

**Earth, Environmental and Life
Sciences**Utrechtseweg 48
3704 HE Zeist
Postbus 360
3700 AJ Zeistwww.tno.nl

T +31 88 866 60 00

F +31 88 866 87 28

infodesk@tno.nl**TNO-rapport****TNO 2013 R11269****Fotokatalytische oxidatie in de glastuinbouw:
Fase 1 – Ontwikkelingen en evaluatie van
technologieconcepten voor desinfectie en
afbraak van middelen in de kas**

Datum	26 augustus 2013
Auteur(s)	R.M. Jurgens MSc. Ir. W.A.J. Appelman MBA Ir. J.W. Assink Ing. M. Zijlstra
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	112 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Produktschap Tuinbouw T.a.v. Joke Klap Postbus 280 2700 AG ZOETERMEER
Projectnaam	
Projectnummer	054.02922
Postscannummer	TNO-060-ZT-2013-00004

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2013 TNO

Samenvatting

Het TNO EZ-cofinancieringsproject "Fotokatalytische oxidatie in de glastuinbouw", hierna FKO-project genoemd, richt zich op het ontwikkelen van een nieuw en duurzaam technologieconcept voor desinfectie van water in de glastuinbouw. Met behulp van niet-toxische en goedkope katalysatoren (zoals titaandioxide, TiO_2) worden, met UV-A straling uit dag- en/of kunstlicht, OH-radicalen aangemaakt in het water die micro-organismen kunnen doden en organische stoffen kunnen afbreken. In het project is samengewerkt met WUR Glastuinbouw en een begeleidingscommissie van Tuindersvereniging TTO en de co financiers Productschap Tuinbouw en Priva.

Het FKO-project bestaat uit twee fases. Fase 1, 2^e categorie onderzoek, richt zich op het vertalen van het bewezen werkingsprincipe van FKO naar een voor de glastuinbouw geschikt technologieconcept ("proof of concept"). Hiertoe zijn toepassingsmogelijkheden in de glastuinbouw geïdentificeerd en zijn in overleg met de begeleidingscommissie de onderstaande toepassingsvormen geformuleerd.

- schermen met TiO_2 films/coatings
- toepassing van gesuspendeerd TiO_2 poeder in het regenwaterbassin
- geïmmobiliseerd TiO_2 (bijv. gecoate glasparels)
- TiO_2 gecoate teeltgoot (zijkanalen)
- TiO_2 gecoate teeltvloer

Om inzicht te krijgen in de ontwerpparameters voor deze toepassingsvormen is met behulp van laboratoriumonderzoek voor verschillende TiO_2 poeders, enkele hieruit gevormde films en een coating (verfsysteem) de afbraakkinetiek van een modelcomponent voor organische verontreiniging (Reactive Blue) onderzocht en zijn de effecten van lichtintensiteit, nutriënten en vervuiling bepaald. Tevens is de afbraak van gewasbeschermingsmiddelen en de afdoding van *Agrobacterium Rhizogenes* onderzocht.

De technische evaluatie heeft laten zien dat FKO in staat is om kleurstof en gewasbeschermingsmiddelen af te breken en *Agrobacterium Rhizogenes* af te doden. Er wordt verwacht dat dit ook geldt voor de remmiddelen. Gecoate glasparels bieden de beste perspectieven gezien de makkelijke afscheiding uit het water en de relatief lage kosten. De poeders kennen relatief hoge kosten vanwege de benodigde afscheiding met NF/RO. De films laten goede perspectieven zien, mits de mechanische bestendigheid verbeterd kan worden door optimalisatie van de preparatie. De commercieel beschikbare coating (TitanProtect) is eenvoudig aan te brengen en mechanisch bestendig maar kent een lage concentratie werkzame stof.

Uit de technische en economische evaluatie zijn diverse concepten naar voren gekomen die goede perspectieven bieden voor toepassing in de glastuinbouw en concurrerend zijn ten opzichte van de conventionele technieken, zijnde:

- Geïmmobiliseerd TiO₂ met UV-A ondersteuning voor behandeling spuiwater
- FKO voor verwijdering van middelen uit spuiwater met voorgeschakelde TOC-verwijdering

De onderstaande concepten bieden nieuwe oplossingen voor de glastuinbouw en kennen naar verwachting goede perspectieven op de korte termijn:

- Combinatie van FKO met het Flow Deck¹
- Integratie van TiO₂ in betonnen teeltvloeren
- Inzet van geïmmobiliseerd TiO₂ als tijdelijk in te zetten extra hulpmiddel voor afbraak van middelen en/of desinfectie (bijv. een gecoat uitrolfolie of tijdelijk te plaatsen IBC met TiO₂)

TNO zal voorbereidend onderzoek uit gaan voeren naar de hier boven genoemde concepten ten behoeve van demonstratie van FKO in de glastuinbouw (cat. 3 onderzoek, Fase 2).

In de onderstaande tabel zijn de behaalde resultaten en de mogelijkheden voor vervolgonderzoek en demonstratie beschreven. Voor meer informatie over de behaalde resultaten en de economische evaluatie van de toepassingsvormen wordt verwezen naar de hoofdstukken 5 t/m 9.

¹ Dit, door TNO ontwikkelde, nieuwe type kasdek bestaat uit een dubbelwandig acrylaatplaat waartussen water stroomt. Het water zorgt voor voorkoming van verlies aan lichtopbrengst door het kunststof en kan gelijktijdig warmte afvoeren die bijvoorbeeld kan worden opgeslagen in een aquifer. Door toepassing van een transparante TiO₂ coating op het dek, blijft de waterkwaliteit gewaarborgd. Ook kan TiO₂ poeder ingezet worden ten behoeve van dynamisch schermen door middel van het regelen van de concentratie.

Problematiek in glastuinbouw	Technisch resultaat	Economisch resultaat	Opties voor inzet in de glastuinbouw
Productieverlies door ziekten en groeiremming van microbiële aard	Desinfectie met FKO is mogelijk (literatuur -> log 5 reductie binnen 145 min obv P25 poeder) Films en gecoate glasparels nog te testen	Kansen voor decentrale ontsmetting. Tbv lokale punt ontsmetting geen voordeel tov UV-C.	Inzet als lokale aanvullende desinfectie, zoals in een teeltvloer met hoge concentratie werkzame stof (desinfecteren tijdens of tussen teelten)
Emissie van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen bij lozen vanwege groeiremming	FKO breekt gewasbeschermingsmiddelen en naar verwachting remmiddelen goed af (>90%)	Gecoate glasparels en TiO ₂ film met UV-A ondersteuning concurrerend qua prijs tov conventionele technieken (<1,9 €/m ³)	Praktijkproeven met gecoate glasparels Produceren films op basis van sol-gel methoden
Algengroei door blootstelling water aan zonlicht (afscherming nodig)	Algen zijn makkelijker afbreekbaar dan bacteriën. FKO is naar verwachting goed in staat om algen snel af te breken	-	Inzet gecoate glasparels of andere vormen van geïmmobiliseerd TIO ₂ in regenwaterbassin of elders
Herbesmetting in watersysteem ondanks centrale desinfectie	Effect aangetoond, lichtbeschikbaarheid is te laag voor volledige desinfectie gehele drainwaterstroom te. Desinfectie van spuiwater of regenwaterbassin is mogelijk.	Kansen voor decentrale ontsmetting.	Inzet als aanvullende desinfectie, zoals in een teeltvloer met hoge concentratie werkzame stof (desinfecteren tijdens of tussen teelten)
Hoge energiekosten voor desinfectie	Desinfectie obv alleen daglicht mogelijk	Zonder UV-A ondersteuning: enkel pompenergie (waar nodig) Met UV-A ondersteuning: factor 1-2 hoger dan UV-C	FKO kan een bijdrage leveren aan de energieneutrale kas
Hoge investeringskosten voor desinfectie/afbraak middelen (complexe technieken)	Techniek is robuust en eenvoudig gebleken.	Kapitaallasten hardware + afscheiding: Films -> 75% tov UV-C Poeders -> vergelijkbaar met UV-C Gecoate glasparels -> 5% tov UV-C	Inzet gecoate glasparels voor afbraak middelen of als tijdelijke extra ondersteuning (eenvoudig toe te voegen en te verwijderen)

Inhoudsopgave

	Samenvatting	3
1	Inleiding	9
1.1	Projectachtergrond	9
1.2	State of the art – TNO	10
1.3	State of the art – Nederland/Internationaal	10
1.4	State of the art – Wetenschappelijke literatuur	10
1.5	Te ontwikkelen nieuwe kennis/beoogde innovatie	11
2	Theoretische achtergrond concept	13
2.1	Werkingsprincipe	13
2.2	Effect van een mengsel van stoffen	14
2.3	Opbrengst o.b.v. energie input (quantum yield)	15
3	Lichtbeschikbaarheid in de kas	17
3.1	Zon-instraling in Westland	17
3.2	UV-A transmissie kasdekmaterialen	18
3.3	Praktijkmetingen UV-A in de kas (tomaat)	19
3.4	Lichtbeschikbaarheid voor overige gewassen	21
3.5	Tussenconclusies	22
4	Technologieconcepten voor FKO in/rondom de kas	23
4.1	Inventarisatie FKO- concepten	23
4.2	Daglicht gedreven technologieconcepten in andere werkvelden	24
4.3	Evaluatie en selectie FKO-concepten	27
5	Technische evaluatie: Onderzoek prestatie katalysatoren	33
5.1	Inleiding	33
5.2	Materialen en methoden	33
5.3	Toegepaste lichtintensiteit	40
5.4	Kinetiek voor afbraak modelstof	40
5.5	Effect standaardwater en praktijkwater op werking FKO	50
5.6	Effect lichtintensiteit	53
6	Technische evaluatie: Afbraak middelen	57
6.1	Afbraak gewasbeschermingsmiddelen	57
6.2	Afbraak remmiddelen (Alar) (WUR)	60
7	Technische evaluatie: Desinfectie en effect op gewasgroei (WUR)	61
8	Praktijk-evaluatie (gecoate teeltgoot)	69

9	Economische evaluatie FKO	71
9.1	Inleiding	71
9.2	Overzicht prestatie geteste TiO ₂ poeders, films en coatings.....	72
9.3	Algemene uitgangspunten	73
9.4	Uitgangspunten lichtomstandigheden en benodigde dosis	74
9.5	Uitkomsten economische evaluatie	75
9.6	Vergelijking met alternatieve technieken voor afbraak gewasbeschermingsmiddelen	78
9.7	Vergelijking met alternatieve technieken voor desinfectie	80
10	Discussie	81
10.1	Adsorptie versus afbraak	81
10.2	Afbraak Reactive Blue	81
10.3	Effect reiniging film	81
10.4	Effect nutriënten en vervuiling	81
10.5	Effect lichtintensiteit	82
10.6	Afbraak gewasbeschermingsmiddelen.....	82
10.7	Afbraak remmiddelen	83
10.8	Desinfectie	84
10.9	Voorkomen van TiO ₂ emissies.....	84
11	Conclusies en aanbevelingen	87
12	Referenties	91
13	Ondertekening	93
	Bijlage(n)	
	A Zon-instraling in Nederland	
	B Informatie lampen armatuur	
	C Specificaties Reactive Blue	
	D Informatie over toegepaste TiO ₂ poeders en coatings	
	E Preparatie methoden	
	F Specificaties UV-A meter	
	G Detailuitkomsten economische evaluatie	

1 Inleiding

1.1 Projectachtergrond

In dit project (Fase 1) is het proces van fotokatalytische oxidatie (FKO) onderzocht als mogelijke nieuwe en duurzame desinfectiemethode voor de glastuinbouw. In FKO processen worden inerte, niet-toxische, goedkope katalysatoren (zoals titaandioxide, TiO_2) gebruikt om met behulp van zuurstof (uit lucht), water en UV-A licht OH-radicalen te genereren. Deze radicalen hebben een sterke oxidatieve werking en kunnen micro-organismen doden en organische stoffen afbreken.

De resultaten van Fase 1 worden gebruikt als input voor Fase 2, waarin het meest succesvolle concept zal worden gedemonstreerd op locatie bij een tuinder.

In samenwerking met Wageningen UR glastuinbouw is onderzocht of FKO een goedkope en duurzame oplossing voor diverse problemen in de glastuinbouw kan zijn:

Tabel 1: Actuele problemen in de glastuinbouw en oplossingen die FKO kan bieden

Problematiek in glastuinbouw	Oplossing die FKO kan bieden
Productieverlies door ziekten en groeiremming van microbiële aard	Afbraak van micro-organismen, schimmels, virussen e.d.
Emissie van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen bij lozen vanwege groeiremming	Lozing vanwege groeiremming niet meer nodig door afbraak stoffen en betere desinfectie
Algengroei door blootstelling water aan zonlicht (afscherming nodig)	Beperkt/voorkomt algengroei
Herbesmetting in watersysteem ondanks centrale desinfectie	Ontsmetting door gehele watersysteem of over een groot deel hiervan
Hoge energiekosten voor desinfectie	Desinfectie o.b.v. reeds beschikbaar (dag)licht
Hoge investeringskosten voor desinfectie/afbraak middelen (complexe technieken)	Eenvoudig, robuust en modulair opzetbaar systeem

De (desinfecterende) werking van fotokatalyse met TiO_2 is sinds 25 jaar bekend en veelvuldig onderzocht. Toepassingen richten zich in hoofdzaak op fotokatalyse met geïmmobiliseerd titaandioxide op oppervlakten om deze steriel en/of schoon te houden. Daarnaast zijn enkele, relatief kleinschalige projecten bekend voor de behandeling van waterige stromen met TiO_2 . Ook zijn er diverse producten gebaseerde op FKO op de markt, zoals bijvoorbeeld de SolarBag van Puralytics² voor goedkope en op consumenten gerichte waterbehandeling in ontwikkelingslanden.

² www.puralytics.com

1.2 State of the art – TNO

In 2000 is binnen een cofinancieringsonderzoek (2e cat, 25%) met het toenmalige Nuon Water (nu onderdeel van Vitens) onderzoek uitgevoerd naar daglicht-gedreven nabehandeling van RWZI-effluent in Elburg. Toepassing op kleine, decentrale schaal werd in dit project als kansrijk gezien vanwege de goede neerschaalbaarheid van de techniek, ook qua kosten.

Recentelijk heeft de expertisegroep Responsive materials & Coatings (TS) een cofinancieringsvoorstel ingediend voor het immobiliseren van TiO₂ op bewerkte glasvezels, met het doel een gelijkmatige aanstraling via de glasvezel te bereiken. De hieruit voortkomende resultaten kunnen mogelijk in de toekomst nuttig zijn voor toepassing in FKO.

1.3 State of the art – Nederland/Internationaal

Er zijn op dit moment geen commercieel verkrijgbare systemen voor FKO voor inzet in de glastuinbouw, zowel in Nederland als internationaal. Er is op dit moment in Duitsland een systeem in demonstratie fase (RayWoX) welke ingezet wordt voor kleinschalige reiniging van afvalwater.

1.4 State of the art – Wetenschappelijke literatuur

De literatuur laat zien dat op het gebied van FKO een breed scala aan voor de glastuinbouw relevante componenten is onderzocht. Hieronder vallen onder andere desinfectie van schimmels en andere pathogenen. Hierbij is slechts naar één of een klein aantal specifieke componenten gekeken [1; 2; 3]. Hiernaast is onderzoek gedaan naar de invloed van verschillende parameters en componenten op de werking van FKO [4]. Uit de literatuur blijkt dat FKO een goede werking kent voor desinfectie.

Uit de literatuur volgt ook dat de samenstelling van de afvalwaterstroom sterk bepalend is voor de prestatie van FKO [4, 5]. Er is geen onderzoek gevonden wat zich specifiek richt op de samenstelling van het recirculatiewater in de (Nederlandse) glastuinbouw. Muzkat et al. beschrijven wel desinfectie voor een drietal bacteriesoorten in recirculatiewater, echter wordt de samenstelling van het water niet beschreven en wordt niet ingegaan op het effect van andere componenten in water [6].

Een aantal auteurs heeft onderzoek gedaan naar reactorsystemen, met name Malota et al. Hebben veel werk op dit vlak verricht [7]. Ook door Bahnemann et al is onderzoek gedaan naar zonne-energie gebaseerde systemen [6]. Hiernaast is de laatste 15 jaar onderzoek gedaan om de effectiviteit van TiO₂ deeltjes te verbeteren (o.a. door additieven). Dit heeft onder meer geresulteerd in katalysatoren met een beperkte toevoeging van stikstof, deze toevoeging wordt ook wel dotering genoemd [8]. Door deze toevoeging wordt de benodigde golflengte verhoogd waarbij de elektronen in de katalysator aangeslagen worden (benodigd voor de radicalen productie, zie paragraaf 2.1) verhoogd en kan (ook) zichtbaar licht gebruikt worden. Voordeel hiervan is dat een groter deel van het daglicht benut kan worden (i.p.v. enkel het UV-A gedeelte).

De literatuur laat echter ook zien dat de prestatie in het zichtbaar licht vaak aanzienlijk lager is dan in het UV-bereik. Ook is waargenomen dat de toevoegingen langzaam vrijkomen uit het TiO₂ deeltje waardoor de prestatie achteruitgaat [9][10].

1.5 Te ontwikkelen nieuwe kennis/beoogde innovatie

In de literatuur wordt onderzoek beschreven met betrekking tot de inzet van FKO voor desinfectie. Dit betreft echter maar beperkt toegepast onderzoek. Voor behandeling van recirculatiewater in de glastuinbouw is nog geen proof-of-concept beschikbaar.

De hoofddoelstelling van het onderliggende project is het vertalen van het bewezen werkingsprincipe naar een technologie concept dat geschikt is voor toepassing in de glastuinbouw. In een vervolgfase zal het ontwikkelde FKO-concept gedemonstreerd worden op locatie.

Om tot toepassing te kunnen komen in de glastuinbouw zijn in het project de onderstaande kennisvragen gesteld.

Kennisvragen		
Centrale kennisvraag	Op welke wijze kan FKO technisch en economisch haalbaar ingezet worden voor desinfectie en afbraak van middelen in de glastuinbouw?	
Deelvragen Fase 1, laboratorium en bench-scale onderzoek		WP
1-1	Welke uitvoeringsvorm van de katalysator is het meest geschikt voor toepassing in de glastuinbouw?	1
1-2	Op welke wijze kan zo optimaal mogelijk gebruik gemaakt worden van het beschikbare (kunst)licht?	1
1-3	Welke effecten heeft de mix van componenten in het recirculatiewater op de werking van de katalysator?	2
1-4	Hoe verhoudt FKO zich technische en economisch tot de gebruikelijke ontsmettingstechnieken (verhitting/UV)?	4
Deelvragen gekoppeld aan Fase 1, door WUR Glastuinbouw*		
W-1	Wat is het effect van de katalysatordeeltjes op de gewasgroei?	WUR, WP3
W-2	Welke prestatie laat de katalysator in de praktijk zien?	WUR, WP3

* Deelvragen W-1 en W-2: Door WUR Glastuinbouw zal in een parallel project FKO experimenteel getoetst worden. Deze onafhankelijke toetsing van de effecten van FKO op gewasgroei draagt bij aan acceptatie in de sector en levert TNO extra kennis op.

Om een goed inzicht te krijgen in de effecten van parameters op de werking van TiO₂ is tijdens het laboratoriumonderzoek gebruik gemaakt van een modelstof (Reactive Blue) en UV-belichting. Reactive Blue is gekozen omdat hier reeds ervaring mee is opgedaan in eerder FKO-onderzoek en omdat deze stof qua molecuulstructuur vergelijkbaar is met gewasbeschermings- en remmiddelen. Dit maakt het mogelijk om resultaten onderling te vergelijken. Hiermee kunnen de condities en de samenstelling van het water naar wens gestuurd worden wat een goede onderlinge vergelijking mogelijk maakt.

Tijdens de door WUR Glastuinbouw uitgevoerde experimenten wordt gebruik gemaakt van een specifiek geselecteerd micro-organisme (*Agrobacterium Rhizogenes*) en middelen die representatief zijn voor de glastuinbouw.

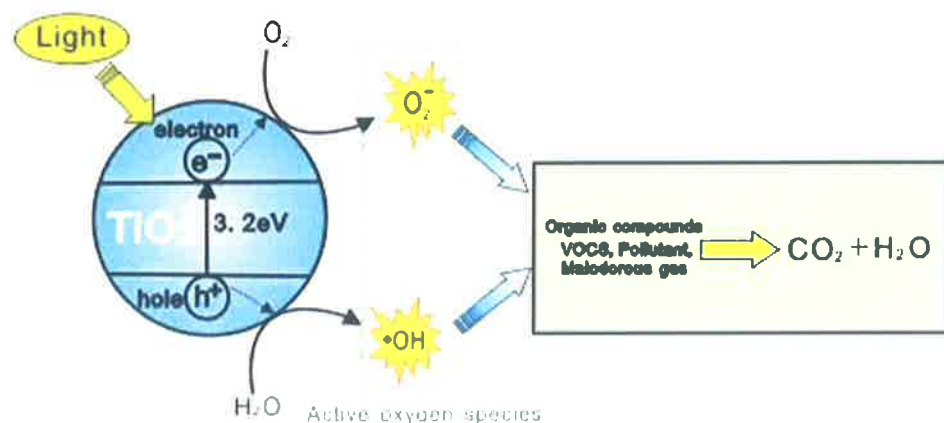
2 Theoretische achtergrond concept

2.1 Werkingsprincipe

Figuur 1 laat het werkingsmechanisme van FKO zien. Er wordt gebruik gemaakt van een halfgeleider-materiaal zoals TiO_2 . Zodra hier een foton met de juiste energie op valt wordt een elektron aangeslagen waarbij een electrongat achterblijft (h^+ in Figuur 1). Bij TiO_2 is hiervoor UV-A straling nodig ($< 380 \text{ nm}$). Het aangeslagen elektron reageert met zuurstof (O_2) om het O_2^- radicaal te vormen. Het electrongat reageert met water om zo een OH^- radicaal te vormen. Deze radicalen kunnen organische stoffen oxideren. Hierdoor worden de organische stoffen afgebroken. Bij voldoende oxidatie blijft enkel CO_2 en H_2O over.

De radicalen vervallen al snel weer terug naar zuurstof en water. Vanwege deze korte levensduur vinden de reacties op of dicht bij het TiO_2 oppervlak plaats. De af te breken stoffen zullen dus of aan het deeltje moeten adsorberen of zich hier heel dicht bij in de buurt bevinden. Na reactie met de radicalen kunnen de restanten van het molecuul weer desorberen (= loskomen van het deeltje).

Tijdens dit proces kunnen diverse stoffen (zoals carbonaten) de radicalen afvangen en zo het proces verstoren. Dit worden ook wel radicaal-scavengers genoemd.



Figuur 1: Werkingsmechanisme fotokatalytische oxidatie [11]

2.2 Effect van een mengsel van stoffen

In de wetenschappelijke literatuur wordt veelal gekeken naar de afbraak van 1 of enkele componenten. Wanneer FKO toegepast wordt op een breed mengsel van stoffen zullen een aantal effecten optreden. In de onderstaande tabel worden deze effecten beschreven.

Tabel 2: effect mengsel van stoffen op werking FKO

Effect	Toelichting
Verschuiving van het adsorptie-desorptie evenwicht	Door de aanwezigheid van andere componenten wordt het adsorptie evenwicht van de af te breken stof beïnvloed (meer onderlinge concurrentie)
Reactie met andere componenten	De OH-radicalen kunnen reageren met nutriënten of carbonaten waardoor ze verloren gaan voor de afbraak van de te af te breken stof
Verskil in snelheid van diffusie van moleculen door een TiO ₂ laag	De molecuulgrootte is sterk bepalend voor de snelheid waarmee een deeltje in een TiO ₂ film kan doordringen. Voor grote deeltjes (zoals bijv. bacteriën) kan de stofoverdracht van de bulk naar het deeltje snelheidsbepalend worden in plaats van de aangeboden UV-A straling

Een ander aspect is de massa aan TiO₂ die wordt toegepast. Bij toepassing van minder TiO₂ (ten opzichte van een vaste concentratie aan af te breken stof) zal een kleinere hoeveelheid stof aan het TiO₂ adsorberen, maar de oppervlaktebelading (uitgedrukt als mg stof/mg TiO₂) zal wel toenemen.. Dit leidt naar verwachting tot een verhoging van de afbraaksnelheid op het TiO₂ deeltje en dus een verbeterde quantum yield (zie paragraaf 2.3). Echter, een te lage concentratie TiO₂ zal tot niet volledige benutting van het beschikbare UV-A licht leiden, zodat per saldo voor een gegeven vloeistoflaag een optimale concentratie voor TiO₂ kan worden verondersteld.

2.3 Opbrengst o.b.v. energie input (quantum yield)

Een van de hoofddoelen van het FKO project is om verschillende toepassingsvormen en verschillende types van TiO₂ te vergelijken en te selecteren voor vervolgonwikkeling. Hiervoor is gebruik gemaakt van een modelstof als indicator voor de werking op het gebied van afbraak en desinfectie, zijnde de Reactive Blue. Er is gekozen voor toepassing van een Reactive Blue omdat hiervoor het gedrag goed bekend is en de afbraaksnelheid het mogelijk maakt om een proef binnen enkele uren uit te kunnen voeren.

Om de verschillende toepassingsvormen onderling te kunnen vergelijken is voor elk van de proeven de quantum yield bepaald. Quantum yield geeft de verhouding weer tussen de hoeveelheid stof die afgebroken is en de energie die hiervoor gebruikt is, zie Vergelijking 1.

Met behulp van de quantum yield (QY) kunnen experimenten onder verschillende condities met elkaar vergeleken worden qua prestatie.

Vergelijking 1: Toegepaste definitie quantum yield

$$QY = \frac{\text{mol afbraak totale kleurstof (opgelost + geadsorbeerd)}}{\text{netto UV - dosis}} \quad (1)$$

De netto UV-dosis wordt bepaald door de lichtintensiteit (W/m²) die op het belichte oppervlak (m²) valt en geadsorbeerd wordt, en de tijdsduur (sec) waarover dit gebeurt.

De quantum yield is in deze studie gebaseerd op de totale hoeveelheid aan Reactive Blue. Dit omvat zowel de opgeloste Reactive Blue als ook de Reactive Blue die aan het TiO₂ geadsorbeerd is. Tijdens de proeven is de concentratie opgeloste Reactive Blue gemeten. De hoeveelheid geadsorbeerde Reactive Blue is bepaald aan de hand van adsorptie isothermen. Deze adsorptie isothermen beschrijven de hoeveelheid geadsorbeerde Reactive Blue bij een gegeven hoeveelheid opgeloste Reactive Blue. De adsorptie isothermen zijn vastgesteld tijdens proeven waar onder donker-condities (geen licht, geen UV) bepaald hoeveel Reactive Blue aan het TiO₂ adsorbeert bij verschillende begin concentraties Reactive Blue.

De netto UV dosis is in de praktijk gemeten door het verschil in UV-intensiteit boven en onder het belichte oppervlak te meten. Hierbij is gecorrigeerd voor het verlies door het gebruikte glaswerk.

3 Lichtbeschikbaarheid in de kas

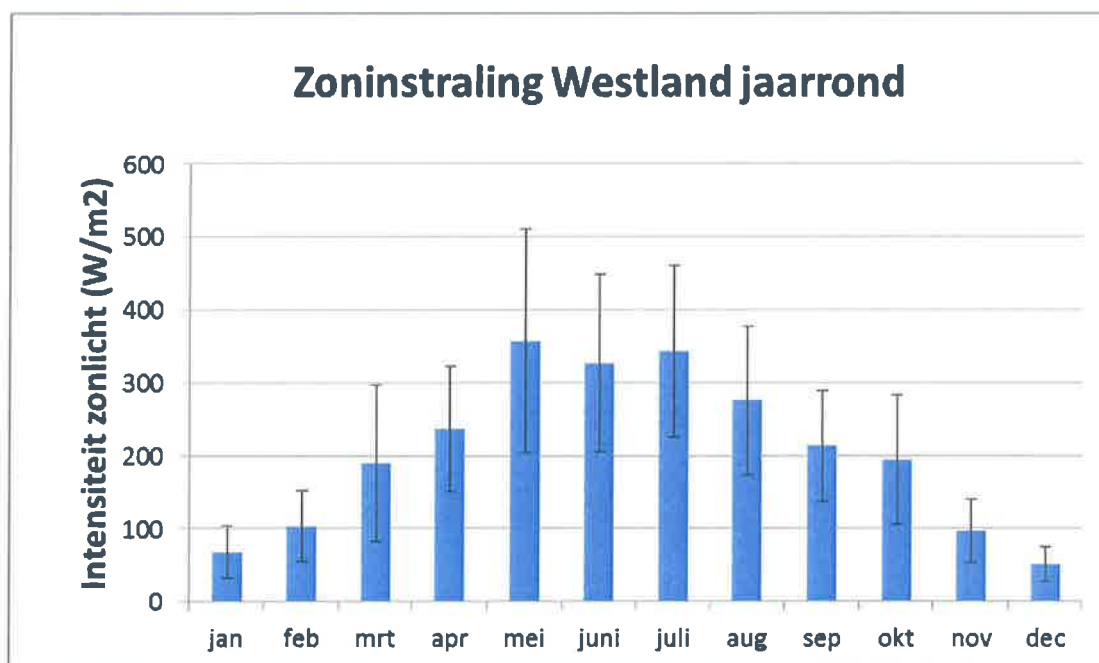
Een van de belangrijkste randvoorwaarden voor de haalbaarheid van FKO in de glastuinbouw is de beschikbaarheid van licht in en rondom de kas. De hoeveelheid daglicht, en daarmee de hoeveelheid UV-A straling, is bepalend voor het oppervlak aan TiO_2 dat benodigd is om de benodigde/gewenste afbraak te bewerkstelligen.

Voorafgaande aan de proeven met de diverse toepassingsvormen van TiO_2 is daarom bepaald hoeveel licht er door het jaar heen naar verwachting beschikbaar is in en rondom de kas.

3.1 Zon-instraling in Westland

Uit KNMI data [12] blijkt dat de gemiddelde zonne-instraling in het Westland 212 W/m^2 bedraagt, met minima van 16 (winter) en maxima van 574 (zomer). Hiervan is naar schatting maximaal 5% UV-straling [13].

In Figuur 2 is de zoninstraling in het Westland voor een geheel jaar weergegeven, inclusief standaard deviatie (spreiding ten opzichte van gemiddelde waarde) per maand. Er is te zien dat de spreiding het grootst is in de zomermaanden als gevolg van het verschil tussen heldere en bewolkte dagen. In de wintermaanden is naar verwachting de bewolking constanter.



Figuur 2: Standaarddeviatie zon-instraling per maand

Een overzicht van de lichtinstraling in Nederland is opgenomen in Bijlage I.

3.2 UV-A transmissie kasdekmaterialen

In de vorige paragraaf is beschreven hoeveel UV-A licht er buiten de kas beschikbaar is. Bij toepassingen van FKO in de kas moet rekening gehouden worden met het feit dat het kasdek een deel van de UV-A straling zal wegvangen.

In Tabel 3 zijn voor verscheidene kasdekmaterialen de transmissie van PAR (fotosynthese actieve straling) en UV-A en UV-B straling weergegeven. De tabel laat zien dat de meeste glassoorten goed UV doorlaten. Voor de kunststoffen geldt dat een deel (vrijwel) geen UV doorlaat terwijl andere kunststoffen dit wel (in bepaalde mate) doen.

Tabel 3: Overzicht kasdekmaterialen en transmissie voor PAR en UV licht [14]

Kasdekmateriaal	Andere namen	PAR-transmissie direct %	PAR-transmissie diffuus %	UV-B doorlatendheid	UV-A doorlatendheid
Tuinbouwglas enkel	Tuinbouwglas90+	89-91	82-83	nee	ja
Witglas enkel	Saint-Gobain*	90-92	83-84	gedeeltelijk	ja
AR-glas enkel	Sunarc glas, Sunergie® glas	ca. 96	89-90	afhankelijk van glastype	ja
Tuinbouwglas dubbel		ca. 83	ca. 73	nee	ja
AR-glas dubbel		91-94	82-86	afhankelijk van glastype	ja
PMMA-UV dubbel	Mönch/Degussa Highlux®	ca. 85	ca. 74	nee	nee
PMMA+UV dubbel	Röhm/Degussa Plexiglas Alltop®	88-90	ca. 76	ja	ja
PC dubbel	GE Lexan Thermoclear	76-80	ca. 61	nee	nee
PC-zigzag dubbel	GE Lexan ZigZag®	90-91	ca. 80	nee	nee
PE folie enkel	Hytibox, Hyticlear, Hytirose (zonder UV)	89-90	80-82	afhankelijk van foliotype	afhankelijk van foliotype
PE folie dubbel				afhankelijk van foliotype	afhankelijk van foliotype
ETFE folie enkel	Asahi F-Clean®	ca. 93	ca. 88	ja	ja
ETFE folie dubbel		ca. 89	ca. 73	ja	ja

* andere fabrieksnamen: Glas Diamant, Pilkington, Optiwhite™, Hortilight91+, Chrystal Clear, Glaverbel Low-Iron, Float

3.2.1 Transmissie waarden voor glas

Tabel 4 laat de licht transmissie van een aantal glassoorten zien. Er is duidelijk te zien dat de transmissie in het 300-400 nm gebied 70-80% bedraagt en slechts een paar procent minder is dan bij de zichtbare golflengten. Er treedt dus weinig verlies op bij de gebruikte glastypes (float glass en diffuus glas).

Tabel 4: Lichttransmissie (%) in verschillende gebieden van het lightspectrum van de verschillende kasdektypen (ref = floatglass, Diff = glas met verschillende % verstrooiing, Coating = glas met Redfuse coating ter bevordering van diffuus licht [15])

Golflengte (nm)	Type kasdek				
	Ref	Diff45	Diff62	Diff71	Coating
350-400	80	79	82	81	73
400-500	83	83	85	82	78
500-600	83	83	86	83	79
600-700	81	81	86	83	76
700-1000	76	74	85	83	72
400-700	83	82	85	83	78

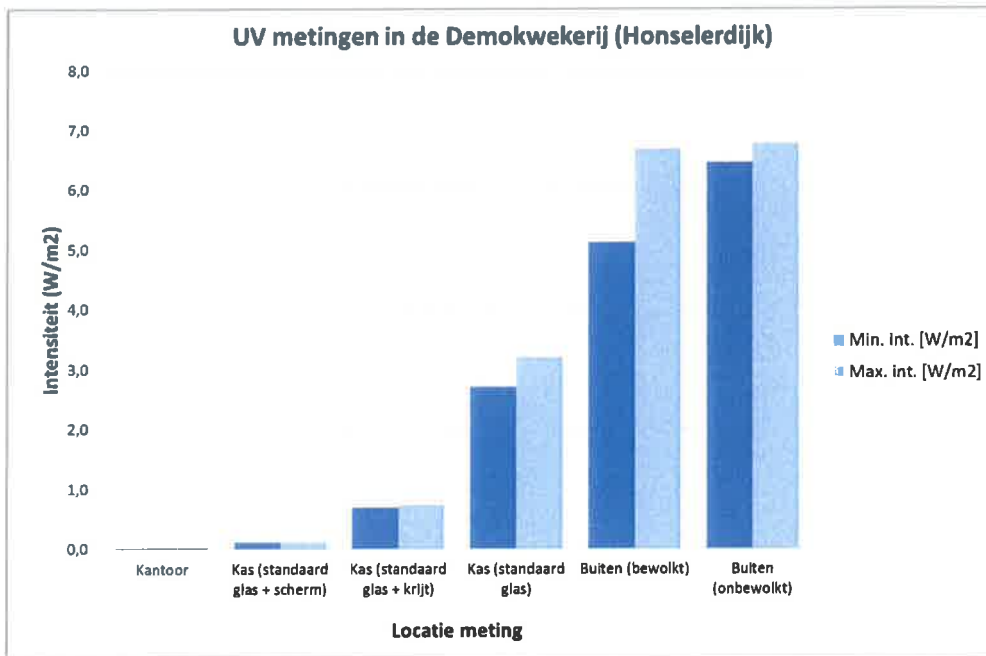
Tijdens eerder onderzoek naar FKO binnen TNO is ook plexiglas getest. Deze proeven lieten zien dat Plexiglas een 90% transmissie laat zien voor zichtbaar licht (>380 nm) en voor UV-A licht (330-380 nm). UV-B en UV-C straling worden (vrijwel) compleet geabsorbeerd.[16].

In 2005 is een TNO studie [16b] naar een (semi-)gesloten kas. Hierbij is ook gekeken naar toepassing van een dubbelwandig plexiglas dak waardoor water wordt geleid om zo de kas te koelen en warmte op te kunnen slaan in een aquifer voor toepassing in de winter. Dit concept is later door TNO en partners verder uitgewerkt tot het Flow Deck systeem binnen het Aquatop project. De studie naar het Flow Deck heeft aangetoond dat de doorlaatbaarheid voor daglicht van deels met water gevuld dubbelwandig Plexiglas (PMMA) paneel vergelijkbaar is met enkelwandig float glas. Het Flow Deck is interessant voor FKO aangezien het laat zien dat toepassingen rondom het kasdek (bij nieuwbouw) zeker mogelijk zijn, zie ook [27]

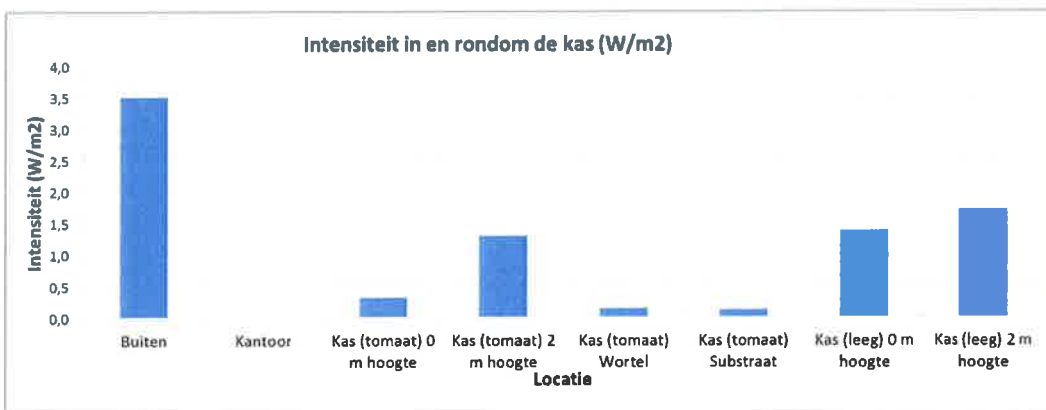
Vrijwel alle glastuinbouwbedrijven in Nederland passen glas toe als kasdek materiaal. Dit betekent dat op basis van de bovengenoemde experimentele waarden naar verwachting een groot deel van het UV-A licht behouden blijft achter het kasdek.

3.3 Praktijkmetingen UV-A in de kas (tomaat)

Op basis van de literatuur kon geen goede inschatting worden gemaakt van de beschikbaarheid van UV-A op verschillende locaties in de kas. Om deze reden zijn praktijkmetingen uitgevoerd in de Demokwekerij te Honselerdijk. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 3 en Figuur 4.



Figuur 3: UV-A beschikbaarheid in de kas (gemeten op 28 augustus 2012, rond 12:00; wisselvallige dag)



Figuur 4: UV-A beschikbaarheid in de kas (gemeten op 26 oktober 2012, bewolkte dag)

In Tabel 5 is een overzicht van de meetwaarden weergegeven inclusief het percentage UV-A wat over is gebleven ten opzichte van de buiten waarde.

Tabel 5: Overzicht lichtintensiteit waarden in Demokwekerij (gebaseerd op metingen uitgevoerd op 26-10-2012, rond 13:00 en bij bewolkt weer)

Locatie	Lichtintensiteit	Percentage tov buiten waarde	Opmerkingen
Buiten	3,5 W/m ²	100%	
Achter standaard glas	1,65 (*)	47%	Ca 2 m hoogte
Achter glas + krijt	0,38 (*)	11%	Ca 2 m hoogte
Achter glas + schermen	0,07 (*)	2%	Ca 2 m hoogte
Kantoor	0	0%	
Kas (tomaat) 0 m hoogte	0,32	9%	
Kas (tomaat) 2 m hoogte)	1,3	37%	
Kas (tomaat) ter hoogte van wortels	0,14	4%	
Kas (tomaat) ter hoogte van substraat	0,12	3%	
Lege kas, 0 m hoogte	1,38	39%	
Lege kas, 2 m hoogte	1,7	48%	

De bovenstaande resultaten laten zien dat de buitenwaarden goed overeenstemmen met de KNMI data. Verder is te zien dat het glazen kasdek ruim 50% van de UV-A straling afvangt. Dat is voor de Demokwekerij meer dan op basis van de waarden in tabel 4 werd verwacht. Kassen waarin krijt en/of schermen worden toegepast laten een afname in UV-A zien van >80%. Op kantoor wordt geen UV-A meer teruggevonden.

De hoeveelheid UV-A onder in een gevulde kas (bij het substraat, de wortel of op de vloer) is beperkt (0,5 W/m² of lager); dit betekent dat TiO₂ deeltjes veel minder actief zullen zijn dan wanneer zij buiten de kas worden gebruikt (onder de aanname dat de quantum yield gelijk blijft). De waardes op 2 meter hoogte en in een lege kas komen overeen met de waarden direct achter glas.

3.4 Lichtbeschikbaarheid voor overige gewassen

In de vorige paragraaf zijn praktijkmetingen beschreven in een kas voor tomaatteelt. Om inzicht te verkrijgen in de lichtbeschikbaarheid voor andere gewassen is een bezoek gebracht aan de proefkas van Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk. Ook is een kort literatuuronderzoek uitgevoerd.[17]

Voor verschillende gewassen zijn getallen bekend met betrekking tot Leaf Area Index (LAI, m² blad per m² teeltoppervlak) en plantdichtheid (aantal planten per m²). Dit geeft een extra indicatie qua ruimtegebruik en lichtbeschikbaarheid.

Uit deze getallen komt naar voren dat:

- Hoeveelheid planten per m^2 varieert sterk. Jonge planten (>400 planten/ m^2) en potplanten (30-50 planten/ m^2) kennen een hoge plantdichtheid. Vruchtgroente en bepaalde snijbloemen kennen juist een lage plantdichtheid (1-3 planten/ m^2). Hierbij speelt uiteraard mee dat de eerstgenoemde planten veel kleiner zijn.
- LAI varieert van <1 tot circa 7. Vruchtgroentes hebben vaak een hoge LAI terwijl de jonge planten tussen 0,5 en 1,5 zitten.



Figuur 5: Ruimtegebruik en lichtbeschikbaarheid voor tomaat (links) en gerbera (rechts)

Dit is in de praktijk ook te zien, zie de foto's van verschillende teelten in Figuur 5. De opkweekplantjes en potplanten zijn laag en vrij compact en staan met veel bij elkaar. De groente-planten (tomaat, paprika) zijn groot en hoog en nemen een groot volume in.

3.5 Tussenconclusies

- Buiten de kas (KNMI data) zal de gemiddelde UV-lichtintensiteit 10 W/m^2 bedragen. De minimale waarde, op basis van het aantal zon-uren per dag, ligt rond $0,8 \text{ W/m}^2$, de maximale waarde rond 28 W/m^2
- Binnen, dus achter standaard tuinbouwglas (zonder schermen of krijt) zal circa 50% -80% van de UV-A straling overblijven ($0,4$ - $22,4 \text{ W/m}^2$). In de wintermaanden okt-jan bedraagt de gemiddelde UV-A waarde achter glas circa $2,25 \text{ W/m}^2$. In de overige maanden is de gemiddelde UV-A waarde achter glas circa 7 W/m^2 .
- In een gevulde kas is de lichtbeschikbaarheid op substraathoogte nog circa 10% aangezien het meeste licht afgevangen wordt door het gewas en/of de teeltvloer voor een groot percentage gevuld is met gewas.
- In een lege kas of bij open plekken in de kas is op vloerhoogte een vergelijkbare UV-A intensiteit gevonden als direct achter het glas.

4 Technologieconcepten voor FKO in/rondom de kas

4.1 Inventarisatie FKO- concepten

4.1.1 *Inleiding*

Als onderdeel van Werkpakket 1 is een inventarisatie, evaluatie en selectie van concepten voor de toepassing van FKO in/rondom de kas uitgevoerd. De resultaten van deze studie worden in het onderstaande hoofdstuk besproken.

De inventarisatie is uitgevoerd op basis van een bezoek aan de proefkas van WUR Glastuinbouw in Bleiswijk en aan de hand van concepten die bij vergelijkbare werkvelden worden toegepast.

4.1.2 *Uitkomsten bezoek aan proefkas Bleiswijk*

Als onderdeel van het literatuuronderzoek is een bezoek gebracht aan de proefkas van WUR Glastuinbouw te Bleiswijk. Tijdens het bezoek is onder andere gesproken over de ontwikkeling van ziekten in de kas en mogelijke concepten voor toepassing van FKO in de kas. [17]

Hieronder zijn de algemene bevindingen benoemd.

- Ziekteontwikkeling (gerelateerd aan water) vindt vooral plaats in het substraat omdat het hier in aanwezige water vaak langer stilstaat. De aanwezigheid van voldoende licht bij het TiO_2 bij of onder het substraat is echter een aandachtspunt, alsook een eventueel effect dat deeltjes door het substraat uitgefilterd zullen worden.
- Mogelijk is bij de kleine plantjes goed gebruik te maken van de hoogte van de kas (deze blijft hierbij grotendeels onbenut). Bij de grotere planten is gebruik maken van ruimte in de kas lastiger.

De onderstaande bevindingen zijn meegenomen in de evaluatie en selectie van FKO-concepten.

- Het regenwaterbassin vormt een interessante optie voor het plaatsen van schermen met een TiO_2 film of voor toevoeging van TiO_2 deeltjes. Desinfectie van regenwater is een nieuwe trend binnen de sector.
- Teeltvloeren (vooral gebruikt bij opkweekbedrijven) bieden goed bereikbaar oppervlak voor het aanbrengen van bijv. een coating.
- Bij orchideeënteelt worden de planten beneveld. Wellicht is TiO_2 mee te vernevelen. N.B. Het risico is aanwezig dat de vernevelingsnozzles geblokkeerd raken.
- TiO_2 zou een oplossing kunnen zijn voor verstoppingsproblematiek in het watergift systeem doordat het biofouling kan tegengaan, mits er ook licht naar deze plekken geleid kan worden.
- TiO_2 zou tijdens of na de UV-desinfectie interessant kunnen zijn als een extra processtap boven op de normale desinfectie.
- Lichtgeleidend substraat is mogelijk ook een interessante optie

4.2 Daglicht gedreven technologieconcepten in andere werkvelden

Ten behoeve van het vaststellen van mogelijke technologieconcepten voor FKO in de glastuinbouw is onder andere gekeken naar andere processen die gebruik maken van zonlicht zoals zonne-energie en algenteelt.

Hieronder wordt een aantal toepassingen behandeld.

4.2.1.1 Toepassingen o.b.v. concepten voor zonne-energie

Door WUR is in het kader van het onderzoek Kas als Energiebron gekeken naar de mogelijkheden voor de benutting van warmte uit zonne-energie voor de glastuinbouw. Dit kent een sterke analogie met FKO aangezien in beide gevallen het opvangen van zoveel mogelijk zonne-energie het hoofddoel is en in beide gevallen gebruik gemaakt kan worden van schermen met hierop de actieve onderdelen (zonnecellen/TiO₂). De randvoorwaarden voor zonne-energie zijn dus vrijwel direct vertaalbaar naar FKO-toepassingen. [18]

In het kader van de bovengenoemde studie is er uitgebreid gekeken naar de beschikbaarheid van daglicht en de wijze waarop dit gebruikt kan worden zonder te concurreren met zonlicht dat benodigd is voor de plantengroei. Er zijn namelijk oplossingen, zoals zonnecellen in de daken, die een hoge energieopbrengst brengen maar door de afschermdende werking ten koste gaan van de gewasgroei.

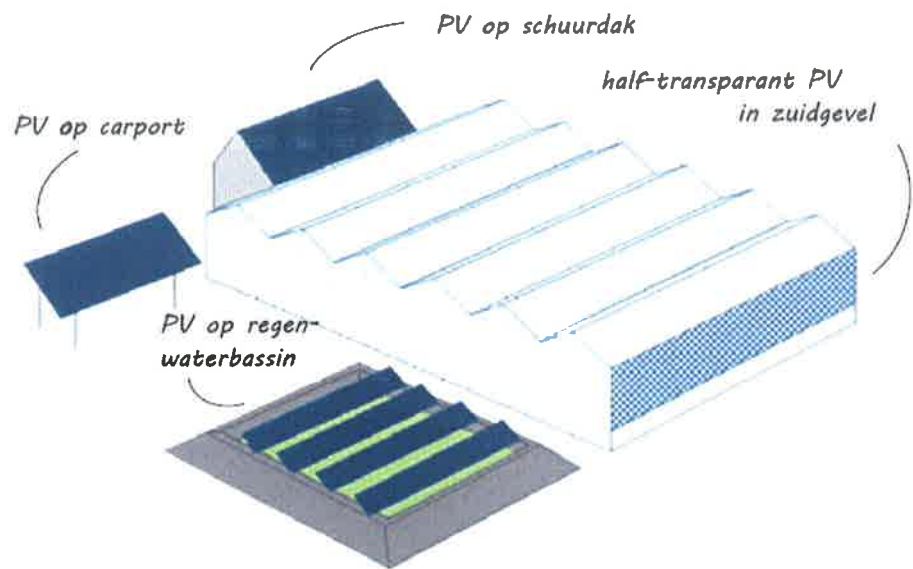


Figuur 6: Glasoppervlak en niet-glas oppervlak in een typische tuinbouwgebied (lichtblauw= teeltoppervlak, lichtgeel = daken bedrijfsruimten en regenwaterbassins)

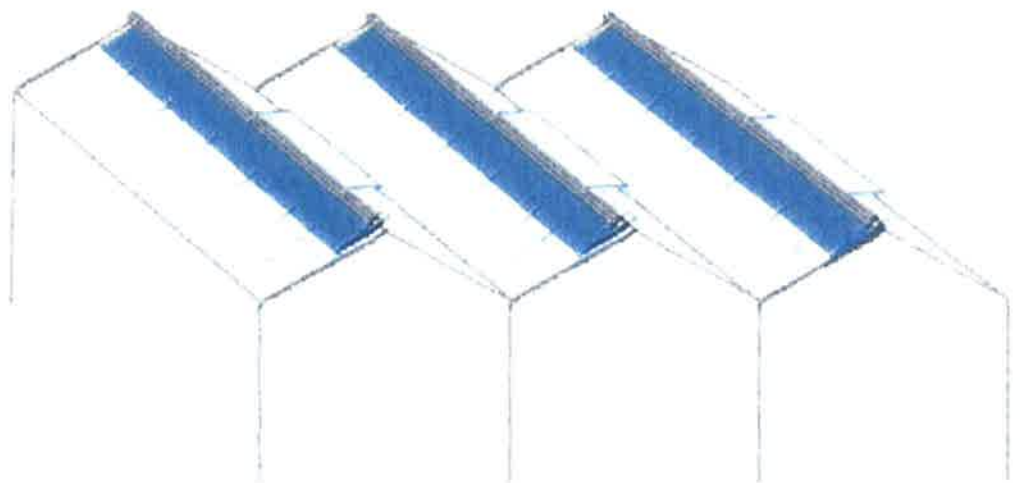
Uit de WUR-studie kwam naar voren dat circa 10% van het bruto kasareaal van zonnepanelen zou kunnen worden voorzien die in geen enkel opzicht concurreren met de lichtvraag van het gewas, zie Figuur 6.

Hierbij is ook te denken aan de oppervlakken boven de middenpaden. Hierbij moet opgemerkt worden dat de zonnepanelen het licht volledig afvangen, waardoor de toepassing op/rondom de kas sterk beperkt wordt. Een dunne laag TiO_2 vangt echter nauwelijks zichtbaar licht af en is dus veel breder toepasbaar. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan toepassing van een TiO_2 film/coating op het kasdek.

Hieronder zijn twee mogelijkheden voor het plaatsen van PV schermen weergegeven, zoals benoemd in het rapport Zonne-energie [18]. Op deze plekken zijn ook TiO_2 schermen toepasbaar. Toepassing binnen de kas (bijv. als hangende schermen tussen het gewas) is ook denkbaar.



Figuur 7: Mogelijkheden voor plaatsen zonnecellen of TiO_2 schermen [18]



Figuur 8: Schets van een kas waarop vanuit de nok een schaduw gevend PV-scherm uitgerold kan worden (een uitrolbare "zak" voor TiO_2 is ook denkbaar) [18]

4.2.1.2 Toepassingen o.b.v. concepten voor algenteelt

Binnen de algenteelt wordt onder andere gekeken hoe er meer efficiënt gebruik kan worden gemaakt van ruimte. De conventionele algenvijvers nemen veel ruimte in. Een mogelijkheid is om met doorstroomde zakken te werken die verticaal opgehangen worden [19]. In de zakken zijn tussenstukken aangebracht welke steeds aan tegenovergestelde uiteinde open zijn. Het water loopt zo door de zak heen en weer naar beneden.



Figuur 9: Algen bioreactoren in demonstratie plant Valcent Products Ltd. Te El Paso, Texas (VS) [19]

Een dergelijke aanpak zou ook toepasbaar kunnen zijn voor FKO. De zakken kunnen in dit geval gevuld worden met TiO_2 suspensies.

4.3 Evaluatie en selectie FKO-concepten

4.3.1 Voor- en nadelen FKO concepten

Aan de hand van het bezoek aan de proefkas van WUR Glastuinbouw in Bleiswijk, literatuur en een brainstorm binnen TNO zijn toepassingsmogelijkheden voor FKO geïdentificeerd. [17, 18, 19]

Vervolgens is op basis van de literatuur en de kennis/ervaring binnen TNO een inschatting gemaakt van de voor- en nadelen voor de diverse toepassings- mogelijkheden voor FKO. Ook is gekeken naar de verwachte termijn waarop de diverse opties geïmplementeerd zouden kunnen worden in de kas. De resultaten van de evaluatie zijn weergegeven in

Tabel 6.

Tabel 6a: Toepassingsmogelijkheden voor FKO buiten de kas inclusief beschouwing van voor- en nadelen.

Optie voor toepassing	Toepassing-vorm TiO ₂	Voordelen	Nadelen	Termijn tot toepassing (*)
Schermen buiten de kas	TiO ₂ film	<ul style="list-style-type: none"> • Geen interactie met de teelt • Toepasbaar naast bestaande kassen • Voor alle bedrijfstypen toepasbaar • Gemakkelijk te onderhouden (teelt zit niet in de weg) • Middels sol-gel methode kan TiO₂ geheel lichtdoorlatend worden aangebracht (enkel UV-deel wordt afgevangen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Watersysteem moet worden uitgebreid naar buiten de kas (kosten?) 	Korte termijn
Toevoegen TiO ₂ aan regenwater-bassin (bijv. gecoate plastic "ballen")	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> • interessant met oog op desinfectie regenwater en gemakkelijk af te vangen bij onttrekkingspunt 		Korte termijn
TiO ₂ film op het kasdek	TiO ₂ film	<ul style="list-style-type: none"> • Veel oppervlak beschikbaar • Lichtafvangst is beperkte (transparante film) 	<ul style="list-style-type: none"> • Water over het dak leiden betekent mogelijk extra belasting kasdek • Vraagt ingrijpende aanpassing kas (vooral geschikt voor nieuwbouw) 	Korte termijn
TiO ₂ deeltjes in dubbelwandig kasdek (Flow Deck) [27]		<ul style="list-style-type: none"> • Veel oppervlak beschikbaar • Concentratie is te sturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vraagt ingrijpende aanpassing bij bestaande bouw (vervanging kasdek) • Vooral geschikt voor nieuwbouw 	Korte tot middellange termijn
Schermen op de kas (zuidgevel, nokken etc)	TiO ₂ film	<ul style="list-style-type: none"> • geen interactie met de teelt • invloed zijgevel op teelt wordt beperkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Integratie met kasconstructie nodig • Alleen bij nieuwbouw toepasbaar • Geringe lichtinval 	Middellange termijn
Flexibel system op schermen	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> • multifunctioneel gebruik schermen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe lichtinval • alleen bij schaduw minnende teelt toepasbaar (er wordt steeds minder geschaduw) • Weinig gebruiksuren 	Middellange tot lange termijn

(*) Korte termijn: 0-2 jaar; Middellange termijn: 2-5 jaar; Lange termijn: >5 jaar

Tabel 7b: Toepassingsmogelijkheden voor FKO binnen de kas inclusief beschouwing van voor- en nadelen.

Optie voor toepassing	Toepassingvorm TiO ₂	Voordelen	Nadelen	Termijn tot toepassing (*)
Schermen in de kas	TiO ₂ film	<ul style="list-style-type: none"> Voor alle bedrijfstypen toepasbaar 	<ul style="list-style-type: none"> Ruimte voor toepassing is beperkt Mogelijke lichtafvangst 	Korte termijn
Coating van teeltvloeren	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> interessant voor opkweeksector 	<ul style="list-style-type: none"> Niet relevant voor teelt op goot 	Korte termijn
Coating van teeltgoten	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> interessant voor reguliere sector 	<ul style="list-style-type: none"> 	Korte termijn
Coating of dosering van TiO ₂ in watergift leidingen	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> interessant voor voorkomen verstoppings-problematiek 	<ul style="list-style-type: none"> Beperkt licht Effect TiO₂ op druppelaars nog niet bekend (risico verstopping) 	Korte termijn
Dosering tijdens of na UV-C ontsmetting	TiO ₂ poeder of TiO ₂ coating op deeltjes	<ul style="list-style-type: none"> Extra desinfecterende werking bovenop huidige UV 	<ul style="list-style-type: none"> Effect op huidige UV niet in detail bekend Mogelijk afvangst nodig (speelt niet bij alle geïmmobiliseerde vormen van TiO₂) 	Korte termijn
TiO ₂ verneveling	TiO ₂ poeder of TiO ₂ oplossing	<ul style="list-style-type: none"> Interessant voor orchideënteelt 	<ul style="list-style-type: none"> Nog geen ervaring beschikbaar met deze toepassing 	Middellange termijn
Lamellen	TiO ₂ poeder	<ul style="list-style-type: none"> snelle regelbaarheid van schaduw bij lichtoverschot biedt dit voordeel voor het gewas 	<ul style="list-style-type: none"> alleen bij schaduw minnende teelt toepasbaar (er wordt steeds minder geschaduw) alleen bij nieuwbouw toepasbaar 	Middellange tot lange termijn
Glasvezels voor transport licht naar FKO systeem	TiO ₂ coating	<ul style="list-style-type: none"> licht te leiden naar plek van gebruik (bijv naar druppelaar/mat met TiO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> nog niet op korte termijn beschikbaar mogelijk vrij complex qua aanleggen relatief duur 	Middellange tot lange termijn

(*) Korte termijn: 0-2 jaar; Middellange termijn: 2-5 jaar; Lange termijn: >5 jaar

Optie voor toepassing	Toepassingvorm TiO ₂	Voordelen	Nadelen	Termijn tot toepassing (*)
TiO ₂ in substraat (wat evt lichtgeleidend is)	TiO ₂ poeder	<ul style="list-style-type: none"> Lokale werking 	<ul style="list-style-type: none"> Beperkt UV-licht Verandering qua substraat ligt gevoelig in de sector (**) 	Middellange tot lange termijn
Glasvezels voor transport licht naar FKO systeem	Nvt	<ul style="list-style-type: none"> licht te leiden naar plek van gebruik (bijv naar druppelaar/mat met TiO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> nog niet op korte termijn beschikbaar mogelijk vrij complex qua aanleggen kosteneffectiviteit mogelijk een aandachtspunt 	Middellange tot lange termijn

(*) Korte termijn: 0-2 jaar; Middellange termijn: 2-5 jaar; Lange termijn: >5 jaar

(**) Overleg met substraat leveranciers wordt aanbevolen om wensen en criteria vast te stellen

4.3.2 *Beoordelingswijze*

Om experimenteel toepassingsgericht onderzoek uit te kunnen voeren is een selectie gemaakt van de twee meest perspectiefrijke concepten uit Tabel 7.

Het perspectief van de concepten is vastgesteld aan de hand van:

- Toepassingstermijn
- Randvoorwaarden voor toepassing (in overleg met begeleidingscommissie onderzoek)

De waardering voor beide aspecten worden hieronder beschreven.

4.3.2.1 *Toepassingstermijn*

Hoofddoel van het onderliggende project is om te komen tot een FKO-concept wat toegepast kan worden in de glastuinbouw. Om de actuele problemen in de glastuinbouw (zie paragraaf 1.1) op te kunnen lossen is een concept met een snelle toepassings-termijn gewenst.

4.3.2.2 *Randvoorwaarden vanuit kasopzet en ruimtebeslag*

Toepassingen in het gangpad zijn beperkt mogelijk omdat deze tijdens de teelt bruikbaar moet blijven voor personeel en apparatuur. Er moet ruimte beschikbaar blijven om de planten te kunnen draaien (bijv. bij tomaten).

Aanpassingen in huidige systeem moeten beperkt blijven met oog op de bedrijfszekerheid. Dat wil zeggen; aanpassingen aan cruciale systemen kunnen grote risico's met zich mee brengen waardoor mogelijk verliezen groter uit kunnen vallen dan de winst die wordt behaald met FKO.

4.3.2.3 *Randvoorwaarden vanuit milieu en productkwaliteit*

Er mag geen emissie van TiO_2 plaatsvinden naar het milieu.

Er mag geen TiO_2 in het product terecht komen

Voor de poeders betekent dit dat deze goed afgescheiden moeten kunnen worden uit het water. Voor de TiO_2 films en coatings geldt dat deze niet afgespoeld moeten worden door het water en dat deze een hoge bestendigheid kennen tegen krassen en vegen.

4.3.2.4 *Overige randvoorwaarden vanuit bedrijfsvoering glastuinbouw*

Als aandachtspunten zijn door de BCO aspecten genoemd als:

- Levensduur
- Onderhoud
- Investeringsruimte
- Prestatie (afbraak/desinfectie)
- Eventueel benodigde ondersteuning met kunstlicht
- Geen negatief effect op gewas

Voor deze aspecten is het lastig gebleken specifieke criteria te benoemen zodat ze als randvoorwaarden in de technologieselectie kunnen worden gebruikt. Voor de geselecteerde FKO concepten zullen deze aspecten in ieder geval worden benoemd en worden meegenomen in de technische en economische evaluatie en de discussie.

4.3.3 Selectie concepten voor laboratoriumonderzoek

Gezien de wens voor toepassing van FKO op korte termijn is ervoor gekozen om enkel naar de concepten met een korte toepassingstermijn te kijken. In Tabel 7 is beschreven hoe de diverse concepten met een korte toepassingstermijn zijn beoordeeld en welke concepten meegenomen zijn in het laboratoriumonderzoek.

Tabel 7: Beoordeling technologie concepten FKO voor de glastuinbouw

Concept	Kasopzet	Milieu	Onderdeel laboratoriumonderzoek
Schermen binnen/buiten de kas	+ (plaatsing naar wens)	+ (TiO ₂ zit vast op scherm)	Ja, als TiO ₂ op een substraat
TiO ₂ film op het kasdek	± (extra last op dakconstructie + vooral geschikt voor nieuwbouw)	+ (TiO ₂ zit vast op kasdek)	Nee, aangezien toepassing op bestaande kassen lastiger is. Dit is wel een interessante optie voor nieuwbouw
Coating teeltvloeren	+ (neemt geen extra ruimte in beslag)	+ (TiO ₂ coating hecht aan de vloer)	Ja (als praktijkproef) (*)
Coating teeltgoot	+ (neemt geen extra ruimte in beslag)	+ (TiO ₂ coating hecht aan de goot)	Ja (als praktijkproef) (*)
Coating of dosering van TiO ₂ in watergiftleidingen	- (aanpassing in cruciaal systeem)	± (niet zeker of vrijkomen van TiO ₂ kan worden voorkomen)	Nee, gezien het feit dat ingegrepen wordt in een cruciaal systeem en het lastig kan zijn om vrijkomen te voorkomen
Dosering in of na UV-C	± (effect op werking UV-C onbekend)	± (afscheiden TiO ₂ deeltjes uit grote drainwaterstroom kan lastig zijn (**))	Nee, aangezien het drainwater veel deeltjes bevat. Afscheiding van enkel het TiO ₂ is dan vrijwel onmogelijk. Enkel mogelijk als TiO ₂ in het water aanwezig mag blijven.
Toevoeging TiO ₂ aan regenwaterbassin	+ (geen extra ruimte verbruik)	+ (centraal aftappunt maakt afscheiding makkelijk)	Ja, in de vorm van TiO ₂ poeders en als gecoate glaspereels

(*) Er is gekozen om dit als praktijkproef (= op locatie) uit te voeren. Dit laat direct de effecten zien in de glastuinbouw. De teeltvloer is getest in de experimenten van WUR Glastuinbouw aangezien deze over de middelen en expertise beschikt voor proeven met micro-organismen.

(**) de overige concepten zijn bedoeld voor TiO₂ dat op een oppervlak zit of voor een schone waterstroom van beperkte omvang (regenwater input). Drainwater heeft een relatief groot volume en bevat vele andere stoffen en deeltjes, waardoor FKO behandeling moeilijker wordt.

5 Technische evaluatie: Onderzoek prestatie katalysatoren

5.1 Inleiding

In het onderstaande hoofdstuk worden de aanpak en de resultaten van het uitgevoerde laboratoriumonderzoek naar de werking en effectiviteit van FKO bij TNO en WUR Glastuinbouw besproken.

Er wordt gestart met een nadere beschrijving de gebruikte materialen en methoden. Vervolgens worden de resultaten van de kinetiek proeven met de gebruikte Reactive Blue (reactieve kleurstof voor de textielindustrie) in demi-water beschreven. Vervolgens worden de effecten bij gebruik van een standaard watermodel (nutriëntenoplossing o.b.v. tuinbouw recepten), praktijk drainwater en veranderingen in lichtintensiteit beschreven.

5.2 Materialen en methoden

5.2.1 Toegepaste lampen

Tijdens de proeven bij TNO en WUR is gebruik gemaakt van Philips CLEO Compact PL-L UV-A lampen met een vermogen van 36W. Deze lampen hebben een breed spectrum rond 350 nm. De lampen zijn zo aangesloten dat ze gedimd konden worden om zo de UV intensiteit te kunnen variëren.

De lampen hebben voorafgaan aan het eerste gebruik eerst 7 dagen continu aangestaan. Op deze manier worden de lampen versneld verouderd en zal de prestatie beter overeenkomen met de prestatie die het zal laten zien bij langdurige toepassing in de praktijk.

Voorafgaand aan elke proef zijn de lampen eerst 15 minuten aangezet om de lampen op te warmen zodat de prestatie tijdens de proef gelijk blijft.

Meer informatie over de lampen en de gebruikte armaturen is te vinden in Bijlage II.

5.2.2 Toegepaste modelstof

Tijdens de proeven is gebruik gemaakt van de Reactive Blue als modelstof. Voordelen van het gebruik van Reactive Blue zijn onder andere het betrouwbare afbraakgedrag en het feit dat het reeds bij eerder TNO-onderzoek is toegepast. Hierdoor kunnen de proeven relatief snel uitgevoerd worden en kan een goede vergelijking gemaakt met andere proeven, met eerder onderzoek en met de resultaten uit literatuuronderzoek.

Tijdens het laboratoriumonderzoek is voor alle proeven een Reactive Blue concentratie van 25 mg/l toegepast.

Meer informatie over Reactive Blue is te vinden in Bijlage III.

5.2.3 Toegepaste typen en toepassingsvormen TiO₂

Uit de beoordeling en selectie van technologie-concepten in hoofdstuk 4 kwam naar voren dat TiO₂ poeders, films en coatings het meest perspectiefrijk zijn voor toepassing in de glastuinbouw op korte termijn. Deze toepassingsvormen zijn verder onderzocht in het laboratorium met oog op het beantwoorden van de in paragraaf 1.5 benoemde kennisvragen.

Er is gestart met het inventariseren van de commercieel beschikbare typen TiO₂. Hiervoor is gekozen omdat een goede beschikbaarheid benodigd is voor (een brede) toepassing van TiO₂ in de glastuinbouw. Gedoteerde vormen van TiO₂ om een groter deel van daglichtspectrum te benutten, zijn wel ontwikkeld, maar worden (nog) niet commercieel toegepast.

Er is ook gekeken naar geschikte en goed beschikbare substraten waarop TiO₂ aangebracht kan worden.

Tabel 8 geeft de resultaten weer van de inventarisatie en laat zien welke typen en toepassingsvormen van TiO₂ getest zijn tijdens het laboratoriumonderzoek. In bijlage IV is meer informatie te vinden over de eigenschappen van de geteste typen en toepassingsvormen van TiO₂.

Tabel 8: Geteste typen en toepassingsvormen TiO₂

Type/Toepassingvorm	Poeder	Film (dunne laag op substraat) (**)	Overig	Coating
Aeroxide P25	X	X		
Aeroxide P90	X			
Kronos 7050	X			
Hombikat	X			
ZnO (*)	X			
Pretiox PB60	X			
Titanprotect				X
Glasparels (obv P25)			X	

(*) ZnO is een fotokatalytische metaaloxide die als alternatief voor TiO₂ kan worden gebruikt. Deze stof wordt ook regelmatig toegepast voor FKO onderzoek en is meegenomen om te zien hoe te zien hoe het presteert t.o.v. TiO₂.

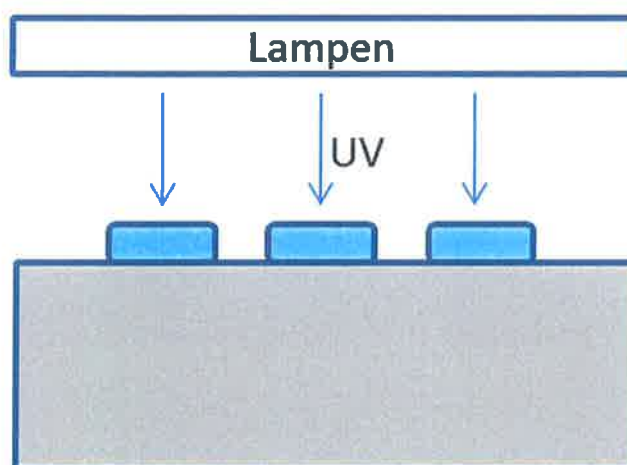
(**) Voor het maken van TiO₂ films zijn verschillende methodes beschikbaar. In Tabel 9 wordt een aantal veel gebruikte methoden beschreven en wordt beschreven welke methode is toegepast tijdens deze studie.

Tabel 9: Preparatie methodes voor TiO₂ films

Preparatie methode	Omschrijving	Voor- en nadelen	Getest tijdens deze studie
Dipcoating	Langzaam onderdompelen en onttrekken van het substraat uit een suspensie van TiO ₂	+ Makkelijk uitvoerbaar - Zwakke hechting; prestatie soms minder dan van sol-gel en plasma methode	Ja
Plasma oxidatie	Elektrochemische oppervlakte behandeling o.b.v. hoge voltages	+ goede binding met onderlaag (betere mechanische binding) - hoge voltages en expertise benodigd	Nee
Sol-gel methoden	Vormen van deeltjes uit een gel van oplosmiddel en micro-deeltjes	+ lagen met hoge dichtheid en goede hechting - vereist tijd en expertise	Nee

5.2.4 Opstelling voor testen poeders + proefaanpak

Voor het testen van de TiO₂ poeders en de gecoate glaspapels is gebruikt gemaakt van een multi-roerplaat. Op deze roerplaat worden tot maximaal 10 petrischaaltjes met hierin de TiO₂ oplossing en Reactive Blue geplaatst. Elke schaalte wordt met een behulp van een roervlo geroerd om alle delen goed te belichten en eventuele uitzakking van het poeder te voorkomen.



Figuur 10: Schematische weergave opstelling voor testen poeders

Het formaat van de lampen en multiroerplaat zijn zo gekozen dat de monsters volledig belicht worden. Tijdens de proeven is steeds gemeten welke UV-intensiteit de verschillende schaaltes ontvangen.

Tijdens de proeven worden in de tijd verschillende monsters genomen uit de petrischalen om de afbraak in Reactive Blue vast te kunnen stellen (=kinetiek).

In Tabel 10 zijn de standaard condities en aanpak voor de proeven met de TiO₂ poeders weergegeven. Wanneer afgeweken is van deze waarden wordt dit nadrukkelijk benoemd.

Tabel 10: Standaard condities en aanpak voor proeven met poeders

Aspect	Waarde	Opmerkingen
Concentratie TiO ₂	1 gr/l	Hoge waarde, om beschikbare UV maximaal te benutten
Concentratie Reactive Blue (Reactive Blue)	25 mg/l	
Volume in petrischaal	35 ml	
Diameter petrischaal	0,096 m	
Wijze van behandeling	Batch	
Lichtintensiteit	12-18 W/m ²	Intensiteit bij 2 CLEO lampen, aangestuurd op 10 V
Monstername	0, 5, 10, 20 en 40 minuten	
Analyse Reactive Blue afbraak	Spectrofotometer (Hach Lange DR 5000)	Meting bij 360 nm

5.2.5 Opstelling voor testen films/coatings + proefaanpak

Tijdens het onderzoek zijn de TiO₂ films/coatings aangebracht op borosilicaat glasplaatjes van 11*11 cm. De preparatie van de films/coatings staat beschreven in Bijlage V. Informatie over de gebruikte typen TiO₂/coatings is te vinden in Bijlage IV.

Voor het testen van de glasplaatjes is door Altop Kunststoftechniek een opstelling gemaakt waarin het glasplaatje kan worden vastgeklemd. Voor toediening van de te behandelen vloeistof is een siliconenslang gebruikt die met een scalpel is ingesneden. Vervolgens is het ingesneden stuk omwikkeld met gaas om er voor te zorgen voor een goede verdeling van het water over de breedte van het glasplaatje. Het water wordt onderaan opgevangen in een voorraadbak en vervolgens weer teruggepompt naar de bovenzijde. Op deze wijze wordt er continu te behandelen oplossing over de TiO₂ film gecirculeerd. De toevoer wordt geregeld met een slangenpomp.

Tijdens het onderzoek is een vloeistofdebiet van 15 liter/minuut toegepast. Deze waarde is gebaseerd op eerder TNO-onderzoek.

Tijdens de proeven zijn monsters genomen uit de voorraad bak. Hiernaast is steeds bepaald welke UV-intensiteit het plaatje netto ontvangt.

Een foto van de opstelling is weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Opstelling voor testen films/coatings

In Tabel 11 zijn de standaard condities en aanpak voor de proeven met de TiO₂ films weergegeven. Wanneer afgeweken is van deze waarden wordt dit nadrukkelijk benoemd.

Tabel 11: Standaard condities en aanpak voor proeven met recirculatie opstelling

Aspect	Waarde	Opmerkingen
Concentratie TiO ₂	1 gr/l	
Concentratie Reactive Blue (Reactive Blue)	25 mg/l	
Volume in opstelling	1 liter	
Oppervlak gecoate glasplaat	0,012 m ²	11*11 cm
Wijze van behandeling	Continue recirculatie	
Lichtintensiteit	7-8 W/m ²	Intensiteit bij 2 CLEO lampen, aangestuurd op 10 V
Monstername	0, 5, 10, 20 en 40 minuten	
Analyse Reactive Blue afbraak	Spectrofotometer	

5.2.6 Opstelling teelttafelproef + proefaanpak

Tijdens de teelttafelproef is gebruik gemaakt van een tafel waarop diverse teeltbakken konden worden geplaatst. In de teeltbakken zijn PVC-vellen gelegd welke voorzien zijn van een TiO₂ coating (TitanProtect TA2202). Er is voor inlegvellen gekozen aangezien de polypropyleen teeltbakken niet gecoat konden worden vanwege de te lage oppervlaktespanning van het kunststof.

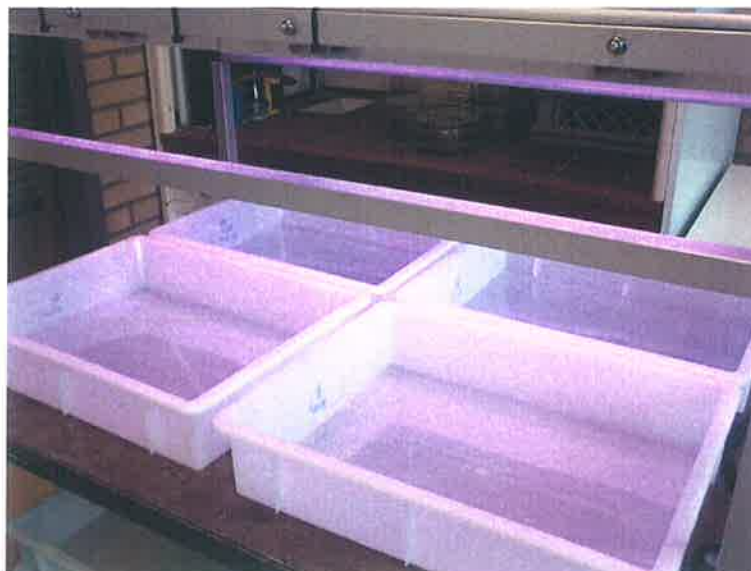
Tijdens de proeven is 1 cm demi-water opgezet in de bakken. Er is geen gebruik gemaakt van mengen. Enkel voorafgaand aan monstername zijn de bakken licht geschud zodat de concentraties overal gelijk zijn.

De bakken zijn gevuld met een oplossing met hierin de *Agrobacterium Rhizogenes*, de streefconcentratie hiervoor is 10⁶ CFU/ml. Doel van de hoge concentratie is om de achtergrond verwaarloosbaar te maken. Aangezien het water geen voeding bevat wordt verwacht dat de groei van de bacteriën tijdens de proeven beperkt zal blijven. Na de proef worden de monsters uitgeplaat op een *Agrobacterium Rhizogenes* specifiek medium.

Bij de teelttafelproef, uitgevoerd door WUR Glastuinbouw in Bleiswijk, is hetzelfde type lampen gebruikt als toegepast in het laboratoriumonderzoek bij TNO.



Figuur 12: Teelttafelproef opstelling



Figuur 13: Teelttafel opstelling in gebruik

5.2.7 *Meting UV-intensiteit*

De UV-intensiteit is gemeten met behulp van een zogenaamde UV-A meter. Meer informatie over de toegepaste UV-A meter is te vinden in bijlage VI.

5.2.8 *Monstername + analyse*

Tijdens de proeven zijn met behulp van een spuit monsters genomen. Hierbij is gebruik gemaakt van een 0.45 µm filter om de deeltjes tegen te houden. Dit is gedaan om verstoring van de meting in de spectrofotometer door de deeltjes te voorkomen.

Bij de berekeningen van quantum yield en afbraaksnelheid is rekening gehouden met de, door de monstername veroorzaakte, afname in volume van de behandelde oplossing.

De hoeveelheid Reactive Blue is vastgesteld door de monsters te meten in de spectrofotometer. Aan de hand van de gemeten lichtabsorptie en de ijklijn kon hieruit de concentratie Reactive Blue worden bepaald. De hoeveelheid geadsorbeerde Reactive Blue is bepaald aan de hand van adsorptie-isothermen.

5.3 **Toegepaste lichtintensiteit**

Het merendeel van de proeven is uitgevoerd bij een intensiteit van 10 W/m². Deze waarde is hoger dan de gemiddelde waarde van 6 W/m² buiten de kas en 1,5-3 W/m² in de kas. De gekozen intensiteit komt overeen met een zonnige zomerdag.

Er is voor deze hogere intensiteit gekozen om de benodigde looptijd van de proeven te verkorten en om een goede vergelijking met eerder uitgevoerd onderzoek door TNO mogelijk te maken.

In de praktijk zal de lichtintensiteit vaak lager liggen en zal deze in de winterperiode factoren lager zijn. Om vast te stellen welke prestatie FKO kent bij deze omstandigheden is een aantal proeven bij een (sterk) verlaagde lichtintensiteit (0,1-0,2 W/m²) uitgevoerd, zie paragraaf 5.6.

5.4 **Kinetiek voor afbraak modelstof**

5.4.1 *Inleiding*

Een van de hoofddoelen van het experimenteel onderzoek is om vast te stellen hoe snel de modelstof afgebroken wordt om zo later het effect van verandering van parameters op de afbraak van de Reactive Blue te kunnen vaststellen. De afbraaksnelheid en quantum yield bij de standaardcondities (10-15 W/m², 25 mg/l Reactive Blue en 1 g/l TiO₂) zijn vastgesteld door middel van kinetiekproeven. Bij deze proeven is de oplossing van Reactive Blue en TiO₂ aan UV blootgesteld en zijn in de tijd monsters genomen om de afbraak van Reactive Blue te bepalen.

De afbraak van het totaal aan Reactive Blue (opgelost en geadsorbeerd) is bepaald aan de hand van de in paragraaf 5.2.8 beschreven methode. De bepaling van de donker adsorptie isothermen wordt beschreven in paragraaf 5.4.2.

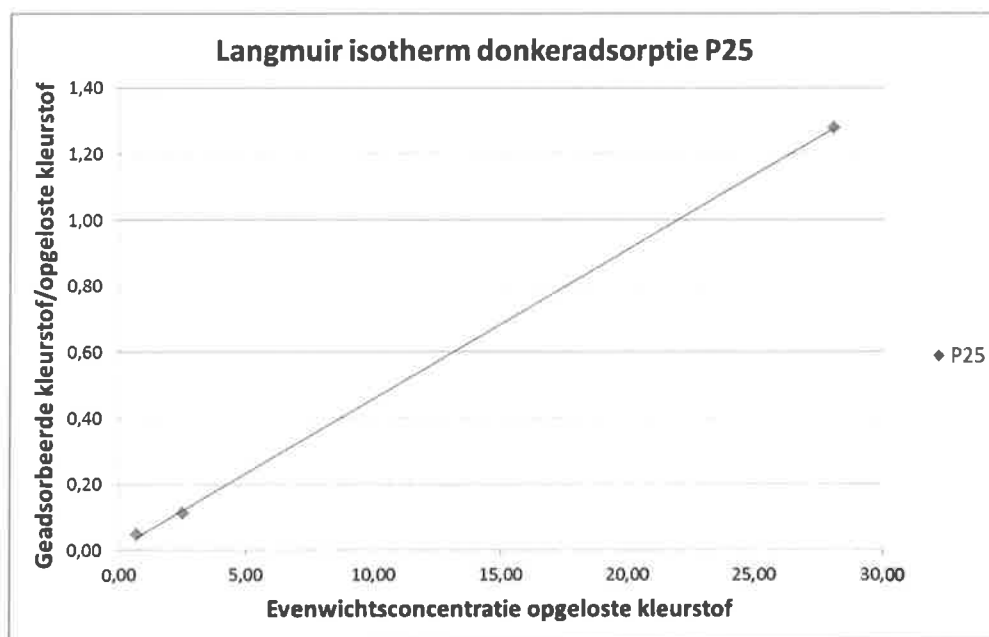
De resultaten van de kinetiek proeven worden hieronder in hoofdlijnen besproken.

5.4.2 Donker adsorptie proeven

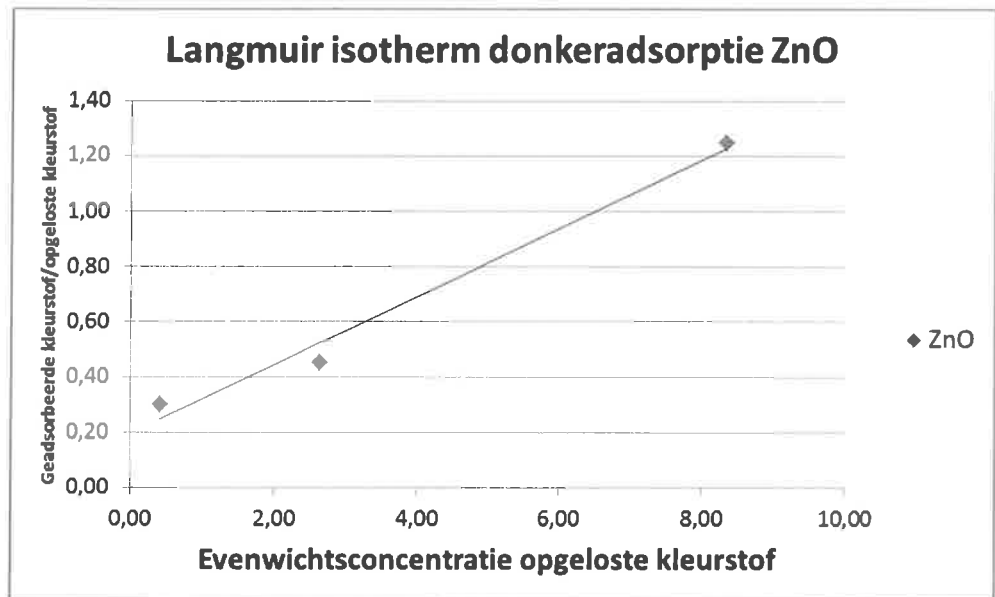
Zoals beschreven in paragraaf 2.1 vinden tijdens behandeling met TiO_2 twee processen plaats: adsorptie en afbraak. De gebruikte meetmethode (spectrofotometer) meet enkel de opgeloste Reactive Blue. Om te bepalen hoeveel Reactive Blue aan het TiO_2 geadsorbeerd is bij verschillende concentraties opgeloste Reactive Blue zijn donkeradsorptie proeven uitgevoerd. Er is eerst een aantal proeven uitgevoerd om te bepalen na hoeveel minuten het adsorptie-evenwicht wordt bereikt voor de verschillende poeders. Deze serie proeven liet zien dat de duur tot evenwicht verschilt en dat 20 minuten voldoende tijd is voor alle poeders om dit punt te bereiken.

Hierna zijn proeven uitgevoerd om de relatie tussen donker adsorptie en de concentratie opgeloste Reactive Blue te bepalen. Deze relaties zijn bepaald door middel van een trendlijn door de meetpunten, hiermee wordt een adsorptie-isotherm verkregen. Bij de donker adsorptie proeven zijn verschillende concentraties opgeloste Reactive Blue onder donker condities in contact gebracht met TiO_2 (1 g/l). Na 20 minuten is de hoeveelheid opgeloste Reactive Blue bepaald. Uit het verschil met de startconcentratie kan de hoeveelheid aan het TiO_2 geadsorbeerde Reactive Blue worden bepaald.

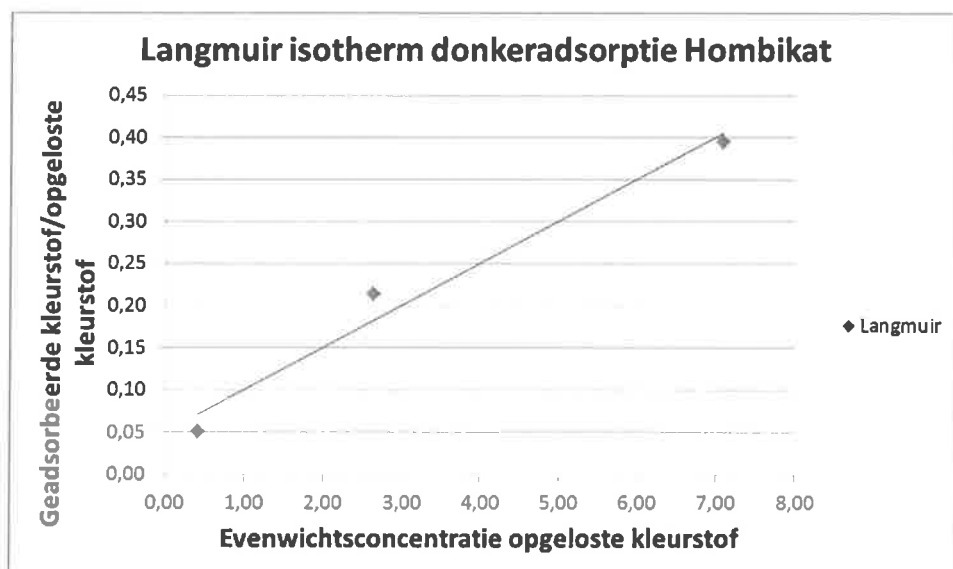
In de onderstaande figuren zijn ter illustratie voor een drietal poeders de adsorptie isothermen weergegeven.



Figuur 14: Donker adsorptie isotherm voor P25



Figuur 15: Donker adsorptie isotherm voor ZnO (1 g/l)



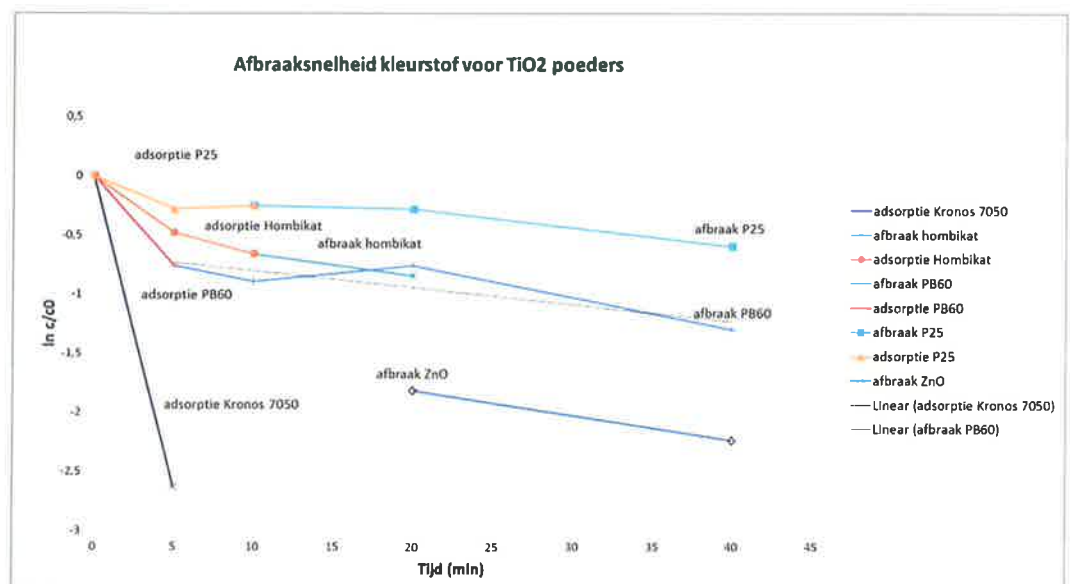
Figuur 16: Donker adsorptie isotherm voor Hombikat

Uit de adsorptie isothermen komt duidelijk naar voren dat de Reactive Blue adsorptie aan het TiO₂ sterk verschilt per type poeder. ZnO en Kronos 7050 laten de sterkste adsorptie zien (> 75% geadsorbeerd bij 25 mg/l Reactive Blue). Hombikat, P25, P90 en PB60 vertonen een adsorptie die significant lager ligt, maar nog steeds groot (>50% geadsorbeerd). Deze resultaten laten zien dat adsorptie van Reactive Blue aan het TiO₂ groot blijkt te zijn bij 1 g/l en nadrukkelijk meegenomen moet worden bij de interpretatie van resultaten.

5.4.3 Reactiesnelheid poeders met en zonder voorbelading

Om de reactiesnelheid van afbraak te bepalen zijn kinetiek-proeven met UV-A licht uitgevoerd waarbij monsters in de tijd zijn genomen. Bij het merendeel van de proeven is direct gestart met UV-A behandeling. Dit betekent dat het TiO₂ poeder bij de start van de proef nog vrij is van Reactive Blue en dat adsorptie evenwicht tijdens de proef wordt bereikt. Bij de interpretatie van de resultaten moeten, zoals beschreven in de vorige paragraaf, adsorptie en afbraak worden onderscheiden. Dit onderscheid is bewerkstelligd met behulp van de tijden tot adsorptie-evenwicht die in de donkerproeven zijn bepaald. Er wordt aangenomen dat tot het bereiken van het adsorptie-evenwicht donkeradsorptie dominant is. Na het bereiken van evenwicht zal naar verwachting voornamelijk afbraak plaatsvinden. Voor beide perioden (adsorptie/afbraak) kan vervolgens een trendlijn worden bepaald.

De resultaten van de kinetiek proeven zonder voorbelading zijn weergegeven in Figuur 17. In de grafiek is de concentratie gedeeld door de startconcentratie uitgezet tegen de tijd (= afname ten opzichte van initiële concentratie). Het concentratie-ratio is logaritmisches uitgezet omdat zo de snelheidsconstanten direct uit de helling van de trendlijn volgen.



Figuur 17: Afbraaksnelheid Reactive Blue voor de TiO₂ poeders (lijnen zijn ter illustratie ; voor ZnO en Kronos 7050 konden respectievelijk geen goed adsorptie/afbraak verloop bepaald worden)

De afbraaksnelheden voor de poeders zijn ook weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12: Afbraaksnelheden Reactive Blue met gesuspendeerde poeders

Poeder	Adsorptiesnelheid (1/min)	Afbraaksnelheid (1/min)	Opmerkingen
P25	0,0298	0,0093	
Hombikat	0,0662	0,0183	
PB60	0,1524	0,0142	
ZnO	Niet te bepalen	0,0209	
Kronos 7050	0,5258	Niet te bepalen	Naar verwachting met name adsorptie en geen afbraak

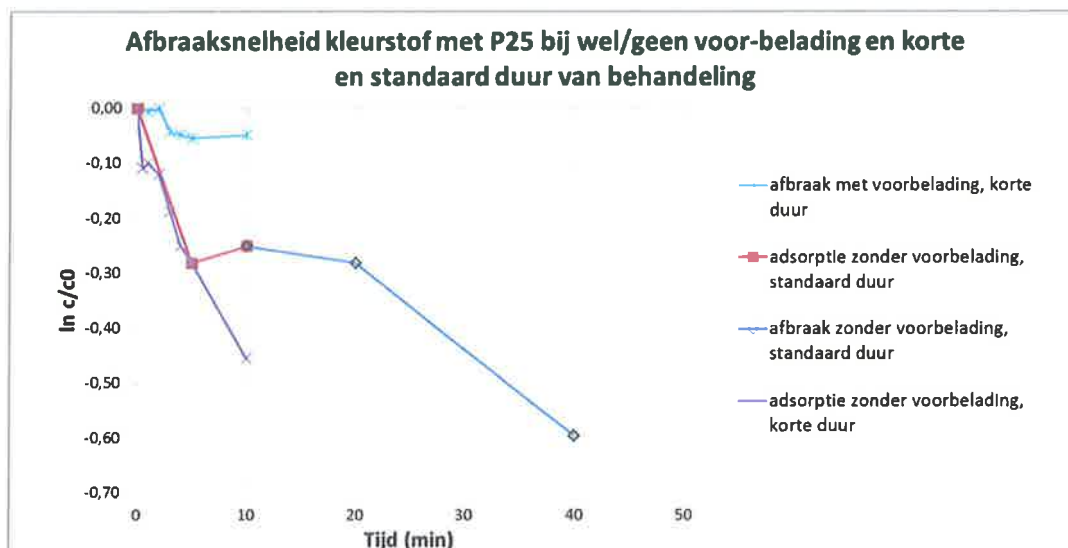
Uit Figuur 17 en Tabel 12 blijkt dat P25, PB60, Hombikat en ZnO allen een vergelijkbare afbraaksnelheid hebben. Kronos 7050 laat een zeer sterke adsorptie zien.

De resultaten laten zien dat, zoals eerder beschreven, donkeradsorptie een belangrijke bijdrage levert aan de verwijdering van Reactive Blue. Ook is de snelheid van donkeradsorptie in het algemeen veel hoger dan de afbraaksnelheid na het bereiken van adsorptie-evenwicht. Het TiO₂ poeder is na 5 à 10 minuten in evenwicht met Reactive Blue. Voor de snelheid van afbraak (waarvoor geadsorbeerde stoffen nodig zijn) kan desorptie van de afbraakproducten dan bepalend worden. Deze hypothese is getest door een aantal aanvullende proeven uit te voeren met P25 waarbij het poeder wel of niet werd voorbeladen met Reactive Blue. Voorbelading is bereikt door het poeder 20 minuten aan de Reactive Blue bloot te stellen onder donker-condities.

In Figuur 18 is het verloop van de afbraaksnelheid in de tijd weergegeven voor P25 nadat er wel/geen voorbelading is toegepast bij twee korte duurproeven en 1 proef met de standaard duur. De resultaten laten zien dat voor-belading leidt tot een significant lagere afbraaksnelheid in de eerste 10 minuten. Er wordt verwacht dat de volledig verzadiging van het oppervlak er voor zorgt dat het UV-A licht het TiO₂ niet goed kan bereiken. Er zal dus eerst afbraak en/of desorptie van een deel van de kleurstof plaats moeten vinden. Hierna zal naar verloop van tijd het gebruikelijke evenwicht tussen adsorptie en afbraak bereikt worden.

De resultaten laten ook zien dat adsorptie een belangrijk onderdeel van het FKO proces is. Eenzelfde effect wordt voor de andere poeders verwacht.

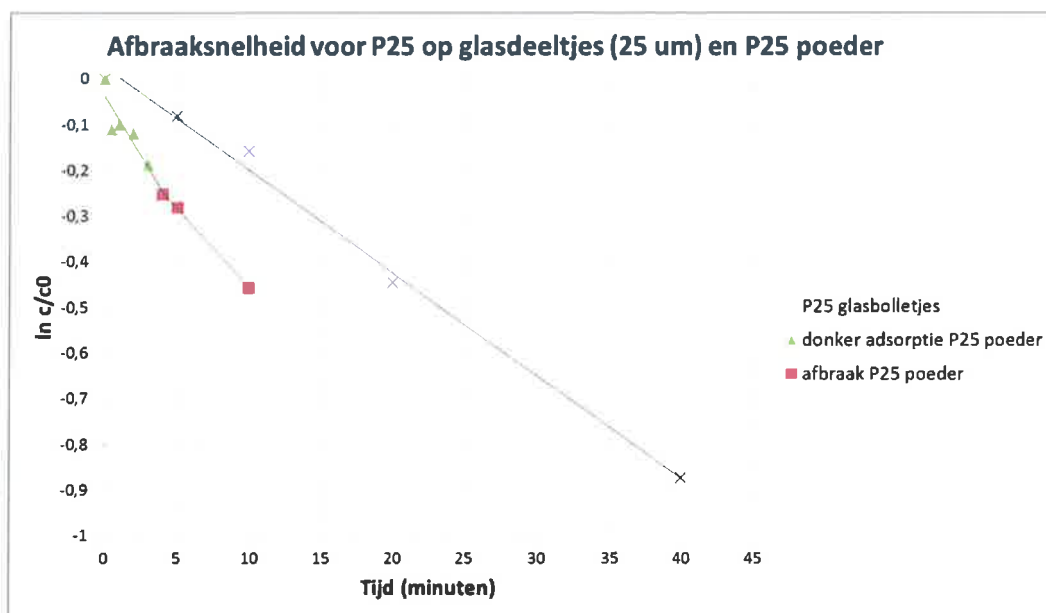
Belangrijkste conclusie die volgt uit deze resultaten is dat voor de evaluatie van de praktijktoepassing uitgegaan moet worden van de snelheden die gevonden worden zodra afbraak dominant wordt.



Figuur 18: Afbraaksnelheid voor P25 en effect van wel/geen voorbelading

5.4.4 Reactiesnelheid glaspereis

Tijdens het onderzoek is ook P25 getest dat geïmmobiliseerd is op glaspereis van 25 μm . Voordeel van de toepassing van deze "gecoate" glaspereis is dat ze door hun grootte aanzienlijk makkelijker af te scheiden zijn dan los poeder³. In Figuur 19 is de afbraaksnelheid voor de glaspereis weergegeven. Ter vergelijking zijn ook de resultaten voor P25 poeder weergegeven.



Figuur 19: Afbraaksnelheid Reactive Blue voor glaspereis met P25 coating

³ P25 poeder bestaat uit kleine vlokjes van enkele micrometers, gevormd door primaire deeltjes van ca. 20 nm.

Figuur 19 laat zien dat de afbraaksnelheid voor de gecoate glasparels circa 30% lager ligt dan voor het P25 poeder. Verder is te zien dat donkeradsorptie bij de glasparels geen grote rol lijkt te spelen. Dit wordt veroorzaakt door het kleinere oppervlak en komt redelijk overeen met de voorspelling door de adsorptie-isothermen van P25 (kleinere TiO_2 massa kan minder Reactive Blue binden).

5.4.5 *Reactiesnelheid TiO_2 films/coatings*

5.4.5.1 *Inleiding*

Na het testen van de poeders en de gecoate glasparels is gestart met het testen van TiO_2 films en coatings. Hierbij zijn glasplaatjes gecoat met een TiO_2 film of met de TitanProtect coating.

Voor de TiO_2 film is gebruik gemaakt van P25. Hiervoor is gekozen omdat de verschillende poeders (Kronos 7050 uitgezonderd) een vergelijkbare prestatie lieten zien en omdat de literatuur en eerder onderzoek de meeste kennis/ervaring biedt met betrekking tot P25. Tevens is P25 relatief goedkoop in bulk te verkrijgen.

De uitgevoerde proeven waren gericht op het bepalen van de afbraaksnelheid van Reactive Blue in demiwater, het mogelijke effect van adsorptie, het effect van standaardwater en de reinigbaarheid van de film.

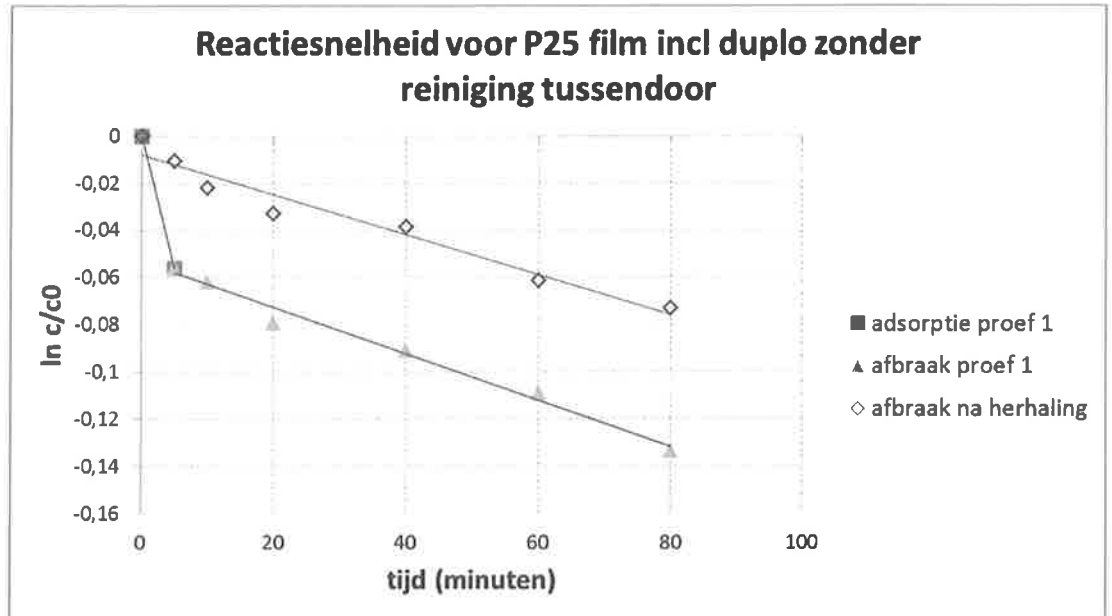
Tijdens de proeven met de films en coatings is gebruik gemaakt van de recirculatie opstelling, zoals beschreven in paragraaf 5.2.5.

5.4.5.2 *Prestatie TiO_2 film o.b.v. demiwater + Reactive Blue*

De afbraaksnelheid van Reactive blue door de film is vastgesteld door de Reactive Blueoplossing over de TiO_2 film te recirculeren en de afname in Reactive Blue in de tijd te bepalen.

Tijdens deze proevenserie is ook getest welke reactiesnelheid gevonden wordt als een proef uitgevoerd wordt met een film die reeds voor een eerdere proef gebruik is en niet gereinigd is. De film is als het ware voor-vervuild. In Figuur 20 zijn de resultaten voor een set van twee proeven weergegeven.

De resultaten laten duidelijk zien dat de reactiesnelheid bij de duplo gelijk is aan de reactiesnelheid die gevonden wordt bij de eerste proef. De prestatie gaat verder op het niveau waar het gebleven was. Er is ook te zien dat bij een schone film er de eerste 5 minuten een aanzienlijke hogere snelheid gevonden wordt als gevolg van donkeradsorptie. Nadat de film verzadigd is vindt vooral afbraak plaats. Bij de duplo is de films reeds verzadigd en wordt geen adsorptie meer waargenomen.



Figuur 20: Afbraaksnelheid Reactive Blue voor P25 film bij een proef met een schone film en na herhaling zonder reiniging

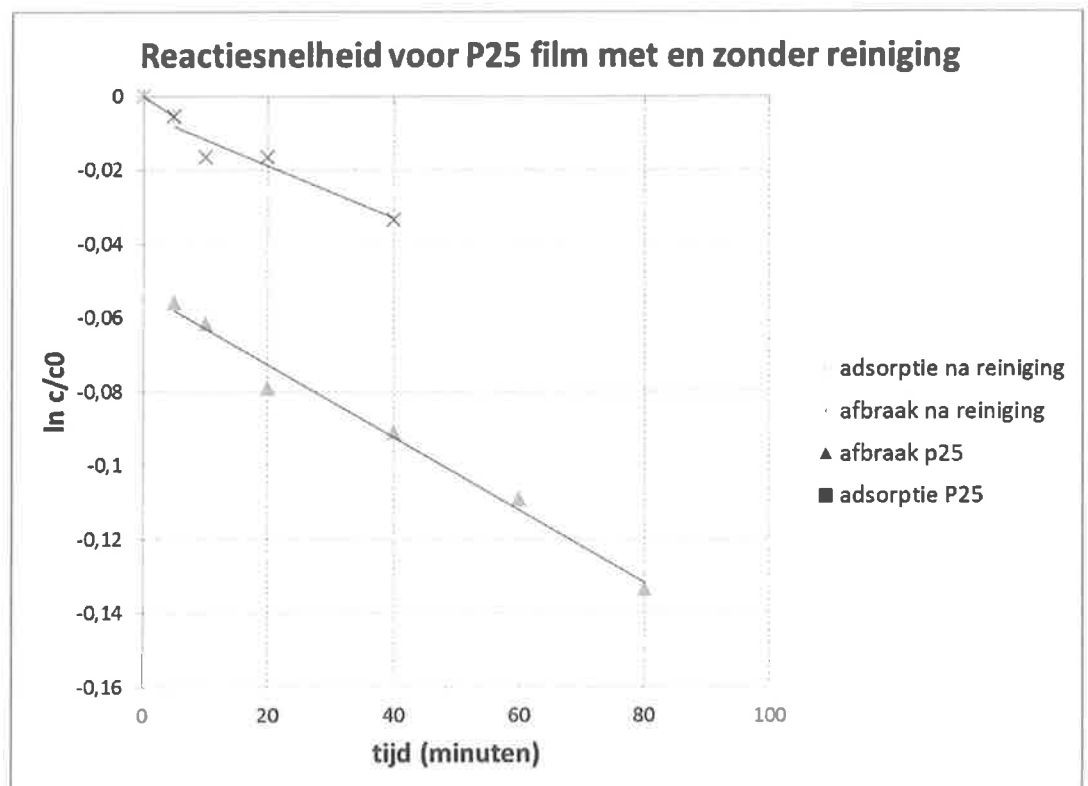
Een vergelijking van de afbraaksnelheid voor de P25 film met het P25 poeder laat zien dat de film circa 12x langzamer is. Op basis van de verhouding tussen volume, aangestraald water oppervlak en lichtintensiteit voor beide opstellingen werd echter verwacht dat de film circa 16x langzamer is.

Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de afbraaksnelheid voor Reactive Blue door de film gelijk of licht hoger is dan voor de poeders.

5.4.5.3 Reiniging van de film

Tijdens de proeven met de films is reiniging van de film getest door tussen twee proeven gedurende 2 uur enkel demiwater te recirculeren bij blootstelling aan UV-A licht. De gedachte hierachter is dat eventuele aanwezige Reactive Blue op de film wordt afgebroken onder invloed van het UV-A licht. Na de reiniging is de proef herhaald om het effect van reiniging te bepalen.

De resultaten van een reinigings-proef zijn weergegeven in Figuur 21.

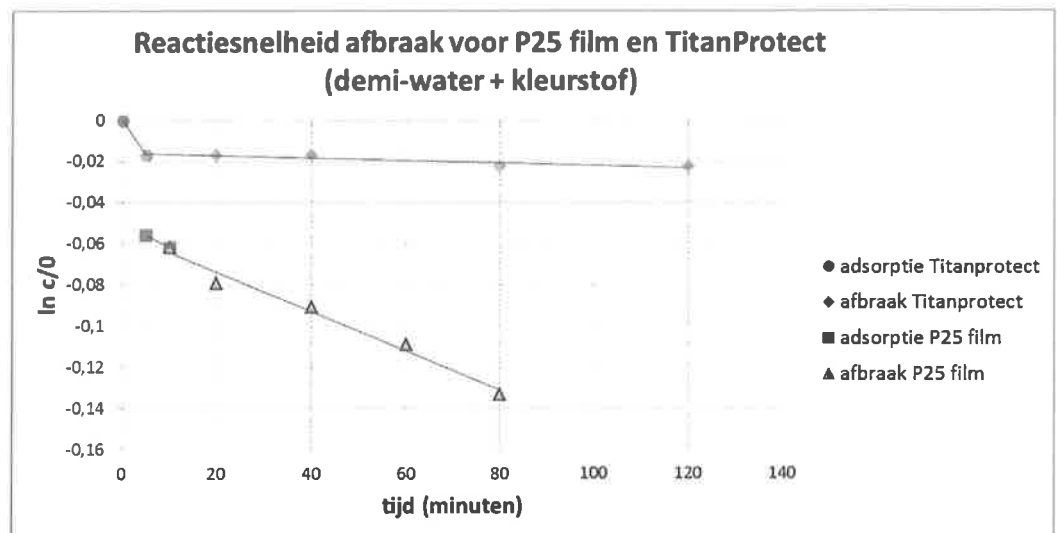


Figuur 21: Effect van reiniging op de afbraaksnelheid van Reactive Blue door de P25 film

De resultaten laten zien dat de afbraaksnelheid voor en na reiniging vrijwel gelijk zijn. De donkeradsorptie na reiniging is beperkt of afwezig wat betekent dat het oppervlak nog steeds in sterke mate verzadigd is.

5.4.5.4 Resultaten met TitanProtect

In Figuur 22 zijn de resultaten voor de afbraak van Reactive Blue met de TitanProtect coating weergegeven. Ter vergelijking zijn resultaten met de P25 film ook weergegeven.



Figuur 22: Afbraaksnelheid Reactive Blue voor de TitanProtect coating

De resultaten laten zien dat de afbraaksnelheid voor Titanprotect aanzienlijk lager ligt. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de lage hoeveelheid werkzame stof in de TitanProtect coating (ca. 0,85%).

5.5 Effect standaardwater en praktijkwater op werking FKO

5.5.1 Poeders

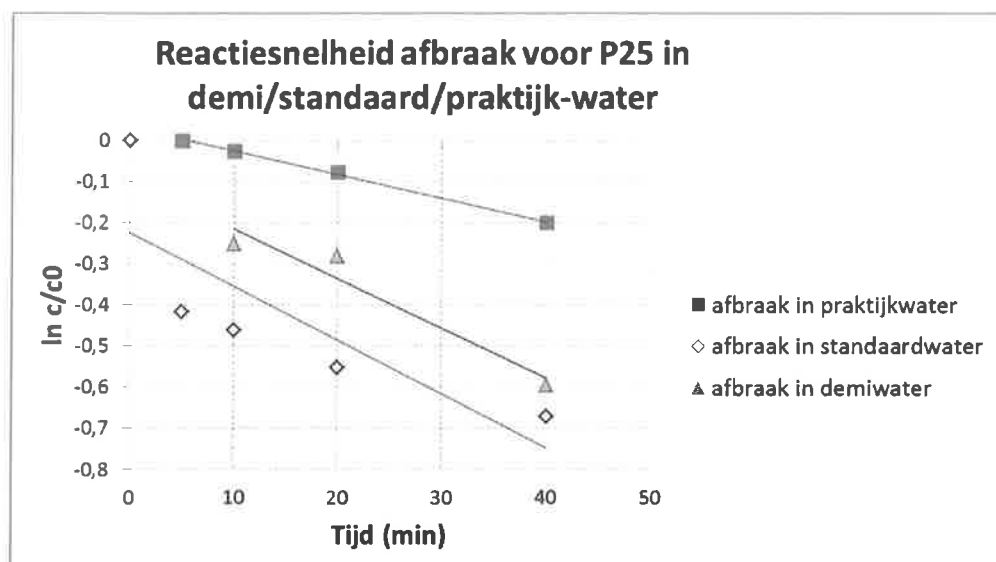
De in de voorgaande paragraaf beschreven experimenten zijn allen uitgevoerd met gedemineraliseerd water. In de praktijk zal het water nutriënten, sporelementen en wisselende concentraties aan vervuiling bevatten. Deze componenten kunnen een deel van de UV-A straling wegvangen en/of concurreren met de af te breken stoffen met betrekking tot adsorptie aan het TiO₂.

Om het effect van de nutriënten en sporelementen op de werking van FKO te testen is gebruikt van een model glastuinbouw water ("standaard water") welke enkel nutriënten en sporelementen bevat. Het effect van de mix van nutriënten en vervuiling is getest met behulp van water uit een glastuinbouwbedrijf, dit wordt in dit rapport praktijkwater genoemd. De samenstelling van het standaardwater en praktijkwater is weergegeven in Tabel 13.

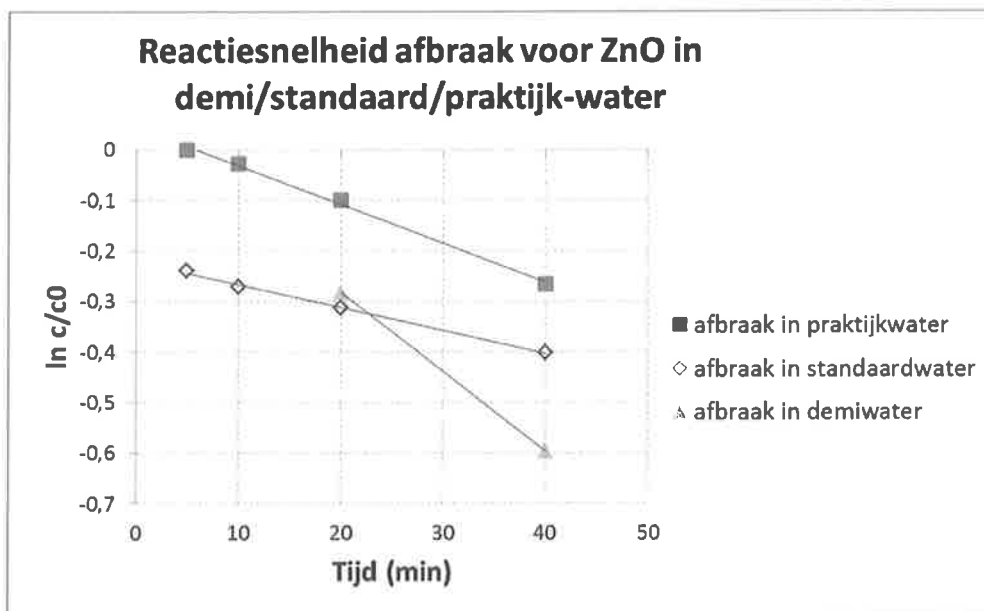
Tabel 13: Samenstelling toegepaste standaardwater (demiwater + modelrecept nutriënten) en praktijkwater

Component	pH	EC	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻
Eenheid	(-)	mS/cm	[mmol/l]										
Standaardwater	5,4	2,2	-	6,5	5,0	7	3,5	-	14,0	4,5	6,0	1,0	0,25
Praktijkwater	6,5	2,4	3,5	2,5	2,5	3,5	2,0	0,5	6,5	2,0	2,0	1,5	5,0

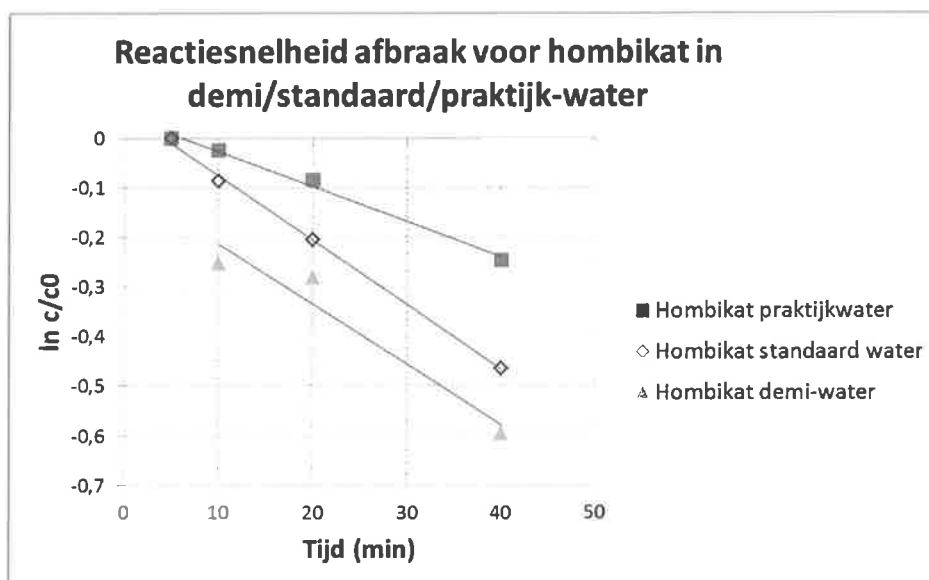
Figuur 23, Figuur 24 en Figuur 25 laten het effect van standaardwater en praktijkwater op de afbraaksnelheid van Reactive Blue zien voor respectievelijk P25, ZnO en Hombikat poeder. Voor het standaardwater en praktijkwater kon geen onderscheid gemaakt worden tussen donkeradsorptie en afbraak, om deze reden zijn enkel de gemeten verwijderingen weergegeven.



Figuur 23: afbraaksnelheid Reactive Blue in demi-, standaard- of praktijkwater voor P25 poeder



Figuur 24: afbraaksnelheid Reactive Blue in demi-, standaard- of praktijkwater voor ZnO poeder



Figuur 25: afbraaksnelheid Reactive Blue in demi-, standaard- of praktijkwater voor Hombikat poeder

De resultaten laten een duidelijk negatief effect zien van het praktijkwater op de afbraaksnelheid. In praktijkwater neemt de afbraak snelheid met een factor 2 tot maximaal 6 af.

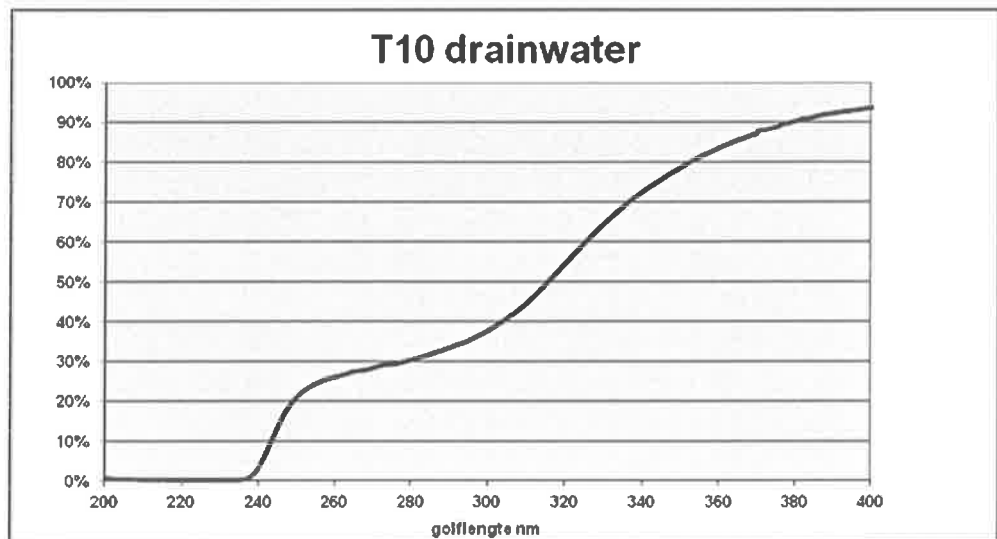
In standaardwater blijft de snelheid gelijk bij P25, bij ZnO wordt een factor 4 afname gevonden, bij Hombikat bedraagt deze factor circa 3. Er is duidelijk te zien dat de effecten variëren per type.

De afname van de afbraaksnelheid in praktijk- of standaardwater is mogelijk te verklaren door:

- Transmissieverschillen in UV-A gebied
- Aanwezigheid van radicaalscavengers, zoals bicarbonaten
- Veranderingen in adsorptiegedrag van Reactie Blue

Uit navraag bij Priva bleek dat geen afname van de transmissie in standaardwater is te verwachten in het UV-A gebied, zodat de belangrijkste oorzaken voor de afname in standaardwater in de twee andere verschijnselen gezocht moet worden.⁴

In Figuur 26 is de transmissie voor een doorsnee drainwater weergegeven. Er is te zien dat in het bereik van 315-400 nm gemiddeld circa 70% transmissie wordt behaald. Dit betekent dat circa 30% van het UV-A licht een waterlaag van 10 mm niet kan doordringen.



Figuur 26: Licht doorlaatbaarheid voor drainwater (bron: Priva)

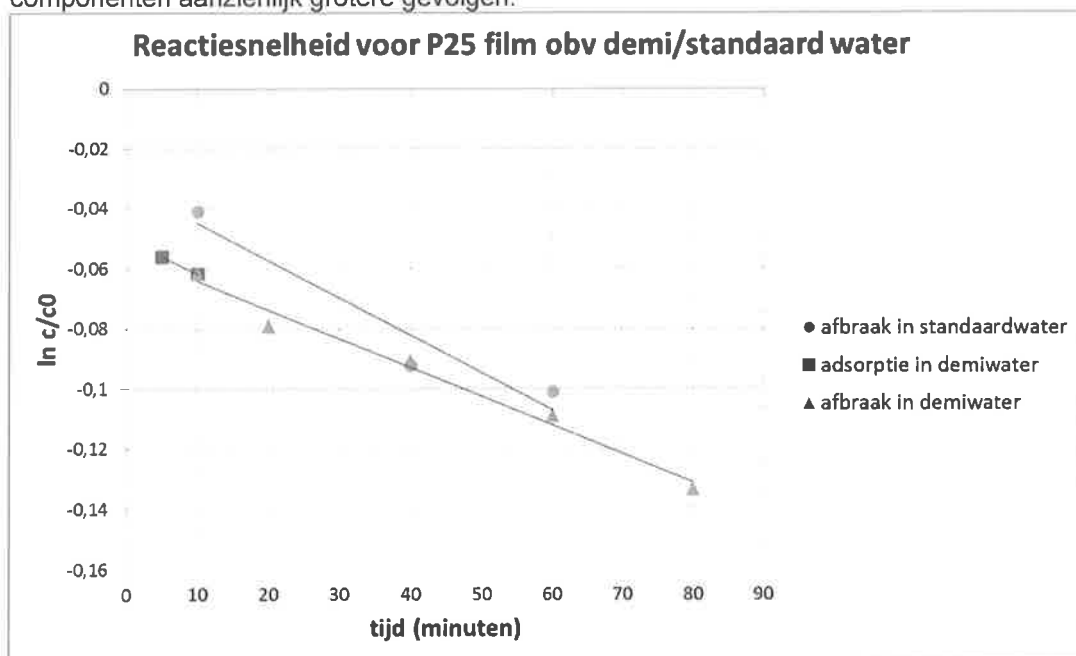
Het effect van praktijkwater is groter dan op basis van de afname in beschikbaar UV-A licht wordt verwacht en wordt dus niet enkel veroorzaakt door een beperkte transmissie. Een snelheidsbeperking door de aanwezige radicaalscavengers zal ongetwijfeld optreden, maar waarschijnlijk niet veel groter zijn dan in het standaardwater. Er kan daarom kan worden geconstateerd dat concurrentie van andere (organische) stoffen in de adsorptie een grote rol speelt. Deze stoffen concurreren in de fotokatalytische afbraak met Reactive Blue. Een belangrijke aanwijzing hiervoor is dat de zogenaamde donkeradsorptie van Reactieve Blue bij praktijkwater veel kleiner is.

⁴ Nitraat heeft een sterk verlagend effect op de T10 waarde (transmissie waarde nadat het licht door 10 mm water is gepasseerd) bij golflengten onder 250 nm en een klein effect rond 330 nm. Bij hogere golflengten heeft het geen effect meer. IJzerchelaten verlagen de T10 sterk rond 200-300 nm, het effect is sterk gekoppeld aan de concentratie. In beide gevallen zijn de effecten van nutriënten op de transmissie in het UV-A (315-400 nm) bereik beperkt tot afwezig.

5.5.2 Films

In Figuur 27 zijn de resultaten van een proef met de P25 film met demiwater en standaardwater weergegeven. De resultaten laten zien dat de afbraaksnelheid voor Reactive Blue in demiwater of standaardwater geen significante verschillen laat zien.

Bij de poeders werd wel een afname vastgesteld bij gebruik van standaardwater. Naar verwachting speelt hier mee dat de verhouding tussen het aantal deeltjes en het behandeld volume bij de poeders aanzienlijk groter is. Hierdoor speelt adsorptie een grotere rol en heeft een verstoring in adsorptiegedrag door andere componenten aanzienlijk grotere gevolgen.



Figuur 27: Reactiesnelheid afbraak Reactive Blue in demi- en standaardwater voor P25 film

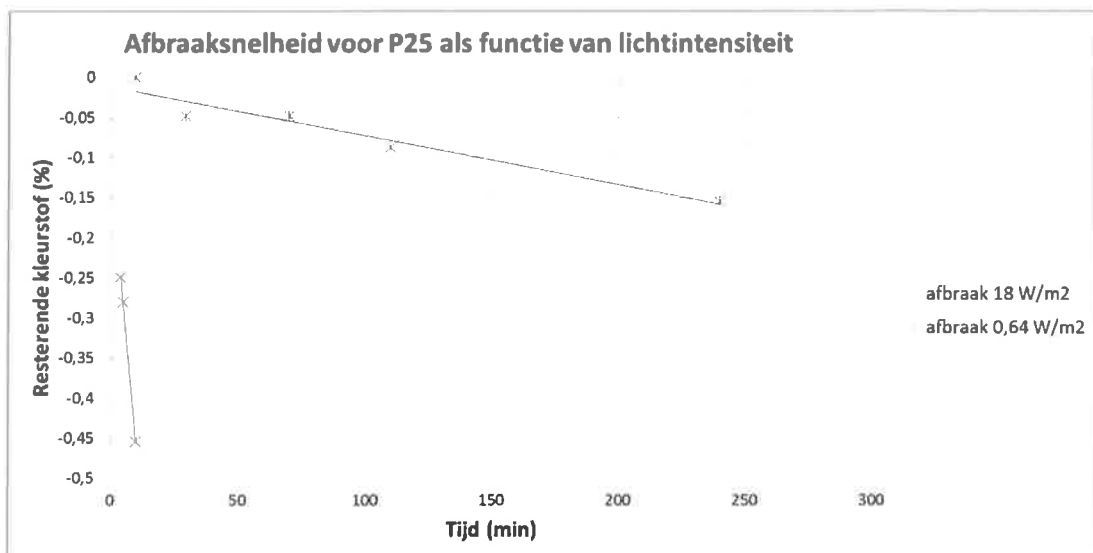
Er konden nog geen proeven met praktijkwater worden uitgevoerd. Hier wordt een zelfde effect verwacht als voor de poeders, namelijk concurrentie van andere organische stoffen in het water met de adsorptie en afbraak van de Reactive Blue.

5.6 Effect lichtintensiteit

Uit de KNMI data en de praktijkmetingen (zie paragraaf 3.1) komt naar voren dat de lichtintensiteit gedurende het jaar sterk varieert. Tijdens het experimenteel onderzoek is daarom ook gekeken naar het effect van lichtintensiteit op de afbraaksnelheid.

5.6.1 Poeders

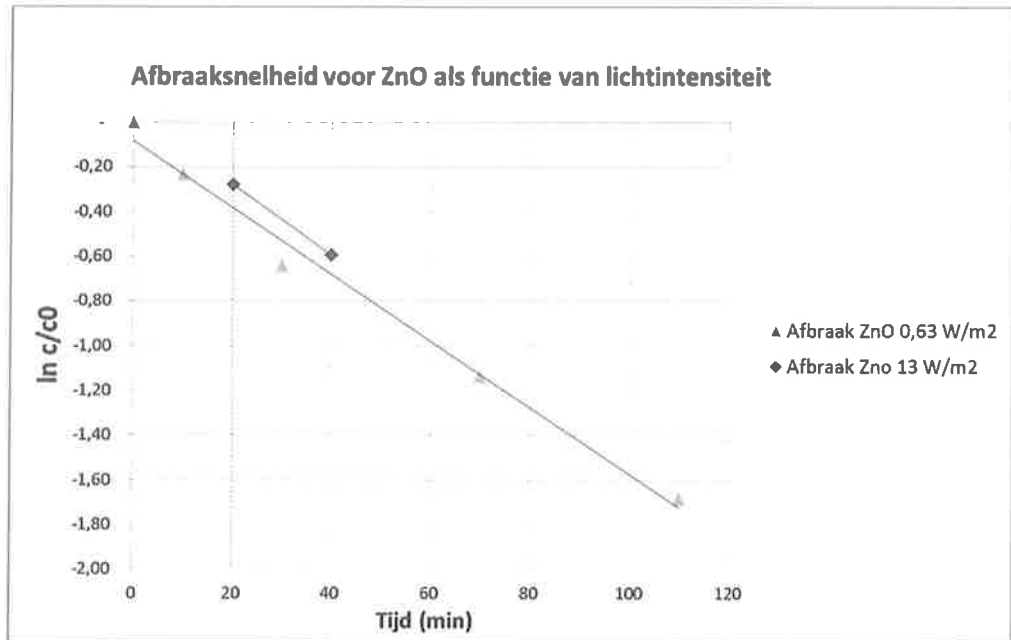
Figuur 28 laat de resultaten zien voor P25 poeder bij twee lichtintensiteiten (18 W/m² en 0,64), respectievelijk overeenkomend met de (zonnige) zomer- en (sombere) winterwaarden.



Figuur 28: Effect lichtintensiteit op afbraaksnelheid Reactive Blue door P25 poeder

Er is te zien dat voor P25 de afname in lichtintensiteit (circa 28x lager) resulteert in een circa 40x lagere afbraaksnelheid in het onderzochte bereik. Voor de overige poeders (behalve ZnO) bedraagt de afname in afbraaksnelheid 5-15x. De overige poeders worden dus effectiever bij lagere lichtintensiteit (circa 2-5x). P25 presteert binnen deze proevenserie dus aanzienlijk slechter dan de rest. Dit is tegen de verwachting in; de afname zal nooit meer zijn dan de afname in lichtintensiteit. Aanvullende proeven zijn gewenst om met meer zekerheid de prestatie van de verschillende poeders bij lage lichtintensiteiten vast te stellen.

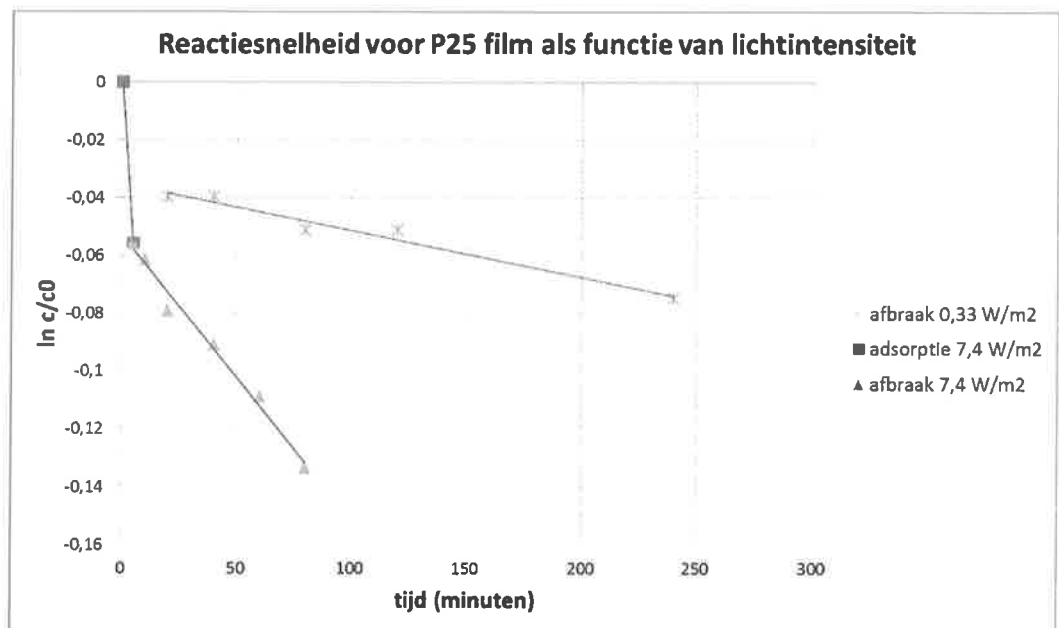
Figuur 29 laat zien dat het effect van lichtintensiteit bij ZnO op de afbraaksnelheid beperkt is. Bij ZnO bedraagt de afbraaksnelheid bij 0,63 W/m² nog circa 66% (factor 1,5x lager) van de waarde bij 13 W/m², dit betekent dat de effectiviteit bij wintercondities 14x zo hoog ligt als bij zomer-condities. De resultaten voor ZnO zijn opmerkelijk beter dan voor de overige poeders. Een mogelijke verklaring zou kunnen dat ZnO ook katalytische eigenschappen heeft en dus ook zonder licht een afbrekende werking heeft. Aanvullende proeven zijn nodig om deze hypothese te toetsen



Figuur 29: Effect lichtintensiteit op afbraaksnelheid Reactive Blue door ZnO poeder

5.6.2 Films

Met de P25 film is een proevenserie uitgevoerd om de afbraaksnelheid bij normale en lage lichtintensiteit vast te stellen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 30.



Figuur 30: Effect lichtintensiteit op afbraaksnelheid Reactive Blue door P25 film

De factor 22 afname in lichtintensiteit leidt tot een factor 6 afname in afbraaksnelheid. Dit betekent dat de film circa 4x zo effectief met licht omgaat bij 0,33 W/m² t.o.v. 7,4 W/m².

6 Technische evaluatie: Afbraak middelen

6.1 Afbraak gewasbeschermingsmiddelen

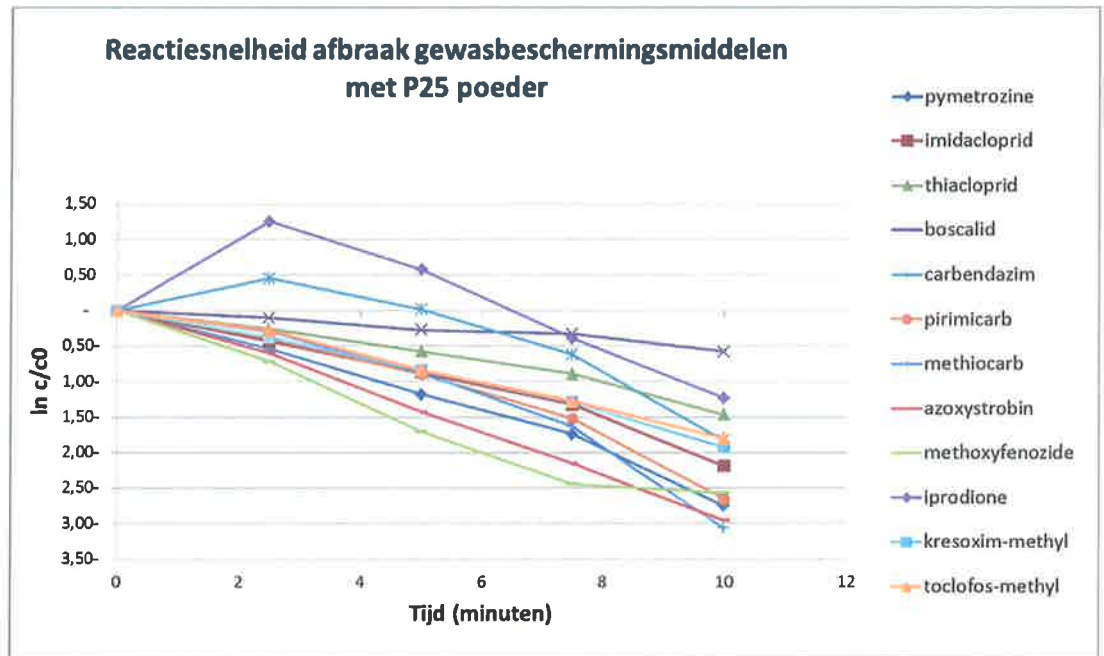
De proeven met gewasbeschermingsmiddelen zijn uitgevoerd met de 12 gewasbeschermingsmiddelen die toegepast worden voor toevoeging aan het standaardwater van WUR Glastuinbouw, zie Tabel 14. Dit betreft de 12 middelen die het meest toegepast worden binnen de Nederlandse Glastuinbouw.

Tabel 14: Toegepaste gewasbeschermingsmiddelen

Gewasbeschermings-middel
azoxystrobin
boscalid
carbendazim
imidacloprid
iprodione
kresoxim-methyl
methiocarb
methoxyfenozide
pirimicarb
pymetrozine
thiacloprid
toclofos-methyl

Een test met een GBM-oplossing met hierin 0,5 ng/ml van elk middel, welke 20 minuten behandeld is met 10 W/m² en 1 gr/l P25 poeder liet zien dat de middelen na 20 minuten reeds volledig verwijderd zijn.

Om de afbraaksnelheid vast te kunnen stellen is daarom een experiment uitgevoerd met een hogere startconcentratie (50-780 ng/ml van elk middel) en met meer monsters in de tijd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 31.

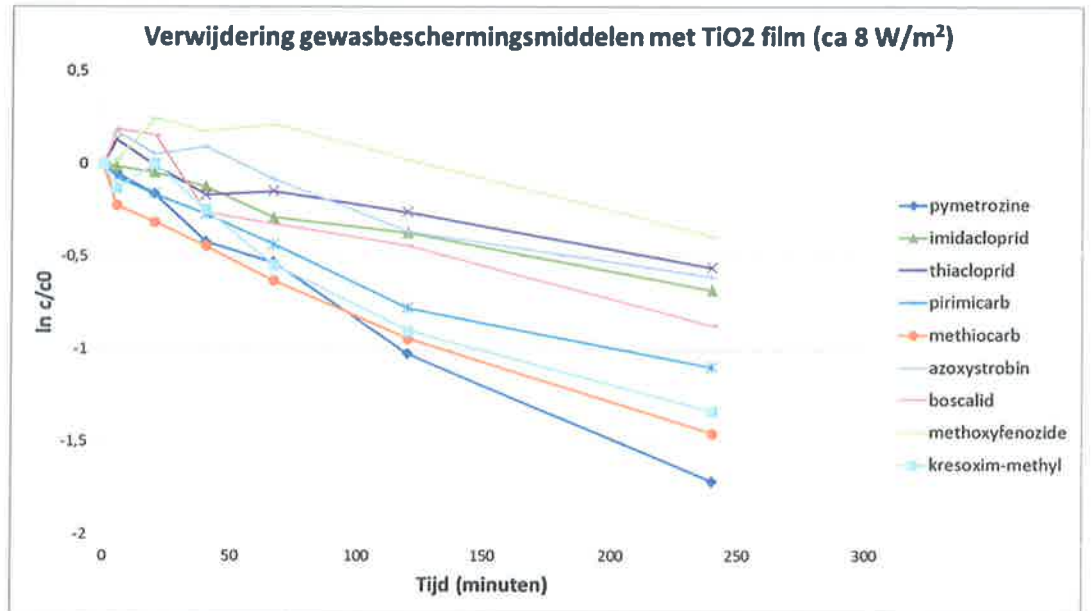


Figuur 31: Afbraak gewasbeschermingsmiddelen (startconcentratie 50-780 ng/ml per middel; 10 W/m² UV-A)

Figuur 31 laat duidelijk de afbraak van de middelen in de tijd zien. Na 10 minuten wordt een gemiddelde verwijdering van >80% ($\ln c/c_0 < -1,6$) van de middelen bereikt. Deze waarden gelden voor een concentratie van circa 3600 µg/l van het totaal aan middelen. De gemiddelde afbraaksnelheid voor het mengsel van 12 middelen bedraagt bij de genoemde concentratie hiermee 0,20 min⁻¹. Ter vergelijking: voor de Reactive Blue lag de gemiddelde afbraaksnelheid rond 0,009-0,06 min⁻¹. De verwijdering van GBM- middelen gaat dus aanzienlijk sneller (3-22x).

Op dit moment is niet bekend welke proces (adsorptie/afbraak) het meest bijdraagt aan de verwijdering van de gewasbeschermingsmiddelen.

De afbraak van gewasbeschermingsmiddelen is op dezelfde wijze getest met de P25 film. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 32. Er is te zien dat met de P25 film een goede afbraak van middelen kan worden bereikt.



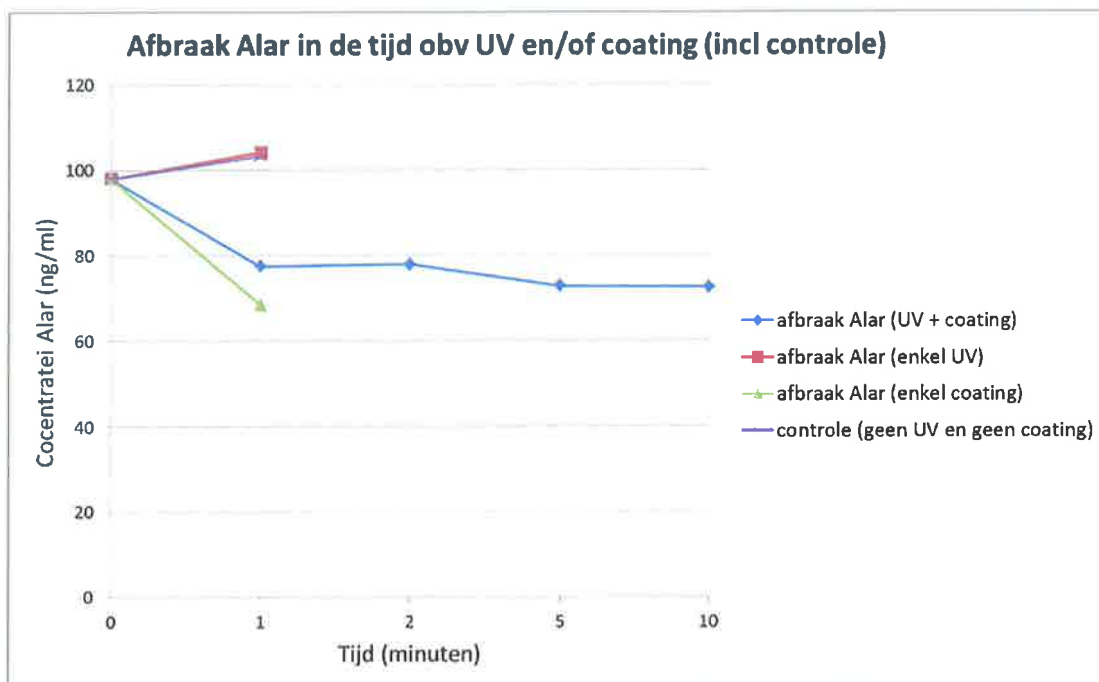
Figuur 32: Afbraak gewasbeschermingsmiddelen (8 W/m²; gemiddelde concentratie per middel = 0,5 ng/ml) met P25 film

Vergeleken met het P25 poeders ligt de afbraaksnelheid bij de P25 film een factor 64x lager. Echter lag de concentratie circa 600x lager. De P25 film laat hiermee een 10x hogere effectiviteit zien ten opzichte van het P25 poeder. Mogelijk speelt hier mee dat de overmaat aan gewasbeschermingsmiddelen bij de proeven met het P25 poeder beperkend is geweest voor de adsorptie aan het TiO₂ oppervlak.

6.2 Afbraak remmiddelen (Alar) (WUR)

6.2.1 Afbraak tijdens teelttafelproef

Tijdens de teelttafelproef is ook gekeken naar de afbraak van Alar (damonizide) onder invloed van UV en/of een TiO₂ coating. De gebruikte TiO₂ coating was TitanProtect TA2202. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 33.



Figuur 33: Afbraak Alar met behulp van Titanprotect coating (inclusief controles)

Een beschrijving van de aanpak van de teelttafelproef is te vinden in paragraaf 5.2.6.

De resultaten van de teelttafelproef laten zien dat er in minuten circa 20-25% van het remmiddel Alar optreedt. Er is ook duidelijk te zien dat enkel UV en de controle niet tot bereik leiden, zoals verwacht. Er wordt verwacht dat de gevonden waarde voor 10 minuten het gevolg is van een fout bij de meting/bereiding van het monster aangezien de coating zonder UV-A belichting geen activiteit kent.

De beperkte afbraak kan mogelijk verklaard worden aan de hand van twee oorzaken:

- Lage intensiteit van menging
- Lage concentratie werkzame stof (<1% TiO₂ in de coating)

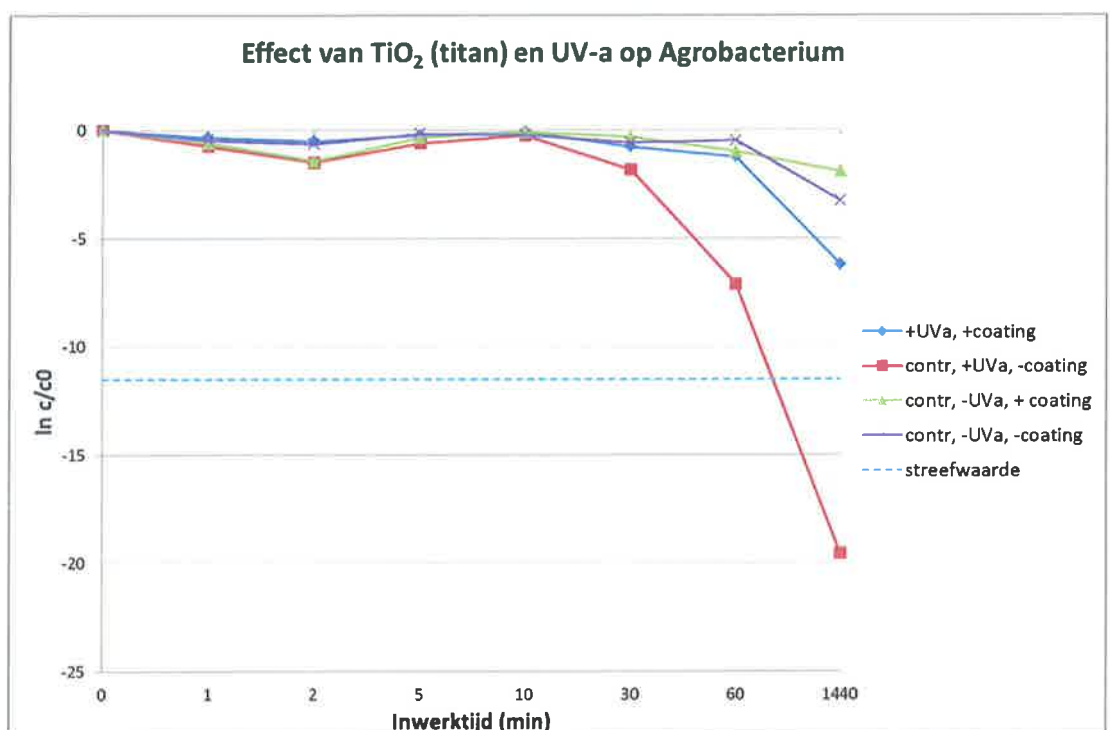
7 Technische evaluatie: Desinfectie en effect op gewasgroei (WUR)

7.1.1 Afdoding *Agrobacterium* tijdens teelttafelproef

Tijdens de teelttafelproef is gekeken naar de afdoding van *Agrobacterium Rhizogenes* onder invloed van UV-A straling en/of een TiO₂ coating (TitanProtect TA2202). Op basis van de resultaten met de remmiddelen (zie paragraaf 6.2) werd verwacht dat de afbraaksnelheid laag zou zijn.

Een beschrijving van de aanpak van de teelttafelproef is te vinden in paragraaf 5.2.6

Door de WUR wordt als beoogd resultaat een log 5 afname binnen 10 tot 30 minuten aangehouden, zoals verkregen wordt met een UV-C installatie. Dit komt overeen met een afbraak van 99,999%. De resultaten van de proef zijn weergegeven in Figuur 34.



Figuur 34: Afbraak *Agrobacterium Rhizogenes* in de tijd met FKO (intensiteit ca 15 W/m², initieel hoeveelheid bacteriën $3,7 \cdot 10^{10}$ CFU)

De resultaten laten zien dat na circa 24 uur een afbraak van circa 99% (log 2,7) wordt bereikt. Op basis van de initiële hoeveelheid bacteriën betekent dit dat $2,8 \cdot 10^{-6}$ J/CFU benodigd is voor de afdoding. Er is ook te zien dat de controle met enkel UV-A tot een 0-waarde leidt na 24 uur. Mogelijk kan met enkel UV-A licht worden volstaan.

De controles laten een licht afname zien na 24 uur, dit wordt naar verwachting veroorzaakt door het gebrek aan voeding in het water waardoor een deel van de cellen sterft.

De benodigde tijdsduur voor afbraak met de TitanProtect coating komt naar verwachting voort uit het lage percentage werkzame stof (0,85%). Er wordt verwacht dat een hoger percentage werkzame stof zal leiden tot een verkorting van de benodigde contact tijd voor een log 5 reductie.

Hiernaast wordt verwacht dat de benodigde contacttijd verder verkort kan worden door een verbetering van de menging of door toepassing van een dunnere waterlaag (kortere diffusie-afstand) . Deze hypothese is getest met de recirculatie-opstelling. De resultaten hiervan worden in de volgende paragraaf beschreven.

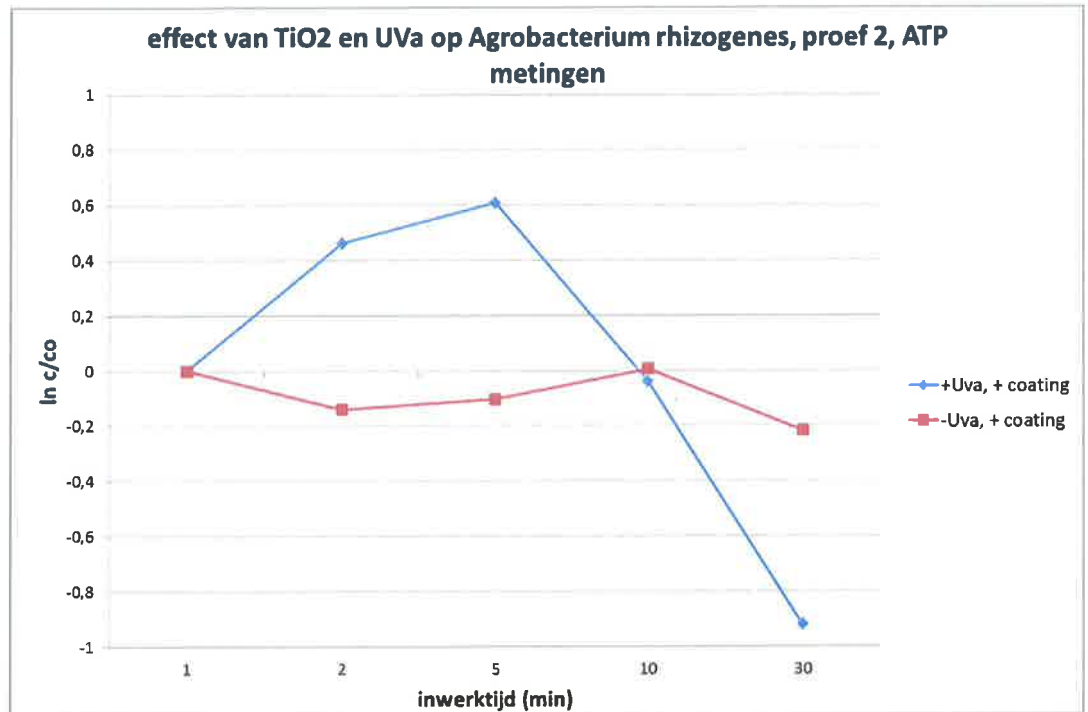
7.1.2 *Afbraak Agrobacterium met recirculatie-opstelling*

Er wordt verwacht dat een betere menging en/of een dunne water laag tot betere resultaten zal leiden vanwege het intensieve contact tussen TiO_2 en de af te doden bacteriën. Om deze hypothese te testen zijn aanvullende proeven (onder dezelfde omstandigheden) uitgevoerd met de recirculatie-opstelling door Wageningen UR.

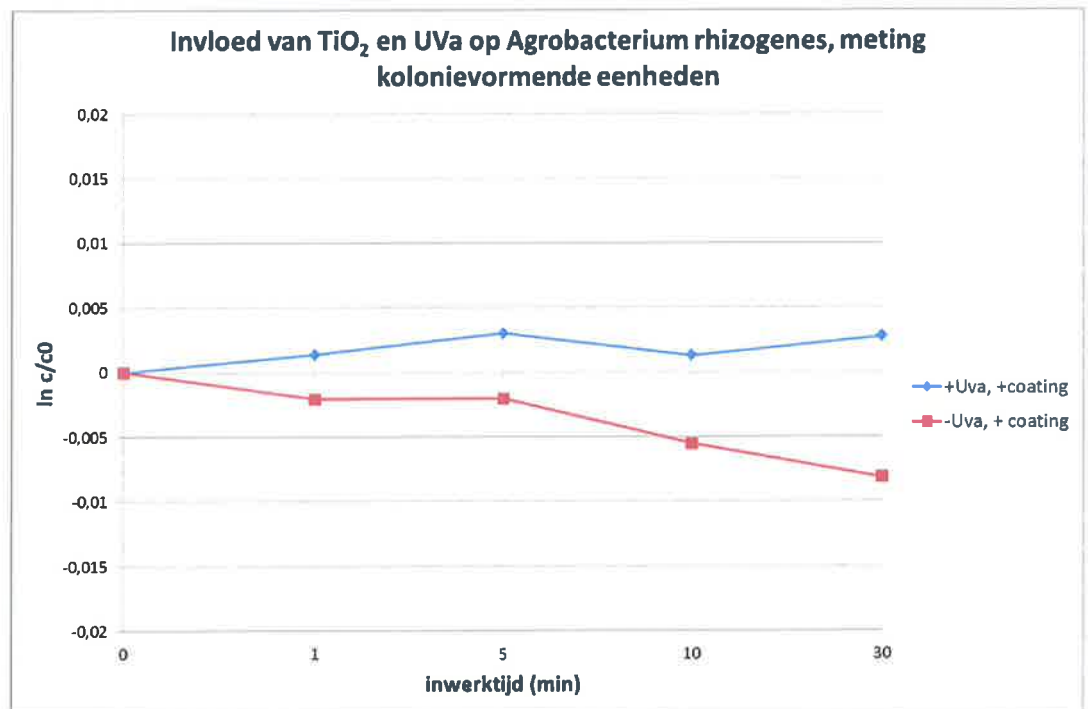
Met oog op de beperkte afname in de tijd die gezien werd bij de teelttafelproef is bij deze proeven naast de KVE-meting ook een ATP-meting toegepast. Deze laatste methode is gebaseerd op het meten van ATP, een integraal onderdeel van de energiehuishouding van de bacteriën. Zodra een bacterie gedood wordt zal deze geen ATP meer afgeven. De hoeveelheid ATP die gemeten wordt in een monster vormt zo een maat voor de hoeveelheid levende bacteriën.

Figuur 35 en Figuur 36 laten de resultaten zien die verkregen zijn met de twee meetmethodes. De ATP-metingen laten een initiële toename zien en dalen vervolgens significant. Het is mogelijk dat de bacteriën onder stress ATP vrijgeven (dit effect wordt beschreven in de literatuur) en dat later afdoding de overhand neemt. Echter is het lastig om de resultaten te interpreteren. Het is mogelijk dat een deel van het door de bacteriën uitgescheiden ATP door de OH-radicalen wordt afgebroken waardoor een vertekend beeld ontstaat. Hiernaast is het moeilijk om onderscheid te maken tussen levende en net gedode cellen aangezien beiden nog ATP afgeven. Pas na enige tijd zal de ATP voorraad van een dode cel op zijn en kan echt een onderscheid tussen levend/dood worden gemaakt. Om deze reden is besloten de ATP metingen niet verder te beschouwen.

De KVE-meting laat geen afdoding zien binnen 30 minuten. Uit de proeven met Reactive Blue kwam naar voren dat de afbraak bij de recirculatieopstelling langzamer gaat vanwege het relatief kleine belichte oppervlak ten opzichte van het te behandelen volume. Het is daarom mogelijk dat een langere contacttijd benodigd is om afdoding met de recirculatie-opstelling waar te nemen bij de gebruikte lichtintensiteit.



Figuur 35: Resultaten afdoding Agrobacterium in recirculatie-opstelling (ATP metingen; 7 W/m²; starthoeveelheid bacteriën = 2,44*10¹¹ CFU)

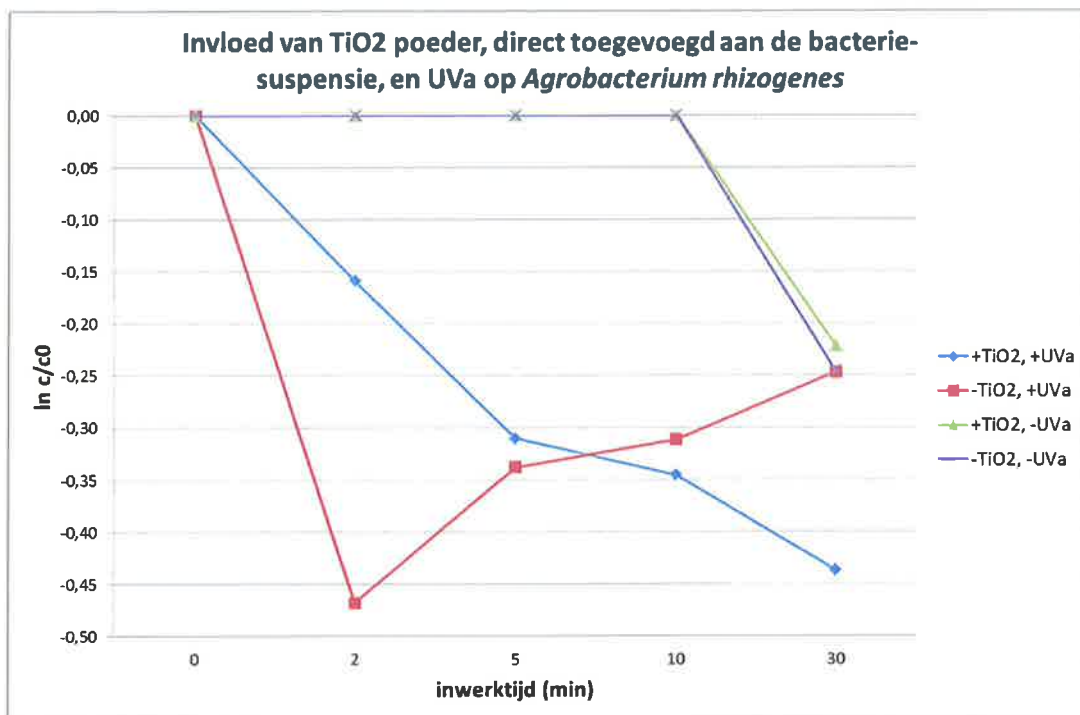


Figuur 36: Resultaten afdoding Agrobacterium in recirculatie-opstelling (meting kolonievormende eenheden; 7 W/m²; starthoeveelheid bacteriën = 2,44*10¹¹ CFU)

7.1.3 Afbraak *Agrobacterium* met P25 poeder

De afbraak van *Agrobacterium Rhinogezes* is ook getest met behulp van het P25 poeder. Hierbij is dezelfde aanpak gebruikt als voor de proeven met Reactive Blue. Dit betekent dat de oplossing met hierin TiO_2 en *Agrobacterium Rhinogezes* gedurende de proef zeer goede gemengd is geweest.

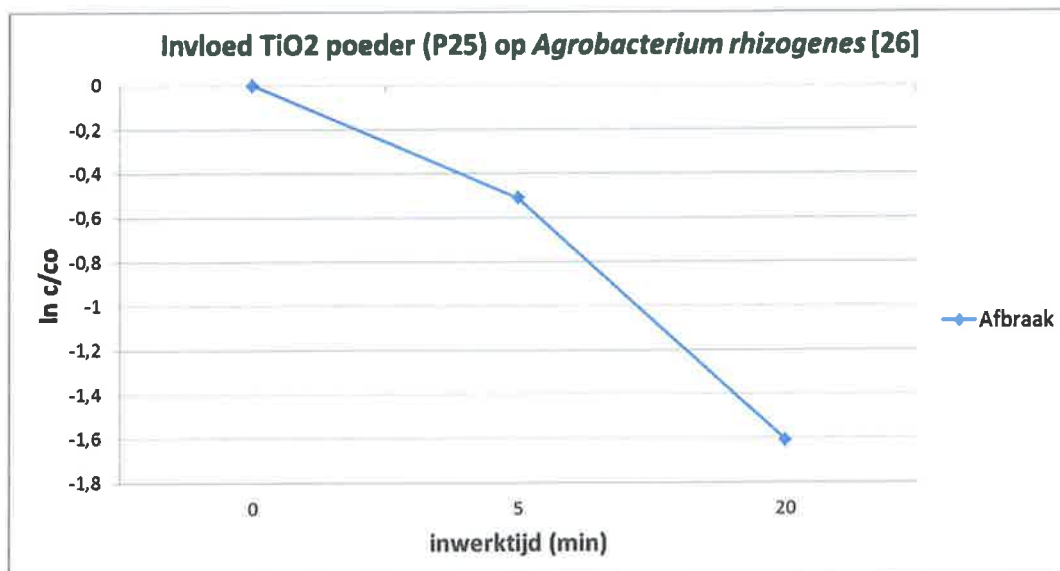
De resultaten van de desinfectieproef met P25 poeder zijn weergegeven in Figuur 37.



Figuur 37: Resultaten desinfectieproef met P25 poeder in petrischaal (15 W/m²; starthoeveelheid bacteriën = $4,9 \cdot 10^9$ CFU)

Ook bij deze proef is een effect van enkel UV-A straling op de bacteriën waarneembaar. Echter neemt de concentratie bacteriën bij deze controle na 2 minuten weer toe waardoor geen conclusie kan worden getrokken.

Door Aminedi et al [26] zijn ook desinfectieproeven met P25 poeder uitgevoerd. Deze resultaten zijn, ter vergelijking, in Figuur 38 weergegeven.



Figuur 38: Resultaten desinfectieproeven met P25 poeder door Amenedi et al. [26] ($6,4 \text{ W/m}^2$, starthoeveelheid bacteriën = $3,6 \cdot 10^7$)

De resultaten laten zien dat met het P25 poeder circa 36% van de bacteriën kan worden afgedood binnen 30 minuten. Amenedi et al. hebben een afbraak van 80% bereikt in 20 minuten. Echter lag hier de starthoeveelheid bacteriën circa 136x lager.

Beide proeven laten een duidelijke 1^e orde reactieverloop zien.

7.1.4 Overzicht resultaten desinfectie

In Tabel 15 is een overzicht weergegeven van de verkregen resultaten tijdens de desinfectieproeven. De TiO₂ film is niet beschreven aangezien hier binnen de proefduur (30 minuten) geen desinfectie kon worden vastgesteld.

Er is te zien dat de startconcentraties en lichtintensiteiten voor de diverse proeven niet gelijk is geweest. Dit maakt het erg lastig om de resultaten onderling te vergelijken en uitspraken te doen over de verwachte duur tot log 5 reductie. Aanvullende onderzoek met gelijke condities is benodigd om de verschillende toepassingsvormen goed te kunnen vergelijken.

Wel is duidelijk gebleken dat desinfectie met FKO mogelijk is en dat de desinfectie een 1^e orde reactieverloop laat zien. Dit betekent dat de reactiesnelheid bij een hogere concentratie hoger ligt verloopt en bij lagere concentraties afvlakt.

Hieronder is een eerste inschatting gemaakt van de verhoudingen qua prestatie. Op basis van de ingeschatte verhouding tussen afbraaksnelheid en start hoeveelheid is gevonden dat de literatuurwaarde circa 7x hoger ligt. Op basis van de meetwaarden van Aminedi [26] is naar verwachting circa 145 minuten nodig is voor een log 5 reductie bij een startconcentratie van 3,6E+08 CFU/ml. Voor het P25 poeder (TNO) zal naar schatting dan circa 1000 minuten benodigd zijn. Dit suggereert dat er nog ruimte voor optimalisatie aanwezig is.

Tabel 15: Overzicht verkregen resultaten tijdens desinfectieproeven (afbraakwaarden zijn een inschatting, deze zijn vanwege de verschillende proef condities niet goed onderling vergelijkbaar).

Type	Start hoeveelheid (CFU) (*)	Energie behoefte voor afdoding (J/CFU)	Hoeveelheid werkzame stof (mg/m ²)	Bereikte afdoding	Inschatting gemiddelde afbraak (CFU/min) (obv 7 W/m ²)	Inschatting afbraak/ start hoeveelheid bij 7 W/m ² (/min)	Opmerkingen
P25 poeder Aminedi [26]	3,6*10 ⁷	1,3*10 ⁻⁷	2.000	2,9*10 ⁷ (20 min; 6,4 W/m ²)	1,6*10 ⁻⁶	0,04	
P25 poeder	4,9*10 ⁹	1,1*10 ⁻⁷	4.940	1,8*10 ⁹ (30 min, 15 W/m ²)	2,7*10 ⁻⁷	0,0056	
Titan-protect coating	3,7*10 ¹⁰	4,2*10 ⁻⁶	2,8	2,6*10 ⁷ (1440 min, 15 W/m ²)	1,2*10 ⁻⁷	0,00032	0,85% werkzame stof

(*) op basis van start concentratie en toegepast volume

7.1.5 *Tussenconclusie desinfectie*

Op basis van de uitgevoerde proevenseries kunnen de volgende tussenconclusies getrokken worden:

- FKO is technisch in staat is om *Agrobacterium Rhizogenes* af te doden.
- Op basis van de literatuur kan met P25 poeder naar verwachting een log 5 reductie bereikt worden in circa 145 minuten bij een startconcentratie van $3,6E+08$ CFU/ml.
- De ingeschatte reactiesnelheid voor de proeven uit de literatuur komt sterk overeen met de in het project gevonden snelheid voor afbraak van Reactive Blue.
- Er wordt ingeschat dat het binnen het project geteste poeder een factor 7 trager is tov de literatuurwaarde. Er wordt verwacht dat dit verholpen worden door optimalisatie van de proefopzet en/of voorbehandeling van het TiO_2 .
- Voor het aantonen van de desinfecterende werking van de TiO_2 film zijn proeven met een langere duur benodigd.
- Aanvullend onderzoek bij gelijk condities is nodig om de toepassingsvormen goed te kunnen vergelijken.

De optimale instellingen voor desinfectie kunnen bepaald worden aan de hand van onderzoek naar het effect van diverse parameters op de desinfecterende werking van het TiO_2 .

Bij de teelttafelproef en de proeven met het P25 poeders leek enkel belichten met UV-A ook effect te hebben op de *Agrobacterium Rhizogenes*. Vanwege de wisselende trends is het echter nog niet mogelijk om hier conclusies over te trekken. Aanvullende proeven zijn gewenst.

7.1.6 *Effect op gewasgroei*

Er wordt verwacht dat de onderzochte concepten voor FKO (poeders in regenwaterbassins, films/coatings op schermen binnen of buiten de kas en gecoate teelgoten/vloeren) geen effect zullen hebben op de gewasgroei. Meer in het algemeen mag worden verwacht dat TiO_2 pas nadelig is (of kan zijn) als een deeltje tegen een wortelhaartje aan ligt en tevens voldoende UV licht ontvangt. Zonder UV licht wordt er geen activiteit c.q. afbraak verwacht. Een wortelhaartje kan vernietigd worden door een TiO_2 deeltje dat voortdurend een stroom van vrije elektronen en elektrongaten produceert. Deze voorwaarden (licht én fysiek contact tussen deeltje en wortel) zullen vrijwel nooit voorkomen. Mocht het toch optreden dan zal het effect zeer beperkt zijn.

Bij toepassing van poeders in het regenwaterbassin zal filtratie worden toegepast om de deeltjes af te vangen voordat het water wordt gebruikt voor het aanmaken van de watergift.

De films/coatings op de schermen zijn gebonden aan een ondergrond en zullen niet of slechts beperkt vrijkomen. De concentratie in het behandelde water zal hiermee laag liggen c.q. verwaarloosbaar zijn. Gezien de lage concentratie en de lage lichtbeschikbaarheid rondom het gewas wordt geen nadelige invloed van het eventueel vrijgekomen TiO_2 verwacht.

Een TiO_2 coating op de teeltgoot zal een beperkte werking kennen vanwege de lage lichtintensiteit en lage activiteit van de coating zelf (Titanprotect). Er wordt verondersteld dat hiermee het risico op een merkbare aantasting van het gewas bij eventuele toepassing verwaarloosbaar is.

De proef met de teeltvloer liet zien dat toepassing van TiO_2 in een eb-en vloed systeem weinig perspectief heeft. Ook hier is het risico op aantasting van het gewas verwaarloosbaar, omdat er geen rechtstreeks contact tussen plant en vloer is.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het effect van TiO_2 op gewassen feitelijk niet is onderzocht. Het is mogelijk dat in toekomstige ontwikkelingen de lichtbeschikbaarheid rondom het gewas kunnen verbeteren en/of het TiO_2 aanzienlijk effectiever kunnen maken. In dit geval moet een nieuwe evaluatie worden uitgevoerd van de effect op het gewas.

8 Praktijk-evaluatie (gecoate teeltgoot)

Als tweede praktijkproef is FKO ingezet op een teeltgoot bij het glastuinbouwbedrijf Vijverberg C&R. Het doel van deze praktijkproef is om vast te stellen of de groene aanslag die na verloop van tijd optreedt op de zijkanten van de teeltgoten voorkomen kan worden met een TiO_2 coating.

Hiertoe is de goot over een lengte van 20 meter schoongemaakt en gecoat met de TitanProtect coating (type TA2203). De eerste 5 meter zijn gecoat met 3 lagen, de tweede 5 meter met 2 lagen en de resterende 10 meter met 1 laag om het effect van verschillende laagdiktes te kunnen bepalen. Een tweede teeltgoot is als referentie enkel schoongemaakt en niet voorzien van een coating zodat het verschil tussen wel/geen coating kan worden vastgesteld.



Figuur 39: Foto van de gecoate goot (eind november 2012, 2 weken na start; de groenige kleur komt voort uit de camera, dit betreft geen aanslag maar reflecties van planten)

Uit deze proef kwamen de volgende bevindingen naar voren:

- Met name in de wintermaanden wordt er weinig water gegeven waardoor er maar beperkt of niet water over de zijkanten van de teeltgoten stroomt.
- De groene aanslag zat met name in de zoutafzettingen op de teeltgoten
- De zoutafzettingen waren bijzonder lastig om te verwijderen
- De coating is gemakkelijk aan te brengen.

Gedurende de proef heeft slechts beperkt water over de zijanten van de teeltgoten gelopen. Daarnaast bleek dat het weghalen van de zoutafzettingen voorafgaand aan de proef het grootste deel van de aanslag verhielp. Hierdoor kon binnen de looptijd van het project geen effect aangetoond worden.

Mogelijk kan de aanslag in sterke mate voorkomen worden door afzetting van zout op de teeltgoot te voorkomen. TitanProtect is benaderd met de vraag in welke mate zouten kunnen hechten aan de TiO_2 coating. TitanProtect heeft aangegeven dat dit nog niet bekend is, wel loopt er reeds een praktijk onderzoek naar de prestatie van de coating op glazen oppervlakken op een hotel nabij de zee. Er wordt aanbevolen deze ontwikkelingen in de gaten te houden. Daarnaast kan aan dit aspect tijdens de demonstratiefase of een vervolgproject aandacht besteed worden.

9 Economische evaluatie FKO

9.1 Inleiding

In het onderstaande hoofdstuk wordt de economische evaluatie voor toepassing van FKO in de glastuinbouw besproken. De economische evaluatie is gebaseerd op de, in het onderzoek vastgesteld, technische prestatie van de diverse toepassingsvormen en op diverse uitgangspunten. Deze beide aspecten worden in de onderstaande paragrafen uiteengezet.

In de economische evaluatie zijn de kosten voor de FKO hardware meegenomen. Deze kosten kunnen in het huidige stadium van ontwikkeling echter slechts ruw ingeschat worden. Na demonstratie op locatie is meer kennis en data beschikbaar en kan de evaluatie bijgewerkt worden.

In de economische evaluatie is voor twee perioden (winter + restant van het jaar) bepaald welk oppervlak aan belicht oppervlak benodigd is om 90% afbraak van de Reactive Blue en/of GBM middelen te bereiken. Deze streefwaarde komt overeen op de verwijdering die met alternatieve technieken (bijv. UV-C + H₂O₂ of actiefkool filtratie) behaald kunnen worden wanneer deze op zichzelf ingezet worden.

De volgende scenario's zijn geëvalueerd:

- Afbraak van kleurstof in spuiwater onder zomer- en wintercondities
- Afbraak van kleurstof in spuiwater met ondersteunende UV-A belichting
- Afbraak van enkel GBM in het spuiwater, met en zonder UV-A ondersteuning (TOC-verwijdering vooraf nodig)

Er is gekozen voor behandeling van spuiwater aangezien al snel bleek dat behandeling van de volledige drain niet haalbaar is. Het hiervoor benodigde oppervlak benadert of overschrijdt hierbij de grootte van de gekozen bedrijfsgrootte (5 ha). Daarnaast speelt mee dat er tegen de verwachting in bij de uitgevoerde proeven geen desinfectie effect kon worden vastgesteld. Inzet voor desinfectie door de gehele kas lijkt daarmee af te vallen.

9.2 Overzicht prestatie geteste TiO₂ poeders, films en coatings

In Tabel 16 en Tabel 17 zijn de behaalde resultaten voor de diverse poeders, films en coatings weergegeven voor de afbraak van Reactive Blue en de verwijdering van gewasbeschermingsmiddelen. Deze waarden zijn als uitgangspunt voor de economische evaluatie gebruikt. De resultaten zijn per type toepassingsvorm gecombineerd om een duidelijk overzicht te bieden. Meer informatie met betrekking tot de prestatie per type TiO₂ is te vinden in de betreffende paragrafen in hoofdstuk 5 en 6.

Tabel 16: overzicht technische prestatie toepassingsvormen TiO₂ voor afbraak Reactive Blue (op basis van toegepaste opstellingen)

Toepassingsvorm	Lichtintensiteit (W/m ²)	Reactiesnelheidsconstante voor afbraak Reactive Blue in demiwater (1/min)	Afname reactiesnelheid in standaardwater	Afname reactiesnelheid in praktijkwater
Poeders	10-18 0,64	0,009-0,06 0,004	0-50%	50%
P25 op glasparels	12	0,0225	Niet getest	
P25 Film	7,4 0,33	0,001 0,0002	Niet significant	<50% (*)
Titanprotect	7,4	0,00006	Niet getest	

(*) Verwachte waarde o.b.v. resultaten met poeders. Bij de film is de waterlaag dun. Het effect van vervuiling op adsorptie/transmissie is dan naar verwachting beperkter.

Tabel 17: overzicht technische prestatie toepassingsvormen TiO₂ voor afbraak gewasbeschermingsmiddelen (op basis van toegepaste opstellingen)

Toepassingsvorm	Lichtintensiteit (W/m ²)	Reactiesnelheidsconstante voor afbraak GBM (*) in demiwater (1/min)	Afname reactiesnelheid in standaardwater	Afname reactiesnelheid in praktijkwater
Poeders	7	0,015 (**)	Niet getest	Niet getest
P25 Film	7	0,015	Niet getest	Niet getest

(*) afbraaksnelheid voor een mengsel van 12 middelen (concentratie per middel circa 5 µg/l)

(**) de geteste concentraties bij de proeven met poeders waren aanzienlijk hoger (ca 200-500 µg/l per middel). Er is aangenomen dat de poeders bij een concentratie van circa 5 µg/l en een intensiteit van 7 W/m² een vergelijkbare prestatie kennen als de TiO₂ films.

Op basis van de gevonden technische prestatie is besloten om TitanProtect niet verder te evalueren aangezien het benodigde oppervlak naar verwachting bij zomercondities reeds aanzienlijk zal zijn. Opm. TitanProtect is eenvoudig aan te brengen en kan daardoor een interessante optie blijken om oppervlakken (in enige mate) steriel te houden.

9.3 Algemene uitgangspunten

In Tabel 18 zijn de algemene uitgangspunten weergegeven die voor de economische evaluatie zijn gebruikt.

Tabel 18: Algemene uitgangspunten gebruikt voor economische evaluatie FKO in de glastuinbouw

Aspect	Waarde	Opmerkingen
Prijs poeders	2,5 euro per kg (bulk) (*)	Dosering: 0,2 – 0,5 g/l
Prijs TiO ₂ film	5 euro/m ²	inschatting o.b.v. literatuur [16]
Ge-evalueerde lichtintensiteiten	2,3 W/m ² en 7 W/m ²	Betreft gemiddelde UV-A flux in resp. winter seizoen (okt t/m jan) en restant van het jaar
Te behandelen volume	10 m ³ /dag	Gebruikelijke spui volume voor 5 ha en 500 m ³ /ha/jr (**)
Af te breken vracht	20 mg/l	Gem. vracht aan organisch materiaal in spuiwater (**)(***)
Concentratie gewasbeschermingsmiddelen	5 µg/l	Per middel
Kosten UV-A lampen	10 €/stuk	
Oppervlak te bestralen per lamp	0,25 m ²	
Kosten FKO hardware	8 €/m ²	Ondersteunende constructie voor films, water toevoer/afvoer en (eenvoudige) circulatiepomp
Kosten UF/RO (voor afscheiden poeder)	2,80 €/m ³	Operationele + kapitaal-lasten
Kosten voor afscheiden glasparsels	0,15 €/m ³	Op basis van bezinken glasparsels; omvat operationele en kapitaal-lasten (****)
Terugwinning water met (membraan)filtratie	80%	Aanname
Toekomstige lozingsheffing voor spuiwater met middelen	5 €/m ³	Inschatting o.b.v. Waterproof project (**)

(*) bron: <http://www.alibaba.com/showroom/tio2-price.html>

(**) bron: Glastuinbouw Waterproof: Substraatteelt project (2010-2012)

(***) Aangezien FKO niet-selectief is moet er rekening mee gehouden worden dat afbraak van organische materiaal (TOC) in het water zal concurreren met de afbraak van ziektekiemen en middelen. TOC is naar verwachting de meest aanwezige verontreiniging in het water en is daarom als uitgangspunt gehanteerd om zo de worst-case te beschrijven.

(****) Door de grootte van de deeltjes (25 µm) zakken deze snel uit in water. Actieve menging is nodig om ze in suspensie te houden.

9.4 Uitgangspunten lichtomstandigheden en benodigde dosis

In Tabel 19 zijn de uitgangspunten voor lichtomstandigheden en benodigde dosis weergegeven die in de economische evaluatie zijn gebruikt. Deze waarden zijn gebaseerd op de metingen in de Demokwekerij en de KNMI-data met betrekking tot de zon-instraling in het Westland, zie ook paragraaf 3.1.

Tabel 19: Uitgangspunten lichtomstandigheden en benodigde dosis voor afbraak Reactive Blue of gewasbeschermingsmiddelen

Item	Eenheid	Situatie		
		UV-ondersteuning	Gemiddeld (feb-sep)	Winter (okt t/m jan)
Seizoen	-			
UV-A lichtflux (gemiddeld)	W/m ² op het belicht oppervlak	18	7	2,3
uren per dag	uur	24	14	10
gemiddelde lichtstroom (UV-A)	E/m ² /dag	4,7	1,07	0,24

9.5 Uitkomsten economische evaluatie

In de onderstaande tabellen zijn de uitkomsten van de economische evaluatie samengevat. De afbraak van Reactive Blue in praktijkwater en de verwijdering van enkel GBM (na TOC-verwijdering) zijn geëvalueerd. De gecoate glasparels zijn niet meegenomen in de evaluatie van GBM-verwijdering na TOC-verwijdering aangezien deze nog niet getest zijn met gewasbeschermingsmiddelen.

In bijlage VII zijn alle achterliggende uitkomsten te vinden.

Tabel 20: Samenvatting uitkomsten economische evaluatie afbraak modelstof (Reactive Blue) in praktijkwater

Type	TiO ₂ poeder		TiO ₂ op glasparels		TiO ₂ film	
	Benodigd maximaal oppervlak	Kosten per m ³	Benodigd maximaal oppervlak	Kosten per m ³	Benodigd maximaal Oppervlak	Kosten per m ³ (*)
Afbraak Reactive Blue o.b.v. minimaal benodigde UV dosis	2.700	3,3	3.700 (**)	1,5	1.400	0,6
Afbraak Reactive Blue o.b.v. gemiddeld benodigde UV dosis	3.550	3,3	3.700	1,5	2.900	1,3
Afbraak Reactive Blue met UV-A ondersteuning (obv minimaal benodigde dosis)	88	3,7	97	1,8	102	0,4
Afbraak Reactive Blue met UV-A ondersteuning (obv gemiddeld benodigde dosis)	180	3,75			212	1,6

(*) Waarde voor feb-sept is voor 70% meegenomen, waarde voor okt-jan voor 30% gebaseerd op de verdeling qua aantal dagen van het jaar.

(**) Voor de glasparels is door het beperkt aantal experimenten nog geen variaties in benodigde dosis gevonden (gemiddeld en minimaal hetzelfde)

Tabel 21: Samenvatting uitkomsten economische evaluatie verwijdering GBM uit spuiwater (na TOC-verwijdering)

Type	TiO ₂ poeder		TiO ₂ film	
	Benodigd maximaal oppervlak	Kosten per m ³ (**)	Benodigd maximaal oppervlak	Kosten per m ³ (*) (**)
GBM verwijdering zonder UV-A ondersteuning	605	3,6	1.800	1,1
GBM verwijdering met UV-A ondersteuning	137	4,5	137	1,6

(*) Waarde voor feb-sept is voor 70% meegenomen, waarde voor okt-jan voor 30% gebaseerd op de verdeling qua aantal dagen van het jaar.

(**) inclusief voorgeschakelde TOC-verwijdering (circa 0,30 €/m³)

De resultaten laten zien dat voor een 90% verwijdering van de modelstof Reactive Blue er maximaal meer dan 3.000 m² belicht oppervlak (>6% van het kasoppervlak) benodigd is wanneer geen UV-A ondersteuning wordt toegepast. Er moet geconcludeerd worden dat zonlicht gedreven FKO op basis van de gevonden prestatie en de lichtbeschikbaarheid technisch niet haalbaar is in de glastuinbouw, zonder belangrijke wijzingen in de benutting van het vloeroppervlak van de kas.

Een belangrijke factor met betrekking tot het benodigde oppervlak is de hoge vracht aan organisch materiaal (ook wel Total Organic Carbon (TOC) genoemd) in het water, welke de bulk uitmaakt van de oxideerbare componenten. Om de oppervlakte vraag te verminderen kunnen twee benaderingen worden toegepast:

- het aanbieden van meer UV-licht door middel van inzet van UV-lampen (verhogen dosis), of
- het vooraf verwijderen van de TOC (verlagen benodigde dosis door verlaging vervuilingsvracht).

Met behulp van UV-A ondersteuning (24 uur, 18 W/m²) kan het benodigde oppervlak verkleind worden tot maximaal 100-200 m² (0,2-0,4% van het kasoppervlak). Bij de poeders en de gecoate glaspereels zorgt UV-A ondersteuning voor een toename in de jaarlijkse kosten aangezien de hoeveelheid poeder niet verandert (afhankelijk van te behandelen volume). Bij de films zorgt UV-A ondersteuning voor een afname in kosten, aangezien er minder filmoppervlak benodigd is waardoor de kosten voor TiO₂ en hardware afnemen. Op basis van de gemiddeld benodigde dosis is inzet van geïmmobiliseerd TiO₂ (op 25 µm glaspereels) of een TiO₂ film met UV-A ondersteuning het meest interessant voor behandeling van de spuiwater stroom (0,4% kasoppervlak, 1,6-1,8 €/m³). De poeders kennen een gelijke of lagere oppervlakte vraag maar kennen hogere kosten. De hogere kosten komen met name voort uit de benodigde afscheiding. Aangezien voor de poeders een zeer dicht membraan benodigd is (NF/RO) liggen de kosten relatief hoog. De afscheiding is bij de glaspereels aanzienlijk goedkoper aangezien deze uit zichzelf bezinken. Bij de films is het benodigde oppervlak enkel afhankelijk van de benodigde dosis.

In het tweede scenario is gekeken naar het perspectief van verwijdering van gewasbeschermingsmiddelen uit water waar de TOC vracht reeds uit is verwijderd. Voor deze toepassing bieden films met UV-A ondersteuning de beste perspectieven gezien het beperkte benodigde oppervlak en de relatief lage kosten (0,3% kasoppervlak, 1,6 €/m³ inclusief TOC verwijdering). Er wordt verwacht dat geïmmobiliseerd TiO₂ (bijv. op glaspereels) een vergelijkbare prijs kent voor de afbraak van gewasbeschermingsmiddelen. De kosten voor TOC verwijdering liggen naar verwachting rond 0,30 €/m³ bij een schaalgrootte van 10 m³ per dag.

De twee scenario's (Reactive Blue/GBM verwijdering) laten zien dat UV-A ondersteuning benodigd is om te komen tot technische en economische haalbare FKO-concepten in de glastuinbouw (indien geen wezenlijke concessies aan het vloergebruik en/of de dakconstructie worden gedaan).

9.6 Vergelijking met alternatieve technieken voor afbraak gewasbeschermingsmiddelen

De economische evaluatie heeft laten zien dat FKO met name interessant is voor toepassing op het spuiwater nadat TOC verwijderd is. Deze toepassing komt sterk overeen met alternatief oxidatie- of verwijderings- technieken die toegepast worden om gewasbeschermingsmiddelen te verwijderen. Om te bepalen of FKO interessant is als alternatief voor deze technieken is een vergelijking gemaakt. De resultaten worden beschreven in Tabel 22.

Tabel 22: Vergelijking technieken voor afbraak/verwijdering gewasbeschermingsmiddelen

Type techniek	Oppervlakte (voor circa 2,5 m3/uur)	Oppervlakte voor 10 m3/dag	Kosten per m3 obv 5 ha en 500 m3/ha/jr	Effectiviteit	Dosis UV (voor 12 middelen tegelijk) (**)	H ₂ O ₂	Ozon	Opmerkingen
TiO ₂ poeder zonder UV-A ondersteuning	3.630	605	3,3	90%	600-1080 mJ/cm ²	-	-	
TiO ₂ poeder met UV-A ondersteuning	820	137	4,2	90%		-	-	
Geïmmobiliseerd TiO ₂ op glaspereels zonder UV-A ondersteuning	5.000	860	1,5 - 1,8	90%	600-1080 mJ/cm ²	-	-	Inschatting obv prijzen voor Reactive blue afbraak en 30% lagere effectiviteit tov poeders
Geïmmobiliseerd TiO ₂ op glaspereels met UV-A ondersteuning	1.200	200				-	-	
TiO ₂ film zonder UV-A ondersteuning	10.800	1.800	0,8	90%	500 mJ/Cm ²	-	-	
TiO ₂ film met UV-A ondersteuning	820	137	1,3	90%	500 mJ/Cm ²	-	-	
Ozon	2-4 m2	0.8 m2 (*)	2,6	80-90%	-	-	Concentratie niet bekend	
H ₂ O ₂ + LDUV	2-4 m2	0.8 m2 (*)	1,9	80-90%	500-1000 mJ/Cm ²	50 mg/l	-	
H ₂ O ₂ + MDUV	2-4 m2	0.8 m2 (*)	2,5	80-90%	500-1000 mJ/Cm ²	50 mg/l	-	
Ozon + Actief kool (in serie geschakeld)	2-4 m2	0.8 m2 (*)	3,4	100%	500-1000 mJ/Cm ²	Conc. onbekend	-	
ECF	>4 m2	> 0.8 m2 (*)	-	40%	-	-	-	In theorie hoger

(*) op basis van [24] en [25]: bij een circulatiedebiet van 2,4 m³/h is circa 4 m² nodig. Dit komt neer op circa 2 m² per m³/h. Voor 10 m³/dag is dan 0,8 m² nodig.

(**) FKO waarden zijn op basis van een concentratie van 5 µg/l per middel. De waarden voor UV + H₂O₂ zijn gebaseerd op een concentratie van 50 µg/l.

Er is te zien dat de benodigde dosis voor de afbraak van gewasbeschermingsmiddelen voor de diverse oxidatie technieken sterk overeenkomt. Dit kan wellicht verklaard worden uit het feit dat de oxidatie technieken (exclusief ozon) allen gebruik maken van OH-radicalen die op basis van UV geproduceerd worden. Uit de resultaten komt ook duidelijk naar voren dat voor FKO aanzienlijk meer oppervlak nodig is aangezien de beschikbare lichtintensiteit lager ligt (max 18 W/m² met UV-A ondersteuning) dan te bereiken met UV-C lampen (120 W bij pilot testen in [25]). Als gekeken wordt naar de kosten is toepassing van FKO poeders bij een concentratie van 1 gr/l te behandelen water economische gezien niet interessant t.o.v. de conventionele technieken door de relatief hoge kosten voor afscheiding. Geïmmobiliseerd TiO₂ op glasparels kent naar verwachting een concurrerende prijs ten opzichte van de conventionele technieken. De TiO₂ films kennen wel een concurrerende prijs, maar vragen nog extra ontwikkeling met betrekking tot de mechanische bestendigheid.

Op basis van de bovenstaande uitkomsten kan geconcludeerd worden dat geïmmobiliseerd TiO₂ (op glasparels en als film) goede perspectieven biedt voor toepassing in de glastuinbouw mits voldoende oppervlak beschikbaar is welke niet concurreert met de teelt (bijv. schuurdaken).

9.7 Vergelijking met alternatieve technieken voor desinfectie

Hieronder is een vergelijking weergegeven tussen desinfectie met UV-C versus desinfectie met FKO. Voor FKO is een eerste inschatting gemaakt op basis van de literatuur [26], aangezien deze laat zien welke prestatie er in potentie haalbaar is. De vergelijking gaat uit van de kosten voor enkel desinfectie. Wanneer naast ziektekiemen ook andere stoffen afgebroken moeten worden moeten de benodigde oppervlakken opgeteld worden.

In hoofdstuk 7 is vastgesteld dat de afbraaksnelheid voor *Agrobacterium Rhizogenes* naar verwachting in sterke mate overeenkomt met de waarde voor afbraak van Reactive Blue. Met oog hierop is voor de onderstaande vergelijking gebruikt van de oppervlaktes en kosten die volgen uit de economische evaluatie voor afbraak van Reactive Blue.

De waarden voor UV-C desinfectie zijn gebaseerd op de businesscase die opgesteld is tijdens het Glastuinbouw Waterproof: substraatteelt project.

Type	Benodigd maximaal oppervlak voor 10 m ³ /dag (m ²)	Kosten (€/m ³ spui)	Opmerkingen
TiO ₂ poeder			
Desinfectie zonder UV-A ondersteuning)	3.550	3,3	Obv literatuurwaarde
Desinfectie met UV-A ondersteuning)	180	3,75	
UV-C desinfectie	0,8 (*)	0,25	Indien er reeds een UV-C installatie voor de drain aanwezig is waarin ook de spui kan worden behandeld
	0,8 (*)	0,5	Indien een UV-C installatie geplaatst moet worden voor behandeling van het drain- en spuiwater

(*) Gebaseerd op oppervlakbehoefte LDUV voor afbraak gewasbeschermingsmiddelen

De bovenstaande vergelijking laat zien dat het niet loont om desinfectie met FKO poeder in te zetten ten opzichte van desinfectie met UV-C. Indien er reeds een UV-C installatie aanwezig is op het bedrijf kan eenvoudig en tegen lage kosten gebruik gemaakt worden van de bestaande apparatuur. Wanneer een UV-C installatie aangeschaft moet worden zal deze ook voor de drainwater stroom ingezet kunnen worden. De kosten per m³ zijn ook in dit geval beperkt.

Uitgaande van de kosten voor afbraak van Reactive Blue zouden gecoate glasparels of een TiO₂ film de kosten kunnen verlagen. Echter wordt ook in dit geval niet het prijsniveau van UV-C desinfectie bereikt.

10 Discussie

10.1 Adsorptie versus afbraak

In de praktijk zal gebruikt gemaakt worden van initieel schoon TiO₂ poeder. Dit betekent dat de drijvende kracht voor adsorptie in het begin hoog is. Op basis van de resultaten wordt verwacht dat in de eerste 5-10 minuten adsorptie dominant totdat er een evenwicht is bereikt tussen adsorptie/desorptie van componenten aan/van het TiO₂. Hierna zal naar verwachting afbraak dominant worden.

10.2 Afbraak Reactive Blue

De resultaten laten zien dat de afbraaksnelheid voor Reactive Blue door de film gelijk of licht hoger is dan voor de poeders (na correctie voor het verschil in oppervlak, dosis en behandeld volume). Er werd verwacht dat het verlies aan buitenoppervlak door immobilisatie en diffusieverschijnselen in de laag beperkend zouden werken op de afbraaksnelheid. Wellicht is dit effect gecompenseerd door het feit dat door het grote volume de gemiddelde concentratie aan Reactive Blue op het TiO₂ tijdens het experiment hoog blijft.

10.3 Effect reiniging film

De resultaten laten zien dat de afbraaksnelheid van de P25 film voor en na reiniging vrijwel gelijk zijn. De donkeradsorptie na reiniging is beperkt of afwezig wat betekent dat het oppervlak nog steeds in sterke mate verzadigd is. Aangezien waargenomen werd dat de kleur verdwenen was betekent dit dat er nog kleurloze afbraakproducten aanwezig zijn die goed adsorberen. De resultaten komen, op de beperkte adsorptie na, overeen met de resultaten zonder reiniging. Lange duur proeven worden aanbevolen om te bepalen of de afbraaksnelheid constant blijft.

10.4 Effect nutriënten en vervuiling

De afname van de afbraaksnelheid voor Reactive Blue in praktijk- of standaardwater is mogelijk te verklaren door:

- Transmissieverschillen in UV-A gebied
- Aanwezigheid van radicaalscavengers, zoals bicarbonaten
- Veranderingen in adsorptiegedrag van Reactie Blue

Uit navraag bij Priva bleek dat geen afname van de transmissie in standaardwater is te verwachten in het UV-A gebied, zodat de belangrijkste oorzaken voor de afname in standaardwater in de twee andere verschijnselen gezocht moet worden.⁵

⁵ Nitraat heeft een sterk verlagend effect op de T10 waarde (transmissie waarde nadat het licht door 10 mm water is gepasseerd) bij golflengten onder 250 nm en een klein effect rond 330 nm. Bij hogere golflengten heeft het geen effect meer. IJzerchelaten verlagen de T10 sterk rond 200-

Het effect van praktijkwater is groter dan op basis van de afname in beschikbaar UV-A licht wordt verwacht en wordt dus niet enkel veroorzaakt door een beperkte transmissie. Een snelheidsbeperking door de aanwezige radicaalscavengers zal ongetwijfeld optreden, maar waarschijnlijk niet veel groter zijn dan in het standaardwater. Er kan daarom kan worden geconstateerd dat concurrentie van andere (organische) stoffen in de adsorptie een grote rol speelt. Deze stoffen concurreren in de fotokatalytische afbraak met Reactive Blue. Een belangrijke aanwijzing hiervoor is dat de zogenaamde donkeradsorptie van Reactieve Blue bij praktijkwater veel kleiner is.

10.5 Effect lichtintensiteit

Er is te zien dat voor P25 de afname in lichtintensiteit (circa 28x lager) resulteert in een circa 40x lagere afbraaksnelheid in het onderzochte bereik. Voor de overige poeders (behalve ZnO) bedraagt de afname in afbraaksnelheid 5-15x. De overige poeders worden dus effectiever bij lagere lichtintensiteit (circa 2-5x). P25 presteert binnen deze proevenserie dus aanzienlijk slechter dan de rest. Dit is tegen de verwachting in; de afname zal nooit meer zijn dan de afname in lichtintensiteit. Aanvullende proeven zijn gewenst om met meer zekerheid de prestatie van de verschillende poeders bij lage lichtintensiteiten vast te stellen.

De resultaten laten zien dat het effect van lichtintensiteit bij ZnO op de afbraaksnelheid beperkt is. Bij ZnO bedraagt de afbraaksnelheid bij 0,63 W/m² nog circa 66% (factor 1,5x lager) van de waarde bij 13 W/m², dit betekent dat de effectiviteit bij wintercondities 14x zo hoog ligt als bij zomer-condities. De resultaten voor ZnO zijn opmerkelijk beter dan voor de overige poeders. Een mogelijke verklaring zou kunnen dat ZnO ook katalytische eigenschappen heeft en dus ook zonder licht een afbrekende werking heeft. Aanvullende proeven zijn nodig om deze hypothese te toetsen.

10.6 Afbraak gewasbeschermingsmiddelen

Op dit moment is niet bekend welke proces (adsorptie/afbraak) het meest bijdraagt aan de verwijdering van de gewasbeschermingsmiddelen. Het merendeel van de afname bij de proef met de poeders vond plaats binnen 10 minuten. Voor Reactive Blue is vastgesteld dat er in de eerste 5-10 minuten met name adsorptie aan het TiO₂ plaats vindt. Donker adsorptie tests met gewasbeschermingsmiddelen zijn gewenst om vast te stellen of dit ook geldt voor de gewasbeschermingsmiddelen. De resultaten laten zien dat de benodigde dosis voor de afbraak van gewasbeschermingsmiddelen voor de diverse oxidatie technieken sterk overeenkomt. Dit kan wellicht verklaard worden uit het feit dat de oxidatie technieken (exclusief ozon) allen gebruik maken van OH-radicalen die op basis van UV geproduceerd worden.

Vergeleken met het P25 poeders ligt de afbraaksnelheid bij de P25 film een factor 64x lager. Echter lag de concentratie circa 600x lager. De P25 film laat hiermee een 10x hogere effectiviteit zien ten opzichte van het P25 poeder. Een mogelijke oorzaak hiervoor is de overmaat aan gewasbeschermingsmiddelen bij de proeven met het P25 poeder.

300 nm, het effect is sterk gekoppeld aan de concentratie. In beide gevallen zijn de effecten van nutriënten op de transmissie in het UV-A (315-400 nm) bereik beperkt tot afwezig.

Hierdoor kan het poeder snel verzadigd zijn geraakt waardoor de afbraak geremd wordt door de afvangst van UV-A licht en als gevolg van de beperkte ruimte voor adsorptie van nog af te breken middelen.

Uit de proeven met Reactive Blue kwam naar voren dat de TiO₂ poeders en de TiO₂ film een vergelijkbare afbraaksnelheid kennen. Gezien de vergelijkbare molecuulstructuur wordt verwacht dat de prestatie van de poeders en de film voor de gewasbeschermingsmiddelen ook vergelijkbaar zal zijn.

10.7 Afbraak remmiddelen

De beperkte afbraak kan mogelijk verklaard worden aan de hand van twee oorzaken:

- Lage intensiteit van menging
- Lage concentratie werkzame stof (<1% TiO₂ in de coating)

Deze twee mogelijke oorzaken worden hieronder verder toegelicht.

Tijdens de teelttafelproef is geen menging toegepast, om de werking van een eb-en vloed opzetting te simuleren. Voorafgaand aan de monsternamen zijn de bakken wel licht geschud om een goede verdeling te krijgen en zo een representatief monster te kunnen nemen.

Zoals beschreven in paragraaf 2.1 vindt afbraak enkel plaats op of nabij het TiO₂ deeltje. Door de beperkte menging zal de Alar in de bulk van de vloeistof (buiten de grenslaag van de coating) naar verwachting beperkt in contact komen met de coating en/of de door de coating geproduceerde radicalen. Transport van de Alar naar de coating kan immers, bij geen menging, enkel door diffusie plaatsvinden wat langzaam is. De waargenomen omzetting wordt mogelijk enkel bereikt door het schudden voorafgaand aan de monsternamen.

Een belangrijke factor met betrekking tot de gevonden activiteit is de lage concentratie aan TiO₂ in de gebruikte TitanProtect coating (0,85% werkzame stof). Er wordt verwacht dat een TiO₂ film of poeder (\approx 100% werkzame stof) tot een afbraak zal leiden die vergelijkbaar is als gevonden voor de gewasbeschermingsmiddelen, mede gezien de vergelijkbare molecuulstructuur van de gewasbeschermings- en remmiddelen.

Middels een extra proevenversie kan deze hypothese snel getest worden.

10.8 Desinfectie

Met de TitanProtect coating is circa een log 3 verwijdering bereikt na 24 uur. Deze lange contact tijd komt naar verwachting voort uit het lage percentage werkzame stof (0,85%). Als gekeken wordt naar de resultaten met Reactive Blue met de recirculatie opstelling was te zien dat de P25 film aanzienlijk beter werkt dan de TitanProtect coating. Er wordt verwacht dat dit ook geldt voor desinfectie en dat met de film een verkorting van de benodigde contact tijd voor een log 5 reductie kan worden bewerkstelligd. Gezien de resultaten moet verwacht worden dat de TiO₂ - film een benodigde contacttijd kent van meer dan 30 minuten. Proeven met een langere duur zijn nodig om de desinfecterende werking van de TiO₂ film vast te stellen.

De ATP-metingen laten een initiële toename zien en dalen vervolgens significant. Het is mogelijk dat de bacteriën onder stress ATP vrijgeven (dit effect wordt beschreven in de literatuur) en dat later afdoding de overhand neemt. Echter is het lastig om de resultaten te interpreteren. Het is mogelijk dat een deel van het door de bacteriën uitgescheiden ATP door de OH-radicalen wordt afgebroken waardoor een vertekend beeld ontstaat. Hiernaast is het moeilijk om onderscheid te maken tussen levende en net gedode cellen aangezien beiden nog ATP afgeven. Pas na enige tijd zal de ATP voorraad van een dode cel op zijn en kan echt een onderscheid tussen levend/dood worden gemaakt. Om deze reden is besloten de ATP metingen niet verder te beschouwen.

Uit de uitgevoerde analyses kwam naar voren dat de startconcentraties van *Agrobacterium Rhizogenes* tijdens de desinfectie proeven niet gelijk zijn geweest. Hierdoor kan geen goede onderlinge vergelijking gemaakt worden. Proeven bij gelijke condities worden aangeraden. Hiernaast wordt aanbevolen om onderzoek uit te voeren naar het effect van diverse parameters op de desinfecterende werking van het TiO₂ om zo de optimale instellingen te kunnen bepalen.

10.9 Voorkomen van TiO₂ emissies

10.9.1 Inleiding

Zoals beschreven in paragraaf 4.3.2.3 heeft de sector de wens geuit dat voorkomen dient te worden dat emissies van TiO₂ naar het milieu plaatsvinden en/of dat TiO₂ in het product terecht kan komen.

Voor de poeders betekent dit dat deze goed afgescheiden moeten kunnen worden uit het water. Voor de TiO₂ films en coatings geldt dat deze niet afgespoeld moeten worden door het water en dat deze een hoge bestendigheid kennen tegen krassen en vegen.

De eventuele aanwezigheid van TiO₂ in het product vormt naar verwachting geen probleem voor de voedselveiligheid, aangezien TiO₂ reeds in levensmiddelen wordt toegepast onder E-nummer 171. Het wordt voornamelijk toegepast in tandpasta en medicijnen.

ZnO kan in het licht zure tuinbouwwater langzaam oplossen. Zink is een micronutriënt maar te hoge niveaus kunnen schadelijk zijn. Bij vergelijkbare prestaties heeft toepassing van TiO_2 daarom de voorkeur.

10.9.2 *Afscheiding TiO_2 poeders*

Voor afscheiding van de fijne TiO_2 poeders is naar verwachting UF/NF/RO membraanfiltratie benodigd.

Bij toepassing van TiO_2 op kleine glas- of zanddeeltjes zal afscheiding gemakkelijk zijn (bezinking volstaat, eventueel fijn filter).

10.9.3 *Bestendigheid TiO_2 films (o.b.v. dipcoating)*

De geprepareerde films op de glasplaatjes laten een lage mechanische bestendigheid zien. Het TiO_2 is makkelijk van het glasplaatje af te vegen.

Uit een 24 uren proef met een 2x hogere langsstroomsnelheid (30 liter/min) is gebleken dat het TiO_2 goed blijft zitten op het glasplaatje. Er zijn geen meetbare verschillen in UV-A adsorptie door de film vastgesteld. Op basis van deze resultaten kan worden gesteld dat de laag wel in hoge mate bestand is tegen water wat er over heen stroomt.

De lage slijt- of veegvastheid is te verklaren uit de ruimtelijke open/vlokkerige structuren van de films. Vanwege het open karakter van de film zal de hechting van de laag beperkt zijn. Om sterkere, meer krasbestendige lagen te verkrijgen kunnen waarschijnlijk binders zoals in coatings of sol-gel methoden worden toegepast. Er worden dan dichtere, meer solide lagen verkregen die naar verwachting een betere (onderlinge) hechting van deeltjes geven. Desalniettemin zal een laag op basis van P25 vrij kwetsbaar blijven.

Etsen van het glas voor het aanbrengen van de film kan ook zorgen voor een versterking van de binding met de ondergrond en bovendien het beschikbare oppervlak iets vergroten. Als alternatief kan een glasvezeldoek worden ingezet, waar het effectieve oppervlak meer dan het honderdvoudige van een glasplaat is. Dit vergemakkelijkt het aanbrengen van voldoende TiO_2 (er zijn geen meerdere dompelingen nodig). Met betrekking tot de bestendigheid tegen slijtage geldt echter hetzelfde als hierboven is vermeld.

10.9.4 *Bestendigheid Titanprotect coating*

Uit opgave van de leverancier komt naar voren dat de coating resistent is tegen vrijwel alle chemicaliën. Alleen waterstof-fluoride of heet geconcentreerd zwavelzuur is schadelijk voor de coating.

Naar verwachting van de leverancier kent de coating geen hoge bestendigheid tegen mechanische belasting. Er wordt verwacht dat de levensduur van de laag zeker één jaar is en mogelijk langer, echter hangt dit sterk af van hoe vaak het oppervlak gereinigd wordt, hoeveel water er langs loopt en type deeltjes in het water. Praktijktesten in een glastuinbouwbedrijf zijn nodig om met zekerheid uitspraken over de duurzaamheid van de coating te kunnen doen.

11 Conclusies en aanbevelingen

Het onderliggende onderzoeksproject heeft zich gericht op het vertalen van bewezen werkingsprincipe van FKO naar een voor de glastuinbouw geschikt technologieconcept ("proof of concept"). Hiervoor is de lichtbeschikbaarheid in en rondom de kas bepaald, zijn toepassingsmogelijkheden in de glastuinbouw geïdentificeerd en zijn mogelijke technologieconcepten geformuleerd. De meest perspectiefrijke concepten zijn vervolgens op laboratoriumschaal onderzocht.

De onderstaande concepten zijn geselecteerd:

- schermen met TiO₂ films/coatings
- toepassing van poeders in het regenwaterbassin
- gecoate teeltgoot (zijkanen)
- gecoate teeltvloer.

Tijdens het experimenteel onderzoek zijn de diverse poeders, film en coatings getest. Hierbij is gekeken naar de afbraak van een modelstof (Reactive Blue), de afbraak van gewasbeschermings-/rem-middelen en de potentie voor desinfectie. Tijdens de proeven is ook de invloed van diverse parameters (donkeradsorptie, aanwezigheid van nutriënten en/of vervuiling en de lichtintensiteit) op de werking van FKO onderzocht.

Op basis van de uitkomsten van het experimenteel onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Algemeen

- FKO is in staat om kleurstof en gewasbeschermingsmiddelen af te breken en *Agrobacterium Rhizogenes* af te doden en volgt daarbij een eerste orde kinetiek. Er wordt verwacht dat dit ook geldt voor de remmiddelen.
- De effectiviteit van de TiO₂ film en de TiO₂ poeders is vergelijkbaar bij de geteste omstandigheden. Een eventuele nadelig effect van de immobilisatie wordt blijikbaar grotendeels gecompenseerd door grotere oppervlakteconcentratie van de modelstof (door de grotere drijvende kracht voor adsorptie).
- Voor een effectieve werking van FKO is een goed contact nodig tussen af te breken stof en het TiO₂. De beste resultaten worden bereikt met een goede menging van een TiO₂ suspensie en/of een dunne laag water op de filmreactor.
- Er wordt geen effect op de gewasgroei verwacht gezien de scheiding van TiO₂ in het FKO proces met het gewas en de lage lichtbeschikbaarheid rondom de wortels van het gewas.

Desinfectie

- Op basis van de literatuur wordt verwacht dat een contactduur van <145 minuten benodigd zal zijn voor een log 5 reductie voor een concentratie van 10^{16} CFU/ml met behulp van P25 poeder.
- De praktijkwaarde voor desinfectie met P25 poeder ligt circa 7x lager dan de literatuurwaarde. Er wordt verwacht dat optimalisatie van de proefopzet en/of voorbehandeling van het TiO₂ deze afname kan compenseren.

Adsorptie versus afbraak

- Bij gebruik van nieuw TiO₂ zal de eerste 5-10 minuten adsorptie aan het TiO₂ plaatsvinden totdat het adsorptie-evenwicht is bereikt. Na deze adsorptie wordt afbraak dominant.
- ZnO en Hombikat laten de beste prestatie zien van de geteste poeders. Kronos 7050 laat met name een sterke adsorptie zien.
- Bij de TiO₂ poeders speelt donkeradsorptie een belangrijke rol vanwege het hoge specifieke oppervlak. Bij de films speelt dit minder aangezien een deel van het oppervlak door de immobilisatie niet meer beschikbaar is. Een hoger oppervlak leidt tot een hoger percentage aan geadsorbeerde Reactive Blue (>75%). ZnO en Kronos 7050 laten de sterkste adsorptie zien.

Effect nutriënten en vervuiling op de werking van FKO

- Nutriënten in het water (0- 14 mmol/l) zorgen voor een beperkte afname van afbraaksnelheid (0-50%). In praktijkwater wordt een gemiddelde afname in afbraaksnelheid gevonden van minimaal 50%; dit als gevolg van andere opgeloste organische stoffen die met de kleurstof of GBM's concurreren in de adsorptie en afbraak. Praktijkwaarden voor FKO zullen derhalve tenminste 2x lager zijn dan de waarden gemeten in demiwater.

Effect lichtintensiteit

- Een verlaging van lichtintensiteit met een factor 10-20 leidt tot een verlaging van de afbraaksnelheid met een factor 4-10. Dit betekent dat het FKO proces bij een lagere lichtintensiteit efficiënter omgaat met de beschikbare fotonen (factor 2-5x). Dit laat tevens zien dat de diffusie van kleurstof in de film niet snelheid beperkend is geweest. Er kan worden geconcludeerd dat aanvoer van licht bepalend is voor de afbraaksnelheid.

Economische evaluatie

- Met behulp van UV-A ondersteuning kan het benodigde oppervlak sterk verkleind worden. Hiermee wordt een economisch en technisch interessant FKO-concept verkregen. Op basis van de gemiddeld benodigde dosis is inzet van geïmmobiliseerd TiO_2 (op 25 μm glasporels) of een TiO_2 film met UV-A ondersteuning het meest interessant voor behandeling van de spuiwater stroom (0,4% kasoppervlak, 1,6-1,8 €/m³). De kosten voor de poeders liggen aanzienlijk hoger (>3 €/m³) als gevolg van de benodigde afscheiding met NF/RO
- Op basis van de gehanteerde uitgangspunten zijn de geselecteerde concepten zonder ondersteuning met UV-A lampen, dus met alleen daglicht niet haalbaar voor behandeling van het spuiwater in de glastuinbouw. Het benodigde oppervlak is namelijk groter dan 6% van het kasoppervlak. De kosten bedragen 1,5 €/m³ voor de gecoate glasporels, circa 3,3 €/m³ voor de TiO_2 poeders en circa 0,6-1,3 €/m³ voor de TiO_2 films.
- Na TOC verwijdering (bijvoorbeeld met elektroflotatie) kan FKO ingezet worden om de resterende middelen in het spuiwater af te breken. Op basis van [24] wordt verwacht dat na TOC verwijdering circa 50-60% van de gewasbeschermingsmiddelen resteert. Bij een volledig verwijdering van TOC kan zonder UV-A ondersteuning volstaan worden met ca. 0,3% van het kasoppervlak waarbij de kosten 1,3 en 4,0 €/m³ (exclusief TOC-verwijdering) bedragen voor respectievelijk de films en poeders. De kosten voor TOC-verwijdering bedragen naar verwachting circa 0,30 €/m³.

Op basis van de onderzoeksresultaten zijn de onderstaande aanbevelingen voor vervolgstudie geformuleerd:

Evaluatie concepten in vervolgproject (tbv demonstratie in de glastuinbouw)

- Evaluatie van geïmmobiliseerd TiO₂ met UV-ondersteuning, FKO + TOC-verwijdering en andere toepassingsvormen, gevolgd door demonstratie van de meest haalbare variant
- Evaluatie van toepassing van een TiO₂ op of in het kasdek bij nieuwbouw (bijv. combinatie met Flow Deck systeem), gericht op ontwikkeling nieuwe kasconcepten

Verbeteren bestendigheid TiO₂ films

- Onderzoek naar het produceren van bestendige TiO₂ films voor het coaten van glaspereels of platen., bijvoorbeeld op basis van sol-gel methoden.

Aanvullende experimenten

- Lange-duurproeven voor bepaling van de vervuiling in de tijd (zodanig onderzoek naar verschillende methodes en tijdsduren voor reiniging van de TiO₂ film)
- Testen diverse lichtintensiteiten tussen 1 en 18 W/m² om een goed inzicht in de effectiviteit over het gehele bereik te krijgen
- Donker adsorptie tests met gewasbeschermingsmiddelen
- Onderzoeken mogelijke katalytische activiteit ZnO (d.w.z. dat het ook werkt zonder UV-A straling)

Afbraak remmiddelen

- Vaststellen afbraaksnelheid bij toepassing van uitvoeringsvormen met een hoger percentage werkzame stof, zoals TiO₂ films of poeders

Desinfectie

- Uitvoeren desinfectieproeven met TiO₂ films met een langere proefduur (≥24 uur)
- Aanvullende desinfectieproeven bij gelijke condities (ten behoeve van onderlinge vergelijking toepassingsvormen)
- Onderzoek naar effect parameters op desinfecterende werking voor de diverse TiO₂ toepassingsvormen

12 Referenties

1. The Testing of TiO₂ Photocatalytic Reaction to Inhibit of *Botryotinia fuckeliana*; F. Kobayashi; Journal of Agricultural Science; Vol 4; No 4; 2012
2. Solar Photo-inactivation of phytopathogens by trace level hydrogen peroxide and titanium dioxide photocatalysis; L. Muzkat et al; Phytoparasitica; Vol 33; No 3; 2005
3. Inactivation of *Escherichia coli* by Titanium Dioxide Photocatalytic Oxidation; J.C. Ireland et al; Applied and Environmental Microbiology; Vol 59; No 5; 1993
4. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review; M.N. Chong et al; Water Research; Vol 44; p. 2997-3027; 2010
5. Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview; S. Malato et al; Applied Catalysis B: Environmental; No 37; p. 1-15; 2002
6. Photocatalytic water treatment: solar energy applications; D. Bahnemann; Solar Energy, No 77; p. 445-459; 2004
7. Photocatalytic decontamination and disinfection of water - with solar collectors; S. Malato et al; Catalysis Today; No 122; p. 137-149; 2007
8. N-doped TiO₂ Nanostructured Coatings for Water Purification; D. Camillo; 2nd Dissemination Workshop of the Nano4water Cluster: Recent Advances in Nanotechnology-based Water Purification Methods; 2012
9. Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches; A. Fujishima, X. Zhang; Comptes Rendus Chimie; Volume 9; Issues 5-6; p. 750-760; 2006
10. Nitrogen-doped titanium dioxide photocatalysts for visible response prepared by using organic compounds; Y. Nosaka et al; Science and Technology of Advanced Materials, Volume 6, p. 143-148; 2005
11. <http://www.easypestsupplies.com.au/pestrol-outdoor-exterminator-mosquito-trap.html>, bezocht april 2013
12. http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/select_uur.cgi?language=nl, bezocht augustus 2012
13. <http://almashriq.hiof.no/lebanon/600/610/614/solar-water/idrc/01-09.html>
14. S. Hemming en H. Stijger; Onderzoek naar effect van UV-straling op groei en bloei planten; Onder glas, Nummer 4, april 2007
15. Dueck et al.; Wageningen UR Glastuinbouw; Rapport GTB -1158: Diffuus licht bij tomaat; 2012
16. J.W. Assink, J.M. Slaager; TNO; Daglicht gedreven fotokatalytische conversie voor duurzame productie van water Fase 1; TNO rapport; 2001
- 16b http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=markt_product&laag1=896&laag2=346&laag3=357&item_id=1531, bezocht juli 2013
17. Persoonlijke communicatie met Daniël Ludeking, plantenziekteneskundige Wageningen UR Glastuinbouw (sinds 01-05-2013 werkzaam bij Rijk Zwaan)
18. De Zwart et al.; Wageningen UR Glastuinbouw, LEI Wageningen; rapport GTB-1134: Benutting van zonne-energie in de tuinbouw – een strategische verkenning; 2011
19. <http://www.globalgreensolutionsinc.com/s/VertigroGallery.asp>, bezocht augustus 2012
20. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur.htm>, bezocht augustus 2012
21. <http://www.firstlight.nl/lampen/philips-zonnebank-lampen/philips-cleo-compact-pl-l-36w-4-pins-uv-a/>, bezocht augustus 2012
22. http://www.sbp-pil.com/docs/pdf/42_Fluoline3_CGE_UK_E_07_08.pdf; bezocht augustus 2012

23. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis; recent overview and trends; S. Malato et al; *Catalysis Today*; No 147; p. 1-59; 2009
24. J. van Ruijven, E. van Os, M. van der Staaij, E. Beerling; Wageningen UR Glastuinbouw; Evaluatie zuiveringstechniek voor verwijdering gewasbeschermingsmiddelen uit lozingswater glastuinbouw; 2012
25. Feenstra et al; TNO Waterbehandeling; Verwijdering van gewasbeschermingsmiddelen (GBM) uit spuiwater van de glastuinbouw; 2013
26. R. Aminedi et al; Shape-dependent bactericidal activity of TiO₂ for killing of Gram-negative bacteria *Agrobacterium Tumefaciens* under UV torch irradiation; *Environmental Science and Pollution Research*; Volume 20, Issue 9; pp 6521-6530, 2013
27. Jan Ruigrok; TNO; Eindrapport WP2 Aquatop project; maart 2012

13 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

Productschap Tuinbouw
t.a.v. Hester van Gent
Postbus 280
2700 AG ZOETERMEER

Namen en functies van de projectmedewerkers:

R.M. Jurgens MSc.
Ir. W.A.J. Appelman MBA

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

Juli 2012 – Maart 2013

Naam en paraaf tweede lezer:

Ir. W.A.J. Appelman MBA



Ondertekening: Autorisatie vrijgave:

Zeist, 22-08-2013

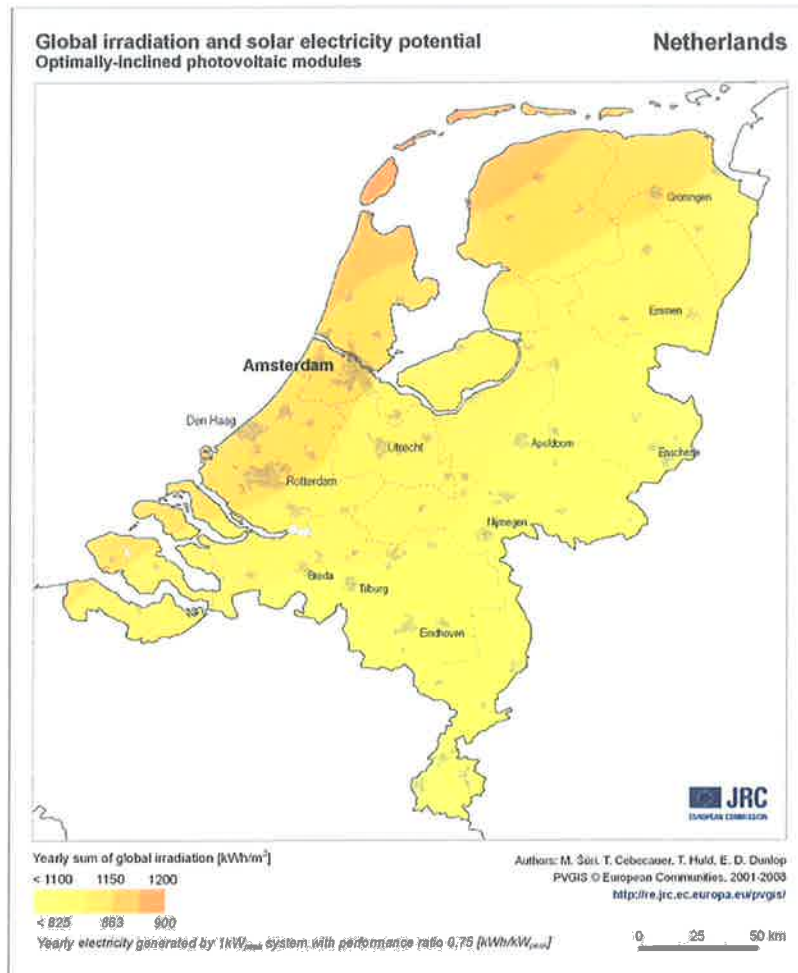


**Raymond Creusen,
(namens Henk Buijtenhek)**



René Jurgens

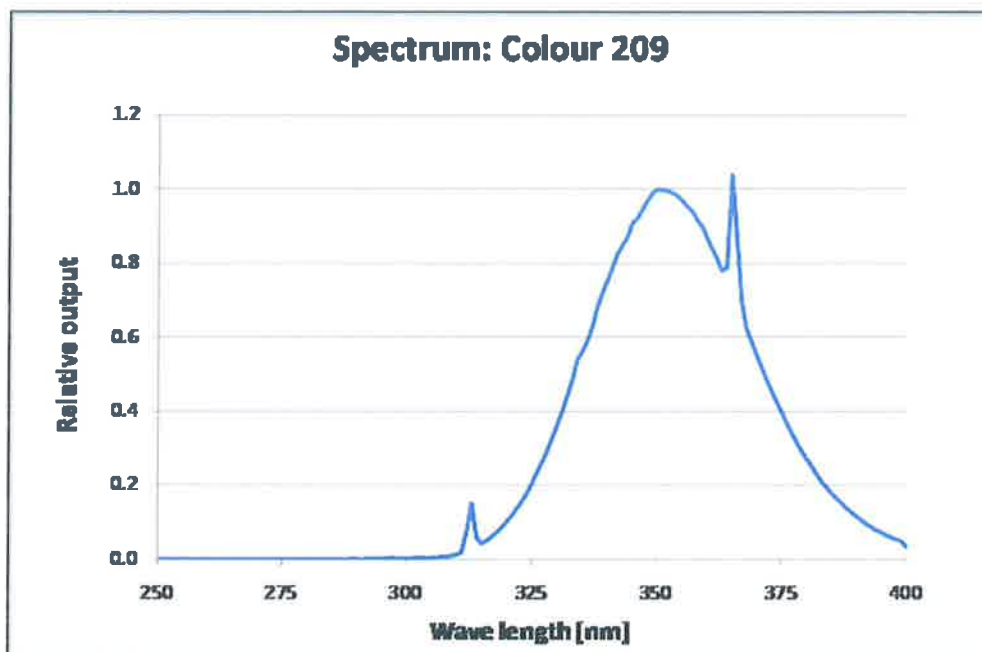
A Zon-instraling in Nederland



Figuur 40: Stralingsom per jaar uit zonlicht in Nederland [20]

B Informatie lampen armatuur

Spectrum toegepaste lampen



Figuur 41: Lichtspectrum Philips Cleo Compact 36W UV-A lampen [21]

Toegepast armatuur

De toegepaste UV-A lampen hebben een PL-L aansluiting. De meeste armaturen bieden deze aansluiting niet of hadden niet de gewenste maat. Het onderstaande armatuur (Fluoline 3) had de juiste afmeting voor toepassing in de zuurkast en bood de benodigde PL-L aansluiting.



Figuur 42: Fluoline 3 armatuur [22]

Toegepast voorschakelapparaat (ten behoeve van dimmen)

Er is een Vossloh Schwabe ELXd 136.720 in het armatuur ingebouwd om deze dimbaar te maken.

C Specificaties Reactive Blue

244813 SIGMA-ALDRICH

Reactive Blue 4

Dye content 35 %

◇ [DOWNLOAD MSDS \(PDF\)](#)

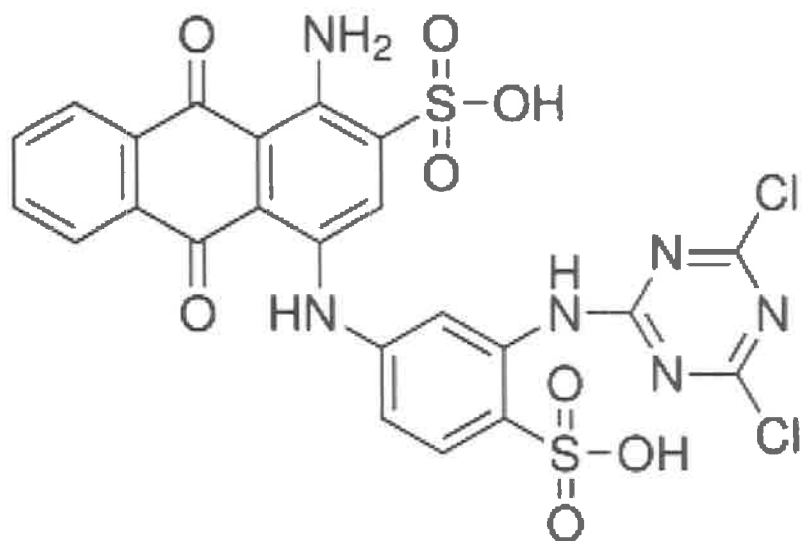
Synonym: **1-Amino-4-[3-(4,6-dichlorotriazin-2-ylamino)-4-sulfophenylamino]anthraquinone-2-sulfonic acid, Procion[®] blue MX-R**

CAS Number 13324-20-4 Empirical Formula (Hill Notation) $C_{23}H_{14}Cl_2N_6O_8S_2$ Molecular Weight 637.43

Beilstein Registry Number 602258 Colour Index Number 61205 EC Number 236-363-9

MDL number MFCD00001218 PubChem Substance ID 24854708 [↗](#)

 [POPULAR DOCUMENTS: SPECIFICATION SHEET \(PDF\)](#)



Figuur 43: Structuurformule Reactive Blue 4

D Informatie over toegepaste TiO₂ poeders en coatings

Type/Toepassingvorm	Specifiek oppervlak (m ² /g)	Grootte TiO ₂ deeltjes (nm)	
Aeroxide P25	35-65	21	
Aeroxide P90	70-110	14	
Kronos 7050	>225	15	
Hombikat, catalyst grade	35-65	Niet bekend	
ZnO (*)	Niet bekend	Niet bekend	
Pretiox PK60	20-30	Niet bekend	

N.B: TiO₂ poeder bestaat uit kleine vlokjes van enkele micrometers, gevormd door primaire deeltjes van ca. 10-20 nm.

Glasparels

De geteste glasparels zijn gecoat met P25 en hebben een diameter van circa 25 µm. De P25 laag is thermisch gefixeerd, waarna de glasparels enkele jaren in een glazen pot zijn bewaard. De laagdikte P25 is niet bekend.

TitanProtect

Tijdens het project is gebruik gemaakt van twee type TitanProtect coatings. TA2203 is toegepast voor het coaten van de teelgoten. TA2202 is gebruikt voor het coaten van de glasplaatjes en het PVC-folie.

Type/Toepassingvorm	Hoeveelheid actief materiaal	Grootte TiO ₂ deeltjes (nm)	Opmerkingen
TA2202 (voor kunststof oppervlakken)	0,8%	<8 nm	Gebruikt licht tot ca. 475 nm (*)
TA2203 (voor metalen ondergronden)	0,85%	<8 nm	Gebruikt licht tot ca. 475 nm (*)

(*) 300-400 nm is UV-A, 400-475 nm is zichtbaar licht (paars tot blauw)

E Preparatie methoden

Preparatieprotocol films op borosilicaat glasplaatjes

- Een suspensie van 10 g/l TiO₂ in demiwater aanmaken.
- De oplossing als coatingsuspensie gebruiken op borosilicaat glasplaten (gebruikte dimensies platen: 11 bij 11 cm en 1,1 mm dik).
- De glasplaat met constant snelheid onderdompelen en weer onttrekken aan de suspensie oplossing (ca. 3-4 mm/s; met behulp van de actuator).
- Aangebrachte laag TiO₂ deeltjes drogen met IR lamp.
- Tussendoor UV-transmissie meten. Als de resterende transmissie minder dan 25% van het opvallende licht wordt gestopt met aanbrengen van lagen. Zo niet, dan extra laag aanbrengen en weer drogen met IR.
- Na aanbrengen van de lagen wordt één zijde van het glas schoongeveegd (met een tissue/papier) en het TiO₂ gefixeerd door de plaat een uur lang te verwarmen bij 450°C.
- Na fixeren is het plaatje ondergedompeld in water voor controle op fixatie. Troebeling moet afwezig blijven, UV absorptie gelijk.

Prepareren gecoat glasvezeldoek

- Dompel het doek onder in de TiO₂ suspensie (zie hierboven). Tenminste 1 uur laten weken. Vervolgens doek uit vloeistof verwijderen en thermisch behandelen op 450 °C (aanzet tot sinteren).
- Massabalans maken om te bepalen hoeveel TiO₂ er aangebracht is (verschil tussen gewicht emmer + suspensie voor en na).

Aanbrengen TitanProtect coating op PVC-folie

- Gebruik de hoge druk verfspuit om eerst de TitanProtect primer aan te brengen. Hou voldoende afstand van de folie en beweeg de verfspuit om een goede verdeling te krijgen. Droog de laag met de IR lamp gedurende ten minste 30 minuten
- Bepaal met behulp van terugwegen hoeveel primer er aangebracht is. Een laag van circa 1 µm is voldoende.
- Breng vervolgens de TitanProtect coating aan.
- Bepaal met behulp van terugwegen hoeveel coating er aangebracht is. Een laag van circa 1 µm is voldoende.

Aanbrengen TitanProtect coating op borosilicaat glasplaatjes

- Er is geen primer benodigd.
- Gebruik de hoge druk verfspuit om de TitanProtect coating aan te brengen. Hou voldoende afstand van het glasplaatje en beweeg de verfspuit om een goede verdeling te krijgen. Droog de laag met de IR lamp gedurende ten minste 30 minuten.
- Bepaal met behulp van terugwegen hoeveel coating er aangebracht is. Een laag van circa 1 µm is voldoende.

F Specificaties UV-A meter

UVA LIGHT METER

Model : UVA-365*ISO-9001, CE, IEC1010*

FEATURES

- * Long wave 365 nm ultra-violet irradiance measurement.
- * Professional, high quality UVA meter.
- * Wide measurement range.
199.9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 1.999 mW/cm^2 and 19.99 mW/cm^2 .
- * Microprocessor circuit assures maximum possible accuracy, provided special functions and features.
- * Exclusive UVA sensor with correction filter.
- * Super large LCD display, easy readout.
- * Heavy duty & compact housing case.
- * Records Maximum, Minimum reading.
- * Data hold.
- * Auto power off saves battery life.
- * Operates from 9V battery.
- * RS 232 PC serial interface.
- * Zero adjustment by push button.

LUTRON ELECTRONIC

The Art of Measurement

UVA LIGHT METER

Model : UVA-365

FEATURES	
* Long wave 365 nm ultra-violet irradiance measurement.	
* Professional, high quality UVA meter.	
* Wide measurement range, 199.9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 1.999 mW/cm^2 and 19.99 mW/cm^2 .	
* Microprocessor circuit assures maximum possible accuracy, provided special functions and features.	
* Exclusive UVA sensor with correction filter.	
* Super large LCD display, easy readout.	
* Heavy duty & compact housing case.	
* Records Maximum, Minimum with recall.	
* Data hold.	
* Auto power off saves battery life.	
* Operates from 9V battery.	
* RS232 PC serial interface.	
* Zero adjustment by push button.	

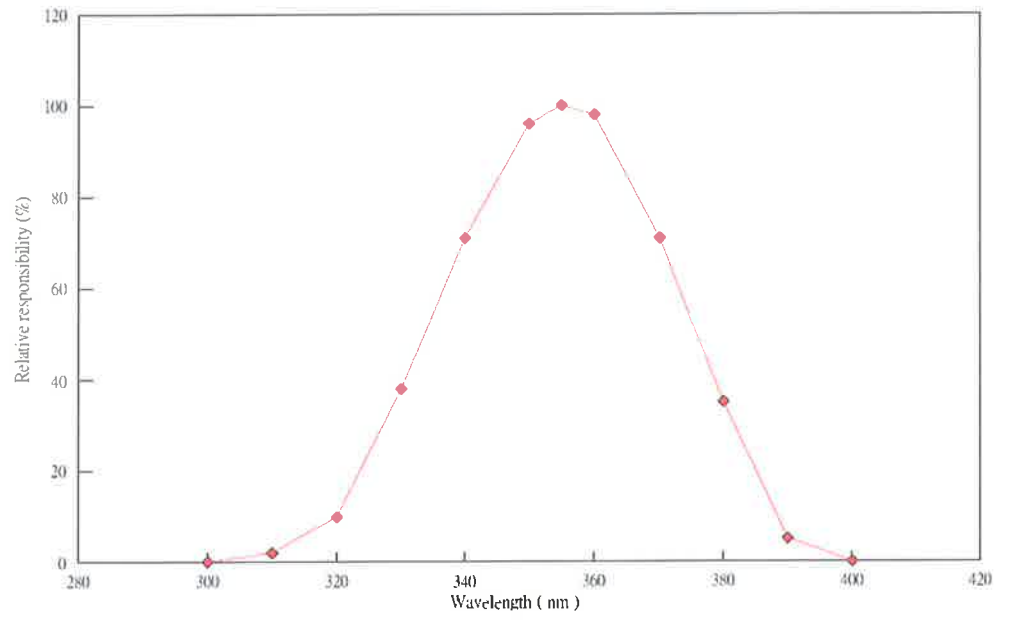
GENERAL SPECIFICATIONS				
Circuit	Custom one-chip microprocessor LSI circuit.		Data Output	RS232 PC serial interface.
Display	13 mm (0.5") large LCD display.		Operating	0 C to 50 C (32 F to 122 F).
	Dual function display.		Temperature and Humidity	Max. 80% RH.
Spectral response range of sensor	Point	365 nm.	Power Supply	DC 9V (016P, MN1604 (PP3) or equivalent. (Alkaline or Heavy duty type)).
	Band pass	320 - 390 nm.		
Measurement & ranges	199.9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ x 0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		Power	Approx. DC 5.3 mA.
	1.999 mW/cm^2 x 0.001 mW/cm^2		Current	
	19.99 mW/cm^2 x 0.01 mW/cm^2		Weight	355 g/0.77 LB (included batteries)
Linearity	$\pm 1\%$.		Size	Main instrument: 185 x 72 x 32 mm (7.1 x 2.8 x 1.3 inch). Sensor probe: 38 mm DIA. x 25 mm.
Sensor	The exclusive photo diode & UVA color correction filter.		Accessories included	Instruction manual..... 1 PC. UVA sensor probe..... 1 PC. Hard carrying case..... 1 PC.
Memory Recall	Records Maximum & Minimum reading with recall.			
Zero Adj.	By push button.		Optional accessories	* Data Acquisition software,SW-U801-WIN * RS232 cable.....UPCB-01 * USB cable.....USB-01
Sample Time	Approx. 0.4 sec.			
Power off	Manual off by push button, or auto shut off after 10 minutes approximately			
Over Range Indication	Indication of "----"			

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (23 \pm 5 C)		
Range	Resolution	Accuracy
199.9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	$\pm (2\% \text{ FS} + 2 \text{ dgt})$ FS : full scale
1.999 mW/cm^2	0.001 mW/cm^2	
19.99 mW/cm^2	0.01 mW/cm^2	

* Appearance and specifications listed in this brochure are subject to change without notice.

0607-UVA365

UVA-365 SENSOR SPECTRUM



G Detailuitkomsten economische evaluatie

Tabel 23: Benodigd belicht oppervlak voor verwijdering van Reactive Blue uit praktijkwater of GBM uit voorbehandeld spuiwater (TOC-verwijdering). Kasgrootte: 50.000 m²

Item	Eenheid	TiO ₂ poeder		TiO ₂ op glasparels		TiO ₂ film	
		zomer	winter	zomer	winter	Gemiddeld (feb-sep)	Winter (okt t/m jan)
Benodigd oppervlak o.b.v. <i>gemiddelde</i> dosis voor afbraak Reactive Blue in praktijkwater	m ²	810	3.550	850	3.710	940	2.920
Benodigd oppervlak o.b.v. <i>minimale</i> dosis voor afbraak Reactive Blue in praktijkwater	m ²	390	1.700	850	3.710	450	1.400
Benodigd oppervlak o.b.v. UV-A ondersteuning voor afbraak Reactive Blue in praktijkwater	m ²	40-90		97		50-100	
Benodigd oppervlak voor enkel GBM verwijdering uit spuiwater (geen UV-A ondersteuning)	m ²	605	2.640	-	-	600	1.800
Benodigd oppervlak voor enkel GBM verwijdering uit spuiwater (met UV-A ondersteuning)	m ²	140		-	-	137	

Tabel 24: Operationele kosten en kapitaallasten voor toepassing van FKO voor verwijdering van modelstof Reactive Blue uit praktijkwater

Item	Subitem	TiO ₂ poeder (*)	TiO ₂ op glasparels (*)	TiO ₂ film	
		Jaar-rond	Jaar-rond	Gemiddeld (feb-sep)	Winter (okt t/m jan)
Operationele kosten	Aanschaf TiO ₂ (o.b.v. gemiddelde UV dosis)	1.825	3.650	940 (**)	2.900 (**)
	Aanschaf TiO ₂ (o.b.v. minimale UV dosis)	1.825	3.650	450	1.400
	Aanschaf TiO ₂ o.b.v. UV-A ondersteuning (obv gemiddeld benodigde dosis)	1.825	3.650	102	102
	Aanschaf TiO ₂ o.b.v. UV-A ondersteuning (obv minimaalbenodigde dosis)	1.825	3.650	212	212
	Afscheiding (membraanfilter of bezinking)	1.820	110	-	-
	Elektriciteit voor UV-A ondersteuning (obv minimaal benodigde dosis)	504	1.220	630	
	Elektriciteit voor UV-A ondersteuning (obv gemiddeld benodigde dosis)	1.130	1.220	1.260	

Kapitaallasten (afschrijving in 5 jaar, 5% rente en 2% onderhoud)	Kapitaallasten TiO ₂ hardware (obv minimaal benodigde dosis)	-	-	970 (met UV-A: 108)	3.020 (met UV-A: 108)
	Kapitaallasten TiO ₂ hardware (obv gemiddeld benodigde dosis)			2.030 (met UV-A 216)	6.300 (met UV-A 216)
	Kapitaallasten afscheiding	8.400	440	-	-
	Kapitaallasten UV-A ondersteuning obv minimaal benodigde dosis)	450	1.090	560	
	Kapitaal lasten UV-A ondersteuning obv gemiddeld benodigde dosis	1.010	1.090	1.120	
	Kosten per m ³ (€/m ³) zonder UV-A ondersteuning bij minimaal benodigde dosis	3,3	1,5	0,38	1,2
	Kosten per m ³ (€/m ³) zonder UV-A ondersteuning bij gemiddeld benodigde dosis	3,3	1,5	0,8	2,6
	Kosten per m ³ (€/m ³) met UV-A ondersteuning bij minimaal benodigde dosis	3,6	1,8	0,4	
	Kosten per m ³ (€/m ³) met UV-A ondersteuning bij gemiddeld benodigde dosis	3,75	1,8	0,8	

(*) De hoeveelheid benodigd poeder/glasparels volgt uit de te gebruiken concentratie (gelijk aan de waarden gebruikt in hoofdstuk 5) en het te behandelen volume. De kosten betreffen de vervanging van de 20% poeder/glasparels die niet terug gewonnen kan worden na gebruik.

(**) Eenmalige aanschaf. Er is aangenomen dat de film 5 jaar meegaat.

Tabel 25: Operationele kosten en kapitaallasten voor toepassing van FKO voor verwijdering van gewasbeschermingsmiddelen uit voorbehandeld spuiwater (TOC-verwijdering)

Item	Subitem	TiO ₂ poeder (*)		TiO ₂ film	
		Jaar-rond		Gemiddeld (feb-sep)	Winter (okt t/m jan)
Operationele kosten	Aanschaf TiO ₂ (o.b.v. 1 gr poeder/liter water / benodigde oppervlak film voor 90% verwijdering GBM)	1.825	1.825	600 (**)	1.800
	Aanschaf TiO ₂ o.b.v. UV-A ondersteuning	1.825	1.825	140	140
	Afscheiding (membraanfilter)	1.820	1.820	-	-
	Elektriciteit voor UV-A ondersteuning	1.730		1.730	
Kapitaallasten (afschrijving in 5 jaar, 5% rente en 2% onderhoud)	Kapitaallasten TiO ₂ hardware	-	-	1.300 (met UV-A: 300)	4.060 (met UV-A: 300)
	Kapitaallasten afscheiding	8.400	8.400	-	-
	Kapitaallasten UV-A ondersteuning	1.540		1.500	
	Kosten per m ³ (€/m ³) zonder UV-A ondersteuning	3,3		0,52	1,6
	Kosten per m ³ (€/m ³) met UV-A ondersteuning	4,2		1,0	2,0

(*) De hoeveelheid benodigd poeder volgt uit de te gebruiken concentratie (gelijk aan de waarden gebruikt in hoofdstuk 5) en het te behandelen volume. De kosten betreffen de vervanging van de 20% poeder/glasparels die niet terug gewonnen kan worden na gebruik.

(**) eenmalige aanschaf. Er is aangenomen dat de film 5 jaar meegaat.