A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are scattered across the page, with some larger circles acting as hubs.

KWR 2024.071 | Mei 2024

Effecten van zonnepanelen op bekkens

Samenwerkingspartners



Rapport

Effecten van zonnepanelen op bekkens

KWR 2024.071 | Mei 2024

Opdrachtnummer

403486

Projectmanager

Erwin Beerendonk

Samenwerkingspartners

PWN, Evides, de Watergroep, WML, AqWa ecologisch advies, Floating Solar

Auteurs

Bas Wols, Maria Lousada-Ferreira, Pan Quan

Kwaliteitsborger

Roberta Hofman-Caris

Verzonden naar

Samenwerkingspartners

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

bekken, zonnepanelen

[Jaar van publicatie](#)
2024

[Meer informatie](#)
Dr. Ir. Bas Wols
T +31 30 606 9604
E Bas.Wols@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Mei 2024 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

Drinkwaterbedrijven in Nederland zijn bezig om klimaatneutraal te worden en een middel hiertoe is om hun eigen duurzame energie op te wekken. Oppervlaktewaterbekkens vormen een groot oppervlak en zijn daarom een interessante plek voor drijvende zonnepanelen. Hiervoor zijn diverse drijvende systemen ontwikkeld, welke reeds toegepast worden op binnenwateren en wereldwijd sterk in opkomst zijn. De bekkens voor de drinkwaterproductie vormen de eerste stap in de drinkwaterzuivering. In tegenstelling tot andere waterlichamen, heeft het plaatsen van zonnepanelen dus niet alleen een effect op het ecologische functioneren, maar ook op de kwaliteit van het drinkwater dat hieruit geproduceerd wordt. Een belangrijk uitgangspunt voor waterbedrijven is dat de waterkwaliteit in de bekkens door het plaatsen van systemen met zonnepanelen niet verslechtert.

Studies van zonnepanelen op binnenwateren laten zien dat er lokaal effecten kunnen zijn van het plaatsen van zonnepanelen op temperatuur, zuurstof en waterkwaliteit. De impact hiervan hangt sterk af van de (hydrodynamische) condities van het binnenwater en de bedekking met zonnepanelen. Aan de andere kant kunnen drijvende panelen kansen bieden om de functie van het bestaande opslag- of zuiveringsproces uit te breiden en/of te verbeteren, bijvoorbeeld door verbetering van mengpatronen, door lokale beschaduwing en door het tegengaan van verdamping.

Op dit moment zijn er geen voorbeelden van diepe bekkens met drijvende zonnepanelen die een aanzienlijk deel van het wateroppervlak bestrijken. Daarom is een modelstudie uitgevoerd waarin de hydrodynamica van drie bekkens zijn gemodelleerd: WPJ reservoir (PWN), Petrusplaat (Evides) en De Lange Vlieter (WML). Voor de eerste twee bekkens is ook de waterkwaliteit gemodelleerd. De modellering is uitgevoerd voor een simulatietijd van één jaar. Hiervoor is gebruik gemaakt van Delft3D en Delwaq. Dit zijn softwarepakketten ontwikkeld door Deltares voor grootschalige oppervlaktewateren. Voor ieder bekken is een berekening uitgevoerd met en zonder zonnepanelen en is een specifiek legplan van zonnepanelen in samenspraak met de waterbedrijven opgesteld. Dit resulteerde in een bedekking van 40% voor het WPJ reservoir, 30% voor spaarbekken Petrusplaat en 10% voor spaarbekken De Lange Vlieter. Het plaatsen van eilanden met zonnepanelen is in het model geschematiseerd door aanpassing van de warmteoverdracht en windsnelheden aan het oppervlak.

Uit de hydrodynamische modellering blijkt dat het plaatsen van zonnepanelen met een bedekkingsgraad van 10-40% de mengpatronen door wind en beluchting in het bekken verandert. De recirculatiecellen die ontstaan door de beluchting en de windpatronen lijken kleiner te worden, dit leidt echter niet tot extra stratificatie. Ook veranderen de temperatuur- en zuurstofprofielen niet of nauwelijks. Het grootste effect van de zonnepanelen is zichtbaar in de temperatuurverdeling over het jaar: (i) Het water warmt in het voorjaar minder snel op, doordat de zonnepanelen het zonlicht blokkeren en (ii) het koelt in het najaar minder snel af, omdat de zonnepanelen de warmte vasthouden. Ook zijn er bij het bekken van PWN lokaal effecten waarneembaar direct onder de zonnepanelen, waar de watertemperatuur toenam in een aantal gevallen door het wegvallen van de stroomsnelheden. Uit de modellering van de waterkwaliteit zijn ook geen sterke effecten zichtbaar door het plaatsen van drijvende zonnepanelen. De waterkwaliteitsmodellering is echter sterk indicatief en kan de werkelijkheid maar beperkt beschrijven, omdat gewerkt is met standaardinstellingen en er vanwege de lange rekentijden niet gekalibreerd is voor het specifieke bekken.

Naast modellering is er aan het begin van het project een workshop gehouden om de kansen én risico's van drijvende zonnepanelen op bekkens in kaart te brengen. De conclusie van de workshop was dat het nodig is om diverse effecten te meten, voordat besloten kan worden tot grootschalige toepassing van drijvende zonnepanelen op bekkens. Dit vraagt om een multidisciplinaire aanpak, waarbij niet alleen technische en fysisch/chemische

parameters worden bekeken, maar ook bijvoorbeeld ecologische effecten worden meegenomen, en de effecten op ook flora en fauna in kaart worden gebracht. De modellering die gedaan is in dit project geeft wel indicaties dat het effect op de waterkwaliteit waarschijnlijk klein is, maar om goed de omvang en impact van drijvende zonnepanelen op de waterkwaliteit te evalueren is een meetcampagne met een tijdsduur van enkele jaren nodig.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Rapport	3
Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 Zonnepanelen op bekkens	8
1.2 Doel van het onderzoek	9
1.3 Aanpak	9
1.4 Modellerings	10
1.5 Leeswijzer	10
2 Aanpak modellering	12
2.1 Inleiding	12
2.2 Hydrodynamische modellering	12
2.3 Waterkwaliteitsmodellering	15
3 Resultaten hydrodynamische modellering	17
3.1 Bekken PWN (WPJ reservoir)	17
3.1.1 Vergelijking met metingen	19
3.1.2 Effect zonnepanelen	21
3.2 Bekken Evides (Petrusplaat)	23
3.2.1 Vergelijking met metingen	27
3.2.2 Effect zonnepanelen	30
3.3 Bekken WML (De Lange Vlieter)	33
3.3.1 Vergelijking met metingen	36
3.3.2 Effect zonnepanelen	38
3.4 Discussie	40
4 Resultaten waterkwaliteitsmodellering	42
4.1 Bekken PWN (WPJ reservoir)	42
4.1.1 Vergelijking met metingen	44
4.1.2 Effect zonnepanelen	45
4.2 Bekken Evides (Petrusplaat)	49
4.2.1 Vergelijking met metingen	50
4.2.2 Effect zonnepanelen	53
4.3 Discussie	56
5 Resultaten workshop	57
6 Conclusies en aanbevelingen	62

6.1	Conclusies	62
6.2	Aanbevelingen	62
	Referenties	64
	Bijlage I: monitoringsplan	66
	Bijlage II: gemodelleerde overige waterkwaliteitsparameters	88

1 Inleiding

1.1 Zonnepanelen op bekkens

Oppervlaktewater bekkens zijn reservoirs waarin water (tijdelijk) wordt opgeslagen. Het is vaak de eerste stap in de zuivering van oppervlaktewater naar drinkwater. Er vinden diverse fysische, chemische en biologische processen plaats in bekkens, welke zowel een positieve als een negatieve invloed kunnen hebben op de waterkwaliteit (Bertelkamp et al., BTO 2020.018). Bekkens kunnen ook een voorraadfunctie hebben, zodat een waterbedrijf selectief oppervlaktewater kan innemen in gevallen van verminderde kwaliteit van het oppervlaktewater.

Waterbedrijven zijn bezig om klimaatneutraal te worden en willen daarom hun eigen energie kunnen opwekken. De bekkens vormen een groot oppervlak en zijn daarom een interessante plek voor eilanden met zonnepanelen. Hiervoor zijn diverse drijvende systemen ontwikkeld (Ziar et al. 2021), welke reeds toegepast worden op binnenwateren en wereldwijd in sterke opkomst zijn (Cazzaniga en Rosa-Clot, 2021). De opbrengst van de zonnepanelen kan zelfs beter zijn op open water, omdat de panelen beter gekoeld worden (Dörenkämper et al., 2021). Een ander belangrijk energetisch voordeel van zonnepanelen op water die met de zon mee kunnen draaien, is het verhoogde rendement als gevolg van de optimale oriëntatie ten opzichte van de zoninstraling. De bekkens vormen vaak de eerste stap in de drinkwaterzuivering. In tegenstelling tot andersoortige bekkens, heeft het plaatsen van zonnepanelen dus niet alleen een effect op het ecologische functioneren, maar ook op de kwaliteit van het drinkwater dat hieruit geproduceerd wordt. Een belangrijk uitgangspunt voor waterbedrijven is dat de waterkwaliteit in de bekkens niet verslechtert. Studies van zonnepanelen op binnenwateren laten zien dat er lokaal effecten kunnen zijn van het plaatsen van zonnepanelen op temperatuur, zuurstof en waterkwaliteit (Yang et al., 2022; Liu et al., 2023, Bax et al., 2023). De impact hiervan hangt sterk af van de (hydrodynamische) condities van het binnenwater en de bedekking met zonnepanelen (Nobre et al., 2023). Aan de andere kant kunnen drijvende panelen kansen bieden om de functie van het bestaande opslag- of zuiveringsproces uit te breiden en/of te verbeteren, bijvoorbeeld door verbetering van mengpatronen, door lokale schaduwwerking en door het tegengaan van verdamping.



Figuur 1 Eerste drie zonne-eilanden die getest zijn bij PWN (referentie: Floating Solar Projecten)

1.2 Doel van het onderzoek

Een belangrijke vraag is op welke ecologische, fysische en chemische waterkwaliteitsparameters het plaatsen van zonnepanelen effect zal hebben. Deze kennis is noodzakelijk om een procedé op te kunnen stellen waarmee de risico's maar zeker ook de meerwaarde op het functioneren van bekkens (in de breedste zin) inzichtelijk gemaakt kunnen worden. Doel van het onderzoek is om een beeld te krijgen van het effect van het plaatsen van zonnepanelen op de waterkwaliteit van bekkens.

Op dit moment monitoren de waterbedrijven de waterkwaliteit van bekkens waar de zonnepanelen zijn of in de toekomst zullen worden geplaatst. Het momenteel toegepaste monitoringsprogramma is weergegeven in bijlage I.

1.3 Aanpak

Drie bekkens (Tabel 1) zijn onderzocht waarvoor plannen bestaan om zonnepanelen op te leggen. De waterkwaliteit in de bekkens wordt in veel gevallen gemonitord aan de hand van meetgegevens. Op verschillende plekken in de bekkens wordt een breed scala aan waterkwaliteitsparameters bemonsterd met een vaste frequentie (meestal eens per 1-2 weken), zodat een goed beeld ontstaat van de waterkwaliteit door het jaar heen. Er zijn echter nog geen voorbeelden van bekkens, waarin oppervlaktewater wordt opgeslagen dat als grondstof voor de productie van drinkwater dient, waarop met een hoge bedekkingsgraad (>30%) zonne-eilanden geplaatst zijn. Daarnaast verschillen de kenmerken en het gebruik van bekkens sterk. Zo is het bekken van PWN een procesbekken met een relatief korte verblijftijd (ongeveer een maand), terwijl het bekken van WML een voorraadbekken is met een zeer lange verblijftijd (1.5-2 jaar). Het effect van de zonnepanelen op de waterkwaliteit van de bekkens kan daarom vooralsnog alleen ingeschat worden aan de hand van modellen (paragraaf 1.4).

De waterbedrijven deelden hun momenteel toegepaste monitoringsprogramma. De informatie is verzameld en geordend in verschillende tabellen, weergegeven in bijlage I, samen met een korte leeswijzer. Ter vergelijking zijn ook de door Deltares geadviseerde parameters voor binnenwateren met zonnepanelen weergegeven. Bijlage I is bedoeld als leidraad bij het opstellen van een monitoringsprogramma voor bekkens met zonnepanelen, met als doel de effecten van zonnepanelen op de waterkwaliteit, fauna en flora te kwantificeren.

Tabel 1 Overzicht van de onderzochte bekkens

	PWN (WPJ reservoir)	Evides (Petrusplaat)	WML (De Lange Vlieter)
Volume	4.6 Mm ³	13 Mm ³	25 Mm ³
Oppervlakte	50 ha	100 ha	125 ha
Diepte gem. (max)	9m (22 m)	13m (15m)	20m (35m)
Verblijftijd	15 dagen	23,5 dagen	~2 jaar
Beluchting	320 m ³ /h (1 injectie)	720 m ³ /h (3 injecties)	Hoofdbekken: 984 m ³ /h (6 injecties) Voorbekken: 58,2 m ³ /h (3 injecties)

Een onderdeel van dit project was het organiseren van een workshop, waarin de kansen én risico's van drijvende zonnepanelen op bekkens in kaart gebracht konden worden. Omdat het nuttig zou zijn aan het begin van het project al een beeld te hebben van de mogelijke risico's, en de monitoring daarop af te kunnen stemmen, is besloten deze workshop aan het begin van het project te organiseren. Op deze workshop gaf Floating Solar een presentatie over hun drijvende systemen met zonnepanelen bij Evides en PWN, en brachten specialisten de technische en hydrodynamische aspecten van drijvende zonnepanelen voor het voetlicht. Daarnaast werd door de programmamanager van de Coalitie Blauwe Hart Natuurlijk ook gewezen op mogelijk ecologische gevolgen, en met welke parameters rekening gehouden zou moeten worden daarvoor.

1.4 Modelling

Het modelleren van grote oppervlaktewater bekkens is complex, omdat het grootschalige systemen zijn, waarin zowel processen met korte tijdschalen als lange tijdschalen een rol spelen. Dit vraagt om numerieke modellen waarin in voldoende detail de stroming en menging worden berekend, maar die ook over een langere periode doorgerekend kunnen worden om bijvoorbeeld effecten als stratificatie en fytoplanktongroei mee te nemen.

In een workshop (10 december 2020) zijn de verschillende typen modellen en processen die in het bekken spelen besproken en geprioriteerd met de opdrachtgevers. De hydraulisch processen (menging) worden gezien als het belangrijkste en zijn van grote invloed op de waterkwaliteit. Voor de modellering van waterkwaliteit gaat het dan in eerste instantie om conservatieve grootheden. Op basis hiervan is onderscheid gemaakt tussen hydrodynamische modellering en waterkwaliteitsmodellering. Het doel van de modellering is om antwoord te vinden op de vragen:

- In hoeverre hinderen of stimuleren zonnepanelen de menging en (de)stratificatie?
- Wat is het effect van het plaatsen van zonnepanelen op de waterkwaliteit (bijv. fytoplanktonontwikkeling)?

1.5 Leeswijzer

Dit rapport beschrijft de modellering van drie Nederlandse bekkens die de eerste stap vormen in de drinkwaterproductie: bekken Andijk (PWN), bekken Petrusplaat (Evides), bekken De Lange Vlieter (WML). Kentallen van de bekkens staan gegeven in Tabel 1. De karakteristieken en functies van de bekkens verschillen: het bekken van WML is een voorraadbekken met een verblijftijd van 2 jaar, terwijl de bekkens van PWN en Evides een veel

kortere verblijftijd hebben (minder dan een maand). Voor elk bekken is een situatie met en zonder zonnepanelen doorgerekend, om het effect van de zonnepanelen te kunnen inschatten. De aanpak van de modellering is beschreven in hoofdstuk 2. De modellering is onderverdeeld in hydrodynamische modellering, waarvan de resultaten van de drie bekkens zijn beschreven in hoofdstuk 3, en waterkwaliteitsmodellering, beschreven in hoofdstuk 4. Een overzicht van de presentaties tijdens de workshop en de daaruit volgende conclusies zijn weergegeven in hoofdstuk 5. Conclusies en aanbevelingen van het project zijn beschreven in hoofdstuk 6. Bijlage I toont de huidige monitoringsprogramma's die door de projectpartners worden toegepast om de effecten van zonnepanelen op de waterkwaliteit, fauna en flora van bekkens te kwantificeren. De informatie is georganiseerd in tabellen, waarin de parameters, de meetfrequentie en de bemonsteringslocaties zijn aangegeven.

2 Aanpak modellering

2.1 Inleiding

Het principe van de modellering berust op het opdelen van het domein van het bekken in kleine elementen waarop de vergelijkingen van de fysische, chemische en biologische processen opgelost worden. De processen die plaatsvinden in het bekken zijn tijdsafhankelijk en daarom worden de vergelijkingen opgelost voor kleine tijdstappen. Omdat dit complexe numerieke modellen zijn, wordt hiervoor gebruik gemaakt van bestaande software-pakketten.

Voor de modellering van de bekkens is het van belang de waterbeweging veroorzaakt door onder meer wind en beluchting nauwkeurig te kunnen beschrijven. Omdat de watersnelheden hierdoor hoog kunnen zijn (tot 1 m/s) moet het bekken opgedeeld worden in kleine elementen en zijn kleine tijdstappen nodig. Aan de andere kant is het van belang de processen die over een langere tijdschaal (maanden) plaatsvinden (bijv. seizoensverschillen, stratificatie en fytoplanktongroei) mee te nemen. Dit vraagt om een compromis tussen de grootte van de rekenelementen en tijdstappen om de rekentijd acceptabel te houden.

Het meest nauwkeurig is gebruik maken van volledige 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) modellen, waarin alle details van de stroming opgelost worden. Hier worden vaak wel aannames gedaan voor de modellering van de turbulentie, omdat het anders te rekenintensief wordt. Echter, nog steeds kan hiermee niet een volledig bekken over een langere tijd doorgerekend worden. Wat soms wel gedaan wordt, is met de CFD een stationaire berekening doen en het bekken vervolgens op basis van de stromingsberekening opdelen in grote compartimenten waarop de tijdsafhankelijke waterkwaliteitsparameters worden berekend (bijvoorbeeld de studie van U. Rehman en W. Audenaert, 2019). Nadeel is dan dat de lokale verschillen die plaatsvinden over de tijd, bijvoorbeeld het tijdsafhankelijke windpatroon rond de zonnepanelen, niet goed meegenomen kunnen worden.

In dit project is gekozen voor het Delft3D-Flow model, ontwikkeld door onderzoeksinstituut Deltares. Hierin worden een aantal aannames gedaan over de modellering van de stroming (paragraaf 2.2) zodat de stroming op een grover rekenrooster kan plaatsvinden. Delft3D wordt veel gebruikt voor de hydrodynamische modellering van grootschalige wateren (Kramer et al. 2016), en is ook gebruikt voor de modellering van bekkens (bijv. Boersen, 2017). In dit project is het rekenrooster zo gekozen dat de details van de systemen met zonnepanelen nog net goed meegenomen kunnen worden (met een rooster van breedte x lengte x hoogte = 5m x 5m x ~1m). Voor de waterkwaliteit is gebruik gemaakt van Delft3D-WAQ, wat ook een onderdeel is van de Delft3D software, ontwikkeld door Deltares. Dit model wordt gebruikt om de waterkwaliteit in (grote) oppervlaktewaters te berekenen, bijvoorbeeld Lee en Stenstrom (2023). De waterkwaliteit is op hetzelfde rekenrooster als de hydrodynamica doorgerekend, zodat de lokale en temporele verschillen in stroming en temperatuur goed meegenomen kunnen worden in de waterkwaliteitsparameters. Parallel aan dit project is er een hydrodynamische studie gedaan door Deltares voor het WPJ bekken van PWN, waar de instellingen voor Delt3D en voor de systemen met zonnepanelen zijn opgesteld (Bijlsma et al., 2021). Hier is alleen de hydrodynamica gemodelleerd, niet de waterkwaliteit. Deze instellingen zijn ook gebruikt in de modellering beschreven in onderliggend rapport.

Voor de drie bekkens wordt eerst de hydrodynamica gemodelleerd en daarna de waterkwaliteit.

2.2 Hydrodynamische modellering

De volgende processen worden meegenomen in de hydrodynamische modellering:

- Stroming en transport: voor de stroming worden de Navier-Stokes vergelijkingen voor onsamendrukbare media opgelost. Er is gebruik gemaakt van Z-coördinaten met een niet-hydrostatische drukverdeling.

Verschillen in dichtheid worden alleen meegenomen in de drukterm (Boussinesq aanname). Voor de modellering van turbulentie wordt gebruik gemaakt van de Reynolds' averaged Navier-Stokes vergelijkingen. Het turbulentiemodel berekent de Reynoldsspanningen, hier is gebruik gemaakt van een $k-\epsilon$ turbulentiemodel om de turbulente viscositeit en diffusiviteit te modelleren. Voor de subgrid schalen (die niet opgelost worden op het rekenrooster) zijn waarden voor horizontale viscositeit en dispersie gebruikt van respectievelijk 0,1 en 0,2 m^2/s (Bijlsma et al., 2021). Krachten door dichtheidsverschillen kunnen de turbulente uitwisseling verkleinen (Delft3D-FLOW, 2019). Transport van stoffen en warmte wordt gemodelleerd aan de hand van een advectie-diffusie vergelijking in 3D. Meer details zijn te vinden in de Delft3D handleiding (Delft3D-FLOW, 2019, hoofdstuk 9).

- Beluchting: hier worden niet individuele luchtbellen gemodelleerd, maar de hoeveelheid water die meegenomen wordt door de beluchter. Dit wordt berekend aan de hand van de hoeveelheid lucht die de beluchter omhoog blaast volgens de volgende formule (Delft-3D Flow, 2019): $Q=(1000*Q_{air})^{0,66}$, waarbij Q_{air} het luchtdebiet is van de beluchter (in m^3/s). In sommige gevallen staan de beluchters alleen aan in bepaalde seizoenen. Dit is meegenomen in de modellering, hiervoor is gebruik gemaakt van tijdreeksen aangeleverd door de waterbedrijven.
- Temperatuur/stratificatie, de temperatuur in het bekken wordt berekend door de transportvergelijkingen van warmte op te lossen. De dichtheidsverschillen van het water die ontstaan door verschillen in temperatuur worden gebruikt in de vergelijkingen van de stroming. Hiermee kan de stratificatie gemodelleerd worden. Opwarming van het bekken gebeurt door uitwisseling van warmte met de buitentemperatuur en zoninstraling.

Randvoorwaarden

- Bodem: geen stroming door de bodem (m.u.v. doorlatende oever bij WML), parallel aan de bodem wordt gewerkt met een Chezy wrijvingscoëfficiënt van 65 $m^{0,5}/s$ (een standaardwaarde voor vlakke modderige bodems). Voor warmtetransport is er geen uitwisseling met de bodem (isolatie).
- Wateroppervlakte: geen stroming (geen instroom door regen) loodrecht op het wateroppervlakte, parallel aan het wateroppervlakte wordt een kracht (spanning) opgelegd door de wind. De spanning door de wind is evenredig met het kwadraat van de windsnelheid, dichtheid van de lucht en een wind drag coëfficiënt (deze is weer afhankelijk van de windsnelheid, zie 9.4.1 in de Delft3D FLOW (2019)). Voor de windrichting en windsterkte wordt gebruik gemaakt van een KNMI station in de buurt. Er vindt geen menging van de bovenste lagen plaats door golven (Ozmidov lengteschaal van 0 cm, zie Delft3D FLOW (2019)).
- Warmteflux aan het wateroppervlak: voor de warmtemodellering vindt uitwisseling plaats aan het oppervlak door: inkomende zonnestraling (zichtbaar licht en IR wordt geabsorbeerd in het water), terugkaatsing van straling (back radiation), verdamping en convectie (wind). Voor de absorptie van de zonnestraling wordt gebruik gemaakt van de Secchi-diepte (indien deze gemeten is). De reflectie, verdamping en convectie worden berekend door een warmteflux-module, die gebruik maakt van de luchttemperatuur, watertemperatuur, relatieve vochtigheid en windsnelheid. Tijdreeksen van de luchttemperatuur, wind, relatieve vochtigheid en zonnestraling worden opgehaald van een KNMI station in de buurt.
- Instroomkanaal: het instromende waterdebiet over de tijd (tijdreeks aangeleverd door het waterbedrijf) en de temperatuur van het instromende water (tijdreeks aangeleverd door het waterbedrijf of uit openbare data). Dit wordt in Delft3D aangegeven als inkomend debiet (discharge), waarbij de inkomende flow en temperatuur opgegeven worden op de plekken waar het water het bekken binnenkomt.
- Uitstroomkanaal: dit gebeurt op dezelfde manier als het instromende waterdebiet door een discharge op te geven op de locaties waar het water het bekken verlaat. Dit is dan een uitgaande debiet gelijk aan het inkomende debiet.



Figuur 2 Zonne-eilanden zoals gemaakt door Floating Solar (referentie: Floating Solar website). De zonnepanelen drijven op PE buizen.

De modellering van de zonnepanelen op het bekken gebeurt als volgt (op de cellen waar de systemen met zonnepanelen geplaatst worden). Deze instellingen zijn in een aparte studie door Deltares voor PWN opgesteld (Bijlsma et al. 2021):

- Zonnestraling: de directe inkomende straling wordt geblokkeerd, maar de diffuse straling van de open lucht kan nog wel onder de panelen komen. Ook kunnen de panelen zelf IR straling uitzenden aan de onderkant naar het water toe. In de modellering wordt alleen diffuse straling van de zon opgenomen (dit is geschat op 60 % van het totaal, een gemiddelde in De Bilt in de lente en zomermaanden). De teruggekaatste straling wordt gelijk gezet aan een 100% wolkendek. Dit limiteert de terugkaatsing van de straling (wat leidt tot hogere temperaturen van het water). De Secchi-diepte wordt gebruikt in het model om de opname van licht door zonnestraling te simuleren en wordt onder de panelen op 0,3 m gezet, zodat alle warmte in de top laag van 0,3 m wordt opgenomen (Bijlsma et al., 2021).
- Er vindt uitwisseling van warmte plaats met de luchttemperatuur onder het paneel. Hiervoor wordt als luchttemperatuur de temperatuur van het paneel gebruikt (met een maximum van 30 °C). De temperatuur van het paneel wordt geschaald met de inkomende zonnestraling, zodat er geen toename in de nacht plaatsvindt.
- De relatieve vochtigheid onder de zonnepanelen wordt niet aangepast (gelijk aan de lucht).
- Waterdiepte wordt met 20 cm verlaagd vanwege het gewicht van de zonnepanelen.
- Wind: de zonnepanelen staan (in de modellering) continu gericht op het zuiden, zodat de wind in noord-zuidelijke richting volledig wordt geblokkeerd, terwijl de wind in oost-west richting nog wel tussen de zonnepanelen door kan blazen. Hier wordt aangenomen dat 20% van de wind in deze richting doorgaat. Dit is een conservatieve aanname.

Begincondities (op 1 januari):

- Watersnelheden staan op nul.
- Temperatuur staat overal op 6,5 °C.

De berekeningen worden uitgevoerd voor een periode van één jaar (1 januari t/m 31 december), zodat de effecten van de verschillende seizoenen meegenomen worden.

2.3 Waterkwaliteitsmodellering

Het waterkwaliteitsmodel maakt gebruik van de stroming, menging en temperatuurverdeling van het hydrodynamische model en berekent de verschillende waterkwaliteitsparameters op hetzelfde rekenrooster als het hydrodynamische model. De hydrodynamische variabelen zijn over de simulatietijd van één jaar elke 30 minuten opgeslagen en worden door het waterkwaliteitsmodel opgehaald. Voor het waterkwaliteitsmodel wordt D-Water Quality (2018a) gebruikt, dat ontwikkeld is door Deltares. De standaardinstellingen van D-Water Quality (WAQ) zijn gebruikt.

De volgende processen en parameters zijn meegenomen in de waterkwaliteitsmodellering:

- Opgelost zuurstof. De zuurstofconcentratie is betrokken bij diverse processen. Voor de beluchting geldt dat de stroming door de beluchting wordt meegenomen in het hydrodynamische model (paragraaf 2.2). In het waterkwaliteitsmodel wordt de concentratie van zuurstof in het beluchtingsscherm gelijk gesteld aan de verzadigde concentratie van zuurstof in water bij de heersende temperatuur. Voor de overige parameters wordt niets opgelegd bij de beluchting.
- Nutriënten (ammonium, nitraat, fosfaat, geadsorbeerd fosfaat, silicium) en organisch materiaal (o.a. DOC): hiervoor zijn (de)nitrificatieprocessen en adsorptie van fosfaat gemodelleerd in WAQ (D-Water Quality, 2018b)
- Microbiologie: sterfte van bacteriën (*E. coli*). Er zijn geen bronnen van bacteriegroei in het model (anders dan de ingaande concentraties bacteriën). Sterfte vindt plaats door UV-licht, en chloride (niet aanwezig) en vindt spontaan plaats als functie van temperatuur.
- Fytoplankton: dit wordt met het submodel BLOOM gemodelleerd. Dit bevat primaire productie, respiratie, sterfte, begrazing, bezinking en resuspensie (D-Water Quality, 2018b). Dit is onder meer afhankelijk van zichtbaar licht, temperatuur, beschikbaarheid nutriënten en zuurstof. Zichtbaar licht wordt uit het hydrodynamische model gehaald in verband met fytoplanktongroei (de parameter PAR – photosynthetic active radiation, D-Water Quality (2018b)). In het model wordt onderscheid gemaakt tussen E, N en P fenotypes voor groenalgen en microcysten. Voor diatomeeën wordt onderscheid gemaakt tussen N en P fenotypes. E, N, en P fenotypes onderscheiden zich door wat de limiterende factor is voor het fenotype: energie/licht (E), stikstof (N) of fosfor (P). Voor elk van deze fenotypes is dezelfde concentratie gebruikt als input. In de output wordt de totaalconcentratie van fytoplankton bekeken. Variaties in drijfvermogen van *Microcystis* is niet meegenomen in de modellering.

De volgende randvoorwaarden zijn gebruikt voor WAQ:

- Bodem: uitwisseling met de bodem vindt plaats voor zuurstof, nutriënten en fytoplankton via twee sedimentlagen, D-Water Quality (2018b).
- Wateroppervlakte: uitwisseling van zuurstof re-aeration, D-Water Quality (2018b) vindt plaats aan het vrije oppervlak. Dit is afhankelijk van de zuurstofconcentratie aan het oppervlak, de verzadigde zuurstofconcentratie (functie van temperatuur), snelheid en windsnelheid.
- Instroomkanaal: gemeten waterkwaliteitsparameters door de waterbedrijven (indien beschikbaar), anders wordt een concentratie van nul opgelegd.
- Uitstroomkanaal: vrije uitstroom, hier wordt geen concentratie opgelegd.

De volgende begincondities (op 1 januari) zijn gebruikt voor WAQ:

- Waterkwaliteitsparameters uit gemeten waarden bekken gemiddeld over de maand januari. Indien geen meetgegevens beschikbaar zijn voor een waterkwaliteitsparameter, wordt een standaardwaarde voor WAQ gebruikt.

Vanwege de grote rekentijden en opslag van data is de waterkwaliteit alleen berekend voor de bekkens van PWN en Evides.

In het waterkwaliteitsmodel kunnen vele constanten en randvoorwaarden van de bodem ingesteld worden. Hiervan is geen kalibratie van parameters gedaan. Er is gebruik gemaakt van 'default' waarden. Hierdoor zullen de resultaten van het waterkwaliteitsmodel niet precies overeenkomen met de werkelijkheid, maar zullen ze sterk indicatief zijn.

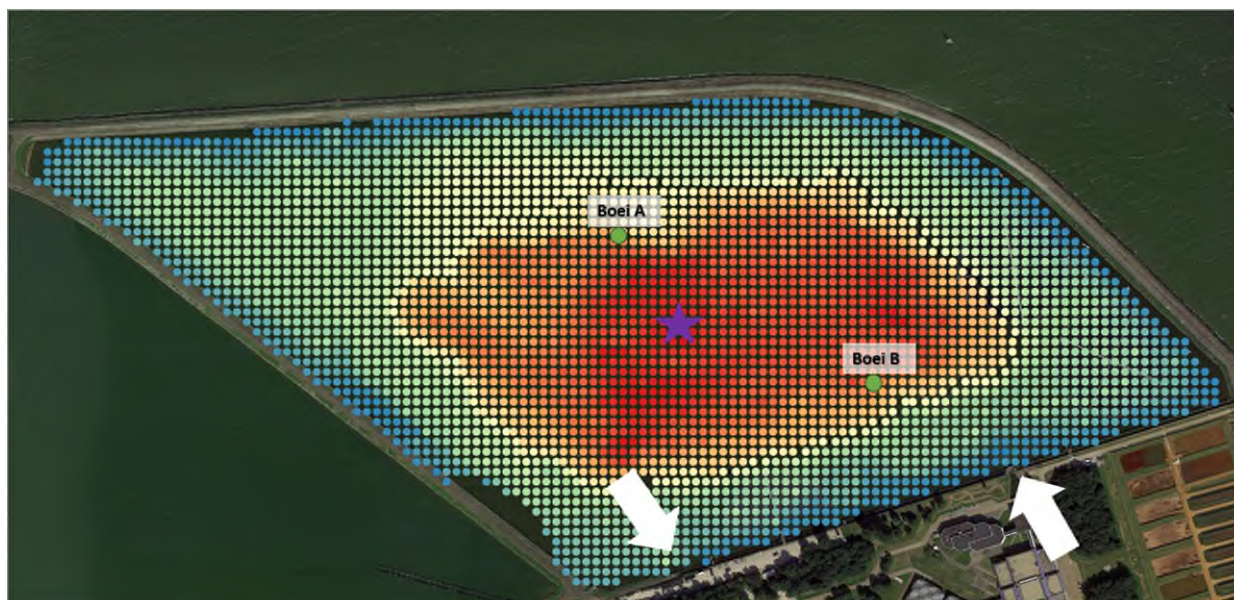
3 Resultaten hydrodynamische modellering

3.1 Bekken PWN (WPJ reservoir)

Voor PWN is het WPJ reservoir doorgerekend met Delft3D. De specifieke gegevens over de simulatie zijn weergegeven in Tabel 2. Het bodemprofiel, ingaande en uitgaande waterstromen, beluchtingspunt en meetpunten zijn weergegeven in Figuur 3.

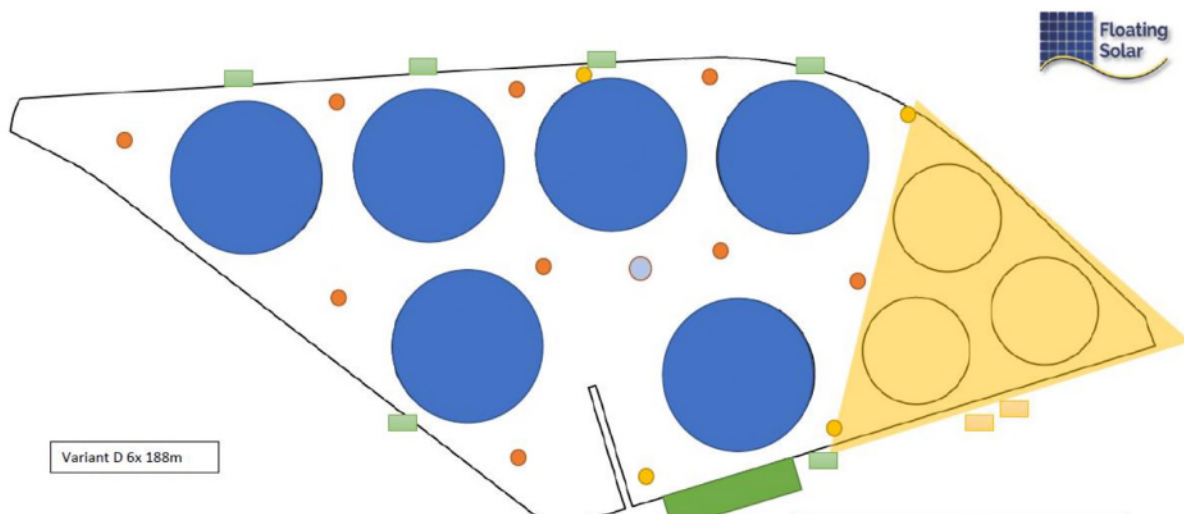
Tabel 2 Gegevens simulaties bekken PWN (WPJ reservoir)

Parameter	Waarde
Grid	5 m*5 m, 27 lagen, variabele hoogte van de lagen
Diepte gemiddeld en maximaal	9 m en 22 m
Gesimuleerde periode	01-01-2020 tot 01-01-2021
Tijdstap	0,1 min
Ingaande debiet	9300 m ³ /h (constant)
Ingaande watertemperatuur	2,8 °C-27,4 °C, gemeten door RWS in het IJsselmeer (FL38)
Beluchting	1 beluchter, 320 m ³ /h lucht, omgerekend naar 19,33 m ³ /s water
Begintemperatuur op 01-01-2020	6,5 (°C)
Secchi diepte	0,8-2,0 m, gemeten door PWN
Weercondities	KNMI 249 (Berkhout)

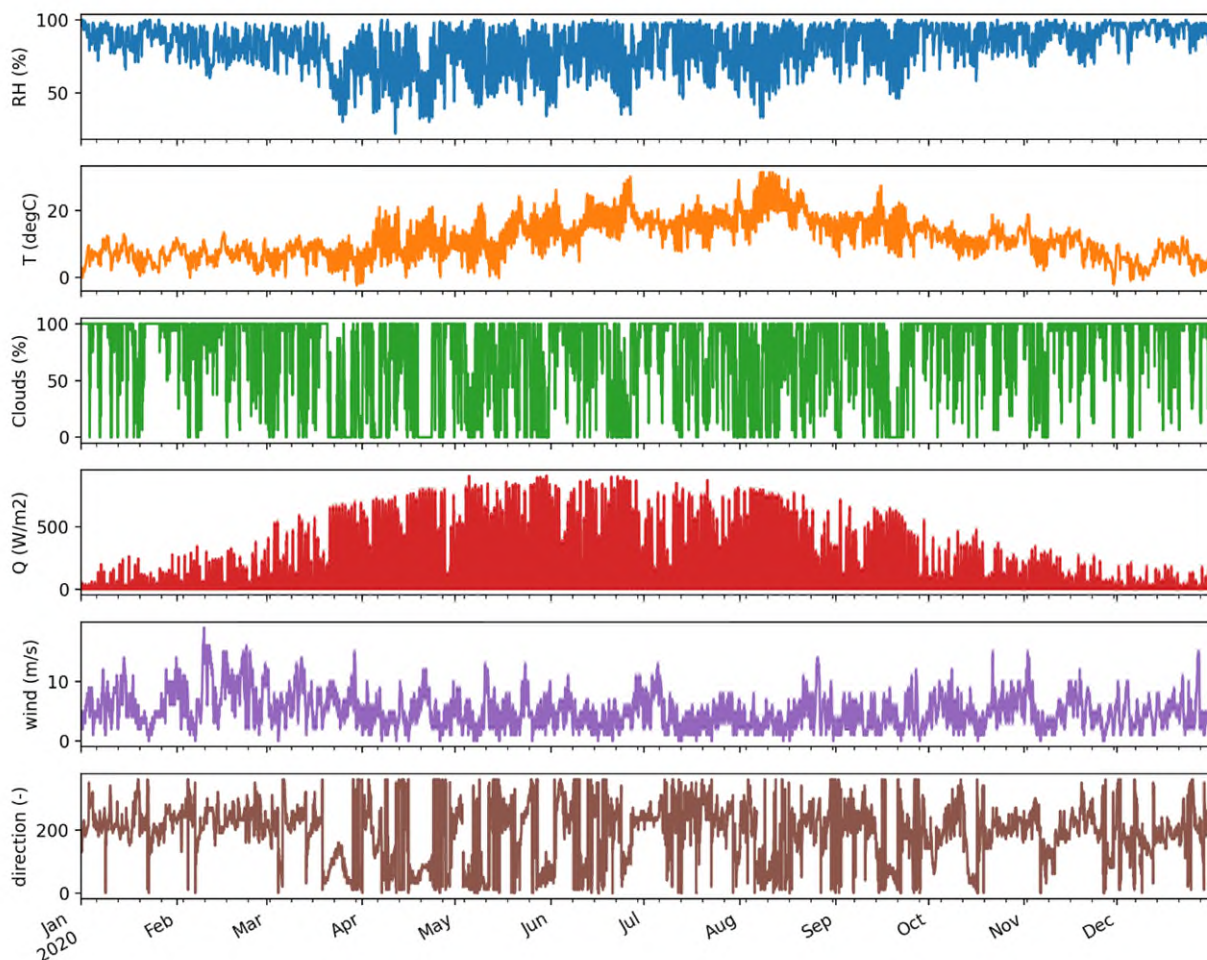


Figuur 3 Bodemprofiel van WPJ reservoir (kleurcode: 0 [blauw] t/m 22m [rood]), inlaat en uitlaat zijn aangegeven met de pijlen. De beluchting is aangegeven met de ster. De meetpunten zijn aangegeven met de groene bolletjes.

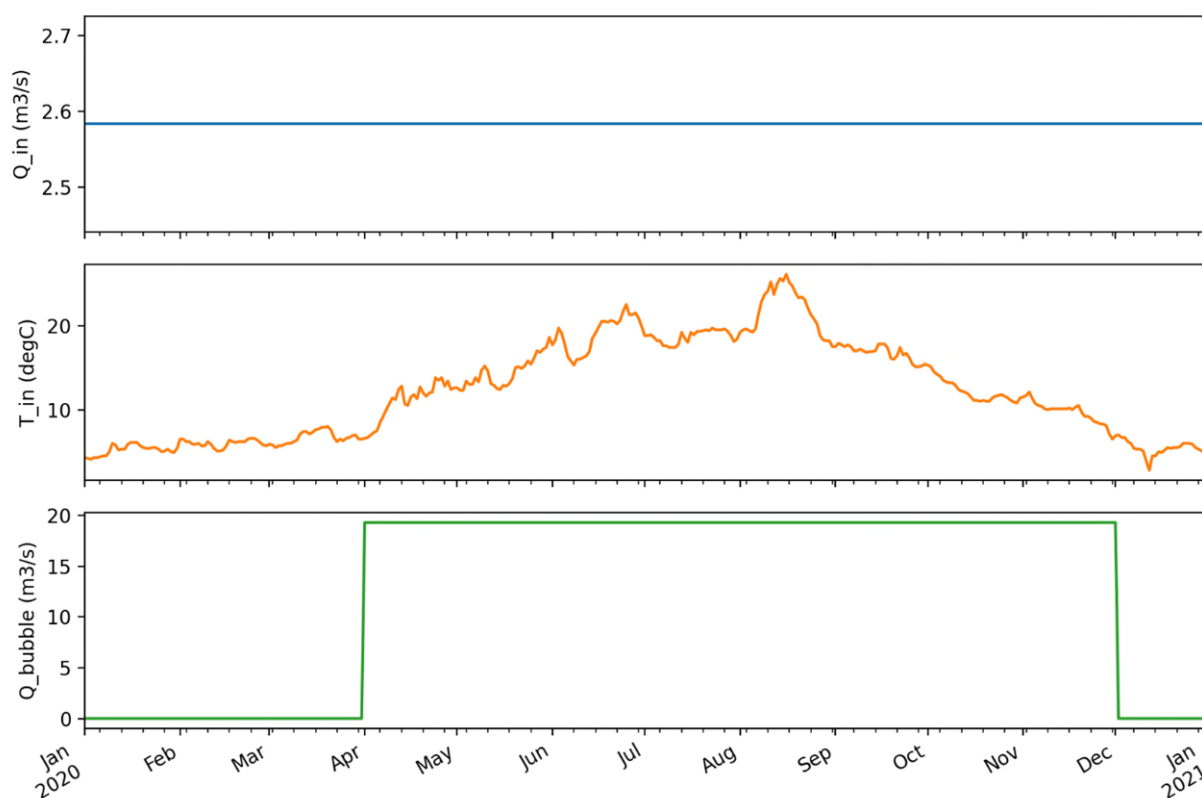
De bedekking met panelen is weergegeven in Figuur 4. Aan de oostkant van het bekken zijn drie kleinere zonne-eilanden geplaatst. Dit wordt voor PWN gebruikt als eerste praktijktest. In de rest van het bekken is een ontwerp gemaakt met zes grotere zonne-eilanden (188 m diameter). De totale bedekking is dan 40%.



Figuur 4 Bedekking met zonnepanelen voor WPJ reservoir (PWN)



Figuur 5 Gegevens van het KNMI station Berkhout die gebruikt zijn als randvoorwaarde in het model. Van boven naar beneden: relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur, wolkenbedekking, zonnestraling, windsterkte, windrichting (360=noord, 90=oost, 180=zuid, 270=west).

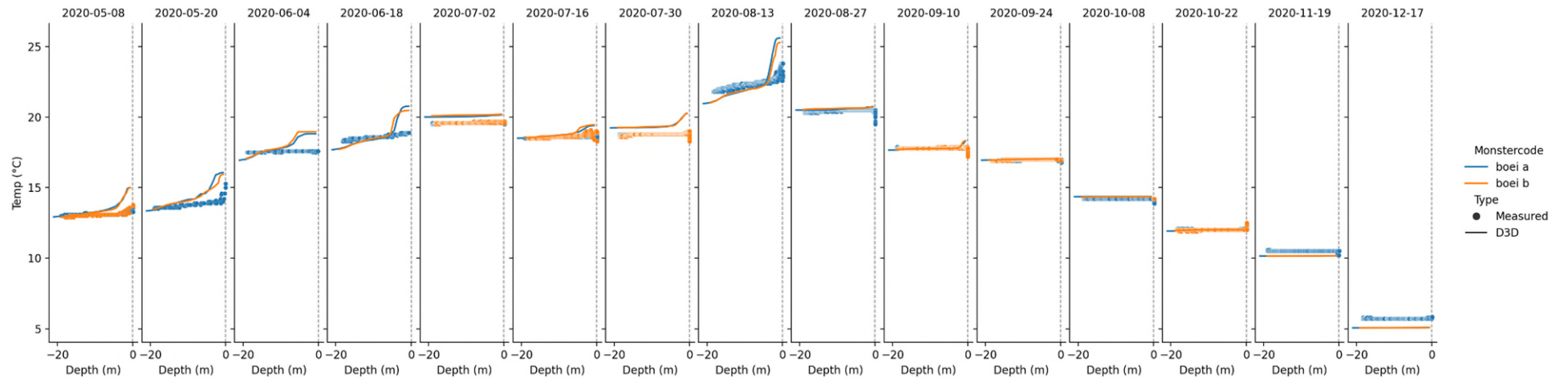


Figuur 6 Randvoorwaarden in het hydrodynamische model, van boven naar beneden: ingaande flow, ingaande temperatuur van het instromende water, debiet van bellenbeluchting.

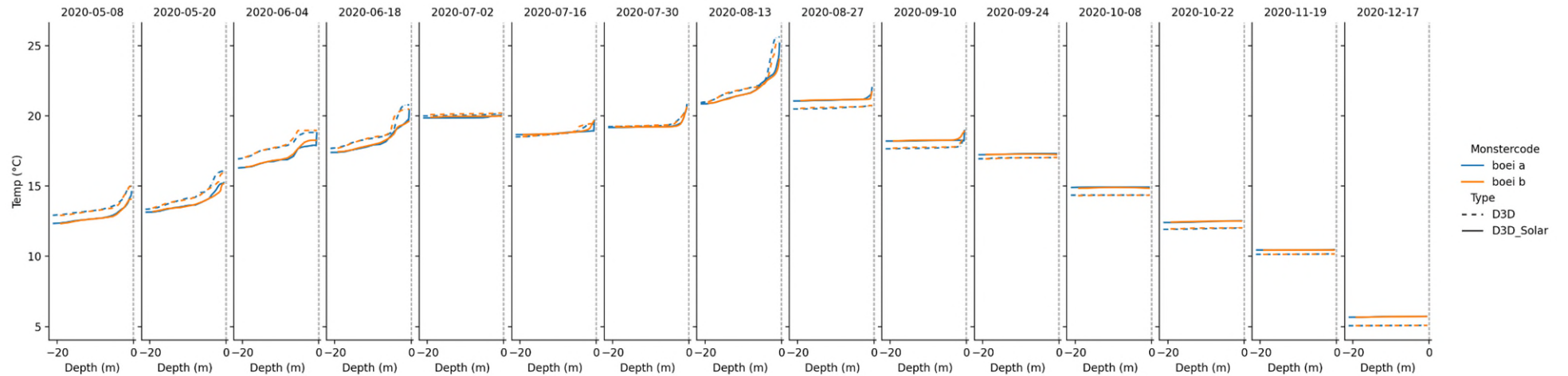
De gebruikte weersgegevens zijn getoond over de berekende periode in Figuur 5. Andere randvoorwaarden in het model zijn weergegeven in Figuur 6.

3.1.1 Vergelijking met metingen

De gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen over het jaar 2020 zijn weergegeven in Figuur 7. Het algemene beeld is dat de gemodelleerde temperaturen goed overeenkomen met de gemeten profielen. Er is weinig verschil tussen de meetpunten (boei a en boei b, zie Figuur 3 voor de locaties van de meetpunten), zowel in de metingen als in het model. Op een aantal warme dagen laat het model wel een sterkere stratificatie zien (hogere temperatuur aan het wateroppervlak) dan de meting. Het model lijkt hiermee de menging iets te onderschatten. De stratificatie wordt echter in het model door menging ook weer opgeheven (net zoals in de metingen), bijvoorbeeld op 27 augustus is er geen stratificatie meer na de sterke stratificatie van 13 augustus. In het model duurt het alleen iets langer voordat het reservoir weer gemengd is na een periode van stratificatie. Hiermee is het model aan de conservatieve kant.



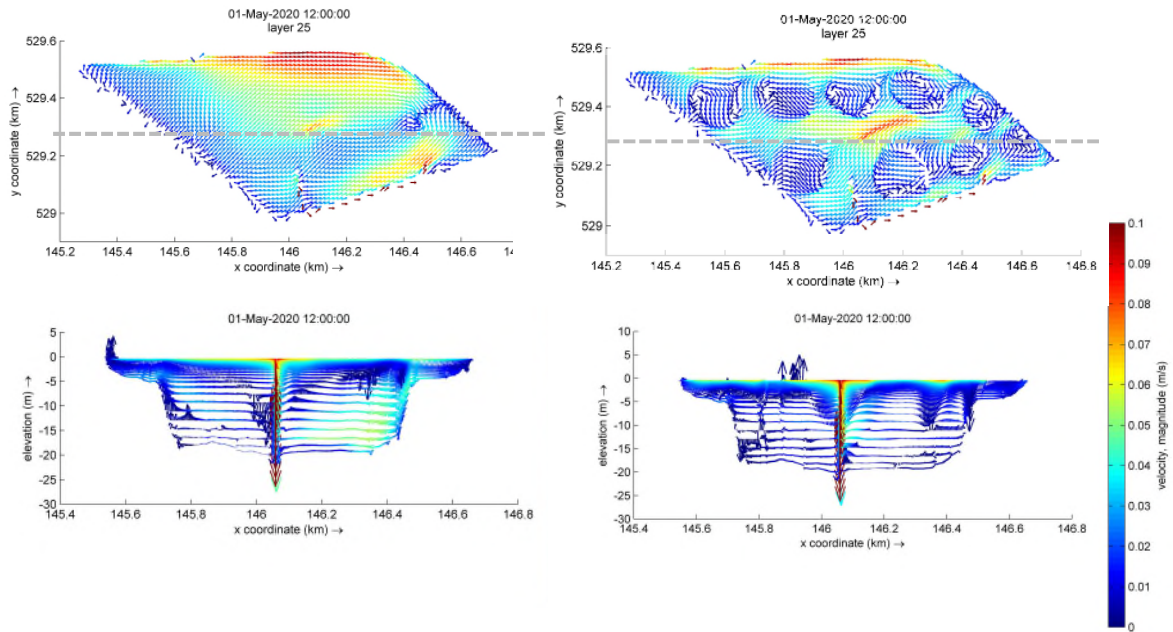
Figuur 7 Gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte op verschillende dagen over het jaar.



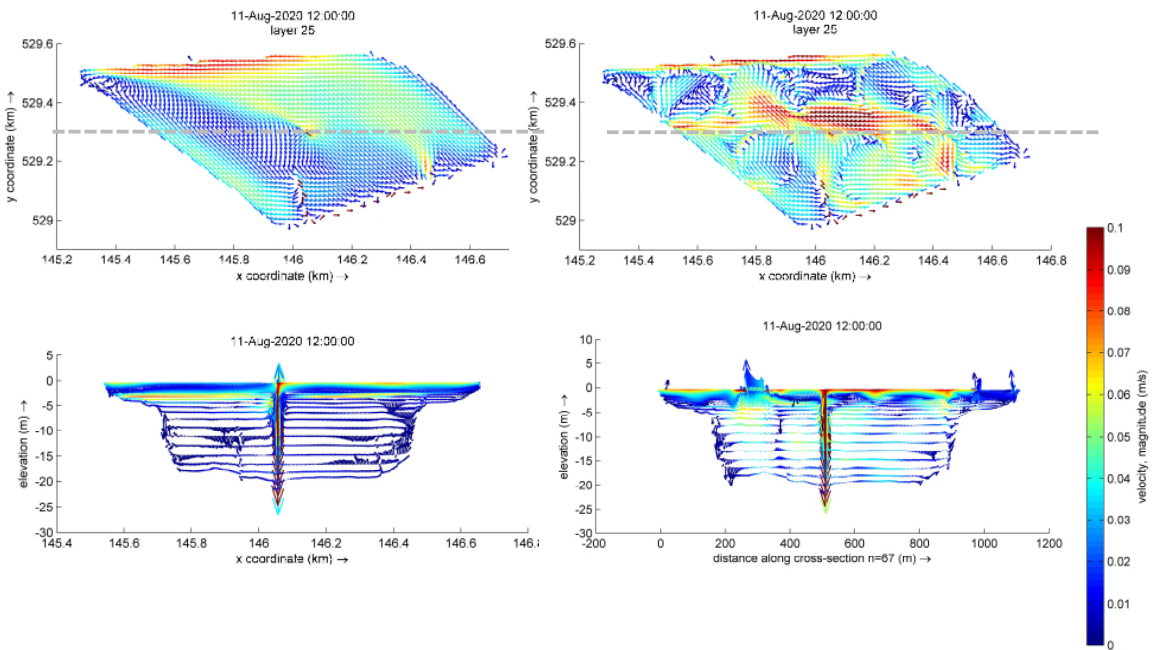
Figuur 8 Gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte met (getrokken lijn) en zonder (gestippelde lijn) zonnepanelen

3.1.2 Effect zonnepanelen

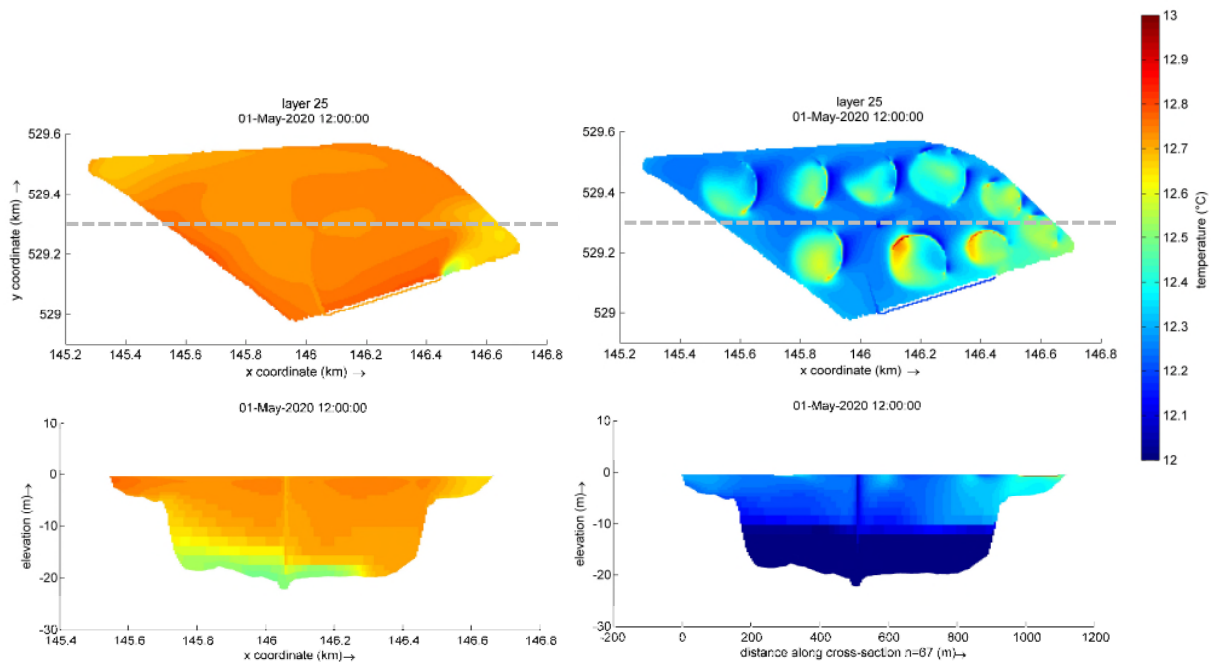
De resultaten van de berekening met en zonder zonnepanelen zijn weergegeven in Figuur 8 voor dezelfde temperatuurprofielen over de diepte als waarop de metingen zijn gedaan. Het algemene beeld is dat in het voorjaar het bekken met zonnepanelen minder snel opwarmt. In het najaar blijft het bekken echter warmer (afkoelen gaat langzamer). Omdat de zonnepanelen een groot deel van de zonnestraling tegenhouden gaat de opwarming langzamer, maar de zonnepanelen houden de warmte ook langer vast.



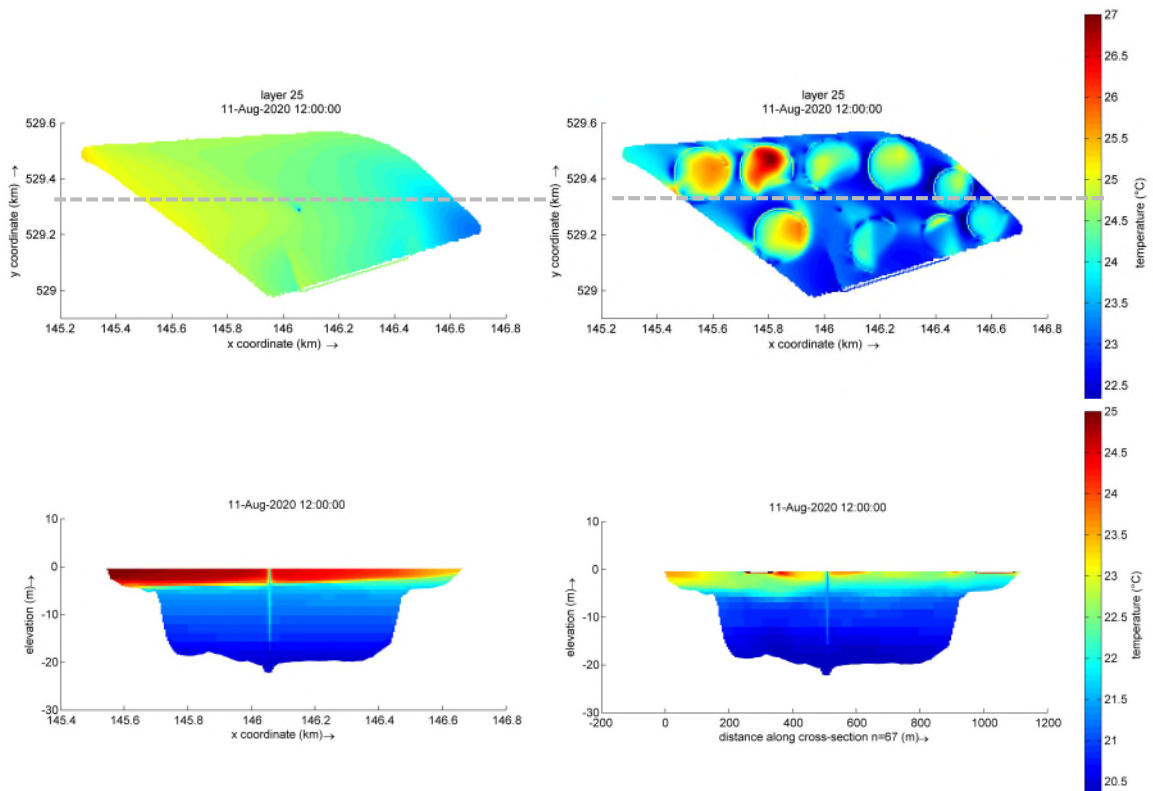
Figuur 9 Gemodelleerde snelheden in het WPJ reservoir op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 10 Snelheidsprofielen in het WPJ reservoir op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 11 Gemodelleerde temperatuur in het WPJ reservoir op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 12 Gemodelleerde temperatuur in het WPJ reservoir op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. NB: de kleurschaal boven en onder is niet hetzelfde.

De gemodelleerde stroming is weergegeven in Figuur 9 op een moment in mei en Figuur 10 op een moment in augustus. De wind en de beluchting veroorzaken een circulatiepatroon in het bekken wat zorgt voor menging en het voorkomen van stratificatie. In het midden van de dwarsdoorsnede is de beluchter zichtbaar. Zonder systemen met zonnepanelen ontstaan er grootschalige circulaties in het bekken, zichtbaar aan de snelheidsvelden op het

oppervlak die gevoed worden door het windveld. Met zonnepanelen wordt het windveld onderbroken en zijn de stroomsnelheden onder de panelen lager. Er ontstaan kleinere recirculatiecellen, die echter nog steeds voor een goede menging kunnen zorgen.

De gemodelleerde temperaturen zijn weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12. Hier is zichtbaar dat in mei het bekken met systemen met zonnepanelen minder snel opwarmt. Echter, de watertemperatuur direct onder de panelen is wel hoger dan op de plekken zonder panelen. Een oorzaak hiervan is dat de stroomsnelheden onder de panelen lager zijn (Figuur 9) en het water daardoor iets gemakkelijker kan opwarmen door warmte-uitstraling van de panelen (ondanks dat de opwarming door directe zonnestraling hier niet plaatsvindt). Voor de stratificatie lijkt het effect van de zonnepanelen klein te zijn.

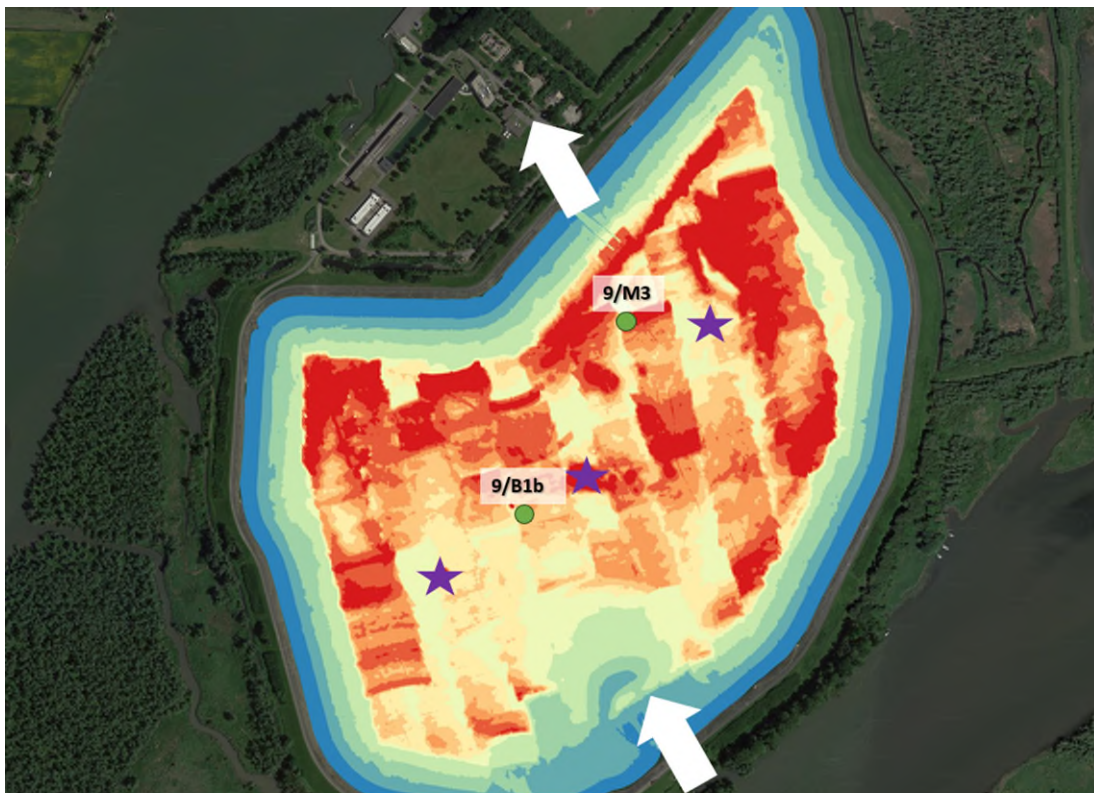
3.2 Bekken Evides (Petrusplaat)

Voor Evides is het bekken Petrusplaat gebruikt in de Delft3D modellering. De gegevens die nodig zijn voor of gebruikt zijn in het model zijn weergegeven in Tabel 3. Het bodemprofiel, ingaande en uitgaande waterstromen, beluchtingspunten en meetpunten zijn weergegeven in Figuur 13.

Tabel 3 Gegevens simulaties bekken Evides (Petrusplaat)

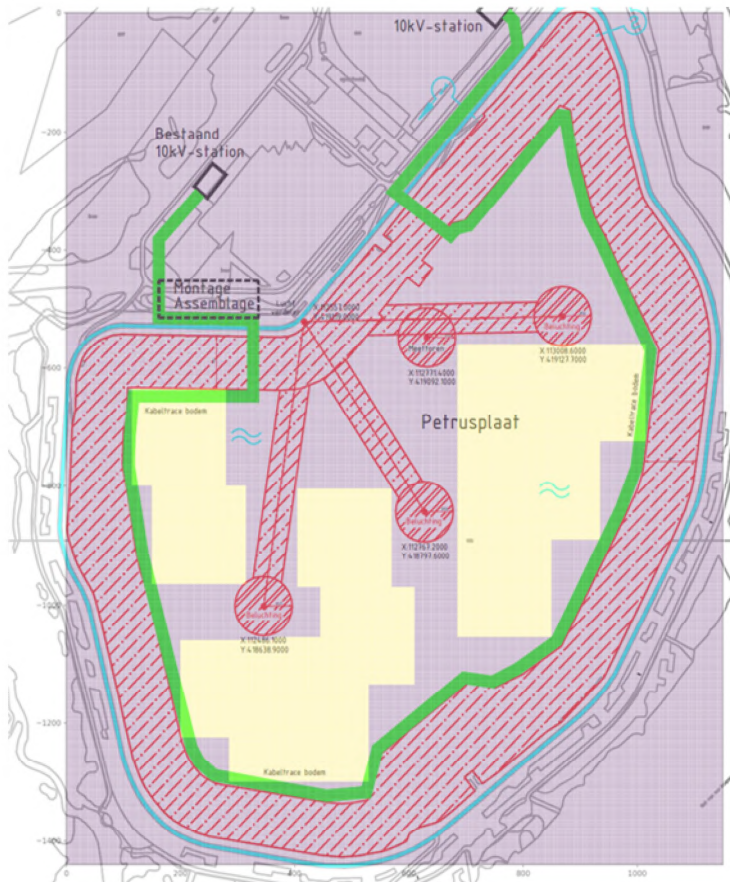
Parameter	Waarde
Grid	5 m*5 m, 15 lagen (0,79m per laag)
Diepte gemiddeld en maximaal	13 m en 15 m
Gesimuleerde periode	01-01-2020 tot 01-01-2021
Tijdstap	0,1 min
Ingaande debiet	6,3 m ³ /s (constant)
Ingaande watertemperatuur	6,0-22,7 °C, uit metingen Evides (Figuur 16)
Beluchting	3 beluchters. Per beluchter 240 m ³ /h lucht, omgerekend naar 16,0 m ³ /s water, varieert over de tijd (Figuur 16)
Begintemperatuur op 01-01-2020	6,5 (°C)
Secchi diepte	1 m (constant) ¹
Weercondities	KNMI 356 (Herwijnen)

¹ In de praktijk kunnen deze waarden groter zijn (tot meer dan 10 m)

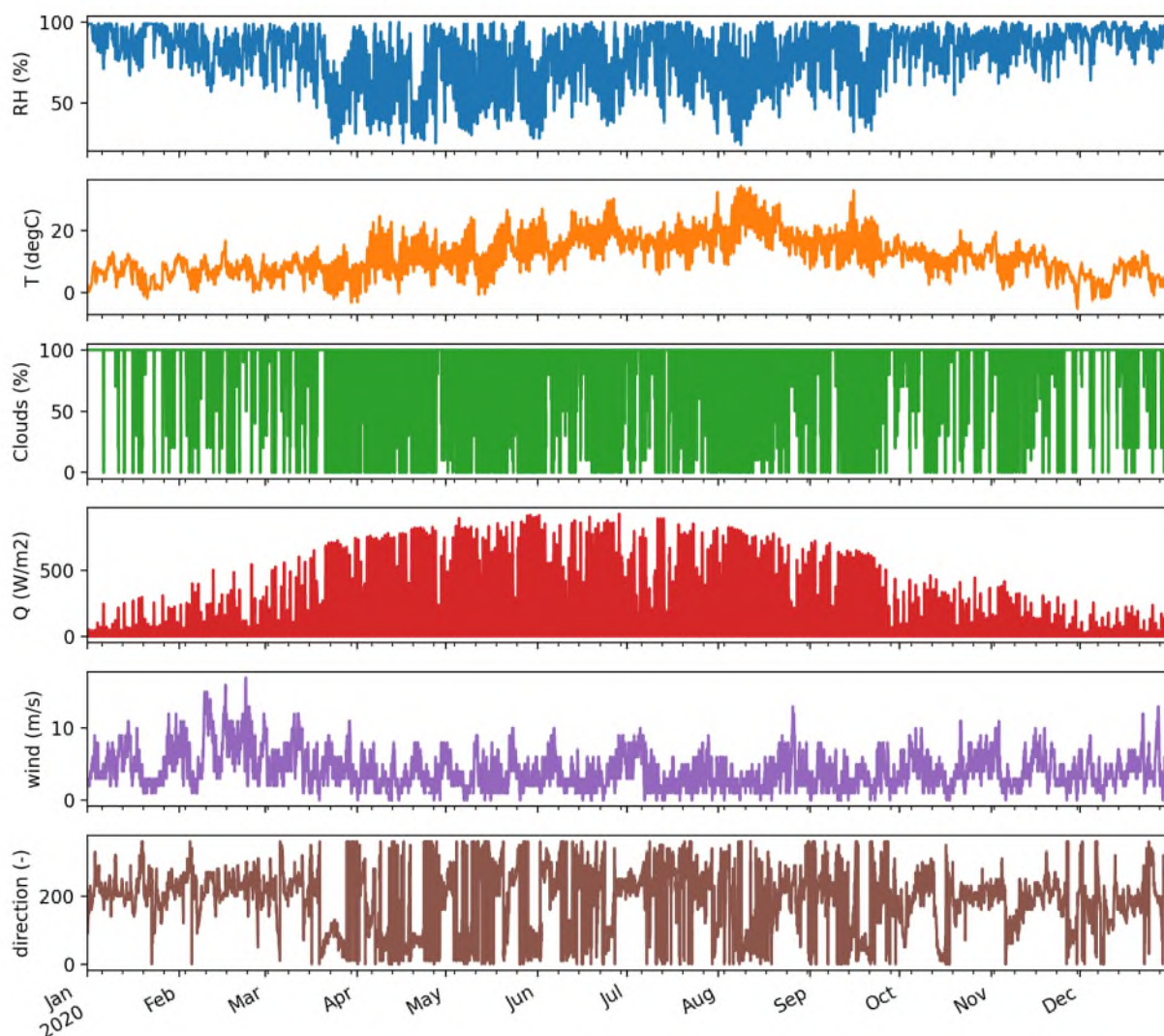


Figuur 13 Bodemprofiel van de Petrusplaat (kleurcode: 0 [blauw] t/m 15m [rood]), inlaat en uitlaat zijn aangegeven met de pijlen. De beluchting is aangegeven met de ster. De meetpunten zijn aangegeven met de groene bolletjes.

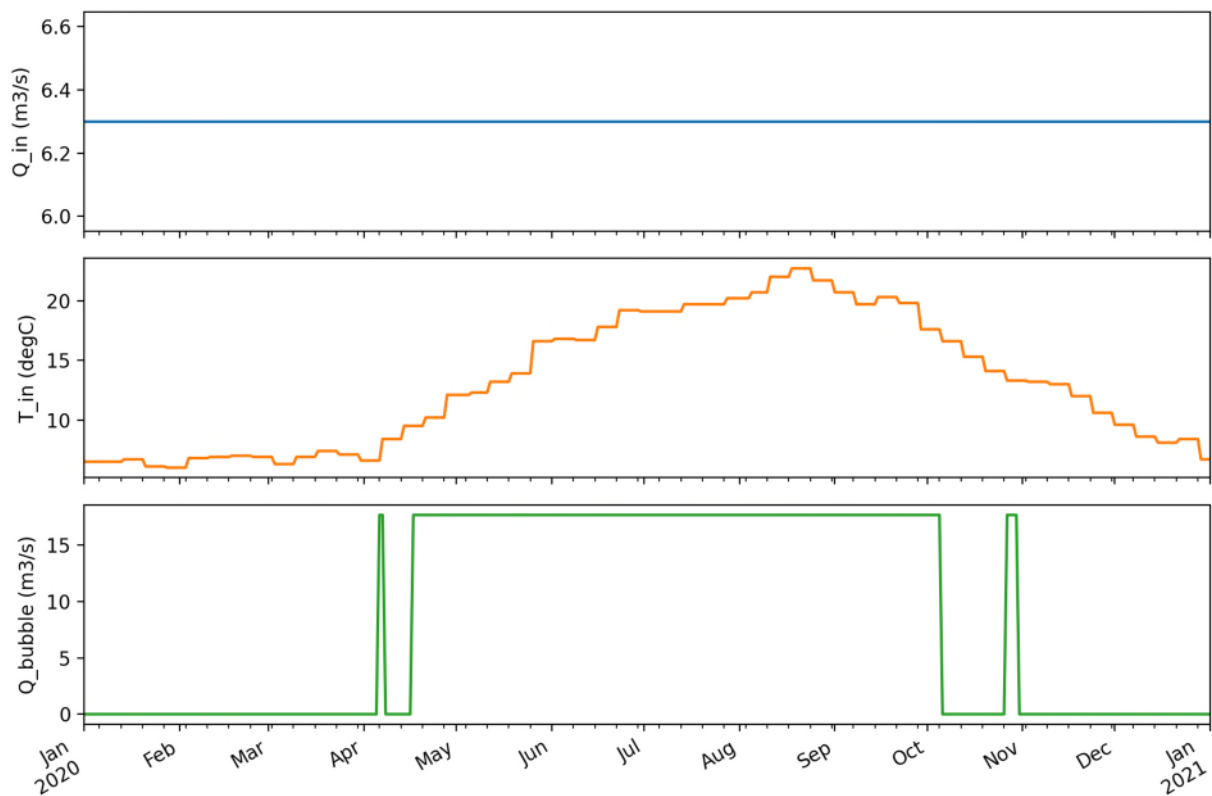
De bedekking met de systemen met zonnepanelen is weergegeven in Figuur 14. Hier is gekozen voor vierkante eilanden met zonnepanelen. Niet overal in het bekken mogen zonnepanelen geplaatst worden, onder meer langs de oevers en bij de beluchtingstorens (rood gearceerde delen). De totale bedekking komt hiermee op 30%.



Figuur 14 Bedekking met zonnepanelen voor de Petrusplaat (Evides). Vierkante eilanden zijn weergegeven in geel, rood gearceerde delen mogen niet bedekt worden.



Figuur 15 Gegevens van het KNMI station Herwijnen die gebruikt zijn als randvoorwaarde in het model. Van boven naar beneden: relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur, wolkenbedekking, zonnestraling, windsterkte, windrichting (360=noord, 90=oost, 180=zuid, 270=west)..

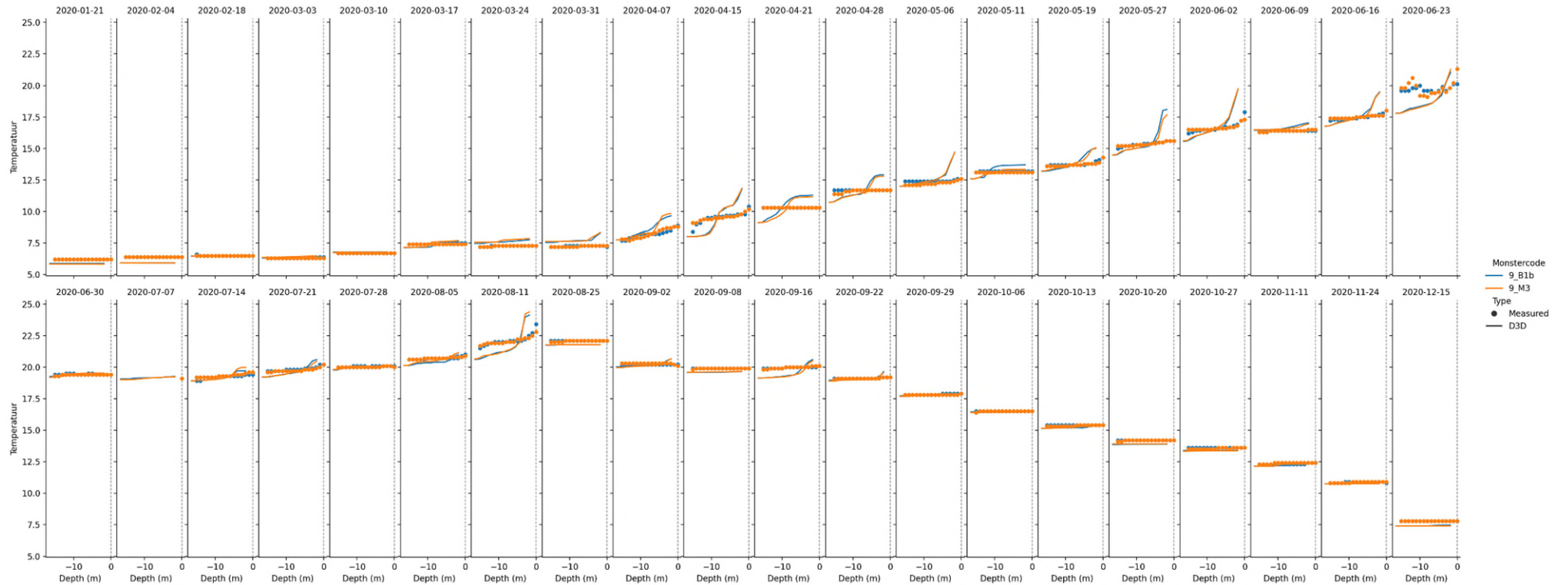


Figuur 16 Randvoorwaarden in het hydrodynamische model, van boven naar beneden: ingaande flow, ingaande temperatuur van het instromende water, debiet van bellenbeluchting per beluchter.

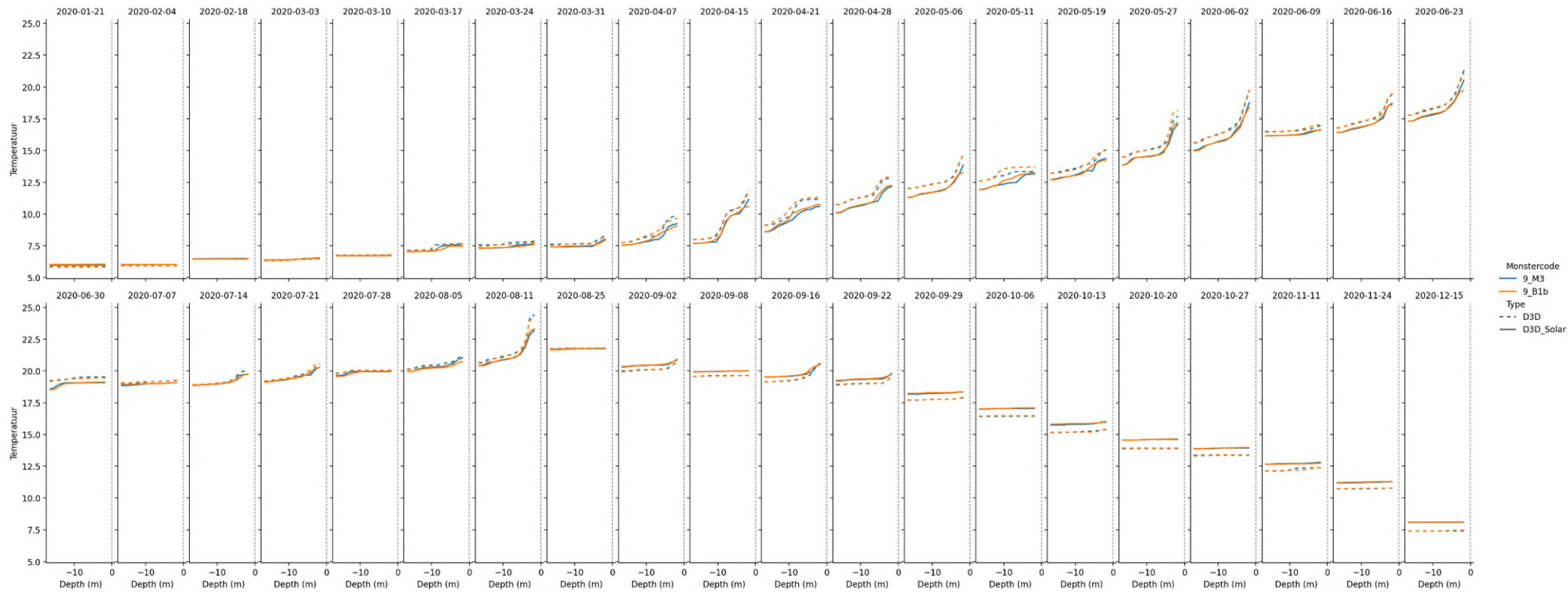
De gebruikte weersgegevens zijn weergegeven over de berekende periode in Figuur 15. Andere randvoorwaarden in het model zijn weergegeven in Figuur 16.

3.2.1 Vergelijking met metingen

De gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen zijn weergegeven in Figuur 17 (de locaties van de meetpunten zijn weergegeven in Figuur 13). Hier geldt net als in het bekken van PWN dat het algemene verloop van de temperatuur over de seizoenen goed weergegeven wordt door het model. Op momenten van grote opwarming (warme dagen) in het voorjaar en zomer zien we hier ook dat het model een sterkere stratificatie voorspelt dan de metingen laten zien. In de metingen is op de warme dagen (bijv. 11 augustus) wel een lichte stratificatie te zien, maar niet zo sterk als in het model. Ook hier geldt dat de stratificatie na een tijd weer opgeheven wordt, zowel in het model als in de meting.



Figuur 17 Gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte op verschillende dagen over het jaar voor de Petrusplaat (Evides)

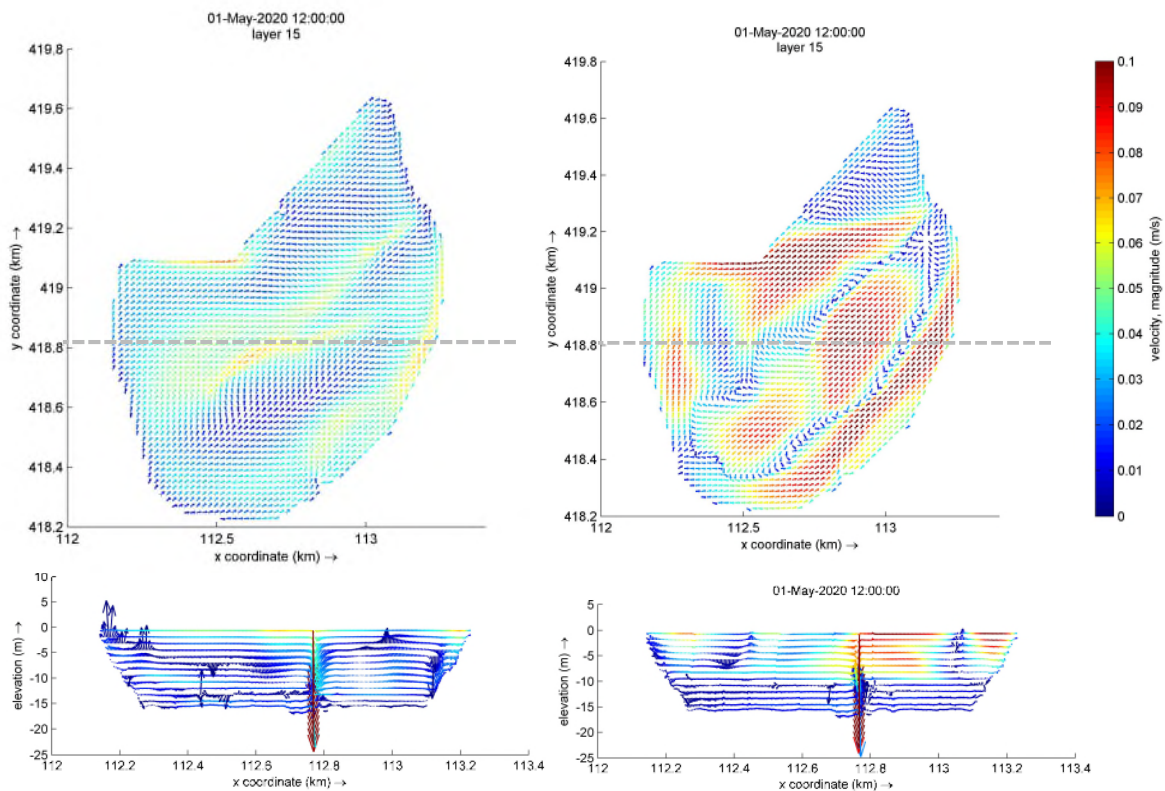


Figuur 18 Gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte met (getrokken lijn) en zonder (gestippelde lijn) zonnepanelen voor bekken Petrusplaat.

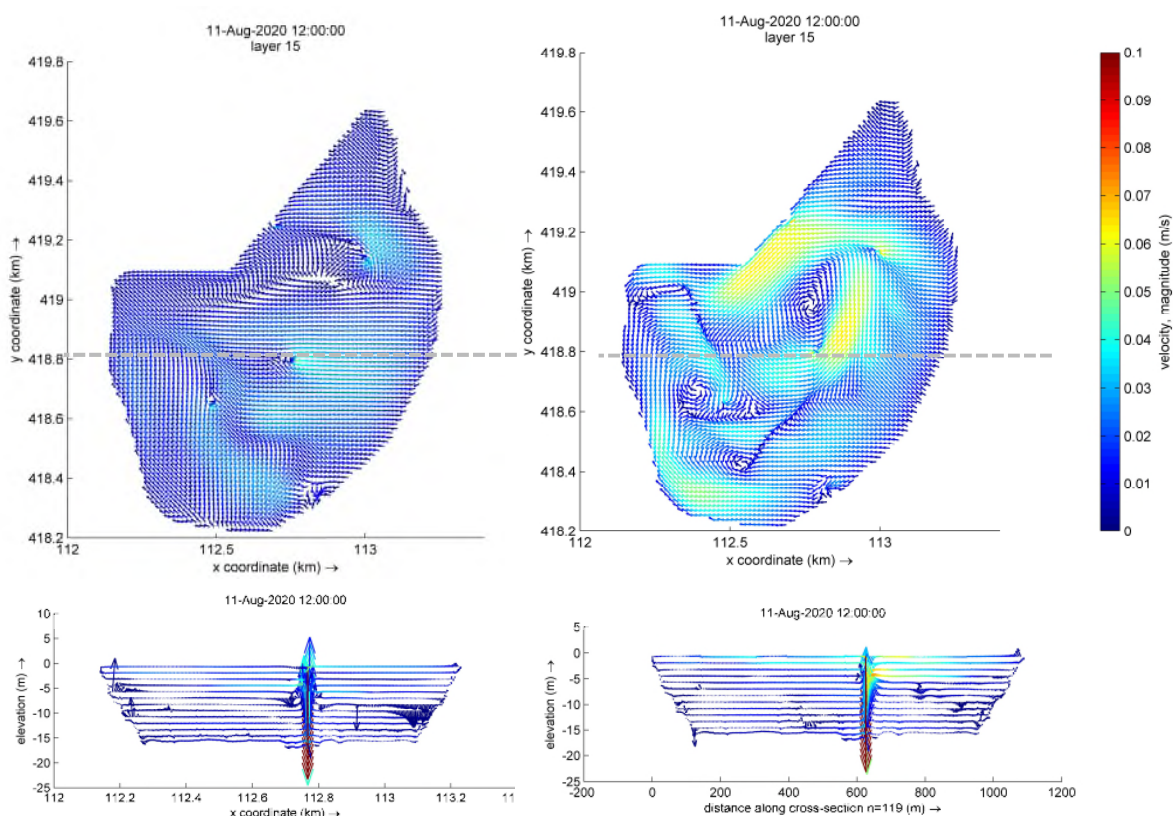
3.2.2 Effect zonnepanelen

Het effect van de systemen met zonnepanelen op de temperatuurprofielen over de diepte is weergegeven in Figuur 18. Net zoals bij het bekken van PWN is de opwarming zonder panelen langzamer omdat de zonnepanelen de zonnestraling blokkeren. En na de zomer koelt het water langzamer af, omdat de zonnepanelen de warmte vasthouden.

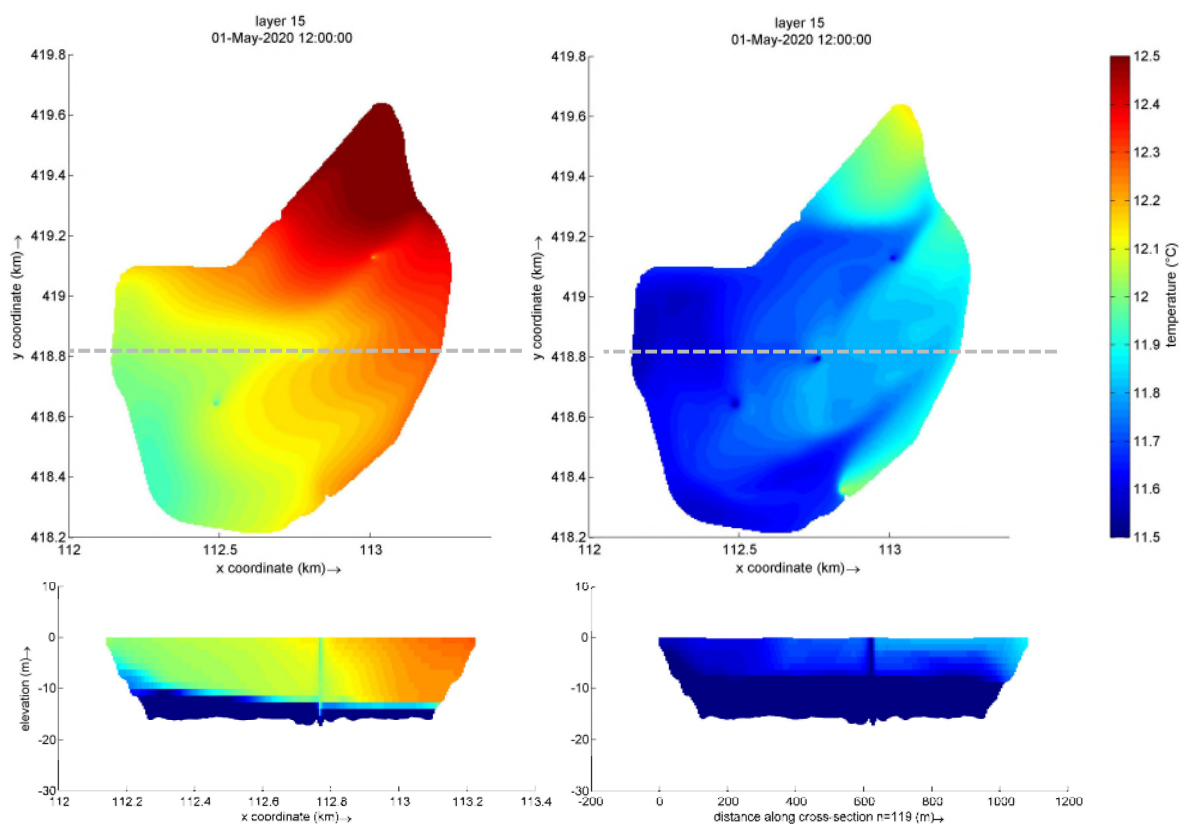
De snelheidsvelden zijn weergegeven in Figuur 19 en Figuur 20. De snelheidsvelden voor het bekken met zonnepanelen zijn anders dan het bekken zonder panelen. De snelheden onder de rechthoekige panelen zijn niet zoals bij PWN lager, maar zijn op 1 mei en 11 augustus zelfs hoger. Voor het bekken van Evides is de menging met zonnepanelen dus ook voldoende volgens het model. Dit is zichtbaar in de temperatuurprofielen (Figuur 21 en Figuur 22). De stratificatie is niet erger, maar eerder minder in de situatie met zonnepanelen. De temperatuur direct onder de zonnepanelen is volgens het model, in tegenstelling tot het bekken van PWN, ook lager. Het wegvallen van de directe zonnestraling onder het zonnepaneel in combinatie met de aanwezige watersnelheden zorgt voor de lagere temperaturen.



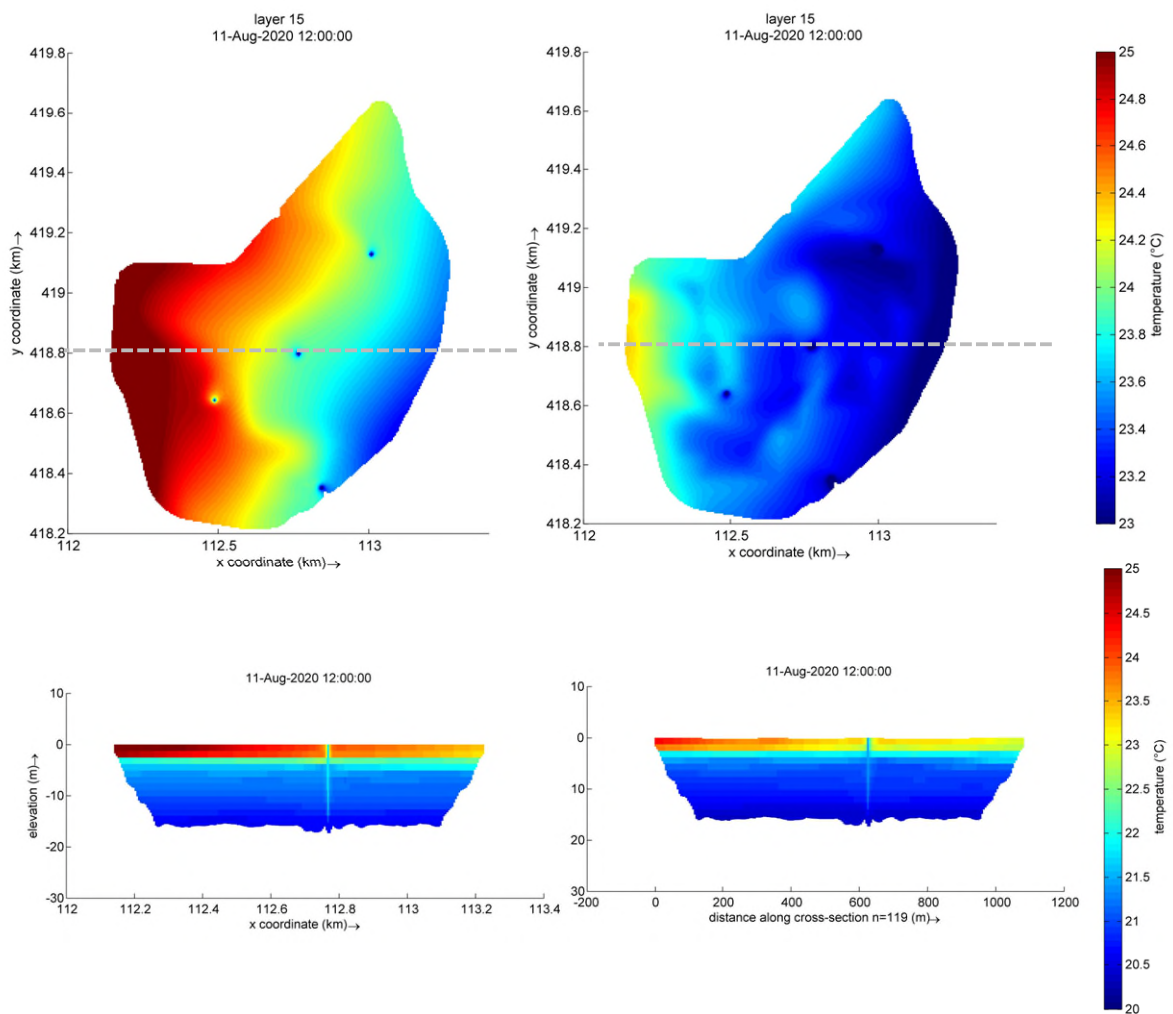
Figuur 19 Gemodelleerde snelheden in de Petruslaag op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 20 Gemodelleerde snelheden in de Petrusplaat op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 21 Gemodelleerde temperatuur in de Petrusplaat op 01 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen



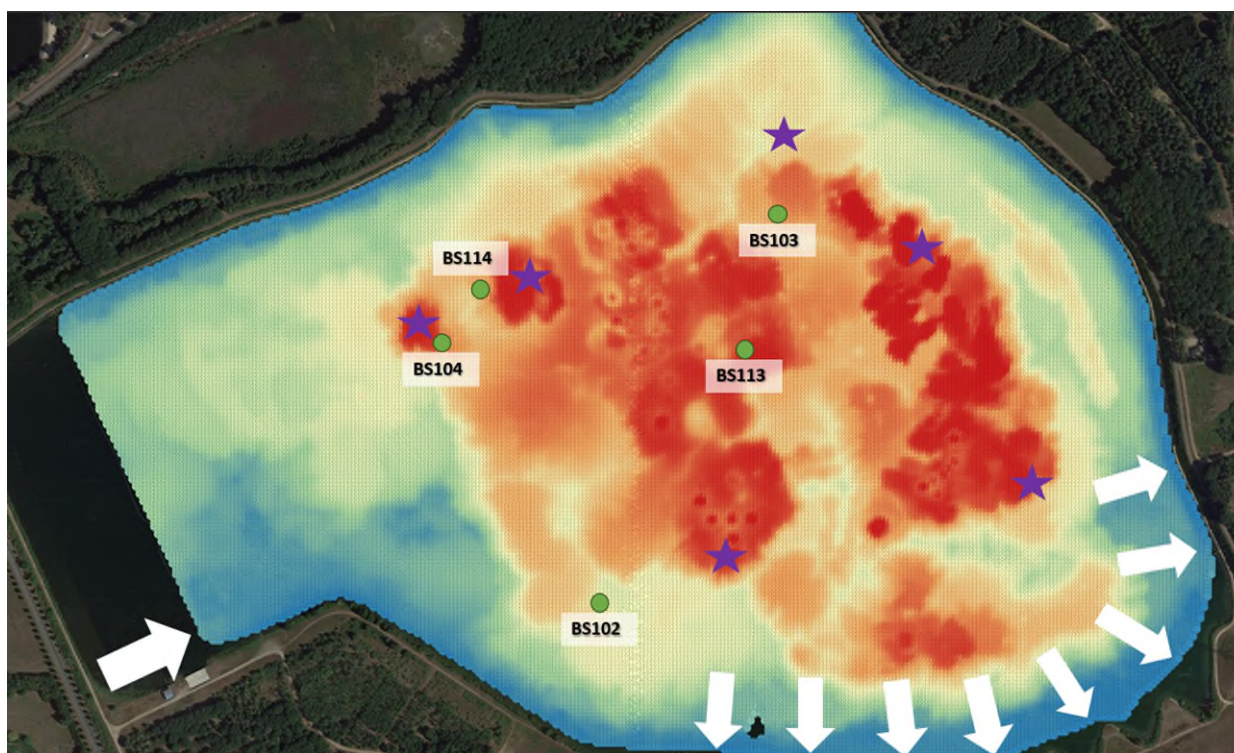
Figuur 22 Gemiddelde temperatuur in de Petrusplaat op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurschaal van de doorsnede.

3.3 Bekken WML (De Lange Vlieter)

Voor WML is het bekken De Lange Vlieter gemodelleerd in Delft3D. De gegevens die nodig zijn voor of gebruikt zijn in het model zijn weergegeven in Tabel 4. Het bodemprofiel, ingaande en uitgaande waterstromen en beluchtingspunten zijn weergegeven in Figuur 23. Tevens zijn hier de meetpunten aangegeven die gebruikt zijn om het model te vergelijken met metingen.

Tabel 4 Gegevens simulaties bekken WML (De Lange Vlieter)

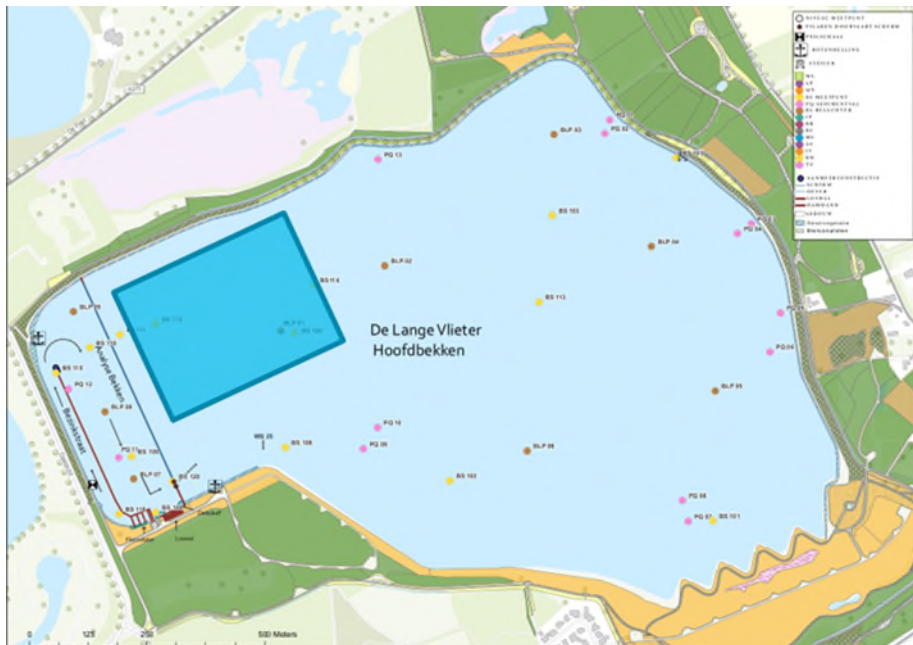
Parameter	Waarde
Grid	5 m*5 m, 47 lagen (0,5m per laag bovenste en onderste 5m, 1m per laag in het midden)
Diepte gemiddeld en maximaal	20 m en 35 m
Gesimuleerde periode	01-01-2020 tot 01-01-2021
Tijdstap	0,1 min
Ingaande debiet	0,46 m ³ /s
Ingaande watertemperatuur	6,4-23,9°C uit metingen WML (Figuur 26)
Beluchting	6 beluchters. Per beluchter: 164 m ³ /h lucht, omgerekend naar 12,4 m ³ /s water, uit/aan over de tijd (Figuur 26)
Begintemperatuur op 01-01-2020	6,5 (°C)
Secchi diepte	1 m (constant) ²
Weercondities	KNMI 377 (Eil)



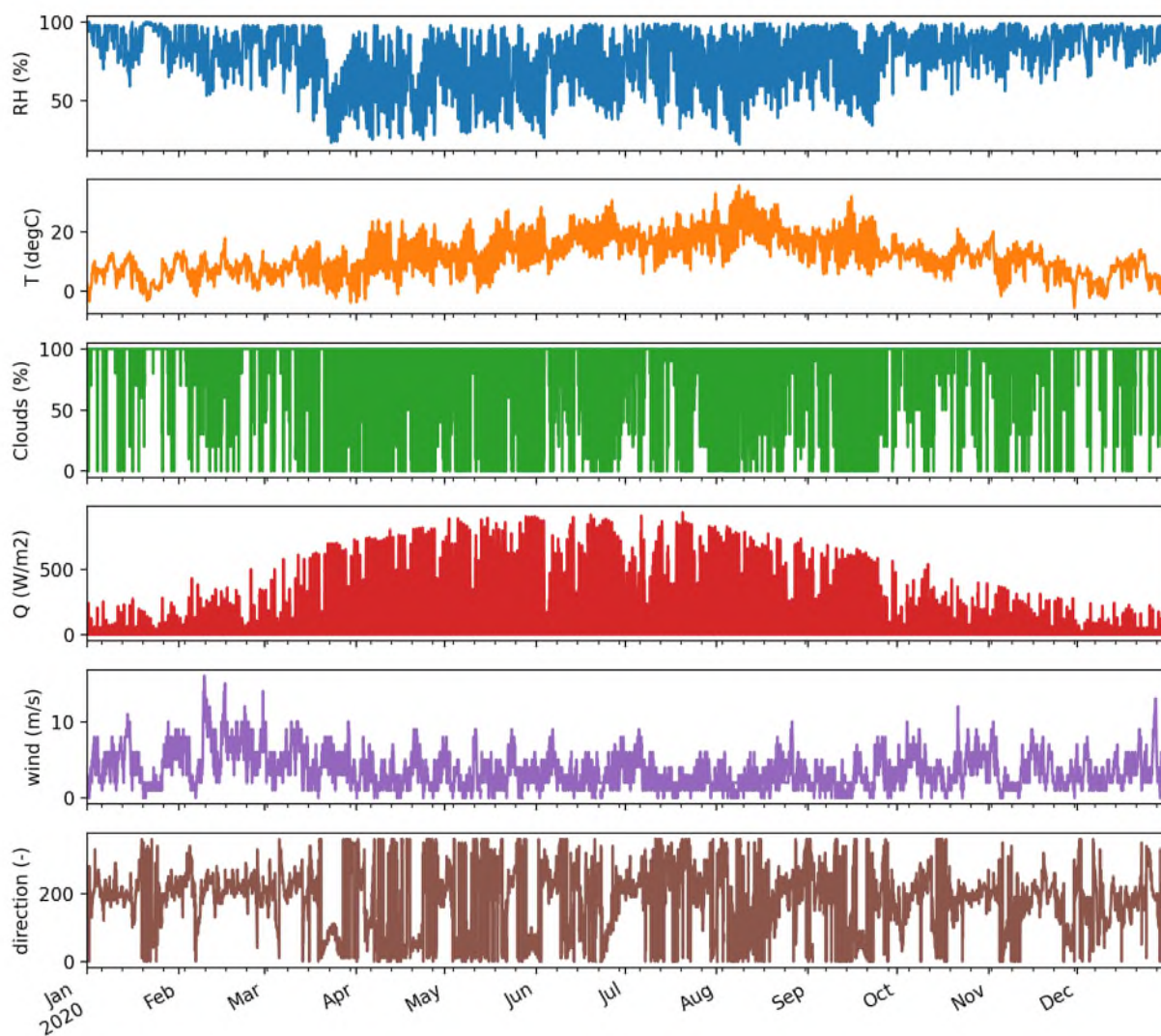
Figuur 23 Bodemprofiel van De Lange Vlieter (kleurcode: 0 [blauw] t/m 35m [rood]), inlaat en uitlaat is aangegeven met de pijlen. De beluchting is aangegeven met de ster. De meetpunten zijn weergegeven met de groene bolletjes.

² In de praktijk kunnen deze waarden groter zijn (tot meer dan 15 m)

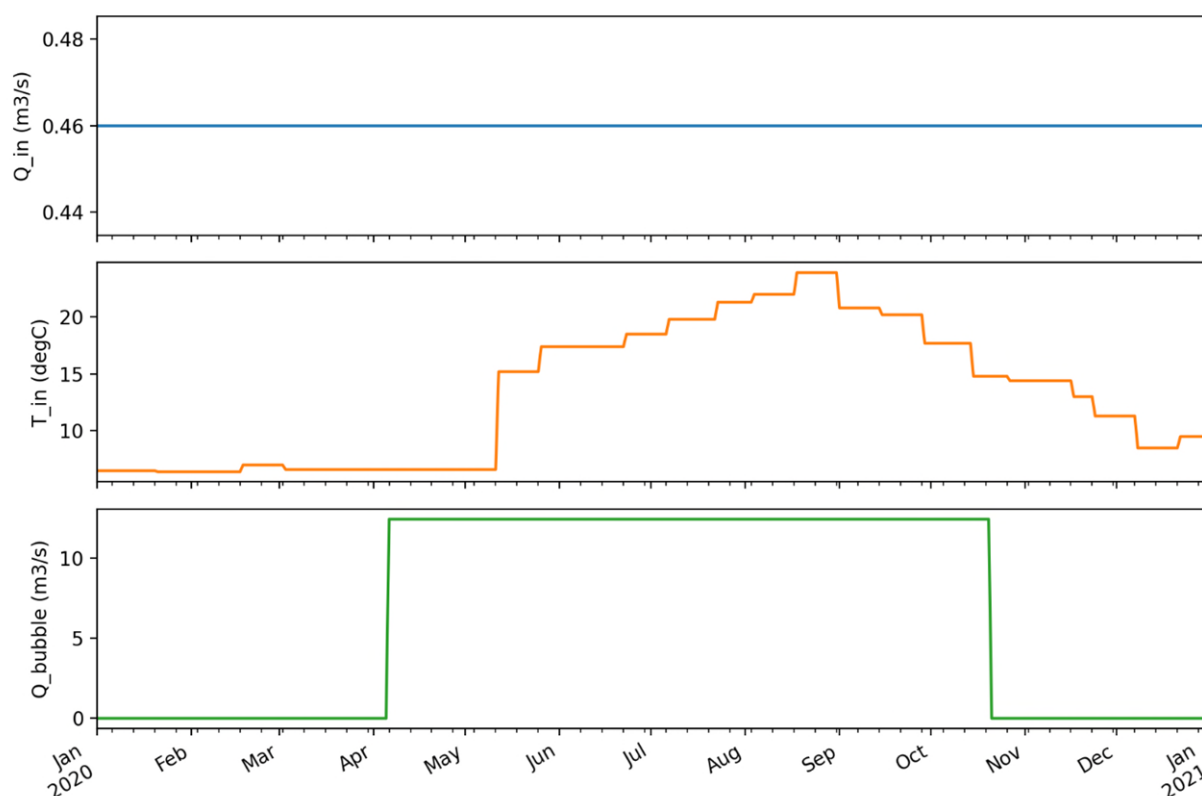
Voor het bekken De Lange Vlieter is gekozen voor een vierkant systeem met zonnepanelen in de noordwest hoek van het Hoofdbekken (Figuur 24). De bedekkingsgraad is daarmee relatief laag (10%), het is echter wel een aaneengesloten gedeelte dat bedekt wordt met zonnepanelen.



Figuur 24 Bedekking met zonnepanelen voor De Lange Vlieter (WML)



Figuur 25 Gegevens van het KNMI station Ell die gebruikt zijn als randvoorwaarde in het model. Van boven naar beneden: relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur, wolkenbedekking, zonnestraling, windsterkte, windrichting (360=noord, 90=oost, 180=zuid, 270=west)..

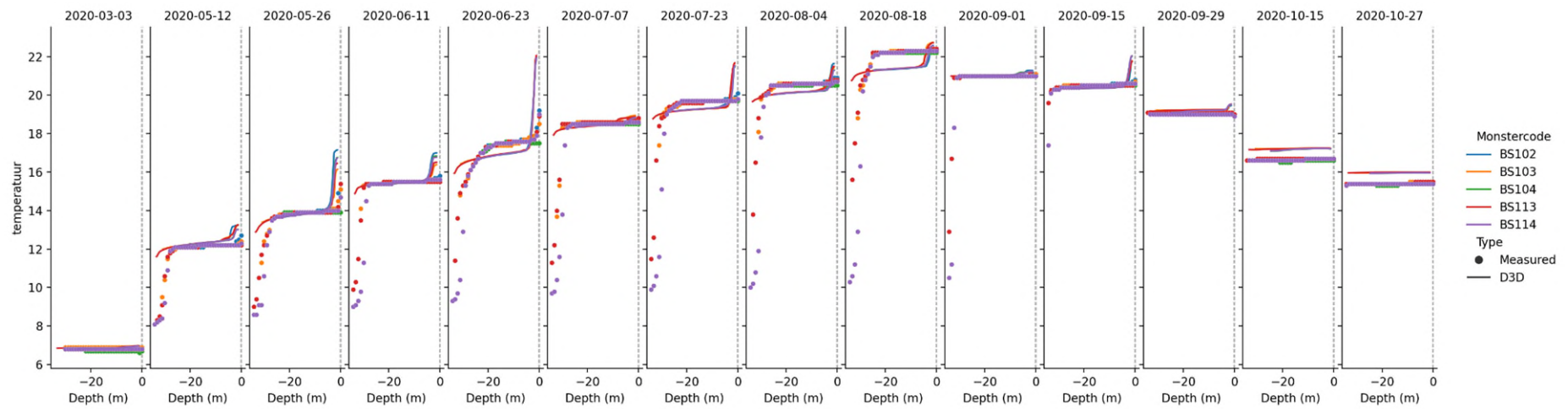


Figuur 26 Randvoorwaarden in het hydrodynamische model, van boven naar beneden: ingaande flow, ingaande temperatuur van het instromende water, debiet van bellenbeluchting per beluchter.

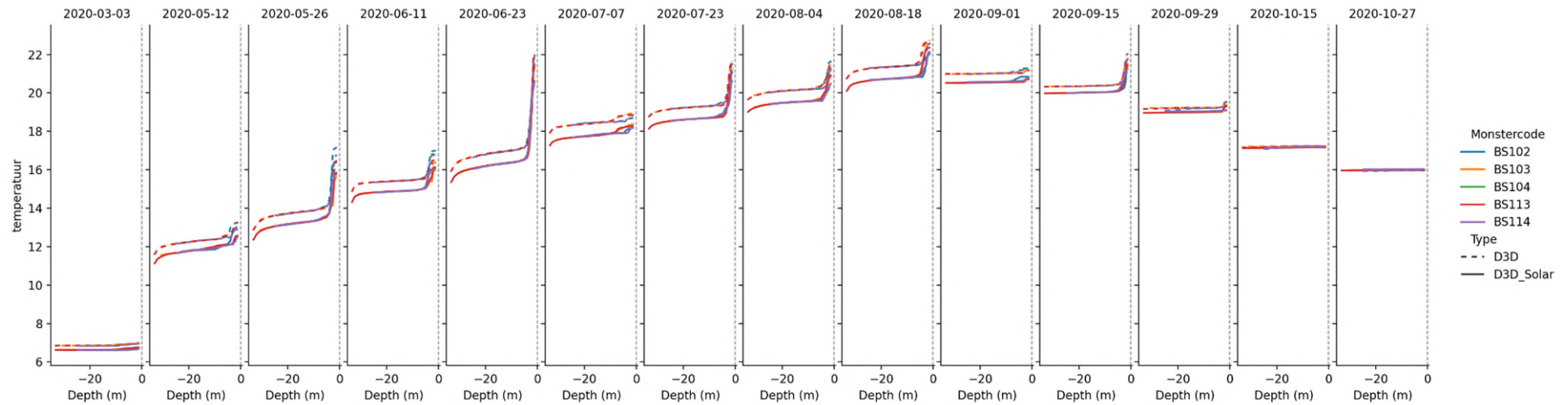
De gebruikte weersgegevens zijn weergegeven over de berekende periode in Figuur 25. Andere randvoorwaarden in het model zijn weergegeven in Figuur 26.

3.3.1 Vergelijking met metingen

Een vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen voor het bekken De Lange Vlieter is weergegeven in Figuur 27 (de locaties van de meetpunten is weergegeven in Figuur 23). Het algemene temperatuurverloop over de maanden wordt goed weergegeven door het model, alleen in de laatste maand is de afkoeling van het bekken iets minder sterk in het model. Op een aantal warme dagen in juni en juli is te zien dat het model een sterkere temperatuurstijging van de toplaag laat zien. Deze overschatting van de stratificatie was ook zichtbaar in de andere bekkens (PWN en Evides). Het bekken wordt echter wel gemengd in het model, zo is bijvoorbeeld op 7 juli de stratificatie weer weg. Een ander opvallend verschil tussen het model en de meting zijn de lage gemeten temperaturen bij de bodem in de periode mei-begin september. Het WML bekken heeft een aantal (diepe) troggen waarin deze lage temperaturen voorkomen. Een mogelijke verklaring hiervoor is stroming van grondwater met een lagere temperatuur door deze troggen heen, wat niet in het model zit.



Figuur 27 Gemeten en gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte op verschillende dagen over het jaar voor De Lange Vlieter (WML)



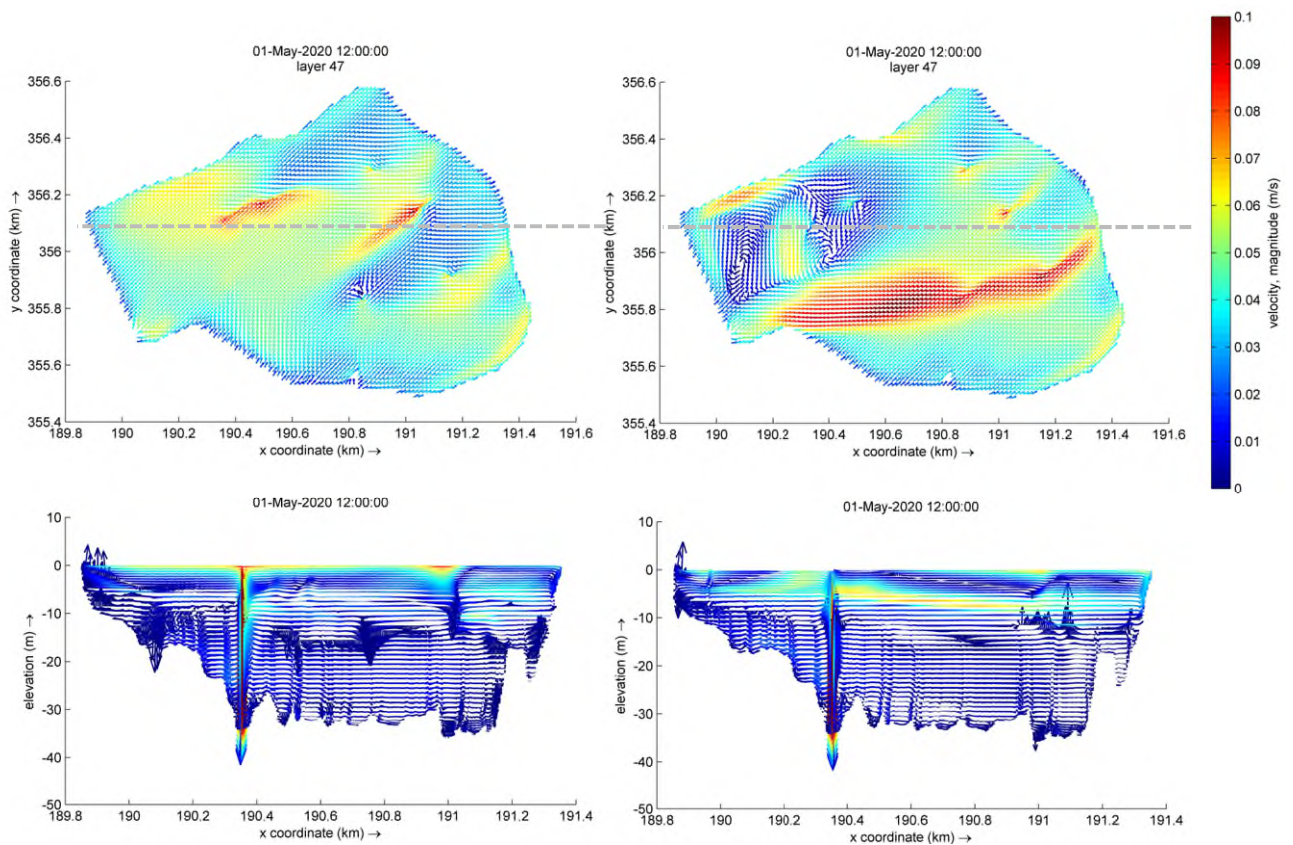
Figuur 28 Gemodelleerde temperatuurprofielen over de diepte met (getrokken lijn) en zonder (gestippelde lijn) zonnepanelen voor bekken De Lange Vlieter (WML).

3.3.2 Effect zonnepanelen

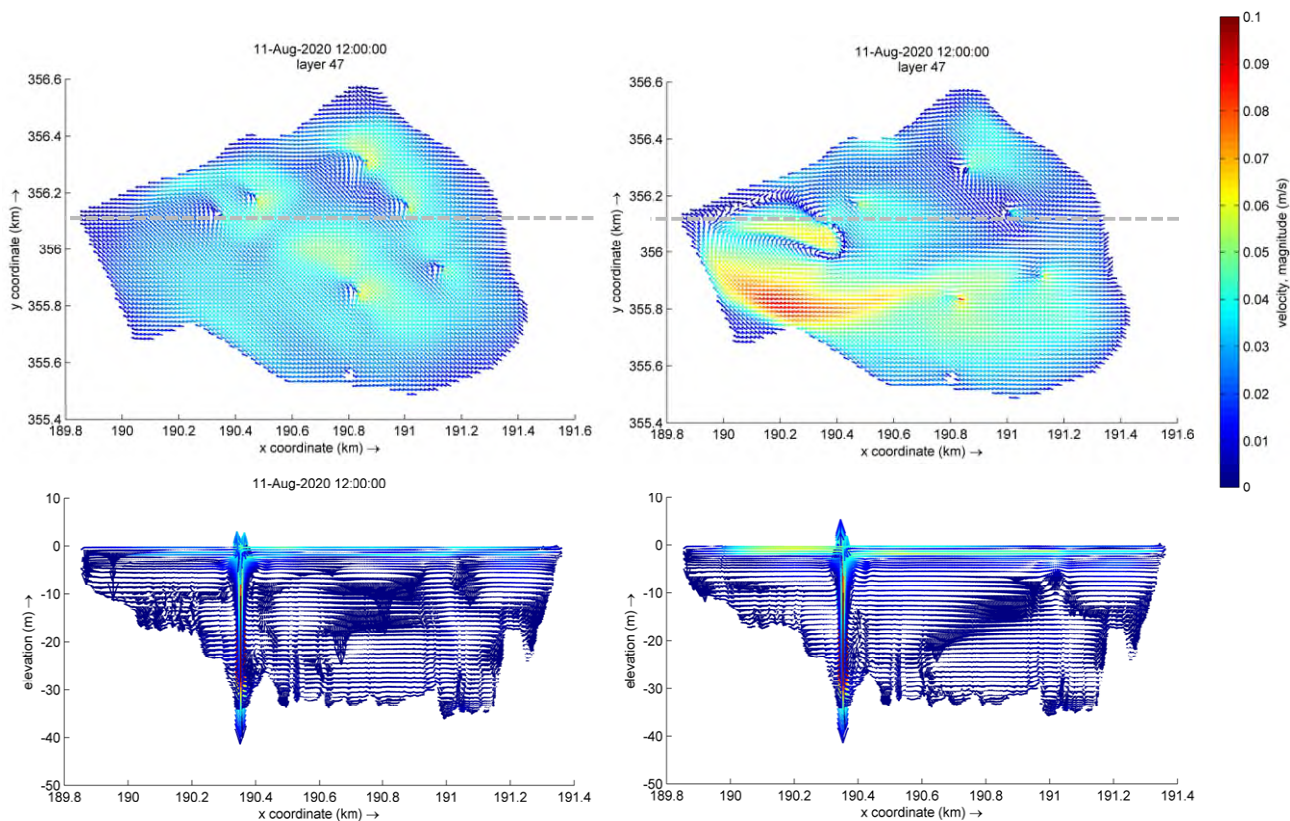
Het effect van de zonnepanelen op de temperatuurprofielen over de diepte is weergegeven in Figuur 28. Net zoals bij de bekkens van PWN en Evides is de opwarming zonder panelen langzamer omdat de zonnepanelen de zonnestraling blokkeren. En na de zomer koelt het water langzamer af, omdat de zonnepanelen de warmte vasthouden. Dit effect is minder groot dan bij PWN en Evides, omdat de bedekking lager is. De mate van stratificatie blijft echter hetzelfde met en zonder zonnepanelen.

Aan de snelheidsvelden is te zien dat voor het bekken van WML de snelheidspatronen veranderen door de zonnepanelen (Figuur 29 en Figuur 30), maar er is nog steeds voldoende menging in de situatie met zonnepanelen. In het snelheidsveld van mei is er wel een gebiedje onder de zonnepanelen met wat lagere snelheden (Figuur 29), maar in augustus is het juist omgekeerd (Figuur 30). De beluchter vlak naast het zonne-eiland helpt ook mee voor de menging onder het zonne-eiland.

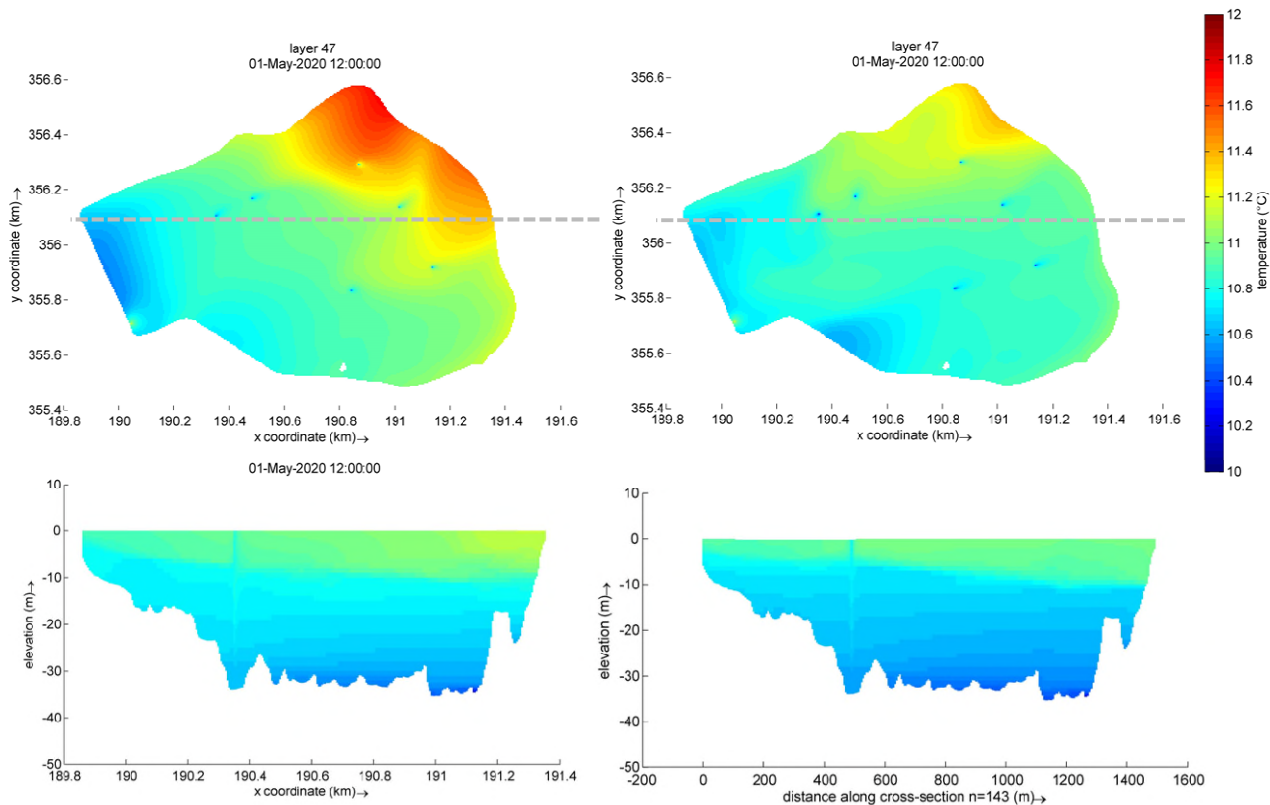
Uit het temperatuurverloop (Figuur 31 en Figuur 32) valt op te maken dat de temperatuur direct onder de panelen iets lager is, omdat er minder directe zonnestraling is op het water onder de panelen. Omdat er nog voldoende stroming is onder de panelen, wordt het water voldoende ververs om niet tot hogere temperaturen te leiden.



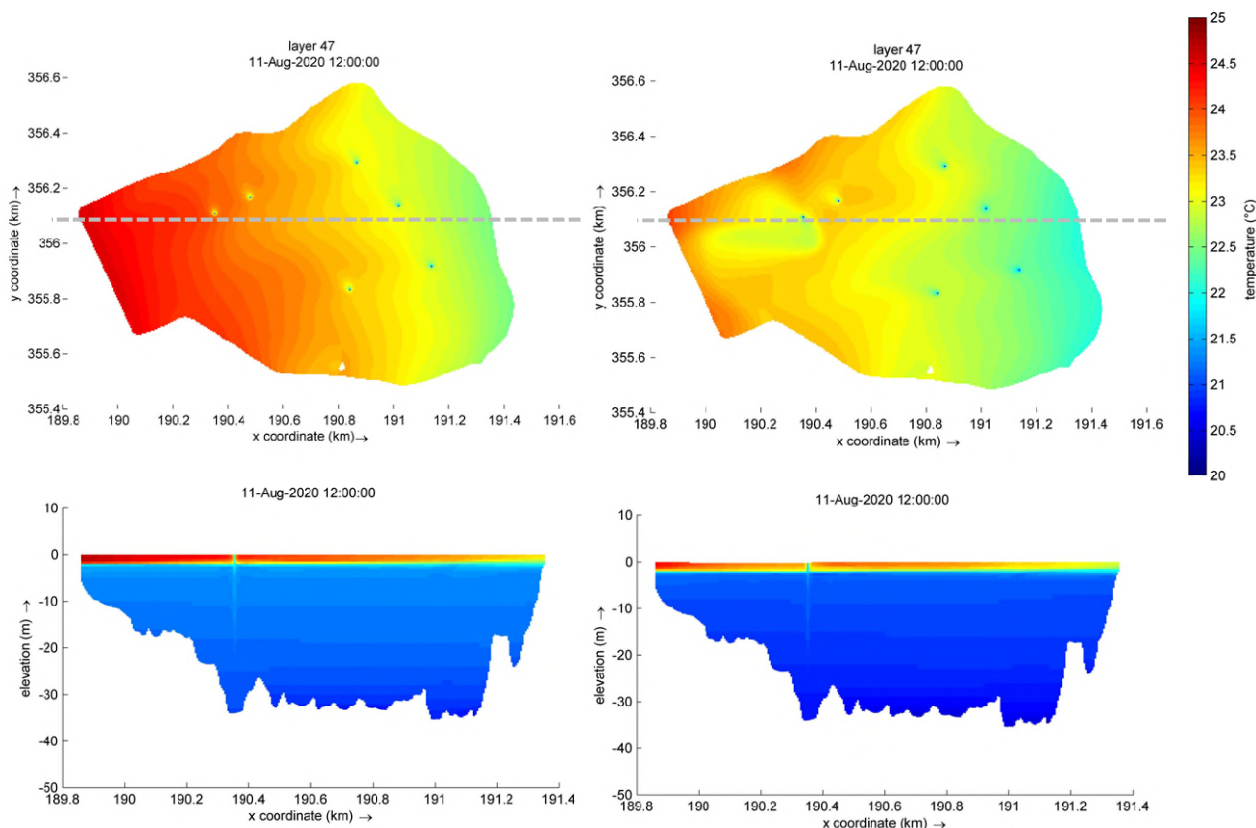
Figuur 29 Gemodelleerde snelheden in De Lange Vlieter op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 30 Gemodelleerde snelheden in De Lange Vlieter op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.



Figuur 31 Gemodelleerde temperatuur in De Lange Vlieter op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen



Figuur 32 Gemodelleerde temperatuur in De Lange Vlieter op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen

3.4 Discussie

De hydrodynamische modellering laat in grote lijnen goede overeenkomsten zien met de gemeten temperatuurprofielen. Het model laat wel een grotere temperatuurstratificatie zien in met name de toplaag van het bekken in de zomermaanden. Dit verschil was het grootste bij het Evides bekken. Mogelijke oorzaak hiervan is een onderschatting van het effect van de beluchting of menging door de wind. Het model is hiermee aan de conservatieve kant (voorspelling geeft een sterkere stratificatie dan de meting).

Het plaatsen van de zonnepanelen op het bekken geeft andere mengpatronen in het bekken. Het lijkt er met name op dat kleinere recirculatiecellen optreden door het plaatsen van zonnepanelen. Dit zorgt echter niet voor minder menging of minder stratificatie in het bekken door het plaatsen van zonnepanelen. Grootste invloed van de zonnepanelen op de temperatuur (onder de aangenomen modelformulering van het effect van de zonnepanelen) komt doordat de zonnepanelen de zonnestraling blokkeren en de warmte van het water in het bekken beter vasthouden. Hierdoor warmt het bekken minder snel op in het voorjaar en koelt het langzamer af in het najaar. Dit effect is zichtbaar bij alle drie de bekkens, maar het minst bij WML, omdat hier de bedekking maar 10% was. In de temperatuurverdeling van het water in het bekken ontstaan ook lokaal verschillen door het plaatsen van zonnepanelen. Zo is bij PWN een hogere temperatuur zichtbaar direct onder de panelen, veroorzaakt door een lagere stroomsnelheid van het water aan het oppervlak direct onder de zonnepanelen. Dit effect is niet zichtbaar bij Evides en WML. Een mogelijke verklaring is een ander type bedekking van zonnepanelen (vierkante eilanden bij WML en Evides ten opzichte van cirkels bij PWN) in combinatie met de geometrie van het bekken. Zo liggen de zonnepanelen bij PWN ook op ondiepere stukken langs de randen van het bekken, dit is niet het geval bij WML en Evides. Bij WML speelt tevens mee dat de bedekking met zonnepanelen laag is en de zonnepanelen vlak naast de

plaats een beluchtingspunt zijn geplaatst. Daarnaast is het rekenrooster aan het oppervlak minder fijn bij het bekken van Evides en WML, zodat deze verschillen mogelijk niet goed opgepakt worden door het model.

4 Resultaten waterkwaliteitsmodellering

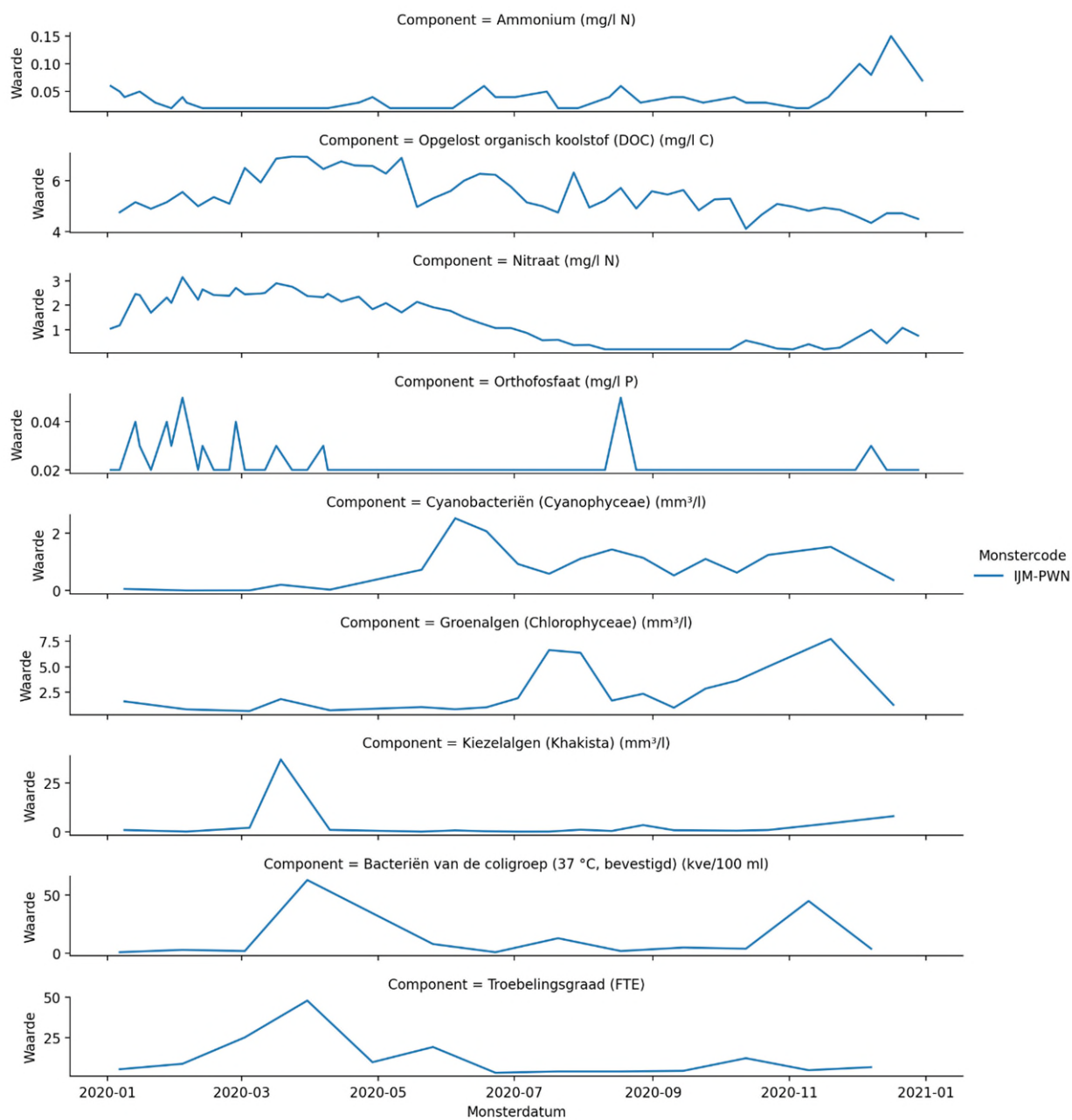
4.1 Bekken PWN (WPJ reservoir)

Het waterkwaliteitsmodel maakt gebruik van de hydrodynamische resultaten van Delft3D. Voor de waterkwaliteitsparameters die meegenomen worden, zijn de begincondities weergegeven in Tabel 5. Voor de parameters waarvan metingen van PWN beschikbaar waren (op het meetpunt uitgaande IJsselmeer) zijn de gemiddelde concentraties in de maand januari 2020 genomen als beginconditie. Indien er geen metingen beschikbaar zijn, is een standaard waarde voor de beginconditie gebruikt (standaard waarde van WAQ, mondeling besproken met Deltares).

Tabel 5 Begincondities waterkwaliteitsmodel, gemiddelde van de gemeten waarden in januari of aangenomen standaard waarde (tussen haakjes)

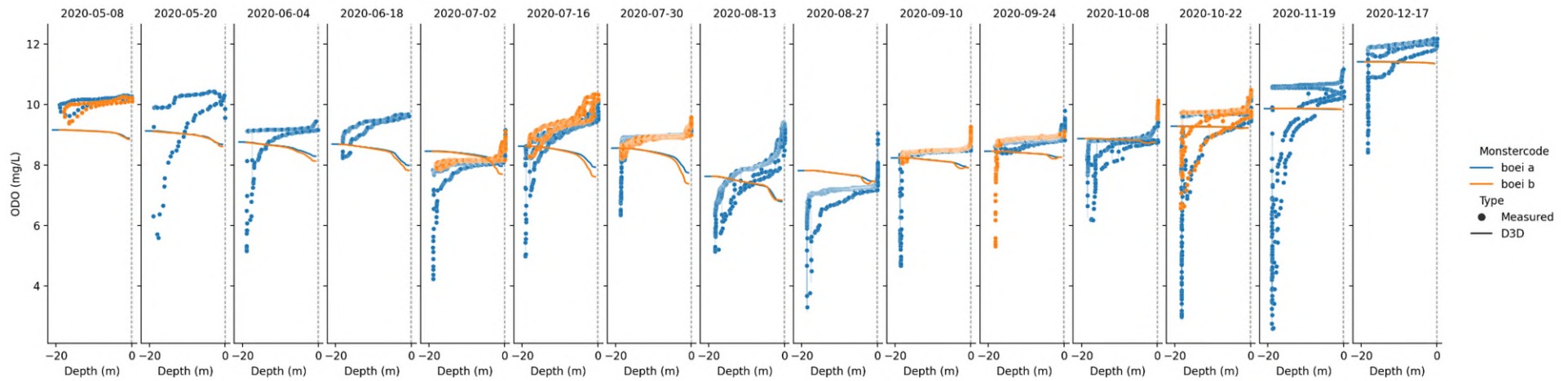
Naam in model	Toelichting (uit D-Water Quality (2018b))	Eenheid	Beginwaarde
OXY	Dissolved oxygen	gO ₂ /m ³	12
IM1	Suspended inorganic matter fraction 1	g/m ³	11,7
NH4	Ammonium	gN/m ³	0,042
NO3	Nitrate	gN/m ³	1,7
PO4	Ortho-phosfaat	gP/m ³	0,02
AAP	Adsorbed phosphate	gP/m ³	0,04
SI	Silicium	gSi/m ³	(1,5)
POC1	Particulate organic carbon	gC/m ³	(0,5)
PON1	Particulate organic nitrogen	gN/m ³	(0,2)
POP1	Particulate organic phosphate	gP/m ³	(0,01)
DOC	Dissolved organic matter	gC/m ³	5
FDIATOMS(_E,P)	Freshwater diatoms (E & P phenotype)	gC/m ³	0
GREENS(_E,N,P)	Green algae (E, N & P phenotype)	gC/m ³	0,2
MICROCYS(_E,N,P)	<i>Microcystis</i> (E, N & P phenotype)	gC/m ³	0,01
EColi	<i>E. coli</i>	MPN/m ³	10000
SOD	Potential Sediment Oxygen Demand	gO ₂	(4)
IM1S1	Inorganic matter fraction 1 in bed layer 1	g	(100)
AAPS1	Adsorbed ortho-phosphate in layers S1	gP	(0)
DetCS1	Fast decomposing detrital carbon in layers S1	gC	(1)
DetNS1	Fast decomposing detrital nitrogen in layers S1	gN	(0,1)
DetPS1	Fast decomposing detrital phosphorus in layers S1	gP	(0,01)

Naast begincondities zijn randvoorwaarden opgelegd aan het ingaande water. De gebruikte waarden zijn weergegeven in Figuur 33. Voor de ingaande *Microcystis* is de concentratie van cyanobacteriën gebruikt, voor de diatomeeën zijn de kiezelalgen gebruikt, en voor *E. coli* de bacteriën van de coligroep. De geometrie, rekenrooster is hetzelfde als bij de hydrodynamische berekening. De tijdstap is één minuut, de berekeningen zijn elke drie uur opgeslagen.

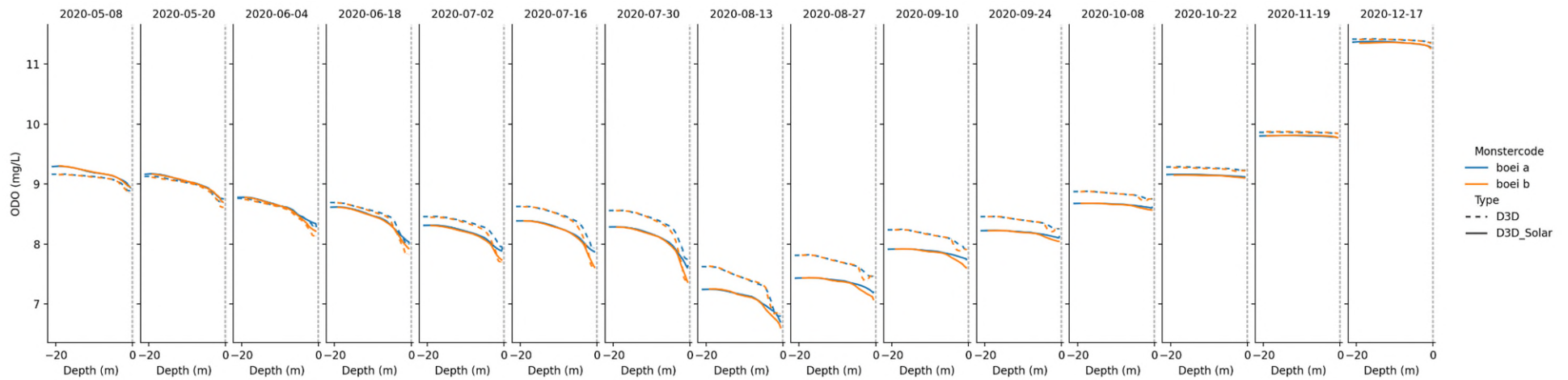


Figuur 33 Gemeten waterkwaliteitsparameters die gebruikt zijn als randvoorwaarde voor het ingaande water in de modellering van het WPJ bekken.

4.1.1 Vergelijking met metingen



Figuur 34 Vergelijking tussen gemeten (optical dissolved oxygen ODO monitor) en gemodelleerde zuurstofprofielen op verschillende dagen voor het WPJ bekken.

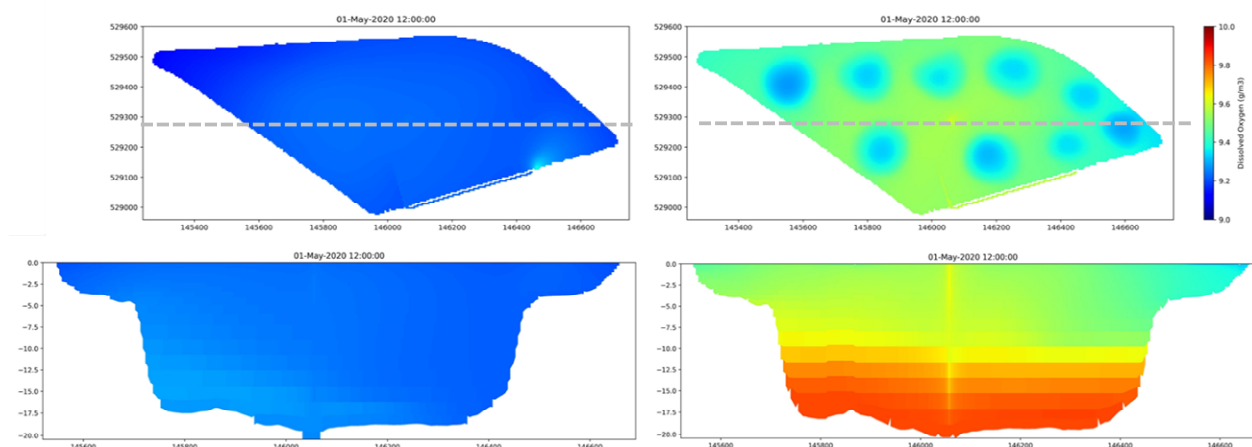


Figuur 35 Verschil in gemodelleerde zuurstofconcentraties over de diepte met en zonder zonnepanelen voor het WPJ reservoir.

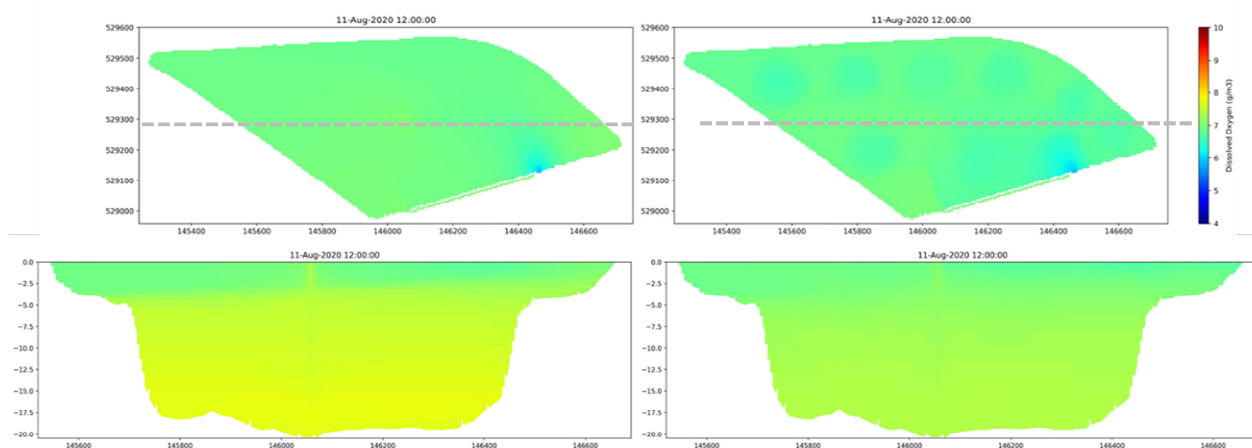
De gemeten en gemodelleerde zuurstofconcentraties over de diepte zijn weergegeven in Figuur 34. De metingen laten het hele jaar door een (lichte) stratificatie zien waarbij de zuurstofconcentratie aan het oppervlak hoger is en afneemt over de diepte in het bekken. Opvallend is dat het model een omgekeerd zuurstofprofiel laat zien (een toenemende zuurstofconcentratie met de diepte), al zijn de verschillen over de diepte wel klein in het model (max 1 mg/L verschil in opgelost zuurstof). Een mogelijke verklaring is dat het oplossen van zuurstof aan het vrije wateroppervlakte wordt onderschat in het model, of dat het afsterven van fytoplankton (zoals *Microcystis*) die binnenkomen vanuit het IJsselmeer in de bovenlaag van het bekken te veel zuurstof verbruikt in het model. Het model houdt daarnaast ook geen rekening met variaties in drijfvermogen van *Microcystis* (de cyanobacterie kan drijfvlagen vormen en kan zijn positie in de waterkolom regelen door het drijfvermogen aan te passen en zo naar het licht te gaan), welke een invloed kan hebben op het zuurstofprofiel. Zowel in de meting als in het model is de stratificatie van zuurstof klein. Desondanks laten de verschillen tussen meting en model wel zien dat de modelresultaten van de waterkwaliteit indicatief beschouwd moeten worden, en ze met name kunnen worden gebruikt om de verschillen met en zonder zonnepanelen te onderzoeken.

4.1.2 Effect zonnepanelen

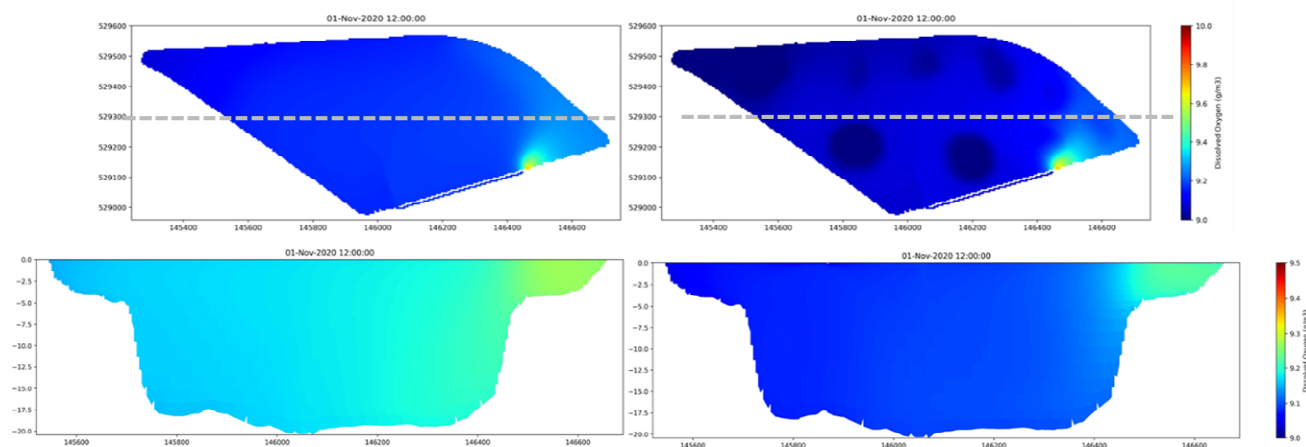
De zuurstofconcentraties met en zonder zonnepanelen zijn weergegeven in Figuur 35 t/m Figuur 38. De verschillen met en zonder zonnepanelen in gemodelleerde zuurstofconcentraties zijn klein (maximaal verschil van 0,5 mg/L in opgelost zuurstof). Het grootste verschil zit in de gemiddelde zuurstofconcentratie. Een deel hiervan kan verklaard worden door de verschillen in (gemiddelde) temperatuur met en zonder zonnepanelen over het jaar (paragraaf 3.1.1, waar blijkt dat het bekken met zonnepanelen langzamer opwarmt in het voorjaar, en langzamer afkoelt in het najaar). In het najaar is de temperatuur in het bekken met zonnepanelen hoger en daardoor is de zuurstofconcentratie lager (omdat er bij een hogere temperatuur minder zuurstof in water kan oplossen). In de zomer zijn de temperaturen nagenoeg gelijk met en zonder zonnepanelen. Hier kan de lagere zuurstofconcentratie mogelijk verklaard worden doordat het moeilijker is om zuurstof op te lossen aan het vrije wateroppervlak omdat er minder menging is door het wegvallen van de wind onder de zonnepanelen. Of dit voorspelde effect van het model echt significant zal zijn is moeilijk te zeggen, omdat de zuurstofconcentraties aan het wateroppervlak al onderschat werden in het model vergeleken met de metingen voor de situatie zonder zonnepanelen. Voor andere macroparameters (nitraat, ammonium, o-fosfaat) zijn de resultaten weergegeven in de Bijlage II. Hier zijn er weinig verschillen met en zonder zonnepanelen zichtbaar. Ook lijken de verschillen in het bekken met name door de stroming en menging te komen en niet door (bio)chemische processen.



Figuur 36 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het WPJ reservoir op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.

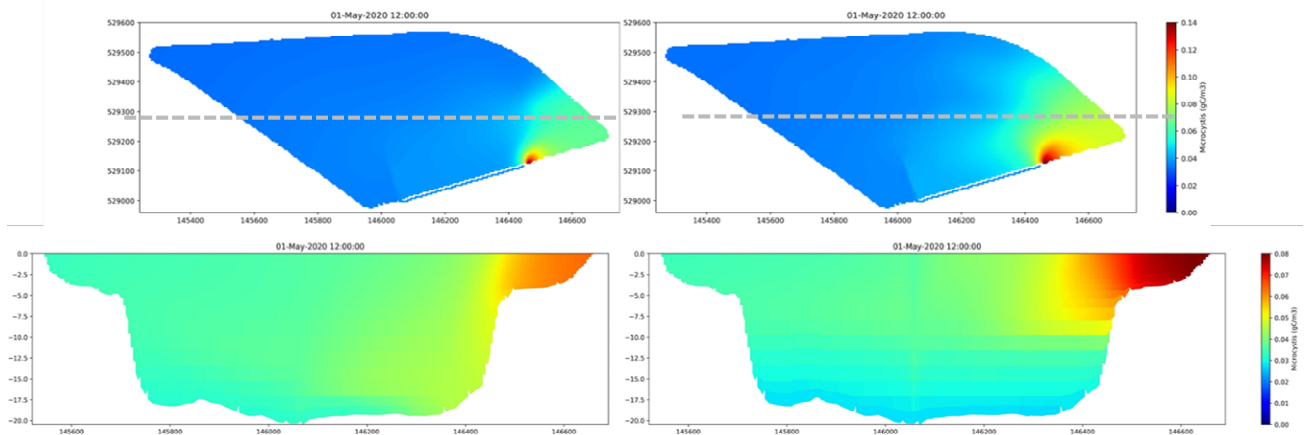


Figuur 37 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het WPJ reservoir op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen.

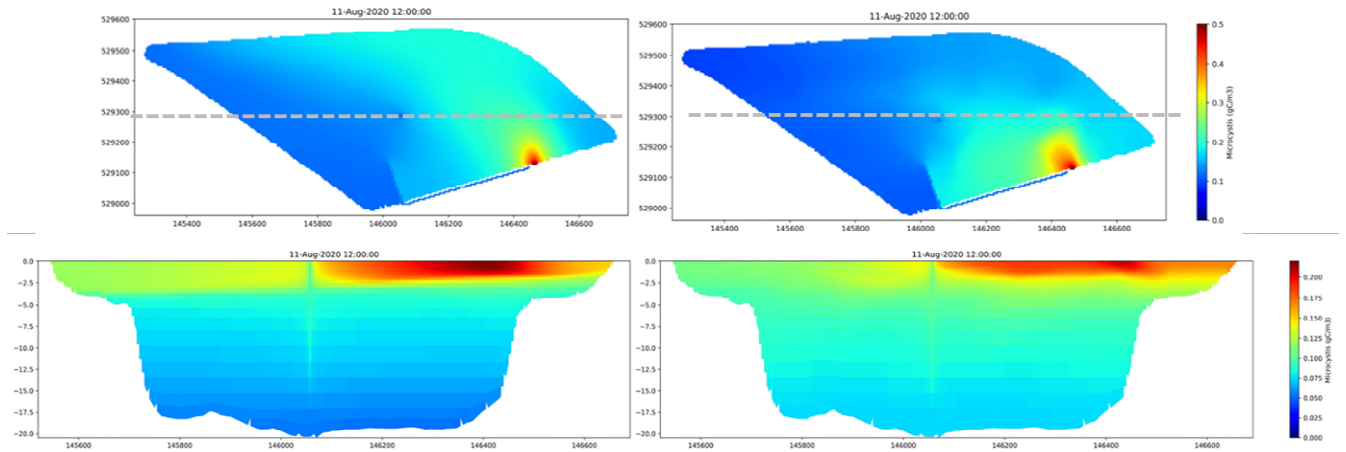


Figuur 38 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het WPJ reservoir op 1 november 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.

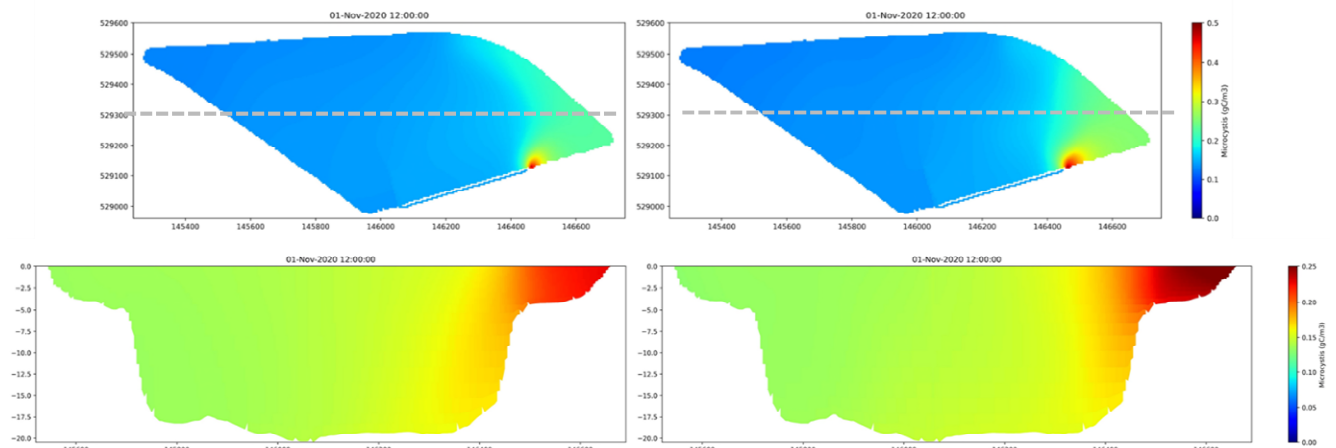
Voor het fytoplankton zijn de *Microcystis* waarden weergegeven in Figuur 39 t/m Figuur 41. Deze concentraties worden met name bepaald door de ingaande concentraties in het inlaatkanaal rechtsonder in het bekken uit het IJsselmeer. *Microcystis* lijkt netto niet toe te nemen in het bekken, maar te worden afgebroken. In augustus is de hoogste concentratie in de bovenlaag aanwezig, hier lijkt de menging minder goed dan in mei of november. De invloed van de zonnepanelen is echter klein. Voor de groenalgen (zie Bijlage II) is het beeld vergelijkbaar als voor *Microcystis*.



Figuur 39 Gemodelleerde *Microcystis* biomassa in het WPJ reservoir op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.

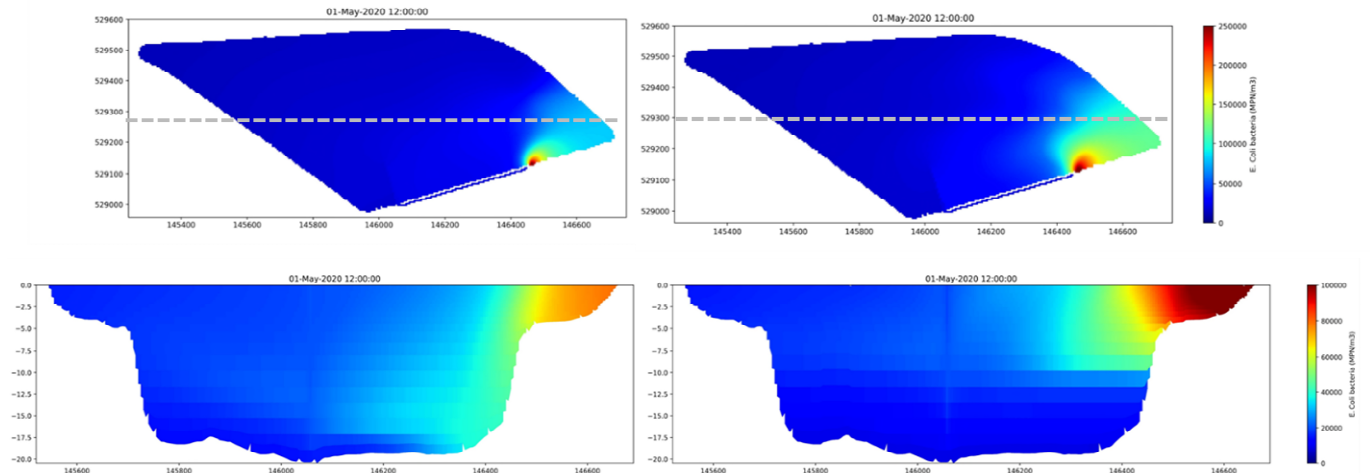


Figuur 40 Gemodelleerde *Microcystis* biomassa in het WPJ reservoir op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.

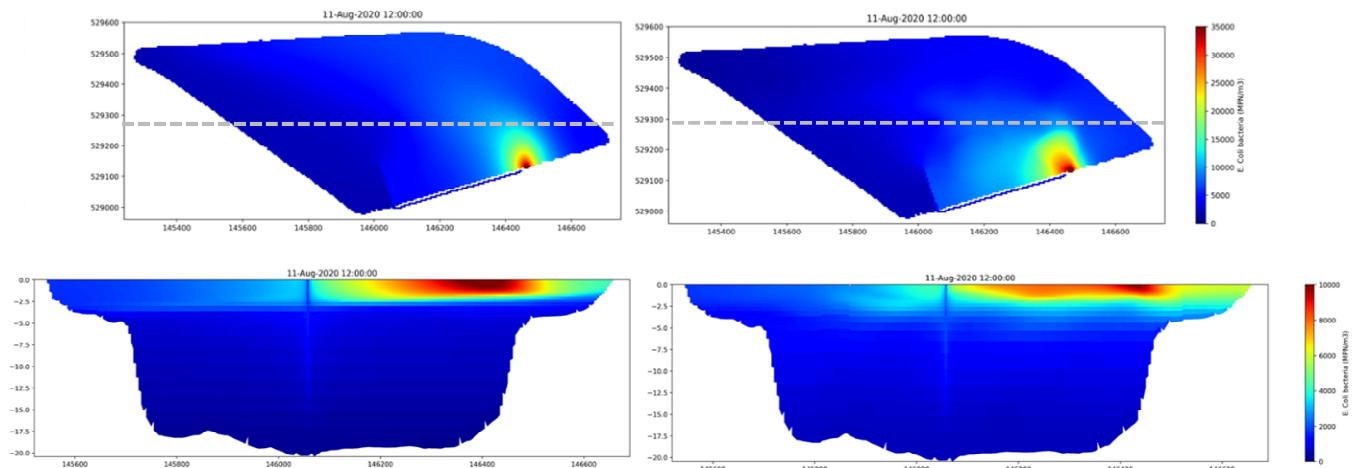


Figuur 41 Gemodelleerde *Microcystis* biomassa in het WPJ reservoir op 1 november 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.

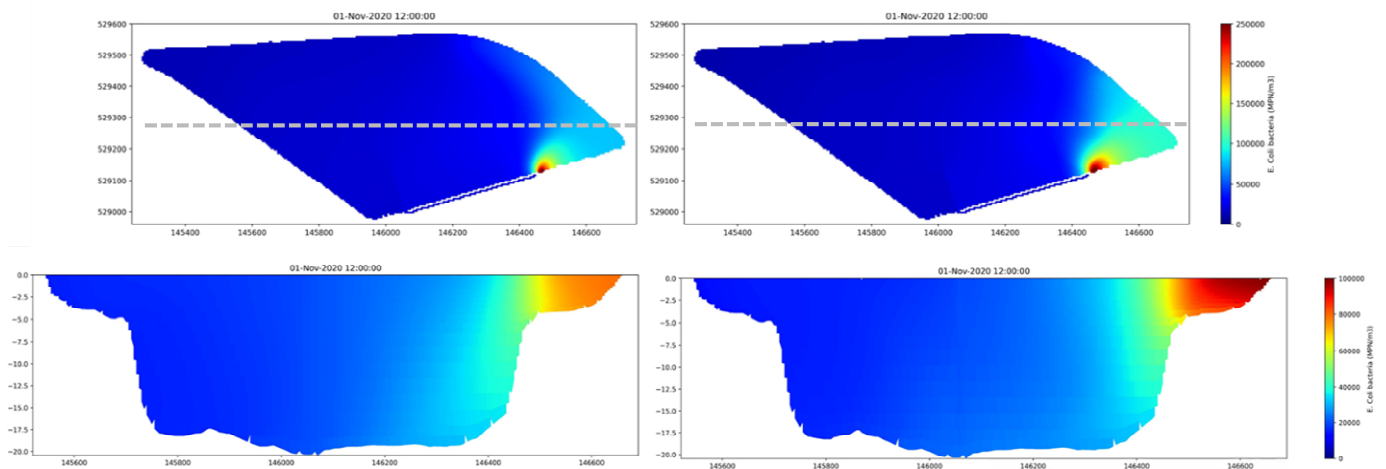
Voor de micro-organismen is *E. coli* weergegeven in Figuur 42 t/m Figuur 44. De concentraties zijn het hoogst bij het inlaatkanaal van het IJsselmeer rechtsonder in het bekken. Deze concentraties nemen snel af onder invloed van zonlicht en temperatuur. Er zijn geen verontreinigingsbronnen van *E. coli* meegenomen in het model. Verder lijkt er in mei iets meer stratificatie te zijn met zonnepanelen, maar dit is in augustus en november niet meer zichtbaar.



Figuur 42 Gemodelleerde *E. coli* dichtheden in het WPJ reservoir op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is MPN/m^3 =most probable number/ m^3 . Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.



Figuur 43 Gemodelleerde *E. coli* dichtheden in het WPJ reservoir op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is MPN/m^3 =most probable number/ m^3 . Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.



Figuur 44 Gemodelleerde *E. coli* dichtheden in het WPJ reservoir op 1 november 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is MPN/m^3 =most probable number/ m^3 . Let op de kleurenschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurenschaal van de doorsnede.

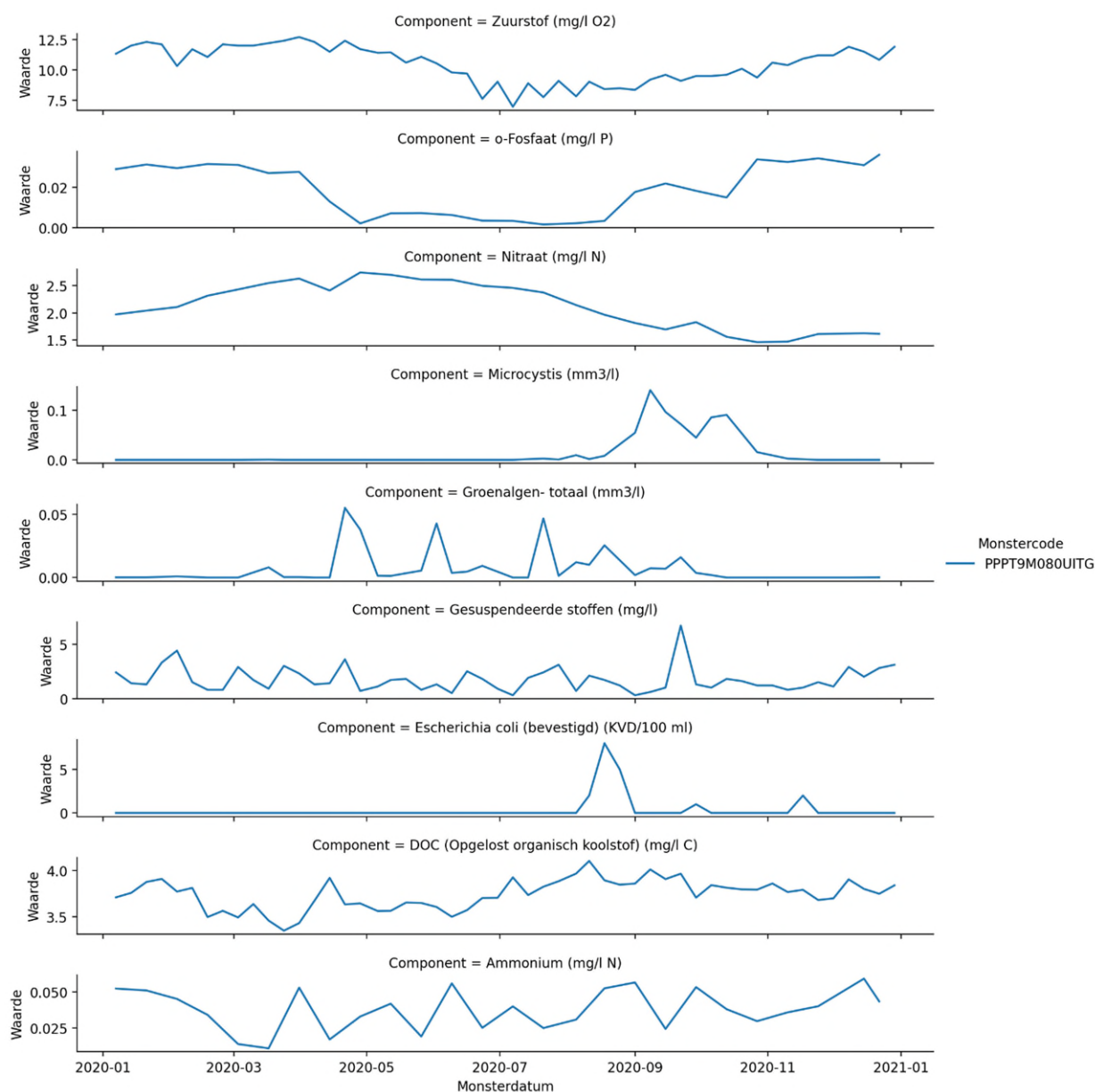
4.2 Bekken Evides (Petrusplaat)

Voor de waterkwaliteitsparameters die meegenomen worden in Delwaq, zijn de begincondities weergegeven in Tabel 6. Voor de parameters waarvan metingen van Evides beschikbaar waren zijn de gemiddelde concentraties in de maand januari 2020 genomen als beginconditie. Indien er geen metingen beschikbaar zijn, is een standaard waarde voor de beginconditie gebruikt (standaard waarde van WAQ, mondeling besproken met Deltares).

Tabel 6 Begincondities waterkwaliteitsmodel, gemiddelde van de gemeten waarde in januari of aangenomen standaard waarde (tussen haakjes)

Naam in model	Toelichting (uit D-Water Quality (2018b))	Eenheid	Beginwaarde
OXY	Dissolved oxygen	gO ₂ /m ³	11,9
IM1	Suspended inorganic matter fraction 1	g/m ³	2,1
NH4	Ammonium	gN/m ³	0,051
NO3	Nitrate	gN/m ³	2,0
PO4	Ortho-phosphaat	gP/m ³	0,03
AAP	Adsorbed phosphate	gP/m ³	0,014
SI	Silicium	gSi/m ³	(1,5)
POC1	Particulate organic carbon	gC/m ³	(0,5)
PON1	Particulate organic nitrogen	gN/m ³	0,45
POP1	Particulate organic phosphate	gP/m ³	(0,01)
DOC	Dissolved organic matter	gC/m ³	3,8
FDIATOMS(_E, P)	Freshwater diatoms (E & P phenotype)	gC/m ³	0,01
GREENS(_E,N,P)	Green algae (E, N & P phenotype)	gC/m ³	0,00004
MICROCYS(_E,N,P)	<i>Microcystis</i> (E, N & P phenotype)	gC/m ³	0,0
EColi	<i>E. coli</i>	MPN/m ³	10000
SOD	Potential Sediment Oxygen Demand	gO ₂	(4)
IM1S1	Inorganic matter fraction 1 in bed layer 1	g	(100)
AAPS1	Adsorbed ortho-phosphate in layers S1	gP	(0)
DetCS1	Fast decomposing detrital carbon in layers S1	gC	(1)
DetNS1	Fast decomposing detrital nitrogen in layers S1	gN	(0,1)
DetPS1	Fast decomposing detrital phosphorus in layers S1	gP	(0,01)

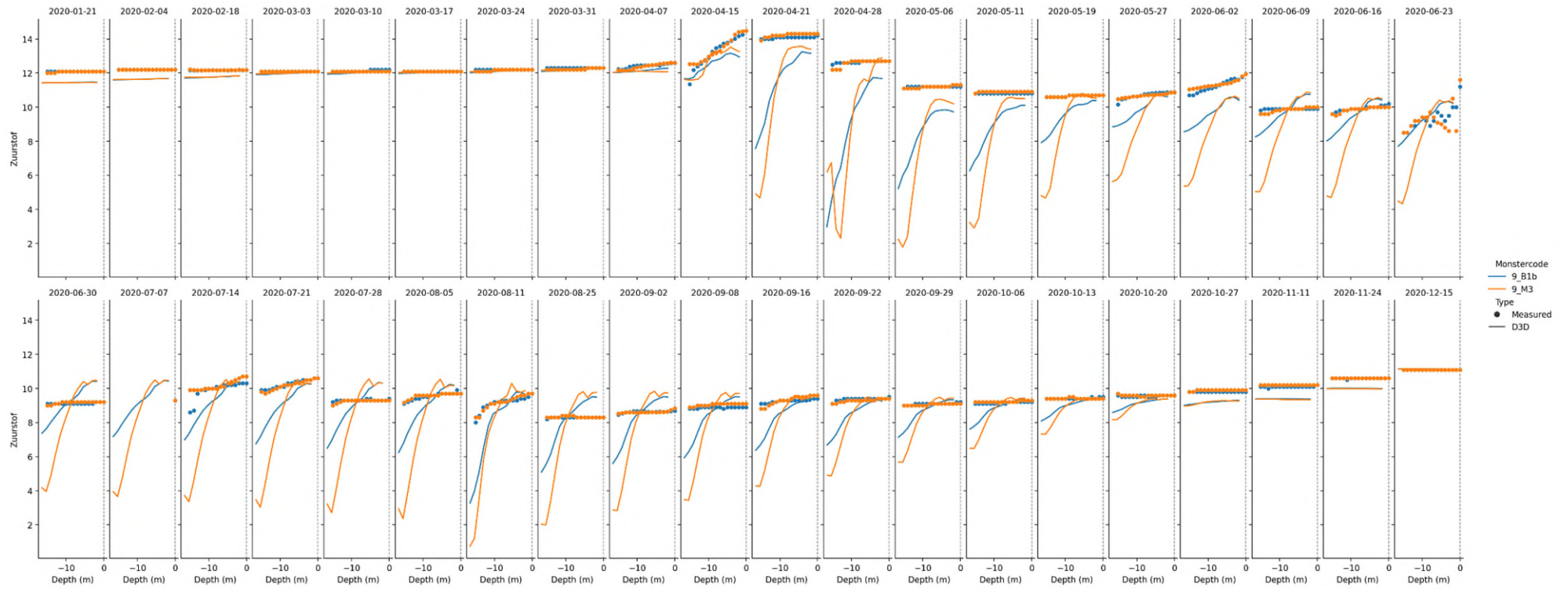
Naast begincondities zijn randvoorwaarden opgelegd aan het ingaande water. De gebruikte waarden zijn weergegeven in Figuur 45. De tijdstap van de berekening is één minuut en de resultaten zijn elke drie uur opgeslagen. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor kortere rekenstappen (0,5 min en 0,25 min), maar dit gaf vergelijkbare resultaten.



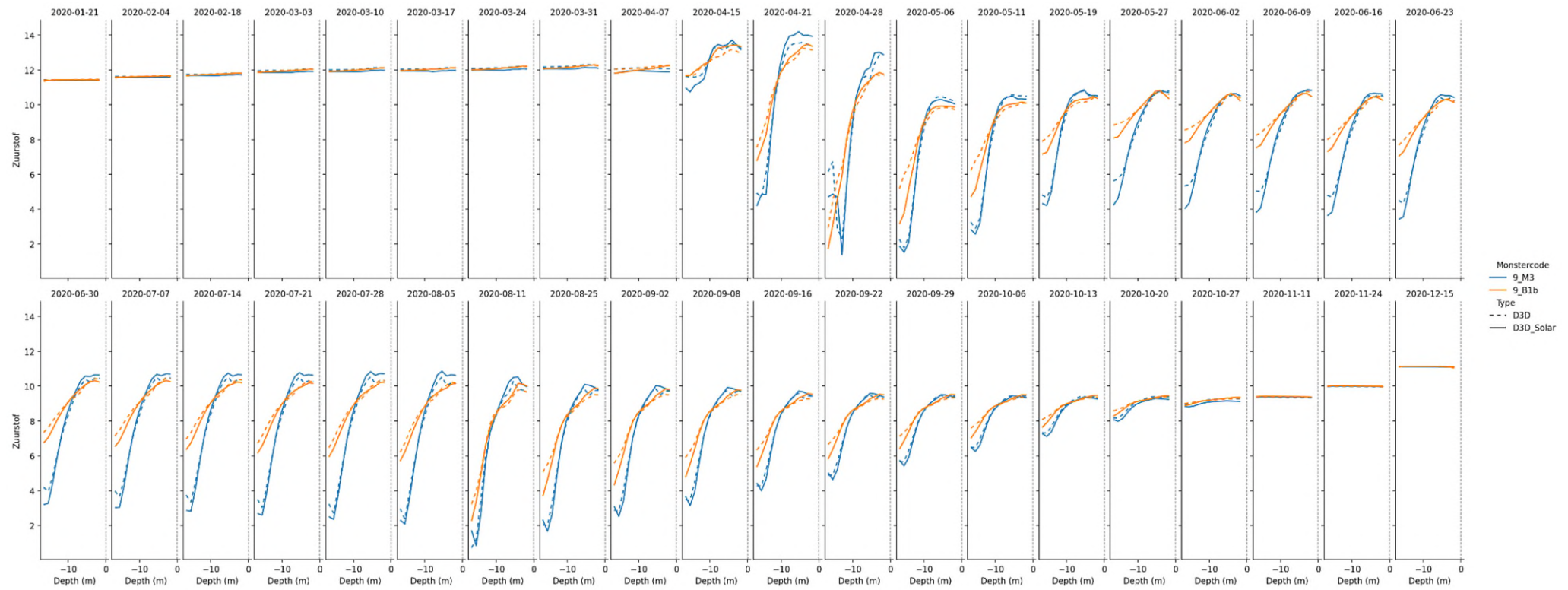
Figuur 45 Gemeten waterkwaliteitsparameters die gebruikt zijn als randvoorwaarde voor het ingaande water in de modellering van het Petrusplaat bekken.

4.2.1 Vergelijking met metingen

De gemodelleerde en gemeten zuurstofconcentraties over de diepte zijn weergegeven in Figuur 46. Tot aan april is er een goede overeenkomst tussen de metingen en het model, als er nog geen verschillen in zuurstofconcentratie over de diepte zijn. Vanaf april ontstaan er verschillen tussen de metingen en het model. Het model voorspelt een veel sterkere zuurstofstratificatie dan de metingen laten zien. In de temperatuurprofielen waren al (kleine) verschillen tussen de meting en het model zichtbaar, welke bij de zuurstofprofielen nog veel sterker zijn. De richting (afname in zuurstofconcentratie naarmate het dieper wordt) wordt wel goed voorspeld door het model. In het najaar blijft in het model de zuurstofstratificatie veel langer in stand (t/m oktober). Dit komt waarschijnlijk omdat de menging door de beluchting wordt onderschat in het model. Het model is hiermee sterk aan de conservatieve kant (de stratificatie wordt overdreven).



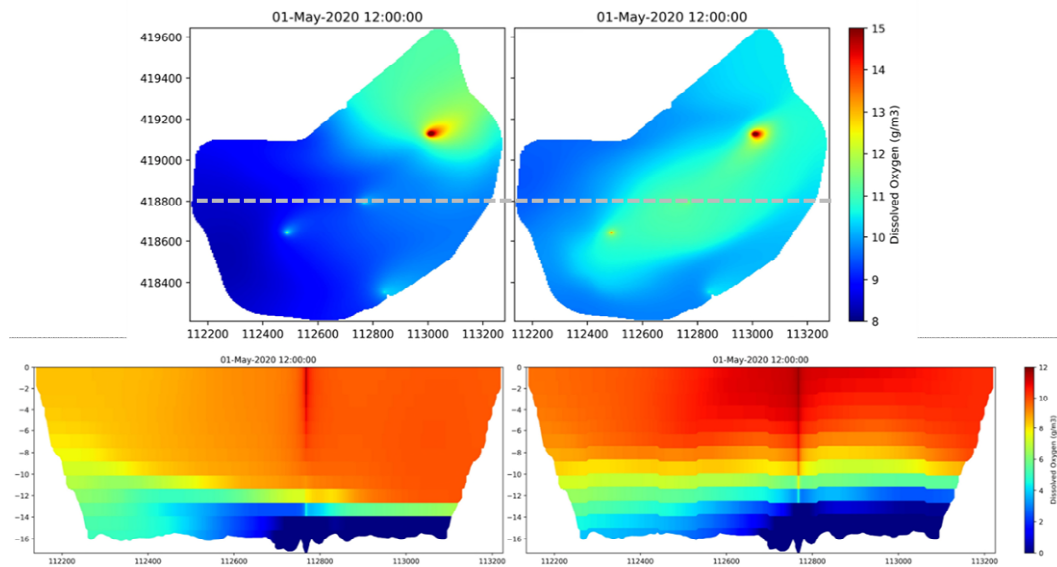
Figuur 46 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde zuurstofprofielen op verschillende dagen voor het Petrusplaat bekken.



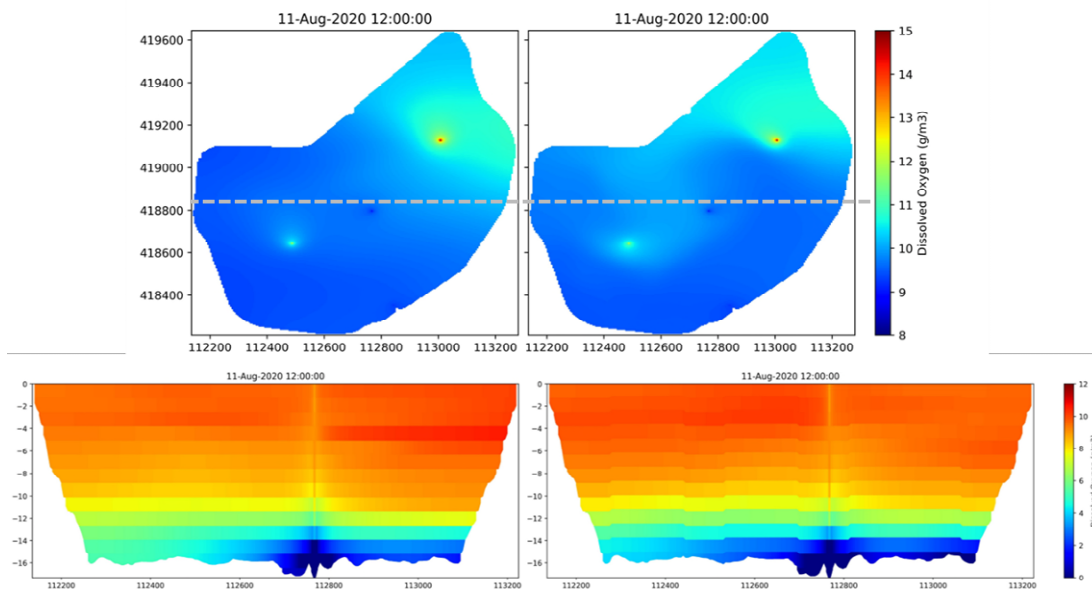
Figuur 47 Verskil in gemodelleerde zuurstofconcentraties over de diepte met en zonder zonnepanelen voor het Petrusplaat bekken.

4.2.2 Effect zonnepanelen

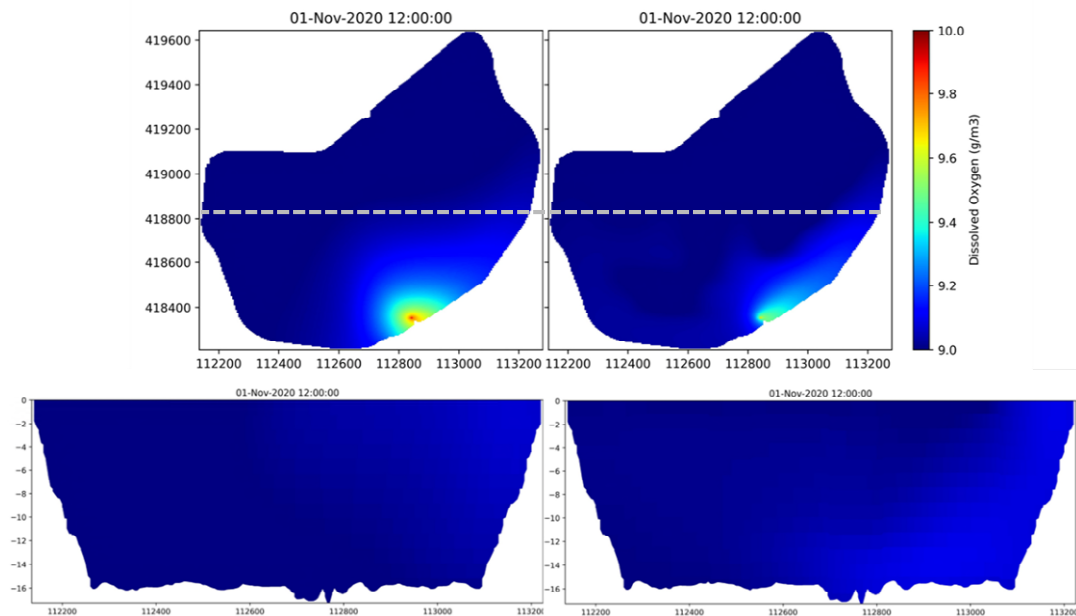
Het verschil in zuurstofprofielen met en zonder zonnepanelen is weergegeven in Figuur 47 (verschil tussen de gestippelde en getrokken lijnen) en de ruimtelijke verdeling van zuurstofconcentraties is weergegeven in Figuur 48 t/m Figuur 50 (de kleurschalen die de concentraties zuurstof aangeven zijn niet overal gelijk). De drie bellenkolommen zijn duidelijk te zien in mei met de hogere concentraties zuurstof aan het oppervlak en een verticale streep met hogere zuurstofconcentraties in de doorsnede. Alleen de middelste bellenkolom in augustus heeft een lagere zuurstofconcentraties, mogelijk dat deze de hele lage zuurstofconcentraties aan de bodem naar boven transporteert. De zonnepanelen lijken weinig invloed te hebben op de zuurstofstratificatie. De lokale verschillen in het bekken (tussen de twee meetpunten) zijn groter dan de verschillen met en zonder zonnepanelen. In de ruimtelijke profielen is de stratificatie van zuurstof ook goed zichtbaar. In mei en augustus is er sprake van een verloop van de zuurstofconcentraties en bij de bodem zijn zelfs zuurstofconcentraties van bijna 0 zichtbaar in het model. Deze zuurstofstratificatie is in november weer verdwenen. Dit effect is sterker dan in de metingen (zie Figuur 46). Deze stratificatie treedt zowel met als zonder zonnepanelen op, de zonnepanelen lijken het niet te versterken. Voor andere macroparameters (nitraat, ammonium, o-fosfaat, DOC) zijn de resultaten weergegeven in de Bijlage II. Ook hier zijn weinig verschillen met en zonder zonnepanelen zichtbaar.



Figuur 48 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het Petrusplaat bekken op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurschaal van de doorsnede.



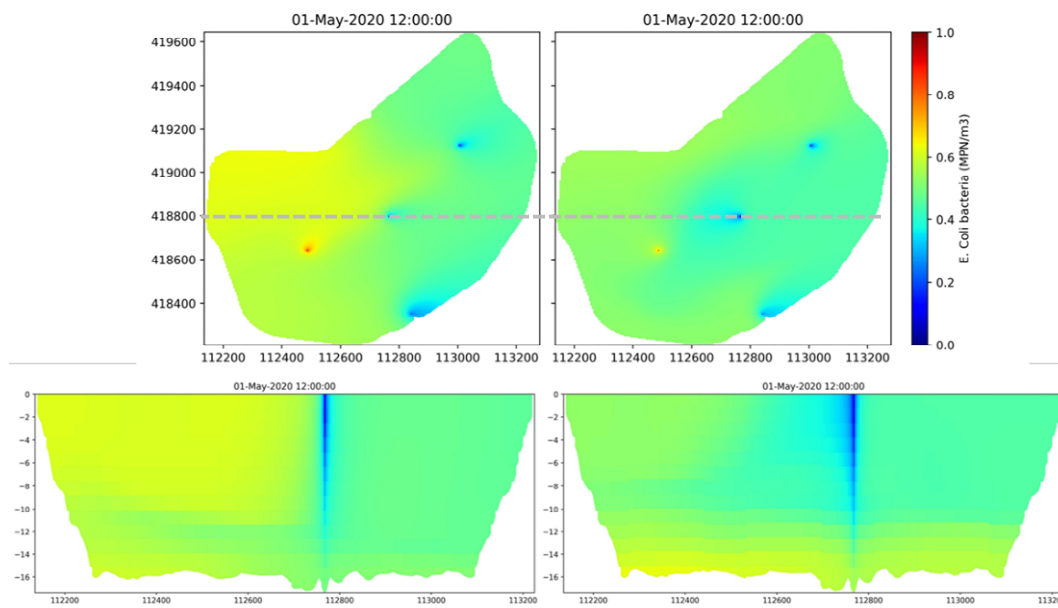
Figuur 49 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het Petrusplaat bekken op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurschaal van de doorsnede.



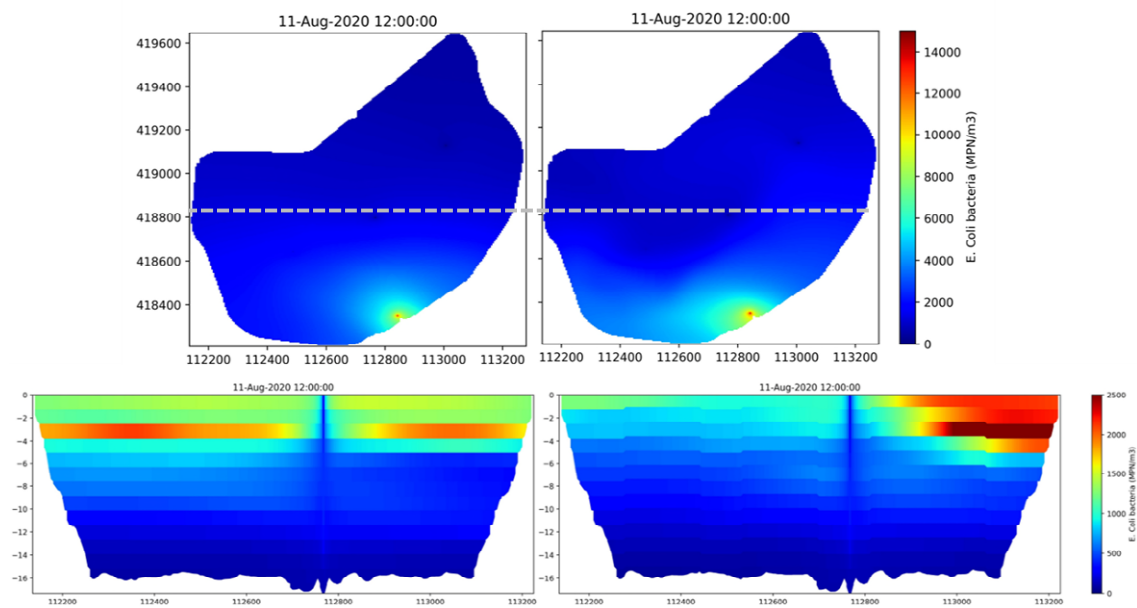
Figuur 50 Gemodelleerde (opgeloste) zuurstofconcentratie in het Petrusplaat bekken op 1 november 2020 12:00, bovenaanzicht van de bovenste laag en dwarsdoorsnede (locatie aangegeven met de gestreepte lijn). Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Let op de kleurschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurschaal van de doorsnede.

In het model treedt geen groei van fytoplankton op, deze concentraties zijn overal rond de 0 (m.u.v. de lage concentratie die bij de inlaat binnenkomt, maar daar sterven ze heel snel af). Dit gebeurt zowel met als zonder zonnepanelen. Mogelijk dat het fytoplanktonmodel numeriek niet stabiel was, verkleinen van de tijdstap van 1 min naar 0,5 min en 0,25 min maakte echter geen verschil.

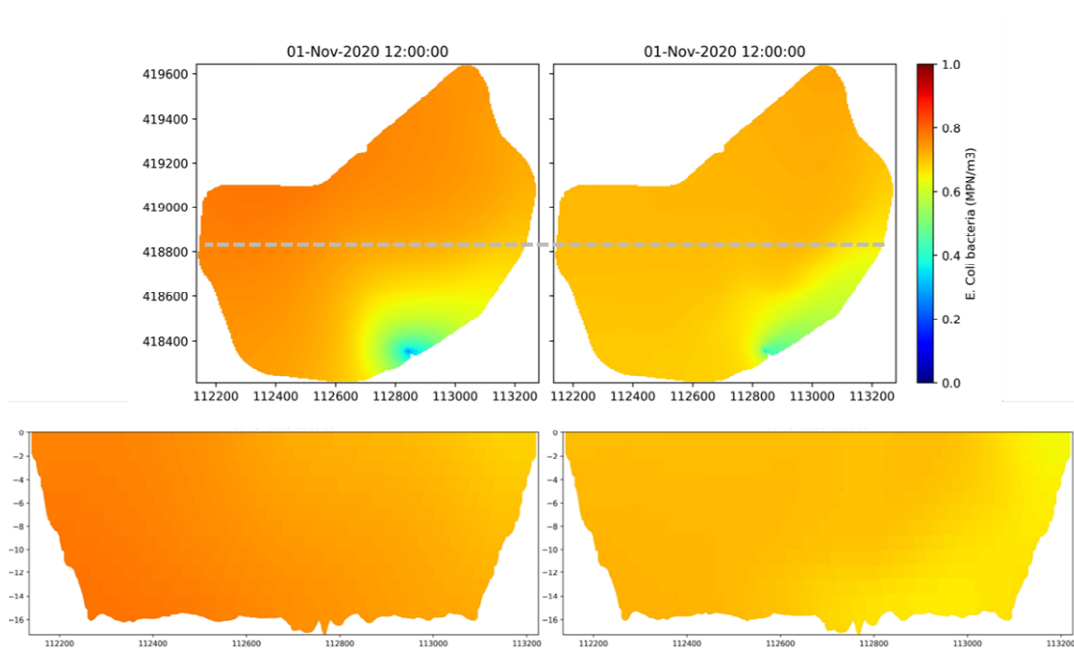
De gemodelleerde *E. coli* dichtheden zijn weergegeven in Figuur 51 t/m Figuur 53. In mei en november zijn de concentraties heel laag (< 1 MPN), in augustus zijn er wel hogere concentraties van *E. coli* in het bekken. Er zijn wel kleine verschillen voor de situaties met en zonder zonnepanelen, waarschijnlijk omdat de stroming anders is.



Figuur 51 Gemodelleerde *E.coli* dichtheden in het Petrusplaat bekken op 1 mei 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is MPN/m^3 =most probable number/ m^3 .



Figuur 52 Gemodelleerde *E.coli* dichtheden in het Petrusplaat bekken op 11 augustus 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is MPN/m^3 =most probable number/ m^3 . Let op de kleurschaal van het bovenaanzicht is niet hetzelfde als de kleurschaal van de doorsnede.



Figuur 53 Gemodelleerde *E.coli* dichtheden in het Petrusplaat bekken op 1 november 2020 12:00, bovenaanzicht en dwarsdoorsnede. Links is zonder zonnepanelen, rechts is met zonnepanelen. Eenheid die gebruikt wordt in het model is $\text{MPN}/\text{m}^3 = \text{most probable number}/\text{m}^3$.

4.3 Discussie

Voor de waterkwaliteitsmodellering is het standaard model van Delwaq gebruikt op basis van de hydrodynamische resultaten. Hier is verder geen kalibratie van modelparameters gedaan, waardoor vermoedelijk de diverse (bio)chemische processen niet goed worden beschreven voor de bekkens. Dit is al zichtbaar in de zuurstofprofielen, die niet volledig overeenkomen met de gemeten zuurstofconcentraties over de diepte. Zoals eerder al bleek bij het hydrodynamische model wordt de stratificatie in het bekken van Evides overschat door het model, wat leidt tot grotere verschillen in zuurstofconcentraties over de diepte in het model. Bij PWN zijn de verschillen kleiner, maar hier is de zuurstofconcentratie aan het oppervlak iets te laag. De resultaten zijn daarom indicatief en beschrijven niet precies de werkelijkheid. Ze zijn vooral bedoeld om de verschillen met en zonder zonnepanelen te onderzoeken. De verschillen als gevolg van de bedekking met zonnepanelen zijn echter klein en worden met name veroorzaakt door de verschillen in mengpatronen voorspeld door het hydrodynamische model. Nauwkeurigere resultaten kunnen verkregen worden door betere kalibratie van de modellen. Voor het hydrodynamische gedeelte zit dit met name in de kalibratie van de bellenkolom (hoeveelheid meegevoerd water). In werkelijkheid lijkt de menging wat beter te zijn, hiermee geeft het model voor de hydrodynamica een conservatieve schatting en is de verwachting dat aanpassing van het model de conclusies voor de hydrodynamica niet zal veranderen (menging blijft goed in stand na het plaatsen van de zonnepanelen). Voor het waterkwaliteitsmodel zijn er veel meer knoppen aan te draaien, bijvoorbeeld initiële concentraties van parameters waar geen metingen voor zijn, uitwisseling met de sedimentlaag op de bodem, uitwisseling van concentraties uit de bellenkolom. Gezien de rekentijden is dit een tijdrovende exercitie.

5 Resultaten workshop

Aan het begin van het project is een workshop gehouden over de kansen en risico's die samenhangen met de aanleg van drijvende zonnepanelen op bekkens. Een samenvatting van deze workshop en de conclusies zijn gepubliceerd op H₂O-Online op 14 april 2021. Dit artikel wordt hieronder weergegeven:

Drijvende zonnepanelen op drinkwaterbekkens: (oplossing voor) een probleem?

Roberta Hofman, Maria Lousada Ferreira, Michiel Hootsmans (KWR)

In het kader van de energietransitie is een belangrijke rol weggelegd voor zonne-energie. Voor zonnepanelen zijn grote oppervlakken nodig, en vandaar dat het oog is gevallen op de bekkens van enkele drinkwaterbedrijven. De aanleg van drijvende zonnepanelen biedt mooie kansen voor de opwekking van groene energie, maar de risico's daarvan zijn nog niet goed in kaart gebracht. In het kader van een TKI-project heeft KWR een workshop over dit onderwerp georganiseerd, waaruit duidelijk werd dat er nog veel vragen beantwoord moeten worden, voordat drijvende zonneparken echt op grote schaal kunnen worden toegepast. Drinkwaterbekkens bieden hiervoor een goede gelegenheid.

Drinkwaterbekkens spelen een belangrijke rol in de zuivering van oppervlaktewater tot drinkwater. Ze zorgen ervoor dat piekconcentraties van verontreinigingen worden afgevlakt, verbeteren de fysische, chemische en microbiologische waterkwaliteit, bijvoorbeeld onder invloed van zonlicht en hebben een voorraadfunctie. Maar daarnaast bieden ze ook een groot en vrijliggend oppervlak én zijn het officieel industriële bekkens en juridisch strikt genomen geen natuurgebied, hoewel ook hier bijvoorbeeld volgens de Vogelrichtlijn grote concentraties vogels niet mogen worden verjaagd. Vaak zijn ze ook onderdeel van een Natura 2000-gebied, bijvoorbeeld als rustgebied en bovendien mogen activiteiten in of op het bekken een naastgelegen gebied niet beïnvloeden. Dit maakt dat bij verschillende drinkwaterbedrijven gekeken wordt of drinkwaterbekkens wellicht ook gebruikt kunnen worden om er zonnepanelen op te aan te leggen en zo twee functies te combineren: de productie van drinkwater en energieopwekking. Wat zijn de risico's van dergelijke drijvende zonne-eilanden, bijvoorbeeld voor de waterkwaliteit? Hun primaire functie maakt namelijk deel uit van de (drink)waterzuivering. En moet er niet ook rekening gehouden worden met ecologische effecten, ook al zijn het dan officieel geen natuurgebieden maar industriële bekkens?

Kansen en risico's van drijvende zonnepanelen op drinkwaterbekkens

KWR voert samen met de drinkwaterbedrijven Evides, PWN, de Watergroep, en WML en de bedrijven Floating Solar en AqWa een project uit met Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI), waarbij wordt gekeken naar onder andere hydrodynamische en ecologische effecten van drijvende zonnepanelen op waterbekkens. Voor het modelleren van de effecten, een belangrijk onderdeel van dit onderzoek, wordt ook samengewerkt met Deltares. Het is duidelijk dat men bij de beslissing of, en zo ja hoeveel, zonnepanelen er op een waterbekken geplaatst kunnen worden, rekening moet houden met diverse aspecten. Daarom is besloten een workshop te houden om de kansen en risico's die hieraan verbonden zijn in kaart te brengen. Deze online workshop werd gehouden op 27 januari 2021. De voorzitter was Maarten van der Ploeg, directeur van Riwa Maas, en er waren ongeveer 25 deelnemers.

In het buitenland is inmiddels al meer ervaring opgedaan met drijvende zonnepanelen. Het grootste in Nederland heeft een vermogen van 28 megawatt piek (MWp) en ligt op de Bommelpas in Zwolle. Het grootste Belgische zonnepark is van Sibelco in Dessel (7 MWp). Dit steekt een beetje schril af tegen het grootste park ter wereld in Anhui, China, met 150 MWp, en de plannen voor een park in India (op de Narmadarivier) van 600 MWp. Toch is er over het algemeen nog vrij weinig bekend over de gevolgen van de plaatsing van drijvende zonnepanelen op de

waterkwaliteit en de ecologie. Wat er bekend is, is zeker niet eenvoudig vertaalbaar naar de Nederlandse of Belgische situatie.

Technische aspecten

Tijdens de workshop werden vier presentaties gehouden. Jürgen Soete van Engie Solar Technics ging in op de technische aspecten van de aanleg van drijvende zonnepanelen. Hierbij moet rekening worden gehouden met de onderwateromgeving, de bodemsamenstelling, de bermen, wind in combinatie met begroeiing en gebouwen, golfslag en niveauverschillen van het water, afstanden tot de oever, maar ook de temperatuur, flora en fauna, visuele impact en andere functies op het waterlichaam. Er zijn verschillende typen eilanden mogelijk. Zo kunnen verschillende panelen op één structuur worden gemonteerd, of elk paneel op zijn eigen drijver, wat een flexibelere structuur geeft.

De panelen kunnen open en op het zuiden gericht zijn, voor een hoog rendement. Dit is echter wel gevoeliger voor de wind en vraagt meer verankering dan een gesloten oost-west-georiënteerd systeem. Daarnaast is de materiaalkeuze van belang. Andere vraagstukken zijn of de omvormers en transformatorstations op het water of aan de wal moeten worden geplaatst, mogelijkheden voor koeling, onderhoudsgemak en de veiligheidsrisico's. Zo heeft in Japan een orkaan die een aantal panelen op elkaar blies een grote brand veroorzaakt. Een grote kostenpost is altijd de verankering: worden de drijvers aan de oever bevestigd of aan de bodem, hoeveel meertouwen zijn er nodig, van welk materiaal worden die gemaakt, en hoe verandert de kwaliteit mogelijk in de loop van de tijd? Door hier onderzoek naar te doen is waarschijnlijk een forse kostenbesparing te realiseren. Ten slotte wees Soete er nog op dat tijdens de bouw van drijvende zonnepanelen ook veel oppervlak op de wal nodig is, dat ook toegankelijk moet zijn. De conclusie was dat er niet één ideale oplossing bestaat, maar dat de best mogelijke oplossing door de lokale omstandigheden wordt bepaald.

Hydrodynamische aspecten

De tweede spreker, Rob Uittenbogaard (Hydro-Key BV, voorheen werkzaam bij Deltares) ging dieper in op de hydrodynamische aspecten van de aanwezigheid van zonnepanelen op een waterbekken. Zonnepanelen schermen het oppervlak af voor straling en wind, waardoor ze van (grote) invloed kunnen zijn op de watertemperatuur, stroming, verdamping, terugstraling, menging, en dergelijke. Met behulp van modellen probeert men dergelijke effecten steeds beter te beschrijven en voorspellen, maar daarvoor zijn wel specifieke data nodig. Het is dan ook belangrijk een een toegesneden meetprogramma uit te voeren. Drinkwatertechnologen maken zich met name zorgen om de waterkwaliteit. Zou een gebrek aan menging in het waterbekken niet leiden tot bijvoorbeeld stratificatie, en daarmee tot een slechtere waterkwaliteit en wellicht meer blauwalgen? Een manier om dit misschien tegen te gaan is door slim gebruik te maken van koelingstechnieken voor de zonnepanelen. De efficiëntie neemt toe als de panelen worden gekoeld. Dat zou bijvoorbeeld kunnen met koud water uit een diepere laag in het bekken. Dat bewerkstelligt niet alleen circulatie van het water en gaat zo de groei van blauwalgen tegen, maar verhoogt ook de zuurstofconcentratie.

Ecologische gevolgen

De derde presentatie werd gegeven door Flos Fleischer, programmamanager van Coalitie Blauwe Hart Natuurlijk. De ecologische gevolgen van de aanwezigheid van zonnepanelen op een wateroppervlak zijn volgens haar op dit moment nog vrijwel onbekend. Zeker bij natuurgebieden is dit een heel belangrijk aandachtspunt, maar ook bij waterbekkens speelt het een rol. Soms, zoals in het geval van de Biesboschbekkens, bevinden de bekkens zich naast een Natura 2000-gebied en ook aan de randen van het IJsselmeer zullen ze bijvoorbeeld veel vogels aantrekken, of nemen ze foerageer- en rustgebieden voor vogels in beslag. Een negatief effect is minder lichtinval in het water, waardoor waterplanten zich minder ontwikkelen, wat weer nadelig is voor sommige vissoorten. Aan de andere kant kan het mogelijk ook voordelig uitpakken als het onder de zonnepanelen koeler zou zijn, bijvoorbeeld voor de spiering. Die vis gedijt juist beter in kouder water. Verder moet er aandacht worden besteed aan factoren als uitloging van metalen uit de constructies en het effect van schoonmaakbeurten op de waterkwaliteit. Er is een gebiedsagenda opgesteld, Agenda IJsselmeergebied 2050, waarin wordt gekeken naar de samenhang van plannen

en ontwikkelingen,; energietransitie, verstedelijking, duurzame visserij, recreatie en toerisme, natuurontwikkeling, nautische economie en klimaatadaptatie. Bij het opstellen van de Agenda IJsselmeergebied is nagedacht over de ruimtelijke, cultuurhistorische en natuurkwaliteiten van het gebied en is de Handreiking Omgevingskwaliteit ontwikkeld. Dit is een instrument om het gesprek over omgevingskwaliteiten bij ontwikkelingen te faciliteren. Het gesprek begint bij het stellen van de of-, waar- en hoe-vragen. In elk geval is het belangrijk om kennis op te doen over de effecten van zon op water. In feite zijn de drinkwaterbekkens, zoals industriële bekkens, heel geschikt om een pilot-onderzoek uit te voeren. Een bijkomend probleem is dat hier een vergunning voor nodig is. Zo had De Watergroep in Vlaanderen onderzoek willen doen naar ecologische effecten van de plaatsing van zonnepanelen op de Meerheuvelplas, maar is hiervoor geen vergunning verleend, juist omdat er mogelijk negatieve ecologische effecten zouden kunnen optreden.

TKI-project

Kees-Jan van der Geer (Floating Solar) gaf een presentatie over de zonneparken die zijn bedrijf heeft aangelegd bij Evides en PWN, en waaraan in het kader van het TKI-onderzoek metingen worden verricht. Floating Solar heeft (in zijn geheel) draaibare eilanden aangelegd, opgebouwd uit HDPE-drijvers met daarop een staalconstructie waarop de zonnepanelen worden gemonteerd (zie afbeelding 1). Er is veel aandacht besteed aan de gebruikte componenten en materialen om plaatsing op de bekkens mogelijk te maken. Het dynamische eiland volgt de zon om de energieopbrengst te maximaliseren. De mogelijkheid om het eiland te draaien heeft als bijkomend voordeel dat de panelen in geval van een storm ook in de goede richting (vaanstand) gezet kunnen worden, om de kans op schade te verminderen. Verder hebben deze eilanden een open structuur, waardoor er toch nog zonlicht in het water komt. De directe afdekking binnen het eiland is circa 20%, de rest is open voor direct of diffuus licht. Om te voorkomen dat vogels op de eilanden gaan zitten is bovenaan de panelen een vogelwering geplaatst. Doordat het eiland draait zijn de panelen overigens onder een steilere hoek geplaatst dan bij statische systemen, wat als bijkomend voordeel heeft dat vogels niet op de panelen kunnen staan. Hierdoor vindt er ook geen ophoping van vogel-uitwerpselen op de panelen plaats en zal dus bij regen ook geen verhoogde belasting door bijvoorbeeld coli-bacteriën in de bekkens optreden. Daarnaast zal het zelfreinigend vermogen groter zijn waardoor minder of zelfs geen schoonmaak van de panelen nodig is. Gebruik van reinigingsmiddelen is – gezien de functies van de bekkens – ongewenst.



Afbeelding 1. Draaibaar systeem met zonnepanelen bij Evides productielocatie Kralingen

Pilotonderzoek naar drijvende zonnepanelen

Over alle hierboven genoemde onderwerpen werd door de deelnemers in verschillende groepen gediscussieerd, maar de algemene conclusie van alle groepen was hetzelfde: er is echt meer onderzoek nodig naar de kansen maar ook naar risico's van het plaatsen van zonnepanelen op oppervlaktewater. Bekkens bieden kansen voor pilotonderzoek, omdat het in feite geen natuurgebieden zijn. Hierbij moet echter niet alleen worden gekeken naar hydrodynamische, fysisch-chemische en ecologische parameters, hoewel die van groot belang zijn. Dergelijk onderzoek levert ook uitgebreide technische kennis op die noodzakelijk is voor eventuele plaatsing van drijvende systemen met zonnepanelen op waterlichamen. Hiervoor zijn echter uitgebreide datasets nodig, die over meerdere jaren moeten worden verzameld. Zo moet de uitgangssituatie goed in kaart worden gebracht, want in veel gevallen is daarover ook nog te weinig bekend. De primaire functie van de bekkens mag echter niet uit het oog worden verloren: ze zijn onderdeel van de (drink)waterzuivering, en daarom mag de waterkwaliteit in de bekkens niet (te veel) verslechteren. Een heel belangrijk aspect hierbij is de menging die in de bekkens optreedt. Er moeten metingen worden gedaan om vast te stellen of, en zo ja hoe die menging precies wordt beïnvloed, wat hiervan de gevolgen zijn voor de waterkwaliteit (en dus de (drink)waterzuivering) en hoe eventuele negatieve gevolgen voorkomen kunnen worden.

Conclusie

Samenvattend kwamen alle deelnemers tot de conclusie dat er inzet nodig is voor het meten van effecten voor de onderbouwing van het al dan niet plaatsen van zonnepanelen op bekkens. Hiervoor is een multidisciplinaire aanpak nodig en samenwerking en uitwisseling tussen de initiatiefnemers van diverse projecten op dit gebied. Tot slot is het van belang om de reële impact vast te stellen en afwegingen te maken voor het totale plaatje, waarin de hierboven genoemde aspecten worden meegewogen. Als dit goed gebeurt, dan is het plaatsen van zonnepanelen op

waterbekkens mogelijk een uitgelezen kans om de opwekking van groene energie te combineren met de productie van drinkwater.

Dankwoord

Deze workshop vond plaats in het kader van het TKI-project Zonnepanelen op Spaarbekken, mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken. Verder gaat dank uit naar de projectpartners Evides, PWN, De Watergroep, WML, Floating Solar en AqWa voor hun bijdrage aan dit project.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Uit de hydrodynamische modellering blijkt dat het plaatsen van zonnepanelen met een bedekkingsgraad van 10-40% de mengpatronen door wind en beluchting in het bekken verandert. De recirculatiecellen die ontstaan door de beluchting en de windpatronen lijken kleiner te worden, dit leidt echter niet tot extra stratificatie.

De gebruikte modellering is aan de conservatieve kant, vergelijking van de modelresultaten met metingen van temperatuur- en zuurstofprofielen over de hoogte laten zien dat het model een stratificatie eerder en sterker laat zien dan de metingen. Plaatsen van zonnepanelen, met de in het model gebruikte schematisatie van de zonnepanelen door aanpassing van de warmteoverdracht en windsnelheden aan het oppervlak, verandert de temperatuur- en zuurstofprofielen niet of nauwelijks. Het grootste effect van de zonnepanelen is zichtbaar in de temperatuurverdeling over het jaar: het water warmt in het voorjaar minder snel op doordat de zonnepanelen het zonlicht blokkeren en koelt in het najaar minder snel af omdat de zonnepanelen de warmte vasthouden. Ook zijn er lokaal effecten waarneembaar direct onder de zonnepanelen, waar de watertemperatuur toenam in een aantal gevallen door het wegvallen van de stroomsnelheden. Dit effect is echter niet zichtbaar bij de bekkens van Evides en WML, waar de vorm en bedekkingsgraad van de drijvende systemen met zonnepanelen heel anders zijn, maar ook de verticale resolutie grover is (vanwege rekentijden). De modellering van de waterkwaliteit, die hooguit indicatief is en de werkelijkheid maar heel beperkt kan beschrijven, omdat gewerkt is met standaardinstellingen en er niet gekalibreerd is voor het specifieke bekken, laat ook weinig tot geen verschillen zien in de gemodelleerde aspecten van de waterkwaliteit van het bekken door het plaatsen van zonnepanelen.

Op dit moment zijn er geen voorbeelden van diepe bekkens voor drinkwaterproductie met zonnepanelen met meer dan 30% bedekking van het wateroppervlak. Bovendien is er, met name voor de ecologische effecten, een time-frame van enkele jaren nodig om de omvang en het belang ervan te evalueren. Daarom is het op dit moment voorbarig om een monitoringsplan vast te stellen. Informatie over de huidige praktijken en een leidraad om een monitoringsplan op te stellen zijn te vinden in Bijlage I.

De conclusie van de workshop was dat het nodig is om diverse effecten te meten, voordat besloten kan worden tot grootschalige toepassing van drijvende zonnepanelen op bekkens. Dit vraagt om een multidisciplinaire aanpak, waarbij niet alleen technische en fysisch/chemische parameters worden bekeken, maar ook bijvoorbeeld ecologische effecten worden meegenomen, en de effecten op ook flora en fauna in kaart worden gebracht.

6.2 Aanbevelingen

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn:

- Uit de modelleringen blijkt dat het effect van het plaatsen van de drijvende zonnepanelen (10-40% bedekking) klein is. Aanbevolen wordt om dit met metingen te bevestigen (monitoringsplan in Bijlage I).
- De huidige berekeningen zijn uitgevoerd met een specifiek legplan en bedekkingsgraad van zonnepanelen voor bekkens van PWN, Evides en WML. Met het model kan de invloed van verschillende legplannen en bedekkingsgraden voor een specifiek bekken onderzocht worden.
- De huidige berekeningen zijn uitgevoerd voor het jaar 2020. Door andere jaren door te rekenen kan mogelijk het effect van meer extreme weersituaties op de plaatsing van de zonnepanelen aan het licht komen.

Aanbevelingen voor verbetering van de modellering zijn:

- De menging in het model door de bellenkolom is aan de lage kant en kan het in stand houden van stratificatie niet of nauwelijks voorkomen. Het model kan hiervoor verbeterd worden door een betere kalibratie van menging van bellenkolommen
- Voor de schematisatie van het effect van zonnepanelen op de warmte-uitwisseling en windpatronen is een aanname gedaan (Bijlsma et al., 2021). Dit kan verbeterd worden door een betere bepaling van de warmte-uitwisseling onder de zonnepanelen (op basis van temperatuurmetingen in de lucht onder de zonnepalen en in het water direct onder de zonnepanelen) en de mate van het wegvallen van de wind. Ook het meedraaien van de zonnepanelen met de stand van de zon zou verbeterd kunnen worden in het model.
- De waterkwaliteitsmodellering kan verbeterd worden door dit model voor een specifiek bekken te kalibreren met lokale meetgegevens van de waterkwaliteit.

Uit de workshop kwam de aanbeveling om de reële impact vast te stellen en afwegingen te maken voor het totale plaatje, waarin alle verschillende aspecten (technisch, chemisch, fysisch, biologisch, ecologisch enz.) worden meegewogen. Als een goede afweging kan worden gemaakt, kan het plaatsen van zonnepanelen op bekkens een kans bieden om de opwekking van groene energie te combineren met de productie van drinkwater.

Referenties

- Bax, V., van de Lageweg, W., Hoosemans, R., van den Berg, B., Floating photovoltaic pilot project at the Oostvoornse lake: Assessment of the water quality effects of three different system designs, Energy Reports, Volume 9, 2023, Pages 1415-1425, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.080>.
- Bertelkamp, C., Hofman-Caris, C.H.M., Siegers, W.G.M, Verschoor, A.M., Hootsmans, M.J.M., Wols, B.A. (2020), Verkenning zuiveringseffect van bekkens, BTO 2020.018, Nieuwegein.
- Bijlsma, A., R. Vlijm, R. Uittenbogaard, M. Dionisio Pires (2021), The effect of solar islands on temperature and mixing in the WPJ reservoir at Andijk, Deltares, oktober 2021.
- Boersen, S.,(2017), Optimalisatie beluchters in De Gijster, rapport Royal HaskoningDHV, WATBF6273R001F1.0.
- Cazzaniga, R., M. Rosa-Clot (2021), The booming of floating PV, Solar Energy, Volume 219, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.057>.
- Delft3D-FLOW (2018), Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, version 3.15, Deltares, 2018.
- Dörenkämper, M., A. Wahed, A. Kumar, M. de Jong, J. Kroon, T. Reindl (2021), The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore, Solar Energy, Volume 219, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.051>.
- D-Water Quality (2018a), Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes, User Manual, version 5.06, Deltares, 2018.
- D-Water Quality (2018b), Processes Library Description, Technical Reference Manual, version 5.01, Deltares, 2018.
- Rehman U., en W. Audenaert (2019). Mixing and dynamic mass balance modelling at Andijk. AM-Team, Floating Solar Projecten, <https://www.floatingsolar.nl/projecten/>, bezocht op 18-4-2023.
- Floating Solar website, <https://www.floatingsolar.nl/>, bezocht op 18-4-2023.
- Kramer, L., H. Los, T. Troost, M. Genseberger, M. Tiessen en P. Boderie (2016). 3D model van het Volkerak-Zoommeer voor waterkwaliteit en primaire productie: modelbeschrijving, kalibratie- en validatiedocument. Deltares rapport 1220070-000-ZKS-0034. Delft: Deltares
- Lee, M.-C. and M. K. Stenstrom (2023). "Water quality mitigation strategy analysis of the Salton Sea, California, using the Delft-3D modeling suite." *Frontiers in Sustainable Resource Management* 2.
- Liu, Z., Ma, C., Li, X., Deng, X., Tian Z.(2023), Aquatic environment impacts of floating photovoltaic and implications for climate change challenges, *Journal of Environmental Management*, Volume 346, 2023, 118851, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118851>.

Nobre, R., Boulêtreau, S., Colas, F., Azemar, F., Tudesque, L., Parthuisot, N., Favriou, P., Cucherousset, J. (2023), Potential ecological impacts of floating photovoltaics on lake biodiversity and ecosystem functioning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 188, 2023, 113852, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113852>.

Yang, P., Chua, L.H.C., Irvine, K.N. et al. (2022), Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. *Limnology* 23, 441–454. <https://doi.org/10.1007/s10201-022-00698-y>

Ziar, H., D. Heijkoop, E. Goma, D. van Tilborg, (2021) Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inlandwater areas, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29: 725-743. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.3367>

Bijlage I: monitoringsplan

De waterbedrijven monitoren op dit moment de bekkens waar zonnepanelen zijn of komen te liggen. Het toegepaste monitoringsplan heeft als doel om de effecten te meten van het plaatsen van zonnepanelen op bekkens, met name op de waterkwaliteit, fauna en flora.

Deze bijlage is bedoeld als leidraad bij het opstellen van een monitoringsplan voor een bekken waar drijvende systemen met zonnepanelen komen te liggen. De gebruikte informatiebronnen waren partnerwaterbedrijven van dit project en Deltares advies voor monitoring van binnenwateren met zonnepanelen (Deltares, 2020).

De waterbedrijven deelden de op dat moment toegepaste monitoringsplannen, namelijk de gemeten parameters, de meetfrequentie en de bemonsteringspunten. De ontvangen informatie werd georganiseerd in tabellen, die als volgt werden toegelicht. De waterbedrijven worden aangeduid als partner A tot en met D, om de anonimiteit te waarborgen.

De geïdentificeerde parameters zijn onderverdeeld in twee grote groepen, namelijk "Fysisch- chemische en overig" en "Flora en fauna". Classificatie van parameters in subgroepen, op basis van ecologische processen, type waterverontreiniging, taxonomiegroep of andere criteria, is ook mogelijk. Eén enkele parameter kan echter informatie opleveren die relevant is voor verschillende subgroep categorieën of voor slechts één subgroep. In de eerste tabel (tabellen I-1) wordt dan ook de bijdrage van elke monitoringparameter aan de verschillende subgroepen aangegeven. De geïdentificeerde subgroepen werden relevant geacht voor de waterkwaliteit of ecologische toestand van een bekken met zonnepanelen.

Tabel I-2 identificeert en karakteriseert de parameters die momenteel worden gecontroleerd. In de tabel I-3 worden voorbeelden gegeven van meetfrequenties en meetlocaties, per parameter. Beide tabellen zijn het resultaat van de informatie die is verzameld bij de waterbedrijven. Ook het advies van Deltares wordt genoemd, indien relevant (Deltares, 2020).

Met betrekking tot tabel I-3 moet worden vermeld dat de meetfrequentie en de bemonsteringspunten moeten worden gedefinieerd op basis van de kenmerken van elk bekken. De informatie in tabel I-3 is derhalve slechts indicatief.

Tabel I-1- Relevantie van de monitoringparameters voor subgroepen van kennis.

Indicator	Subgroepen van kennis																
	Stratificatie/menging	Fysisch-chemisch	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Waterplanten	Bodem (inclusief bodemdieren)	Wind	Drijvende systeem (inclusief panelen)	Bacteriologie	Vissen	Vogels	Amfibieën	Reptielen	Vleermuizen	Nutriëntenhuishouding	OMV
Fysisch-chemisch en overig																	
Zuurstof	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓
Temperatuur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
Zuurgraad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓					✓	✓
Geleidbaarheid (EGV)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓					✓	
Redox	✓	✓															
Lichtdoorlaatbaarheid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓						✓
Lichtuitdoving (zichtdiepte)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓						✓
Licht (EXO2 sonde)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓						✓
Troebelheid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓						✓
Waterdiepte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓						✓
Bodemtype		✓	✓	✓		✓	✓										✓
Bodemprofiel	✓	✓	✓	✓		✓	✓										✓
Wind	✓		✓	✓	✓				✓	✓		✓			✓		
Windstoten									✓	✓		✓			✓		
Bodemnalevering	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓										✓
Sedimentatie		✓		✓		✓	✓										✓
Decompositie		✓		✓		✓	✓			✓							✓

Indicator	Stratificatie/menging	Fysisch-chemisch	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Waterplanten	Bodem (inclusief bodemdieren)	Wind	Drijvende systeem (inclusief panelen)	Bacteriologie	Vissen	Vogels	Amfibieën	Reptielen	Vleermuizen	Nutriënthuishouding	OMV
Golven	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓							✓	
Horizontale stroming	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓							✓	
Invloed van wind	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓							✓	
UV transmissie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓						✓
Anorganische koolstof		✓	✓	✓		✓											
Bicarbonaat (HCO ₃)		✓	✓	✓		✓											
Zuurstofverzadiging	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓
Totaal-fosfaat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Ortho-fosfaat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Fosfaat in bodem	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Totaal stikstof	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Ammonium	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Nitraat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Nitriet	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Silicium	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
IJzer (Fe)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Sulfaat (SO ₄)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Gesuspendeerde stof	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	

Indicator	Stratificatie/menging	Fysisch-chemisch	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Waterplanten	Bodem (inclusief bodemdieren)	Wind	Drijvende systeem (inclusief panelen)	Bacteriologie	Vissen	Vogels	Amfibieën	Reptielen	Vleermuizen	Nutriënthuishouding	OMV
1H-Benzotriazool	✓																✓
Guanylureum	✓																✓
Urotropine	✓																✓
Diverse OMVs	✓								✓								✓
PFAS	✓								✓								✓
Bioassays									✓								✓
Screening op verontreinigingen									✓								✓
Flora & Fauna																	
Totaal chlorofyl (EXO2 sonde)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓						✓
Fycocyanine (EXO2 sonde)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓						✓
Chlorofyl (Lab NEN6520+C1)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓						✓
Fytoplanktensamenstelling	✓		✓			✓			✓								✓
Primaire productie	✓		✓			✓			✓								✓
Toxines	✓		✓			✓			✓								✓
Geosmine en 2-MIB			✓	✓			✓		✓								
Benthische matten			✓	✓		✓	✓		✓								
Lengtefrequentieverdeling (mosselen en <i>Daphnia</i>)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓					✓

Indicator	Stratificatie/menging	Fysisch-chemisch	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Waterplanten	Bodem (inclusief bodemdieren)	Wind	Drijvende systeem (inclusief panelen)	Bacteriologie	Vissen	Vogels	Amfibieën	Reptielen	Vleermuizen	Nutriënthuishouding	OMV
Dichtheid en samenstelling (mosselen en <i>Daphnia</i>)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓				✓	
Waterplanten	✓		✓	✓		✓	✓		✓							✓	
Benthische cyanobacteriën	✓		✓	✓		✓	✓		✓							✓	
Biofilms/aangroei			✓	✓			✓		✓	✓						✓	
Soortensamenstelling (vissen)											✓						
Abundantie (vissen)											✓						
Biomassa (vissen)											✓						
Dichtheid (vissen)											✓						
Lengtefrequentie verdeling (vissen)											✓					✓	
Broedvogels									✓	✓		✓				✓	
Niet-broedende vogels									✓	✓		✓				✓	
Aantallen en soorten (vogels)									✓	✓		✓				✓	
Vogelfeces op panelen									✓	✓		✓				✓	
Aantallen en soorten (amfibieën)													✓				
Aantallen en soorten (reptielen)														✓			
Aantallen en soorten (zoogdieren)															✓		
Vleermuizen															✓		
<i>E. coli</i>									✓	✓		✓					

Indicator	Stratificatie/menging	Fysisch-chemisch	Fytoplankton	Fytobenthos	Zoöplankton	Waterplanten	Bodem (inclusief bodemdieren)	Wind	Drijvende systeem (inclusief panelen)	Bacteriologie	Vissen	Vogels	Amfibieën	Reptielen	Vleermuizen	Nutriëntenhuishouding	OMV
Bacteriën van de coligroep									✓	✓		✓					
Enterococcen									✓	✓		✓					
Intestinale enterococcen									✓	✓		✓					
<i>Cryptosporidium</i> & <i>Giardia</i>									✓	✓		✓					
<i>Clostridium perfringens</i>									✓	✓		✓					
<i>Campylobacter</i>									✓	✓		✓					
Totaal ATP										✓							
Aantal bacteriecellen (flow-cytometrie)										✓							

Tabel I-2 - Relevante parameters voor het monitoringsprogramma.

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Fysisch-chemisch en overig				
Deltares	Zuurstof	Essentieel	veld	Diepteprofielmetingen van zuurstof; concentratie in water (in mg/L)
A; B; C	Zuurstof	Essentieel	veld	Diepteprofielmetingen van zuurstof met handmatig sensor (elke halve meter of elke meter een meting) vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
Deltares	Temperatuur	Essentieel	veld	Diepteprofielmetingen van temperatuur; Watertemperatuur; in graden Celsius
A; B; C	Temperatuur	Essentieel	veld	Diepteprofielmetingen van temperatuur met handmatig sensor (elke halve meter of elke meter een meting); vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
Deltares	Zuurgraad	Essentieel	veld	pH
A; B; C	Zuurgraad	Essentieel	veld	pH; Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
Deltares	Geleidbaarheid	Extra	veld	Maat voor hoeveelheid ionen (vooral zouten) in water; meting via EGV meter ($\mu\text{S}/\text{m}$)
A; B; C	Geleidbaarheid (EGV)	Essentieel	veld	Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe; diepteprofielmetingen van EGV met handmatig sensor
A; C	Redox	Extra	veld	Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
Deltares	Doorzicht (= lichtdoorlaatbaarheid)	Essentieel	veld	Secchi-diepte
A; B; C	Lichtdoorlaatbaarheid	Essentieel	veld	Secchi disk
Deltares	Lichtuitdoving (zichtdiepte)	Essentieel	veld	Uitdoving van zichtbaar licht (PAR: 400-700 nm) per meter
A	Licht (EXO2 sonde)	Extra	veld	Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
A; C;D	Troebelheid	Essentieel	veld	Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe; Troebelingsgraad

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Deltares	Waterdiepte	Essentieel	veld	Verskil waterbodemhoogte en jaargemiddeld waterpeil
Deltares	Bodemtype	Essentieel	veld	Zand, veen, klei of mix ervan
A; C	Waterdiepte	Essentieel	veld-continu	Verskil waterbodemhoogte en jaargemiddeld waterpeil
A	Bodemprofiel	Essentieel	veld	Gemeten in een boot met een sensor
Deltares	Wind	Essentieel	veld-continu	Zowel snelheid als richting; lokaal te plaatsen meteo station; als alternatief KNMI data meest dichtbij gelegen meteo station nemen
A; C	Wind	Essentieel	veld-continu	Data KNMI en/of windmeter geplaatst langs de rand van bekkens
Deltares	Windstoten	Extra	continu	Noteren van maximale windstoten om te zien of daarmee stratificatie wel of niet wordt doorbroken
Deltares	Bodemnalevering	Extra	lab	Core proeven of veldmetingen (equilibriummetingen) aan nalevering uit de bodem van nutriënten
Deltares	Sedimentatie	Extra	lab	Met sedimentvallen nagaan wat er vanuit water bezinkt, o.a. onder de panelen
C	Sedimentatie	Extra	lab	Sedimentvallen (hoeveelheid)
Deltares	Decompositie	Extra	lab	Gestandaardiseerde maat voor afbraak in je systeem, bijv. met behulp van cotton strips, decotabs of tea-bag-index
A	Horizontale stroming	Extra	veld	nog te bepalen
A	Golven	Extra	veld	nog te bepalen
A	Invloed van wind	Extra	veld	nog te bepalen
B; C	UV transmissie	Essentieel	veld	
Deltares	Anorganische koolstof	Extra	lab	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ en CO ₃ ²⁻ . Gaat via TIC analyzer.
B; C	Bicarbonaat (HCO ₃)	Extra	lab	
Deltares	Zuurstofverzadiging	Extra	veld	<100%: kan wijzen op vervuild water. >100%: indicatie voor veel waterplanten en/of algen (fotosynthese)

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Deltares	Totaal fosfaat	Essentieel	lab	Fosfaat in 1 L water, inclusief alle deeltjes ($\mu\text{g/L}$)
A; B; C	Totaal fosfaat	Essentieel	lab	
Deltares	Ortho-fosfaat	Essentieel	lab	In water opgelost fosfaat ($\mu\text{g/L}$)
A; B; C	Ortho-fosfaat	Essentieel	lab	
Deltares	Fosfaat in bodem	Essentieel	lab	Totaal-P gehalte (mg/L) in poriewater verschillende bodemlagen (bijv. slib en eerste 20 cm vaste bodem)
A; B; C	Fosfaat in bodem	Essentieel	lab	steekmonsters
Deltares	Totaal stikstof	Essentieel	lab	Stikstof in 1 L water, inclusief alle deeltjes ($\mu\text{g/L}$) en alle vormen (N, nitraat, nitriet, ammonium)
A; B; C	Ammonium	Essentieel	lab	
A; B; C	Nitraat	Essentieel	lab	
C	Nitriet	Extra	lab	
A; B; C	Silicium	Essentieel	lab	
A; B	Ijzer (Fe)	Essentieel	lab	totaal en opgelost; ICP-MS
B; C	Sulfaat (SO ₄)	Essentieel	lab	
B; C	Gesuspendeerde stof	Essentieel	lab	
B	Anorganische fractie (as)	Essentieel	lab	
Deltares	Chloride	Extra	lab	Concentratie in mg/L. Vindt plaats d.m.v ion-selectieve meetmethode (zilverchloride staaf). Verschil in spanning tussen zilverstaaf en referentiestaaf is maat voor chloride gehalte.
A; B; C	Chloride (Cl ⁻)	Essentieel	lab	
C	TOC	Essentieel	lab	
A; C	DOC	Essentieel	lab	

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
A; B	NOM (inclusief biopolymeren)	Essentieel	lab	inclusief biopolymeren; LC-OCD
Deltares	Zware metalen	Extra	lab	Met name om vast te stellen of er uitloging plaatsvindt. Van tevoren vaststellen. In water zal verdunning te groot zijn
A; C	Aluminium	Essentieel	lab	ICP-MS
A; C	Nikkel	Essentieel	lab	ICP-MS
A; C	Lood	Essentieel	lab	ICP-MS
A; C	Mangaan	Essentieel	lab	ICP-MS
A; C	Cadmium	Essentieel	lab	ICP-MS
A	Zink	Essentieel	lab	ICP-MS
A	Koper	Essentieel	lab	ICP-MS
A	Chroom	Essentieel	lab	ICP-MS
A	Arseen	Essentieel	lab	ICP-MS
A	Seleen	Essentieel	lab	ICP-MS
A	EDTA	Essentieel	lab	
A	1H-Benzotriazool	Essentieel	lab	
A	Guanylureum	Essentieel	lab	
A	Urotropine	Essentieel	lab	
C	Diverse OMVs	Essentieel	lab	
A	PFAS	Essentieel	lab	
A	Bioassays	Essentieel	lab	
A	Screening op verontreinigingen	Essentieel	lab	

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Flora & Fauna				
A; B; C	Totaal chlorofyl (EXO2 sonde)	Essentieel	veld	Diepteprofielmetingen van chlorofyl met handmatig sensor
A; B; C	Phycocyanine	Essentieel	veld	Vaste probe (verticaal profiler)en/of losse probe
Deltares	Chlorofyl-a	Essentieel	lab	Concentratie
A; B; C	Chlorofyl (Lab NEN6520+C1)	Essentieel	lab	Fytoplanktonbiomassa en samenstelling (inclusief chlorofyl a)
Deltares	Fytoplanktonsamenstelling	Essentieel	lab	In ieder geval onderscheid maken tussen blauwalgen, diatomeeën en groenalgen; biovolumes bepalen d.m.v. microscopie en lengtemetingen.
A; B; C	Fytoplanktonsamenstelling	Essentieel	lab	Fytoplanktonbiomassa en samenstelling
Deltares	Primaire productie	Extra	veld	Productie van chemische energie door levende organismen, in aquatische wereld meestal algen en planten
Deltares	Toxines	Extra	lab	Microcystine (equivalenten) in µg/L
A	Toxines	Essentieel	lab	Microcystine (equivalenten) in µg/L
Deltares	Geosmine en 2-MIB	Extra	lab	Vormen van stankoverlast als gevolg van aanwezigheid blauwalgen
A	Geosmine en 2-MIB	Essentieel	lab	Vormen van stankoverlast als gevolg van aanwezigheid blauwalgen
Deltares	Benthische matten	Extra	veld	Controle aanwezigheid benthische blauwalgen
Deltares	Lengtefrequentieverdeling	Extra	lab	Voor bepaling effecten op vispredatie (of grote en kleine vlooien apart tellen)
A; C	Lengtefrequentieverdeling (mosselen en <i>Daphnia</i>)	Essentieel	lab	Voor bepaling effecten op vispredatie (of grote en kleine vlooien apart tellen)
A; B; C	Dichtheid en samenstelling (mosselen en <i>Daphnia</i>)	Essentieel	lab	Biomassa en samenstelling

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Deltares	Waterplanten(diversiteit)	Essentieel	veld	Bedekking functionele groepen en soorten
A; C	Waterplanten	Essentieel (in ondiepe bekkens); Essentieel of extra (in diepe bekkens, afhankelijk van klimaat licht)	veld	duikobservatie en monsters; duikobservatie-aangroei aan panelen, kabels e.d. vaststellen
A; C	Benthische cyanobacteriën	Essentieel (in ondiepe bekkens); Essentieel of extra (in diepe bekkens, afhankelijk van klimaat licht)	veld	duikobservatie en monsters; duikobservatie-aangroei aan panelen, kabels e.d. vaststellen
Deltares	Biofilms/ aangroei	Extra	lab	DNA technieken
A; C	Biofilms/ aangroei	Essentieel (in ondiepe bekkens); Essentieel of extra (in diepe bekkens, afhankelijk van klimaat licht)	veld	duikobservatie en monsters; duikobservatie-aangroei aan panelen, kabels e.d. vaststellen
Deltares	Soortensamenstelling van vissen	Essentieel	veld	dichtheid per soort
Deltares	Abundantie van vissen	Essentieel	veld	aantal en biomassa per hectare
A: C	Biomassa van vissen	Essentieel	veld	
A: C	Dichtheid van vissen	Essentieel	veld	per standard multimesh gillnet
A: C	Lengteverdeling van vissen	Essentieel	veld	
Deltares	Broedvogels	Essentieel	veld	aantal (n) per vastomlijnd gebied (waterlichaam en nabij gelegen gebieden). Zie https://www.sovon.nl/nl/BMP voor broedvogels anders dan kolonievogels en https://www.sovon.nl/kolonievogels voor kolonievogels
Deltares	Niet-broedende vogels	Essentieel	veld	aantal (n) per vastomlijnd gebied (waterlichaam en nabij gelegen gebieden). Ook informatie opnemen over wat de vogels in het gebied doen zoals rusten, foerageren of slapen. Bij strenge vorst in zandwindplassen ook tellen.

Partners	Indicator	Essentieel of extra	Lab/Veld/Veld-continu	Omschrijving
Deltares	Aantallen en soorten (vogels)	Extra	veld	effecten op aantallen in nabij gelegen (N2000) gebieden
A	Aantallen en soorten (vogels)	Essentieel	veld	Vogeltellingen
A	Vogelfeces op panelen	Essentieel	veld	foto's van drijvend systeem met zonnepanelen, 10 panelen in de breedte en 10 in de lengte
Deltares	Aantallen en soorten (amfibieën)	Extra	veld	
Deltares	Aantallen en soorten (reptielen)	Extra	veld	
Deltares	Aantallen en soorten (zoogdieren)	Extra	veld	Registratie via BMP door vogeltellers.
Deltares	Vleermuizen	Essentieel	veld	vliegpatronen volgen
A	Vleermuizen	Essentieel (Natura2000 gebied)	veld	
Deltares	<i>E. coli</i>	Essentieel	lab	Bepaling via membraanfiltratie of qPCR
A; C	<i>E. coli</i>	Essentieel	lab	
A; C	Bacteriën van de coligroep	Essentieel	lab	
A; C	Enterococcen	Essentieel	lab	
A	Intestinale enterococcen	Essentieel	lab	
Deltares	<i>Cryptosporidium</i> & <i>Giardia</i>	Extra	lab	protozoa
A; C	<i>Clostridium perfringens</i>	Essentieel	lab	inclusief sporen
A; C	<i>Campylobacter</i>	Essentieel	lab	
B	Totaal ATP	Extra	lab	ATP en vrij ATP
B	Aantal bacterie cellen	Extra	lab	Flow cytometry

Tabel I-3 - Meetfrequentie en bemonsteringslocaties.

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
Deltares	Zuurstof	wekelijks; dagelijks in groeiseizoen (Mei-Oktober), liefst continu	
A; B; C	Zuurstof	continu en/of wekelijks (52x), 41x per jaar (winter minder vaak); of iedere 2 weken in maart-oktober	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of 2 vaste punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting; of op 1 vast punt bij inlaat water; of in- en uitlaat van bekken
		continu en/of wekelijks (52x), 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water; of in- en uitlaat van bekken
Deltares	Temperatuur	wekelijks; dagelijks, liefst continu	
A; B; C	Temperatuur	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of 2 vaste punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting) en 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar); of 2-5 vaste punten; of op 1 vast punt bij inlaat water; of in- en uitlaat van bekken
		continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of 2 vaste punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting) en 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar); of 2-5 vaste punten
Deltares	Zuurgraad	Wekelijks	
A; B; C	Zuurgraad	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water; of in- en uitlaat van reservoir
Deltares	Geleidbaarheid	Maandelijks	

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A; B; C	Geleidbaarheid (EGV)	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak); of inlaat: elk week (52x); uitlaat elk men (13x); of wekelijks/ 1x per kwartaal	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of 2e vast punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting) en 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar); of inlaat en uitlaat bekken; of bezinkstraat/ representatief punt
A; C	Redox	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water
Deltares	Doorzicht (= lichtdoorlaatbaarheid)	Wekelijks	
A; B; C	Lichtdoorlaatbaarheid	Wekelijks (41x per jaar); of iedere 2 weken maart-oktober	van 2 tot 6 vaste punten; optioneel 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar)
Deltares	Lichtuitdoving (zichtdiepte)	Wekelijks	
A	Licht (EXO2 sonde)	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
A; C;D	Troebelheid	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water
		1x per maand tot 1x per kwartaal	inlaat en representatief punt
Deltares	Waterdiepte	1x/jaar	
Deltares	Bodemtype	1x/jaar	
A; C	Waterdiepte	continu	
A	Bodemprofiel	1x 10 jaar	
Deltares	Wind	continu	
A; C	Wind	continu	
Deltares	Windstoten		
Deltares	Bodemnalevering	max 4xper jaar	onder en naast panelen
Deltares	Sedimentatie	maandelijks	
C	Sedimentatie	1x/jaar	

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
Deltares	Decompositie	maandelijks	
A	Horizontale stroming	enkele keren per jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
A	Golven	enkele keren per jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
A	Invloed van wind	enkele keren per jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
B; C	UV transmissie	elk 2 weken (26x); of 1x per maand tot 1x per kwartaal	in- en uitlaat van reservoir; of inlaat en representatief punt
Deltares	Anorganische koolstof	Maandelijks	
B; C	Bicarbonaat (HCO_3^-)	elk week (52x); of 1x per kwartaal	in en uitlaat bekken; of representatief punt
Deltares	Zuurstofverzadiging		
Deltares	Totaal fosfaat	Maandelijks	
A; B; C	Totaal fosfaat	iedere 2 weken (26x); of inlaat, elk week (52x) en uitlaat, elk 2 weken (26x)	in- en uitlaat van bekken; of inlaat en representatief punt
Deltares	Ortho-fosfaat	Maandelijks	
A; B; C	Ortho-fosfaat	wekelijks; of iedere 2 weken (26x)	in- en uitlaat van bekken; of inlaat en representatief punt
Deltares	Fosfaat in bodem	Maandelijks	
A; B; C	Fosfaat in bodem	1x per jaar tot 1 x per 5 jaar	minimaal 3 punten open water; 3 punten zonnepanelen
Deltares	Totaal stikstof	Maandelijks	
A; B; C	Ammonium	wekelijks; of iedere 2 weken (26x)	in- en uitlaten; inlaat en representatief punt
A; B; C	Nitraat	wekelijks; of iedere 2 weken (26x)	in- en uitlaten; inlaat en representatief punt
C	Nitriet	elk 2 weken (26x)	inlaat en representatief punt
A; B; C	Silicium	wekelijks; of iedere 2 weken (26x)	in en uitlaten; inlaat en representatief punt

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A; B	IJzer (Fe)	totaal Fe: elk week (52x); opgelost Fe: elk men (13x); of 1x per maand	inlaat en uitlaat bekken
B; C	Sulfaat (SO ₄)	inlaat: elk week (52x); uitlaat elk 2 weken (26x); of 1x per maand tot 1 x per kwartaal	inlaat en uitlaat bekken
B; C	Gesuspendeerde stof	inlaat: elk week (52x); uitlaat elk 2 weken (26x); of elk 2 weken (26x)	in- en uitlaten; inlaat en representatief punt
B	Anorganische fractie (as)	elk 2 weken (26x)	inlaat en uitlaat bekken
Deltares	Chloride	Maandelijks	
A; B; C	Chloride (Cl ⁻)	wekelijks; of elk 2 weken (26x); of inlaat, elk week (52x) en uitlaat elk 2 weken (26x)	in- en uitlaten; inlaat en representatief punt
C	TOC	elk 2 weken (26x)	inlaat en representatieve punten
A; C	DOC	wekelijks (52x); of elk 2 weken (26x)	in- en uitlaten; inlaat en representatief punt
A; B	NOM (inclusief biopolymeren)	iedere 2 weken (26x); of inlaat, elk week (52x) en uitlaat elk 2 weken (26x)	in en uitlaten
Deltares	Zware metalen	max 4x per jaar	
A; C	Aluminium	1x per maand	inlaat en uitlaat; of inlaat en representatief punt
A; C	Nikkel	1x per maand	inlaat en uitlaat; of inlaat en representatief punt
A; C	Lood	1x per maand	inlaat en uitlaat; of inlaat en representatief punt
A; C	Mangaan	1x per maand	inlaat en uitlaat; of inlaat en representatief punt
A; C	Cadmium	1x per maand	inlaat en uitlaat; of inlaat en representatief punt
A	Zink	1x per maand	
A	Koper	1x per maand	
A	Chroom	1x per maand	
A	Arseen	1x per maand	

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A	Seleen	1x per maand	
A	EDTA	1x per maand	inlaat water en afgeleverd water
A	1H-Benzotriazool	1x per maand	inlaat water en afgeleverd water
A	Guanylureum	1x per maand	inlaat water en afgeleverd water
A	Urotropine	1x per maand	inlaat water en afgeleverd water
C	Diverse OMVs	1x per maand	inlaat water en afgeleverd water
A	PFAS	1x per maand	1 punt open water; 1 punt onder panelen
A	Bioassays	voor en na plaatsen	open water (1 punt op het bekken)
A	Screening op verontreinigingen	voor en na plaatsen	open water (1 punt op het bekken)
Flora & Fauna			
A; B; C	Totaal chlorofyl (EXO2 sonde)	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	2 vaste punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting) en 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar) minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water; of in en uitlaat van bekken
A; B; C	Phycocyanine	continu en/of wekelijks, 41x per jaar (winter minder vaak)	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen; of op 1 vast punt bij inlaat water; of 2 vaste punten (1 naast beluchting, 1 ver van beluchting) en 3 ad-hoc punten (3 keer over het jaar)
Deltares	Chlorofyl-a	maandelijks (Mei-Oktober)	
A; B; C	Chlorofyl (Lab NEN6520+C1)	wekelijks (41x per jaar), tweewekelijks; of iedere 2 weken in april - oktober en een keer per maand in winter (totaal 20x); of iedere 2 weken in april - september	in- en uitlaat van reservoir; bemonsteringspunten binnen bekken (waar stratificatie wordt gecontroleerd); mengmonster
Deltares	Fytoplanktensamenstelling	tweewekelijks	

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A; B; C	Fytoplanktensamenstelling	wekelijks (41x per jaar), tweewekelijks; of iedere 2 weken in april - oktober en een keer per maand in winter (totaal 20x); of iedere 2 weken in maart - oktober	
Deltares	Primaire productie	om de 2 dagen of continu met automatische meetsensoren	
Deltares	Toxines	enkel bij constatering blauwalgen	
A	Toxines	enkel bij constatering blauwalgen	
Deltares	Geosmine en 2-MIB	enkel bij constatering blauwalgen en stankoverlast	
A	Geosmine en 2-MIB	tweewekelijks	
Deltares	Benthische matten	maandelijks	
Deltares	Lengtefrequentieverdeling	wekelijks	
A; C	Lengtefrequentieverdeling (mosselen en Daphnia)	iedere 2 weken in april - september	
A; B; C	Dichtheid en samenstelling (mosselen en Daphnia)	tweewekelijks; of iedere 2 weken in april - september; of iedere 2 weken in april - oktober en een keer per maand in winter (totaal 20x)	mengmonster; in- en uitlaat van bekken; mix van bemonsteringspunten binnen bekken (waar stratificatie wordt gecontroleerd);
Deltares	Waterplanten(versiteit)	1 x voor beide parameters	
A; C	Waterplanten	1x tot 3x /jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
A; C	Benthische cyanobacteriën	1x tot 3x /jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
Deltares	Biofilms/ aangroei	Wanneer biofilm zich voordoet	
A; C	Biofilms/ aangroei	1x tot 3x /jaar	minimaal: 1 punt open water en 1 punt zonnepanelen
Deltares	Soortensamenstelling van vissen	1x/jaar	
Deltares	Abundantie van vissen		

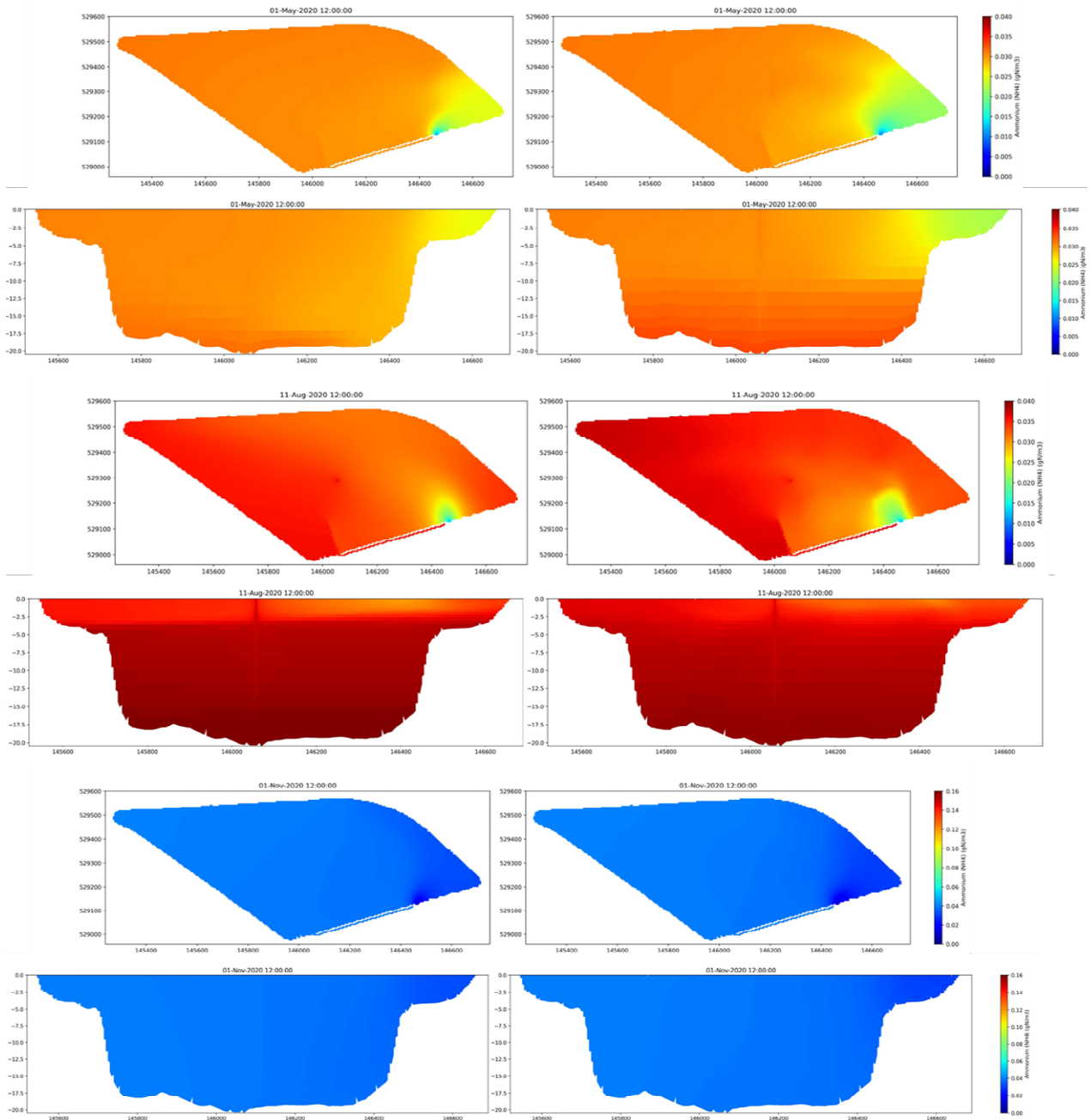
Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A: C	Biomassa van vissen	1x keer per 3 jaar	
A: C	Dichtheid van vissen	1x keer per 3 jaar	
A: C	Lengtefrequentieverdeling van vissen	1x keer per 3 jaar	
Deltares	Broedvogels	1x/jaar	
Deltares	Niet-broedende vogels	1x/jaar	
Deltares	Aantallen en soorten (vogels)		
A	Aantallen en soorten (vogels)	iedere 2 weken (26x)	
A	Vogelfeces op panelen	iedere 2 weken (26x)	
Deltares	Aantallen en soorten (amfibieën)	April-Augustus	
Deltares	Aantallen en soorten (reptielen)	April-Augustus	
Deltares	Aantallen en soorten (zoogdieren)	1x/jaar	
Deltares	Vleermuizen	voor installatie; frequentie later te bepalen	
A	Vleermuizen	voor installatie; frequentie later te bepalen	
Deltares	<i>E. coli</i>	wekelijks	
A: C	<i>E. coli</i>	iedere 2 weken (26x); of iedere 4 weken	Uitlaat en voor chloordosering; of inlaat en representatief punt
A; C	Bacteriën van de coligroep	iedere 2 weken (26x); of iedere 4 weken	Uitlaat en voor chloordosering; of inlaat en representatief punt
A; C	Enterococcen	iedere 2 weken (26x); of iedere 4 weken	Uitlaat en voor chloordosering; of inlaat en representatief punt
A	Intestinale enterococcen	iedere 2 weken (26x)	Uitlaat en voor chloordosering
Deltares	<i>Cryptosporidium & Giardia</i>	Alleen als daar aanleiding voor is. Geldt ook voor virussen	
A; C	<i>Clostridium perfringens</i>	iedere 2 weken (26x); of iedere 4 weken	Uitlaat en voor chloordosering; of inlaat en representatief punt

Partners	Indicator	Aantal metingen per jaar (frequentie)	Monsterpunten
A; C	<i>Campylobacter</i>	iedere 2 weken (26x); of iedere 4 weken	Uitlaat en voor chloordosering; of inlaat en representatief punt
B	Totaal ATP	iedere 2 weken (26x)	in en uitlaat van bekken
B	Aantal bacterie cellen	iedere 2 weken (26x)	in en uitlaat van bekken

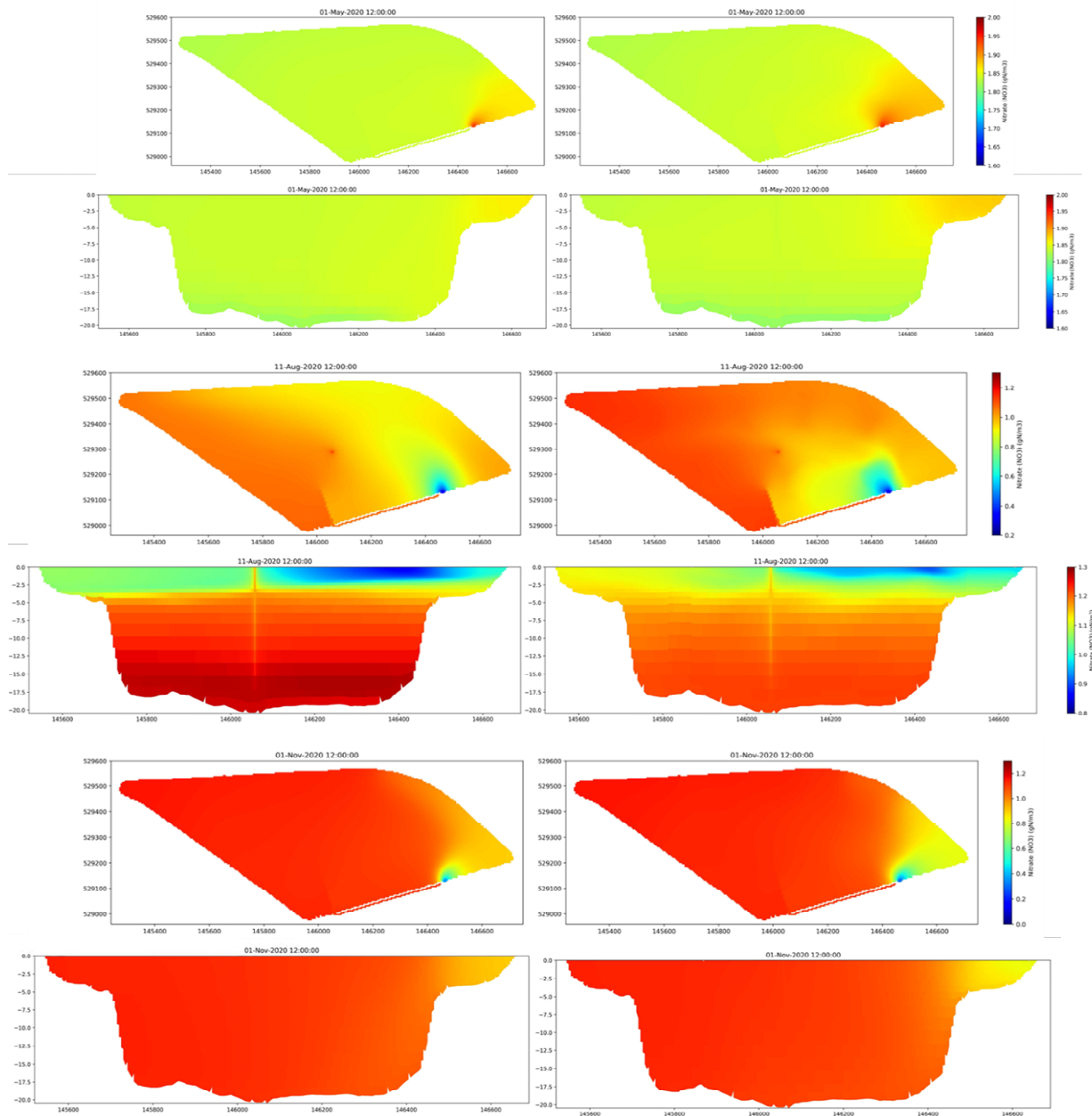
Bijlage II: gemodelleerde overige waterkwaliteitsparameters

Bekken PWN (WPJ reservoir)

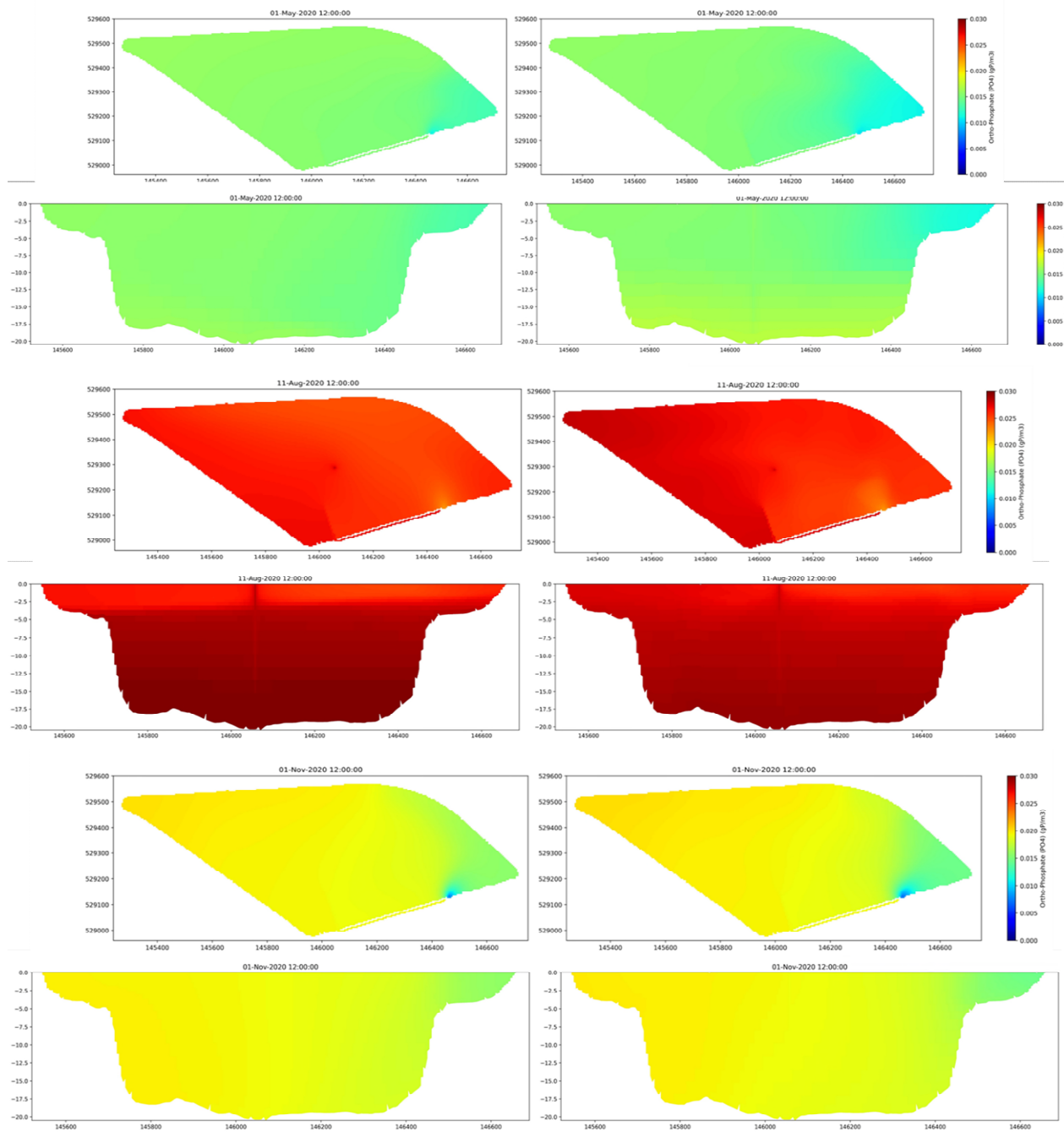
Ammonium (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)



Nitraat (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)

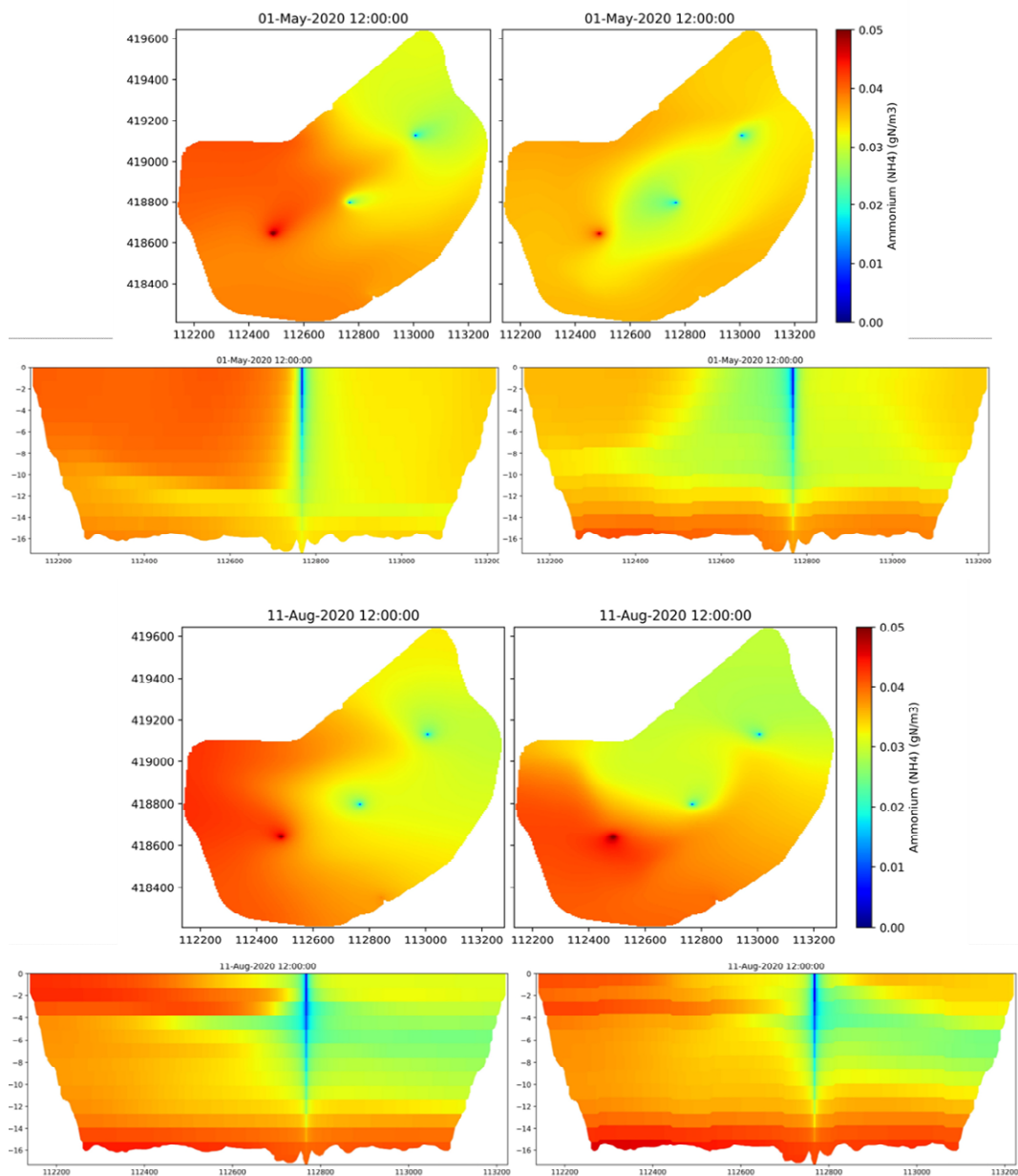


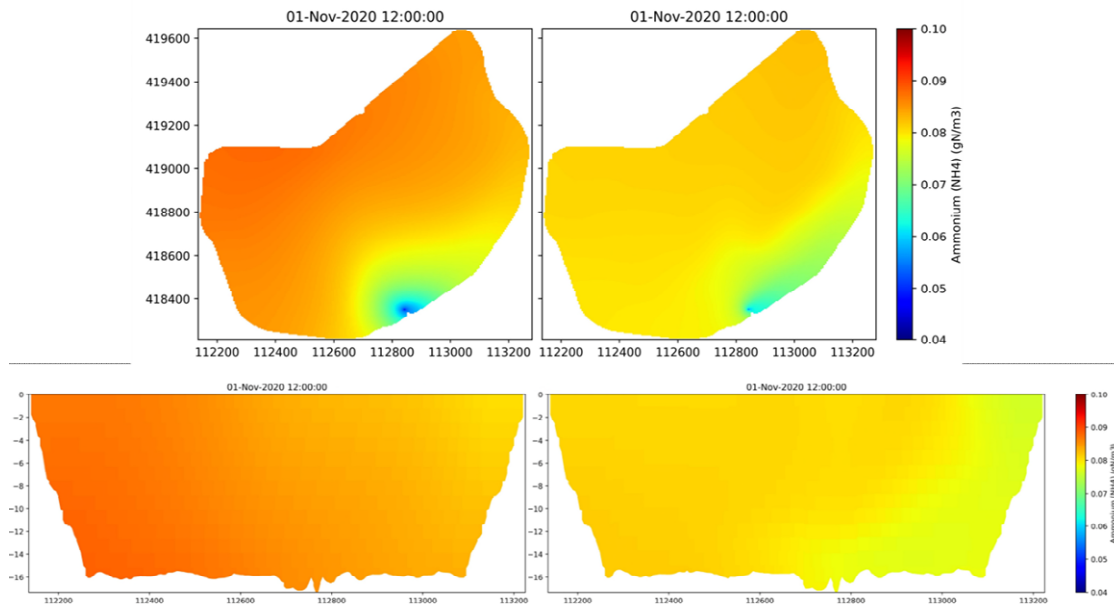
Ortho-fosfaat (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)



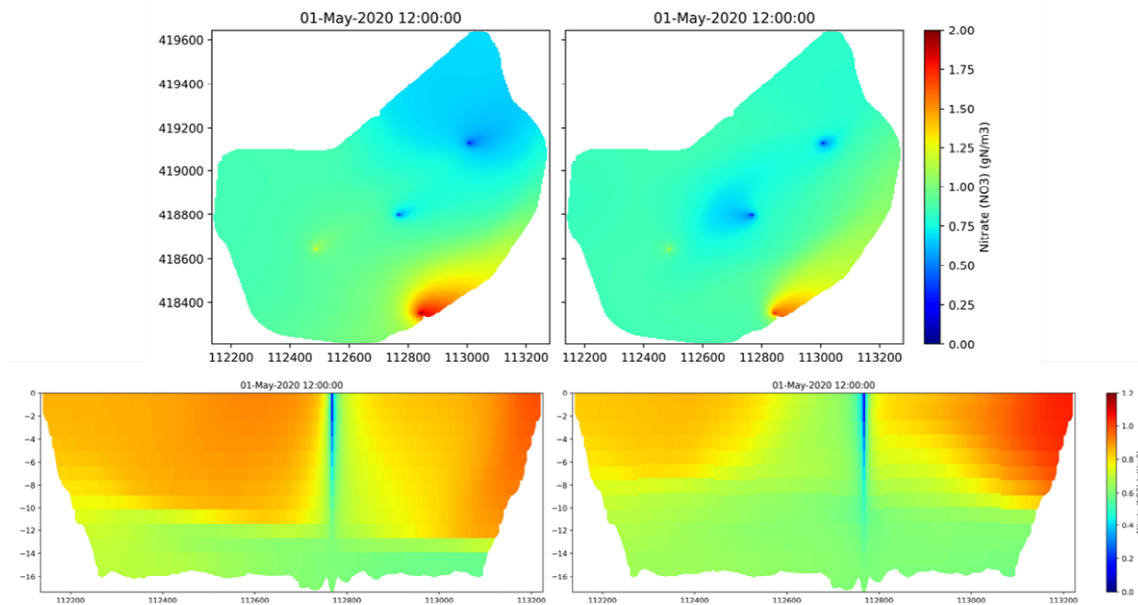
Bekken Evides (Petrusplaat)

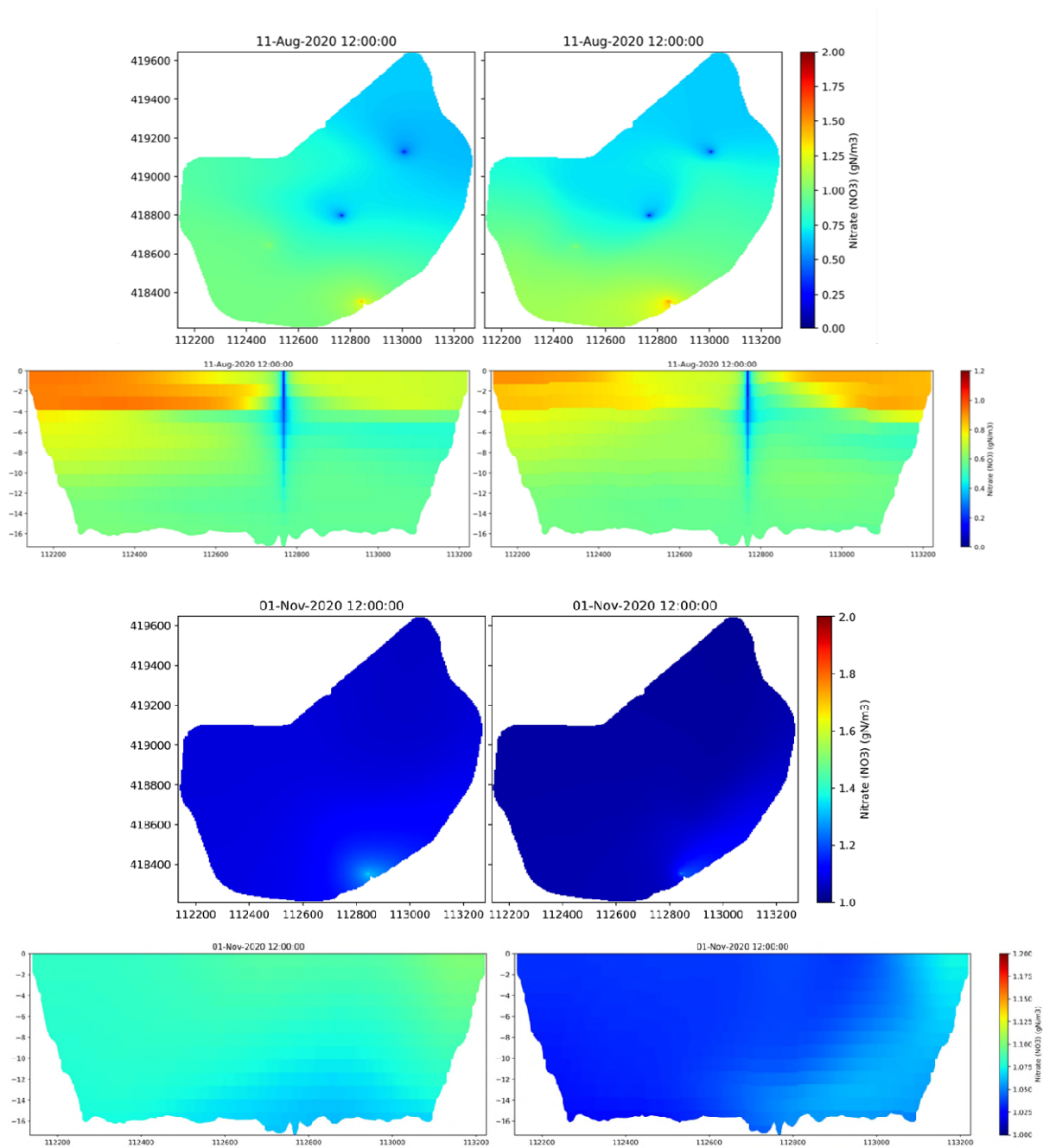
Ammonium (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)





Nitrat (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)





Ortho-fosfaat (bovenaanzicht en doorsnede in mei, augustus en november, rechts is met zonnepanelen)

