwaterlichtklimaat in het slibmodel (ε_1 en ε_2) zijn afgeleid uit gemeten veranderingen van de extinctie coëfficiënt en zwevend stof (detritus) in Loosdrecht [3] en Terra Nova [15], zie Figuur 3.4. De waarde van k_0 verdisconteert de bijdrage van water, humuszuren en algen. In [3, 4] wordt voor de jaren 2002-2005 een extinctie coëfficiënt gemeten tussen 1.5 en 3.0 m⁻¹ de, met UITZICHT, berekende bijdrage van water en humus bedraagt 0.5 m⁻¹ en de bijdrage van algen ook orde 0.5 m⁻¹.



Figuur 3.4 Overzicht van veranderingen in extinctiecoëfficiënt en gemeten zwevend stof en fytoplankton in Terra Nova [15, boven] en voor Loosdrecht [3, onder.]

In tabel 3.1 zijn de parameter instellingen voor het model gegeven. Dit zijn de nu meest plausibele waarden van deze modelinstellingen (op basis van de nu beschikbare kennis en gegevens) en zijn gebruikt voor de scenario berekeningen (zie hoofdstuk 4).

3.3 Parameter gevoeligheden

Voor twee locaties (observatiestation A en G, zie Figuur C.1 voor de ruimtelijke ligging) zijn resultaten van 33 gevoeligheids/bandbreedte-sommen gemaakt. De resultaten staan in de grafieken zie Figuur D.1 t/m Figuur D.18 in bijlage D, zie voor de figuurnummering per parameter in kolom 4 van Tabel 3.2).

Tabel 3.1 Parameter instellingen zoals gebruikt voor de scenario berekeningen. Initiële hoeveelheden slib in het model $m_1 = 2.0 \text{ kg/m}^2$; $m_2 = 20.0 \text{ kg/m}^2$ (equivalent met $p_2 = 0.25$).

parameter	waarde	eenheid	beschrijving
ws01	0.5	m/d	sedimentatiesnelheid 1e fractie
ws02	0.1	m/d	sedimentatiesnelheid 2e fractie
C0	25	mg/L	referentieconcentratie voor ws
f_1	1.0	-	exponent in flocculatie formulering 1e fractie
f_2	1.0	-	exponent in flocculatie formulering 2e fractie
M_0	150	g/m ² /d	0e orde suspensie flux S1
	100	g/m ² /d	0e orde suspensie flux S2
M_1	0.4	1/d	1e orde suspensie flux S1
M_2	0.1	1/d	1e orde suspensie flux S2
τ_{c1}	0.03	Pa	kritische schuifspanning erosie S1
τ_{c2}	0.2	Pa	kritische schuifspanning erosie S2
n	0.4	-	porositeit
d2	0.05	m	dikte bodemlaag S2
Vbur	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
ε_1	0.2	m ² /g	specifieke extinctie coëfficiënt slibfractie 1
ε_2	0.2	m ² /g	specifieke extinctie coëfficiënt slibfractie 2
k_0	0.5	m ⁻¹	achtergrond extinctie

Hier onder zijn de bevindingen kort beschreven.

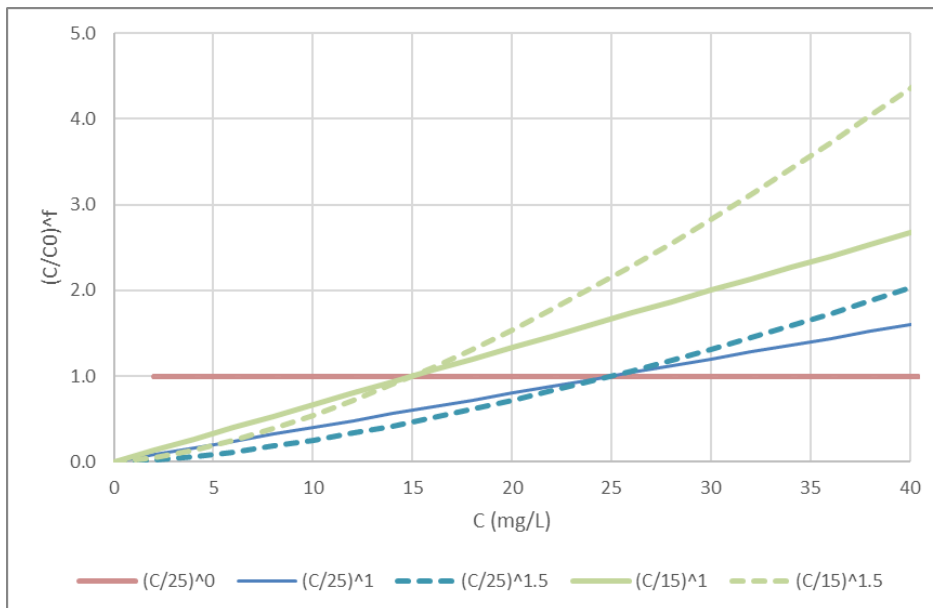
C_0 - referentieconcentratie voor ws:

Dit is de belangrijkste gevoeligheid in het model omdat C_0 de (schijnbare) sedimentatiesnelheid (w_s) afhankelijk maakt van de zwevend stof concentratie volgens: $w_s = w_{s0} (C/C_0)^f$, zie Figuur 3.4

Als de slibconcentratie kleiner is dan C_0 neemt de sedimentatiesnelheid af waardoor lage concentraties slib langer in het water zweven dan zonder deze formulering. Voor slibconcentraties groter dan C_0 geldt het omgekeerde, de sedimentatiesnelheid is dan hoger en dus verdwijnt slib sneller na een storm dan zonder deze formulering.

f_1 en f_2 - exponent in flocculatie formulering

De gevoeligheid van de sedimentatiesnelheid (w_s) voor de onderzochte coëfficiënten f_1 en f_2 volgens $w_s = w_{s0} (C/C_0)^f$ is groot als de schijnbare sedimentatiesnelheid niet meer afhankelijk is van de slibconcentratie (waarde $f=0$). De gevoeligheid van f is met name voor lage slibconcentraties relevant.



Figuur 3.4 Effect van coëfficiënten C_0 en f op factor $(C/C_0)^f$ in de flocculatieformulering $w_s = w_{s0} (C/C_0)^f$

Tabel 3.2 Selectie van parameters waarvan de modelgevoeligheid is onderzocht. De vetgedrukte waarden zijn de referentiewaarden die zijn gebruikt voor de scenarioberekeningen in Hoofdstuk 4.

parameter	meest plausibele waarde	range van onderzochte waarden	figuur	Delft3D-WAQ interne parameter naam
w_{s01}	0.5	0.3, 0.4, 0.5	Figuur D.7, D.8	V0SedIM1
w_{s02}	0.1	0.1 , 0.05, 0.15	Figuur D.9, D.10	V0SedIM2
C_0	25	15, 25	Figuur D.17, D.18	CrSS
f_1	1.0	0.0, 1.0 , 1.5	Figuur D.17, D.18	nIM1
f_2	1.0	0.0, 1.0 , 1.5	Figuur D.17, D.18	nIM2
M_0	150	50, 100, 150 , 200	Figuur D.1, D.2	ZResIM1
M_0	100	50, 100 , 150, 200	Figuur D.3, D.4	ZResIM2
M_1	0.4	0.4	niet berekend	VResIM1
M_2	0.1	0.1	niet berekend	VResIM2
T_{c1}	0.03	0.02, 0.03 , 0.04	Figuur D.11, D.12	TaucRS1Imx
T_{c2}	0.2	0.08, 0.10, 0.12, 0.20	Figuur D.13, D.14	TauShields
V_{bur}	0.004	0.004 , 0.01, 0.02, 0.04	Figuur D.15, D.16	VBurDMS1
P	5	1, 3, 5	Figuur D.5, D.6	ZDigS2DM
ε_0	0.2	0.2	niet berekend	ExtVIIM1
ε_1	0.2	0.2	niet berekend	ExtVIIM1

$M_0 - 0^e$ orde resuspensie flux S1

Gemodelleerde slibconcentratie is ongevoelig voor M_0 , waarschijnlijk omdat de hoeveelheid sediment in de bodem te klein is waardoor resuspensie als 1^e orde proces wordt gemodelleerd en de gevoeligheid afhankelijk wordt van variabelen M_1 en M_2 .

w_{s01} en w_{s02} -sedimentatiesnelheid

Het modelresultaat (slibconcentratie in water) is in perioden na ruw weer zeer gevoelig voor de keuze van de (schijnbare) sedimentatiesnelheid voor de grovere (VSedIM1) en fijnere (VSedIM2) fractie.

τ_{c1} en τ_{c2} - kritische schuifspanning erosie S1 en S2

τ_{c1} is gevarieerd binnen een vrij kleine range van waarden en daarbinnen nog behoorlijk gevoelig, met name de piekconcentratie slib is gevoelig voor deze parameter.

Slibconcentraties zijn gevoelig voor τ_{c2} met name de piekconcentratie tijdens turbulentere periodes, zie bijvoorbeeld het verschil tussen 0.1 en 0.2 N.m⁻².

P – snelheidsconstante slib productie

Het model blijkt niet gevoelig voor P binnen de simulatieperiode van een jaar.

4 Scenarioberekeningen

4.1 Beschouwde scenario's

Met de eerste versie van het slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen zoals beschreven in de vorige twee hoofdstukken zijn scenarioberekeningen gedaan (dit met de nu meest plausibele waarden van de modelinstellingen voor de slibprocessen uit Tabel 3.1). Oorspronkelijk waren de scenarioberekeningen bedoeld ter ondersteuning van de opzet van een pilot luwtestructuur (locatie en omvang van luwtestructuur voor in pilot). Een eerste scenario (met een suggestie voor de luwtestructuur van de pilot in de oosthoek, vlakbij de oostkant van de eilanden Robinson Crusoe en Markus Pos) daarvoor is opgenomen in deze rapportage als scenario 10. Tevens is als scenario 5 het scenario met luwtestructuren ("I74") uit het gebiedsakkoord meegenomen.

Echter, door ontbreken van voldoende veldwaarnemingen is voor de eerste opzet van het slibmodel onvoldoende zeker wat de dominante factor is in de slibdynamiek voor de Loosdrechtse Plassen: resuspensie van bodemslib door golven, oevererosie en/of vlokvorming in de waterkolom. Hierdoor is ook de berekende effectiviteit van luwtestructuren onzeker. Dit was aanleiding de vraag te stellen of niet beter eerst een luwte-experiment gedaan kan worden door het verrichten van metingen rond een van de bestaande eilanden (met het eiland als luwtestructuur). Met deze metingen kan het slibmodel aangescherpt worden en beter van te voren ingeschat worden of het principe van een luwtestructuur specifiek werkt in de Loosdrechtse Plassen (zonder al een grotere investering te doen in een luwtestructuur voor de pilot). Daarom is vooral aandacht besteed aan scenario's waar eilanden fictief zijn weggehaald: scenario 1 zonder eiland Hoek, scenario 2 zonder eiland Markus Pos en scenario 3 zonder eiland Robinson Crusoe (zie Figuur C.1 in bijlage C voor ruimtelijke ligging en betreffende observatiepunten) en scenario 4 zonder alle drie deze eilanden. In eerste instantie waren daarvoor alleen de droge cellen en dunne dammen voor Delft3D-FLOW en polygonen voor SWAN weggehaald. Het bleek echter dat de interpolatie van diepte samples rondom de eilanden leidde tot relatief ondiepe gebieden ter hoogte van het eiland (wat zich doorvertaalt in de bodemschuifspanning en licht ter plaatse). Daarom is de bodem verlaagd tot het diepte niveau rondom het betreffende eiland (zie Figuur C.5 in bijlage C). De oorspronkelijke scenario's zonder deze aanpassing zijn opgenomen in dit rapport als scenario 6, 7, 8 en 9 (te vergelijken met respectievelijk scenario 1, 2, 3 en 4).

4.2 Resultaten scenarioberekeningen

Resultaten van de scenarioberekeningen voor referentie (de huidige situatie van de Loosdrechtse Plassen), scenario's 1 t/m 4 (met fictief weghalen van bestaande eilanden) scenario 5 (scenario met luwtestructuren uit het gebiedsakkoord), scenario's 6 t/m 9 (scenario's 1 t/m 4 zonder bodemaanpassing bij eiland) en scenario 10 (suggestie voor luwtestructuur pilot in oosthoek) zijn opgenomen in bijlage E, F en G. Resultaten in bijlage E, F en G worden steeds als volgt gepresenteerd: modelresultaten voor grootheid X tijdens periode Y voor referentie, scenario 1 t/m scenario 5 (van links naar rechts, van boven naar onder) in figuren met oneven nummer en referentie, scenario 6 t/m scenario 10 (van links naar rechts, van boven naar onder) in figuren met even nummer.

Let op dat per figuur (dezelfde grootheid gedurende dezelfde periode voor verschillende scenario's) dezelfde kleurschaal gebruikt wordt maar dat verschillende figuren (verschillende grootheden en verschillende perioden) verschillende kleurschalen gebruiken, dit omdat anders effecten (tussen verschillende scenario's onderling) niet meer onderscheidbaar zijn. Zie als voorbeeld Figuur 4.1, Figuur 4.2 en Figuur 4.3 voor de referentie. Figuur 4.1 laat een maat

voor de gemiddelde opwerveling zien, afhankelijk van de periode van middeling (jaar en voorjaar in dit geval) zal dit meer of minder zijn. Doorvertaling naar de hoeveelheid zwevend stof is te zien in Figuur 4.2. Hoewel het gemiddelde over een jaar een stuk lager is dan voor het voorjaar, lijken het vergelijkbare uitkomsten door de vergelijkbare kleuren. Maar dat is niet zo omdat een andere kleurenschaal is gebruikt. Voor licht is dit nog sterker, zie Figuur 4.3.

4.2.1 Bodemschuifspanning

Bijlage E laat de belangrijkste resultaten zien van de eerste stap van het slibmodel middels overschrijdingsfrequenties van bodemschuifspanning voor de belangrijke kritische waarden 0.2 Pa, 0.1 en 0.03 Pa over het jaar, het voorjaar (wanneer het relatief hard waait waardoor opwerveling optreedt, zie voor de referentie ook Figuur 4.1 en vergelijk links en rechts voor, respectievelijk, het gemiddelde over jaar en voorjaar) en de zomer (relatief rustige periode). Te zien is dat de lokale diepte van belang is: oude restanten van de opdeling van de veenplassen waar het relatief ondiep is en de ondiepe zone aan oostkant worden zichtbaar door meer frequente overschrijdingen. Met name het fictief weghalen van eiland Hoek (scenario 1) leidt tot een verhoging van de overschrijdingen in een groter gebied. Ook is te zien dat de relatief rustige periode in de zomer leidt tot een flink lager aantal overschrijdingen dan het gehele jaar en het voorjaar. Scenario 5 (scenario met luwtestructuren uit het gebiedsakkoord) heeft een positief effect, zoals verwacht op basis van de eerdere resultaten van de strijklengteaanpak (zie ook sectie 2.5).

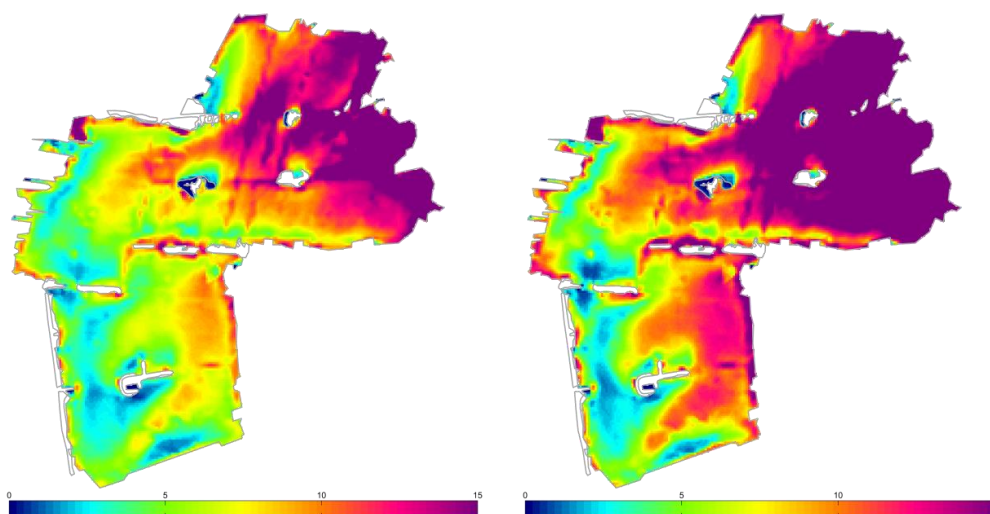
4.2.2 Zwevend stof

Bijlage F laat de belangrijkste resultaten zien van de tweede stap van het slibmodel voor het zwevend stof in de waterkolom. Figuur F.1 t/m Figuur F.6 tonen ruimtelijke beelden van het gemiddelde over jaar, voorjaar en zomer van zwevend stof voor de verschillende scenario's. Zie voor de referentie ook Figuur 4.2, aangevuld met Figuur 4.1 voor de relatie met bodemschuifspanning (vergelijk daarbij links en rechts voor, respectievelijk, het gemiddelde over jaar en voorjaar).

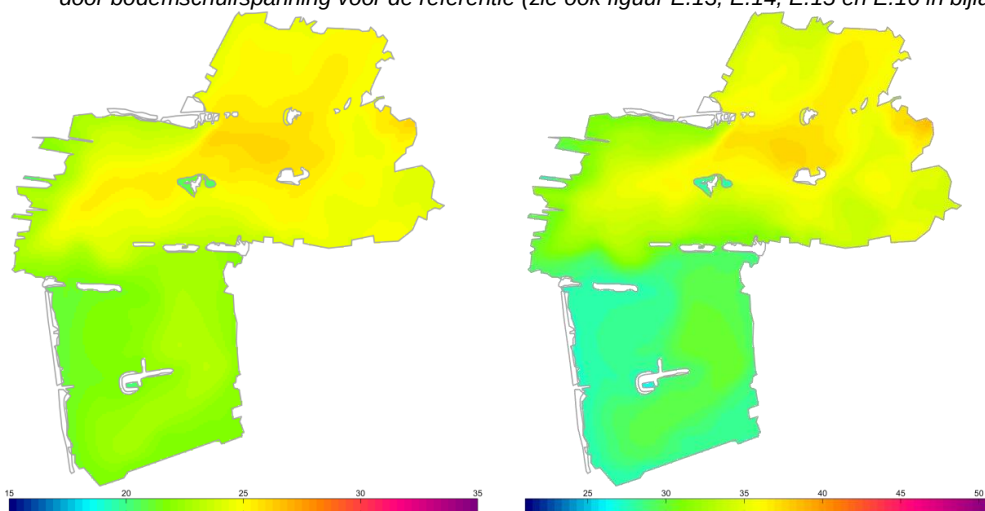
Te zien is dat het fictief weghalen van met name eiland Hoek (vergelijk scenario 1 en scenario 4 met de referentie in de figuren) leidt tot een globale verhoging van de hoeveelheid zwevend stof in de waterkolom. Het niet lokaal verdiepen (vergelijk scenario 9 met scenario 4 in de figuren) leidt tot een verdere verhoging. De suggestie van de luwtestructuur voor de pilot van scenario 10 leidt tot een verlaging, met name aan de oost en noordkant (vergelijk scenario 10 met de referentie in de figuren). Scenario 5 met de luwtestructuren uit het gebiedsakkoord leidt tot een globale afname van zwevend stof in de waterkolom (vergelijk scenario 5 met de referentie in de figuren).

Figuur F.7 t/m Figuur F.15 tonen tijdseries van de berekende hoeveelheid zwevend stof in de waterkolom. Over het algemeen is hieruit af te leiden dat:

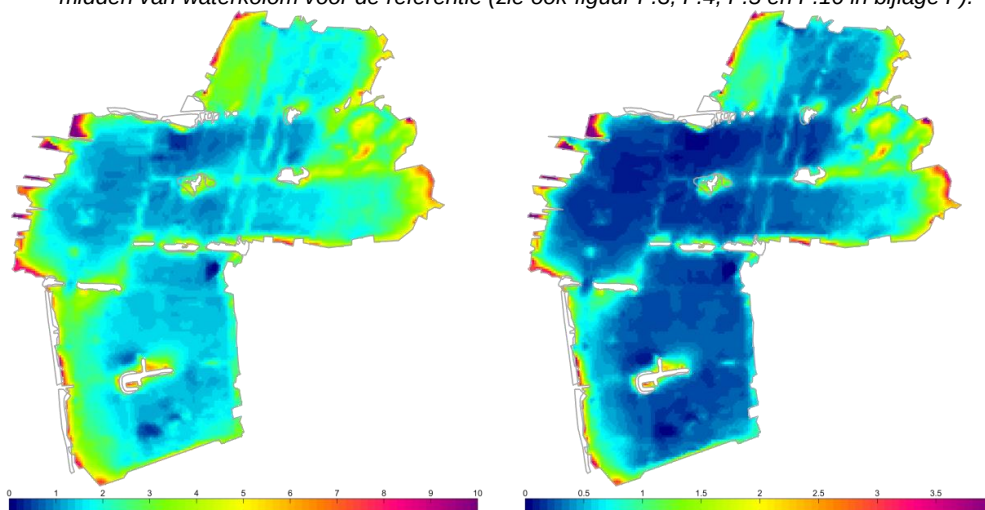
- de range van concentraties in de waterkolom plausibel is,
- er nauwelijks een concentratieverschil is tussen de topklaag en de bodemlaag,
- er ruimtelijke variatie optreedt met name in perioden met resuspensie, in luwe perioden is het gedrag (flocculeren en uitzakken) ruimtelijk homogeen.



Figuur 4.1 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar (links) en voorjaar (rechts) van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor de referentie (zie ook figuur E.13, E.14, E.15 en E.16 in bijlage E).



Figuur 4.2 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar (links) en voorjaar (rechts) van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor de referentie (zie ook figuur F.3, F.4, F.5 en F.16 in bijlage F).



Figuur 4.3 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar (links) en voorjaar (rechts) van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor de referentie (zie ook Figuur G.1, G.2, G.3 en G.4 in bijlage G).

Figuur F.7 laat de ruimtelijke variatie zien door middel van observatiepunten A t/m E voor de referentie, hierin is duidelijk de respons te zien op de wind (zie met name Figuur C.5 waarin de windrichting alleen getoond wordt voor harde wind vanaf 8.0 m/s, dit geeft ook een indicatie voor de richtingsafhankelijkheid van de respons).

Figuur F.8, voor observatiepunten A t/m E voor referentie, laat zien dat over het hele gebied in de verticale richting amper gelaagdheid van zwevend stof optreedt: het verschil tussen bovenste en onderste laag is vrij klein (ten opzichte van de absolute waarde in Figuur F.7).

Figuur F.9 en Figuur F.10 tonen aan dat over het algemeen de referentielocatie voor F, G en H bruikbaar is als een relatief ongestoorde referentielocatie. Figuur F.10 laat zien dat het verschil voor deze locatie tussen de berekening met (referentie) en zonder eiland (scenario 1, 2 en 3 voor respectievelijk F, G en H) een stuk kleiner is dan absolute waarde (Figuur F.9). Met deze kennis laten Figuur F.11 t/m Figuur F.15 vervolgens zien dat eiland Hoek (scenario 1) het meest voor de hand ligt als locatie voor het luwte-experiment omdat daar de windrespons het grootst en het meest gevarieerd is.

4.3 Licht

Tenslotte tonen Figuur G.1 t/m Figuur G.6 ruimtelijke beelden van het gemiddelde over het jaar, voorjaar en zomer van de lichtfractie in het midden van de waterkolom voor de verschillende scenario's. Belangrijke input voor de bepaling van deze fractie is de lokale diepte en de concentratie zwevend stof ter plekke in de waterkolom. Omdat de concentratie zwevend stof sterk afhangt van de modelinstellingen voor de slibprocessen en daar nog aanzienlijke variatie in mogelijk is (zie hoofdstuk 3), moeten de hier gepresenteerde resultaten alleen gezien worden als indicatie van hoe het effect op licht ruimtelijk met het slibmodel voor verschillende scenario's in kaart gebracht kan worden. Met dit als voorbehoud is wel duidelijk te zien dat scenario 5 (scenario met luwtestructuren uit het gebiedsakkoord) een positief effect op licht heeft.

5 Conclusies en aanbevelingen

Gegeven het huidige model, met de meest plausibele modelinstellingen voor de slibprocessen, lijken luwtestructuren wel effect te hebben. Echter, dit is nu niet voldoende zeker te onderbouwen met het slibmodel vanwege de onzekerheid in de modelinstellingen en het relatieve belang van processen als resuspensie door golven, oevererosie en vlokvorming. De zekerheid zal daarvoor vergroot moeten worden door het slibmodel beter te kalibreren en valideren op basis van veldmetingen.

Een betere afregeling en validatie van het model is niet mogelijk zonder dat een meetpaal gedurende een langere periode (maanden) hoogfrequent zwevend stof en onderwaterlichtkarakteristieken meet:

1. De toename van de zwevendstofconcentratie met de diepte is het grootste voor grove korrelgroottefracties, terwijl fracties met fijne korrelgrootte een vrij constante concentratie met diepte laten zien. Uit veldwaarnemingen moet blijken of en onder welke omstandigheden een turbulente stroming verhoogde slibconcentraties nabij de bodem laat zien en wat het effect daarvan is op licht.
2. Kalibratie van (schijnbare)valsnelheden kan door (1) waargenomen verticale sedimentconcentratiegradiënten te reproduceren en (2) waargenomen sedimentconcentratie / afnamesnelheden te reproduceren tijdens rustig weer na een periode van ruw weer of in een relatief luw gebied (bijvoorbeeld achter een eiland/luwtestructuur). Laten metingen de nu door het model voorspelde langzame afname van slib in het water na een verstoring zien? Hoeveel slib blijft langdurig in het water en hoe belangrijk is dat voor het lichtklimaat?

In situ metingen van zwevendstofconcentratie kunnen, waar mogelijk, aangevuld worden met remote sensing beelden voor ruimtelijke patronen in de bovenste waterlaag. Met veldwaarnemingen kan de eerste opzet van het slibmodel aangescherpt worden. Dit aangevuld met aanscherpen van de invloed van flocculatie en afschatten van andere bronnen dan resuspensie: o.a. oevererosie, lokale productie en toevoer van elders.

Voor waterbeweging (stroming en golven) kan in eerste instantie volstaan worden met de eerste stap van het liggende slibmodel, zie sectie 2.5: de verwachting is dit redelijk goed in het model zit. Dit reduceert de kosten van veldmetingen (zie ook bijlage B).

Hoewel de gevoeligheid van het model voor het windklimaat geen onderdeel van deze rapportage is bevelen we op basis van expertkennis wel aan om gedurende de veldmeting een de wind (richting en snelheid) lokaal te meten. Kleine afwijkingen van lokale wind t.o.v. het weliswaar nabij gelegen KNMI station De Bilt kunnen bepalend zijn voor de gemodelleerde stroming, golven en slibconcentratie.

6 Referenties

- [1] <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home>
- [2] Booij, Ris, Holthuijsen: A third-generation wave model for coastal regions. J. Geoph. Research, 104(C4):7649–7666, 1999. swanmodel.sourceforge.net
- [3] Ellis Penning, Menno Genseberger, Rob Uittenbogaard en Gerben van Geest, Aanvullingen bij Besluit-MER verdiepingen Loosdrechtse Plassen, Deltares rapport Q4700, 2009.
- [4] W. E. Penning, 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 710 (1), pp. 279-295, 2013. DOI 10.1007/s10750-012-1026-z
- [5] Rob Uittenbogaard, Ellis Penning en Marnix van der Vat, Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechtse Plassen - Expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater lichtklimaat, WL | Delft Hydraulics rapport Q4461.04, 2008.
- [6] W. E. Penning, 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
- [7] John Cornelisse en Marcel Grootenboer, Veldmeting Loosdrecht - karakterisering toplaag, WL | Delft Hydraulics meetverslag Q4461.02, 2007.
- [8] Malou van Meer en Yvonne Roijendijk, Verkennend en beschrijvend waterbodemonderzoek (inclusief asbestonderzoek) in de Loosdrechtse Plassen, Tauw rapport R001-1263469MVM-V04-tsz-NL, 2018.
- [9] Malou van Meer, Veld- en analysegegevens Loosdrechtse Plassen ten behoeve van slibmodel Deltares, Tauw brief L001-1263469MVM-V02-nja-NL, 2018.
- [10] Loosdrechtse Plassen - Analyse van 3 kernen, Medusa rapport 2007-185R1, 2007.
- [11] H. Buiteveld, UITZICHT model voor berekening van doorzicht en extinktie. RIZA rapport 90.058, 1990.
- [12] Thijs van Kessel, Gerben de Boer en Pascal Boderie, Calibration suspended sediment model Markermeer, Deltares rapport 120048, 2008.
- [13] Hans Los, Maarten Ouboter en Robbert Fokkink, Onderzoek naar de slibdynamiek van de Loosdrechtse Plassen met behulp van mathematische modellen, WL | Delft Hydraulics rapport T1571, 1997.
- [14] Maarten Ouboter, M. Vonk, Hans Los, Bijdrage MER aanleg verdiepingen Loosdrechtse Plassen, WL | Delft Hydraulics rapport T2313, 1999.

[15] Gerard ter Heerdt en Michiel Hootsmans, Why biomanipulation can be effective in peaty lakes, *Hydrobiologia* (2007) 584:305–316, DOI 10.1007/s10750-007-0594-9.

A Resultaten labexperimenten Loosdrecht

Deltares memo

Aan: Jacques van Alphen (Waternet)

Kenmerk: 11201773-003-ZWS-0003

Datum: 1 februari 2019

AUTEUR	REVIEW	GOEDKEURING
Gerlinde Roskam	Thijs van Kessel	Renée Talens

A.1 Aangeleverde sedimentkolommen

Er zijn door Tauw 24 buizen met sediment en 3 potten met mengmonster afkomstig van 7 locaties in Loosdrecht aangeleverd. Bij de nummering geeft het eerste cijfer de locatie weer, dus kolom 63 is afkomstig van locatie 6. De locaties zijn weergegeven in Figuur A.1.1 (overgenomen uit memo van Tauw¹). Daarnaast is monstermateriaal naar AL-West gestuurd voor analyse van de korrelgrootteverdeling (d.m.v. sedigraaf), het percentage organische stof, organisch koolstof en een aantal hoofdelementen (na koningswaterontsluiting).

Twee locaties (locatie 2 (kolom 24) en 3 (kolom 30)) zijn geselecteerd voor het experimenteel werk dat is uitgevoerd door Deltares. Deze selectie is gemaakt op basis van:

- de boorbeschrijving van Tauw
- aanwezigheid van dikke sliblaag
- goede overeenkomst van buizen van dezelfde locatie
- ruimtelijke ligging
- karakter eenvoudig op te wervelen materiaal (formaat vlokken, vlokken aanwezig in waterkolom, hoeveelheid vlokken).



Figuur A.1.1 Bemonsteringlocaties. In rood de huidige locaties, in geel locaties waar in 2007 en 2009 monsters zijn genomen voor opwervelings- en sedimentatieproeven.

A.2 Uitvoering opwervelings- en sedimentatie-experimenten

Het doel van de huidige experimenten is om meer gegevens te verkrijgen wat betreft de gevoeligheid voor opwerveling en deze gegevens te vergelijken met gegevens uit het verleden. Uitkomsten worden gebruikt om de instellingen te bepalen van een eerste versie van een model dat zwevend stof en licht in de Loosdrechtse Plassen dynamisch modelleert. Op de

¹ Van Meer, M. (2018). Veld- en analysegegevens Loosdrechtse Plassen ten behoeve van slibmodel Deltares. Tauwrapport L001-1263469MVM-V02-nja.NL.

geselecteerde buizen is hiervoor een opwervelingsproef uitgevoerd. Hierbij wordt het bovenstaande water met toenemende snelheid in beweging gebracht door een rotor (Vane). De rotor bevindt zich op 2,5 cm van de bovenkant van het sediment. Het bovenstaande water wordt gedurende de proef continu afgepompt (en aangevuld met gebiedseigen water). Het afgepompte water gaat achtereenvolgens door een

- oslim (obv de mate van lichtverstrooiing wordt de zwevend stof concentratie bepaald)
- Malvern (laser diffractie deeltjesgrootte analyse)
- oslim
- pomp (losse vlokken worden kapot gemaakt)
- oslim

De oslims zijn gekalibreerd door oplossingen met een variabele concentratie zwevend stof (afkomstig van Loosdrecht) te meten. De schuifspanning die door de waterverplaatsing op de toplaag wordt uitgeoefend is niet uniform over het gehele oppervlak. Een nauwkeurige kritische schuifspanning kan hierdoor niet worden bepaald, maar wel een schatting op basis van de snelheid van de rotorbladen.

Het opgewervelde materiaal is opgevangen en vervolgens gebruikt in een proef met de sedimentbalans om de bezinksnelheid te bepalen. Na afloop is het materiaal gedroogd en geanalyseerd met TGA (thermogravimetrische analyse) om het organisch stof en kalkgehalte te bepalen.

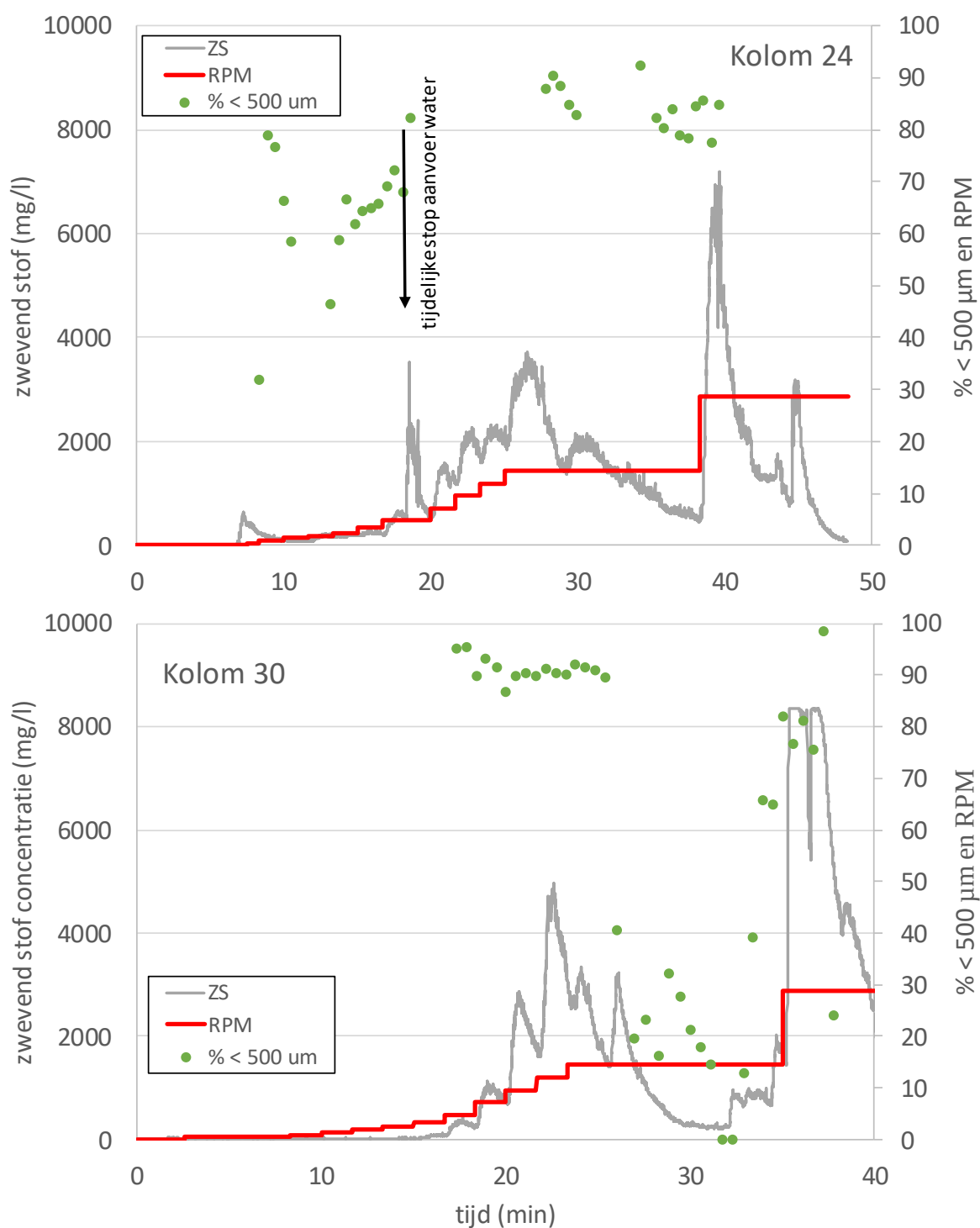
A.3 Resultaten experimenten

A.3.1 Opwervelingsexperimenten

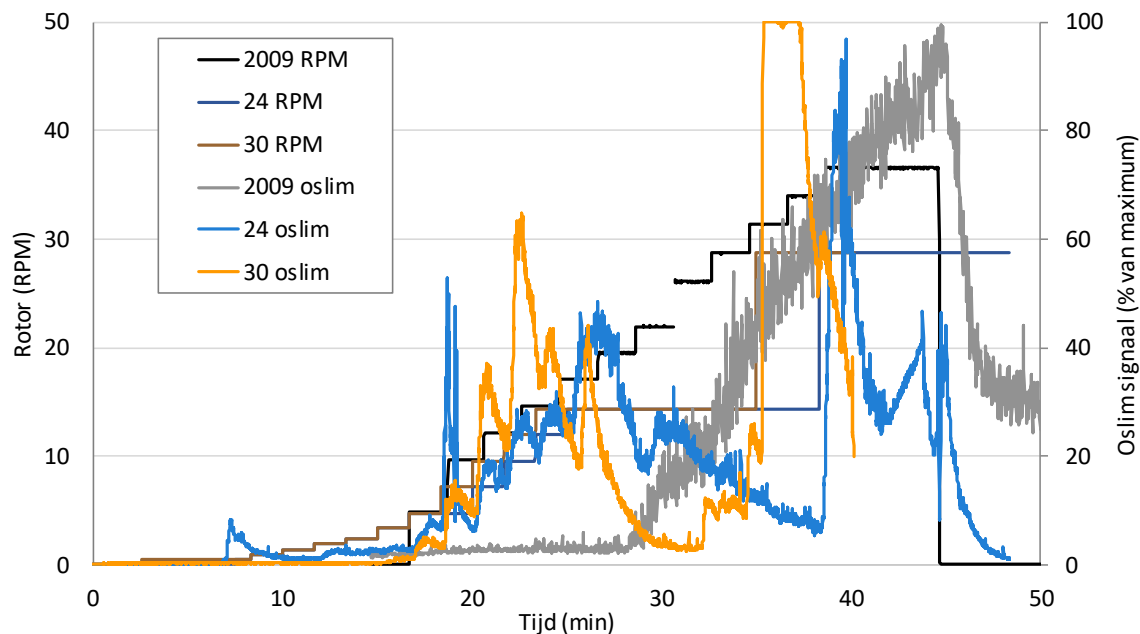
In Figuur A.3.1 zijn de resultaten van de opwervelingsexperimenten weergegeven. De zwevend stof concentraties zijn vanuit de kalibratie van de oslims berekend (zie Bijlage: Overige data opwervelingsexperiment), waarbij de ruis in het signaal is verwijderd door het gemiddelde van 30 tijdstappen weer te geven. In deze bijlage zijn ook de deeltjesgrootteverdelingen opgenomen; in Figuur A.3.1 is de verdeling van deeltjes gerepresenteerd door het percentage deeltjes kleiner dan 500 μm weer te geven.

De zwevend stof concentraties in kolom 24 liggen lager dan in kolom 30, maar het materiaal komt wel door het starten van de pomp al in suspensie (nog voordat de rotor begint te draaien). Als we deze eerste piek buiten beschouwing laten, zien we vanaf 2 RPM continu materiaal opwervelen. In kolom 30 komt het materiaal bij 3,5 RPM in beweging.

In kolom 30 is een duidelijke verschuiving in de deeltjesverdeling zichtbaar; vanaf een rotorsnelheid van 15 rpm treedt er een daling van het percentage deeltjes < 500 μm op; er komt op dat moment materiaal vrij dat voor meer dan de helft bestaat uit deeltjes/vlokken die groter zijn dan 500 μm . In kolom 24 komt vooral bij aanvang van het experiment meer grover materiaal vrij.



Figuur A.3.1 Opwervelingsexperiment. In de figuur zijn in rood de snelheid van de rotor (in RPM), in grijs de zwevend stof concentratie (berekend vanuit het signaal van de oslims) en in groen het percentage deeltjes kleiner dan 500 μm weergegeven.



Figuur A.3.2 Vergelijking tussen opwervelingsexperiment in 2009 en huidige data.

In Figuur A.3.2 zijn de resultaten van de huidige experimenten samen met de data uit 2009 weergegeven. In 2009 zijn iets andere rotorstanden gebruikt, en ook de duur waarop de rotor op een bepaalde stand heeft gedraaid varieert (ook tussen kolom 24 en 30). De figuren zijn gesynchroniseerd op het moment waarop de rotor op stand 10 is gezet (overeenkomend met 5,1 RPM). In 2007 is ook een opwervelingsexperiment uitgevoerd, maar hierbij is slechts het gedrag van het materiaal bij een bepaalde rotorstand beschreven.

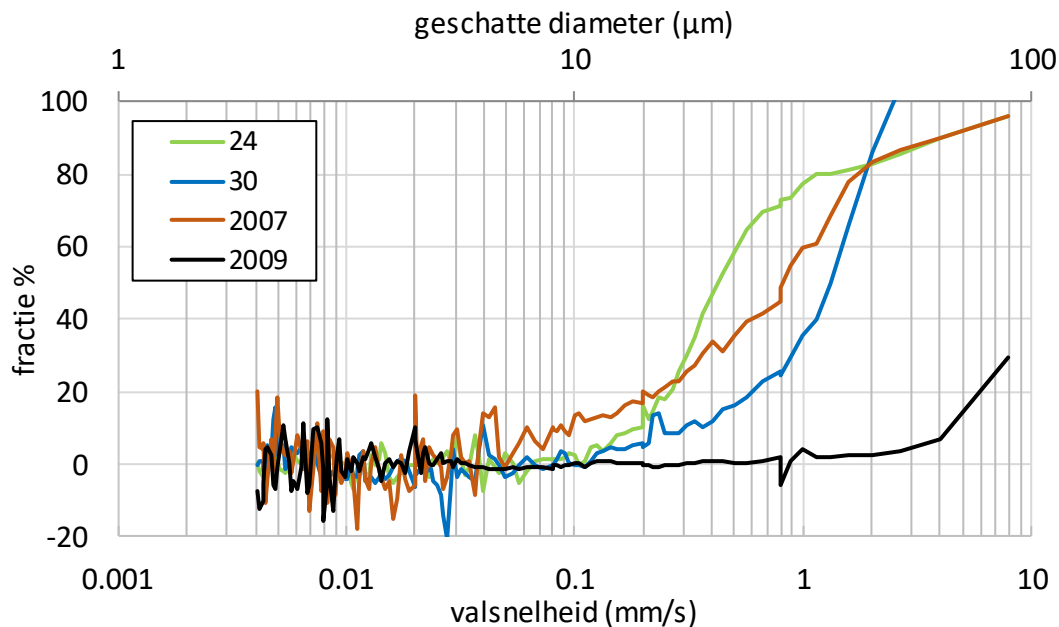
De kritische schuifspanning wordt voor kolom 24 en 30 geschat op respectievelijk 0,02 en 0,05 Pa, hetgeen representatief is voor zeer los en waterig fijn sediment ('fluff'). Deze waarden zijn een benadering, omdat voor opwervelingsexperimenten met een rotor de bodemschuifspanning niet uniform is. Voor een nauwkeuriger bepaling is een Gust erosiemeter beschikbaar, maar deze test vraagt om een ingewikkelder bemonstering die in deze verkennende fase niet haalbaar was. Bovendien is deze Gust test in 2007 en 2009 ook niet uitgevoerd, zodat geen vergelijking met eerdere resultaten mogelijk zou zijn.

De beschrijving van het verloop van de meting van 2007 suggereert dat het materiaal vergelijkbaar was met het materiaal uit kolom 24. Bij de meting van 2009 treedt pas bij 22 RPM een duidelijke verhoging van het oslimsignaal op; dit komt overeen met een veel hogere kritische schuifspanning van 2 Pa. Dit materiaal is waarschijnlijk veel grover (zand of stevig geklonterd slib), zoals ook uit de sedimentatiesnelheid naar voren komt (paragraaf A.3.2). Daarnaast valt op dat in de huidige metingen de zwevend stof concentraties afnemen totdat de rotor weer op een hogere stand wordt gezet, terwijl in 2009 sprake was van een continue stijging van het signaal van de oslim. Mogelijk dat dit wordt veroorzaakt door een verschil in snelheid waarmee het bovenstaande water wordt afgepompt en vervangen.

A.3.2 Sedimentatie van opgewerveld materiaal

Van het materiaal dat bij de opwervelingsexperimenten is vrijgekomen, is door middel van een sedimentatiebalans de sedimentatiesnelheid bepaald. Voor het berekenen van de diameter van de deeltjes vanuit de valsnelheid, moet een dichtheid voor de deeltjes worden aangenomen. Deze dichtheid zal ergens tussen de 1,1 (organische stof) en 2,65 kg/l (minerale delen) liggen. Voor de in Figuur A.3.3 weergegeven diameter is uitgegaan van een dichtheid van 2,5 kg/l. Naast de huidige data, zijn ook data uit 2007 en 2009 weergegeven. In 2007 is een locatie in de buurt van locatie 2 (kolom 24) bemonsterd; de kolom uit 2009 was afkomstig

van een locatie in de buurt van locatie 3 (kolom 30) gestoken. De ruis bij lage valsnelheden wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid van de balans.



Figuur A.3.3 Sedimentatiesnelheid van het opgewervelde materiaal.

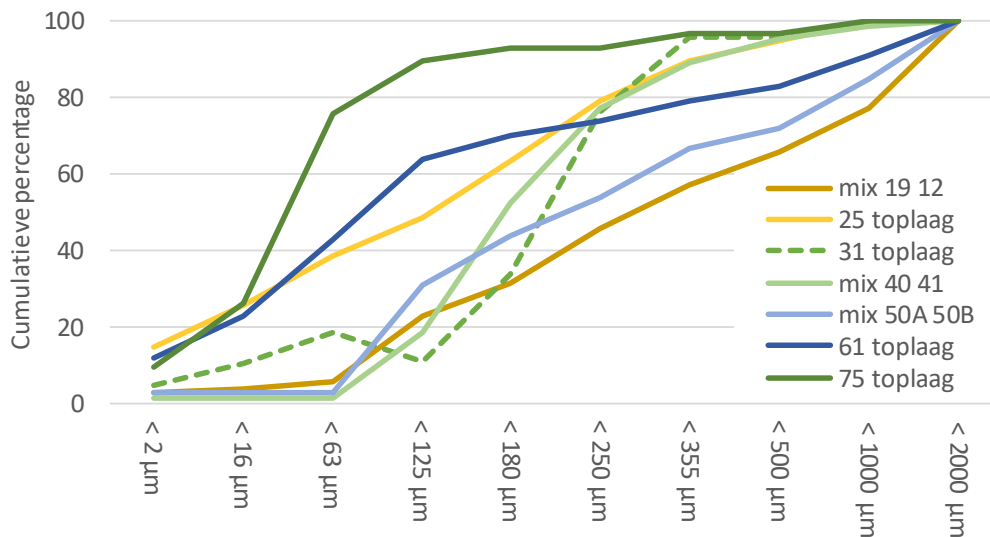
Het materiaal van kolom 24 heeft een lagere valsnelheid dan het materiaal van kolom 30: 50% heeft een valsnelheid van minder dan 0,4 mm/s; 10% van het materiaal heeft een valsnelheid van minder dan 0,18 mm/s (en doet er daardoor zonder verstoring minimaal 3 uur over om de bodem van een 2 meter-diepe plas te bereiken). In kolom 30 ligt de 50%-grens op 1,3 mm/s en de 10%-grens op 0,29 mm/s. De meting uit 2007 vertoont een lijn die vergelijkbaar is met de huidige metingen (hoewel de laatste 10% wel een lagere valsnelheid heeft), het huidige sediment lijkt daarmee vergelijkbaar met het sediment van ruim 10 jaar geleden. Een meting uit 2009 levert een veel hogere valsnelheid op; dit is in overeenstemming met de sterk afwijkende resultaten van het opwervelingsexperiment.

A.3.3 Samenstelling toplaag (door Tauw) en opgewerveld materiaal

Door Tauw is van alle zeven locaties de samenstelling van de toplaag, en van 1 locatie ook de samenstelling van de onderlaag geanalyseerd (zie memo Tauw²). Deze onderlaag wijkt qua samenstelling niet af van de betreffende toplaag en zal verder niet besproken worden. De analyse van de korrelgrootte en het percentage organische stof is op een ander deelmonster uitgevoerd dan de analyse van TOC en de overige elementen. De deelmonsters verschillen onderling in samenstelling; dit blijkt doordat parameters die gewoonlijk een sterke correlatie vertonen (OM versus TOC, < 2 µm versus Al) in deze set niet of matig gecorreleerd zijn. Het gebrek aan verband tussen de fractie < 2 µm en het aluminium gehalte kan overigens ook veroorzaakt worden doordat met een koningswaterontsluiting aluminiumsilicaten niet geheel in oplossing gaan.

² Van Meer, M. (2018). Veld- en analysegegevens Loosdrechtse Plassen ten behoeve van slibmodel Deltares. Tauw-rapport L001-1263469MVM-V02-nja.NL.

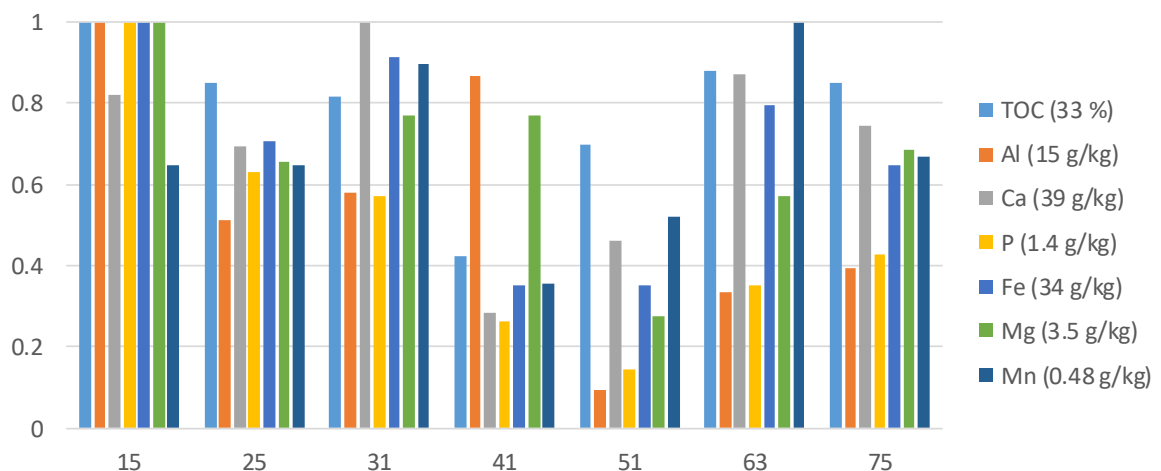
De door Tauw gerapporteerde resultaten van de sedigraaf zijn uitgedrukt als een percentage van het volledige monster; het cumulatieve percentage $< 2000 \mu\text{m}$ varieert daardoor van 10 tot 65%. De overige 35 tot 90% bestaat uit organische stof of kalk, deze worden bij de opwerking voorafgaand aan de analyse verwijderd. Eventuele deeltjes groter dan $2000 \mu\text{m}$ vallen helemaal buiten de analyse (en vormen ook geen onderdeel van de 100%). De meting van monster 31 toplaag komt uit op 92% $< 2000 \mu\text{m}$; dit is niet mogelijk aangezien er 60% organische stof in het monster aanwezig is. De sedigraafresultaten van dit monster zijn gestippeld weergegeven omdat ze onbetrouwbaar zijn. Om de monsters onderling beter te kunnen vergelijken, is de korrelgrootteverdeling toegerekend naar 100% $< 2000 \mu\text{m}$ (en wordt daarmee de korrelgrootteverdeling van de minerale fractie). Op locatie 2, 6 en 7 bevatten de minerale delen 10-15% klei ($< 2 \mu\text{m}$) en 35-75% $< 63 \mu\text{m}$ (Figuur A.3.4). De overige locaties bestaan (buiten het organisch materiaal) grotendeels uit zandig materiaal ($> 63 \mu\text{m}$).



Figuur A.3.4 Korrelgrootteverdeling van de minerale delen (resultaten sedigraaf omgerekend naar 100%). De analyse van monster 31 toplaag is dubieus (te hoog percentage, $< 63 \mu\text{m}$ is groter dan $< 125 \mu\text{m}$) en daarom gestippeld weergegeven.

In Figuur A.3.5 zijn de (genormaliseerde) meetwaarden van de elementgehalten weergegeven. Opvallend is dat de korrelgrootteverdeling van locatie 1 goed overeenkomt met die van locatie 5, maar dat de elementgehalten op locatie 1 veelal het hoogste en op locatie 5 juist het laagste zijn binnen deze set monsters. Het lijkt erop dat het moedermateriaal, dat op deze locaties bestaat uit zandig materiaal, op beide locaties in een verschillende mate is opgeladen met organische stof, ijzer en calcium. Locatie 2 en 6 vertonen ook een vergelijkbare korrelgrootteverdeling; voor deze monsters zijn de verschillen in de gehalten kleiner.

Wat nog ontbreekt is een verband tussen de samenstelling van (de toplaag van) de waterbodem en de gevoeligheid voor opwerveling. Voor het afleiden van dit verband zijn op dit moment nog niet voldoende gegevens beschikbaar.



Figuur A.3.5 Samenstelling toplaag sediment. De data zijn genormaliseerd op de hoogste meetwaarde (hoogste meetwaarde is vermeld in de legenda); de absolute meetwaarden zijn terug te vinden in de memo van Tauw.

Op het opgewervelde materiaal uit kolom 24 en 30 is een TGA (thermogravimetrische analyse) uitgevoerd. Hieruit volgt het gloeiverlies waaruit het organisch stof percentage kan worden geschat en het kalkgehalte. De samenstelling van het opgewervelde materiaal uit kolom 24 en 30 is vergelijkbaar; het organische stofgehalte is respectievelijk 53 en 60% en er is geen kalk aanwezig. Dit laatste geeft aan dat het calcium dat in de monsters aanwezig is, voldoende voor 3 tot 10% kalk (CaCO_3), waarschijnlijk voornamelijk geadsorbeerd aan klei of organische stof voorkomt en niet in de vorm van carbonaten. Verkittende werking door carbonaten lijkt daarmee geen factor waarmee rekening gehouden hoeft te worden.

A.4 Conclusies

A.4.1 Conclusies

- Er zijn verschillen tussen de beide kolommen waarop een opwervelings- en sedimentatieproef is uitgevoerd. Het sediment in kolom 24 heeft een lagere geschatte kritische schuifspanning (0,02 Pa) en een lagere gemiddelde valsnelheid dan het materiaal in kolom 30 (kritische schuifspanning 0,05 Pa). Op locatie 2 is het lutumgehalte van de minerale delen 15% en is bijna 40% van de deeltjes kleiner dan 63 μm . Van locatie 3 is geen betrouwbare korrelgrootteverdeling beschikbaar.
- Metingen uit 2009 leveren een veel hogere kritische schuifspanning (2,3 Pa) in combinatie met een hogere gemiddelde valsnelheid op. De opwerveling en valsnelheid van materiaal dat in 2007 is bemonsterd is wel vergelijkbaar met het huidige materiaal.
- De vlokken lijken redelijk stabiel. Mogelijk zijn vlokvorming en -afbraak niet essentieel voor het model.
- Met organische stofgehalten die variëren tussen 27 en 77% en een minerale fractie die varieert tussen minder dan 1 en 22% kleiner dan 63 μm , is de variatie in samenstelling van de toplaag van het sediment groot.
- Op basis van het waterbodemonderzoek uitgevoerd door Tauw³ kan mogelijk een beter beeld verkregen worden van de ruimtelijk verdeling van organisch rijk en klei-houdend materiaal in de toplaag.

³ Van Meer, M. en Roijendijk, Y. (2018). *Verkenndend en beschrijvend waterbodemonderzoek (inclusief asbestonderzoek) in de Loosdrechtse Plassen*. Tauw-rapport R001-1263469MVM-V04-tsz-NL.

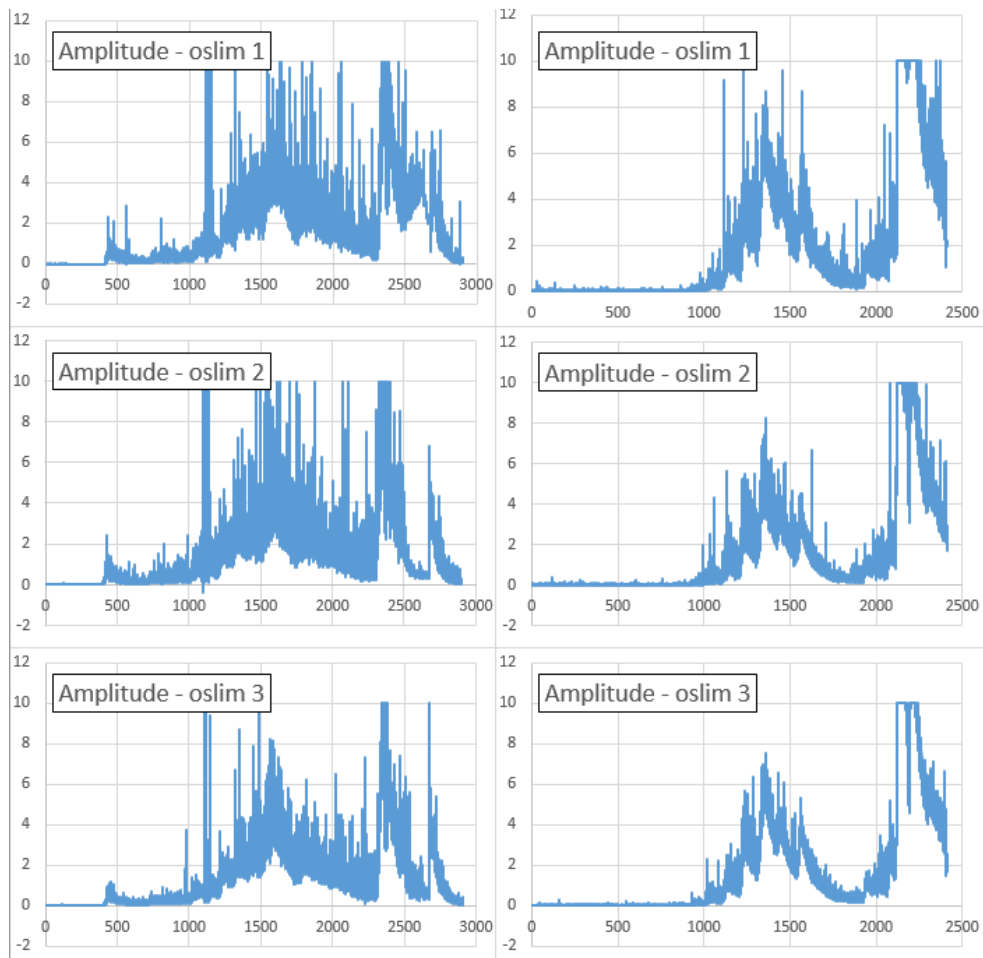
Door de grote ruimtelijke variatie en het effect dat deze variatie lijkt te hebben op de opwerveling van materiaal, verdient het de aanbeveling om met grotere ruimtelijke resolutie het sediment van de plassen te bemonsteren en op zoek te gaan naar de parameters die het opwervelings- en sedimentatiegedrag van de locaties het beste voorspellen. Voor het lichtklimaat zijn vooral de eigenschappen van het materiaal dat relatief traag bezinkt van belang; de hoeveelheid van dit materiaal varieert per locatie. Daarnaast worden niet alle locaties even sterk beïnvloed door windwerking. Dit is mogelijk van invloed op het karakter van het materiaal dat zich bij harde wind over de plassen verspreidt.

Daarnaast is het wenselijk om meer aandacht te besteden aan de temporele en ruimtelijk variatie in de zwevend stof concentraties, het verband tussen de samenstelling van het zwevend stof en de samenstelling van de toplaag van het sediment op verschillende locaties, en de lichtverstrooiende eigenschappen van het zwevend stof. Deze gegevens zullen een verbetering van het bestaande model opleveren en daarmee een betere advisering ten aanzien van een luvtestructuur en een betere voorspelling van het te verwachten effect van een luvtestructuur.

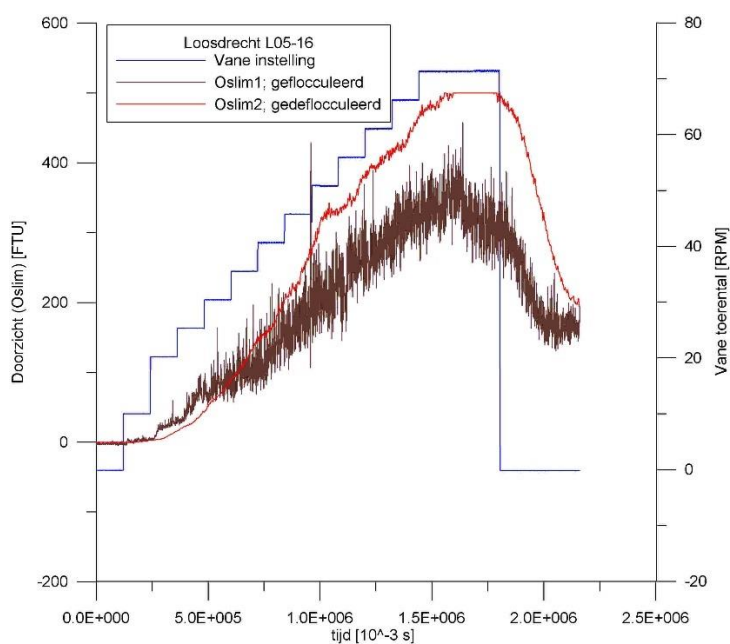
A.5 Bijlage: Overige data opwervelingsexperiment

In Figuur A.5.1 is het signaal van de drie oslims voor beide kolommen weergegeven (links kolom 24, rechts kolom 30). Met name in kolom 30 is een afname in de ruis van het oslim signaal te zien; dit duidt op afbraak van vlokken tot kleinere en meer uniforme deeltjes. De afname in de ruis is veel kleiner dan bij in het verleden uitgevoerde experimenten (Penning et al., 2012⁴, zie Figuur A.5.2); maar in die experimenten werden de vlokken door middel van 3 pompen kapot gemaakt, en in dit experiment is het monster door een enkele pomp gegaan. De vlokken lijken redelijk bestand tegen frictie.

⁴ Penning, W.E., Genseberger, M., Uittenbogaard, R.E. en Cornelisse, J.C. (2012). *Quantifying measures to limit wind-driven resuspension of sediments for improvement of the ecological quality in some shallow Dutch lakes*. *Hydrobiologia* 710(1), pp. 279-295.

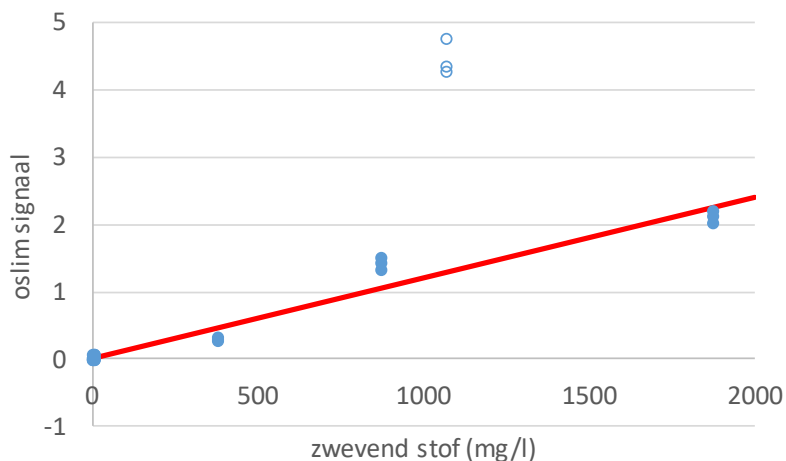


Figuur A.5.1 Oslim signaal tijdens opwervelingsexperiment. Links kolom 24, rechts kolom 30. Oslim 1 direct na opwervelen, oslim 2 na Malvern, oslim 3 na pomp.



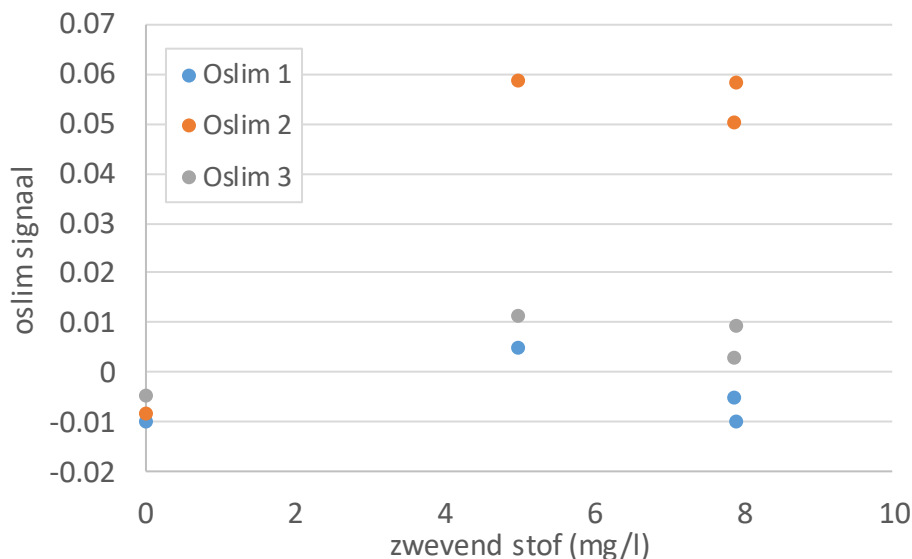
Figuur A.5.2 Opwervelingsexperiment sediment Loosdrecht in 2009 (Penning et al., 2012).

De oslims zijn gekalibreerd door een aantal suspensies met verschillende zwevend stof concentraties te meten (Figuur A.5.3). De concentraties in de kalibratie zijn in dezelfde orde van grootte als de concentraties die tijdens het opwervelingsexperiment zijn gemeten. De verschillen tussen de drie oslims zijn beperkt en worden daarom met één kalibratie afgedekt. Eén monster levert een duidelijk afwijkend signaal op alle drie de oslims op. De oorzaak is onbekend, de meting is niet meegenomen bij het vaststellen van het verband tussen de zwevend stof concentratie en het oslimsignaal.



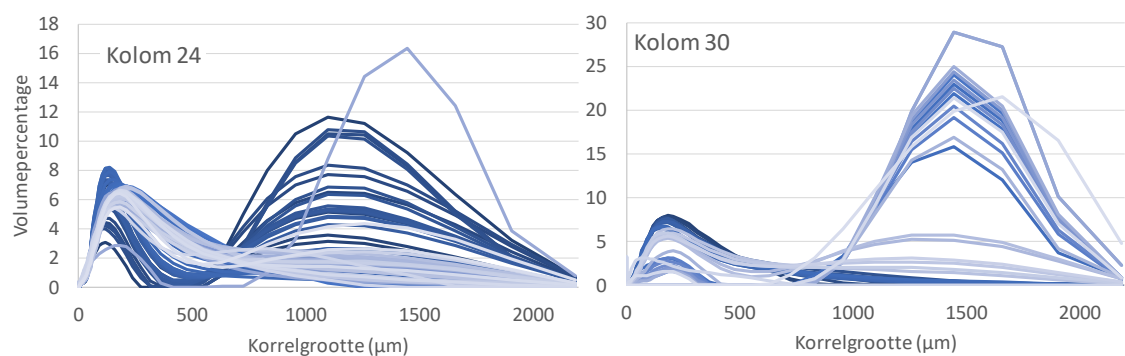
Figuur A.5.3 Kalibratie oslims met bekende zwevend stof concentratie. Rode lijn geeft de helling weer; de open symbolen niet zijn meegenomen in de kalibratie.

Daarnaast is het interessant om de lichtabsorberende eigenschappen van het opgewervelde materiaal te vergelijken met de lichtabsorberende eigenschappen van zwevend stof dat te klein of te licht is om onder natuurlijke omstandigheden te sedimenteren. In Figuur A.5.4 is het oslim signaal van kraanwater (0 mg/l zwevend stof), het bovenstaande water (na opwerveling en weer bezinken) afkomstig van kolom 30 (5 mg/l), van kolom 24 (8 mg/l) en het oppervlaktewater dat apart was aangeleverd (ook 8 mg/l). Er is geen verband tussen de zwevend stof concentratie en het signaal van de verschillende oslims. We zijn er daarmee niet in geslaagd de oslim te kalibreren voor deze fijne fractie; een vergelijking tussen de lichtabsorberende eigenschappen van de beide typen monsters is daardoor niet mogelijk.

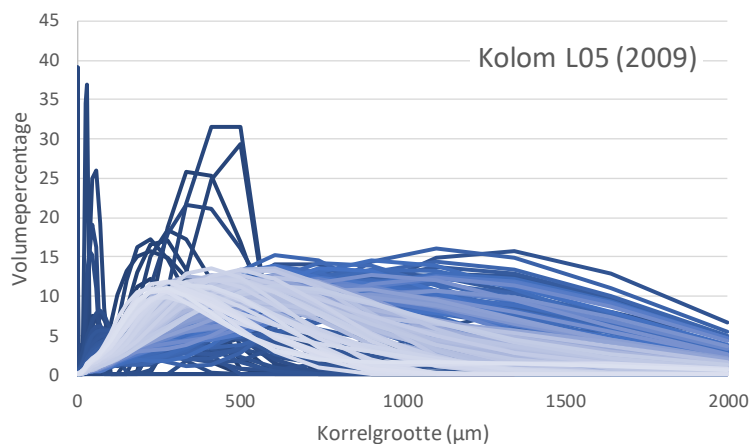


Figuur A.5.4 Poging tot kalibratie van de drie gebruikte oslims voor de fractie zwevend stof die niet bezinkt.

De tweede analyse gekoppeld aan het opwervelingsexperiment is een deeltjesgrootteanalyse op basis van laserdiffractie (Malvern). Om een indruk te geven van de deeltjesgrootteverdelingen, zijn in Figuur A.5.5 alle deeltjesgrootteverdelingen per kolom weergegeven. Tijdens het experiment vindt er een verschuiving in de deeltjesgrootte plaats. In kolom 24 verdwijnt de tweede piek (rond 1000 μm) grotendeels uit het spectrum, in kolom 30 verschijnt er juist een piek door een toename van deeltjes met een formaat van circa 1500 μm . Tijdens het opwervelingsexperiment dat in 2009 is uitgevoerd, kwamen in eerste instantie veel fijne deeltjes in suspensie, vervolgens verschijnt een piek rond 1000 μm , waarna weer een verschuiving naar kleinere deeltjes plaatsvindt (zie Figuur A.5.6). De metingen van 2009 lijken daarmee meer op de metingen van kolom 24 dan op die van kolom 30.



Figuur A.5.5 Deeltjesgrootteverdelingen tijdens de opwervelingsexperimenten. De donkerste tinten betreffen de monsters van het begin van het experiment, de latere monsters zijn telkens in een lichtere kleur weergegeven.



Figuur A.5.6 Deeltjesgrootteverdelingen tijdens het opwervelingsexperiment in 2009. De donkerste tinten betreffen de monsters van het begin van het experiment, de latere monsters zijn telkens in een lichtere kleur weergegeven.

B Programma van eisen pilot luwte-effecten Loosdrechtse Plassen

Deltares memo

Aan: Jacques van Alphen (Waternet), Fred de Haan (Waternet)

Kenmerk: 11201773-005-ZWS-0001

Datum: 29 maart 2019

Auteurs	Review	Goedkeuring
Arjan Wijdeveld Pascal Boderie Menno Genseberger	Thijs van Kessel	Renée Talens

B.1 Doel en opbouw

Dit programma van eisen dient als leidraad om tot een plan van aanpak te komen voor de pilot luwte-effecten in de Loosdrechtse Plassen. Belangrijke wijziging ten opzichte van het eerste concept is dat er tijdens overleg met Waternet op 26-02-2019 gekozen is om een bestaand eiland als luwtestructuur te gebruiken. Hiermee vervalt de noodzaak voor de aanleg van een luwtestructuur in de pilot.

We richten ons hierbij primair op de impact van luwtestructuren op het lichtklimaat ten gevolge van sedimentatie en opwerveling van slib door beïnvloeding van golven en stroming. Hiermee worden andere mogelijke oorzaken (en maatregelen) die invloed hebben op de zwevend slib concentratie niet specifiek vastgelegd. Hierbij moet gedacht worden aan de invloed van oevererosie als bron van zwevend slib, het inlaten van gebiedsvreemd water of de invloed van baggeren op de zwevend slib concentratie. Niettemin draagt de monitoring potentieel ook bij aan het kwantificeren van deze effecten, weliswaar niet direct, maar wel indirect via de inwinning van meetgegevens. Deze meetgegevens worden gebruikt om het slibmodel van de Loosdrechtse Plassen te verbeteren door kalibratie en validatie. Hiermee kan het effect van meer maatregelen dan alleen een luwtestructuur worden bepaald.

Het programma van eisen bestaat uit drie onderdelen:

1. de achtergrond en onderbouwing van de maatregel luwtestructuur op hoofdlijnen,
2. de informatie op hoofdlijnen met betrekking tot de aanleg van de luwtestructuur en
3. de monitoringsstrategie op hoofdlijnen, met daarin de te monitoren grootheden ter beoordeling van de effectiviteit van de luwtestructuur en de kostenschattting.

B.2 Achtergrond en onderbouwing luwtestructuur op hoofdlijnen

De pilot luwte-effecten moet aantonen of de aanleg van luwtestructuren helpt bij het verbeteren van het lichtklimaat in de Loosdrechtse Plassen (eerste tot en met vijfde plas). Een beter lichtklimaat draagt bij aan het verkrijgen van meer waterplanten op de waterbodem. Het lichtklimaat is afhankelijk van de mate van uitdoving van licht in de waterkolom. Voor de Loosdrechtse Plassen zijn hiervoor eerder onderzoeken gedaan (zie o.a. [1, 2, 3, 4]). De mate van lichtuitdoving in de waterkolom is gerelateerd, maar niet een-op-een gelijk, aan de hoeveelheid zwevend slib in de waterkolom. Vermindering van de zwevend slib concentratie in Loosdrechtse Plassen draagt bij aan een verbeterd lichtklimaat. Een manier om dit te bereiken is zorgen dat slib dat zweeft in de waterkolom meer bezinkt naar de bodem (meer sedimentatie) en dat slib op de bodem minder vaak opwervelt naar de waterkolom (minder resuspensie).

Een luwtestructuur draagt hieraan bij door:

- vermindering van de strijklengte waardoor golfkrachten afnemen en
- beïnvloeding van stroming.



Figuur B.1 Voorbeeld van de luwtestructuur bij Warder in het Markermeer zoals tijdelijk aangelegd voor het Onderzoeksprogramma Natuurlijk(er) Markermeer-IJmeer (NMIJ) [5, 6].

De conclusies die uit eerder veldonderzoek getrokken zijn (in het Markermeer [5], zie foto luwtestructuur in Figuur B.1) zijn niet een-op-een vertaalbaar naar Loosdrecht, maar indicatief. Het succes van luwtestructuren hangt van meerdere factoren af, waaronder:

- de positie en afmeting van de luwtestructuur in relatie tot de waterbeweging en
- de eigenschappen van het slib.

De luwtestructuur richt zich hierbij primair op het veranderen van de balans van slib op de bodem (in een fluffy laag) en in de waterkolom. En niet als hoofdzaak op het aanpakken van de bronnen van slib (denk aan bodem- en oevererosie en aanvoer van gebiedsvreemd water – bodemerosie wordt weliswaar lokaal maar niet op grote schaal verminderd door een luwtestructuur).

De pilot luwte-effecten is onderdeel van een integraal plan om het zwevend slib in de Loosdrechtse Plassen aan te pakken. Twee andere onderdelen hierin worden op het ogenblik door Deltares uitgevoerd:

- 1 klein experimenteel onderzoek naar het gedrag van het zwevend slib uit de Loosdrechtse Plassen (gerapporteerd in [7]) en
- 2 opzet van een slibmodel voor de Loosdrechtse Plassen met de resultaten van a) en hiermee verkennende modelsimulaties voor de pilot.

De pilot levert gegevens op om het slibmodel uit b) verder uit te werken en te verbeteren. Het slibmodel is uiteindelijk bedoeld voor scenario verkenningen en optimalisatie van maatregelen. Deze maatregelen richten zich op vermindering van de zwevend slib concentratie voor een beter lichtklimaat. De monitoring is niet alleen nuttig om het effect van luwtemaatregelen te bepalen maar ook om een beter inzicht te krijgen in de hydro-, slib- en lichtdynamiek van de

Loosdrechtse Plassen in het algemeen en voor de afregeling en validatie van het slibmodel om beheermaatregelen door te rekenen.

Verder is gebruik gemaakt van door Tauw gestoken boorkernen [8], veld-/analysegegevens van Tauw [9], dieptekaart uit 2016 [10] en kennis uit eerdere studies (o.a. [1, 2, 3, 4]).

B.2.1 Experimenteel onderzoek gedrag zwevend slib

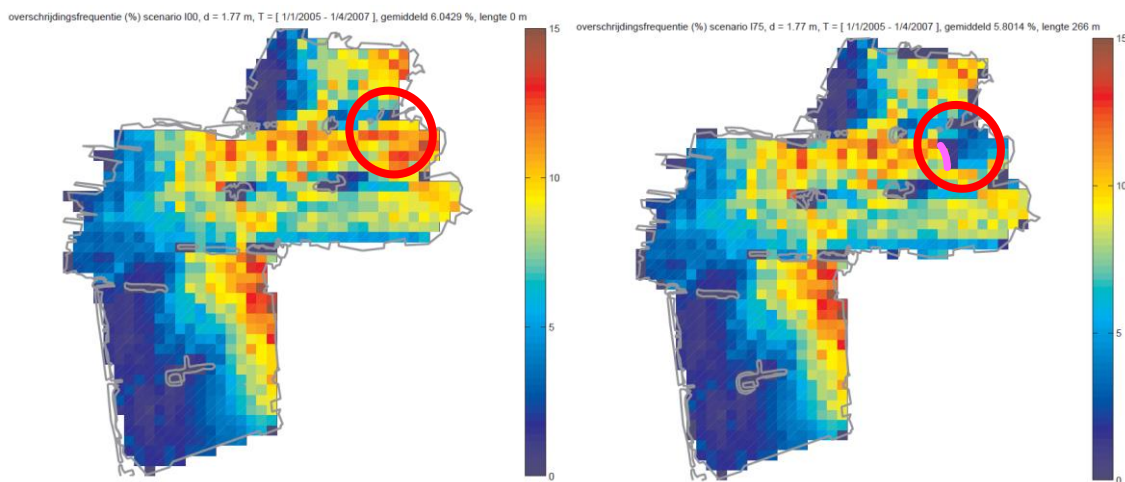
De laboratoriumexperimenten kennen een aanzienlijke spreiding en onzekerheid. Het is echter wel mogelijk om een aantal kritische parameters af te leiden die van belang zijn voor het bepalen van de kans op succes voor de toetsing van de pilot luwte-effecten:

- De in 2018 [7] afgeleide kritieke bodemschuifspanning op basis van opwervelingsproeven is laag, tussen de 0,02 en 0,05 Pa (kolom 24 en kolom 30).
 - o De spreiding in de kritieke bodemschuifspanning met een factor 2.5 is relatief groot, in de modellering wordt hier door middel van een gevoeligheidsanalyse rekening mee gehouden.
 - o Deze bodemschuifspanning is dermate laag dat het aannemelijk is dat er resuspensie van de sediment toplaag plaatsvindt door golven in een meer met een strijklengte van 3 km en een diepte van 2 meter bij matige wind (windkracht 5-6: 10 m/s).
- De korrelgrootteverdeling van het zwevend slib is in de 2018 experimenten stabiel, ook na resuspensie en na verpompen. Opwerveling en sedimentatie van het slib heeft dan ook geen aantoonbare invloed op het vormen of afbreken van vlokken. Voor de modellering wordt het zwevend slib vereenvoudigd tot de aanwezigheid van twee fracties:
 - o Voor 90% van het zwevend slib wordt een gemiddelde valsnelheid van circa 0,2 tot 0,3 mm/s aangehouden (circa 15 tot 25 m/dag) conform de range gemeten in de kolom experimenten. Dit sediment bezinkt in een 2 meter diepe waterkolom in circa 2 tot 3 uur.
 - o Voor 10% van het sediment is de valsnelheid (veel) kleiner dan 0,2 mm/s (lagere valsnelheden waren in de proefopzet niet meetbaar). Dit sediment zal al met een zeer minimale beweging van de waterkolom door turbulentie dagen in suspensie blijven. Voor de modellering is voor nu een schijnbare valsnelheid (het is in feite een flocculatiekans) van deze fractie (kleiner dan 10 µm) gekozen in de range van 0,1 tot 1 m/dag (2 tot 20 dagen in de waterkolom na resuspensie). Aan de hand van veldmetingen kan het slibmodel worden gekalibreerd.
 - o Uit de experimenten (kolommen 2007 [1] en 2018 [7] en veldmeting Tauw 2018 [9]) volgt dat maximaal 10% van het zwevend stof uit fijn slib (kleiner dan 10 µm) bestaat.

Samenvattend: het experimenteel onderzoek heeft aangetoond dat de luwtemaatregel waarschijnlijk een concentratieverlagend effect heeft op circa 90% van het zwevend slib afkomstig van de waterbodem (resuspensie), maar ook dat er een fractie van zo'n 10% zwevend slib is dat erg moeilijk bezinkt. Voor praktische toepassing in de Loosdrechtse Plassen gaat het erom te weten hoe dit zich doorvertaalt naar het doorzicht. De pilot dient ervoor om het effect van luwte op de slibconcentratie en het doorzicht te bepalen en de geschiktheid van het slibmodel voor het doorrekenen van luwtemaatregelen te verbeteren (kalibratie) en te toetsen (validatie).

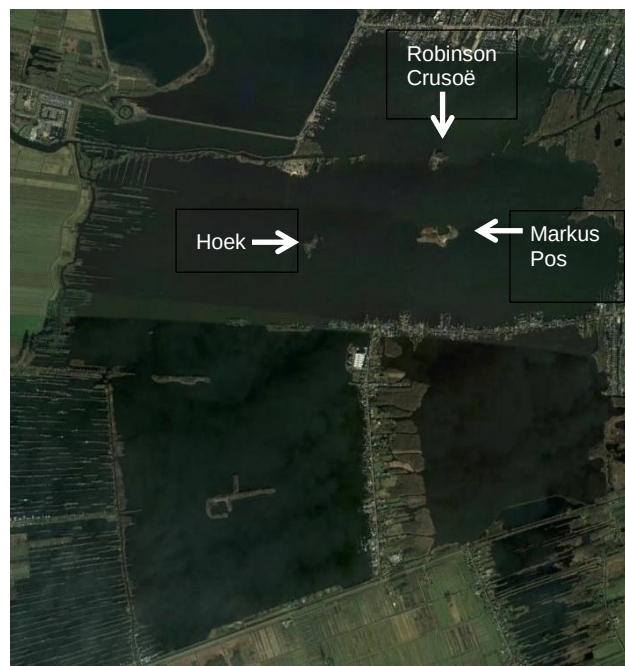
B.2.2 Mogelijke meetlocaties

Op basis van het in 2008 [2] opgezette quick scan model voor kans op opwerveling van slib door wind gedreven golven is een suggestie gedaan voor een mogelijke luwtestructuur voor de pilot. Deze luwtestructuur heeft een afmeting van zo'n 250 m waarmee op de voorgestelde locatie een aantoonbare invloed wordt verwacht. Figuur B.2 laat dit zien: de kans op opwerveling van slib door wind gedreven golven neemt door de aanleg sterk af aan de noordoostelijke zijde van de luwtestructuur. Dit is voor wind uit de periode 1-1-2005 tot 1-4-2007. Figuur B.2 toont de kans op opwerveling gemiddeld over deze periode.



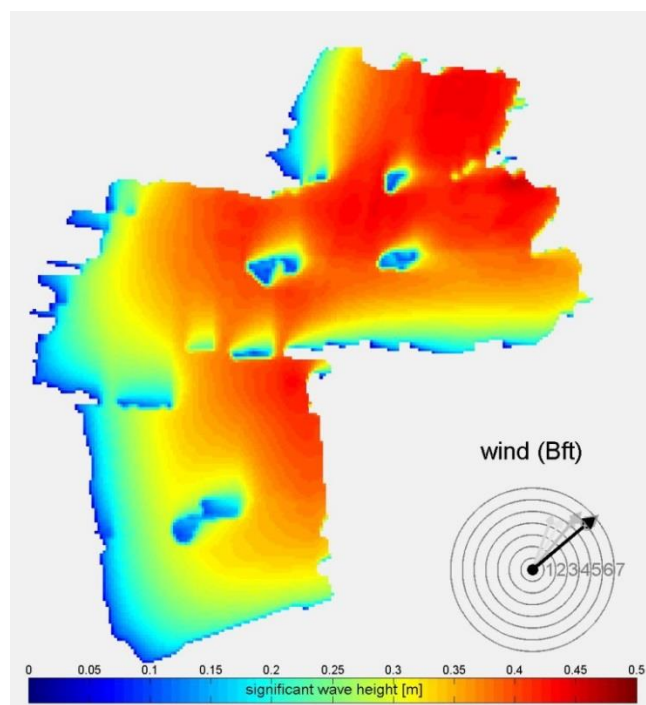
Figuur B.2 Modelberekening quick scan model, links de kans op opwerveling van slib door wind gedreven golven zonder luwtestructuur, rechts met luwtestructuur van zo'n 250 m (in roze).

Tijdens overleg met Waternet op 26-02-2019 is echter gekozen om een bestaand eiland als luwtestructuur te gebruiken. Hiermee vervalt de noodzaak voor de aanleg van een luwtestructuur in de pilot. We richten ons hierbij op de drie eilanden Hoek, Markus Pos en Robinson Crusoe (Figuur B.3) omdat deze in de noordelijke zijde van de Loosdrechtse Plassen liggen waar we het grootste effect op de strijklengte verwachten. Hierbij moet wel aangetekend worden dat ten oosten van Markus Pos gemiddeld gesproken weinig tot geen slib op de bodem voorkomt.



Figuur B.3 Eilanden Hoek, Markus Pos en Robinson Crusoe en Markus Pos in de Loosdrechtse Plassen.

Door verkennende modelberekeningen met de eerste opzet van het slibmodel is nagegaan wat de invloed is van de eilanden op de golfhoogte. Figuur 4 laat voor dit zien voor een momentopname bij windkracht 7 uit het zuidwesten (zie voor een meer dynamisch beeld de animaties die met de eerste opzet van het slibmodel zijn gemaakt). Op basis van deze verkennende modelberekeningen wordt een meetlocatie geadviseerd op 50 meter uit de kust van een van de drie eilanden aan de noordoostkant. Voorstel is om dit bij eiland Hoek te doen.



Figuur 4 Significante golfhoogte bij zuidwestelijke wind, windkracht 7.

B.2.3 Te monitoren effecten

De uitkomsten van het experimenteel onderzoek [7] en de eerste versie van het slibmodel laten zien dat er twee belangrijke processen zijn die het lichtklimaat kunnen beïnvloeden:

- De bodemschuifspanning en de valsnelheid van 90% van het zwevend slib. De lab-experimenten en de modelresultaten wijzen erop dat de pilot luwte-effecten effect zal hebben op deze bulk van het slib door verminderen van strijklengte en beïnvloeding van stroming.
- Het slecht bezinken van 10% van het zwevend slib waardoor een luwtestuctuur hierop nauwelijks invloed heeft (luwte kan nooit alle opwerveling voorkomen waardoor een deel van het slib 'semi-permanent' in de waterkolom zit)

Voor praktische toepassing in de Loosdrechtse Plassen gaat het erom vast te stellen welke invloed een luwtestructuur precies heeft op de slibconcentratie en hoe dit zich effectief doorvertaalt naar het doorzicht. Daarom stellen we in dit plan van eisen de volgende te monitoren grootheden voor.

B.2.3.1 *Nagaan functioneren luwtestructuur binnen systeem aan noordoostkant eiland*

Doel van dit hoofdonderdeel is de werking van het principe van een luwtestructuur in de praktijk aan te tonen door te monitoren dat

- a) golven zwakker worden in de luwe zone,
- b) dat door a) in de luwe zone minder opwerveling van slib naar de waterkolom optreedt,
- c) meer slib uit de waterkolom bezinkt (en ook wordt vastgehouden) door a) en beïnvloeden van het stromingsgedrag,
- d) de zwevend slib concentratie in de waterkolom (in totaal) vermindert door b) en c) en
- e) het lichtklimaat in de waterkolom verbetert door d), zie toelichting in sectie B.2.3.4.

Dit kan met een meetpaal/-frame op een meetlocatie op 50 meter uit de kust aan de noordoostkant van een van de drie eilanden Hoek, Markus Pos en Robinson Crusoe (sectie B.2.2). Voor een specifieke uiteenzetting van de te meten grootheden zie sectie B.4.2.

B.2.3.2 *"Nice to have": referentie aan zuidwestkant eiland*

Ter referentie heeft het de voorkeur om de onderdelen uit B.2.3.1 ook aan de andere kant, ten zuidwesten van hetzelfde eiland op 50 meter van de kust te monitoren.

Alternatief voor volledige tweede meetpaal/-frame:

- a) Door gebruik te maken van metingen bij verschillende windrichtingen (b.v. noordoostelijk i.p.v. de overheersende zuidwestelijke wind) kan de eerste meetpaal als een pseudo tweede referentie meetpaal dienen. Er is echter geen een-op-een parallel vergelijking mogelijk.
- b) Een andere optie is een tweede meetpaal met een beperkt aantal sensoren. Zo is het golfklimaat voor onderdeel B.2.3.1 a) relatief betrouwbaar te reconstrueren op basis van de gemeten windsnelheid maar is de effectiviteit voor onderdeel B.2.3.1 c) beter te beoordelen door een aanvullende referentie meting op een tweede locatie.

B.2.3.3 *Aanvullend rondom eiland en voor Loosdrechtse Plassen*

- a) Wekelijkse doorzicht metingen (secchi disk) aan noordoostelijke en zuidwestelijke meetlocatie van eiland en een meting van de lichtuitdoving over de diepte met een lichtmeter (zie B.B.2.3.4).
- b) Wekelijkse chemische analyse van optisch actieve stoffen (algen, DOC en zwevend stof), zie toelichting in sectie B.2.3.4. Mogelijk te combineren rondom onderhoudsmomenten en/of met reguliere monitoringsprogramma Waternet.
- c) Uurlijkse winddata van KNMI station De Bilt opvragen en opslaan.
- d) De ontwikkeling van waterplanten in de buurt van het eiland monitoren.

B.2.3.4 Toelichting voor nagaan effect luwtestructuur op lichtklimaat in waterkolom

Lichtmetingen zijn een goede (standaard) oplossing voor het meten van de afname van de hoeveelheid licht onder water door de gelijktijdige meting van de lichtflux met twee op een verticale afstand gemonteerde lichtsensoren (bijvoorbeeld van het merk LiCor). Deze lichtsensoren zijn gevoelig voor het golflengtegebied en meten totale straling in deze range die relevant is voor algen- en waterplantengroei (tussen 400 en 700 nm). Merk op dat de lichtbron bij de meting de zon zelf is en niet, zoals bij een OBS, een kunstmatige (infrarood) lichtbron. Bij lichtmetingen kan gekozen worden voor een vaste opstelling van de lichtmeters of regelmatig meten (per week) met de hand.

“Very nice to have”: spectrale samenstelling van het onderwater licht.

Om absorptie coëfficiënt en totale extinctie over het zichtbaar-licht- spectrum in situ te meten zijn in situ spectrofotometers beschikbaar (bijvoorbeeld ACs van Wetlabs, www.wetlabs.com). Deze kunnen geautomatiseerd de optische eigenschappen in het water meten zonder dat er flessenmonsters nodig zijn. De structuur en samenstelling van slib, plankton en vlokken blijft zo intact. Een niet continue meting is ook mogelijk met een handheld onderwater volledige spectrum sensor.

Om de veldmetingen van licht bruikbaar te laten zijn voor modellering met het onderwaterlicht model UITZICHT is het belangrijk om ook andere (dan zwevend stof) concentraties van optisch actieve stoffen ten tijde van de lichtmeting beschikbaar te maken, met name algen (chlorofyl-A) en opgelost organisch materiaal (DOM of DOC).

Hoewel bijvoorbeeld met een YSI multiprobe (fluoroprobes) concentraties van groen en blauwalg pigment continue gemeten kunnen worden (samen met o.a. zuurstof en temperatuur) verg dit een forse (20 k€) investering die nu waarschijnlijk niet rendeert (tijdens het luwte-experiment in het Markermeer [5] is wel een YSI gebruikt). Daarom adviseren we wekelijkse chemische analyse van optisch actieve stoffen (algen, DOC en zwevend stof).

B.2.3.5 Meetperiode

Om beoogde effecten te monitoren denken we dat een periode van 3 maanden voldoende moet zijn om het effect van verschillende windsnelheden en richtingen te kunnen bepalen en statistiek te kunnen toepassen. Een periode van 3 maanden is echter te kort om verschillen tussen seizoenen vast te stellen. Gezien het veronderstelde belang van onderwaterlicht voor de ontwikkeling en groei van onderwatervegetatie is een keuze voor het voorjaar en of vroege zomer logisch.

B.3 Informatie over aanleg luwtestructuur op hoofdlijnen

Tijdens overleg met Waternet op 26-02-2019 is gekozen om een bestaand eiland als luwtestructuur te gebruiken. Hiermee vervalt de noodzaak voor de aanleg van een luwtestructuur in de pilot. Afmeting van de eilanden zijn in dezelfde orde van grootte als de eerder voorgestelde luwtestructuur zoals hieronder beschreven.

Voor overleg met aannemers, detaillering dimensies op basis van modelresultaten:

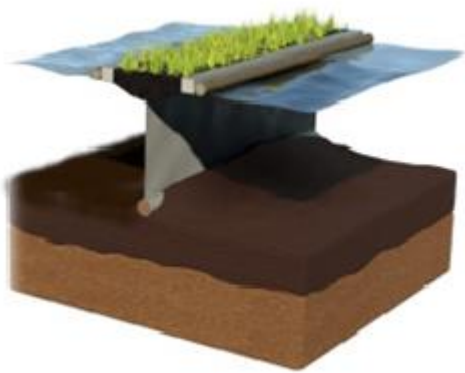
De globale locatie en dimensies van de luwtestructuur zijn afgeleid op basis van het experimenteel onderzoek, eerdere ervaringen met een luwtestructuur in het Markermeer [5] (zie sectie 2) en de eerdere studies en modelberekeningen voor de Loosdrechtse Plassen.

Het eerdere voorstel was om de luwtestructuur voor de pilot:

- minimaal 400 meter lang te maken,
- aan te leggen in het noordoosten van de Loosdrechtse Plassen:
 - o hier is momenteel een hoge overschrijdingsfrequentie voor resuspensie,
 - o hier kan wellicht aangesloten worden op plekken waar al waterplanten op de bodem voorkomen,

- er is in de oosthoek een relatief zandige bodem, maar daar wordt regelmatig een sliblaag aangetroffen, het slib lijkt relatief mobiel,
- hier is het mogelijk een locatie te kiezen waar relatief minder gevaren wordt.
- enigszins te krommen, om een bezinkzone te creëren,
- gesloten (impermeabel) aan te leggen zodat zowel de strijklengte verkort wordt en daarmee de golfsterkte vermindert en er weinig tot geen retourstroming plaatsvindt,
- door te laten lopen van de bodem tot boven de waterspiegel.

Er is nu gekozen om de metingen rond een bestaand eiland uit te voeren. Bij succes van de metingen is de vraag wel hoe de luwtestructuren aan te leggen. De keuze voor het materiaal van de luwtestructuur is niet voorgeschreven. Het gebruik van geotextielen (zie Figuur B.5, links) is ter nadere overweging aan Waternet. Geotextiel is in algemene zin ongewenst, maar als tijdelijke maatregel mogelijk acceptabel. “Building with Nature” oplossingen (zie Figuur B.5, rechts) worden aangemoedigd.



Figuur B.5 De slibremmer (Tauw) en flood protection met lokale vegetatie (Ecoshape).

B.4 Monitoringsstrategie op hooflijnen en kostenschatting

B.4.1 Monitoringsstrategie

De monitoringseisen staan weergegeven in sectie B.2.3. De exacte invulling dient in overleg met de aannemer plaats te vinden. Hier wordt nu indicatief een eerste invulling gegeven.

Voorgesteld wordt om met twee meetstrategieën te werken:

- minimaal één maar bij voorkeur twee meetpalen/-frames voor de basisinformatie (sectie B.2.3.1 en B.2.3.2) en
- aanvullende gegevens, onder meer door geregelde veldmetingen (sectie B.2.3.3).

De meetpalen worden aan weerszijde van de luwtestructuur (een eiland) geplaatst, zie Figuur B.6.



Figuur B.6 Voorgestelde locaties meetpalen/-frames bij eiland Hoek.

Figuur B.7 illustreert dat een meetpaal in ondiep water ook relatief eenvoudig kan worden aangelegd, bijvoorbeeld met een spuitlans en stijgerpijp. Om torderen te voorkomen hebben wij de voorkeur voor minimaal twee ankerpunten en een frame.



Figuur B.7 Boven, geassembleerd buizenstelsel (links het onderwatergedeelte), onder de meetpaal na plaatsen.

B.4.2 Kostenschatting (excl. BTW)

Meetapparatuur **meetpaal 1** (met service en dataverwerking/rapportage voor 3 maanden, zie sectie B.2.3.5):

- RVS Frame 4.000 euro per stuk
 - Montage ter plaatse 800 euro per stuk (1 mandag)
 - Plaatsing 1.000 euro per stuk (2 man ½ dag, incl. boot)
- Stroming, ADV/ADCP 20.000 euro per stuk (met batterij, zonder logger)
 - 1x per meetpaal, circa 25 cm van de bodem
 - Programmeren om 1x per uurgemiddelde stroming (sterkte en richting) te meten
- Golven, druksensor 2.000 euro per stuk (zonder logger)
 - Circa 25 cm onder waterspiegel
 - Programmeren om 1x per uur druk met frequentie van 5 hertz voor 5 min te meten
- Zwevend slib sensor, OBS 16.000 euro (8 kEuro per stuk (zonder logger))
 - Veldkalibratie OBS 3.000 euro (zie ook survey)
 - Circa 25 cm onder waterspiegel
 - Circa 25 cm van de bodem
- Temperatuur (ter referentie) 2 x 200 euro
 - Circa 25 cm onder waterspiegel
- Circa 25 cm van de bodem
- Lichtfluxmeting met twee sensoren op vaste verticale afstand
 - bijvoorbeeld 2x LiCor (LI-192) 2x 600 euro
- Logger en software 15.000 euro
- Solar voeding 5.000 euro
- Meteo KNMI
- Installatie meetapparatuur 12.000 euro
- Service (OBS heeft wiper) 6 x 1.500 euro = 9000 euro
- Monitoren en rapportage 15.000 euro (3 maanden)
- Ontmantelen 2.000 euro

Kosten **meetpaal 1:** **~108 kEuro**

Optionele **meetpaal 2** (minder parameters)

- Frame 4.000 euro per stuk
 - Montage ter plaatse 800 euro per stuk (1 mandag)
 - Plaatsing 1.000 euro per stuk (2 man ½ dag, incl. boot)
- Stroming, 1x ADV (Vector) 20.000 euro per stuk (met batterij, zonder logger)
 - 1x per meetpaal, circa 25 cm van de bodem
- Zwevend slib sensor, 1x OBS 8.000 euro per stuk (zonder logger) (1 diepte)
 - Kalibratie OBS 1.500 euro
 - Circa 25 cm van waterbodem
- Logger en software 10.000 euro
- Solar voeding 5.000 euro
- Meteo, KNMI
- Installatie meetapparatuur 6.000 euro
- Service 6x 500 euro (icm 1^e meetpaal)
- Monitoren en rapportage 12.500 euro
- Ontmantelen 2.000 euro

Kosten optionele **meetpaal 2:** **~ 75 kEuro**

Ter verdere aanscherping: afweging tussen stromingsmeters en spectrale lichtmeters.



Figuur B.8 ADV met batterijhuis op het meetframe.



Figuur B.9 Drukopnemer op de meetpaal.

B.4.3 Survey's

Meten, frequentie:

- Bathymetrie en rond luwtestructuur. Elke maand (3x totaal), vraag is wat dit oplevert qua meetbare resultaten
- bodemsamenstelling (organisch stofgehalte en korrelgrootte verdeling toplaag overwegen), vraag is wat dit oplevert qua meetbare resultaten
- Samenstelling opp. water (zwevend slib). Minimaal elke twee weken (6x).
 - 2 locaties 2 dieptes
 - Lab analyses korrelgrootte
- Doorzicht (secchi disk) en Kd (lichtflux metingen). Elke week, grid uitzetten
- Algen, DOC en zwevend stof. Elke week
 - chemische analyse in lab

Kostenschatting:

○ Bathymetrie rond luwtestructuur	7.500 euro per keer, 22.500 euro
○ Bodemsamenstelling	pm
○ Samenstelling opp. water (zwevend slib),	1.500 euro per keer, 9.000 euro
○ 2 locaties 2 dieptes	
○ Lab analyses korrelgrootte	4x 250 euro, 1.000 euro
○ Doorzicht (secchi disk) en lichtflux metingen	12 x 750 euro, 9.000 euro
○ Lichtfluxmeter.	1x LiCor (LI-192) 600 euro
○ <u>Algen, DOC en zwevend stof</u>	<u>Waternet?</u>
Totaal kosten survey	~42 kEuro

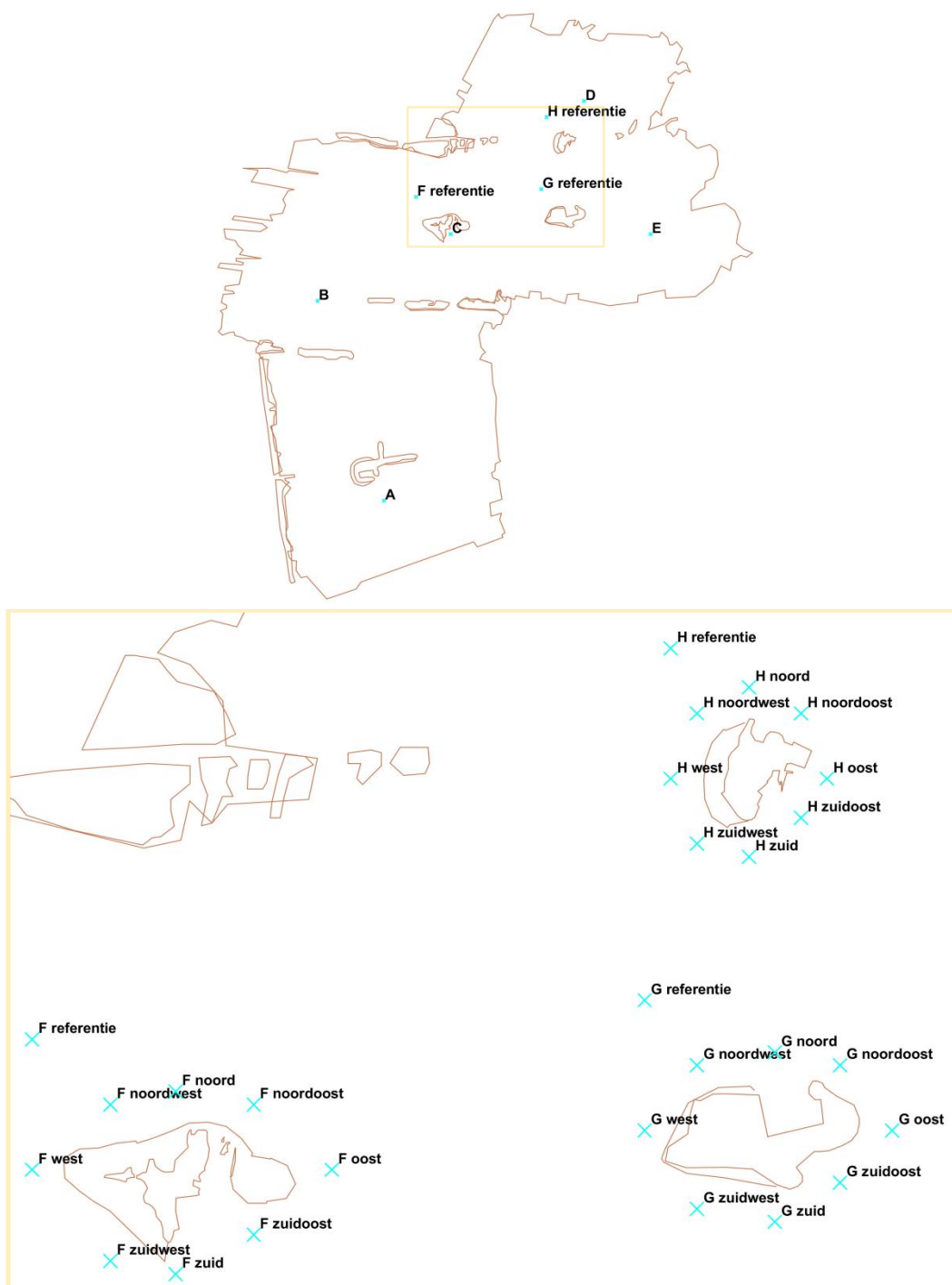
B.4.4 Totale kostenschatting monitoring effectiviteit luwtemaatregel

- Met 2 meetpalen en survey's: **225 kEuro**
- Met 1 meetpaal en survey's: **150 kEuro**

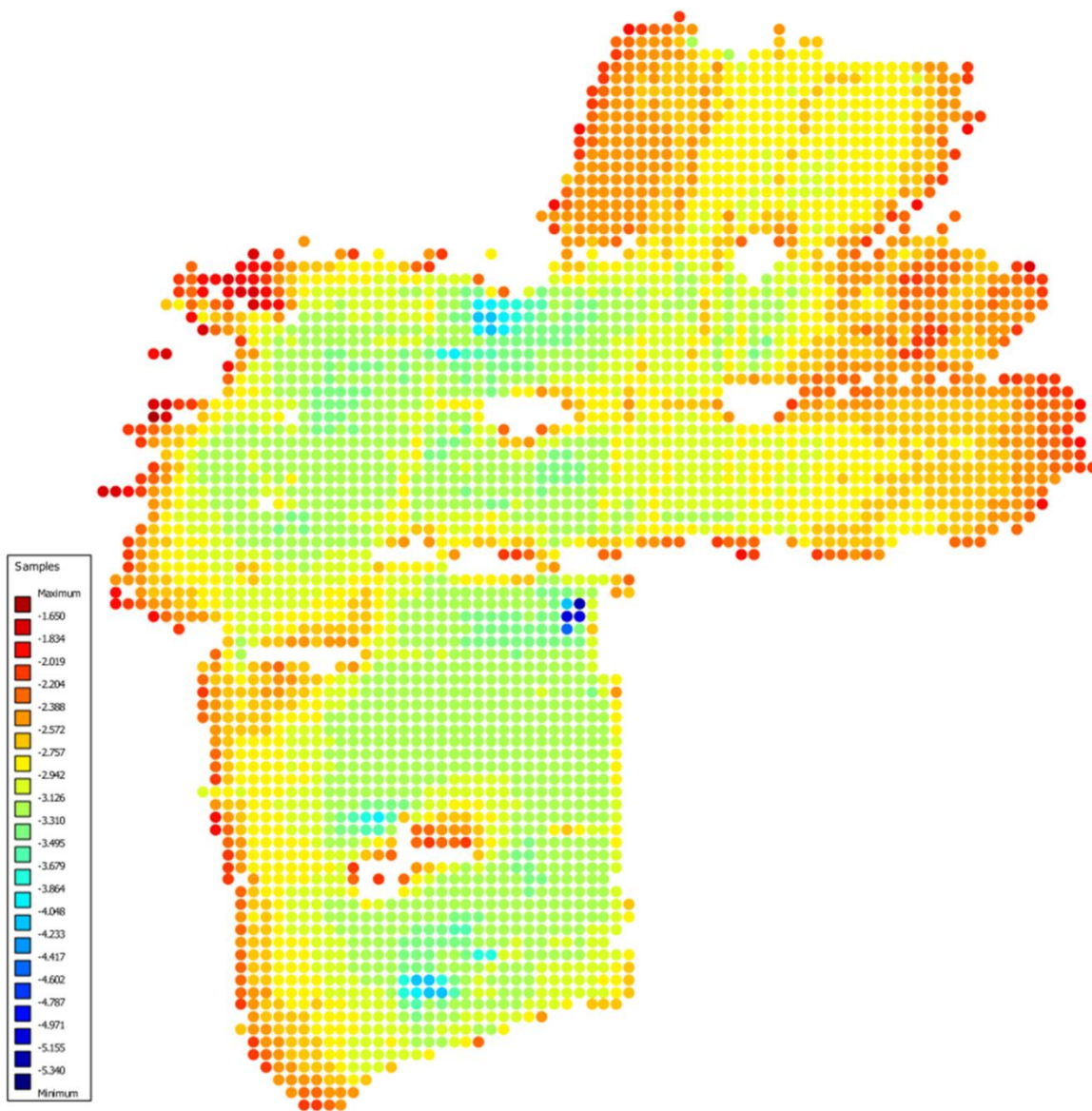
B.5 Referenties

- [1] Rob Uittenbogaard, Ellis Penning en Marnix van der Vat, Bijdrage MER - Verdiepingen Loosdrechtse Plassen - Expertbijdrage over zwevend stofhuishouding en onderwater lichtklimaat, WL | Delft Hydraulics rapport Q4461.04, 2008.
- [2] Ellis Penning, Menno Genseberger, Rob Uittenbogaard en Gerben van Geest, Aanvullingen bij Besluit-MER verdiepingen Loosdrechtse Plassen, Deltares rapport Q4700, 2009.
- [3] W. E. Penning, 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
- [4] W. E. Penning, 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* 710 (1), pp. 279-295, 2013. DOI 10.1007/s10750-012-1026-z
- [5] Thomas Vijverberg, Roel Knoben en Pascal Boderie, Resultaten Veldexperiment Luwtestructuur - Invulling kennisleemten en beantwoording onderzoeksvragen, HaskoningDHV rapport 9V6742.A2, 2013.
- [6] Kennissite van het Onderzoeksprogramma Natuurlijk(er) Markermeer-IJmeer (NMIJ): <https://kennis.markermeerijmeer.nl>
- [7] Gerlinde Roskam, Resultaten experimenten Loosdrecht, Deltares memo 11201773-003-ZWS-0003, 2019.
- [8] Malou van Meer en Yvonne Roijendijk, Verkennend en beschrijvend waterbodemonderzoek (inclusief asbestonderzoek) in de Loosdrechtse Plassen, Tauw rapport R001-1263469MVM-V04-tsz-NL, 2018.
- [9] Malou van Meer, Veld- en analysegegevens Loosdrechtse Plassen ten behoeve van slibmodel Deltares, Tauw brief L001-1263469MVM-V02-nja-NL, 2018.
- [10] Hans Hussem, Inmeting 2017, te baggeren volumes, Loosdrechtse Plassen, memo Hussem Consultancy, 24 januari 2017.
- [11] Van Kessel, de Boer en Boderie. Calibration Calibration suspended sediment model Markermeer, 2008. Deltares raport 120048.

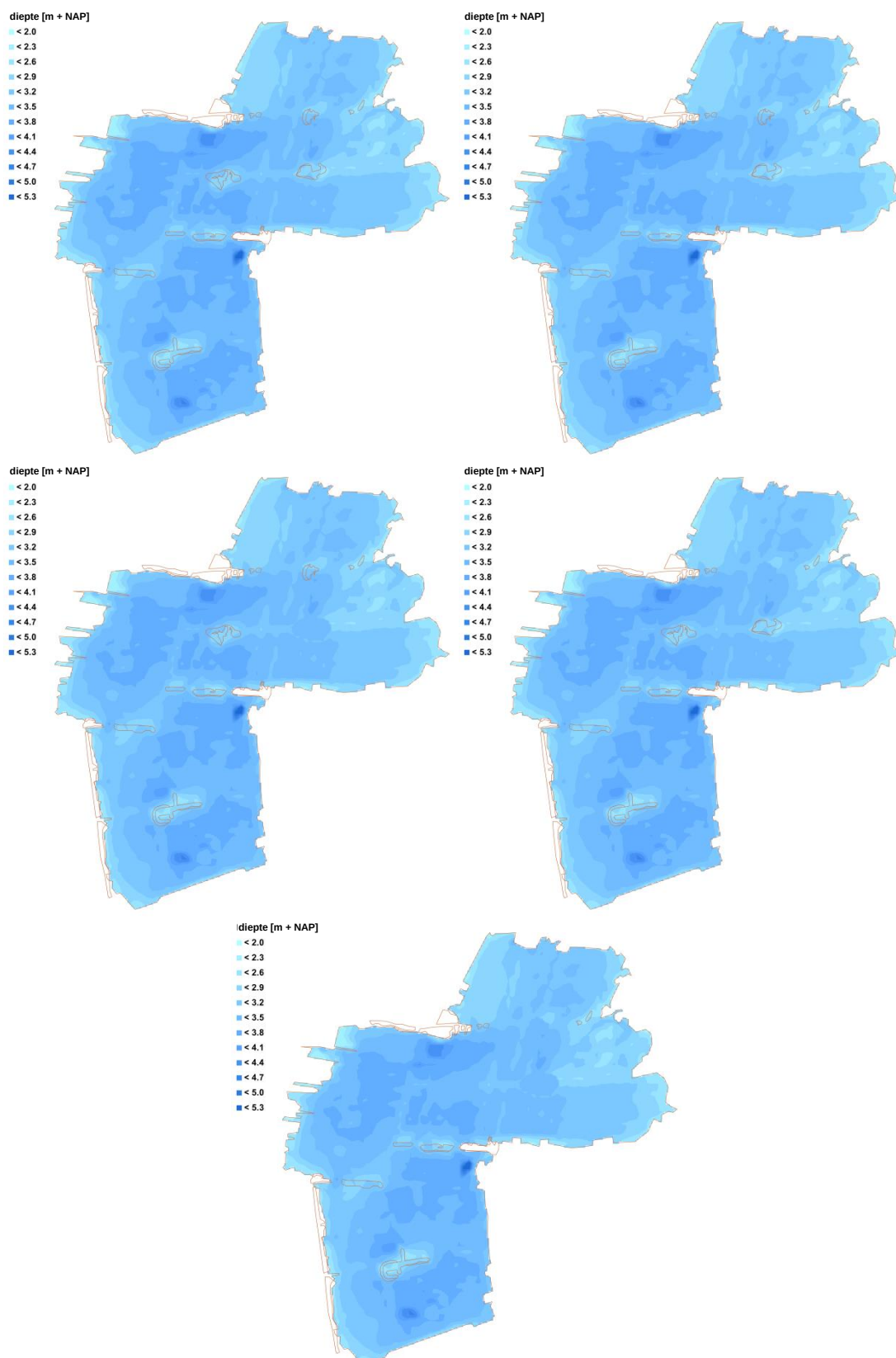
C Modelopzet



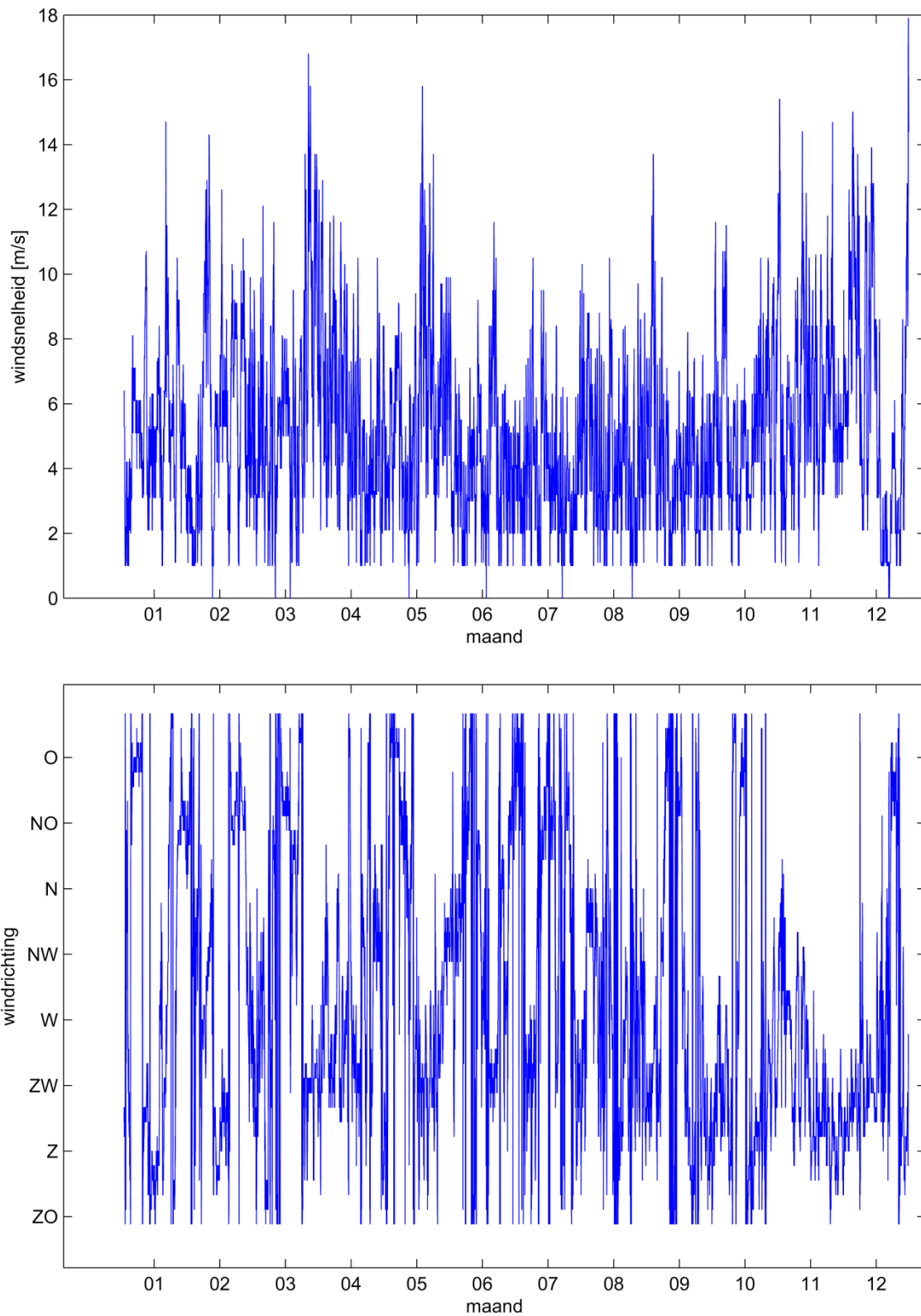
Figuur C.1 In slibmodel gebruikte observatiepunten voor tijdseries (boven: gehele gebied, onder: oranje uitsnede uit gehele gebied met observatiepunten rondom drie beschouwde eilanden in scenario 1 t/m scenario 4, observatiepunten F liggen bij eiland Hoek, G bij eiland Markus Pos en H bij eiland Robinson Crusoe).



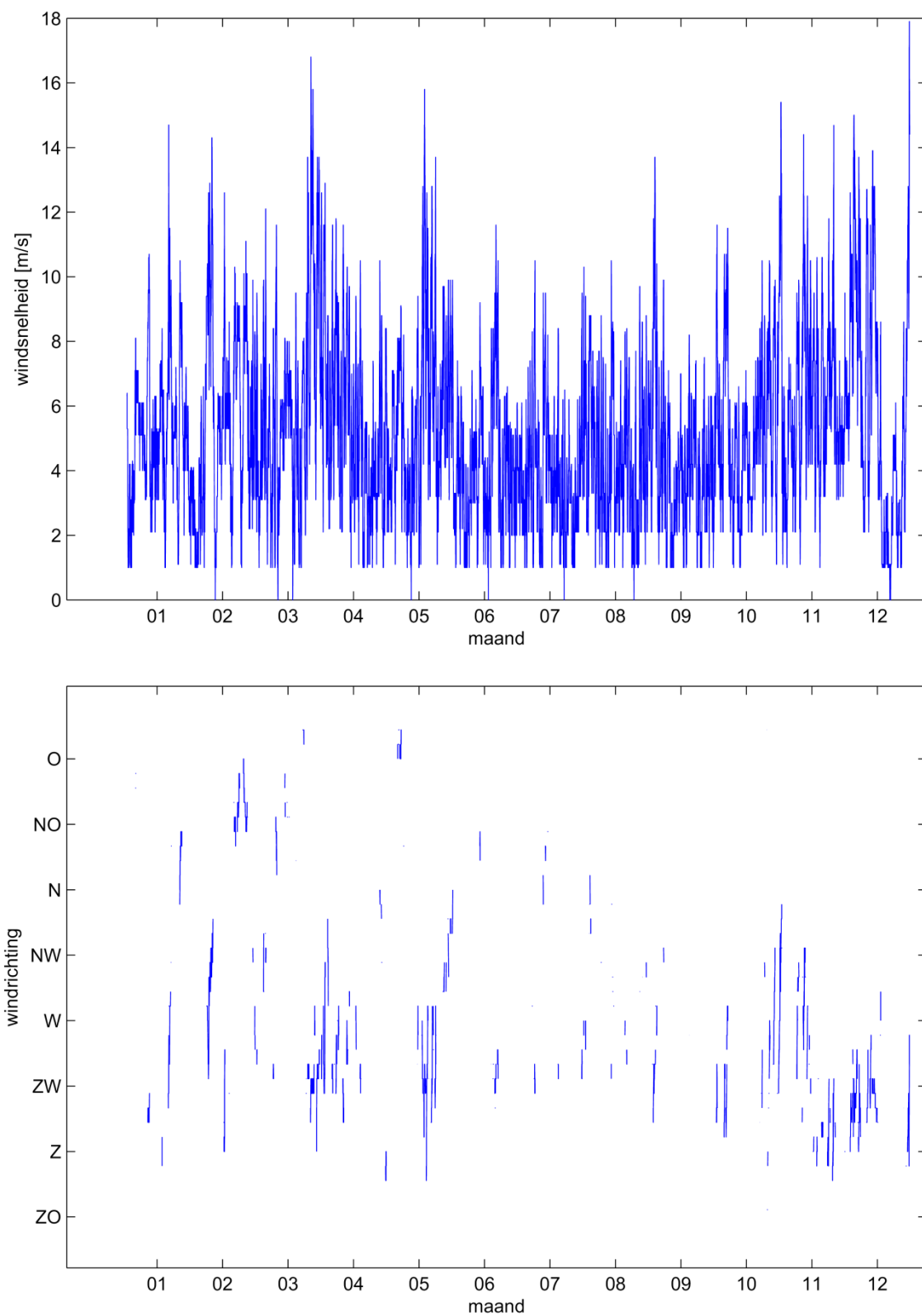
Figuur C.2 Voor ruimtelijk variërende diepte gebruikte samples van metingen GEO-XYZ uit 2016 (in meters t.o.v. NAP), hierop is een uniforme correctie van 30 cm toegepast.



Figuur C.3 In slibmodel gebruikte diepte (in meters t.o.v. NAP) voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 4.



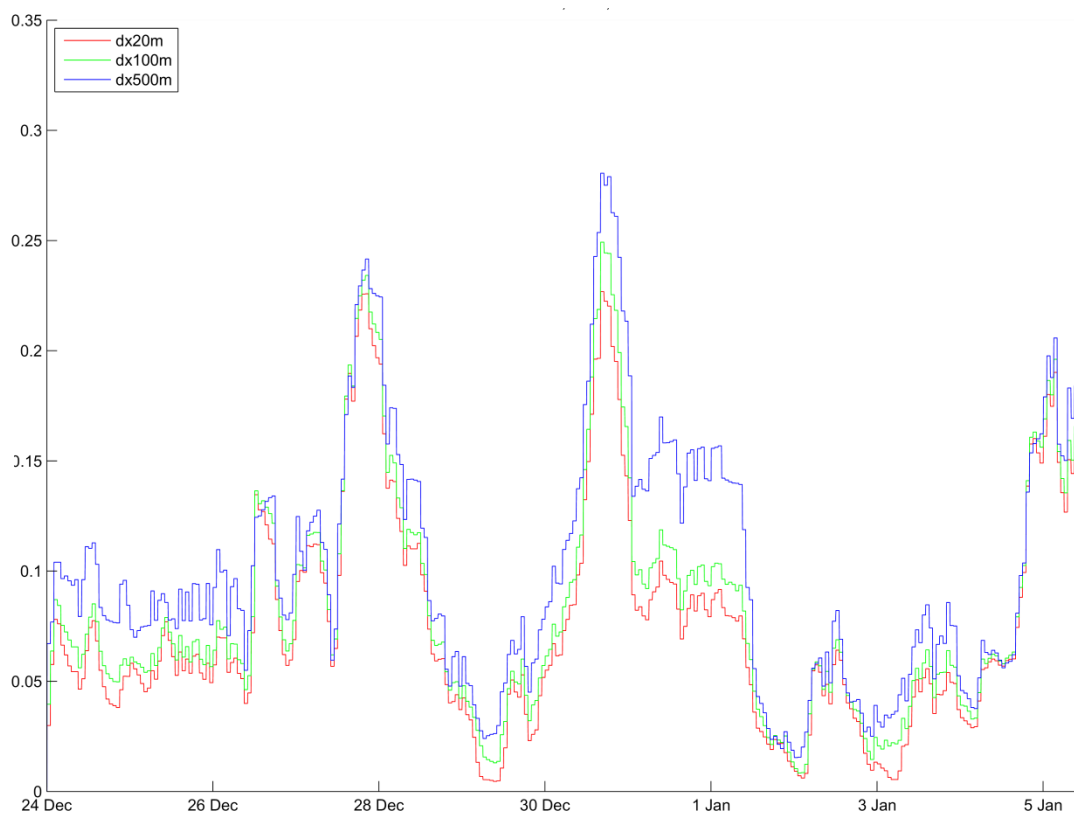
Figuur C.4 Gebruikte tijdserie over gehele jaar 2006 voor windforcering van slibmodel (boven: windsnelheid, onder: windrichting).



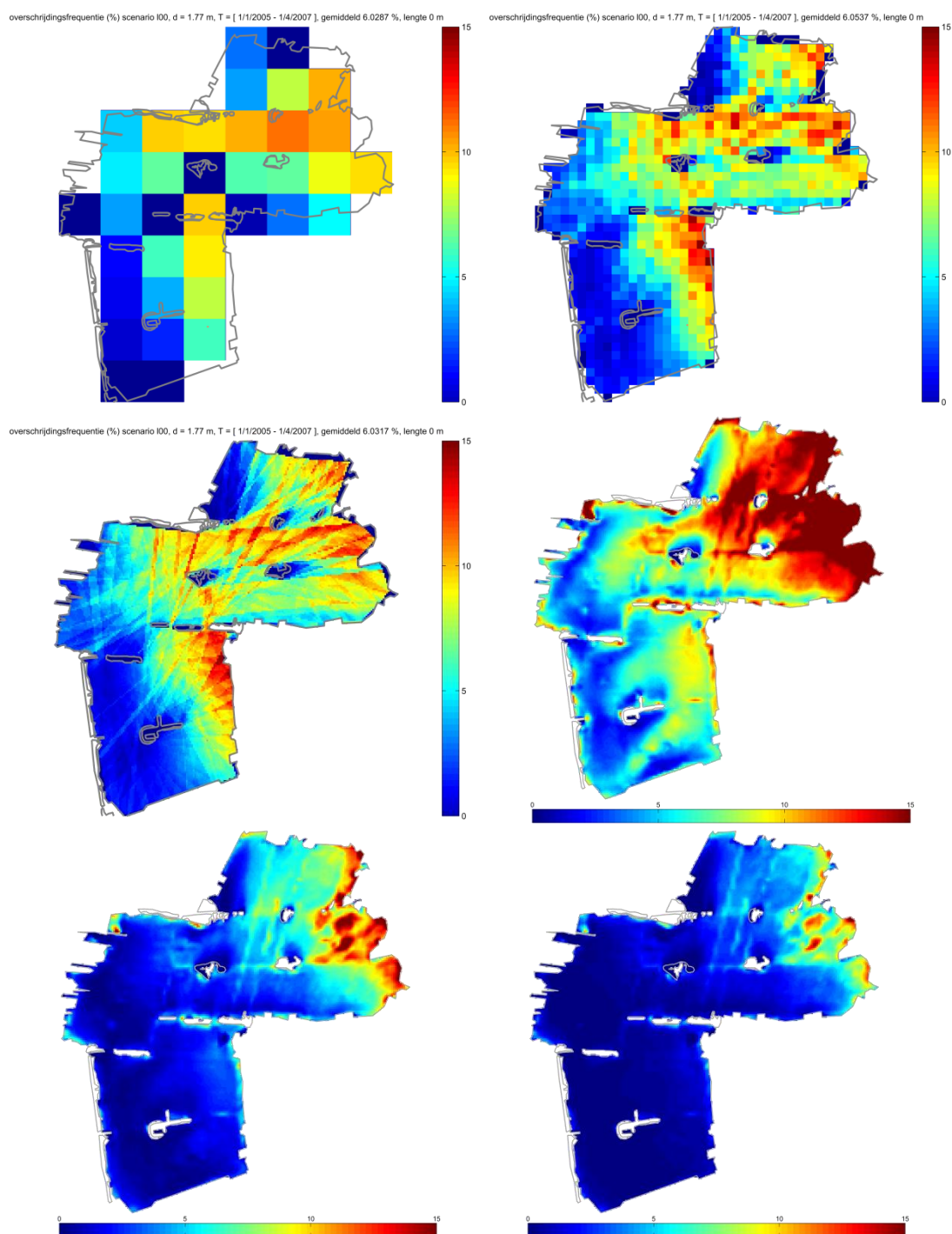
Figuur C.5 Gebruikte tijdserie over gehele jaar 2006 voor windforcering van slibmodel (boven: windsnelheid, onder: windrichting in het geval dat de windsnelheid minstens 8.0 m/s is).



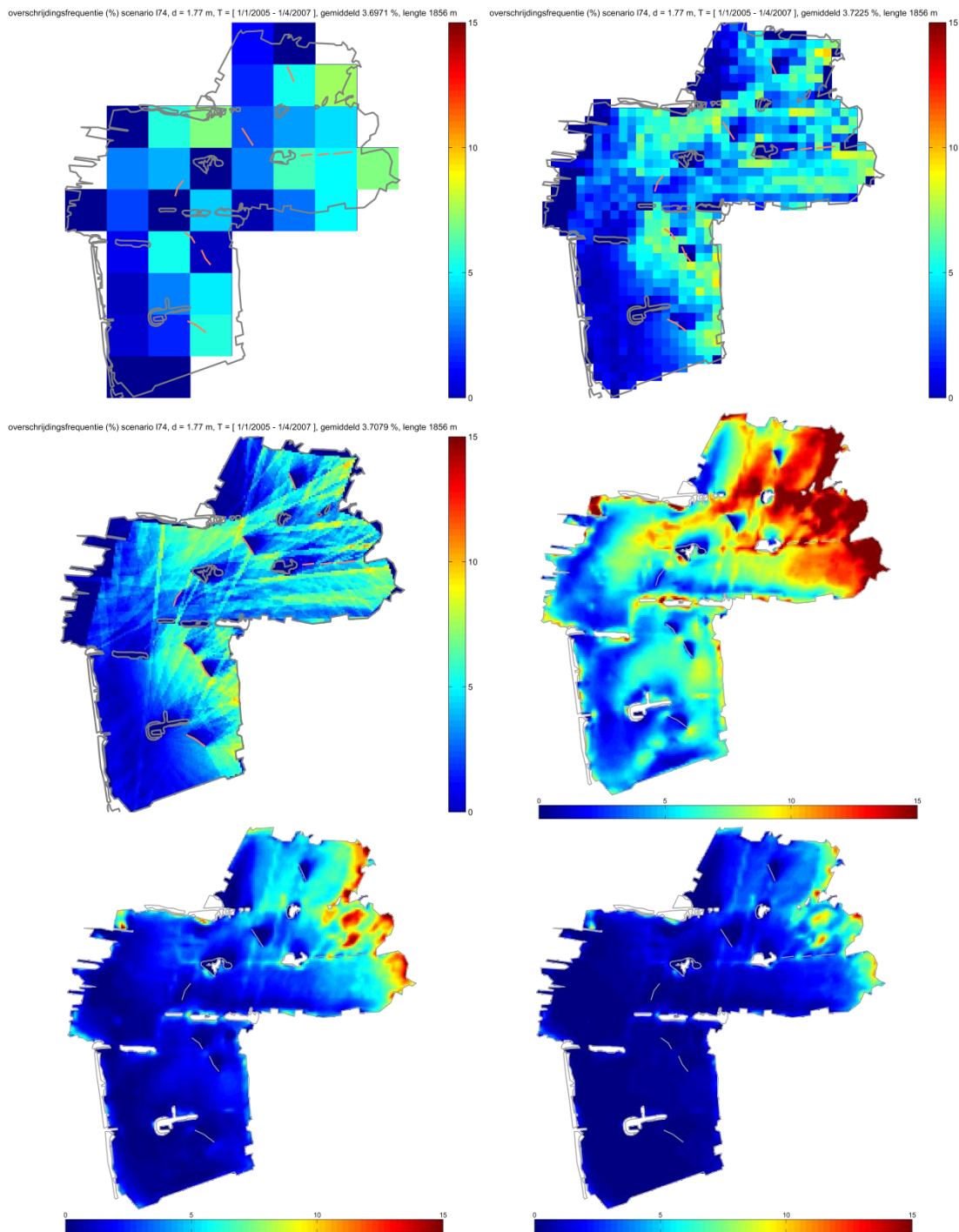
Figuur C.6 Voorbeeld voor observatiestation E van gebruikte modelresultaten voor waterstand (in meters t.o.v. NAP) voor nagaan van de benodigde rekestijdstap voor Delft3D-FLOW in slibmodel voor waterbeweging.



Figuur C.7 Voorbeeld voor observatiestation B van gebruikte modelresultaten voor significante golfhoogte (in meters) voor nagaan van de benodigde resolutie voor Delft3D-WAVE/SWAN in slibmodel voor golven.

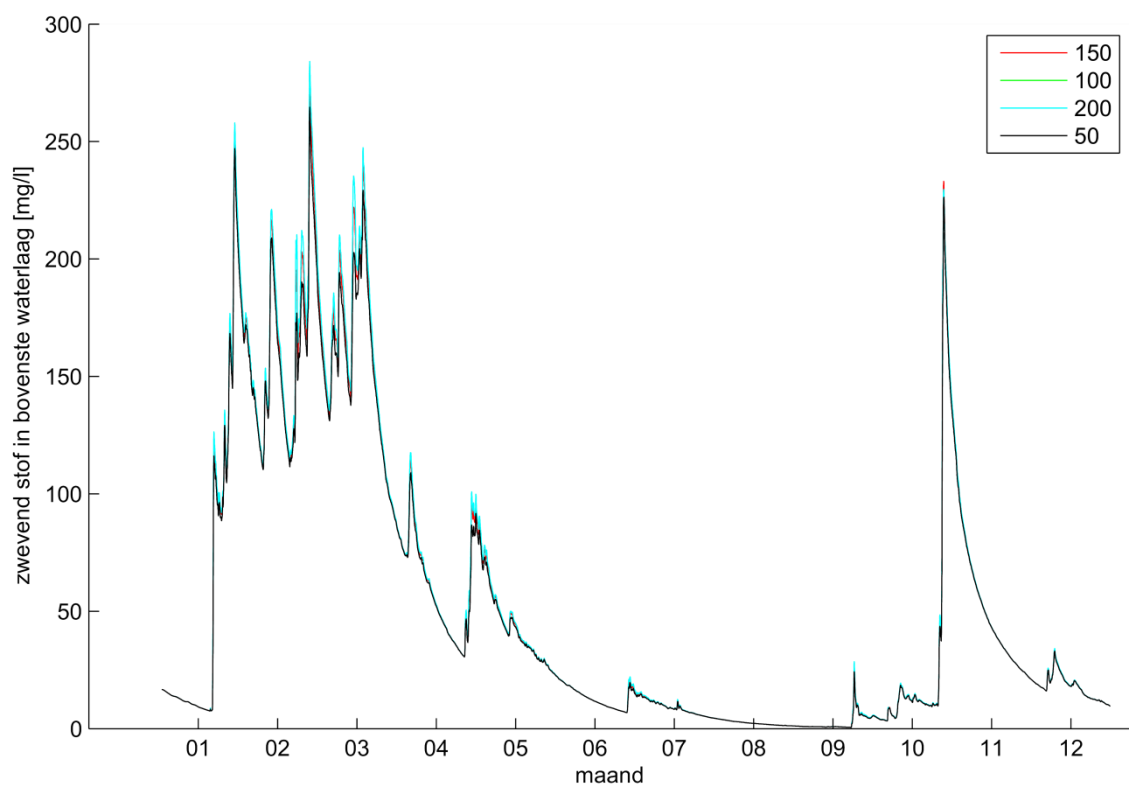


Figuur C.8 Ruimtelijke overschrijdingsfrequentie van bodemschuifspanning voor referentie berekend (van links naar rechts, van boven naar onder) met strijklengte aanpak bij grenswaarde van 0.1 Pa voor 500 m, 100 m en 20 m ruimtelijke roosterresolutie gemiddeld over 1-1-2005 tot 1-4-2007 en met slibmodel bij grenswaarde van 0.03 Pa, 0.1 Pa en 0.2 Pa gemiddeld over 1-1-2006 tot 1-1-2007.

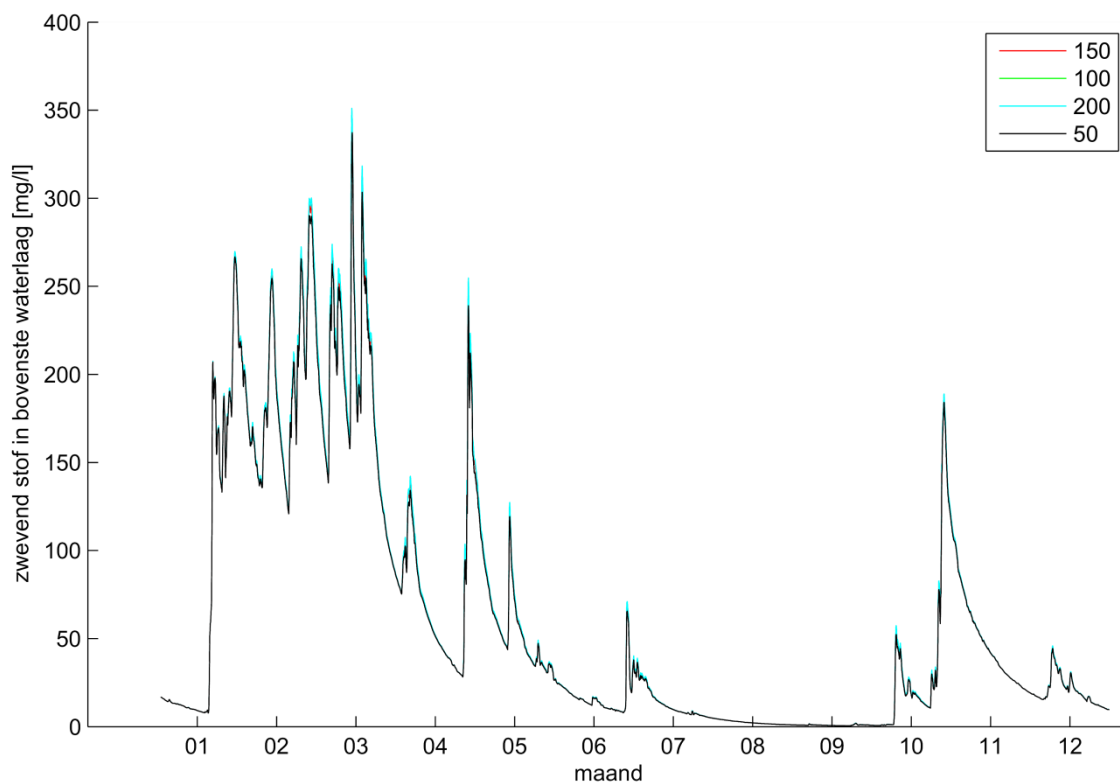


Figuur C.9 Ruimtelijke overschrijdingsfrequentie van bodemschuifspanning voor scenario 5 berekend (van links naar rechts, van boven naar onder) met strijklengte aanpak bij grenswaarde van 0.1 Pa voor 500 m, 100 m en 20 m ruimtelijke roosterresolutie gemiddeld over 1-1-2005 tot 1-4-2007 en met slibmodel bij grenswaarde van 0.03 Pa, 0.1 Pa en 0.2 Pa gemiddeld over 1-1-2006 tot 1-1-2007.

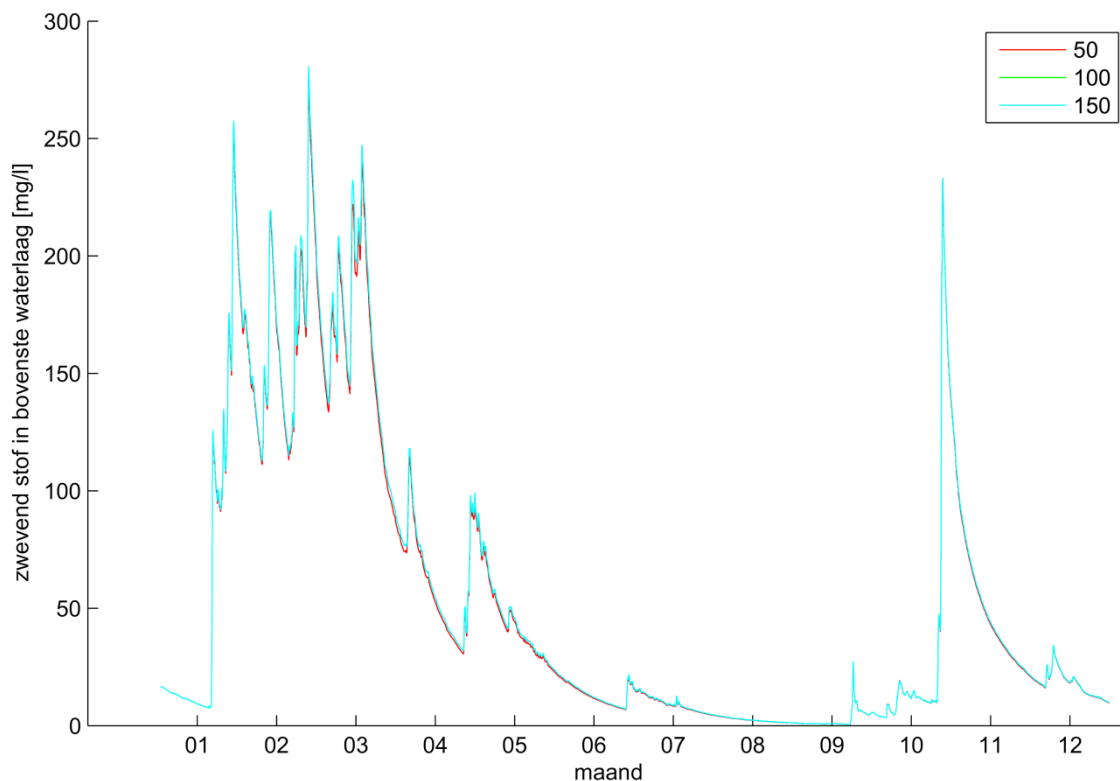
D Gevoeligheidsanalyse modelparameters



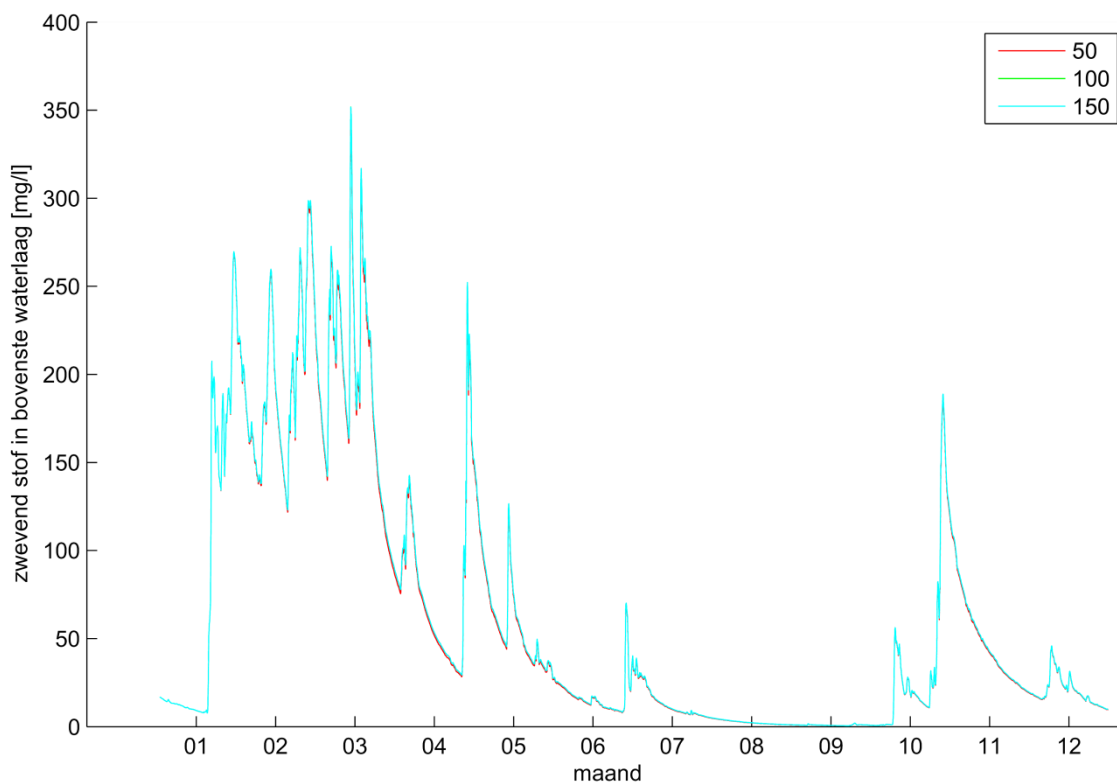
Figuur D.1 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter nulde orde resuspensie (M_0) flux zwevend stof fractie 1.



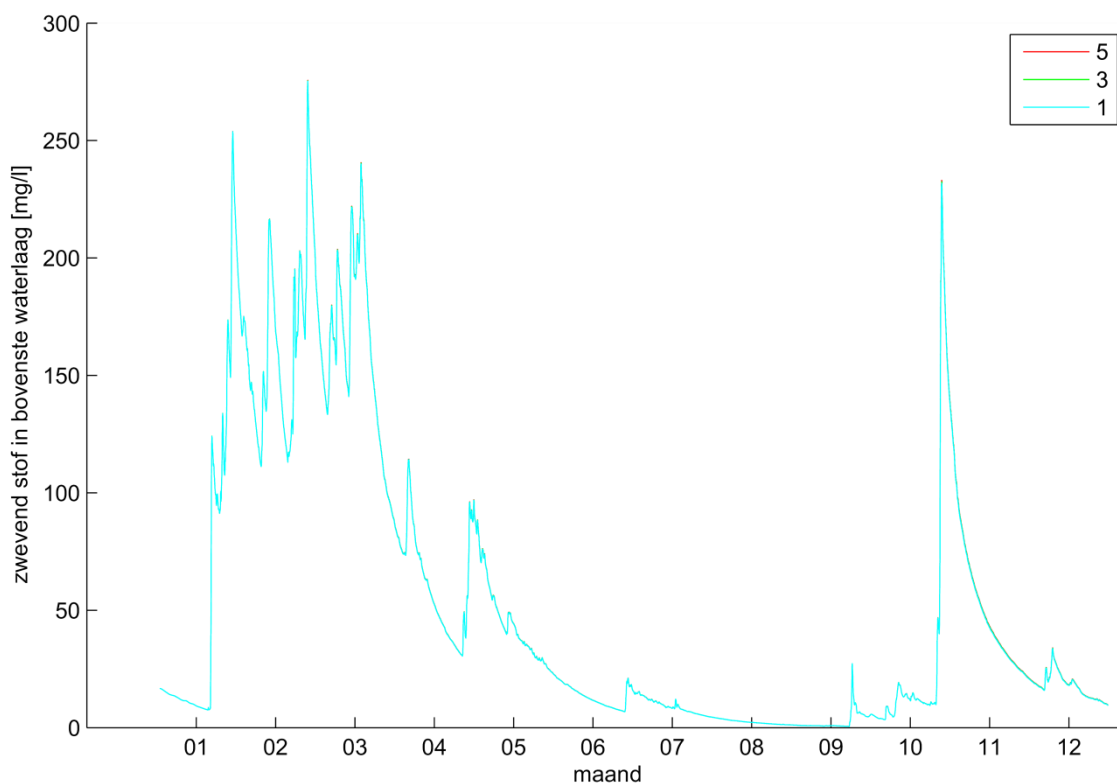
Figuur D.2 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter nulde orde resuspensie (M_0) flux zwevend stof fractie 1.



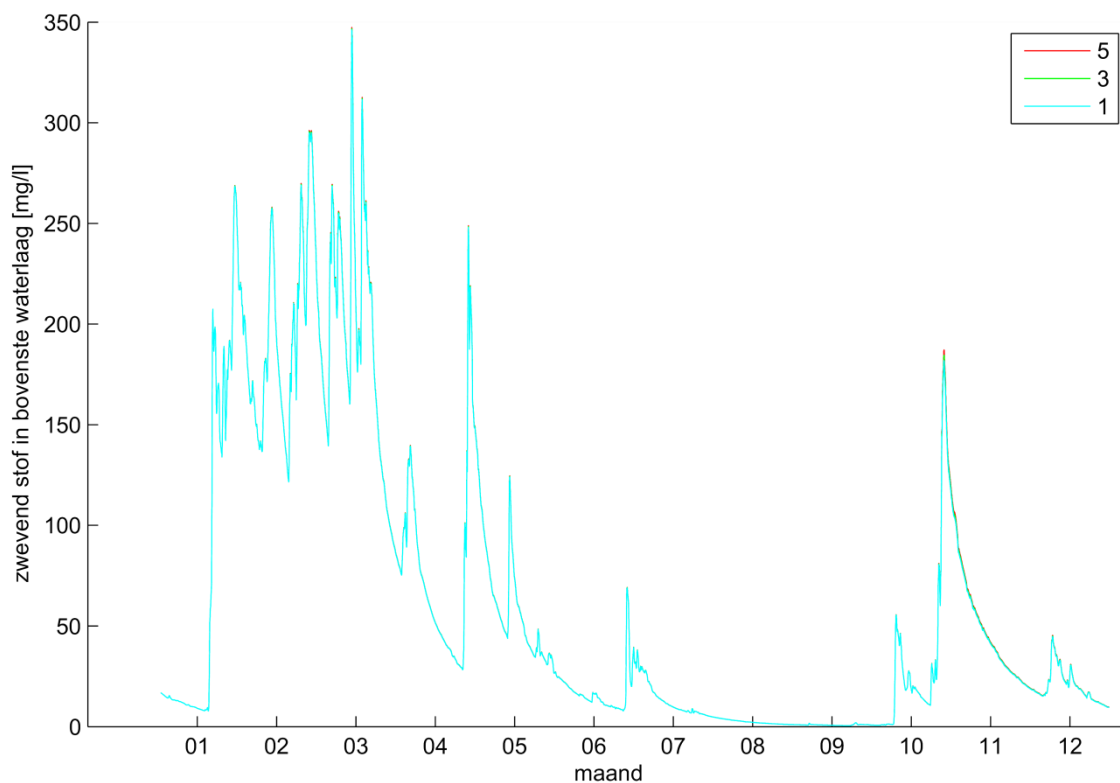
Figuur D.3 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter nulde orde resuspensie (M_0) flux zwevend stof fractie 2.



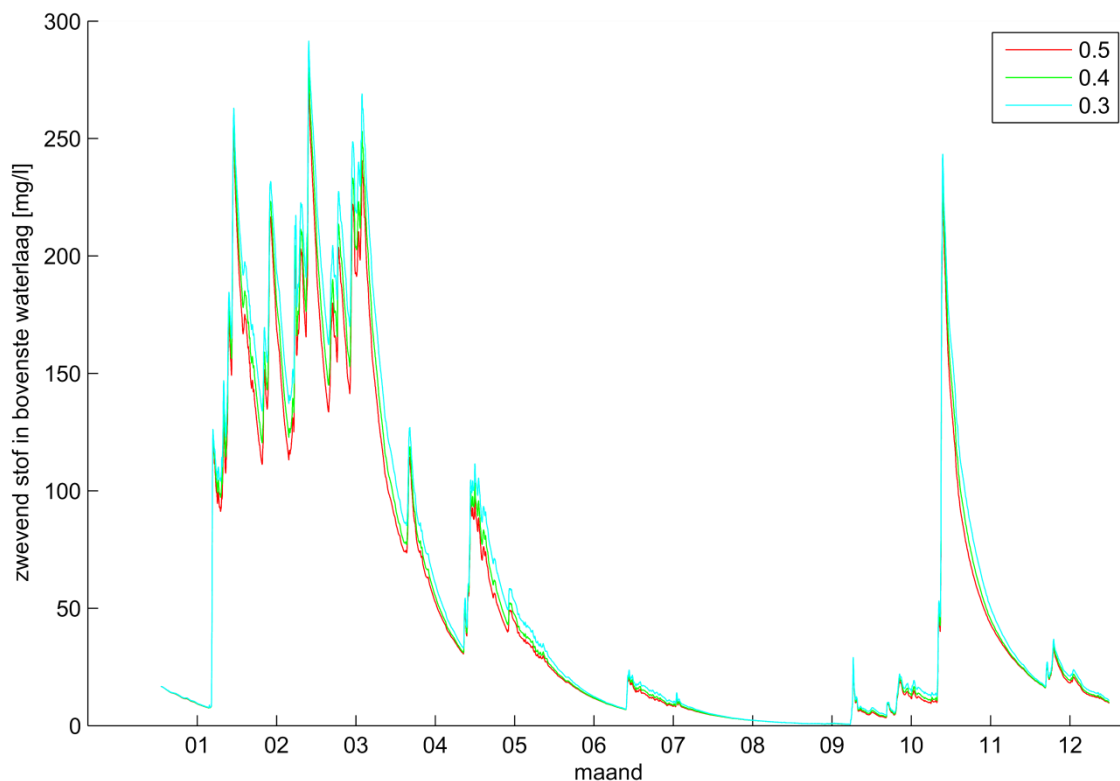
Figuur D.4 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter nulde orde resuspensie (M_0) flux zwevend stof fractie 2.



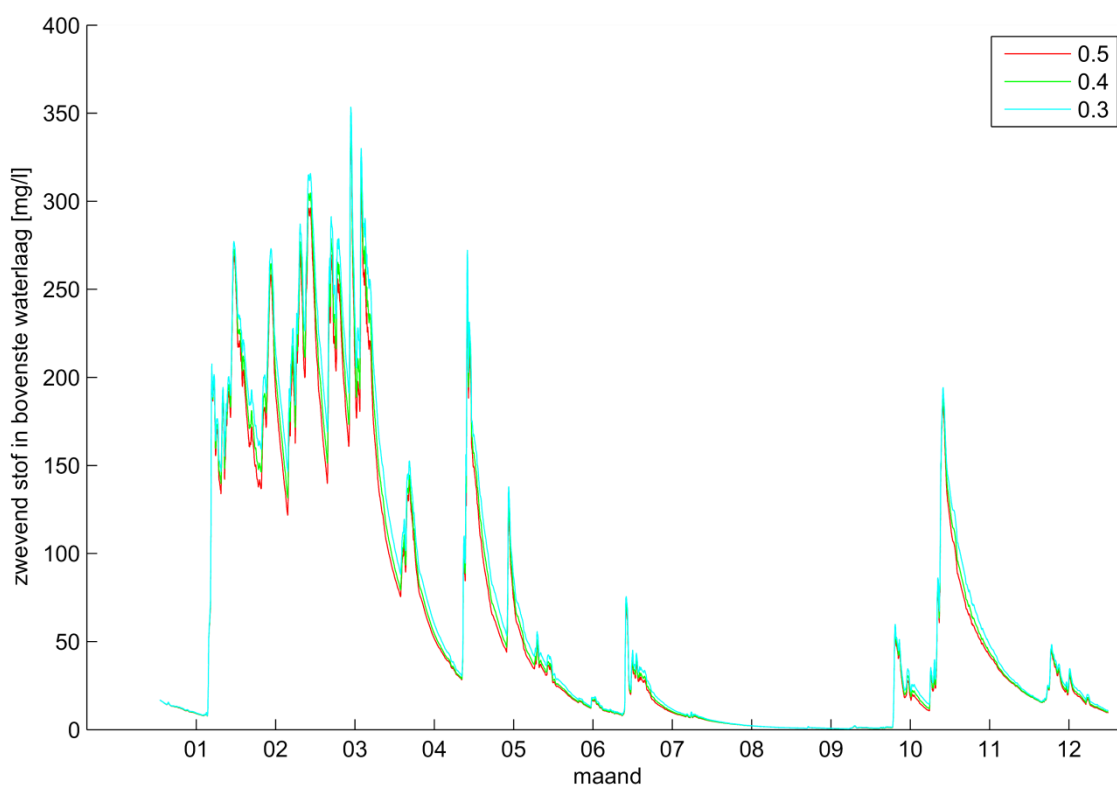
Figuur D.5 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter slibproductie (P).



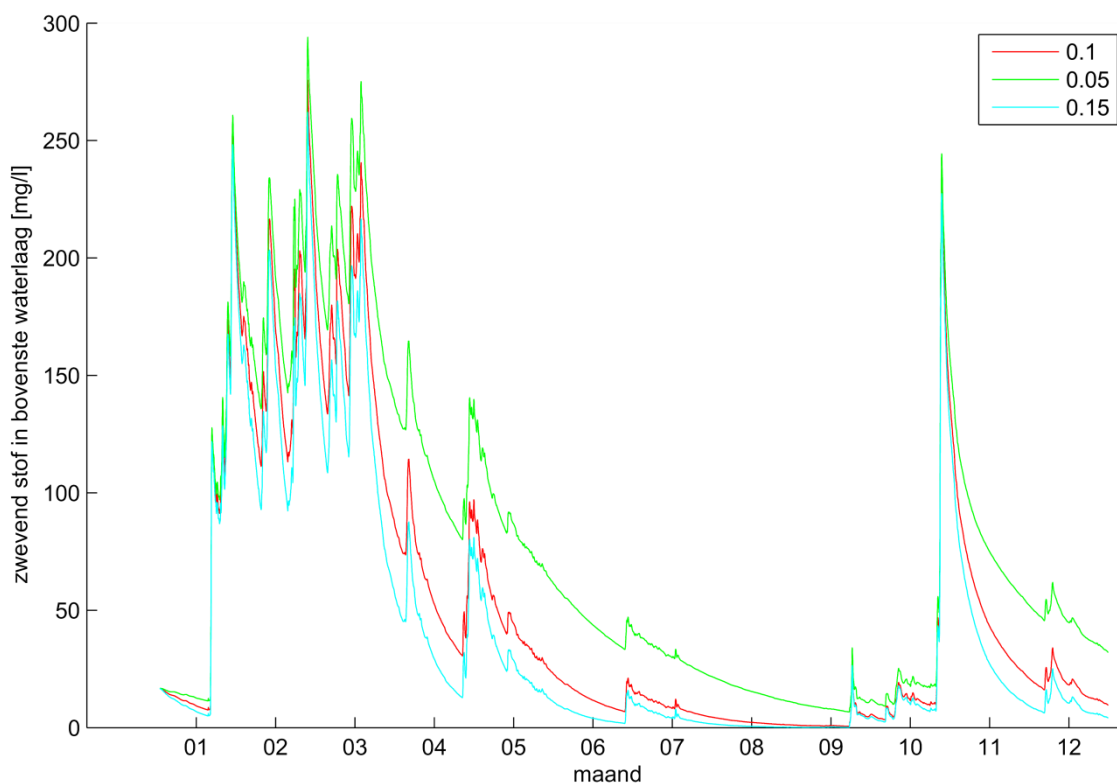
Figuur D.6 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter slibproductie (P).



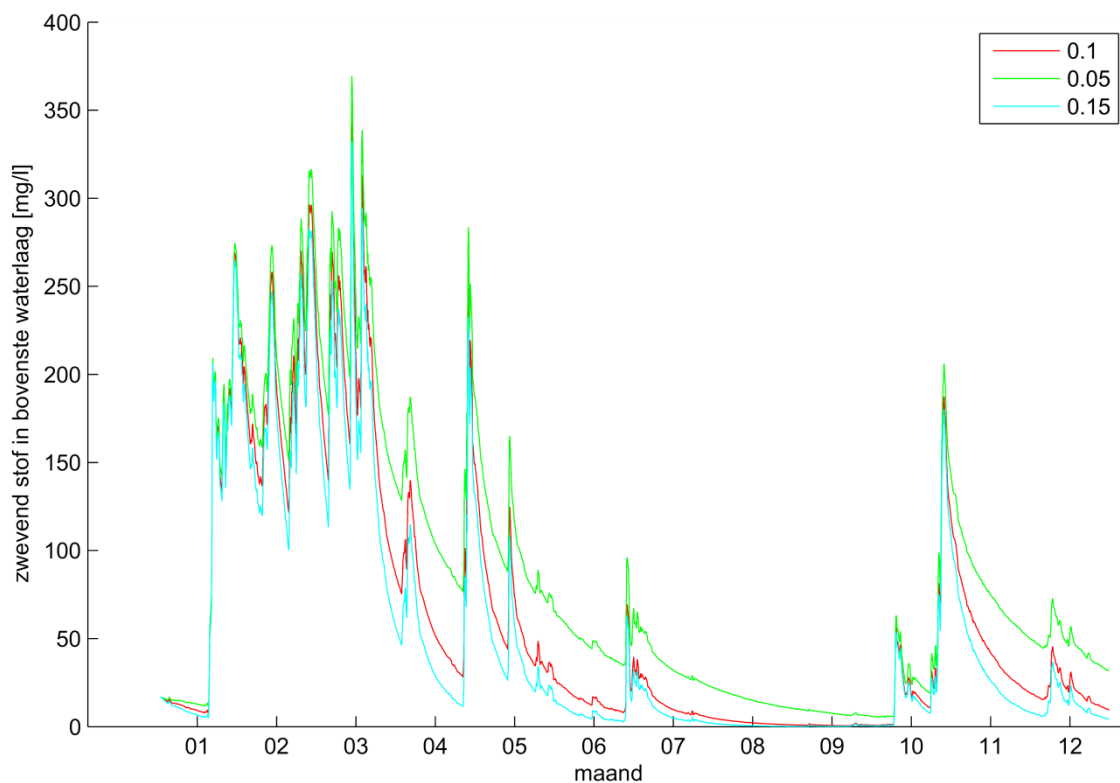
Figuur D.7 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter sedimentatie snelheid zwevend stof fractie 1 ($ws_{0.1}$)



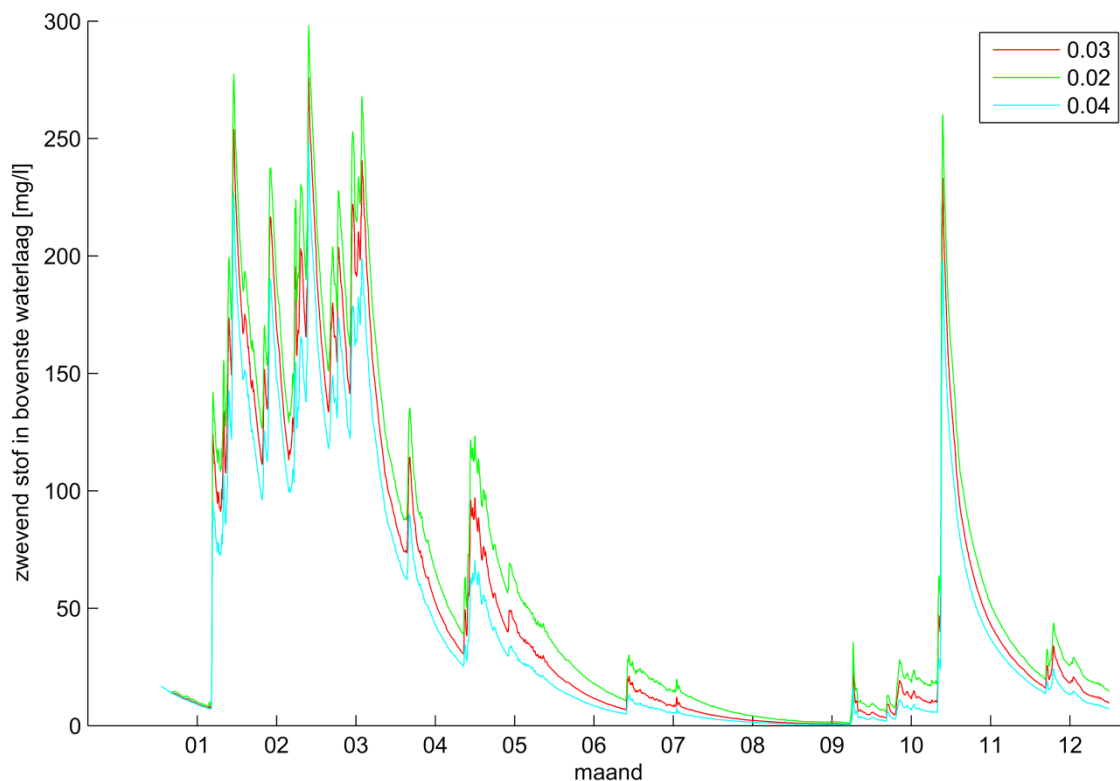
Figuur D.8 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter sedimentatie snelheid zwevend stof fractie 1 (ws_{01}).



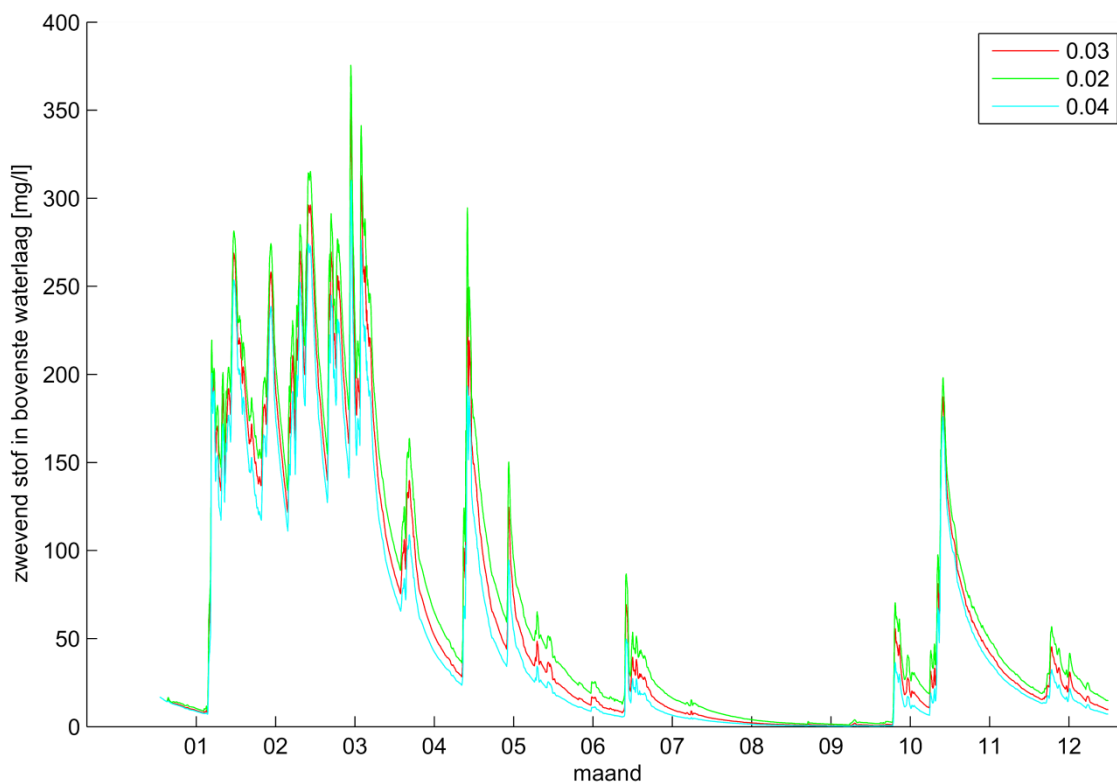
Figuur D.9 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter sedimentatie snelheid zwevend stof fractie 2 (ws_{02}).



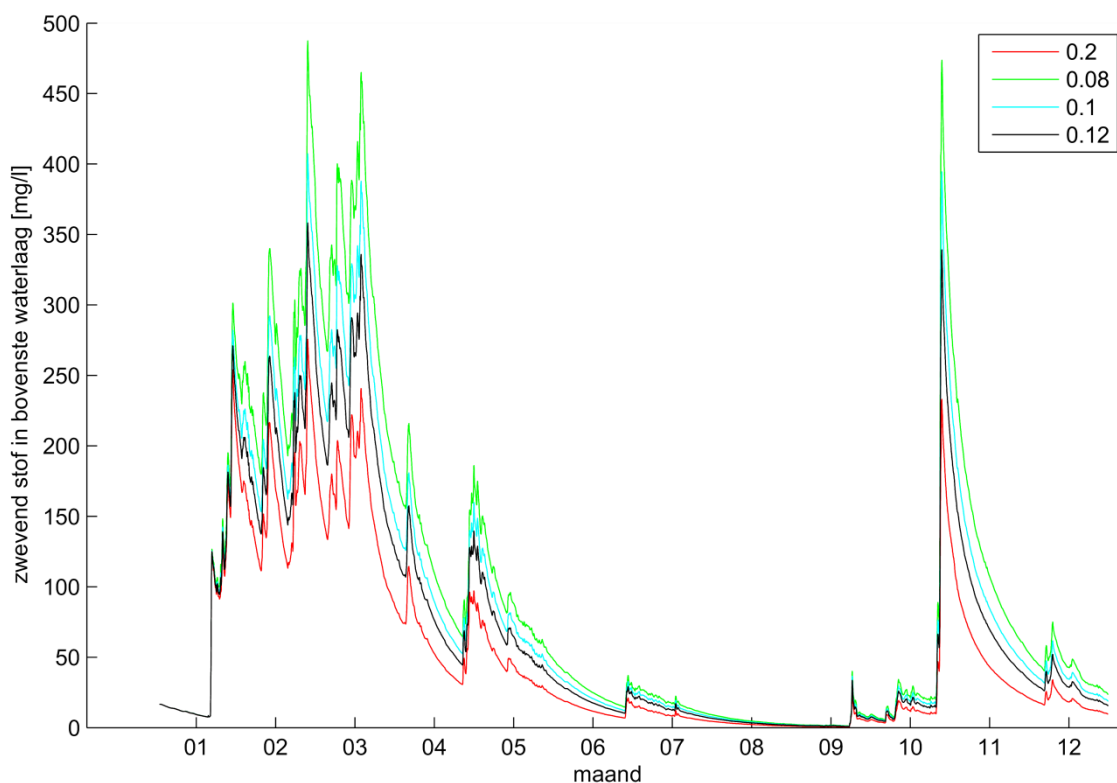
Figuur D.10 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter sedimentatie snelheid zwevend stof fractie 2 (ws_{02}).



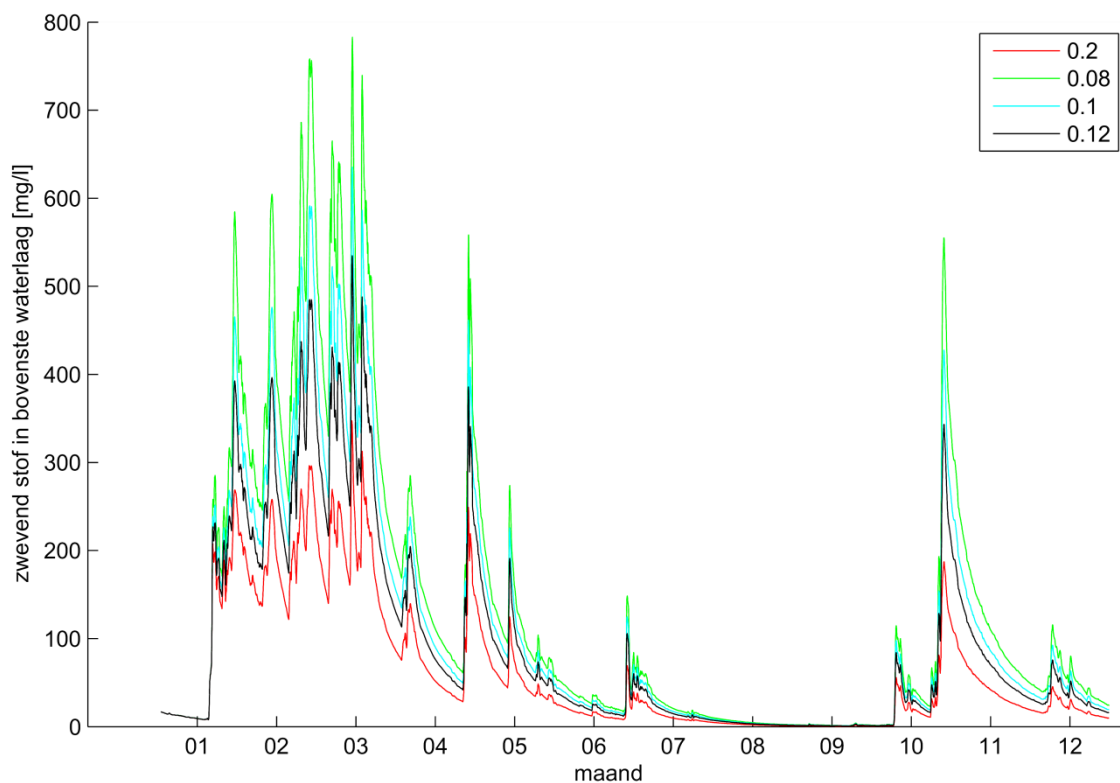
Figuur D.11 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter kritische bodemschuifspanning voor resuspensie S1 (τ_{c1}).



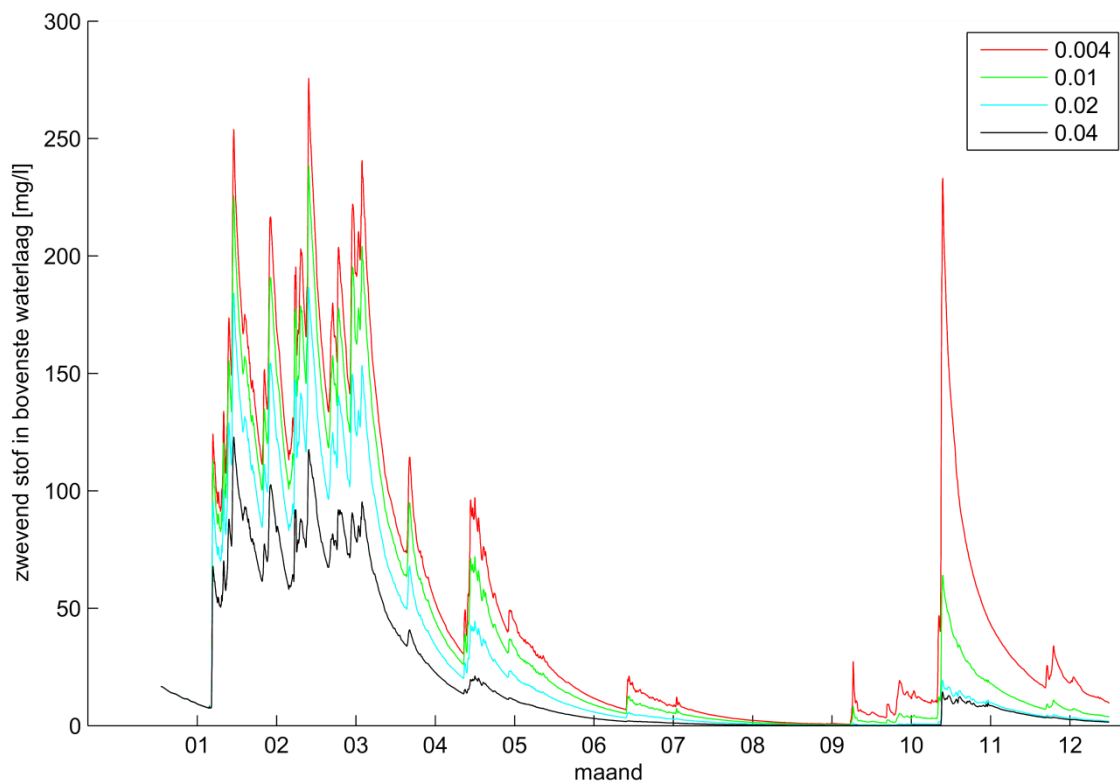
Figuur D.12 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter kritische bodemschuifspanning voor resuspensie S1 (τ_{c1}).



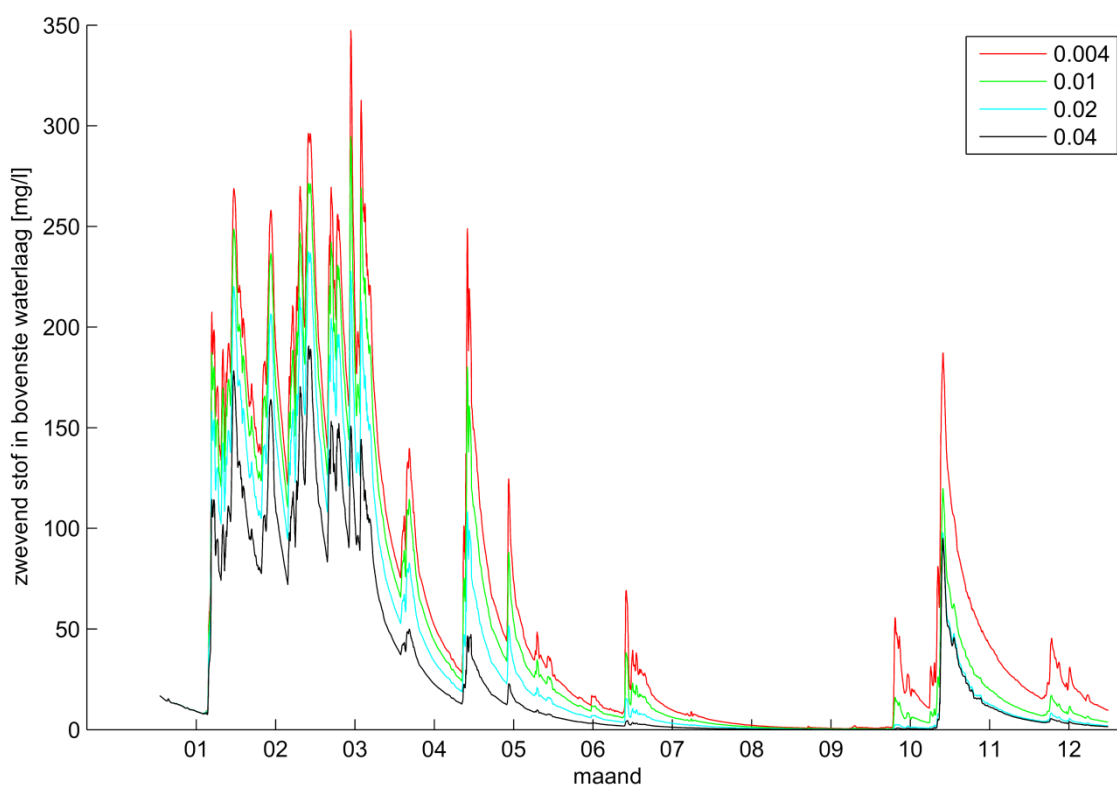
Figuur D.13 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter kritische bodemschuifspanning voor resuspensie S2 (τ_{c2}).



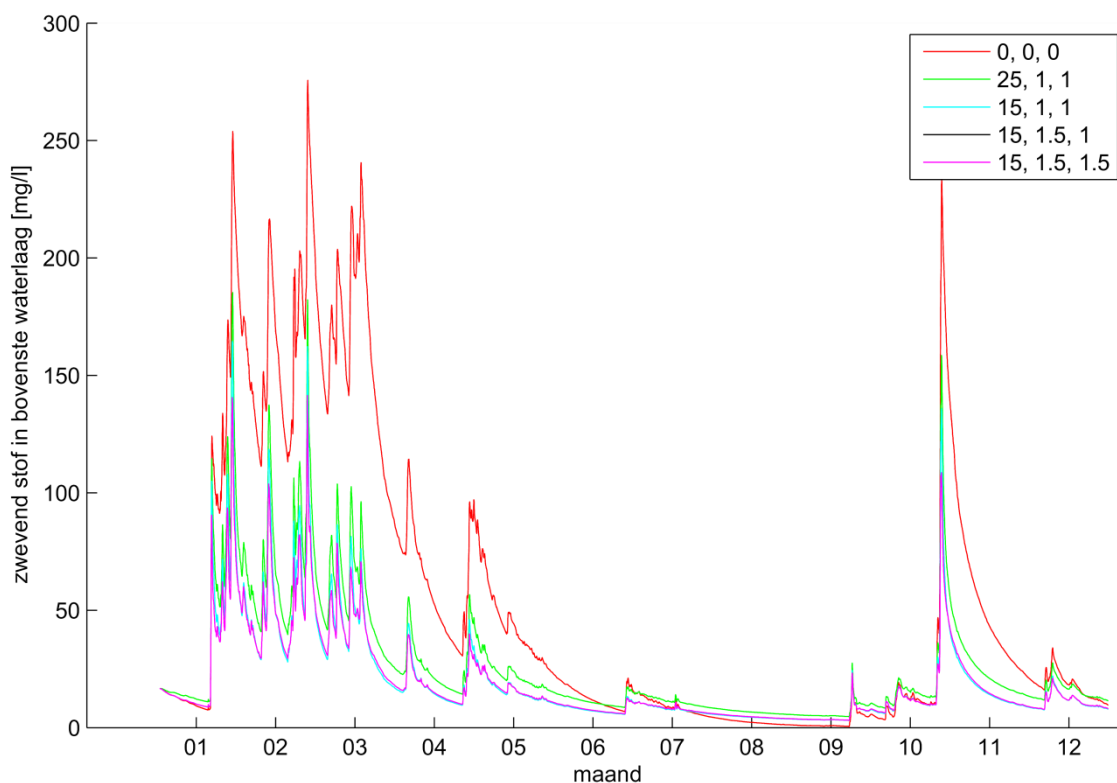
Figuur D.14 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter kritische bodemschuifspanning voor resuspensie S_2 (τ_{c2}).



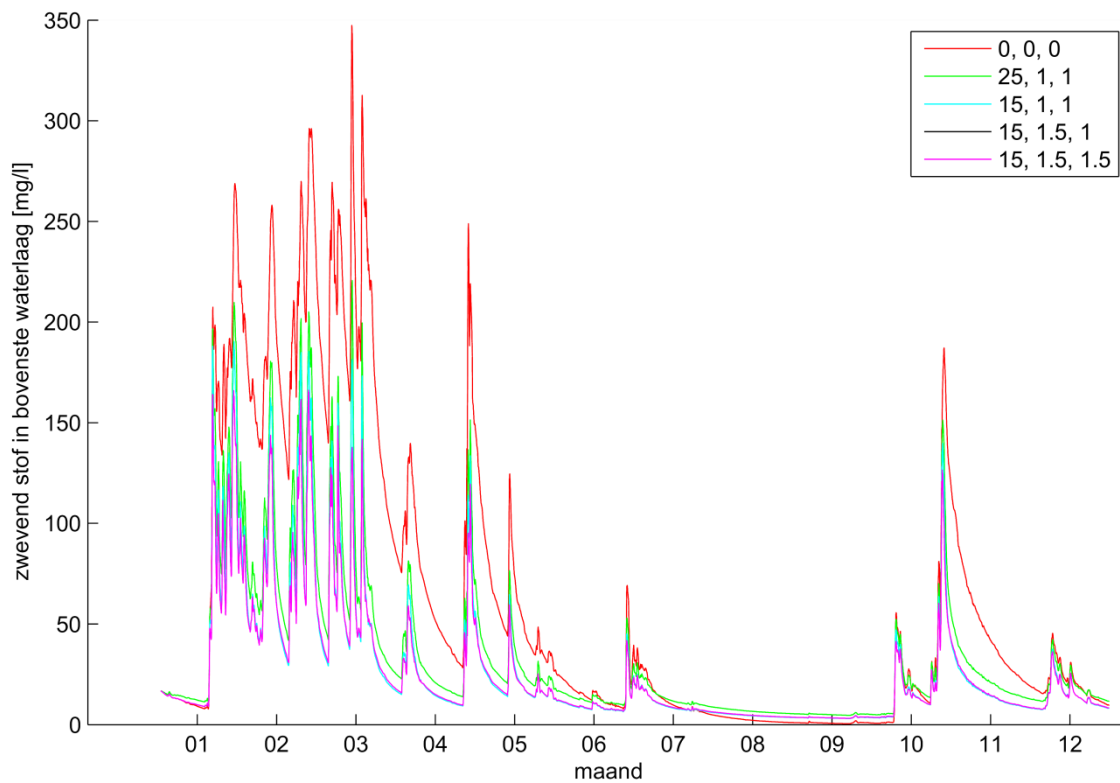
Figuur D.15 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter snelheidsconstante begraving S_1 naar S_2 (V_{bur}).



Figuur D.16 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in modelparameter snelheidsconstante begraving $S1$ naar $S2(V_{bur}, V_{BurDMS})$.

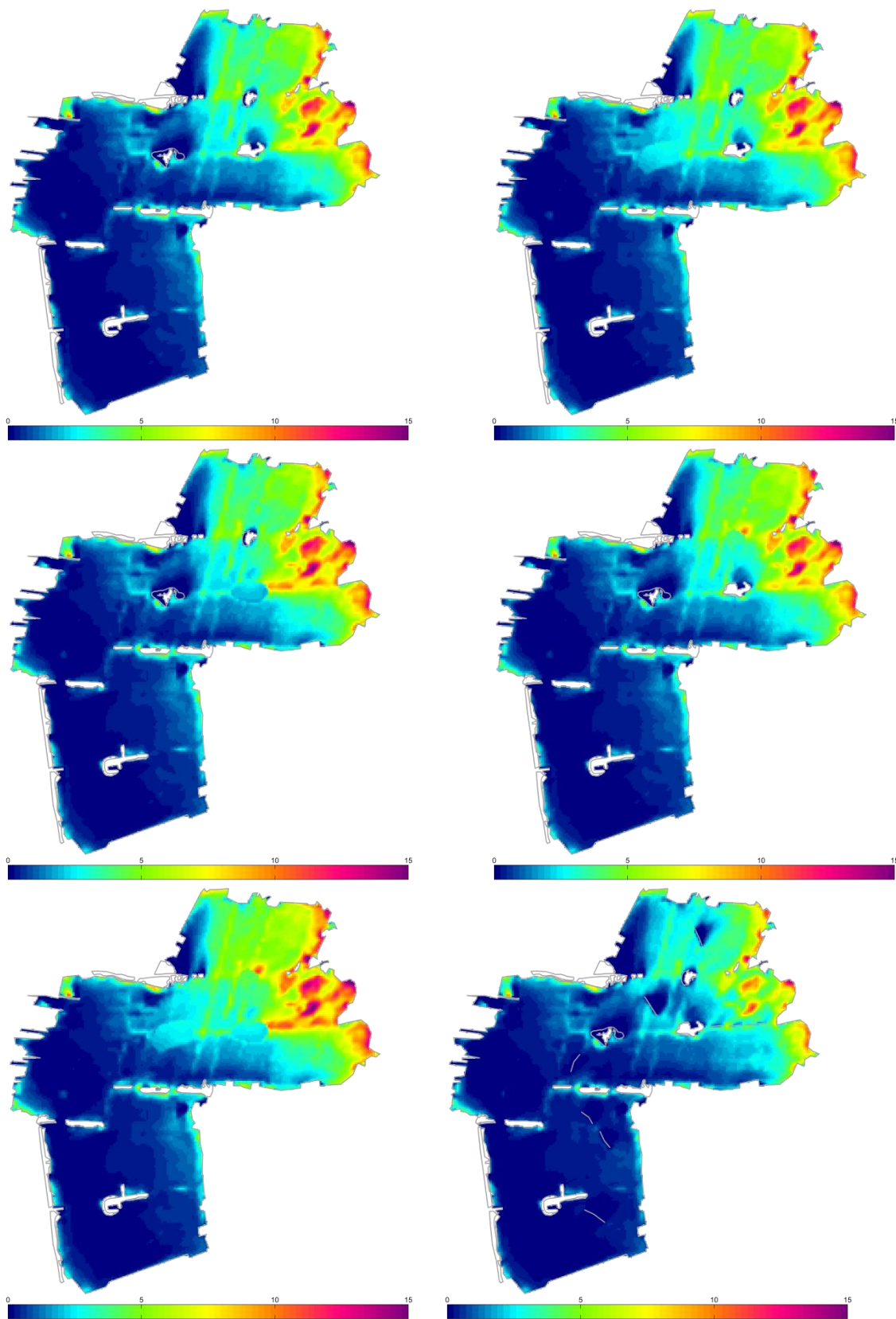


Figuur D.17 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie A van bandbreedte in modelparameter referentieconcentratie voor w_s (C_0) en de exponent in flocculatie formulering (f_1 en f_2).

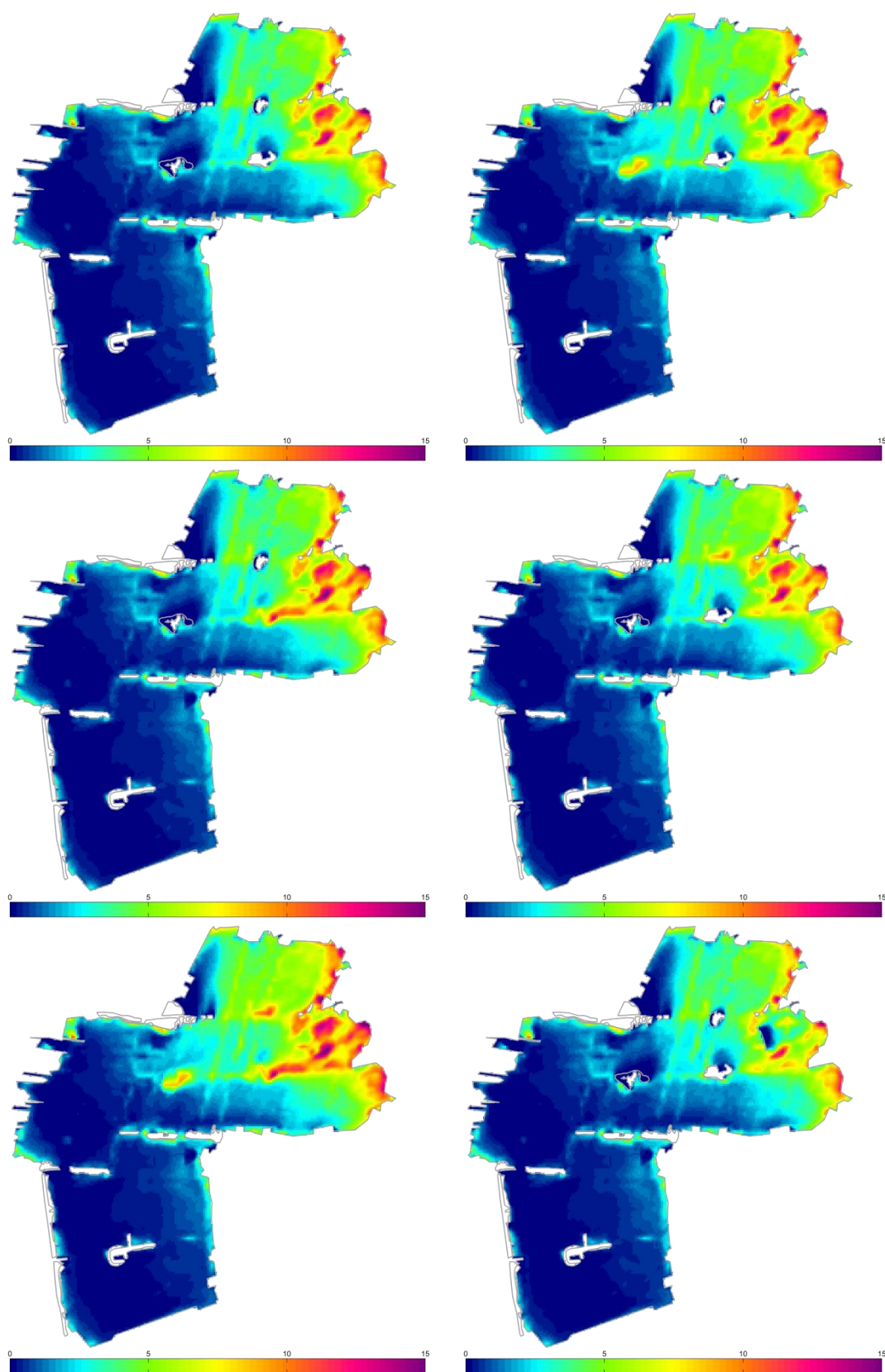


Figuur D.18 Effect op zwevend stof in bovenste waterlaag [mg/l] bij observatielocatie G van bandbreedte in referentieconcentratie voor w_s (C_0) en de exponent in flocculatie formulering (f_1 en f_2).

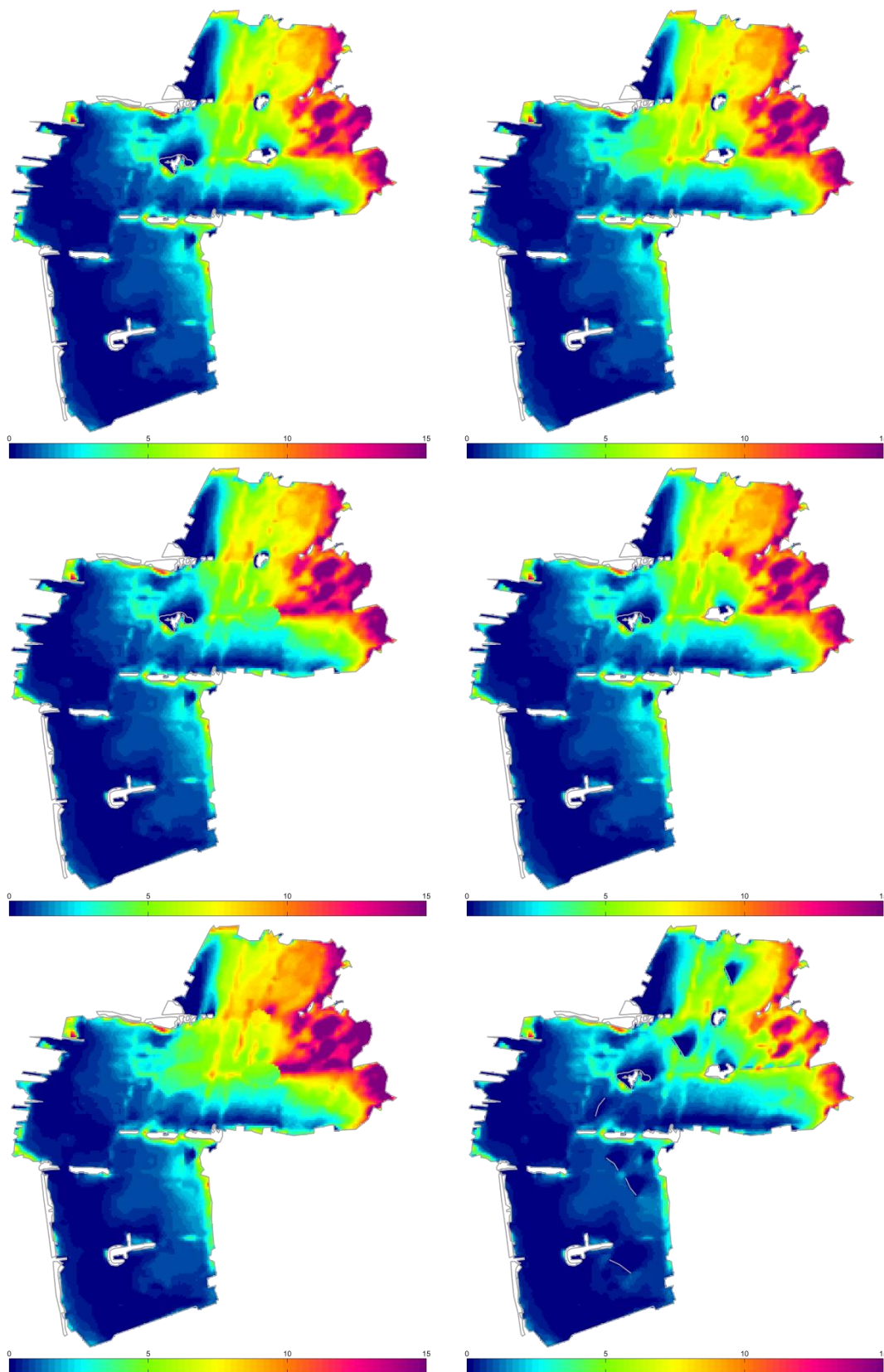
E Resultaten scenario berekeningen bodemschuifspanning



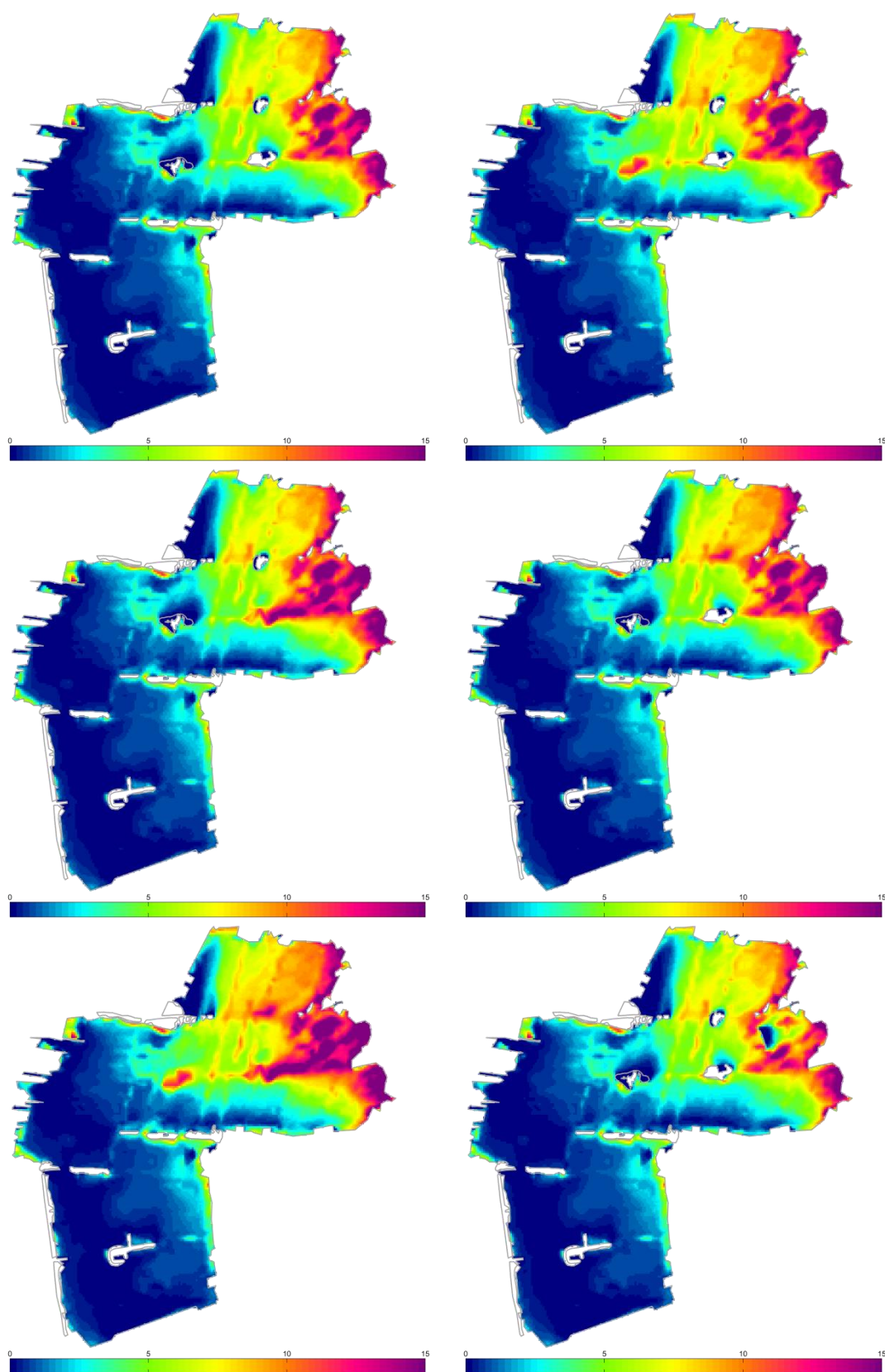
Figuur E.1 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



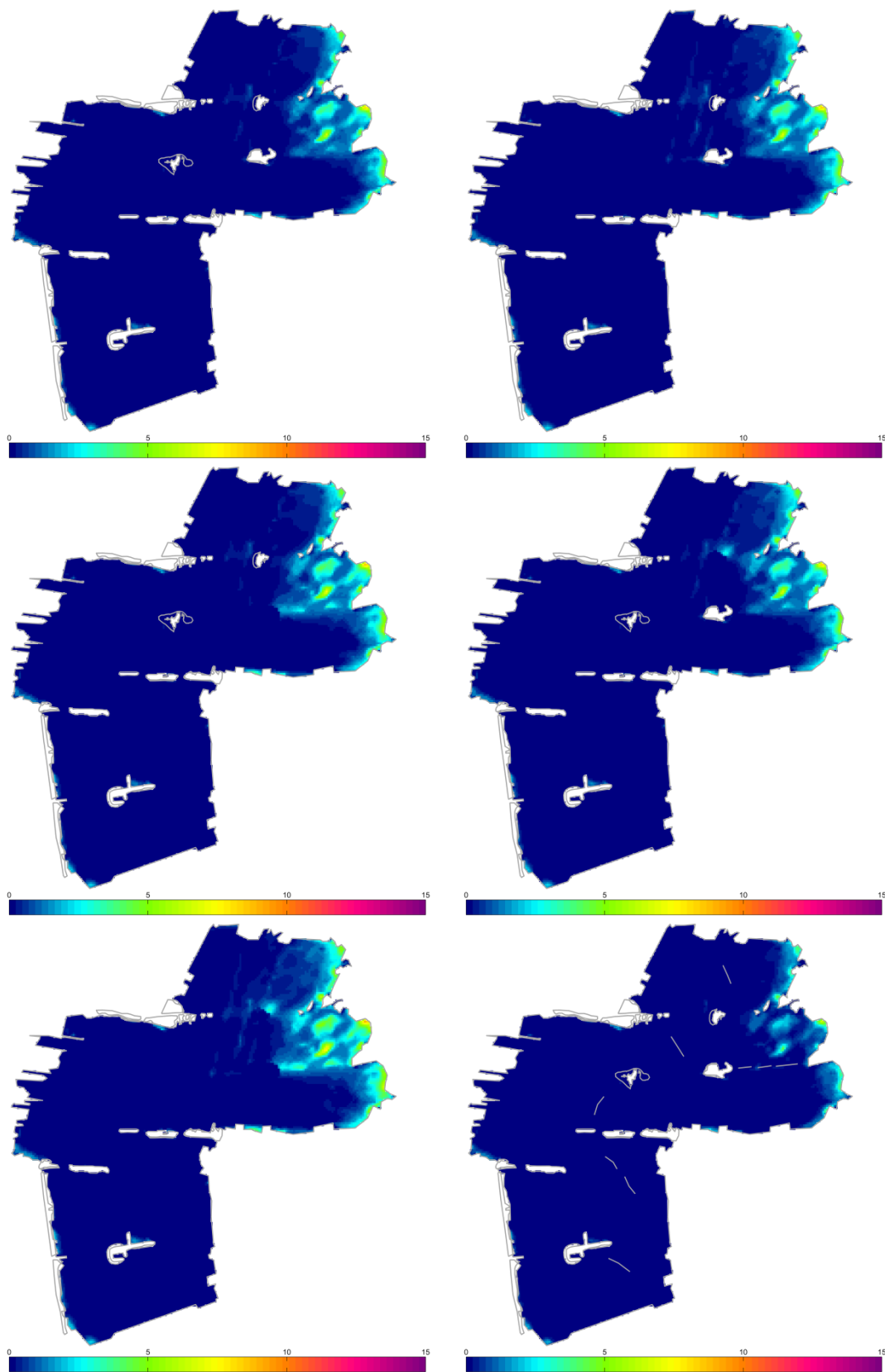
Figuur E.2 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



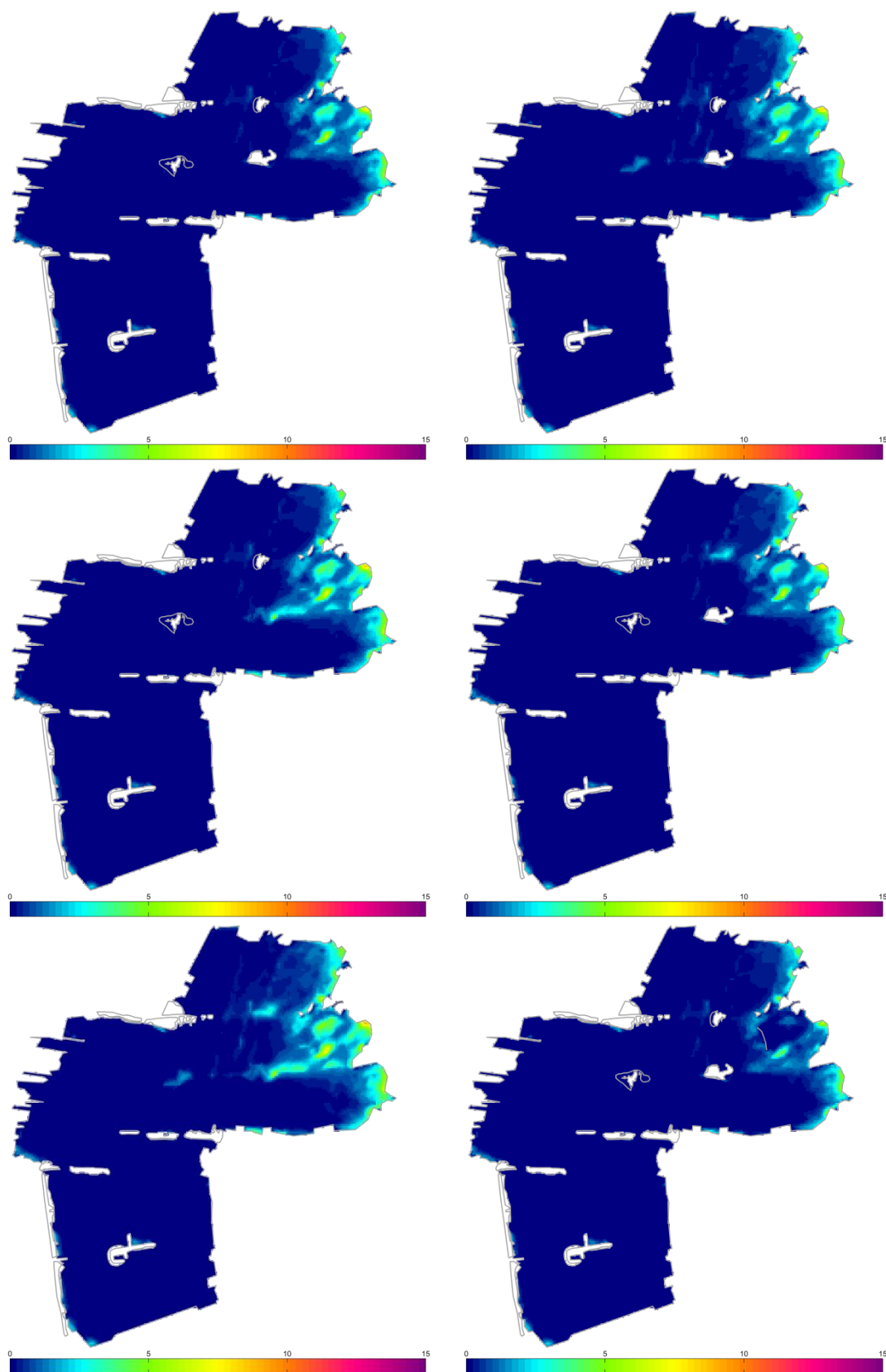
Figuur E.3 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



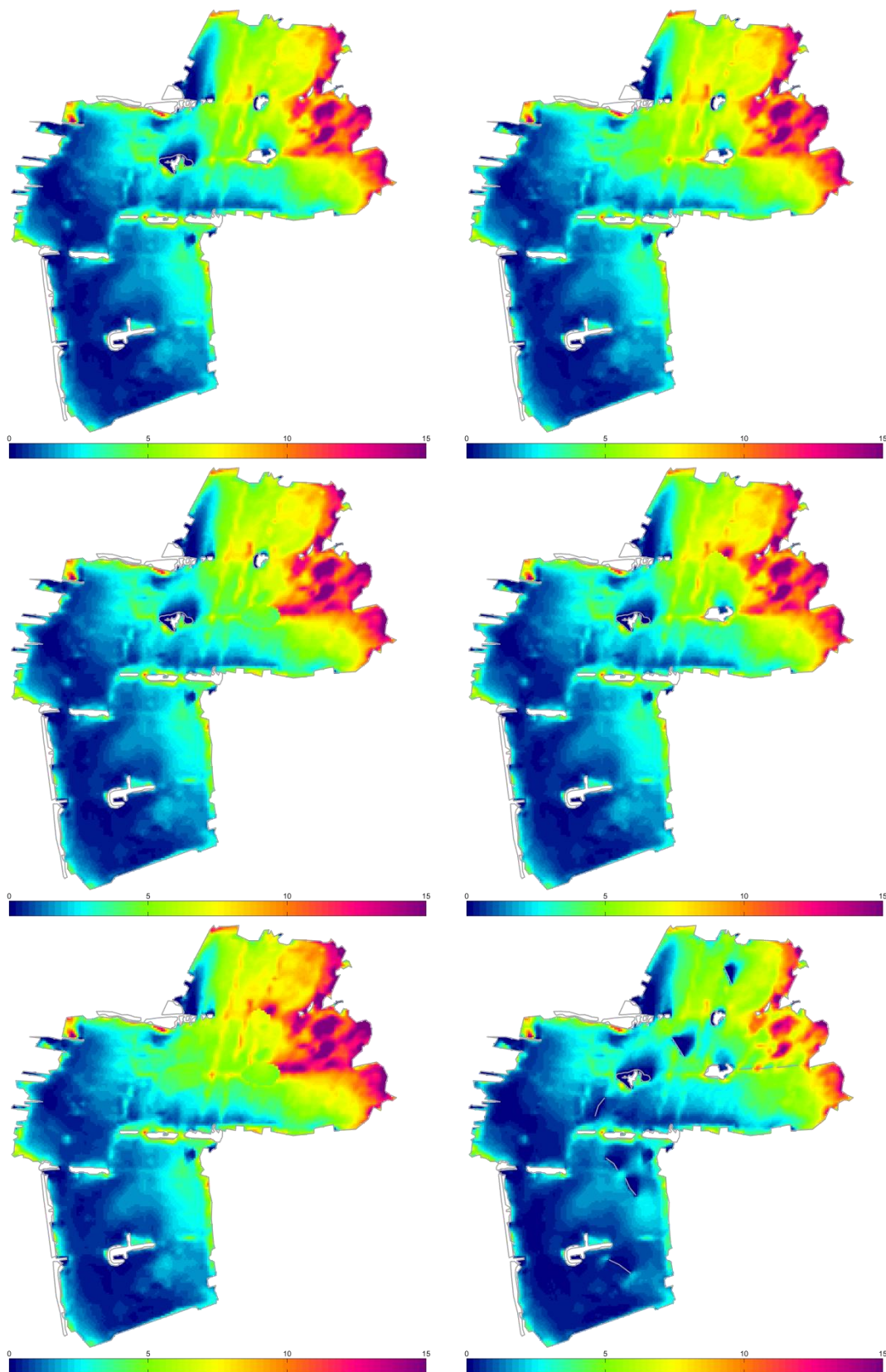
Figuur E.4 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



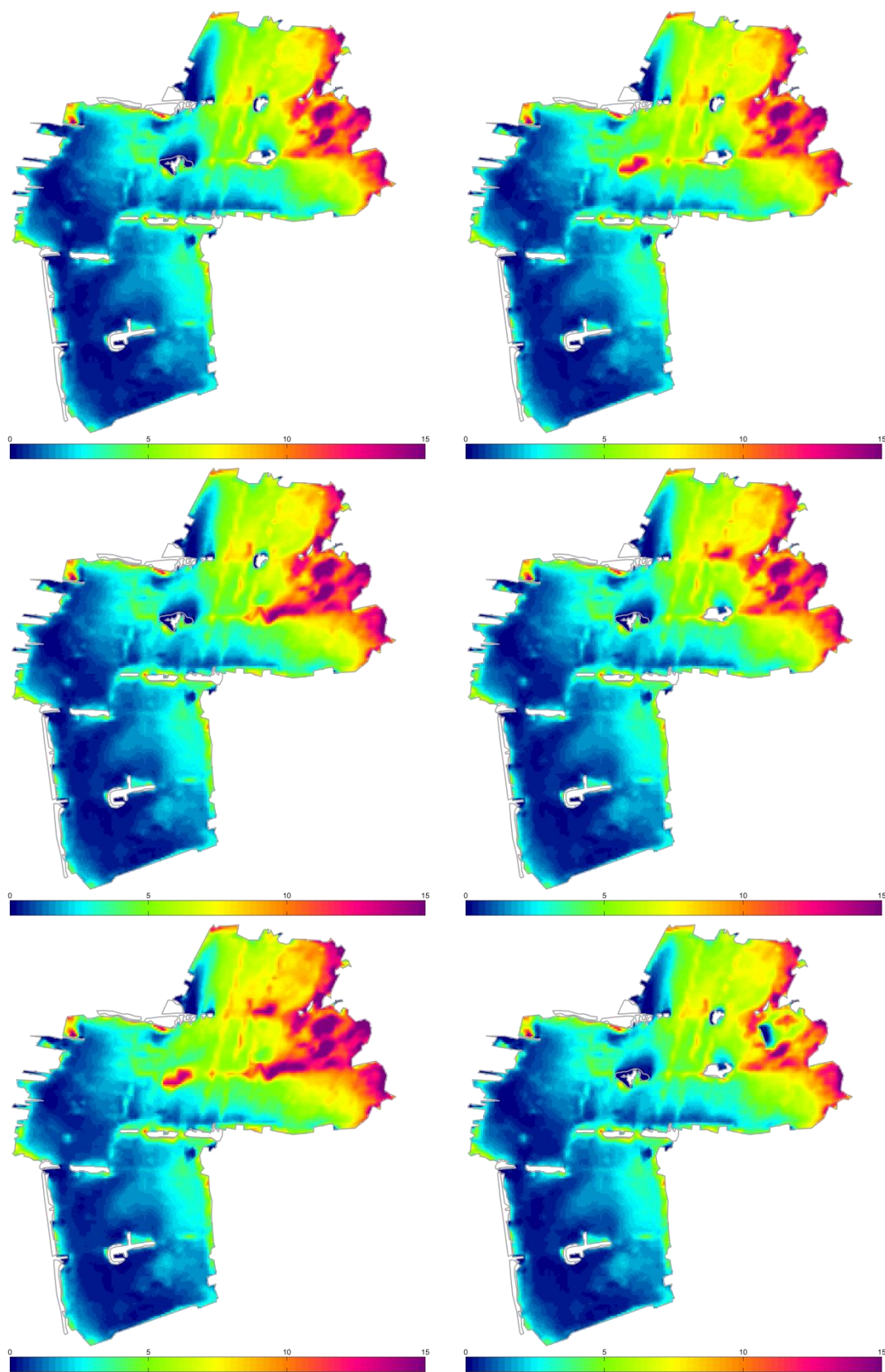
Figuur E.5 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



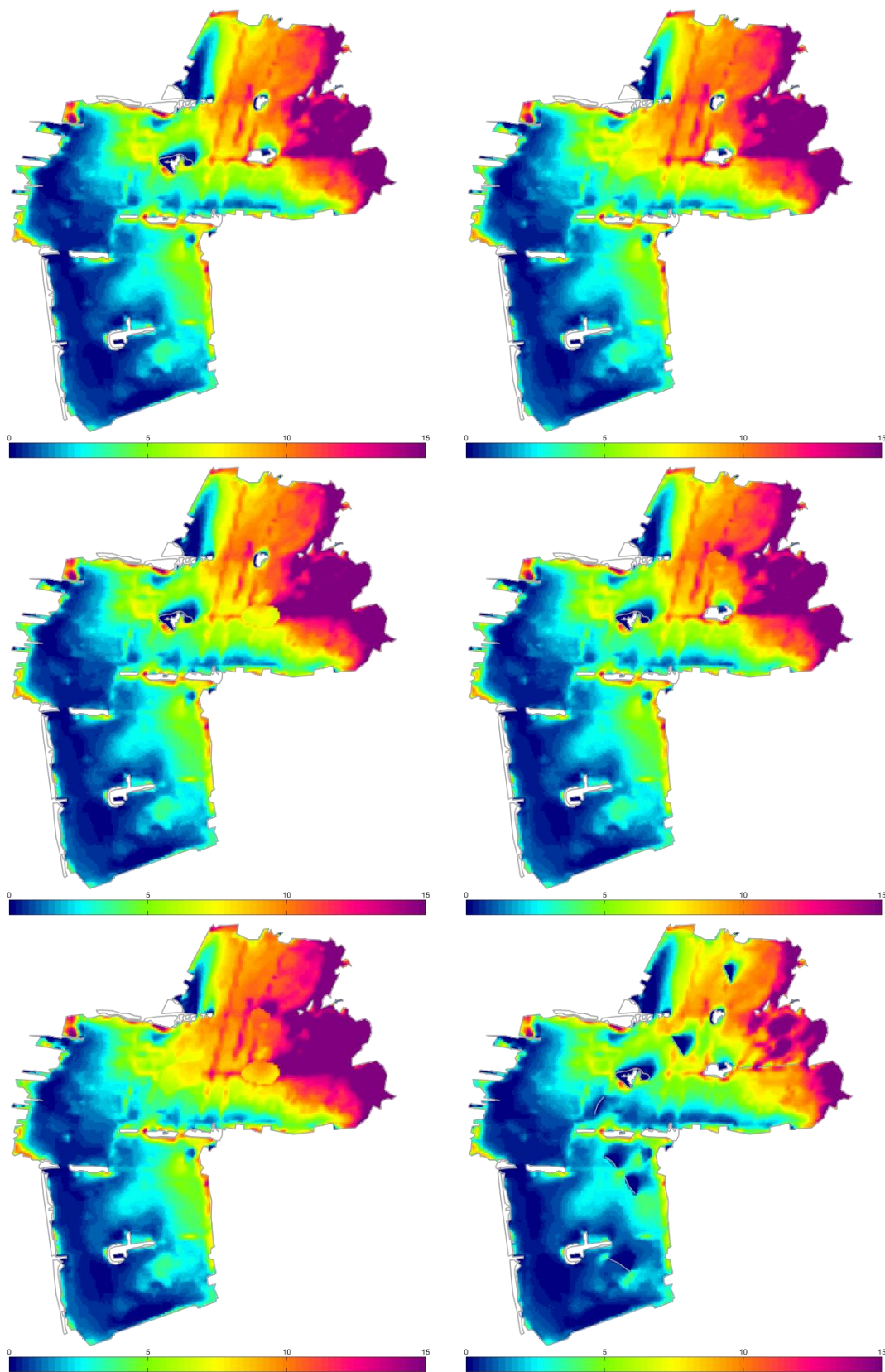
Figuur E.6 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.20 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



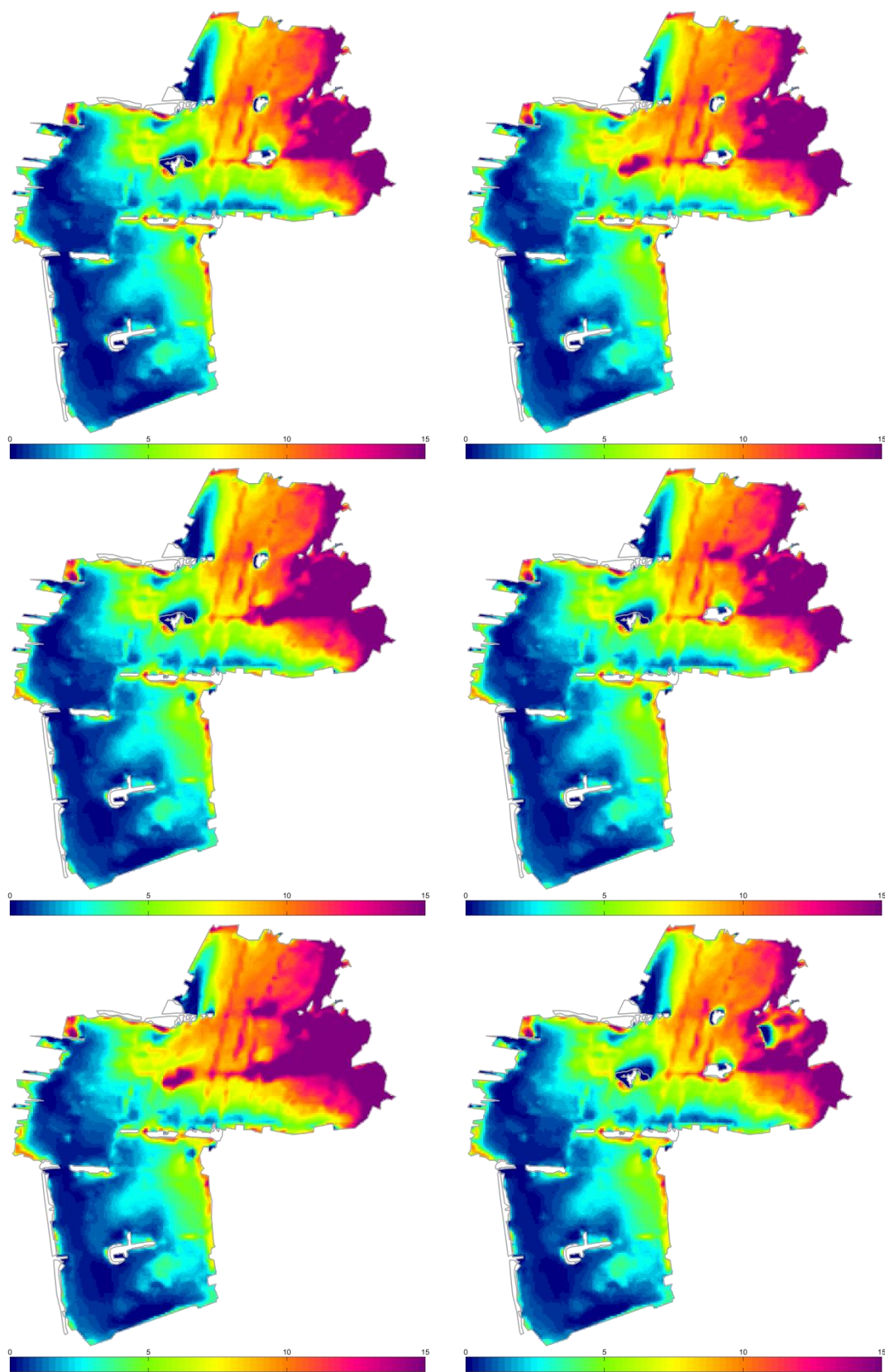
Figuur E.7 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



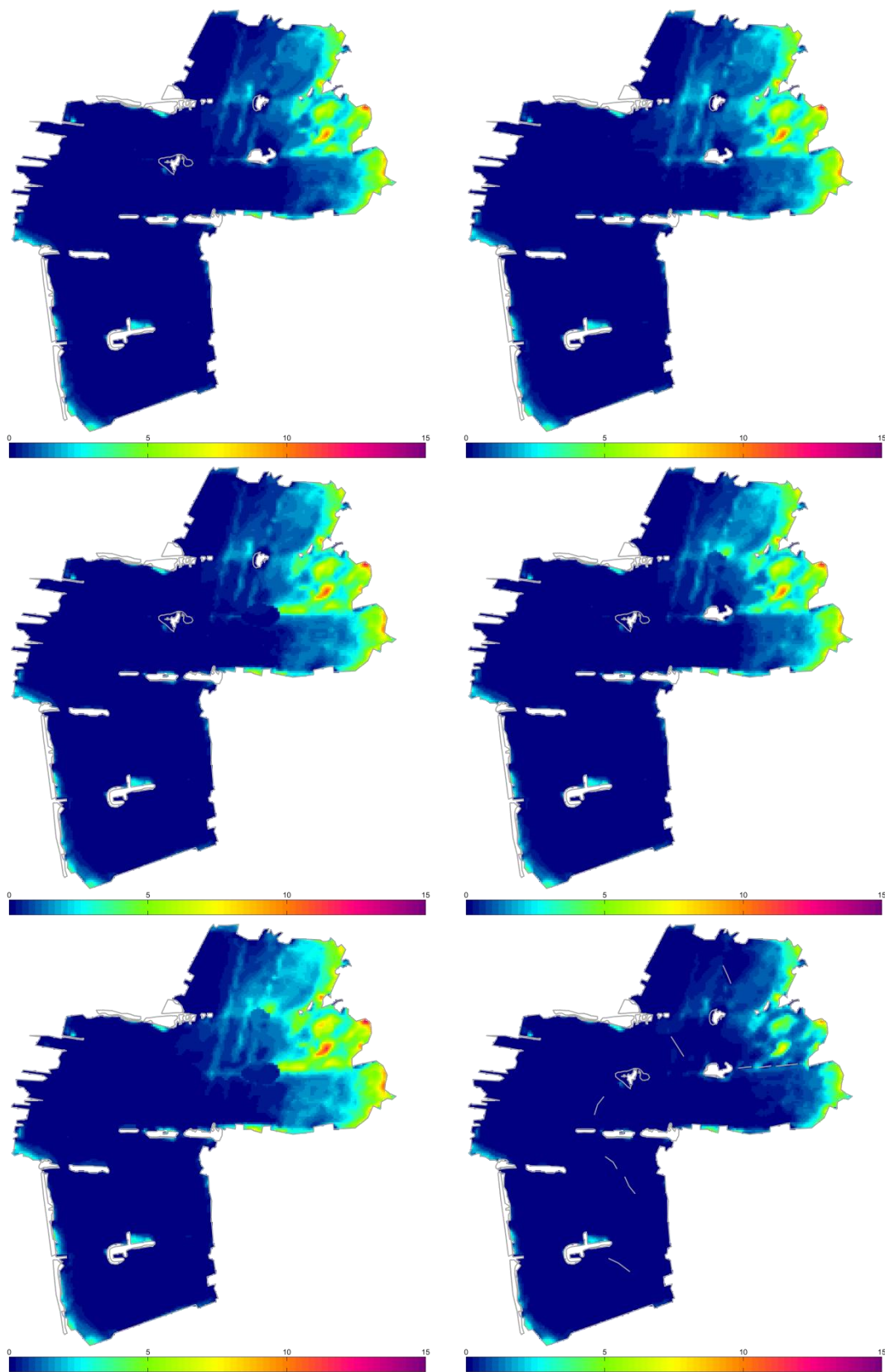
Figuur E.8 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



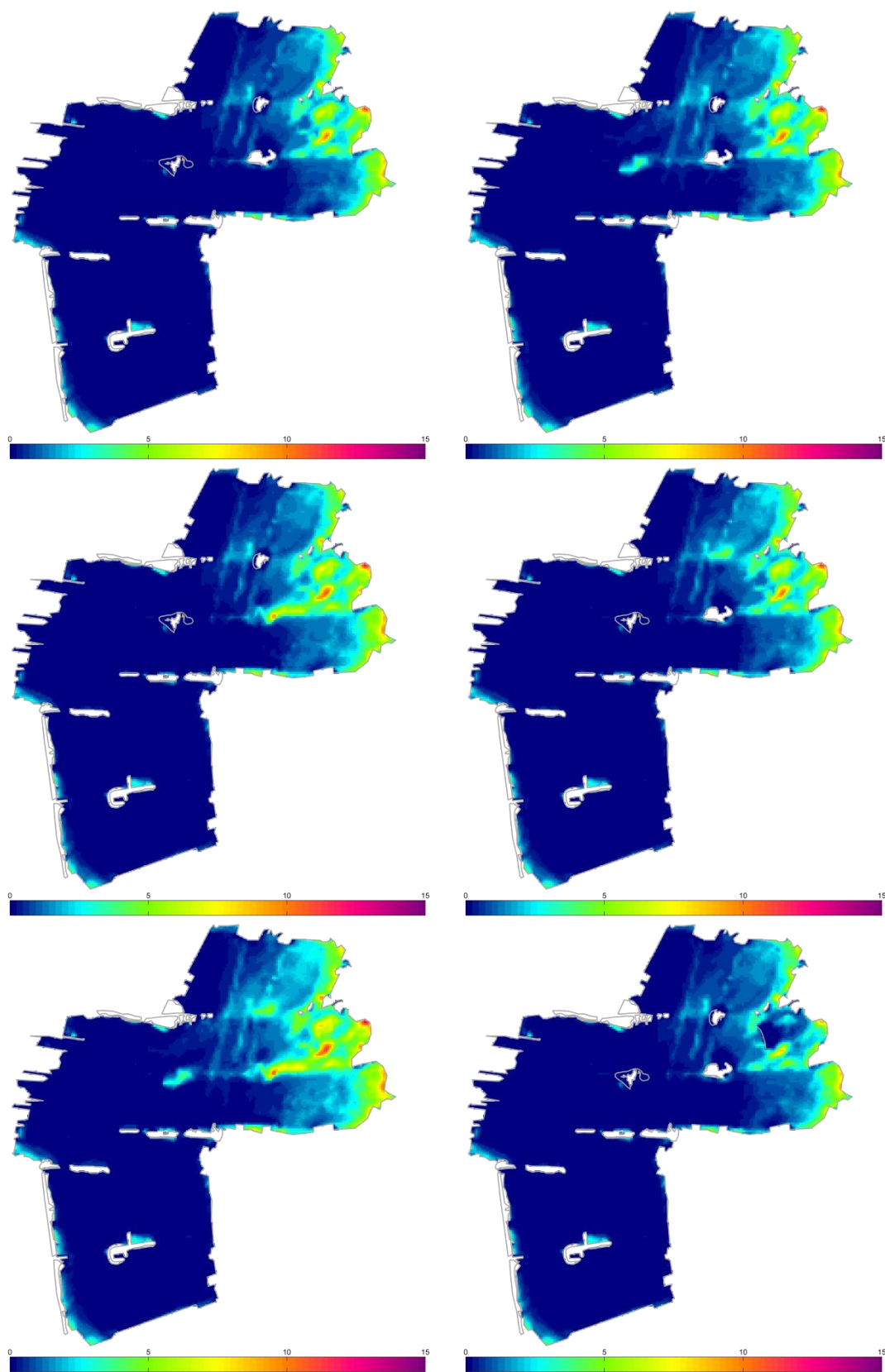
Figuur E.9 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



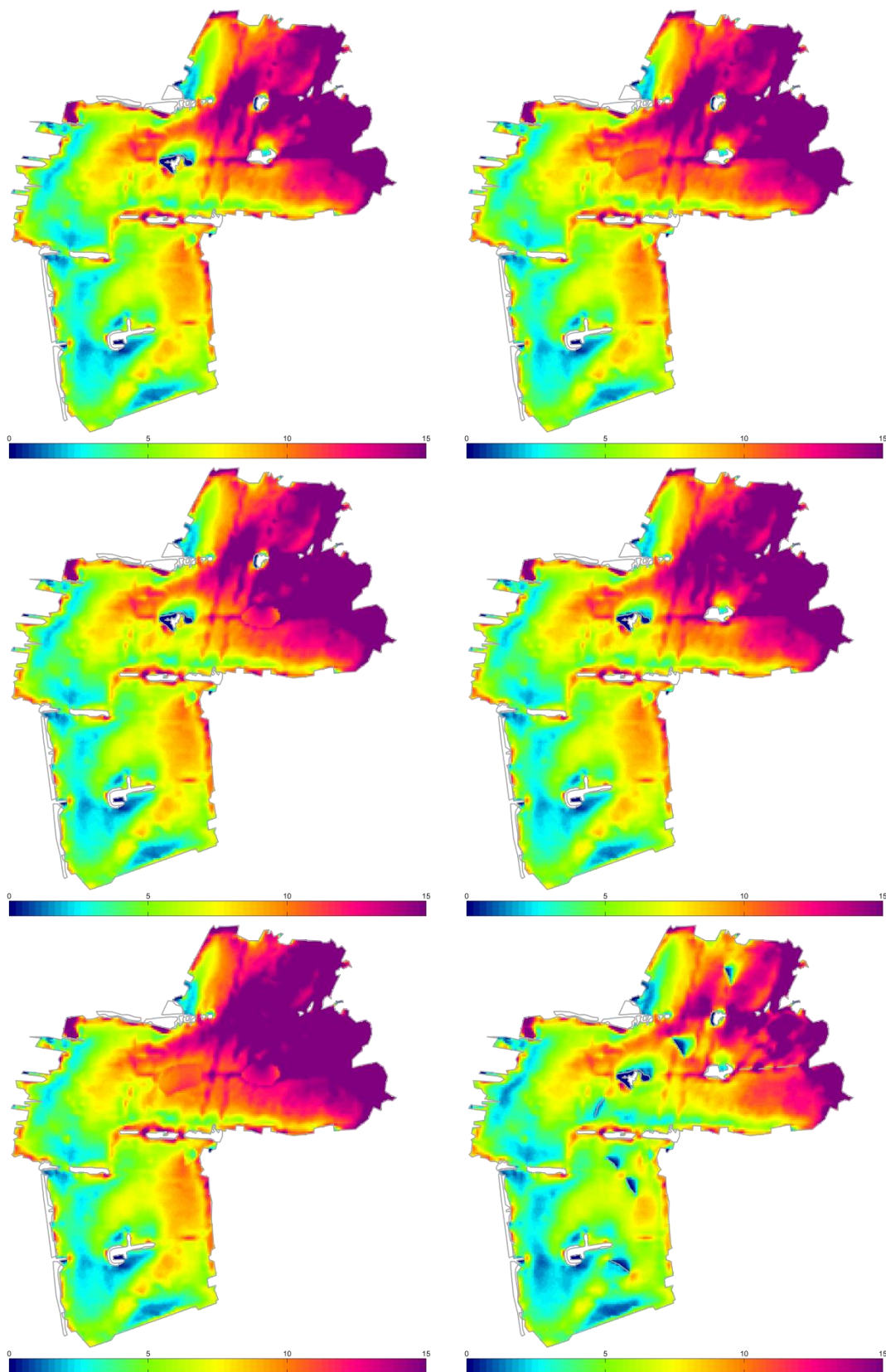
Figuur E.10 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



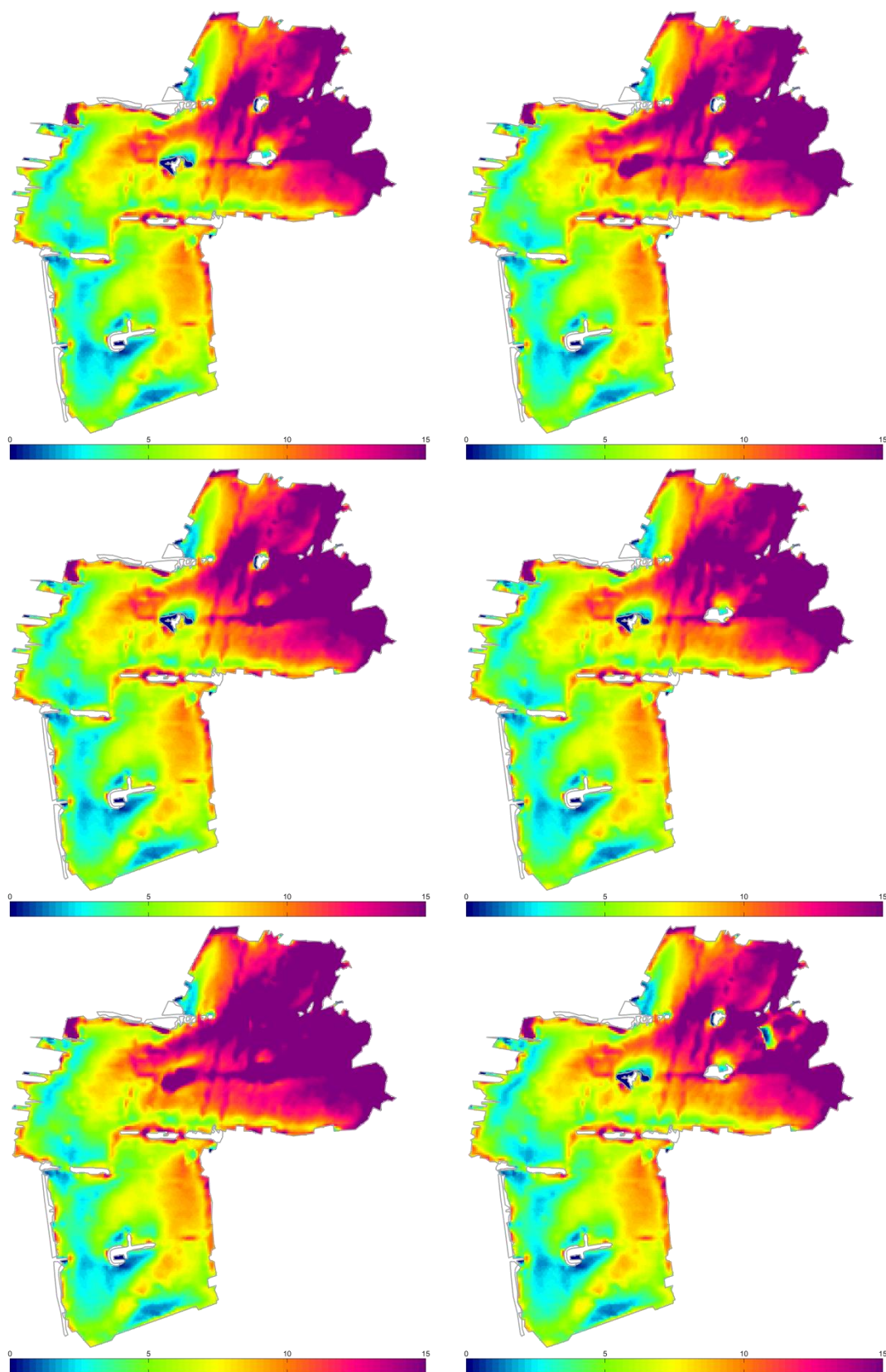
Figuur E.11 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



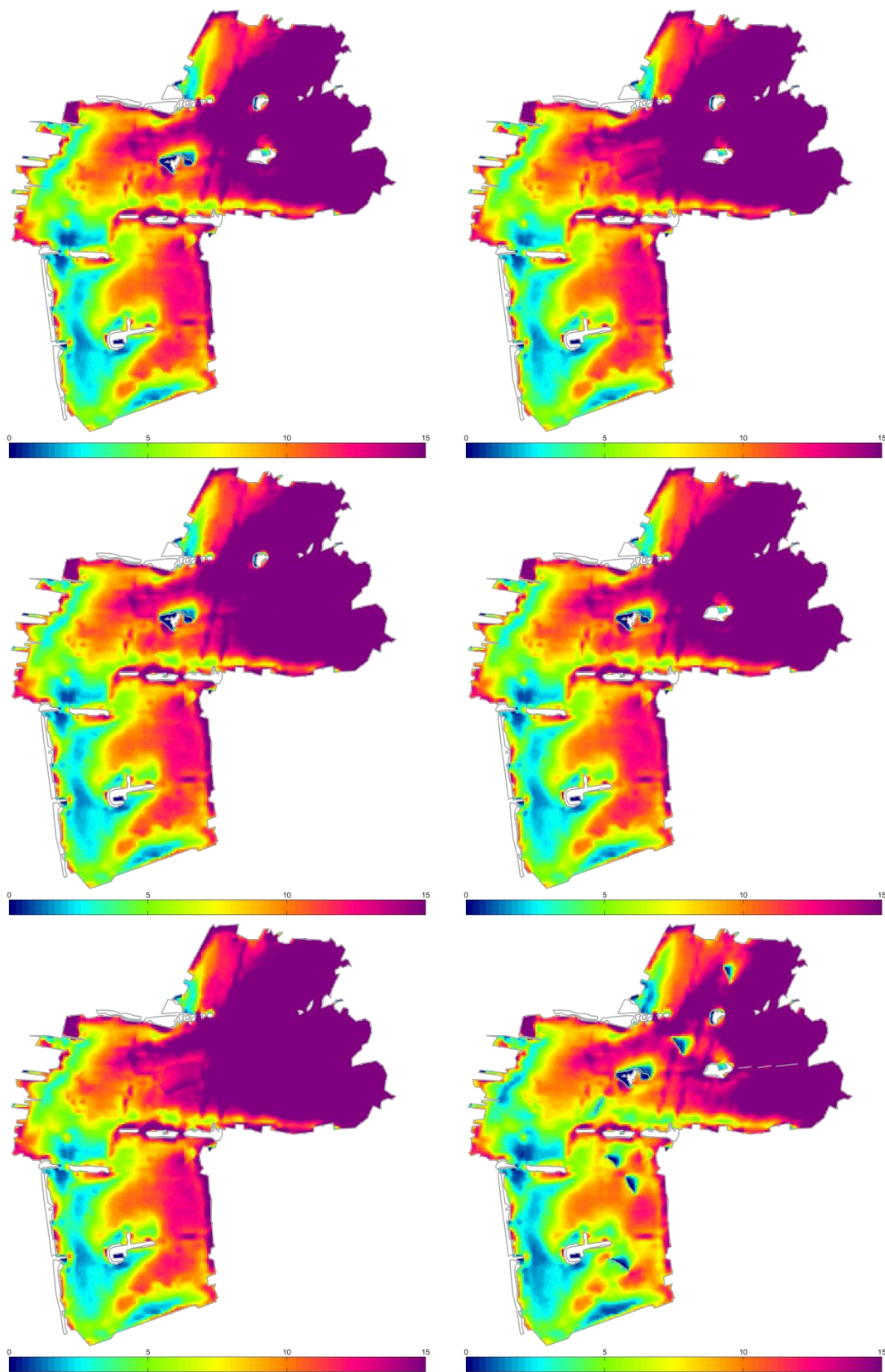
Figuur E.12 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.10 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



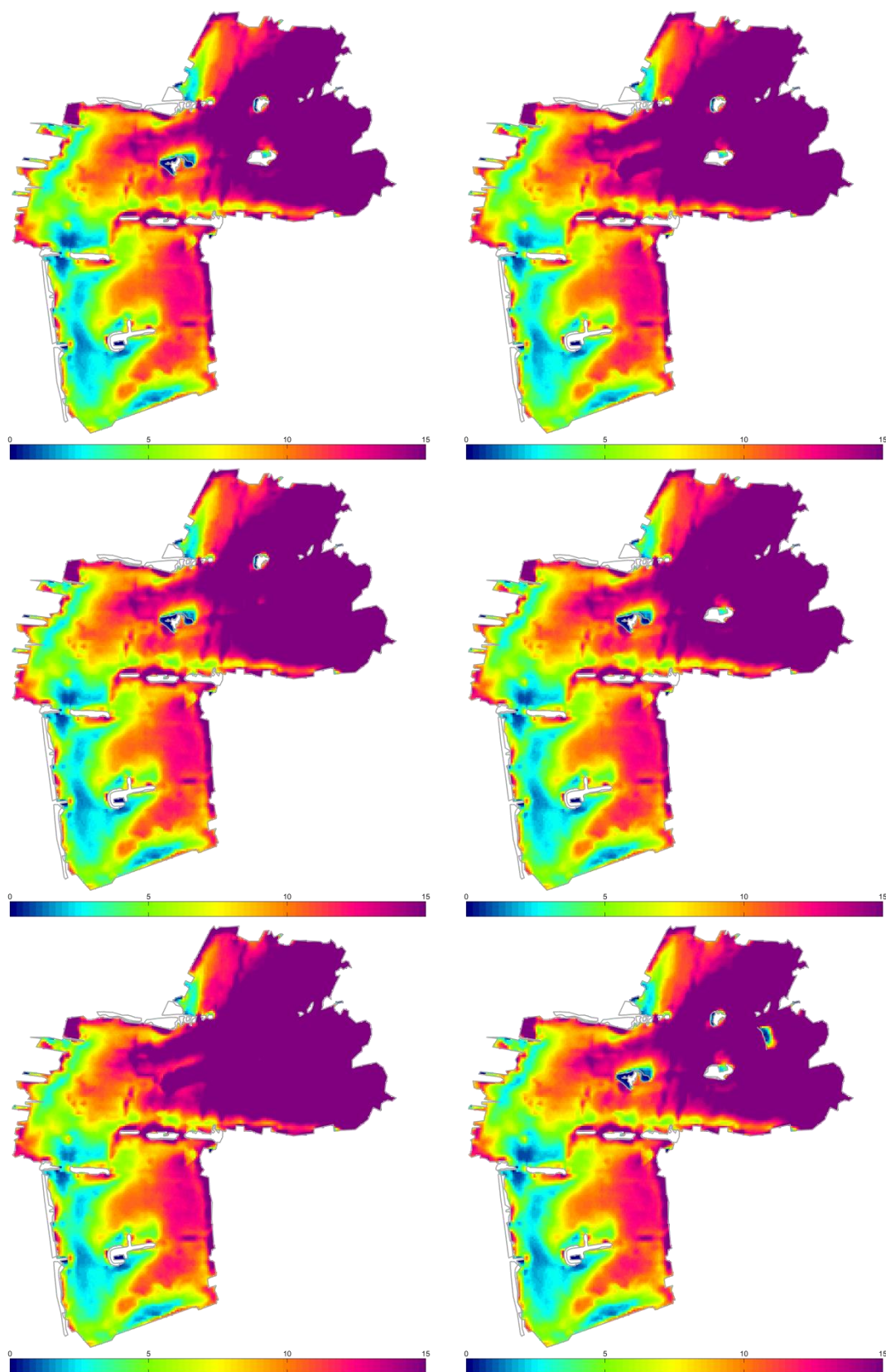
Figuur E.13 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



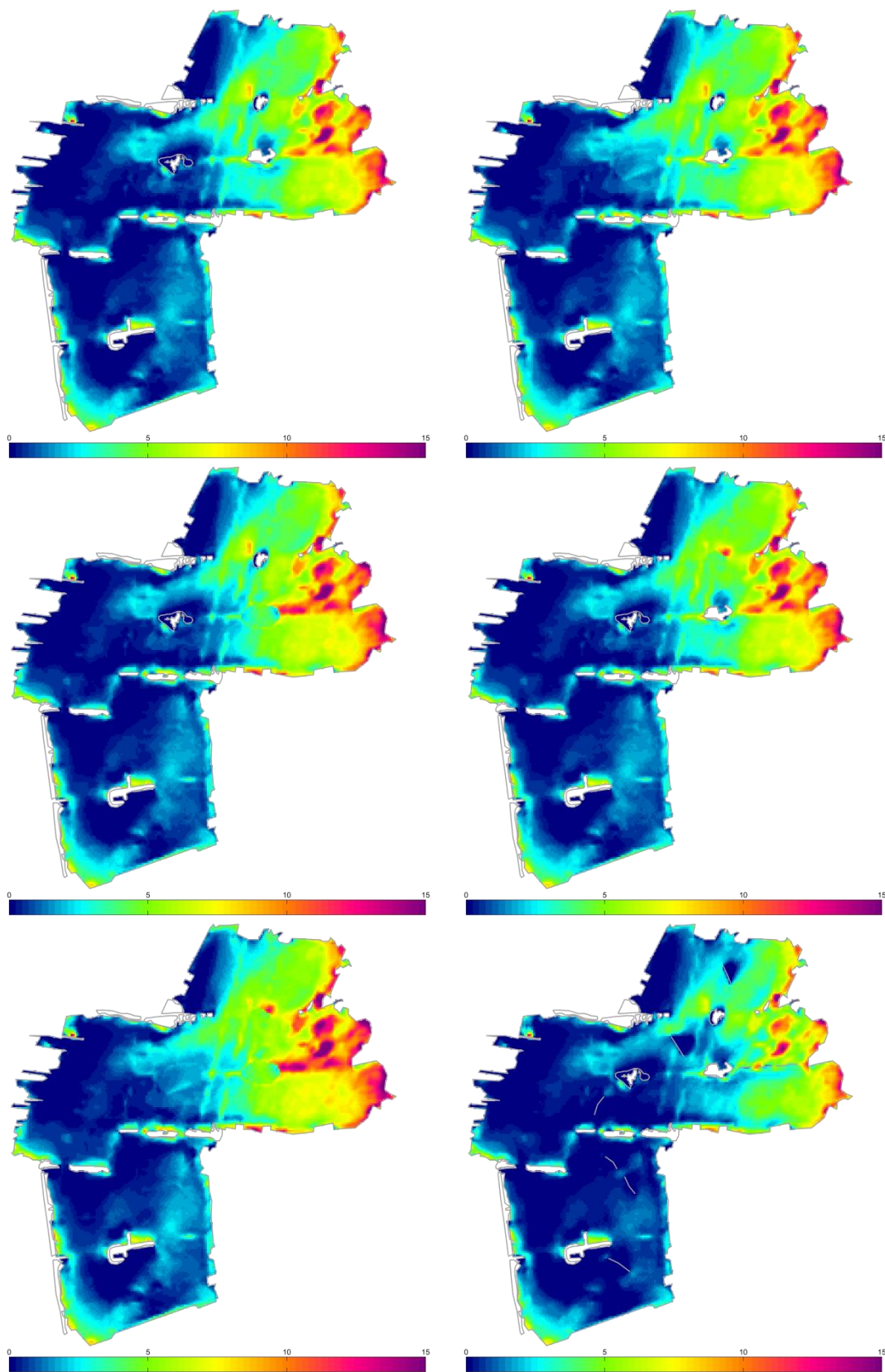
Figuur E.14 Modelresultaten voor frequentie [%] over jaar van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



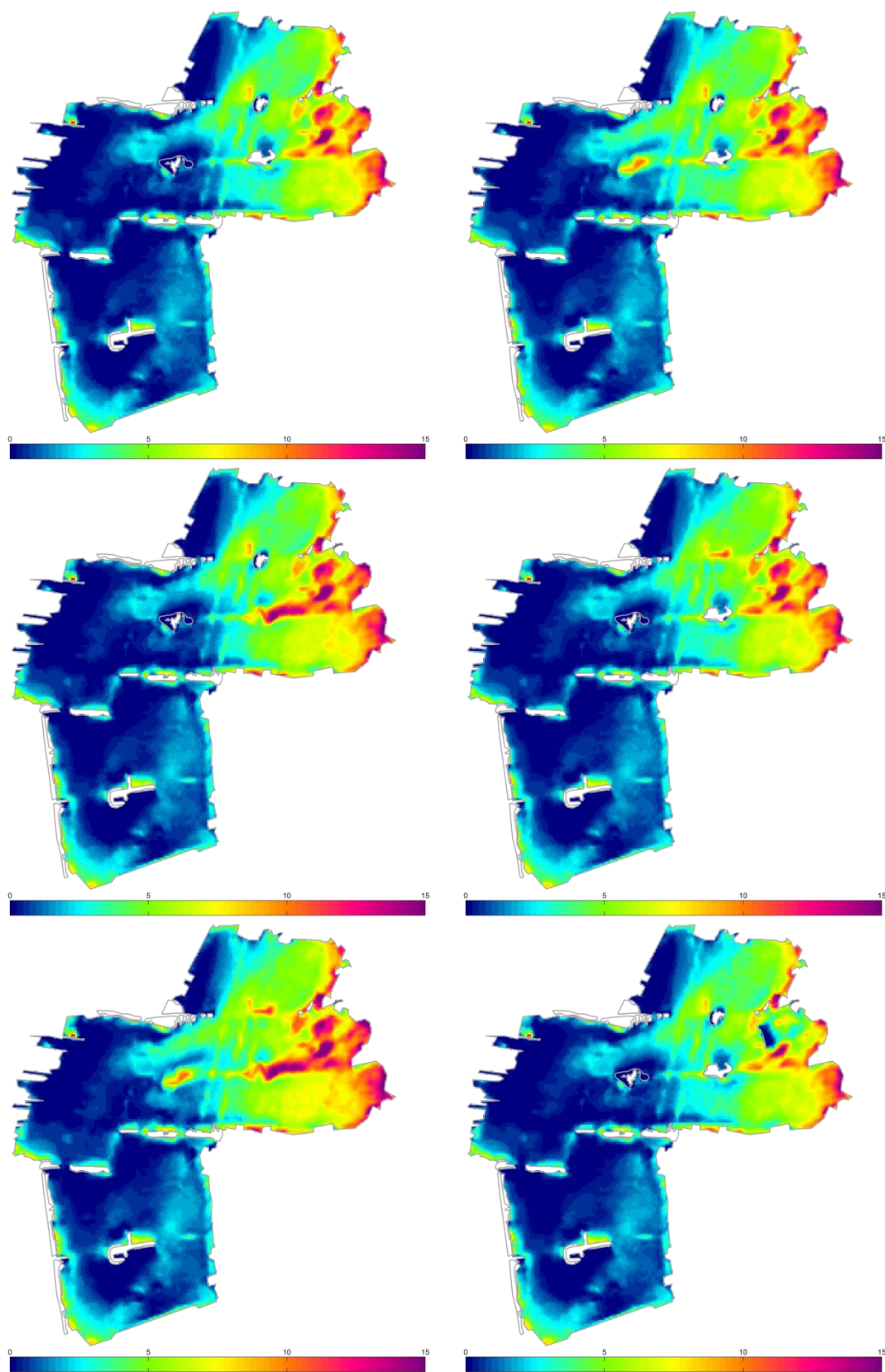
Figuur E.15 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



Figuur E.16 Modelresultaten voor frequentie [%] over voorjaar van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.

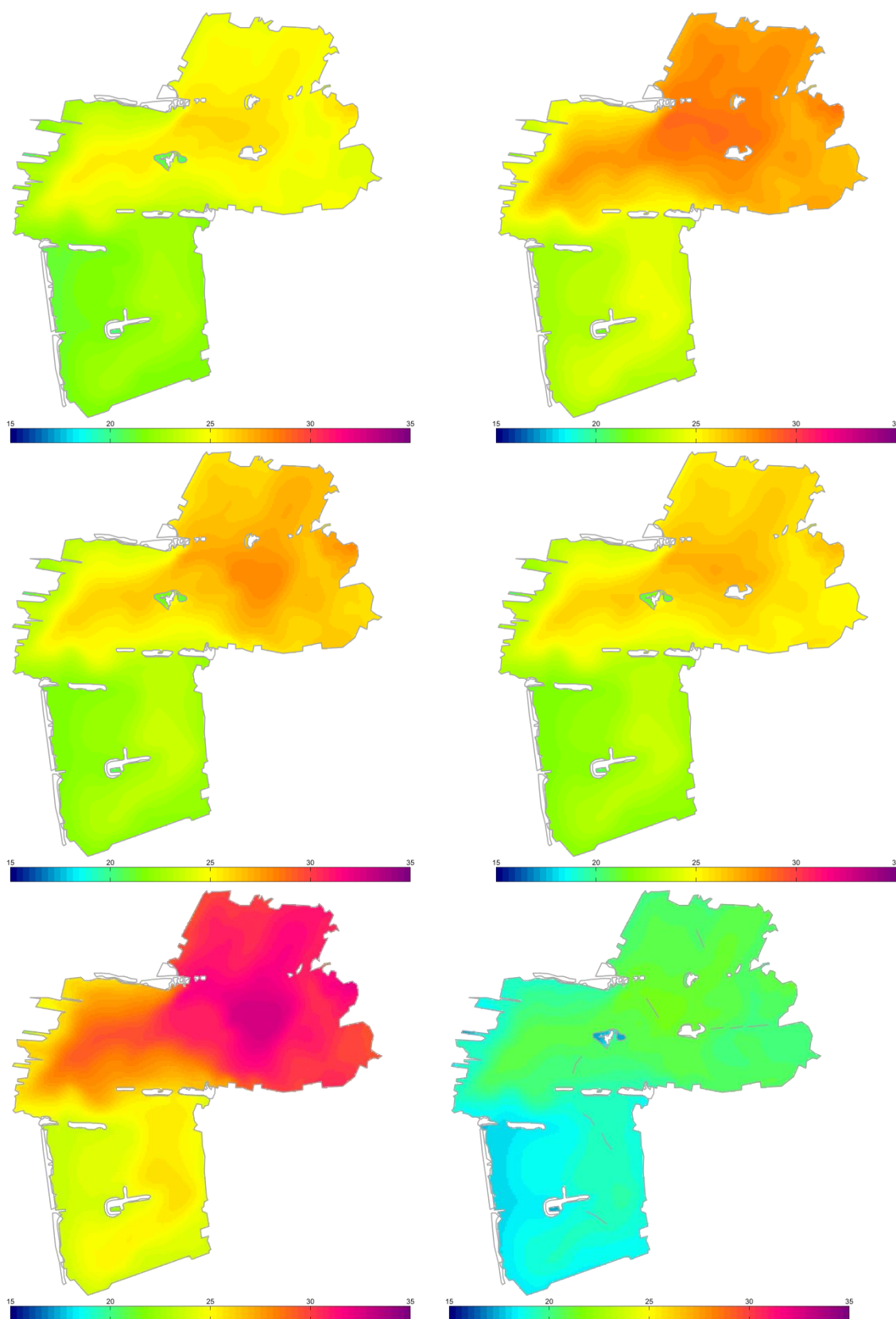


Figuur E.17 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.

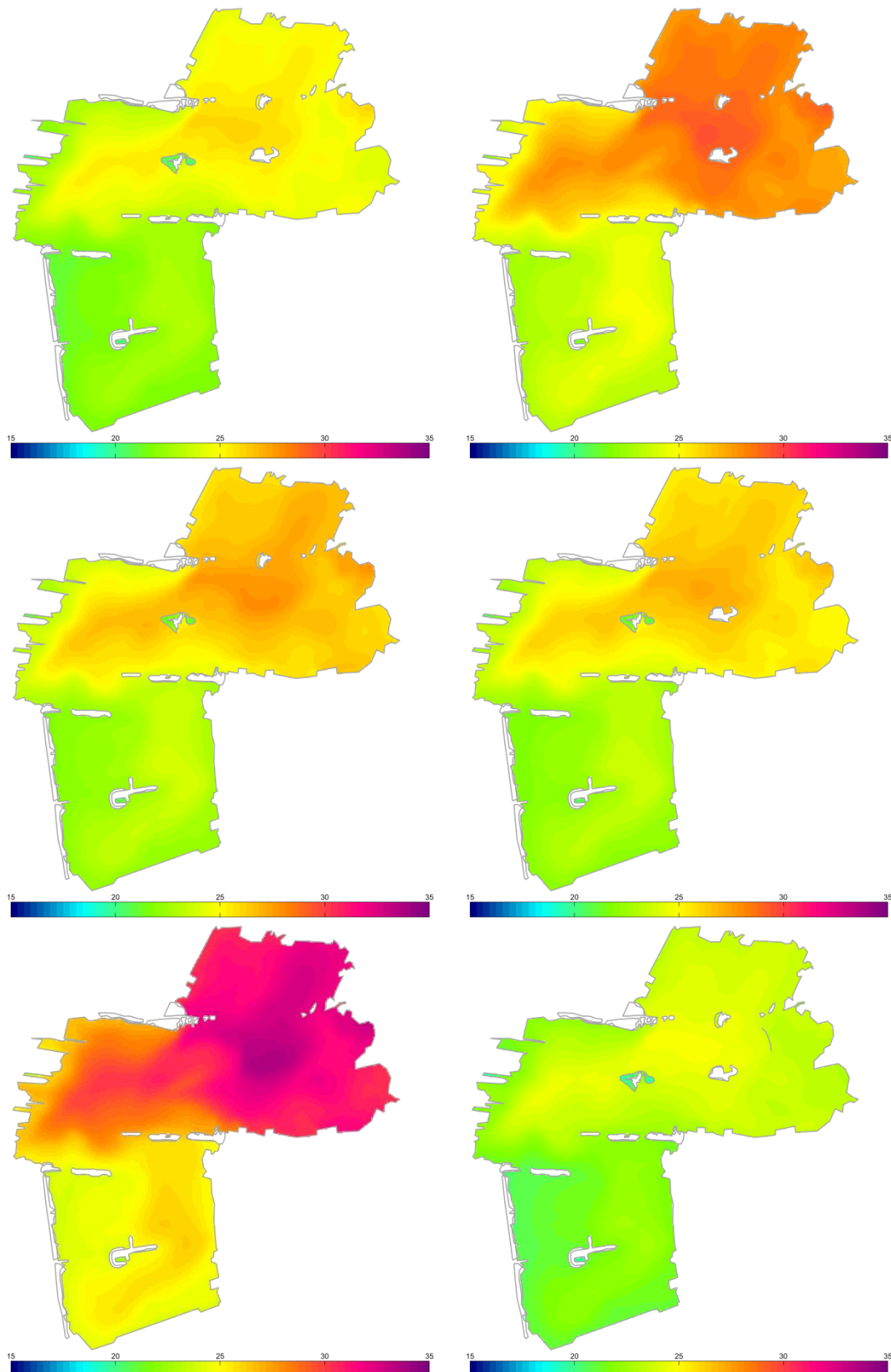


Figuur E.18 Modelresultaten voor frequentie [%] over zomer van overschrijding met 0.03 Pa door bodemschuifspanning voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.

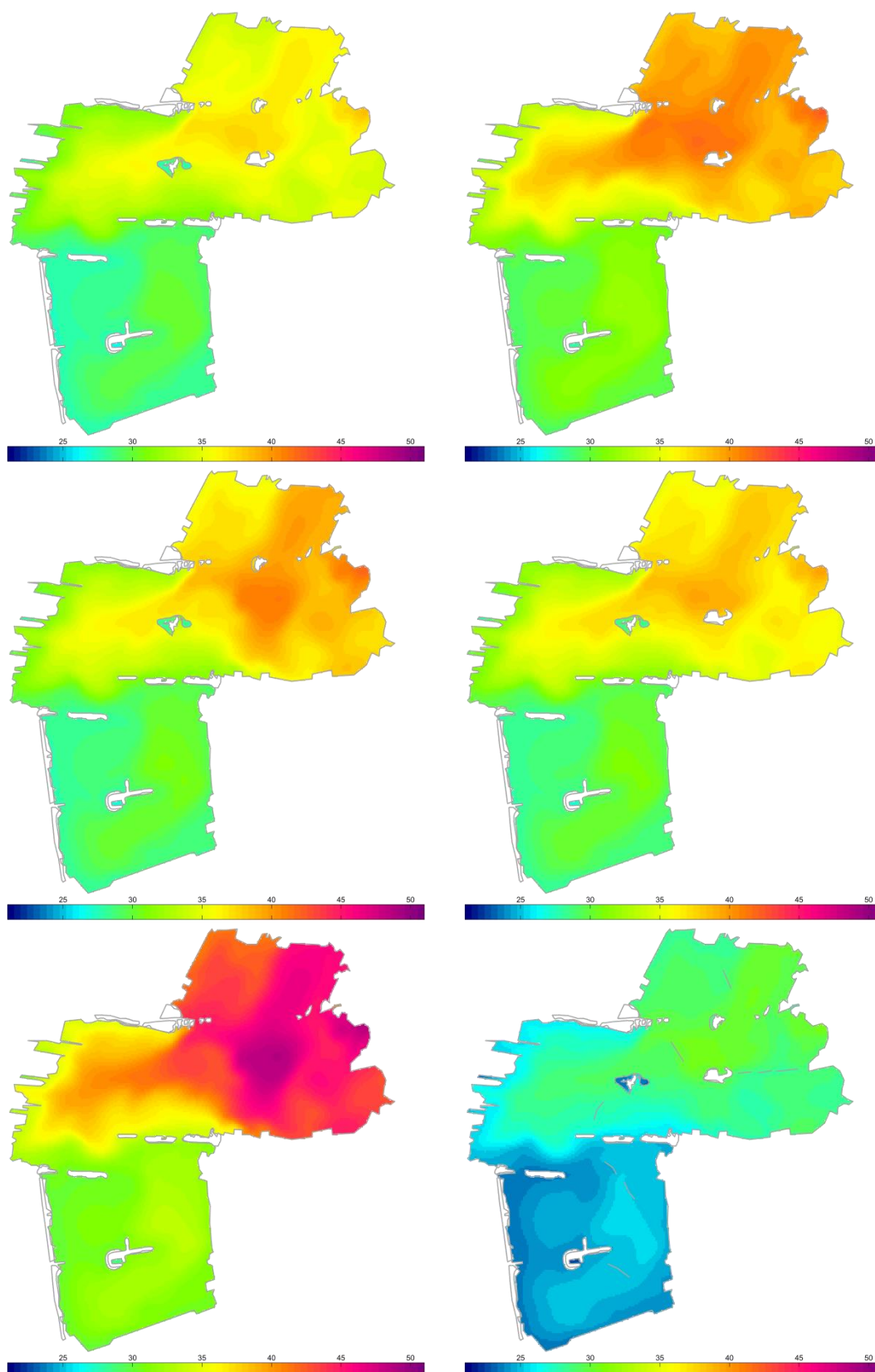
F Resultaten scenario berekeningen zwevend stof



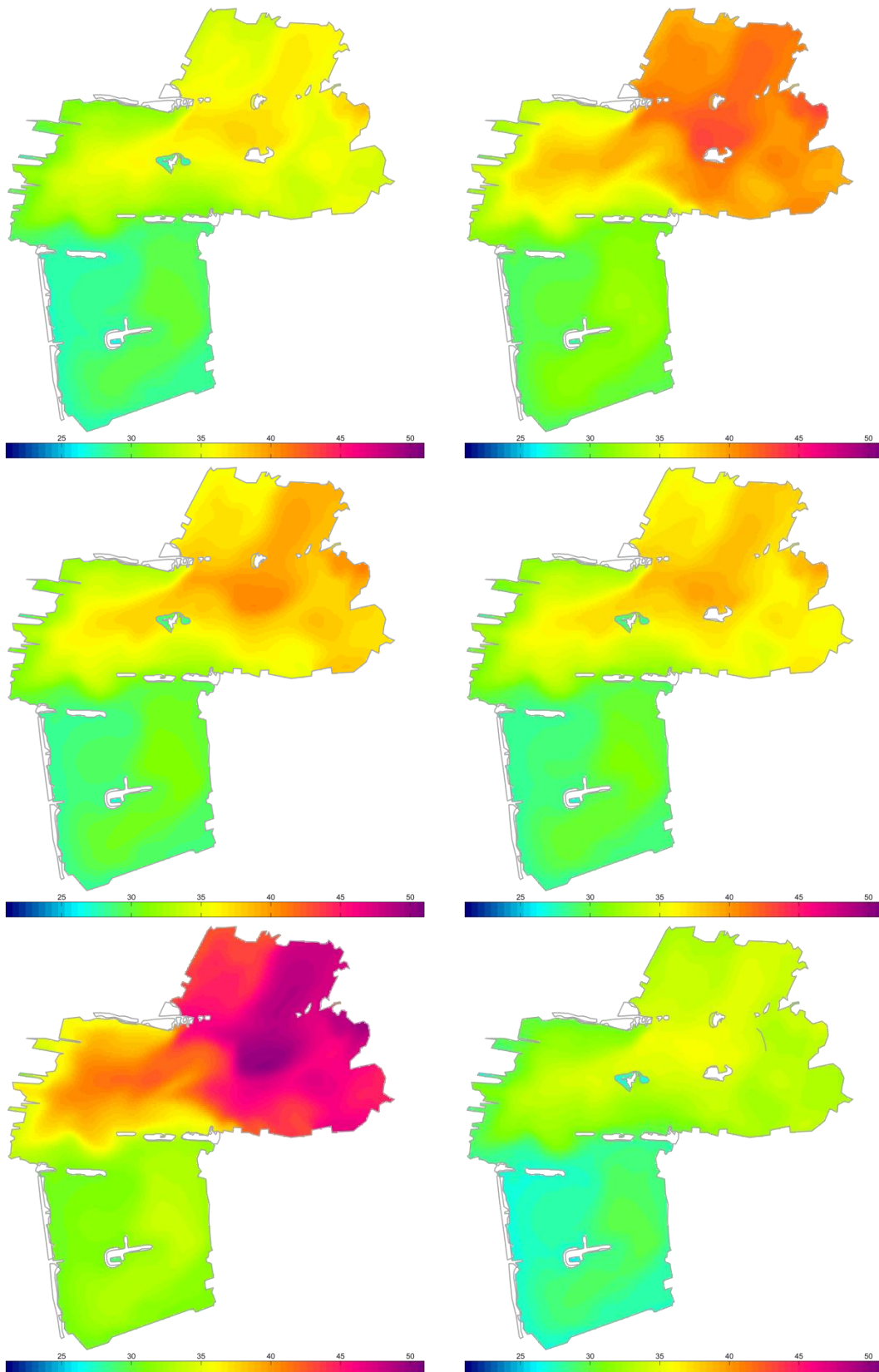
Figuur F.1 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



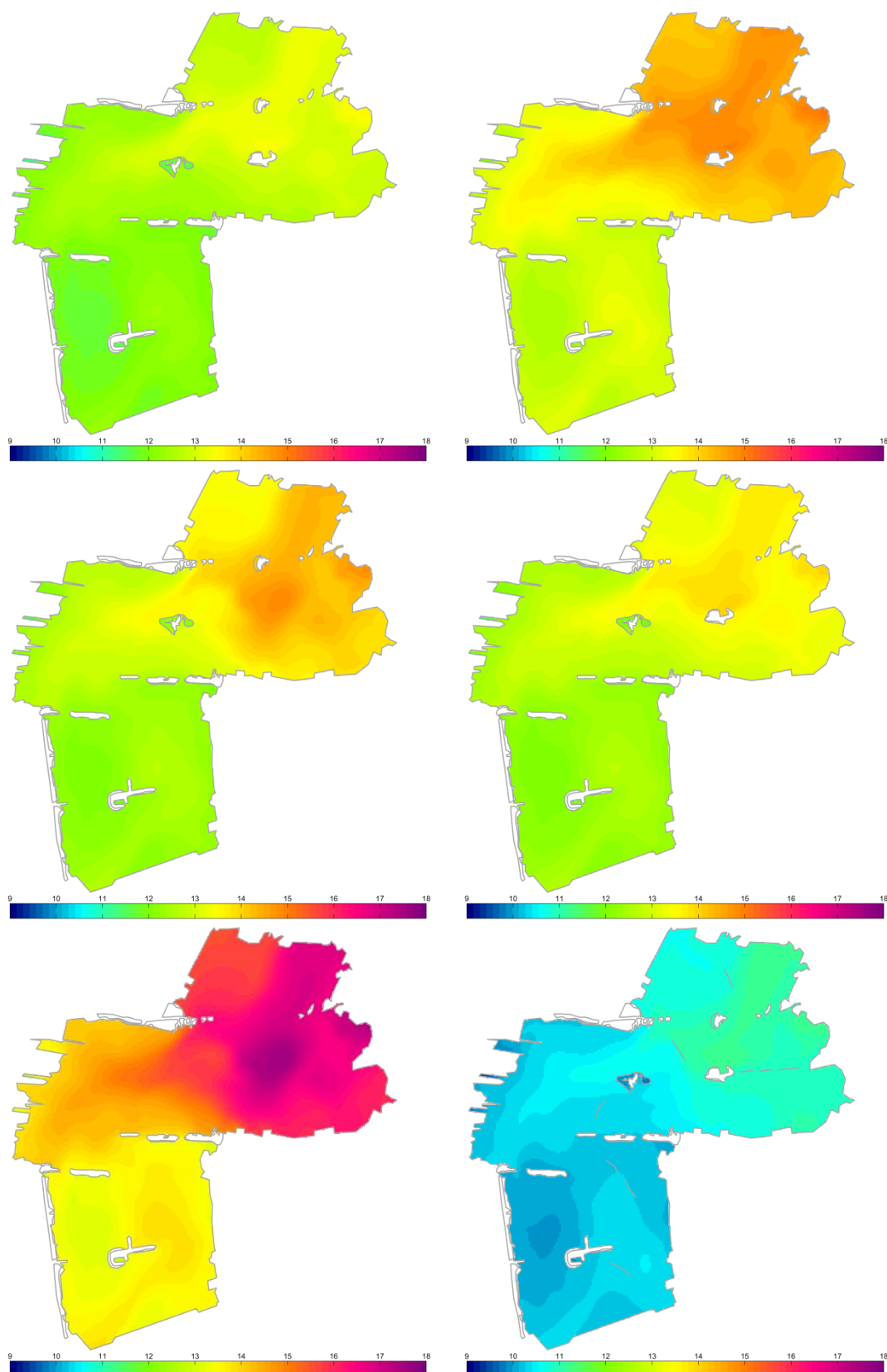
Figuur F.2 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



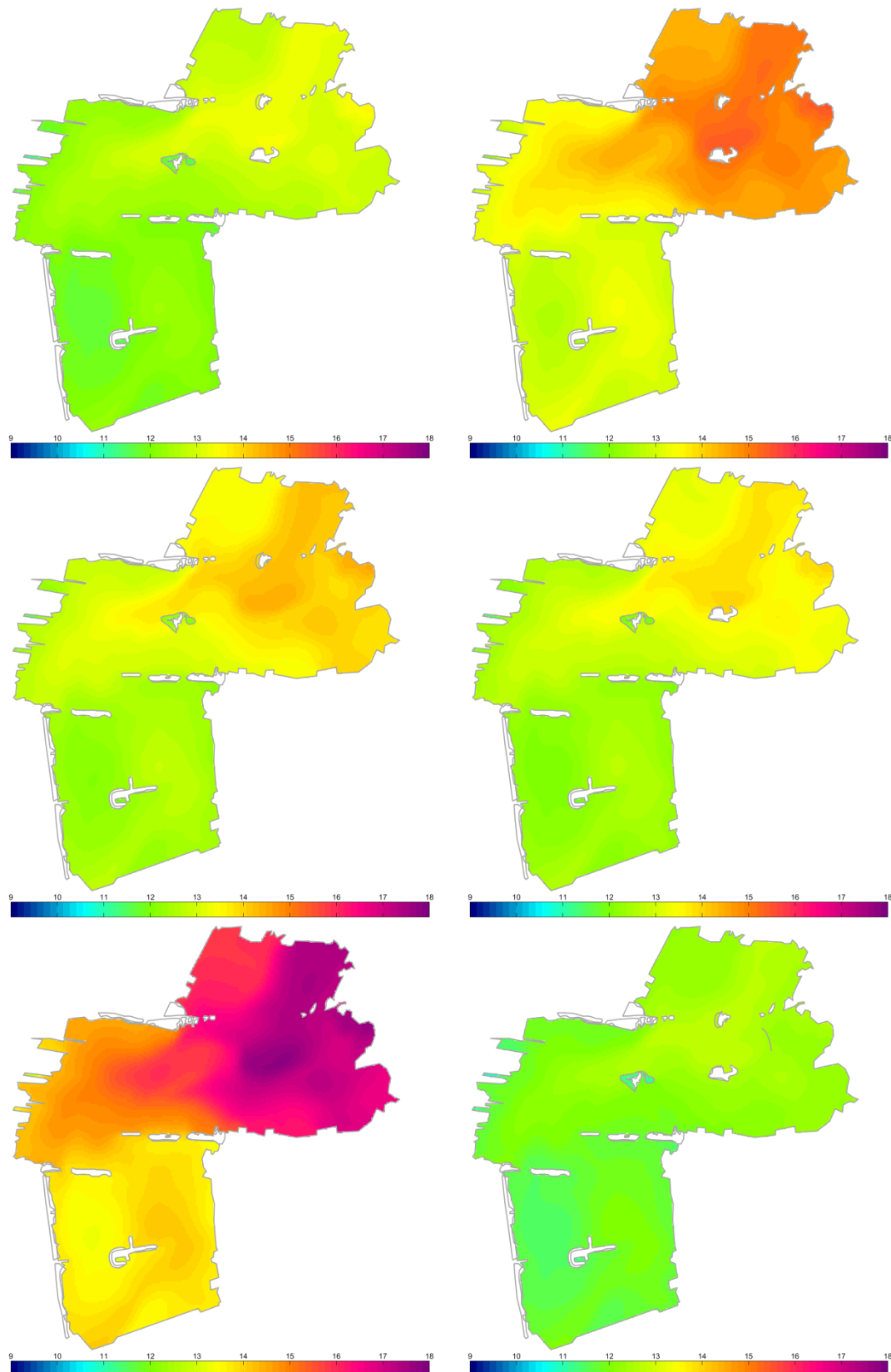
Figuur F.3 Modelresultaten voor gemiddelde over voorjaar van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



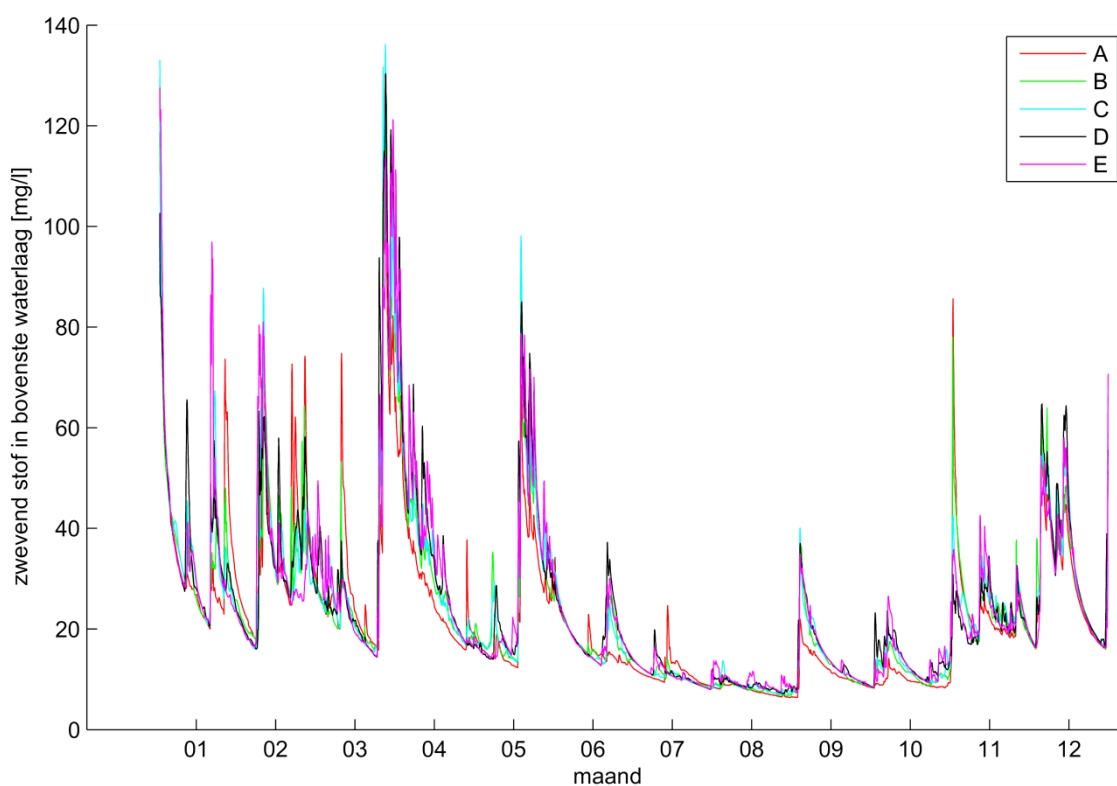
Figuur F.4 Modelresultaten voor gemiddelde over voorjaar van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



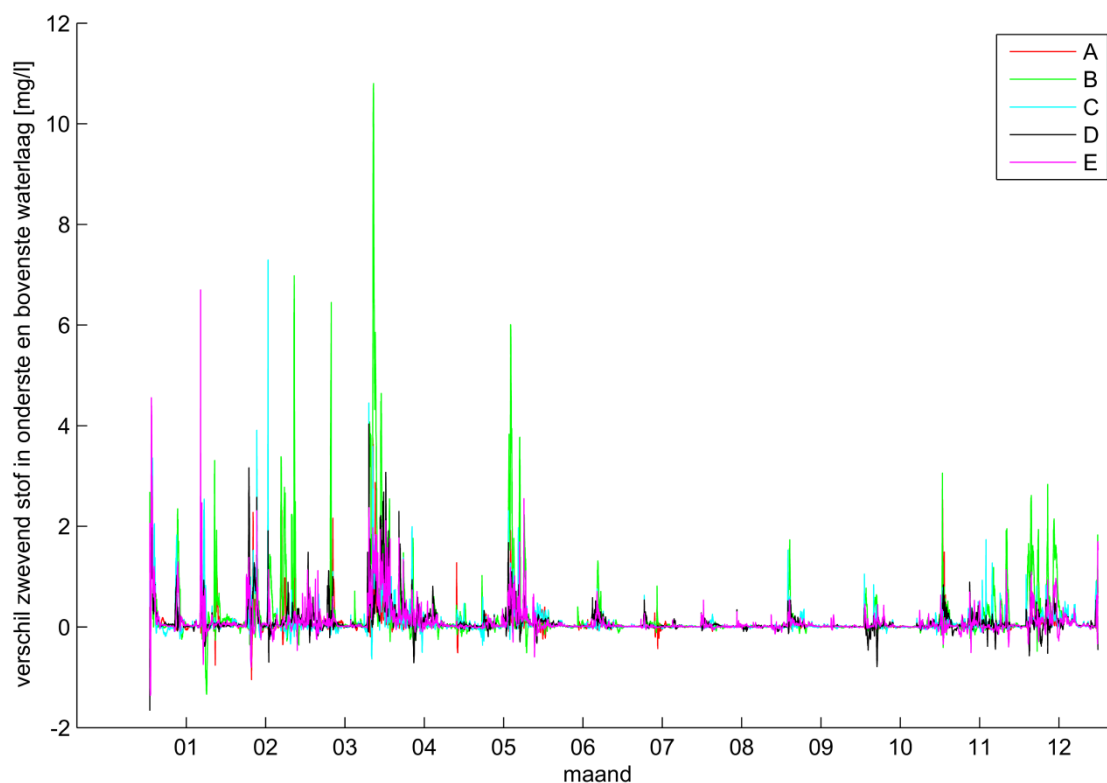
Figuur F.5 Modelresultaten voor gemiddelde over zomer van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



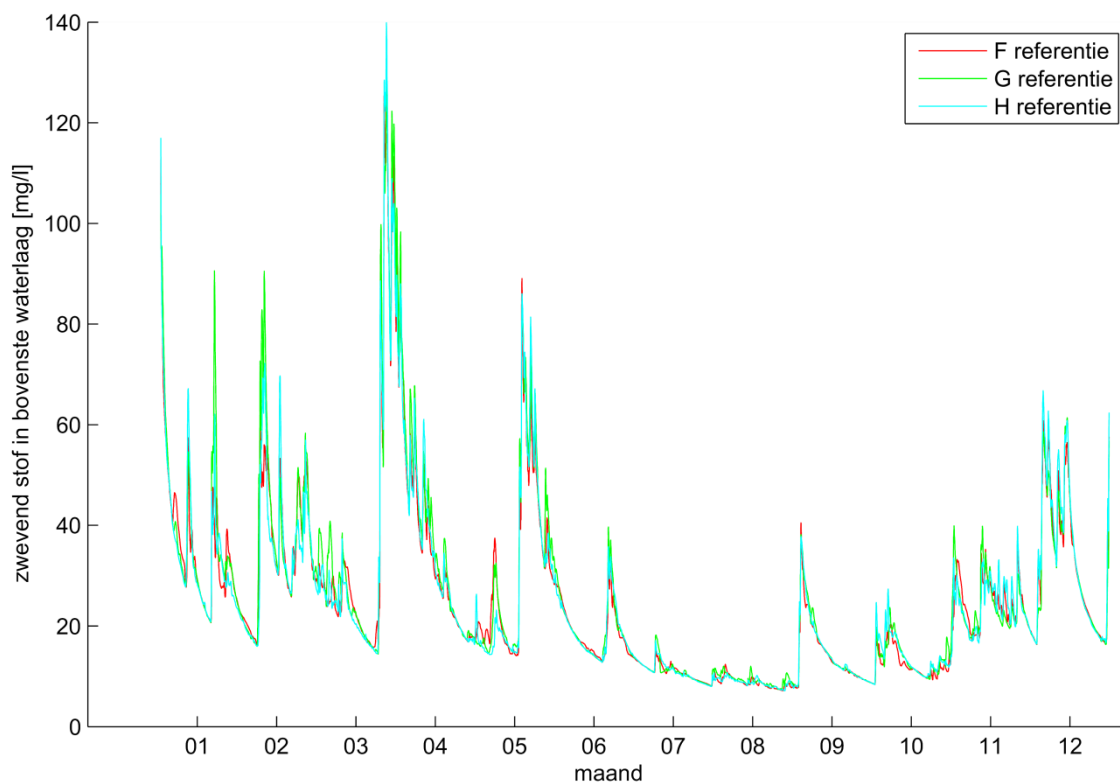
Figuur F.6 Modelresultaten voor gemiddelde over zomer van zwevend stof [mg/l] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



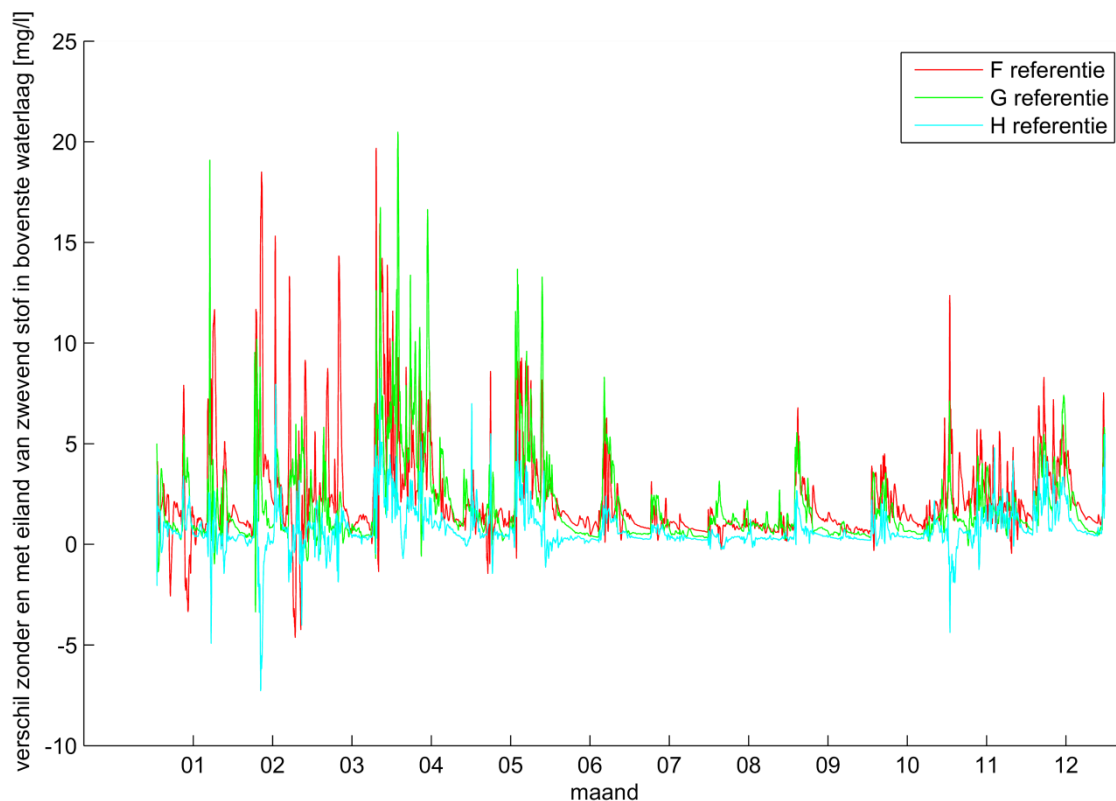
Figuur F.7 Modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag voor referentie bij observatiepunt A t/m E.



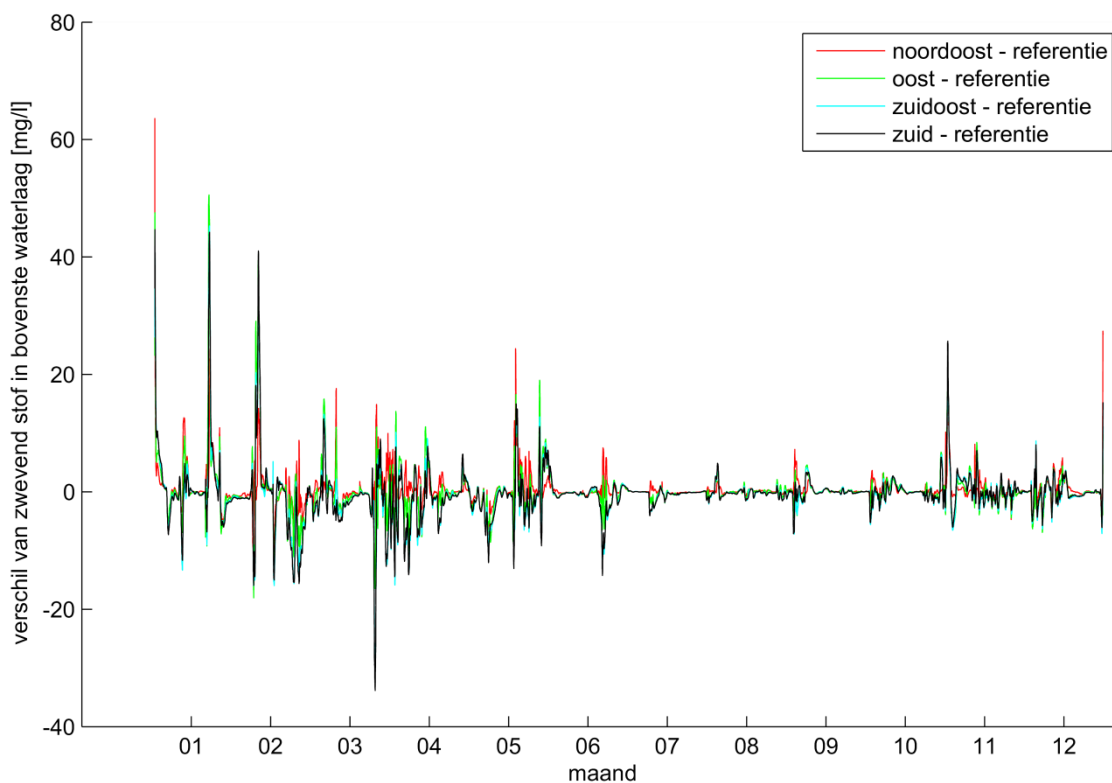
Figuur F.8 Verschil tussen onderste en bovenste waterlaag voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] voor referentie bij observatiepunt A t/m E.



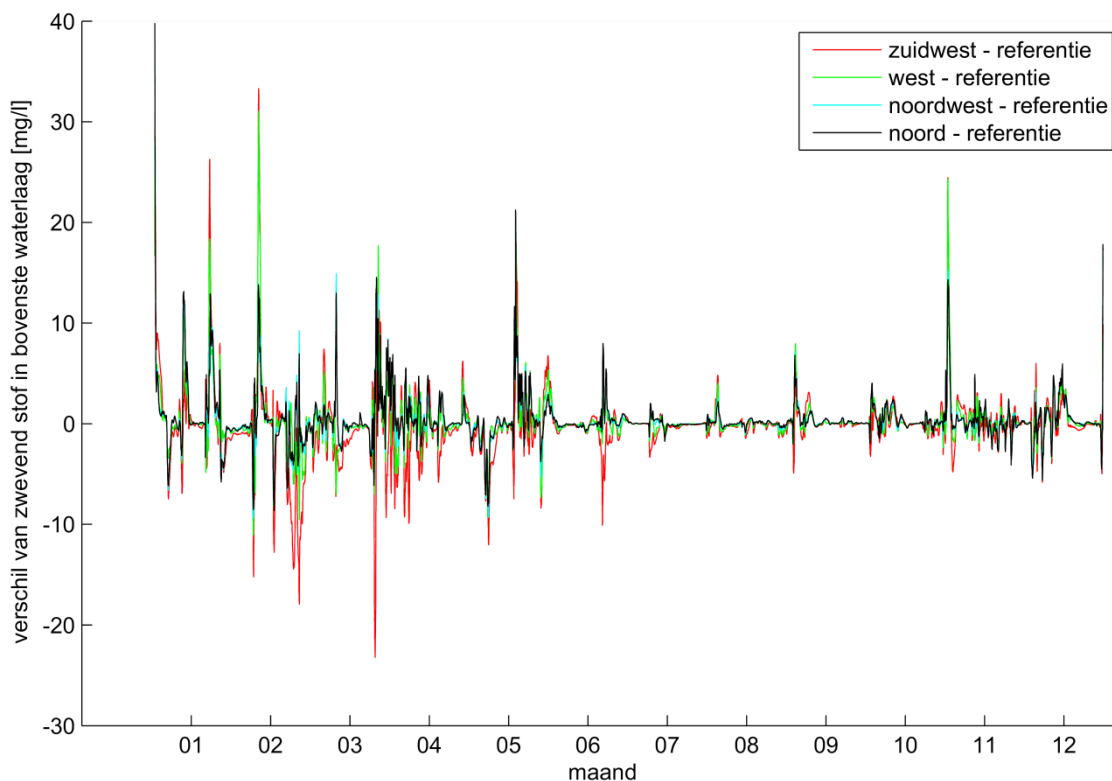
Figuur F.9 Modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag voor referentie bij observatiepunt F referentie t/m H referentie.



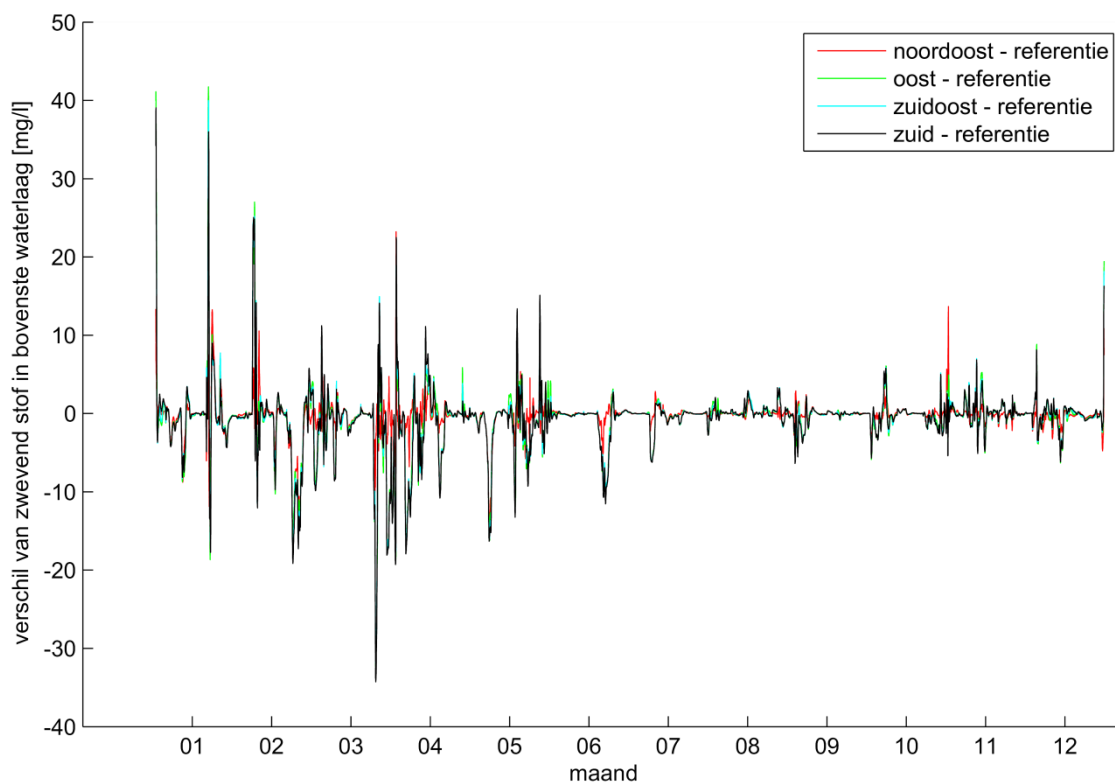
Figuur F.10 Verschil tussen scenario 1 (respectievelijk 2 en 3) en referentie bij observatiepunt F (respectievelijk G en H) referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.



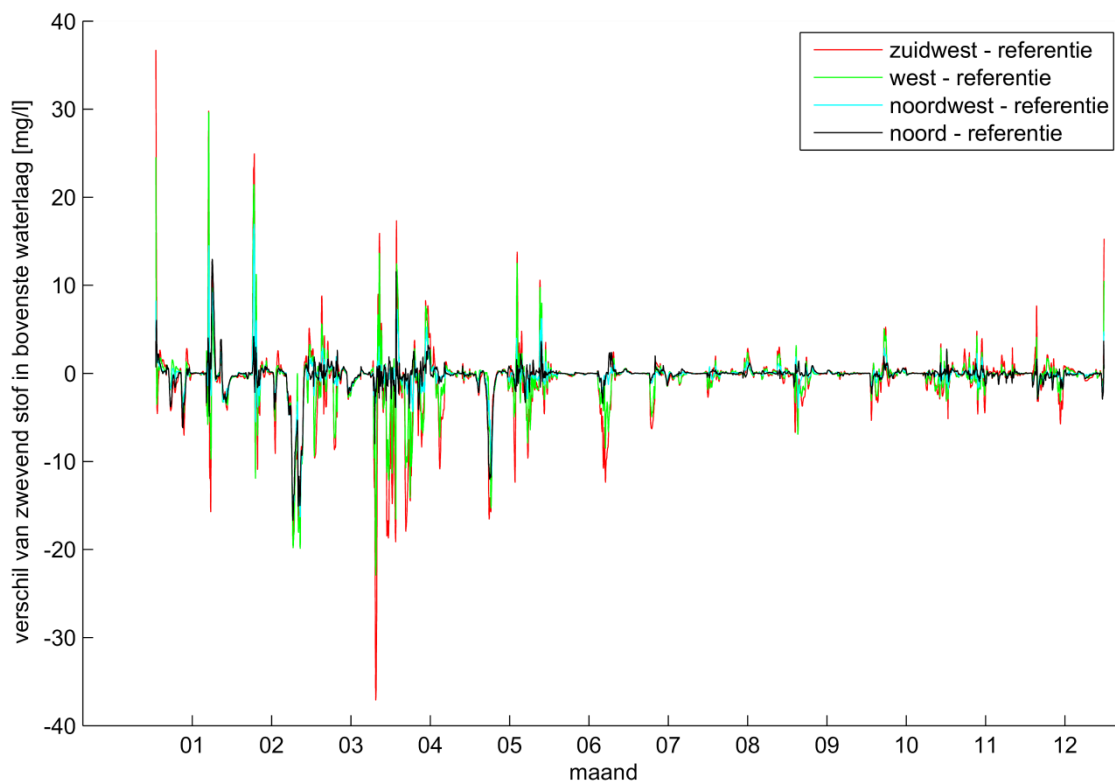
Figuur F.11 Verskil voor referentie tussen oostelijke observatiepunten rondom eiland Hoek en F referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.



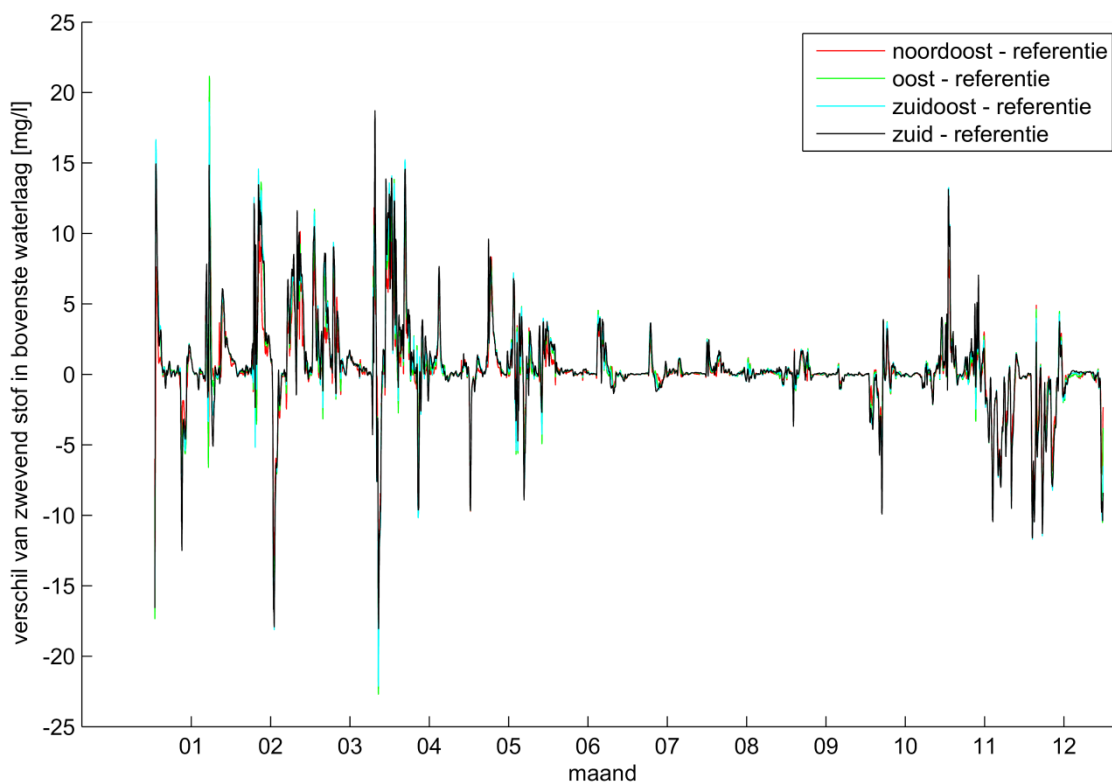
Figuur F.12 Verskil voor referentie tussen westelijke observatiepunten rondom eiland Hoek en F referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.



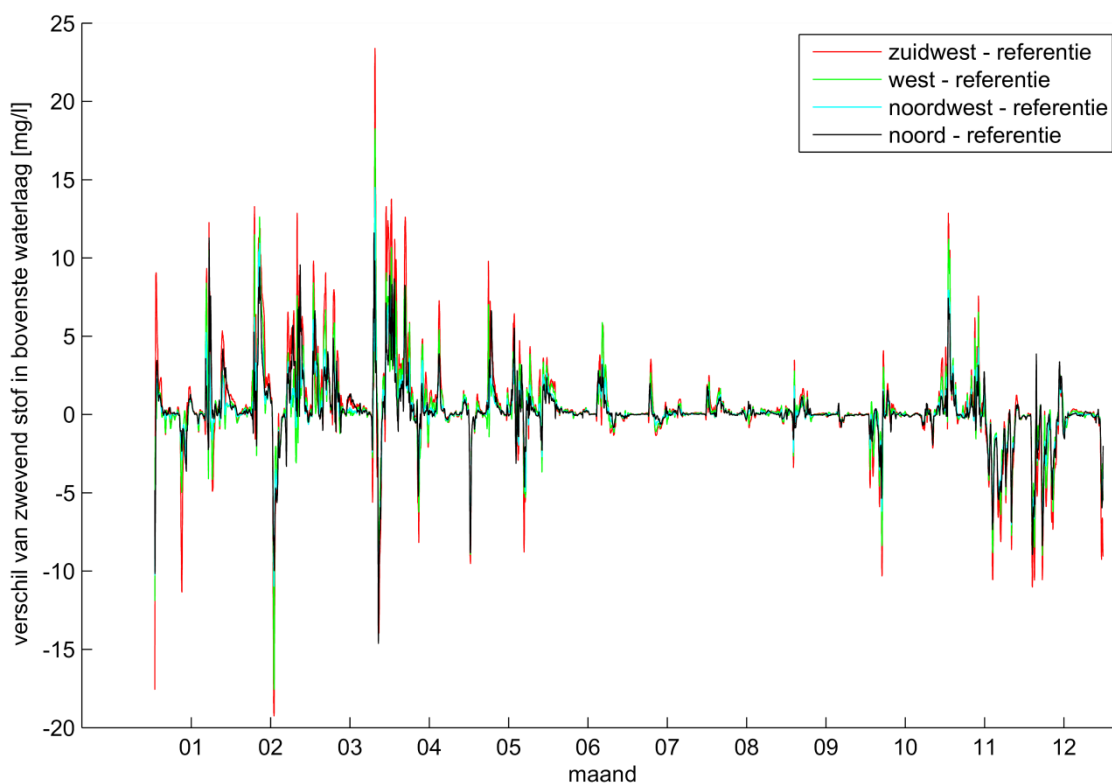
Figuur F.13 Verskil voor referentie tussen oostelijke observatiepunten rondom eiland Markus Pos en G referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.



Figuur F.14 Verskil voor referentie tussen westelijke observatiepunten rondom eiland Markus Pos en G referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.

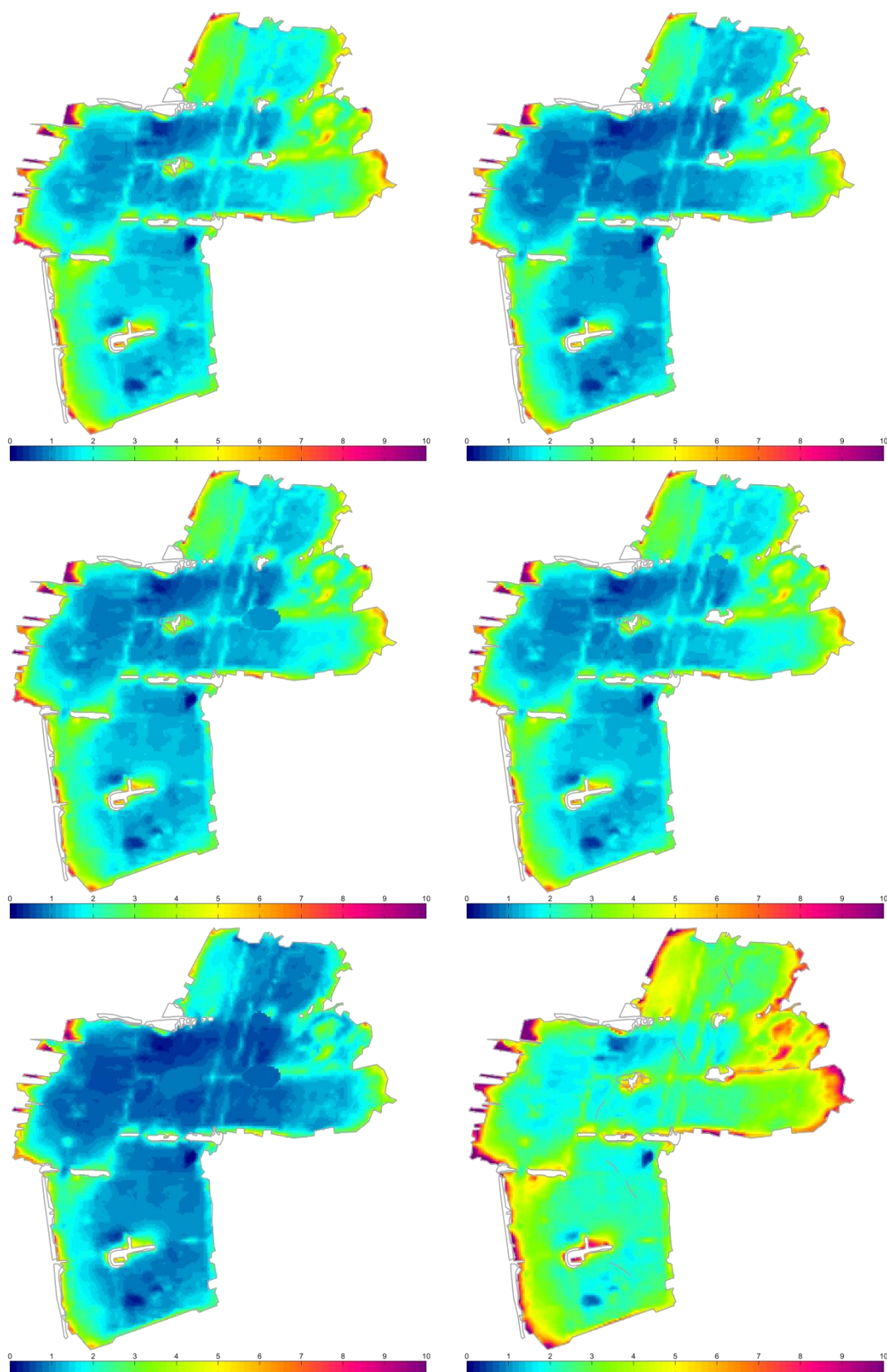


Figuur F.15 Verschil voor referentie tussen oostelijke observatiepunten rondom eiland Robinson Crusoe en H referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.

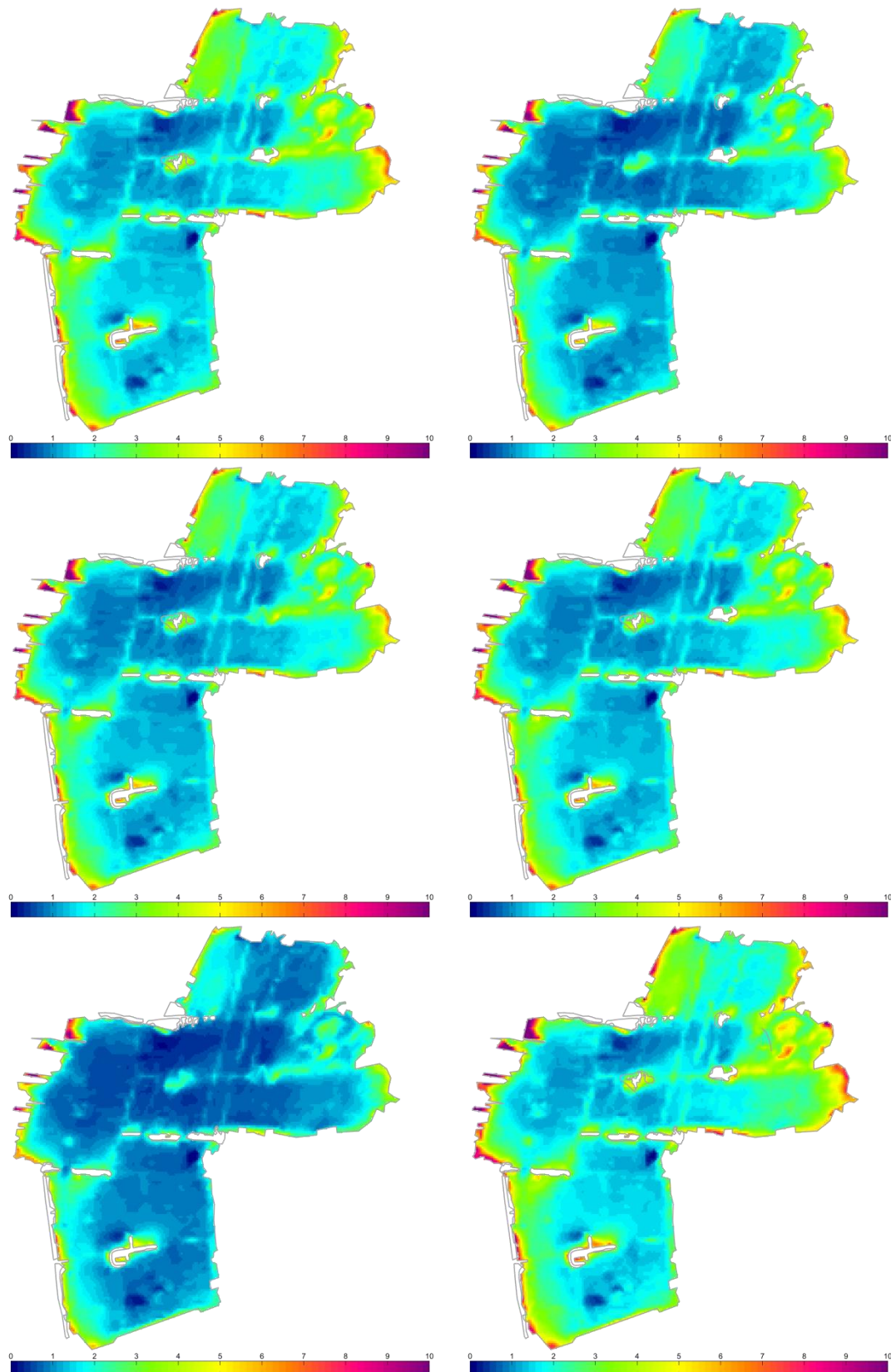


Figuur F.15 Verschil voor referentie tussen westelijke observatiepunten rondom eiland Robinson Crusoe en H referentie voor modelresultaten van verloop van zwevend stof [mg/l] in bovenste waterlaag.

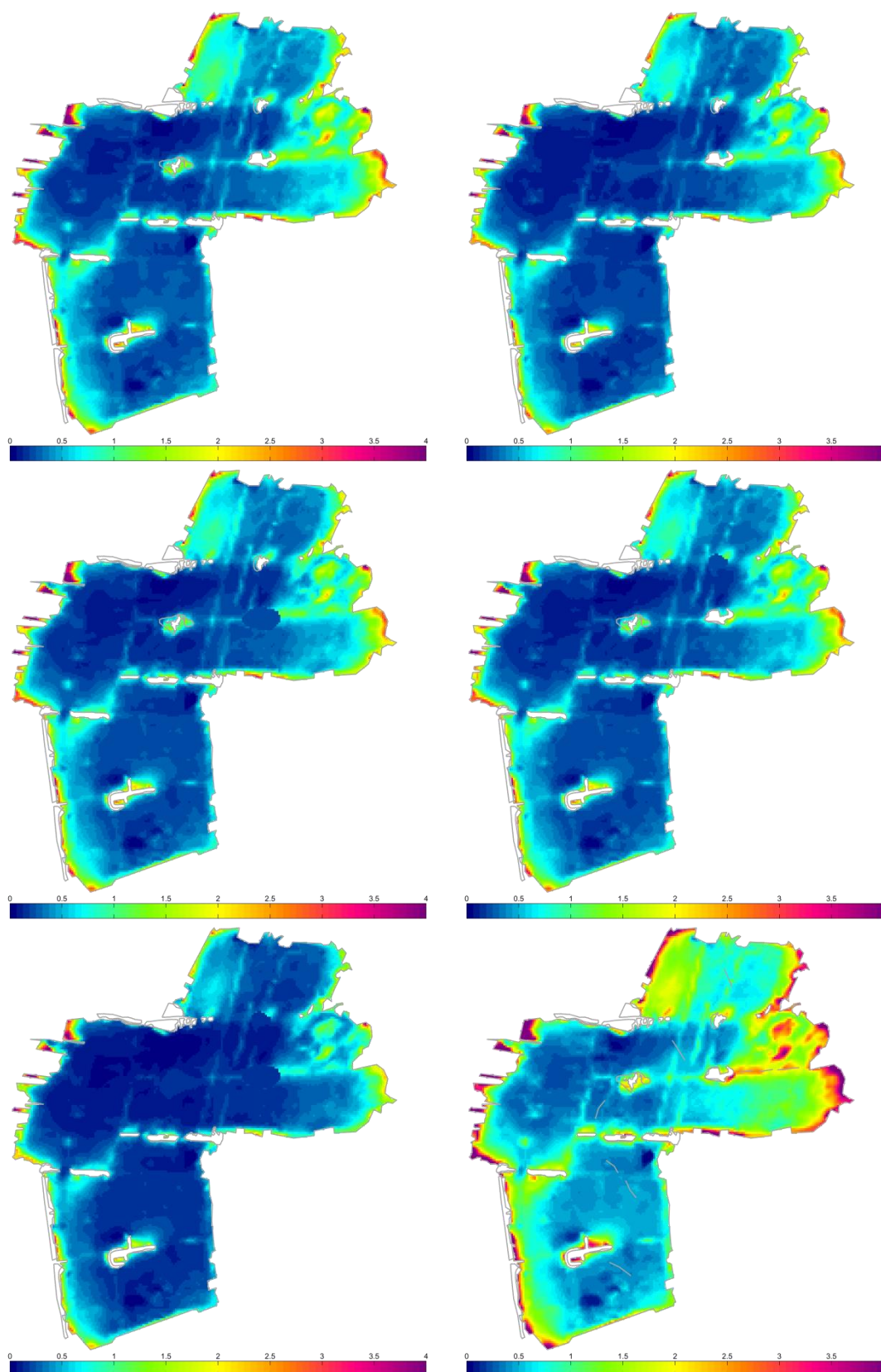
G Resultaten scenario berekeningen licht



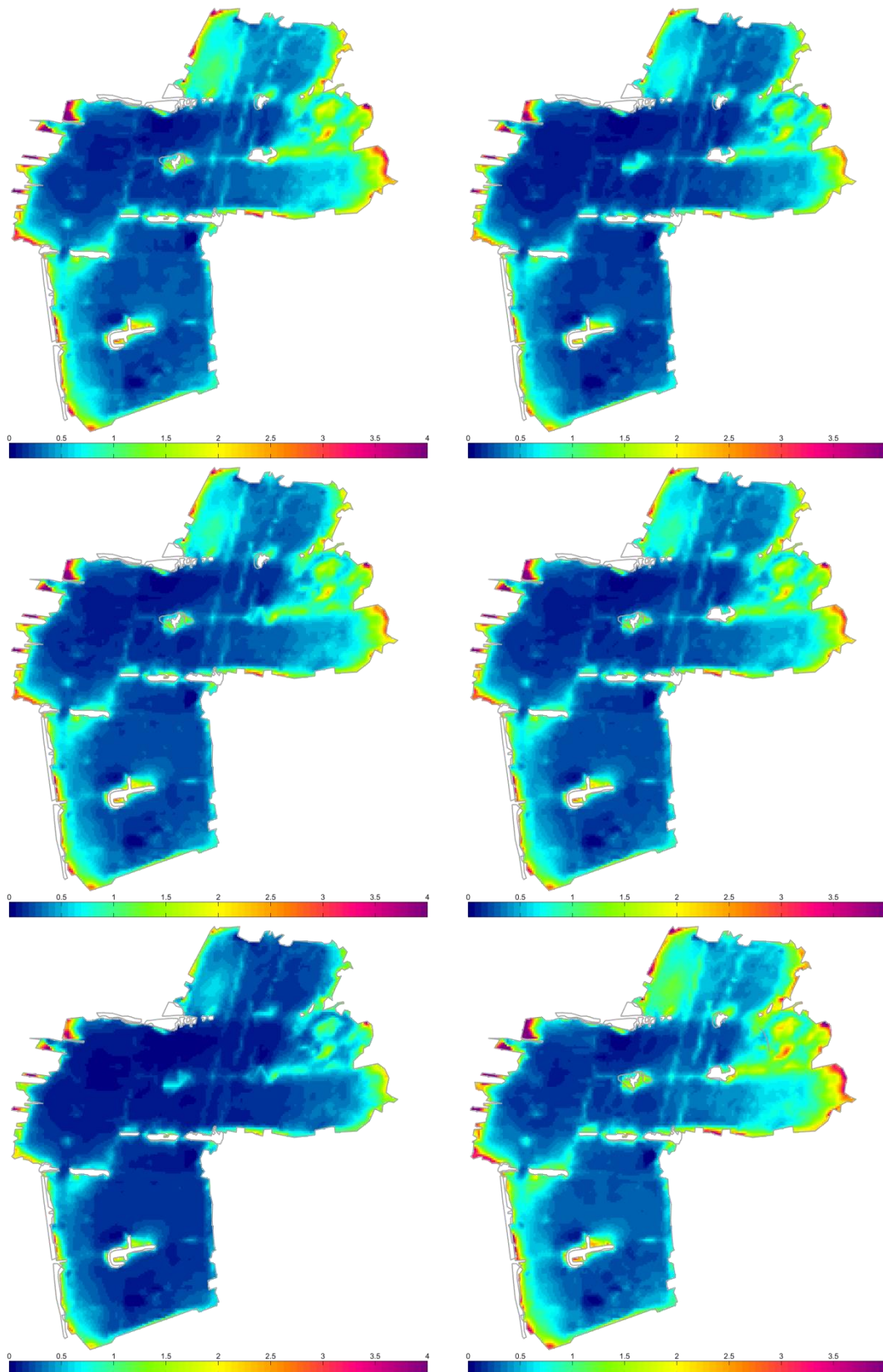
Figuur G.1 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



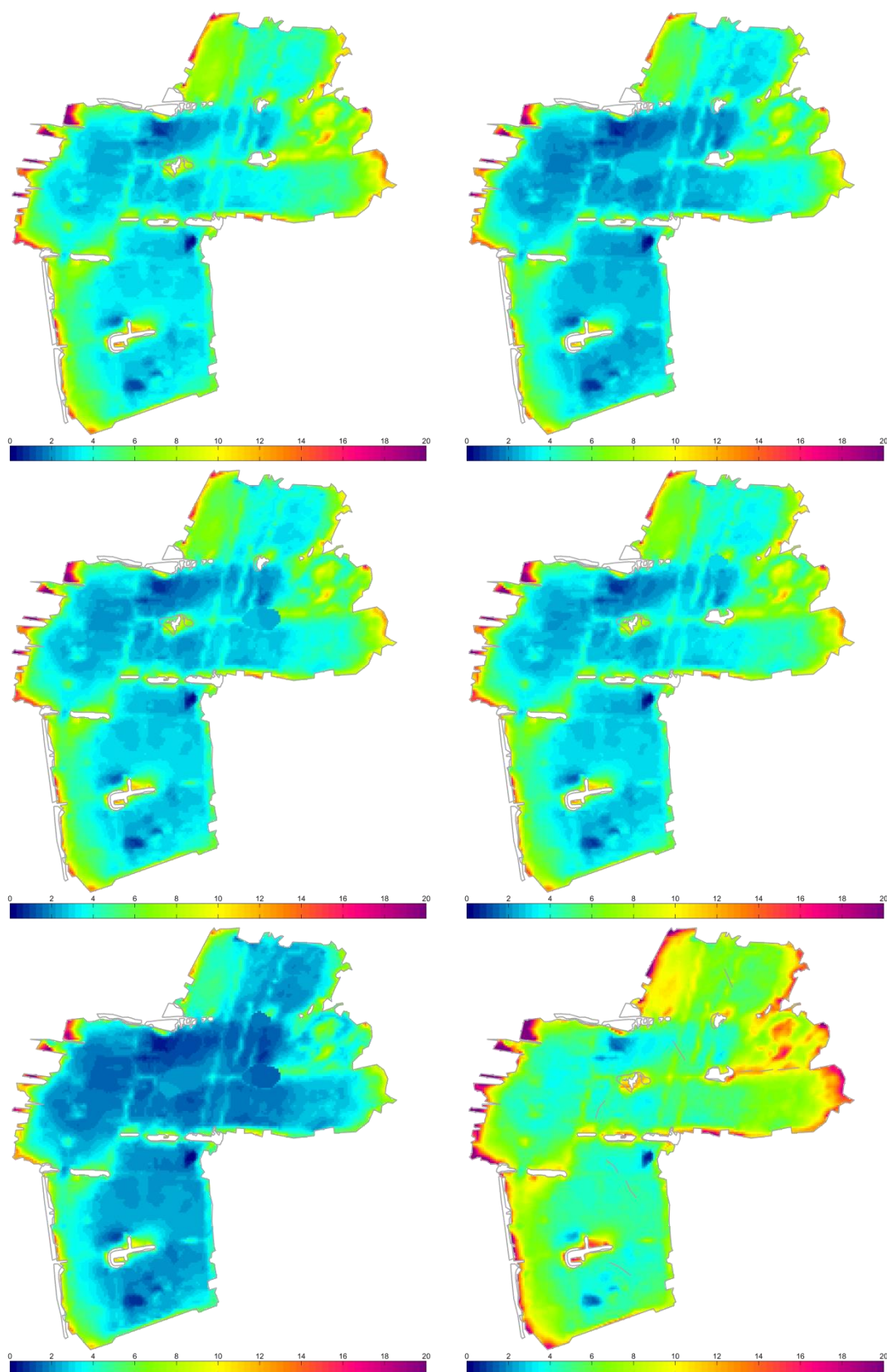
Figuur G.2 Modelresultaten voor gemiddelde over jaar van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



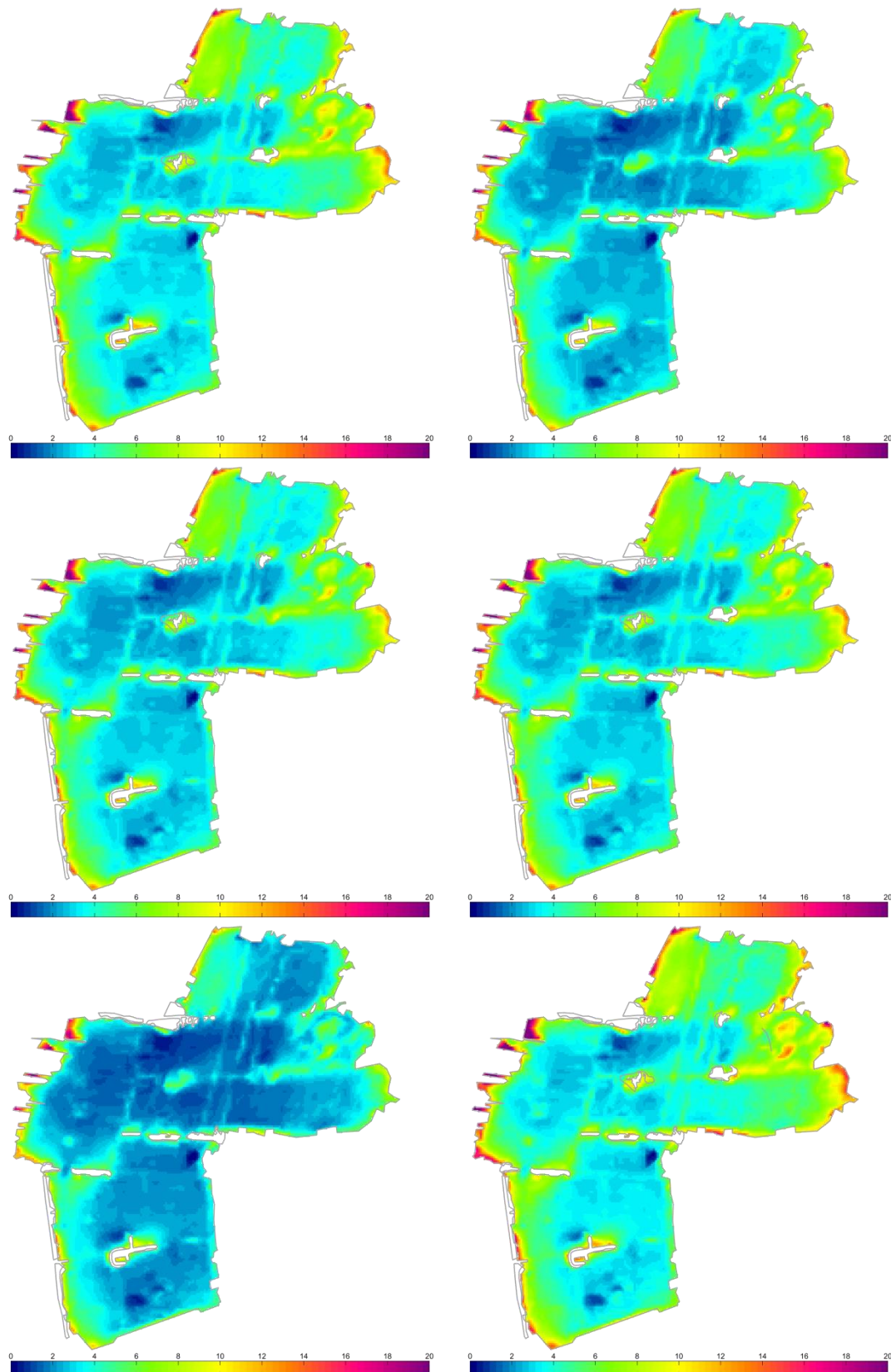
Figuur G.3 Modelresultaten voor gemiddelde over voorjaar van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



Figuur G.4 Modelresultaten voor gemiddelde over voorjaar van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.



Figuur G.5 Modelresultaten voor gemiddelde over zomer van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 1 t/m scenario 5.



Figuur G.6 Modelresultaten voor gemiddelde over zomer van lichtfractie [%] in midden van waterkolom voor (van links naar rechts, van boven naar onder) referentie, scenario 6 t/m scenario 10.