

Het gebruik van kunstmatig licht onder zonneparken als mitigerende maatregel om primaire productie te herstellen



Het gebruik van kunstmatig licht onder zonneparken als mitigerende maatregel om primaire productie te herstellen

Auteur(s)

Lisa van Eck

Miguel Dionisio Pires

Het gebruik van kunstmatig licht onder zonneparken als mitigerende maatregel om primaire productie te herstellen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Corporate Dienst
Contactpersoon	Teun Lamers
Referenties	
Trefwoorden	FPV, kunstmatig licht, aquatische primaire productie, zon op water

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	20-12-2023
Projectnummer	11209221-015
Document ID	11209221-015-BGS-0001
Pagina's	19
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Lisa van Eck	
	Miguel Dionisio Pires	

Samenvatting

Dit rapport onderzoekt de haalbaarheid van kunstmatig licht onder zonneparken op oppervlaktewateren als mitigatiemaatregel voor het herstellen van de aquatische primaire productie. Zonneparken op water kunnen de waterkwaliteit beïnvloeden door het beschaduen van het wateroppervlak, wat lokale afname van zuurstofproductie en ongunstige ecologische omstandigheden veroorzaakt. Het project streeft naar het verkennen van kunstmatig licht als oplossing, met focus op de benodigde lichteigenschappen, technische haalbaarheid en potentiële effecten op het aquatische ecosysteem, met het oog op mogelijke toepassingen bij andere licht belemmerende constructies.

Om optimale lichtomstandigheden te bieden voor verschillende planten en algen, kan een praktische benadering worden toegepast. Kunstmatig LED-licht met golflengtes van 450 nm (blauw) of 660 nm (rood), overeenkomend met chlorofyl a en b absorptiepieken en een intensiteit van $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, is breed toepasbaar en houdt rekening met diverse behoeften van fotosynthetiserende organismen in helder water.

Voor het behoud van een natuurlijk ecosysteem wordt aangeraden het natuurlijke dag-nachtritme en seizoen verloop aan te houden met belichten.

Hoewel technisch haalbaar, brengt het kunstmatig belichten van het wateroppervlak onder een heel zonnepark aanzienlijke energiekosten met zich mee. Het strategisch gebruik van over geproduceerde stroom kan worden ingezet om deze kosten te minimaliseren. Daarnaast zijn er potentiële risico's voor de aquatische ecologie.

De aanbeveling is om te starten met een modelleerstudie voor een meer gedetailleerd overzicht van de energiekosten. Daarnaast kan een kleinschalige pilot in het veld inzicht geven in de effecten van het kunstmatige belichten van oppervlakte water, evenals uitdagingen in het veld.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Benodigde lichteigenschappen voor aquatische primaire productie	7
2.1	Lichttype	7
2.2	Lichtintensiteit en kwaliteit	7
2.3	Fotoperiode	9
3	Technische haalbaarheid	10
3.1	Berekening 1: minimale lichtvraag aquatische primaire producenten	10
3.2	Berekening 2: Oudehaske belicht als aquarium	11
3.3	Berekening 3: Oudehaske rekening houdend met zonne-instraling	11
4	De effecten van Kunstmatig licht op het aquatische ecosysteem	13
5	Conclusies en aanbevelingen	14
	Vraag 1: benodigde lichteigenschappen	14
	Vraag 2: technische haalbaarheid	14
	Vraag 3: potentiële effecten op aquatische ecologie	14
5.1	Mogelijke vervolgstudies	14
5.1.1	Modelstudie	15
5.1.2	Pilot studie in het veld	15
5.2	Alternatieven	15
5.2.1	Een opstelling met meer ruimte tussen de panelen.	15
5.2.2	Spiegels	15
6	Referenties	16
7	Bijlage: interviews	17

1 Inleiding

In de afgelopen jaren is er wereldwijd steeds meer interesse in drijvende fotovoltaïsche (FPV) systemen ^{1,2}, wat heeft geleid tot de planning en bouw van talrijke grootschalige FPV systemen over de hele wereld ³, evenals in Nederland ⁴. Rijkswaterstaat, in samenwerking met de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en het Rijksvastgoedbedrijf (RVB), opereert in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) om gronden en wateren beschikbaar te stellen voor duurzame energie, waaronder wind- en zonne-energie, via het uitschrijven van tenders.

Verschillende van deze tenders richten zich specifiek op zon-op-water projecten. Zonneparken op zoet watersystemen kunnen echter een impact hebben op de waterkwaliteit. De zon op water systemen beschaduwen namelijk het water en verminderen zo het licht dat normaal gebruikt kan worden voor primaire productie. De afname van het licht onder een zonnepark zorgt lokaal voor minder zuurstofproductie, wat kan leiden tot onwenselijke situaties ⁵. Voorbeelden van dit soort situaties zijn verstoring van het voedsel web, nutriënten en zuurstofloze omstandigheden.

Het is daarom van cruciaal belang om adequate mitigatiemaatregelen beschikbaar te hebben voor het succesvol doorlopen van de voorbereiding van de tender en de vergunningverlening na de tender, wat een kerntaak is van Rijkswaterstaat.

Kunstmatig licht komt vaak naar voren als mitigerende maatregel maar momenteel ontbreekt de kennis over het gebruik hiervan onder zonneparken op water om primaire productie te herstellen. Het doel van dit project is dan ook een verkenning naar de haalbaarheid van kunstmatige belichting als mitigatiemaatregel, inclusief de vereiste randvoorwaarden en monitoringseisen voor een test op een bestaand zonnepark. Dit om een zo natuurlijk mogelijk systeem te behouden bij oppervlakte wateren met een drijvend zonnepark. Indien succesvol zou kunstmatig licht ook kunnen worden toegepast bij andere licht belemmerende constructies, zoals drijvende woningen of werkeilanden.

Dit verkennende onderzoek beantwoordt dan ook de volgende vragen:

- 1 Wat zijn de benodigde lichteigenschappen om de primaire productie in de met een zonnepark bedekte oppervlakte wateren in stand te houden?
- 2 Wat is de technische haalbaarheid van het gebruik van kunstmatig licht hiervoor?
- 3 Wat zijn de potentiële effecten van het kunstmatig licht op de rest van het aquatische ecosysteem?

Door middel van een literatuurstudie van relevante wetenschappelijke literatuur, interviews met verschillende experts en gesimplificeerde berekeningen zijn deze onderzoeksvragen beantwoord. De antwoorden van vraag 1, 2 en 3 zijn respectievelijk terug te vinden in hoofdstuk 2, 3 en 4. Hoofdstuk 5 geeft de conclusies en aanbevelingen voor vervolgstudie en alternatieven voor kunstmatig licht als mitigerende maatregel.

2 Benodigde lichteigenschappen voor aquatische primaire productie

2.1 Lichttype

Er zijn verschillende soorten lampen die worden gebruikt in de terrestrische plantenkwekerij sector. In tabel 1 is een overzicht gegeven van verschillende soorten lampen die hiervoor gebruikt worden uit een onderzoek van Darko et al., (2014)⁶. Uit deze eigenschappen blijkt dat LED licht het beste geschikt is voor het kweken van fotosynthetiserende organismen, zoals planten, algen en sommige bacteriën. Het LED licht heeft een hoge fotosynthetisch actieve straling efficiëntie, ook wel afgekort als PAR (photosynthetically active radiation). PAR verwijst naar het spectrale bereik (golfband) van zonnestraling tussen 400 en 700 nanometer dat organismen het optimaalst kunnen gebruiken voor fotosynthese.

Daarnaast kan je LED licht instellen op specifieke golflengtes en scoort deze het best op duurzaamheid, kosten en warmte productie. Tegenwoordig worden LED-lampen ook het meeste gebruikt in aquaria voor de groei van waterplanten en het houden van vissen ([AquastoreXL | Aquariumverlichting - AquastoreXL](#)). LED-lampen zijn vrij toegankelijk te koop en zijn flexibel in te stellen voor de verschillende lichteigenschappen.

Tabel 1. Eigenschappen van veelvoorkomende kunstmatige lichtbronnen die worden gebruikt in plantenteelt⁶

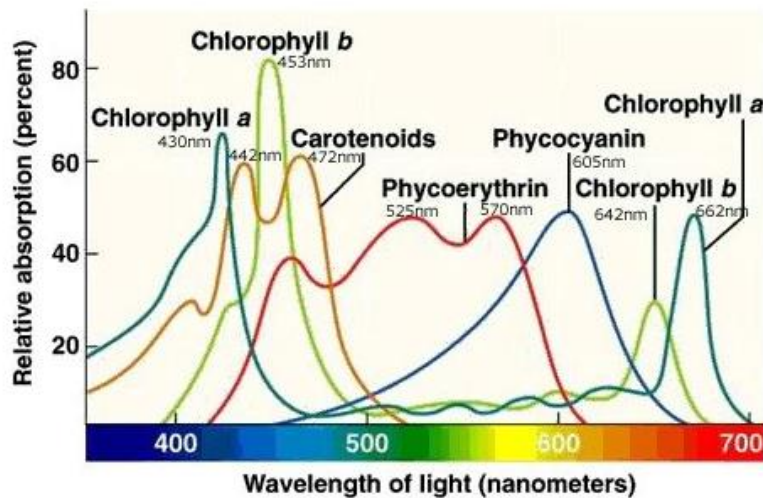
Type	Licht efficiëntie (lm/watt)	PAR efficiëntie (%)	Spectrale specificiteit	Energie kosten	Winkelprijs	Warmte productie
Fluorescentielamp	46-75	35-40	Polychromatisch (wit) 492-600 nm	Laag	Goedkoop	Laag
Fluorescentiebuis	70-104	20-30	Polychromatisch (wit) 492-600 nm	Laag	Goedkoop	Laag
Metaalhalidelamp	65-115	29-32	Blauw 400 - 500 nm	Zeer hoog	Duur	Gemiddeld
Lagedruk natriumlamp	100-200	15-29	Geel 570-590 nm	Hoog	Duur	Gemiddeld
Hogedruk natriumlamp	100-110	30-35	Goudgeel 570-590 nm	Zeer hoog	Duur	Gemiddeld
Light-Emitting Diode (LED)	58-200	80-100	Monochroom	Zeer laag	Goedkoop	Zeer laag

2.2 Lichtintensiteit en kwaliteit

Om de optimale lichtomstandigheden voor de groei van algen en waterplanten door te laten dringen in de waterkolom, moet er gekeken worden naar zowel de lichtintensiteit, als de lichtkwaliteit.

De lichtkwaliteit is gebaseerd op de golflengte waarin de absorptie pieken van de verschillende soorten algen liggen. Verschillende pigmenten in algen hebben verschillende absorptie pieken, die ervoor zorgen dat licht op die golflengtes het meest efficiënt kan worden gebruikt (**Figuur 1**). Over het algemeen hebben cyanobacteriën de pigmenten chlorofyl a, fycocyanine, fycocerythrine en allofycocyanine, terwijl de meeste groenalgen en diatomeeën alleen chlorofyl a, chlorofyl b en carotenoïden bevatten (Tabel 1).

Waterplanten bevatten, vergelijkbaar met groenalgen, voornamelijk chlorofyl a, b en carotenoïden. Al deze pigmenten liggen dus in het PAR spectrum van licht. De verschillen in adsorptiepieken van de pigmenten in verschillende organismen zouden dus gebruikt kunnen worden om specifieke aquatische primaire producenten in een systeem te stimuleren



Figuur 1. Absorptiepieken van pigmenten (bron: <https://algaeresearchsupply.com/pages/lighting-for-algae-cultures>).

Tabel 2. Verschillende pigmenten in aquatische fotosynthetiserende organismen.

Pigment	Absorptiepiek (nm)	Algen
Chlorofyl a	430-450 (blauw) en 665-680 (rood)	Waterplanten, alle fotoautotrofe algen en cyanobacteriën
Chlorofyl b	455-470 (blauw) en 640-660 (rood)	Waterplanten, meeste fotoautotrofe algen
Chlorofyl c	Afhankelijk van subtype, maar overeenkomend met a & b	Bepaalde algen, zoals diatomeeën
Fycocyanine	620-650 (blauw) en 650-680 (oranje-rood)	Cyanobacteriën, sommige groenalgen
Fycoërythrine	470-490 (blauw) en 540-560 nm (groen)	Cyanobacteriën, sommige rode algen
allofycocyanine	Diverse (blauw/rood)	Cyanobacteriën, sommige rode algen
Carotenoïden	Diverse (blauw-groen-geel-oranje)	Waterplanten, meeste fotoautotrofe algen, inclusief groenalgen, diatomeeën

Lichtintensiteit is bepalend voor de groeisnelheid van fotosynthetiserende organismen, en de invloed ervan varieert voor soorten⁷⁸. De lichtintensiteit wordt uitgedrukt in $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en het optimum hiervan is soort afhankelijk. Lichtintensiteit in het water is afhankelijk van diepte en hoeveelheid opgeloste deeltjes, zowel als de waterkleur en de weersomstandigheden.

Volgens verschillende auteurs ligt de optimale fotonflux dichtheidswaarde voor algen in het bereik van $50\text{-}200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ⁹.

Zowel een te hoge of een te lage lichtintensiteit heeft een nadelige invloed op de groeisnelheid van algen en planten. Daarnaast verschilt de optimale lichtintensiteit ook per golflengte. Het onderzoek van Luimstra et al., 2018¹⁰, geven ze aan dat voor de blauwalg *Synechocystis* de optimale lichtintensiteit voor oranje (625 nm) en rood licht (660 nm) rond de $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ligt. Voor blauw licht is deze vele malen hoger ($\sim 300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), wat blauw (450 nm) licht dus minder gunstig maakt voor blauwalgen om in te groeien. Voor de groenalg *C. sorokiniana* licht het optimum rond de $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en is de groeisnelheid het hoogste bij rood (660 nm) en blauw (450 nm) licht. Dus de optimale golflengte voor de groei efficiëntie van groen algen en juist tegen blauwalgen zou liggen in het blauwe licht bij 450 nm of in het rode licht bij 660 nm, dit wordt ondersteund door de absorptiepieken van de verschillende pigmenten aanwezig in groen- en blauwalgen (tabel 1 en figuur 1).

Voor waterplanten varieert de optimale lichtintensiteit ook. Voor smalle waterpest (*Elodea nuttallii*) ligt het optimum rond de $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, waardoor in gebieden met hoge troebelheid deze planten veel voorkomen¹¹. Voor de kranswieren ligt deze hoger, namelijk tussen de $50\text{-}300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, daarom komt deze plantensoort voornamelijk voor in wateren met lage troebelheid. Kranswieren en waterpest zijn allebei veel voorkomende plantensoorten in Nederland, maar kranswieren zijn een indicator voor goede waterkwaliteit dus vaak wenselijker.

Om de optimale lichtintensiteit voor een diversiteit aan planten- en algensoorten te bepalen, zou idealiter per locatie rekening moeten worden gehouden met de specifieke organismen en hun optimale groeiomstandigheden. Helaas is dit in de praktijk vaak niet haalbaar. Een benadering zou zijn om licht te gebruiken met een golflengte van 450 nm of in het rode licht bij 660 nm, adsorptie pieken van chlorofyl a en b, wat minder gunstig is voor blauwalgen, maar wel voordelig voor een breed scala aan andere fotosynthetiserende organismen. Bovendien zou een gemiddelde lichtintensiteit worden gekozen die enigszins gunstig is voor soorten voorkomend in helder water, zoals $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Deze aanpak houdt rekening met diverse eisen van verschillende planten- en algensoorten, terwijl het praktisch uitvoerbaar blijft op brede schaal.

2.3 Fotoperiode

Planten en algen hebben tijdens een bepaalde periode in het jaar en in de dag licht nodig voor hun fotosynthese en zo zuurstof als bijproduct te produceren. Aquatische primaire producenten hebben specifieke daglengtes (en daarmee hoeveelheid licht) nodig om te bloeien en zich voort te planten. Deze daglengtes zijn voornamelijk aanwezig in het voorjaar en in de zomer, waarin de primaire productie ook op zijn hoogst is. Tevens wijzen verschillende onderzoeken op de nadelige effecten van de aanwezigheid van kunstmatig licht in de nacht op andere aquatische organismen, zoals vissen en aquatische primaire producenten^{12,13}. Voor het gebruik van kunstmatig licht zou een natuurlijk dag nacht ritme aangehouden moeten worden een zo natuurlijk mogelijk ecosysteem te simuleren.

3 Technische haalbaarheid

Daarnaast is het belangrijk om rekening te houden met de energievraag voor het bereiken van deze optimale lichtkwaliteit en lichtintensiteit voor de verschillende organismen. In deze paragraaf zijn drie berekeningen uitgevoerd om een indruk te krijgen hoeveel energie nodig is om kunstmatig licht onder drijvende zonnepanelen toe te passen. Daarbij zijn getallen gebruikt van het drijvende zonnepark in Oudehaske, genaamd Oudehaske 2, wat gebouwd is in maart 2023.

Berekening 1 (paragraaf 3.1) berekent de minimale hoeveelheid benodigd licht voor een "gemiddeld" aquatisch fotosynthetisch organisme gebaseerd op een de golflengte van 450 nm in de PAR range en de intensiteit die gemiddeld gezien gunstig is voor waterplanten in heldere wateren (paragraaf 2.2).

Berekening 2 (paragraaf 3.2) gaat ervan uit dat het leven onder het park van Oudehaske II belicht wordt zoals een gemiddeld zoetwater aquarium tot 1 meter diepte, zonder rekening te houden met het percentage licht dat wel nog wordt doorgelaten door de panelen. Dit is een overschatting van het benodigde vermogen aangezien in een natuurlijk systeem niet altijd alles 100% belicht is.

In berekening 3 (paragraaf 3.3) is er uitgegaan van een gemiddelde zonne-instraling en is er wel rekening gehouden met de uitdoving van de zonnepanelen en met de lichtextinctie die plaatsvindt als je dieper gaat in de water kolom.

3.1 Berekening 1: minimale lichtvraag aquatische primaire producenten

Het aantal fotonen nodig per vierkante meter per seconde:

Gemiddelde benodigde lichtintensiteit: $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dit is nodig om de bijvoorbeeld kranswieren te verkrijgen in het systeem, maar ook optimaal voor vele soorten algen

Aantal fotonen per μmol : $6,022 \cdot 10^{17}$ (Getal van Avogadro in micromol)

$100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s} \cdot 6,022 \cdot 10^{17} \text{ fotonen}/\mu\text{mol} = \mathbf{6,022 \cdot 10^{19} \text{ fotonen}/\text{m}^2/\text{s}}$

Dus de energie van elk foton is:

De energie van een foton kan worden berekend met behulp van de formule $E = hc/\lambda$, waarbij E de energie van het foton is, h de constante van Planck is en c de lichtsnelheid en de golflengte λ :

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$c = \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Golflengte (λ): $450 \text{ nm} = 450 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

$E = h \cdot c / \lambda = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 450 \cdot 10^{-9} = \mathbf{4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$

De totale energie van alle fotonen die op 1 vierkante meter komen per seconde

$E = 6,022 \cdot 10^{19} \text{ fotonen}/\text{s}/\text{m}^2 \cdot 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}/\text{foton} = \mathbf{26,60 \text{ J}/\text{s}/\text{m}^2}$

Totale foton energie nodig over het gehele oppervlak van het park op de diepte waar de algen/planten aanwezig zijn

Aantal zonnepanelen en vermogen Oudehaske II: 38.000 en 21,3 MW

([Drijvende zonneparken Oudehaske I en II - groenleven.nl](https://www.groenleven.nl))

Vermogen Oudehaske II: Oppervlakte van een zonnepaneel: $\sim 1,6 \text{ m}^2$

Totale fotonenenergie = $26,60 \cdot 1,6 \cdot 38000 = \mathbf{1.617.351 \text{ J/s} = 1,62 \text{ MW}}$

3.2 Berekening 2: Oudehaske belicht als aquarium

Aantal zonnepanelen en vermogen Oudehaske II: 38.000 en 21,3 MW
([Drijvende zonneparken Oudehaske I en II - groenleven.nl](#))

Oppervlakte van een zonnepaneel: ~1,6 m²

Hoeveelheid licht nodig in een aquarium: 30 Lumen per liter

Efficiëntie van wit LED: 100 Lumen / watt

Aantal liter water dat verlicht moet worden (uitgaande van 1 meter diepte)

Aantal panelen * gemiddelde oppervlakte paneel * diepte = aantal kubieke meter water
 $38000 * 1.6 * 1 = 62.080 \text{ m}^3 = \mathbf{62.080.000 \text{ L}}$ water dat verlicht moet worden.

Benodigde vermogen als het belicht wordt als een aquarium

Aantal lumen per liter * aantal liter dat verlicht moet worden = totaal aantal benodigde watt
 $30 * 62.080.000 / 100 = 18.624.000 \text{ watt} = \mathbf{18 \text{ MW}}$ om tot 1 meter diepte te verlichten als aquarium.

3.3 Berekening 3: Oudehaske rekening houdend met zonne-instraling

Aantal zonnepanelen en vermogen Oudehaske II: 38.000 en 21,3 MW
([Drijvende zonneparken Oudehaske I en II - groenleven.nl](#))

Oppervlakte van een zonnepaneel: ~1,6 m²

Percentage weggevangen door zonnepark: 80%¹⁴

Percentage licht over op 1 meterdiepte: 20% (uitgerekend met default waarde [ESF2-LICHT \(onderwaterlicht.nl\)](#)) (wat veel is vergeleken met bijvoorbeeld het IJsselmeer)

De jaarlijkse hoeveelheid zonnestraling gemiddeld over vijf KNMI- meetstations was in 2019: ~1125 kWh/m² ([KNMI - Zonnestraling in 2019](#)).

Het totale vermogen van de zonne-instraling onder het park op het wateroppervlak op 1 meter diepte

$1125 / (365 * 24) = 0.1284 \text{ kW/m}^2$

$0.1284 * 1.6 * 38000 = 7808 \text{ kW} = 7,808 \text{ MW}$

Hiervan wordt 80% weggevangen door de zonnepanelen en blijft er daarvan nog 20% over op 1 meter diepte door extinctie in de waterkolom.

$7,808 * 0.2 * 0.2 = 0.31 \text{ MW}$

Om de minimale benodigde hoeveelheid licht te bereiken op slechts 1 meter diepte is er dus een vermogen nodig van $1,32 - 0,31 = \mathbf{1.01 \text{ MW}}$. Dit is ~5% van het opgewekte vermogen van het zonnepark

Dus het gebruik van kunstmatig licht om de primaire productie in aquatische systemen is mogelijk. Dit zou dus betekenen dat ongeveer 5% van het totale vermogen van dit park, verbruikt zou worden aan kunstmatige verlichting, om gunstige lichtomstandigheden op 1 meter diepte te creëren voor aquatische fotosynthetiserende organismen. Wel zou kunstmatig licht strategisch kunnen worden ingezet door bijvoorbeeld over geproduceerde stroom in de zomer gebruiken om zo de energiekosten te verlagen.

4 De effecten van Kunstmatig licht op het aquatische ecosysteem

Het is goed om na te denken over de effecten die het artificiële licht kan hebben op andere facetten van het aquatische ecosysteem. In een korte literatuur verkenning, was er alleen informatie te vinden over de effecten van artificieel licht in de nacht op het aquatische ecosysteem. In deze literatuur is gevonden dat de aanwezigheid van kunstmatig licht in de nacht nadelige effecten heeft op vissen en aquatische primaire producenten^{12,13}. Over de effecten van artificieel licht overdag op het ecosysteem is geen literatuur gevonden. Uit eigen expertise en het interview met Tom Buijsma zijn er potentiële effecten hieronder uiteen gesteld. Het kunstmatige licht kan effecten hebben op vissen. Het zou ervoor kunnen zorgen dat de schuilplekken van vissen afnemen, voornamelijk als het licht feller is dan natuurlijk daglicht. En als het ondiepe systemen zijn, kunnen er ook effecten doordringen op de bodem. Daarnaast, kan er biofilm ontstaan op de lampen, wat weer een risico kan vormen op de waterkwaliteit. Naar de effecten van kunstmatig licht op het aquatische ecosysteem is geen uitgebreide review gedaan, maar deze korte verkenning laat zien dat dit meegewogen moet worden

5 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is getracht een zo goed mogelijk inzicht te krijgen in de haalbaarheid van het gebruik van kunstmatig licht onder zonneparken als mitigerende maatregel om primaire productie te herstellen. Hiervoor zijn de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

- 1 Wat zijn de benodigde lichteigenschappen om de primaire productie in de met een zonnepark bedekte oppervlakte wateren in stand te houden?
- 2 Wat is de technische haalbaarheid van het gebruik van kunstmatig licht hiervoor?
- 3 Wat zijn de potentiële effecten van het kunstmatig licht op de rest van het aquatische ecosysteem?

Vraag 1: benodigde lichteigenschappen

De kennis over het kunstmatig belichten van oppervlakte water ontbreekt, maar wel is er voldoende bekend over optimale lichtomstandigheden voor aquatische primaire producenten om iets te kunnen zeggen over de benodigde lichtomstandigheden. Als type licht is LED-licht ideaal voor het kweken van fotosynthetiserende organismen vanwege zijn hoge PAR-efficiëntie, instelbaarheid op specifieke golflengtes, duurzaamheid, kostenefficiëntie en minimale warmteproductie. De praktisch haalbare benadering voor optimale lichtintensiteit in aquatische ecosystemen is het gebruik maken van fotosynthetisch actieve straling (PAR) golflengtes en een gemiddelde lichtintensiteit van $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, om zo rekening te houden met diverse eisen van verschillende planten- en algensoorten op brede schaal. Daarnaast voor het behouden van een zo natuurlijk mogelijk ecosysteem met het kunstmatig belichten van oppervlaktewater, is het raadzaam het natuurlijke dag-nachtritme te volgen. Bovendien is het van belang de seizoenen in overweging te nemen, aangezien aquatische primaire producenten voornamelijk actief zijn in het voorjaar en de zomer.

Vraag 2: technische haalbaarheid

Het gebruik van kunstmatig licht onder zonneparken om de primaire productie in aquatische systemen in stand te houden is haalbaar, maar leidt dit tot aanzienlijke energiekosten (ongeveer 5% in Oudehaske II). Desondanks zou strategische inzet, zoals het benutten van overgeproduceerde stroom in de zomer, kunnen helpen bij het verlagen van de energiekosten. Ook moet er nog rekening gehouden worden met onderhoudskosten, zoals schoonmaken van biofilm op de lampen.

Vraag 3: potentiële effecten op aquatische ecologie

Er zijn een aantal potentiële risico's benoemd in Hoofdstuk 3. Omdat er geen ervaring is met de toepassing van kunstmatig licht om een 'normaal' ecosysteem te simuleren, kan de omvang van de risico's niet goed worden ingeschat. Bij een eventuele pilot dient hier een goed monitoringsplan voor worden opgesteld.

5.1 Mogelijke vervolgstudies

Deze korte verkennende studie laat zien dat er technisch gezien wel mogelijkheden zijn om een lichtklimaat onder water te simuleren. Lampen zijn beschikbaar en de vereiste lichtkwaliteit en intensiteit zijn bekend. De hoge energiekosten zijn waarschijnlijk te mitigeren bij slim gebruik van de over geproduceerde stroom. Toch is het nooit in de praktijk toegepast en kunnen we de risico's en kansen niet kwantificeren. Dit is nog een kennislacune voordat kunstmatig licht als mitigerende maatregel ingezet kan worden. Onze aanbeveling is om een vervolg studie te ondernemen en te starten met een modelleerstudie. Vervolgens kunnen die uitkomsten leiden tot een kleinschalige pilot in het veld.

5.1.1 Modelstudie

Om het kunstmatig belichten van oppervlakte water te implementeren is er vervolgonderzoek nodig om in meer detail te kunnen beslissen over energiekosten en om de effecten van het kunstmatige belichten van oppervlakte water, zowel positief als negatief, te kunnen vaststellen. Het accurater doorrekenen van de stroomkosten, rekening houdend met variabele lichtinstraling per seizoen en de verschillende zonnepark opstellingen wordt aanbevolen. Dit kan uitgevoerd worden doormiddel van een modelstudie, gebruikmakend van de bestaande modellen BIGEYE van TNO en UITZICHT van Deltares. Om dit model goed te kunnen runnen is het nodig om referentiegegevens te hebben van primaire productie voor de aanleg van een zonnepark en monitoringsdata van zuurstof (waarmee primaire productie uitgerekend kan worden). Twee potentiële pilotkandidaten hiervoor zijn het zonnepark in Krammersluise en het zonnepark in Oudehaske.

5.1.2 Pilot studie in het veld

Naast een modelstudie is het advies om een pilot studie op kleine schaal uit te voeren om zo veldervaring op te doen. Dit zou bijvoorbeeld kunnen bij de parken horen bij het innovatieproject INNOZOWA van waterschap Rivierenland. Het voorstel is om vanaf maart 2024 onder de 2 zonneparken van dit project Ledlampen te hangen en de zuurstof te meten (wat omgerekend kan worden tot primaire productie). Een andere optie voor een kleinschalige pilot is de opstelling voor het project DRIVER. Voor dit project ligt een klein zonnepark (maximaal 1% bedekking) in de Mark. Dit onderzoek levert dan waardevolle inzichten op over de praktische haalbaarheid van het gebruik van kunstmatige verlichting en een beginnend inzicht te krijgen van de effecten.

5.2 Alternatieven

5.2.1 Een opstelling met meer ruimte tussen de panelen.

Een alternatieve benadering voor het verminderen van lichtverlies door zonnepanelen, zonder extra onderhoud, is het overwegen van een ruimere opstelling van de panelen. Er zijn verschillende opstellingen in gebruik, waarbij de ene opstelling meer licht doorlaat dan de andere¹⁴.

5.2.2 Spiegels

Een alternatieve aanpak om de primaire productie onder zonneparken in stand te houden is het gebruik van spiegels. Door strategisch geplaatste spiegels te gebruiken, kan het beschikbare zonlicht worden gereflecteerd op het wateroppervlak. Het voordeel hiervan is dat het gereflecteerde licht van dezelfde aard is als direct zonlicht, waardoor het systeem minimaal verandert. Een belangrijk aspect bij het implementeren van deze oplossing is het zorgvuldig berekenen van de optimale invalshoek voor de spiegels. Dit vereist een gedetailleerde technische analyse om ervoor te zorgen dat de spiegels effectief het zonlicht naar de wateroppervlak richten. Daarnaast is het gebruik van spiegels over het algemeen kosteneffectief in vergelijking met het kunstmatig belichten onder de zonnepanelen.

6 Referenties

1. Trapani, K. & Redón Santafé, M. A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **23**, 524–532 (2015).
2. Spencer, R. S., Macknick, J., Aznar, A., Warren, A. & Reese, M. O. Floating Photovoltaic Systems: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States. *Environ Sci Technol* **53**, 1680–1689 (2019).
3. Abid, M. et al. Prospects of floating photovoltaic technology and its implementation in Central and South Asian Countries. *International Journal of Environmental Science and Technology* **16**, 1755–1762 (2019).
4. groenleven.nl. https://groenleven.nl/projecten/?project_category=op-het-water.
5. de Lima, R. L. P., Paxinou, K., Boogaard, F. C., Akkerman, O. & Lin, F. Y. In-situ water quality observations under a large-scale floating solar farm using sensors and underwater drones. *Sustainability (Switzerland)* **13**, 6421 (2021).
6. Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. & Sabzalian, M. R. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **369**, (2014).
7. Metsoviti, M. N., Papapolymerou, G., Karapanagiotidis, I. T. & Katsoulas, N. Effect of Light Intensity and Quality on Growth Rate and Composition of *Chlorella vulgaris*. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 31 **9**, 31 (2019).
8. Li, Y. et al. Effect of light intensity on algal biomass accumulation and biodiesel production for mixotrophic strains *Chlorella kessleri* and *Chlorella protothecoide* cultivated in highly concentrated municipal wastewater. *Biotechnol Bioeng* **109**, 2222–2229 (2012).
9. Brzychczyk, B., Hebda, T. & Pedryc, N. The Influence of Artificial Lighting Systems on the Cultivation of Algae: The Example of *Chlorella vulgaris*. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 5994 **13**, 5994 (2020).
10. Luimstra, V. M. et al. Blue light reduces photosynthetic efficiency of cyanobacteria through an imbalance between photosystems I and II. *Photosynth Res* **138**, 177–189 (2018).
11. Szabó, S. et al. The Ecophysiological Response of Two Invasive Submerged Plants to Light and Nitrogen. **10**, 1 (2020).
12. Grubisic, M. Waters under Artificial Lights: Does Light Pollution Matter for Aquatic Primary Producers? *Limnol Oceanogr Bull* **27**, 76–81 (2018).
13. Jechow, A. & Hölker, F. How dark is a river? Artificial light at night in aquatic systems and the need for comprehensive night-time light measurements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **6**, e1388 (2019).
14. Boderie, P. & van Aken, B. B. TNO 2022 M11857_rapport buitendijks plan_Aken. (2020).

7 Bijlage: interviews

Veerle Luimstra; gepromoveerd op de interactie tussen lichteigenschappen en algen

Vragen:

Wat denk jij over het kunstmatig verlichten van oppervlakte water onder zonnepanelen?

Hoe rendabel is het? Rendabeler maken door rekening te houden met de frequentie met de fotosystemen van de planten. Met flitslampen, maar is belangrijk wat de effecten zijn op de andere organismen.

Gewoon zo dicht mogelijk bij de zon of wel golflengtes kiezen die tegen blauwalgen werken?

Dat is locatie specifiek en hangt af van de natuurlijk voorkomende soorten.

Dat licht eraan wat je wilt. Wil je specifieke soorten behouden of soorten stimuleren?

Gemiddelde lichtintensiteit van Nederland in het voorjaar. Hoe lang zijn de dagen niet hoogzomer nabootsen. Niet te fel licht. Wit licht, meer richting de blauwe kant van het spectrum. Waar wil je de lamp doen? Bovenstraling? Te fel licht zorgt voor te veel algen. Geen constante felle licht. Houd rekening met de effecten van licht op ander onderwater leven.

Is het haalbaar om met specifieke golflengte specifieke groepen algen wel of niet te in je water te krijgen?

Dit kan. Rood licht. Alle groenalgen en planten hebben chlorofyl en gebruiken vooral rood licht. Blauw licht veel meer energie om te maken. Oranje licht niet, want die zijn goed voor blauwalgen. 4 fotonen fotosynthese en meer energie om die fotonen van blauw licht te maken.

Wat voor soort lampen?

LED licht.

Minne de Jong & Bas van Aken; Technische experts van zon op water projecten bij TNO

Wat denken jullie over het kunstmatig verlichten van oppervlakte water onder zonnepanelen?

Hoeveelheid licht, wat heb je nodig. Alleen bij overmaat van stroom bijvoorbeeld. Ze zien vooral potentie in het doorlaten van meer licht. Ronde parken die ronddraaien met de zon mee en de daardoor is er veel meer ruimte tussen de panelen waar het licht door kan. Waar bied je dat licht aan, op het water in het water eronder. Wat is het minimale licht nodig voor de groeicurve van algen. Goed om hier rekening mee houden. Waarom pomp je niet gewoon zuurstof erin? TNO kan en wil uitrekenen hoeveelheid licht die doorkomt bij verschillende soorten opstellingen van zonneparken. Vaak kunnen de panelen van zonneparken veel meer opwekken dan het netstroom aankan. Hij zegt leuk TKI-toeslag project.

Tom Buijsma; vissenexpert Deltares

Het is soort en leeftijd specifiek hoe de vissen reageren op licht. Zichtjagers komen naar het licht toe. Ander vissen ontwijken de lampen weer. Ze gebruiken het gebrek aan licht om bijvoorbeeld predatie te ontwijken. Dag nacht ritmes zijn hierom belangrijk om aan te houden. Meerderheid van vissen zoeken ondiepe gedeeltes op s 'nachts omdat ze dan niet gezien worden. Snoekbaars kan goed in troebel water kijken (te helder water kan problemen hiervoor geven). Daglicht constructies lijkt hem een beter alternatief, aangezien het dan rekening houdt met het dag nacht ritme met de seizoenen mee. Spiegellenzen of andere constructies bekijken die worden gebruikt om daglicht aan huis te krijgen (daglicht buis). Synchroniseren met daglicht. Ziet toch meer potentie in meer ruimte tussen de panelen te maken. Parallel met lichtvervuiling.

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

Deltares

www.deltares.nl