

Groen proceswater: zuivering brouwerijprocesafvalwater met microalgen

Auteurs:

Wim van Dijk, PPO-agv Wageningen UR Rommie van der Weide, PPO-agv
Wageningen UR Arthur Kroon, Algae Food & Fuel



Groen proceswater: zuivering brouwerijprocesafvalwater met microalgen

Auteurs:

Wim van Dijk, PPO-agv Wageningen UR

Rommie van der Weide, PPO-agv Wageningen UR

Arthur Kroon, Algae Food & Fuel

© 2016 Wageningen, ACRRES – Wageningen UR

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

ACRRES – Wageningen UR is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Projecttitel: Groen proceswater

Financiering via:

Project nr. 3250237600 Groen proceswater (2012-2014)

Project nr. 3250273800 TKI Kleinschalige Bioraffinage, onderdeel aquatisch (2015-2016)
BO-21.04-001-001, Deliverable D5.12a

Dit project is mede mogelijk gemaakt door:



Ministerie van economische
zaken, landbouw en innovatie



**Kleinschalige
Bioraffinage**



ACRRES – Wageningen UR

Adres : Edelhertweg 1, Lelystad
Postbus 430, 8200 AK Lelystad
Tel. : 0320 - 29 11 11
Fax : 0320 - 23 04 79
E-mail : info@acrres.nl
Internet : www.acrres.nl

Inhoudsopgave

SAMENVATTING.....	4
1 INLEIDING.....	7
2 EFFECTEN VOORBEHANDELING UASB-EFFLUENT	9
2.1 Inleiding.....	9
2.2 Uitvoering test	9
2.2.1 Beschrijving test-unit BTN.....	9
2.2.2 Uitvoering test.....	10
2.3 Resultaten	11
2.3.1 Samenstelling.....	11
2.4 Conclusie.....	16
3 EFFECTEN VAN FLASHEN OP LICHTEFFICIËNTIE	17
3.1 Inleiding.....	17
3.2 Proefopzet.....	17
3.3 Resultaten	19
3.4 Conclusie.....	24
4 VERWAARDING ALGENBIOMASSA	25
4.1 Veevoer/visvoer.....	25
4.1.1 Voedingswaarde van algen.....	26
4.1.2 Gezondheid bevorderende aspecten van algen.....	26
4.1.3 Kwaliteit bevorderende aspecten van algen in voer	27
4.1.4 Regelgeving gebruik van algen in voer	28
4.1.5 Regelgeving gebruik van algen in voer	28
4.2 Toepassing bij teelt van landbouwgewassen	29
4.2.1 Biomeststof en bodemverbeteraar	29
4.2.2 Biopesticiden.....	30
4.2.3 Biostimulant.....	30
4.2.4 Groeiregulatie.....	31
4.2.5 Regelgeving	31
4.2.6 Economische waarde algen bij landbouw toepassingen.....	32
4.3 Conclusie.....	32
5 SLOTBESCHOUWING	34
6 REFERENTIES.....	38

Samenvatting

In 2012 is het project Groen Proceswater gestart. Hierin worden de mogelijkheden van zuivering van brouwerijprocesafvalwater met behulp van microalgen onderzocht. Dit is gedaan in een samenwerkingsverband van Heineken Nederland BV, Algae Food & Fuel en WUR-ACRRES. De resultaten behaald in 2012 en 2013 zijn beschreven in afzonderlijke rapporten. In dit rapport zijn de resultaten van 2014 en 2015 beschreven. In 2014 is onderzocht of een voorbehandeling van het proceswater via cavitatie-flotatie het zuiveringsresultaat kan verbeteren en in 2015 of de energie-input van de LED-belichting kan worden verminderd door te flashen (afwisselende licht-donker periodes op microseconde tijdschaal). Verder is in 2015 en 2016 via een literatuurstudie gekeken naar de verwaarding van de geproduceerde algenbiomassa en zijn de conclusies van het gehele project samengevat.

Onderzoek 2012-2013

In 2012 is op labschaal met behulp van een 2 L-doorstroomreactor de stikstof- en fosforverwijdering in het procesafvalwater (UASB-effluent) door algen onderzocht. De resultaten waren perspectiefvol. Het verwijderingsrendement (voor zowel stikstof als fosfor) liep uiteen van circa 50% bij een verblijftijd van ruim een dag tot circa 90% bij een verblijftijd van circa 6 dagen.

Vervolgens zijn eind 2012 op de Heineken-locatie in Zoeterwoude 2 kuubsreactoren geïnstalleerd om op grotere schaal de zuivering met algen te onderzoeken. Bij een verblijftijd van 5 dagen bedroeg voor stikstof het verwijderingsrendement 70-80% bij een gehalte van 8-10 mg N_{totaal}/l in het reactoreffluent. Voor fosfor werd een verwijderingsrendement behaald van 30-40% bij een fosforgehalte 4-5 mg P/l in het reactoreffluent.

Wat betreft het N-en P-gehalte was het resultaat van de kuubsreactor qua grootte orde vergelijkbaar met de huidige aerobe zuivering. De toekomstige eisen voor lozing op het oppervlaktewater werden nog niet gehaald. In vergelijking met de in 2012 uitgevoerde proeven met de 2 L chemostaat was de verwijdering vooral bij fosfor lager. Om te voldoen aan toekomstige lozingseisen moeten de N-en P-gehalten verder worden teruggebracht naar respectievelijk 3-5 mg N/l en 0,5-1 mg P/l. Daarnaast is het energieverbruik voor de LED-belichting nog te hoog.

Voorbehandeling proceswater

Eén van de factoren die de groei van de algen beperkt is de troebelheid van het effluent. Dit beperkt de lichtdoordringing in de reactor. Een mogelijke optie is om het effluent eerst voor te behandelen zodat deze helderder wordt en bovendien een deel van de N en P er wordt verwijderd zodat eenvoudiger aan het zuiveringsdoel wordt voldaan. Er is een eerste test uitgevoerd met cavitatie-flotatie zoals ontwikkeld door het bedrijf BTN International in Arnhem. Dit betreft een flotatiebehandeling in combinatie met een vlokmiddel.

De flotatiebehandeling leidde tot een helderder en minder gekleurd effluent dan het ingaande proceswater. De fosfor werd voor een groot deel verwijderd en het COD-gehalte daalde sterk. De N/P-verhouding steeg echter naar ruim 15 (circa 7 is ideaal). De resultaten van de algengroei testen op het flotatie-effluent zijn echter wisselend, in twee van de drie testen was de groei minder dan op standaard medium, terwijl in een derde test de groei beter was.

Voor een betere beoordeling van het systeem is een langere duurttest vereist waarbij voor een langere periode in een steady state situatie de samenstelling wordt bepaald en de massabalans kan worden bepaald. Verder is ook een duurzame bestemming van de vaste fractie van belang.

Verder vindt er nog steeds innovatie in de voorbehandelingstechnologie plaats o.a. door het bedrijf PURE Waterwell, waarvan verder onderzoek naar de combinatie voorbewerkingstechnologie, algenproductie en verwaardingsmethoden wenselijk zou zijn.

Flashen

Met behulp van kleine literreactoren is op labschaal het effect van flashen van de LED-belichting onderzocht. In het onderzoek zijn drie flash-instellingen vergeleken met de referentie: continue belichting. Bij de laatste is de lichtintensiteit zo ingesteld dat de hoeveelheid lichtenergie per volume van dezelfde grootte orde is dan de hoeveelheid lichtenergie in de kuubsreactor zoals gebruikt in Zoeterwoude. De continue belichting is vergeleken met een drietal flashinstellingen. Bij de eerste twee flashinstellingen is bij eenzelfde lichtintensiteit als bij continu licht de duty cycle (periode van de licht-donker cyclus dat het licht aan is) verlaagd naar 70% en 40%. Bij de derde flashinstelling is uitgegaan van een duty cycle van 40%, maar is de lichtsterkte in de periode dat het licht aanstaat dermate verhoogd dat de totale lichtoutput weer gelijk is aan die bij continue belichting. Bij alle instellingen is uitgegaan van een flashfrequentie van 10 kHz.

De resultaten van het flashonderzoek laten zien dat de lichtefficiëntie kon worden verhoogd door te flashen. Om eenzelfde productie te realiseren als bij continue belichting kon bij flashen 5-10% worden bespaard op de energie voor belichting. In de literatuur zijn hogere besparingspercentages gevonden (30-80%). Mogelijk dat ook de lichtverdeling hierbij een rol speelt. In onze proeven is gebruikt gemaakt van een cilindrische reactor met de lamp in het midden, terwijl in de genoemde publicaties vaak een vlakke plaat reactor is gebruikt waarbij de lichtverdeling per volume waarschijnlijk beter is. Verder is gewerkt met een relatief lage lichtintensiteit per reactorvolume, waardoor de risico's van fotoinhibitie bij continue belichting geringer zijn.

Benadrukt moet worden dat ook bij een hogere lampefficiëntie (omzetting van elektrische energie in algenbiomassa-energie) de elektriciteitsbehoefte voor belichting nog steeds aanzienlijk is. Bij een lampefficiëntie van 5% (3,5% is de maximaal gemeten waarde in de flashproeven) bedraagt het energieverbruik circa 75 kWh/m³ te zuiveren water. Dit benadrukt de noodzaak voor een voorbehandeling of mede zonlicht te gebruiken. Met name in klimaatregio's dichter bij de evenaar is de potentiële jaarproductie hoger en vertoont bovendien weinig spreiding over het jaar heen.

Verwaarding algenbiomassa

Bij de teelt van algen op afvalwaters liggen wat betreft verwaarding waarschijnlijk de beste kansen bij gebruik als veevoer of bij toepassing bij de teelt van landbouwgewassen. Wat betreft veevoer toonden diverse onderzoeken aan dat algen een positief effect kunnen hebben op diergezondheid en productkwaliteit. Vanwege de kostprijs van algenbiomassa moet de waarde bij gebruik als veevoer in eerste instantie worden gezocht in dit additief effect. Naast veevoer is ook de toepassing als voer bij kweekvis, schelpdieren en garnalen een interessante optie.

Er zijn interessante kansen voor toepassing van microalgen in landbouwgewassen. Microalgen en stoffen die door microalgen geproduceerd worden, blijken potentie te hebben als gewasbeschermingsmiddel. Microalgen kunnen ook als bodemverbeteraar worden toegepast en met cyanobacterie toepassingen kan bespaard worden op de minerale stikstofgift. Bij bemesting met micro-algen kan de smaak en kleur van voedselproducten verbeterd worden en mogelijk ook de weerstand van de plant. Verder kunnen extracten van cyanobacteriën de groei bevorderen. De meerwaarde van algentoepassingen zou vooral in de combinatie van deze effecten kunnen liggen.

Bij toepassing van algenproducten als biomeststof en biopesticide moet wel rekening worden gehouden met regelgeving op o.a. gebied van toelating van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen.

Tenslotte

Geconcludeerd kan worden dat de afvalwaterzuivering met microalgen perspectieven biedt, maar dat er nog een optimalisatieslag nodig is met betrekking tot productie en kostenreductie voor Noordwest-Europese klimaatcondities. Naast de reeds genoemde voorbehandeling van het te zuiveren water en de verhoging van de lichtefficiëntie door flashen dan wel een beter gebruik van zonlicht, is er ook aandacht nodig voor een energiezuinige oogstmethode en beheersing van predatoren.

Het voordeel van algenzuivering is dat de biomassa waarschijnlijk beter verwaard kan worden en dat in potentie lagere N- en P-gehalten gerealiseerd kunnen worden dan bij de huidige manier van zuiveren. Daarnaast worden nutriënten via de algenbiomassa herbenut en draagt daardoor bij aan een circulaire

economie. Vanuit dat oogpunt gezien verdient zuivering van rest- en afvalstromen via microalgen of andere aquatische biomassa verder aandacht in het onderzoek.

1 Inleiding

In 2012 is het project Groen Proceswater gestart. Hierin worden de mogelijkheden van zuivering van brouwerijprocesafvalwater met behulp van microalgen onderzocht. Dit is gedaan in een samenwerkingsverband van Heineken Nederland BV, Algae Food & Fuel en WUR-ACRRES.

In het bierbrouwproces ontstaat procesafvalwater, dat moet worden gezuiverd om het uiteindelijk te mogen lozen op het oppervlaktewater. Het procesafvalwater bevat nutriënten (COD, stikstof, fosfor, spoorelementen) en warmte (ca. 30°C). De huidige wijze van afvalwater zuiveren (anaerobe UASB gevolgd door aerobe actieve slibzuivering) is kostbaar, energie-intensief en functioneel te beperkt (onvoldoende fosforverwijdering) om aan de toekomstige lozingseisen te voldoen. Bovendien wordt er bij deze wijze van zuiveren slib geproduceerd als biomassa, hetgeen een negatieve waarde in het handelsverkeer heeft. Daarnaast gaat fosfor voor de voedingsketens verloren, omdat dit ofwel via de slibverwerking onbeschikbaar wordt gemaakt (o.a. na verbranding verwerkt in cement), ofwel op het oppervlaktewater wordt geloosd. Recycling is gewenst, omdat fosfor een essentieel voedingselement is voor voedselproductie en de huidige bron, fosfaaterts, eindig is.

Een interessante optie is om na te gaan of het laatste deel van de afvalwaterzuivering kan worden uitgevoerd door in het effluent van de UASB reactor algen te laten groeien (m.b.v. een geschikte licht- en CO₂-bron). De algenzuivering vervangt hiermee de aerobe nazuivering. De gevormde algenbiomassa heeft voedings- c.q. voederwaarde (eiwit, mineralen en onverzadigde vetzuren). Bovendien nemen de algen fosfor en andere nutriënten op, zodat deze met de algenbiomassa naar de voedingsketen wordt gerecycled. Met de restwarmte die al in het afvalwater aanwezig is kunnen zonder extra inspanning optimale groeitemperaturen voor algen worden gecreëerd. Door te streven naar een gebalanceerde opname van nutriënten is het wellicht mogelijk om schoon water te produceren. Bovendien komt er bij het brouwen naast rookgas met CO₂ ook nog schone CO₂ vrij die beide als koolstofbron voor de algen kunnen dienen.

Doel van het project is te onderzoeken in welke mate het procesafvalwater kan worden gezuiverd door algen door vast te stellen welke algensoorten in staat zijn in dit water te groeien, welke algenproductie hierbij mogelijk is en wat dan de hierbij behorende effluentsamenstelling van de algenreactor is en hoe de geproduceerde algenbiomassa optimaal tot waarde kan worden gemaakt.

Resultaten onderzoek 2012-2013

In 2012 is door WUR-ACRRES op labschaal met behulp van een 2 L-doorstroomreactor de stikstof- en fosforverwijdering in het procesafvalwater (UASB-effluent) door algen onderzocht (Van Dijk et al., 2013). De resultaten waren perspectiefvol. Het verwijderingsrendement (voor zowel stikstof als fosfor) liep uiteen van circa 50% bij een verblijftijd van ruim een dag tot circa 90% bij een verblijftijd van circa 6 dagen (Tabel 1).

Vervolgens zijn eind 2012 op de Heineken-locatie in Zoeterwoude 2 kuubsreactoren geïnstalleerd om op grotere schaal de zuivering met algen te onderzoeken. Bij een verblijftijd van 5 dagen bedroeg voor stikstof het verwijderingsrendement 70-80% bij een gehalte van 8-10 mg N totaal/l in het reactoreffluent (Van Dijk et al., 2014). Verder bleek dat de ammonium (de opneembare stikstofbron voor de algen) vrijwel volledig werd verwijderd. Voor fosfor werd een verwijderingsrendement behaald van 30-40% bij een fosforgehalte 4-5 mg P/l in het reactoreffluent.

Wat betreft het N-en P-gehalte was het resultaat van de kuubsreactor qua grootte orde vergelijkbaar met de huidige aerobe zuivering. De toekomstige eisen voor lozing op het oppervlaktewater werden nog niet gehaald. In vergelijking met de in 2012 uitgevoerde proeven met de 2 L chemostaat was de verwijdering vooral bij fosfor lager. Om te voldoen aan toekomstige lozingseisen moeten de N-en P-gehalten verder worden teruggebracht naar respectievelijk 3-5 mg N/l en 0,5-1 mg P/l.

Tabel 1. Resultaat algenzuivering (COD-, N-totaal en P-totaalgehalte in effluent en verwijderingsrendement) in de kuubsreactor na het aanbrengen van de vier lampen met de watermantel in vergelijking met het resultaat van de 2 L chemostaat (onderzoek 2012), het resultaat van de huidige aerobe zuivering en de toekomstige streefwaarden voor lozing op het oppervlaktewater.

	Kuubsreactor			2 L chemostaat ¹	
	COD	N-totaal	P-totaal	N-totaal	P-totaal
Resultaat algenzuivering					
- Gehalten (mg/l)	120-150	8-10	4-5	3-4	1-2
- Verwijderingsrendement (%)	60-70	70-80	30-40	80-90	80-90
Huidige aerobe zuivering, mg/l	48	9,5	4	9,5	4
Streefwaarde voor lozen, mg/l	100	3-5	0,5-1	3-5	0,5-1

1 lab opstelling, onderzoek uitgevoerd in 2012

Onderzoek 2014 en 2015

Voor verdere implementatie zijn nog wel een aantal verbeteringen nodig. De stikstof- en fosfor-verwijdering, zoals gerealiseerd in de kuubsreactor, is nog niet voldoende voor lozing op oppervlaktewater. Verder is de energie-input, met name als gevolg van de LED-verlichting, nog te hoog. In 2014 is onderzocht of een voorbehandeling van het proceswater via cavitatie-flotatie het resultaat kan verbeteren. Hierdoor wordt het proceswater helderder en wordt een deel van de N en P verwijderd zodat met behulp van microalgen eenvoudiger aan het zuiveringsdoel wordt voldaan. Verder is met behulp van kleine literreactoren onderzocht of het energieverbruik kan worden verlaagd door te flashen (afwisselende licht-donker periodes op microseconde tijdschaal). De resultaten van beide onderdelen worden beschreven in onderhavig rapport (respectievelijk hoofdstuk 2 en 3). Tevens is via een literatuurstudie gekeken naar de verwaarding van de geproduceerde algenbiomassa (hoofdstuk 4). Het rapport wordt afgesloten met een slotbeschouwing (hoofdstuk 5).

2 Effecten voorbehandeling UASB-effluent

2.1 Inleiding

Eén van de factoren die de groei van de algen beperkt is de troebelheid van het effluent. Dit beperkt de lichtdoordringing in de reactor. Een mogelijke optie is om het effluent eerst voor te behandelen zodat deze helderder wordt en bovendien een deel van de N en P er wordt verwijderd zodat eenvoudiger aan het zuiveringsdoel wordt voldaan. Begin juni 2014 is een test uitgevoerd met cavitatie-flotatie (CF) zoals ontwikkeld door het bedrijf BTN International in Arnhem. In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven.

2.2 Uitvoering test

2.2.1 Beschrijving test-unit BTN

Bij een CF-behandeling wordt afvalwater met lucht gemengd en onder druk gebracht in een drukvat. Alle slibcellen (vuildeeltjes) nemen deze druk aan. Vervolgens wordt binnen 1 seconde de druk verlaagd waardoor slibcellen openbarsten. De ingebrachte lucht zorgt ervoor dat de vuildeeltjes naar de oppervlakte drijven en een drijf laag vormen in de flotatietank. Deze wordt vervolgens aan de bovenzijde van de flotatietank afgevoerd. Aan de onderzijde verlaat de heldere waterfractie de flotatietank.

Om de afscheiding van de vaste deeltjes te bevorderen wordt een vlokmiddel toegevoegd. In deze proef betrof dit CFVLOK1A (metaalzout, poly-aluminiumchloride) dat in een dosering van 0,25% is toegediend. Dit komt overeen met een dosering van 2,5 liter per m³ influent. Naar verwachting kan de dosering door optimalisatie worden verlaagd naar een dosering van ca. 0,06%.

Het vlokmiddel is op twee plaatsen gedoseerd: 1) voorraad tank influent en 2) voor de inlet van de flotatietank. Er is géén polymeer gebruikt

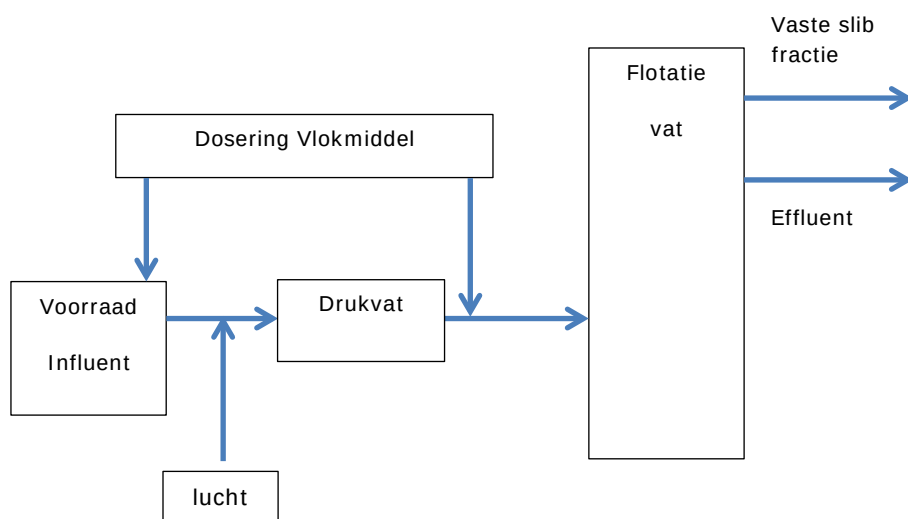
In Figuur 1 en 2 is de mobiele opstelling van BTN weergegeven, Figuur 3 geeft een schematische weergave van de belangrijkste processen.

Het flotatievat heeft een inhoud van circa 7 m³. Het influent van de brouwerij werd vanuit een tankwagen in een kuubstank afgelaten. Van daar uit wordt het door de CF installatie verpompt naar een voorraadvat, waaraan het vlokmiddel wordt gedoseerd en gemengd. Vervolgens wordt het afvalwater onder druk gebracht en wordt er lucht aan het water toegevoegd. Daarna wordt de druk afgelaten en wordt het afvalwater in het flotatievat gebracht.



Figuur 1. Linker foto: Mobiele opstelling van de CF module van BTN International.

Figuur 2. Rechter foto: tankwagen, flotatietank en containerbak voor opvang effluent uit de CF



Figuur 3. Schema cavitatie-flotatie-opstelling BTN International

2.2.2 Uitvoering test

Voor de test is circa 13 m³ UASB-influent van de brouwerij opgehaald in een tankauto. Omdat de doseerpomp van het flocculant slechts een beperkt debiet had kon er slechts 6-7 m³ worden verwerkt. Dit betekent dat het niet mogelijk was een goede massabalans op te stellen, omdat de totale inhoud van de installatie al 6-7 m³ bedraagt. Het beperkte invoervolume betekent ook dat er nog geen steady state situatie zal zijn gerealiseerd in de reactor. Om dit te bereiken zou eigenlijk minimaal 2-3 keer het volume van de installatie moeten worden ingevoerd. Om toch een goed beeld te krijgen van het verkregen effluent is bij het invoerpunt in het flotatievat, maar na de drukverlaging, een kraan aangebracht waarin vloeistof kon worden afgetapt. Na afscheiding van de vaste fractie is vervolgens een monster genomen voor de samenstelling. Verwacht mag worden dat de samenstelling van dit monster niet zal afwijken van die van het effluent dat uit het flotatievat komt in een steady state situatie. In Figuur 4 is het resultaat van de flotatie-behandeling te zien.

Het was lastig de vaste fractie op te vangen, omdat deze erg schuimde. Een deel van het schuim is opgevangen in vaten waarin het vervolgens neersloeg en een dunne slurry resulteerde. Hieruit zijn monsters genomen voor analyse en voor een vergistingstest.



Figuur 4. Resultaat flotatie, in beker links is zichtbaar dat de vaste delen zicht afscheiden en een heldere vloeistof achterblijft, de beker rechts is gevuld met UASB-influent.

2.3 Resultaten

2.3.1 Samenstelling

In Tabel 2 zijn de COD, stikstof- en fosforgehalten weergegeven. Het betreft een gemiddelde van 5 meetwaarden. In het effluent werd vrijwel geen COD meer gemeten. De fosfor werd voor circa 90% verwijderd, de stikstof voor circa 40%.

Gemiddeld bedroeg het N- en P-gehalte van het effluent 8.6 mg N/l en 0.5 mg P/l resulterend in een N/P-ratio van 17. Dat is aan de hoge kant voor algengroei (ideaal is 7-8). Verder is de stikstof voor ongeveer 40-50% in organische vorm aanwezig. Dit deel is niet direct beschikbaar voor algengroei. Naar verwachting zal het wel gaan om redelijk snel afbreekbare stikstof (o.a. eiwitten).

Opmerking

Opvallend is het relatief lage N totaal-gehalte van het influent. Dat is normaal ruim twee keer zo hoog. Het fosforgehalte is wel van de grootte orde zoals verwacht. Heineken meet de N- en P-gehalten van het influent niet, dus er kon niet worden nagegaan of er in die periode lagere gehalten zijn gemeten. Het UASB-effluent wordt gebruikt voor de voeding van de algenreactoren. Daar wordt het N- en P-gehalte wel gemeten en dat bevond zich op een normaal niveau van 30-40 mg N.

Tabel 2. COD, stikstof- en fosforgehalten van influent en effluent van cavitatie-flotatie.

	COD (mg/l)	N-totaal (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	P-totaal (mg/l)	P-PO ₄ (mg/l)
Influent	3565	14.0	0.1	3.0	6.5	5.6
Effluent	< 15	8.6	0.8	3.4	0.5	<0.5

In Tabel 3 is de ionenanalyse weergegeven van influent en effluent. In de laatste kolom is tevens het berekende gehalte (op basis van dosering) weergegeven van het standaard groeimeedium (3N-BBM). Laatstgenoemd medium bevat macro- en micronutriënten en vitaminen. De term 3 N geeft aan dat er 3 keer zo veel stikstof wordt gegeven dan bij BBM-medium.

Wat opvalt is het hoge chloridegehalte in het effluent. Dit kan de groei van algen negatief beïnvloeden. Het hogere chloridegehalte hangt samen met het gebruikte vlokmiddel (aluminiumchloride). Het is te verhelpen door een ander vlokmiddel te gebruiken. Ook het zinkgehalte is hoger dan in het influent, terwijl het ijzergehalte weer lager was.

Verder is het bicarbonaat-gehalte in het effluent aanzienlijk lager dan in het influent. Mogelijk slaat dit deels neer als ijzercarbonaat (vlokmiddel bevat ijzer). Dit zou tot een lagere koolstofbeschikbaarheid kunnen leiden. Anderzijds heeft het 3N-BBM-medium een bicarbonaatgehalte dat ruim 3 keer lager is dan dat van het flotatie-effluent. Een koolstofbeperking lijkt derhalve niet direct aan de orde.

Tabel 3. Ionenconcentraties in influent en effluent cavitatie-flotatie.

	Influent	Effluent	3N-BBM ¹
pH	7.5	7.3	-
EC, mS/cm	3.0	3.7	-
<i>Macro/semi-macro-elementen, mg/l</i>			
K	21	25	84
Na	737	804	205
Ca	37	37	8
Mg	14	15	7
Cl	194	712	17
S	35	34	10
HCO ₃	838	346	-
<i>Micro-elementen, µg/l</i>			
Fe	125	60	120
Mn	50	46	69
Zn	89	126	8
B	29	37	-
Cu	14	10	-
Mo	nd	nd	10

1 Berekende waarde 3N-BBM-medium (basal bold medium + vitaminen met drie keer zo veel stikstof)

In Tabel 4 is de samenstelling van de vaste fractie weergegeven. Na het inzakken van het schuim bevatte de slurry circa 1% droge stof waarvan circa de helft organische stof was. Het N-totaal en P-totaal gehalte bedroeg respectievelijk 0.37 en 0.14 mg/kg. De stikstof was vrijwel volledig aanwezig in organische vorm.

Gebaseerd op het P-gehalte in het influent en de vaste fractie en het feit dat de fosfor vrijwel volledig in de vaste fractie terecht komt, kan worden afgeleid dat circa 5% van de ingaande massa terecht komt in de vaste fractie.

Opmerking

De fosfor en een deel van de stikstof komt terecht in de slibfractie. Dat betekent dat er nog wel een duurzame bestemming moet worden gevonden voor het slib, zodat de fosfor en de andere nutriënten kunnen worden hergebruikt.

Tabel 4. Samenstelling vaste fractie.

Droge stof (g/kg)	Organische stof (g/kg)	N-totaal (g/kg)	P-totaal (g/kg)
10	5	0.37	0.14

Groeitest algen

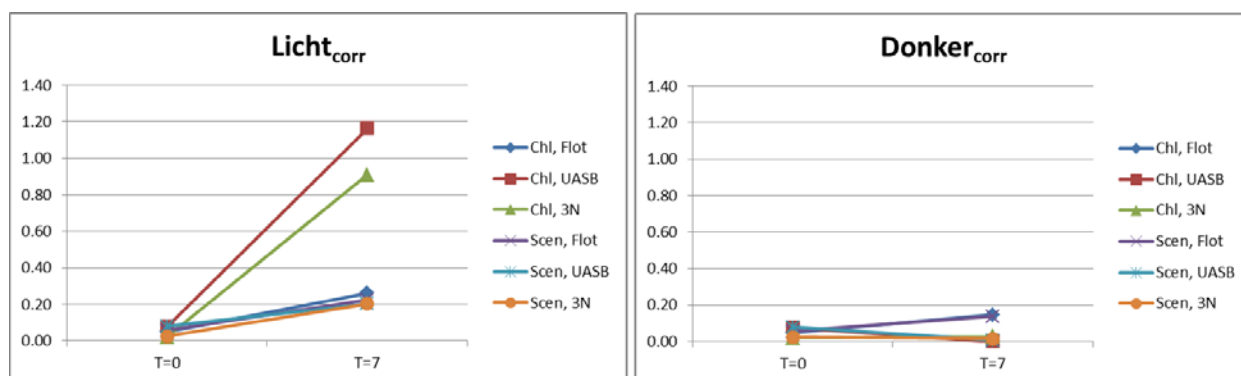
Er is een algengroeitest uitgevoerd met het flotatie effluent. Het betrof een wellplattenproef. Hierbij wordt de groei van de algen gevolgd in kleine cups (2 ml) waarin het groeimedum (1,5 ml, o.a. het flotatie effluent) en algencultuur (0,5 ml) worden samengebracht.

In de proef is de algengroei op flotatie-effluent (Flot) vergeleken met die op UASB-effluent (UASB, de huidige voeding van de algenreactoren) en een standaard groeimedum (3N-BBM, nitraatvoeding). De test is uitgevoerd met de algensoorten *Chlorella sorokiniana* en *Scenedesmus obliquus* in zowel licht als donker. Het laatste om ma te gaan of er mogelijk sprake is van heterotrofe groei.

In Figuur 5 is het verloop van de optische dichtheid (OD) weergegeven bij een golflengte van 695 nm. Het betreft waarden gecorrigeerd voor de waarden gemeten bij de controles (groeimedum zonder toevoeging van een algencultuur).

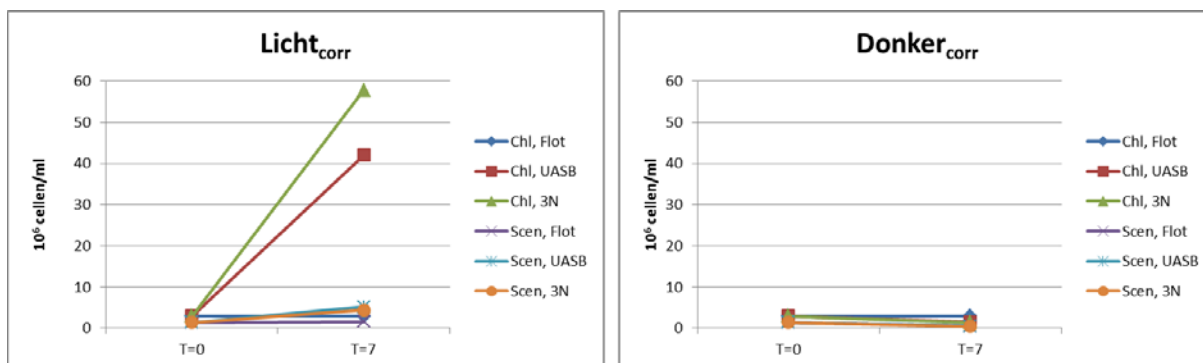
In het algemeen was de groei bij de algensoort *Chlorella sorokiniana* sterker dan bij *Scenedesmus obliquus*. In het licht werd bij de *Chlorella* de sterkste toename van de OD gevonden bij het UASB-effluent en het 3N medium. Het flotatie-effluent bleef daarbij duidelijk achter. Bij de *Scenedesmus* werd geen duidelijk verschil gevonden tussen de drie groeimedia, maar was de groei in het algemeen minder sterk dan bij de *Chlorella*.

In het donker werd alleen bij het flotatie-effluent enige toename van de OD waargenomen (bij zowel *Chlorella* als *Scenedesmus*).



Figuur 5. De optische dichtheid (OD₆₉₅) bij aanvang (T=0) en bij einde van proef 1 (T=7 dagen) in relatie tot medium (FLOT = flotatie effluent, UASB = UASB-effluent, 3N = standaard groeimedum), algensoort (Chl = *Chlorella sorokiniana*, Scen = *Scenedesmus obliquus*) en wel/geen belichting (Licht en Donker).

In Figuur 6 is de celdichtheid weergegeven. Ook hier is gecorrigeerd ten opzichte van de controle. Hier werden echter vrijwel geen algen geteld bij de controles (in zowel licht als donker). Het beeld is vergelijkbaar met dat van de optische dichtheid, namelijk een sterke toename van de celdichtheid bij de *Chlorella* in het licht gegroeid op het UASB-effluent en het 3N medium en vrijwel geen toename van de celdichtheid bij het flotatie-effluent.



Figuur 6. De celdichtheid (cellen/ml) bij aanvang ($T=0$) en bij einde van proef 1 ($T=7$ dagen) in relatie tot medium (FLOT = flotatie effluent, UASB = UASB-effluent, 3N = standaard groeimeedium), algensoort (Chl = *Chlorella sorokiniana*, Scen = *Scenedesmus obliquus*) en wel/geen belichting (Licht en Donker).

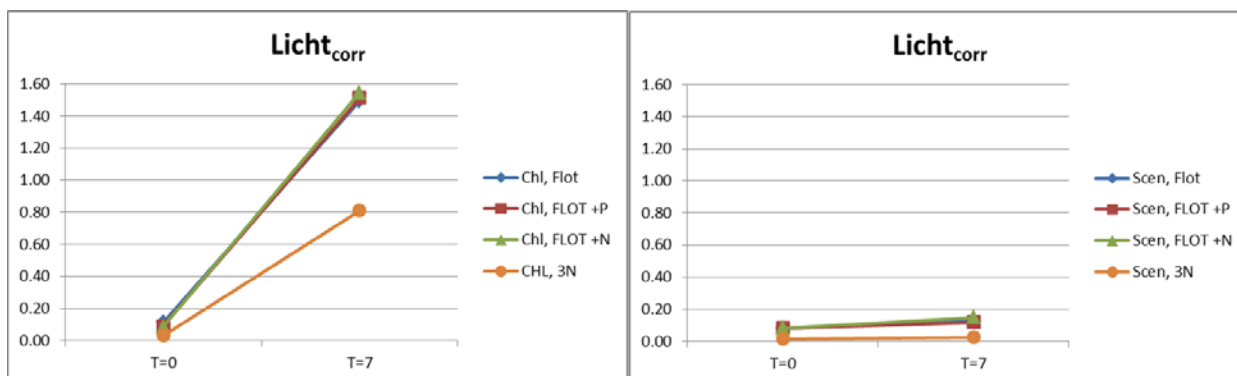
Het algemene beeld van de eerste proef is dat de groei van de algen minder is vergeleken met die op het UASB-effluent en het 3N-BBM medium. Dit kan een gevolg zijn van een tekort aan bepaalde nutriënten zoals fosfor, stikstof en ijzer of aan een te hoge concentratie van groei beperkende elementen zoals chloride en zink. Ook het aluminium in het gebruikte vlokmiddel kan een negatief effect hebben op de algengroei.

Aanvullende proeven

Besloten is om nog een extra wellplattenproef uit te voeren waaraan aan het flotatie-effluent extra fosfor of stikstof is toegevoegd, zodat kan worden nagegaan of de tegenvallende groei hiermee samenhangt. Er is alleen gekeken naar het verloop van de optische dichtheid, er zijn geen celtellingen uitgevoerd.

Deze proef gaf een duidelijk ander beeld dan de eerste (Figuur 7). De groei van *Chlorella sorokiniana* op het flotatie effluent was in de tweede proef beter dan die op het standaard groeimeedium. Er was geen effect van de extra fosfor- en stikstof toevoegingen. Ook de groei van de *Scenedesmus* op het flotatie effluent was beter dan die op het standaard medium, hoewel de groei veel minder sterk was dan die van de *Chlorella*.

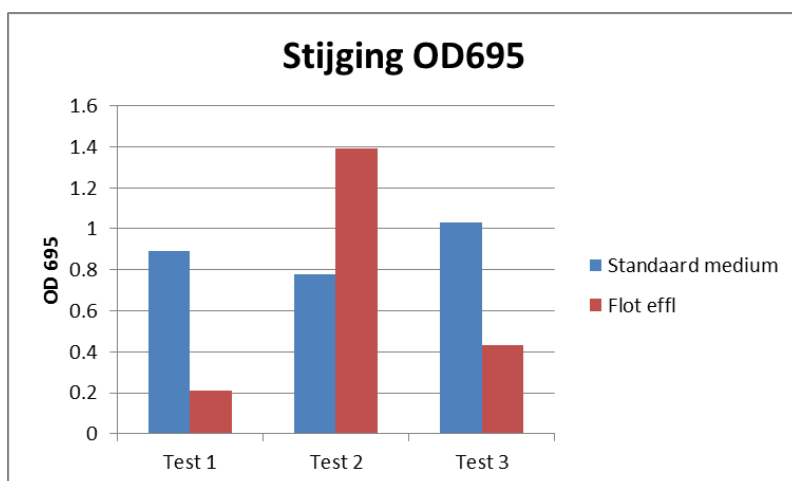
Voor het verschil in uitkomst tussen beide proeven is niet direct een duidelijke verklaring te geven. Wat mogelijk een rol kan spelen is dat het flotatie effluent voor de tweede proef een langere tijd is bewaard, weliswaar gekoeld, maar mogelijk dat er toch enige omzettingen hebben plaatsgevonden die van invloed zijn op de groei van de algen.



Figuur 7. De optische dichtheid (695 nm) bij aanvang ($T=0$) en bij einde van proef 1 ($T=7$ dagen) in relatie tot medium (FLOT = flotatie effluent, FLOT+P/N = flotatie effluent met extra fosfor cq. stikstof, 3N = standaard groeimeedium), algensoort (Chl = *Chlorella sorokiniana*, Scen = *Scenedesmus obliquus*) en wel/geen belichting (Licht en Donker).

Ter controle is nog een derde proef ingezet (vergelijking groei op flotatie effluent en standaard groeimeedium bij de algensoort *Chlorella sorokiniana*). In Figuur 8 zijn de resultaten van de drie testen samengevat op basis van de stijging van de optische dichtheid na een groei van 7 dagen. Hieruit blijkt dat in de derde proef de groei op het flotatie effluent duidelijk minder is dan op het standaard groeimeedium, dus meer overeenkomend met de eerste proef.

Algemeen beeld is dat de resultaten dus wisselend zijn. Verder onderzoek op groter schaalniveau ook met andere vlokmiddelen is gewenst.



Figuur 8. De stijging van de optische dichtheid (695 nm) na 7 dagen groei in het licht van *Chlorella sorokiniana* op het standaard medium (3N BBM) en het flotatie effluent bij de drie welltesten (Test 1 t/m 3).

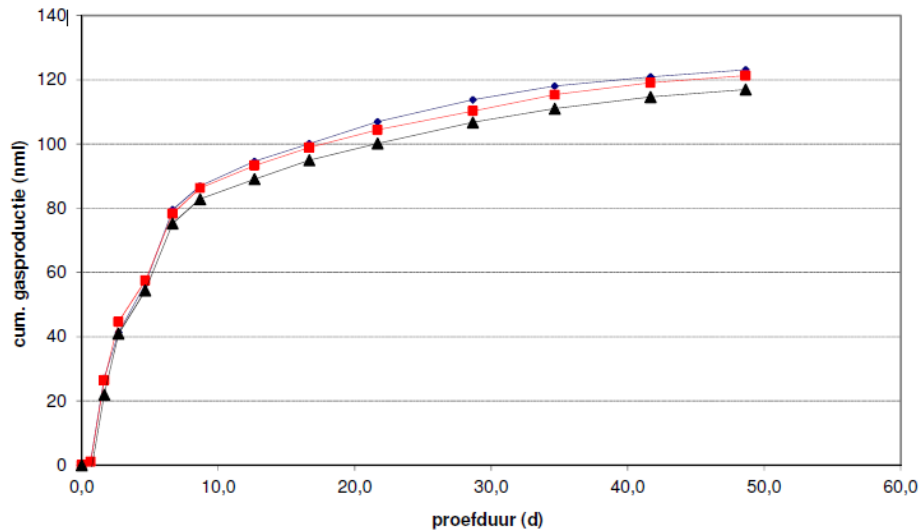
Vergistingsproef vaste fractie flotatie

Naast het effluent ontstond een slurry. Hiermee is door Opure BV een labvergistingsproef uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt een mesofiel entslib. Uit het verzamelmonster zijn drie submonsters genomen die vervolgens zijn vergist. De proefduur bedroeg 50 dagen. In Tabel 5 zijn de resultaten weergegeven.

De slurry bevatte ruim 1% drogestof, waarvan 54% uit organische stof bestond. De biogasproductie bedroeg 2.4 Nm³ per ton slurry. Met circa 80% methaan was de kwaliteit van het biogas goed. Uit deze gegevens kan worden afgeleid dat circa 40% van de organische stof is afgebroken. Dat is relatief laag. Uit het verloop van de cumulatieve gasproductie (Figuur 9) blijkt dat het grootste deel van de totale productie plaatsvindt in de eerste 8-10 dagen.

Tabel 5. Resultaten labvergistingstest (uitgevoerd door Opure, gemiddelde van drie submonsters).

Parameter	Waarde
Drogestofgehalte, %	1.2
Organische stofgehalte, % van droge stof	54
Biogasproductie, Nm ³ per ton product	2.4
Methaangehalte biogas, vol-%	80
Specifieke biogasproductie, Nm ³ per ton organische stof	366



Figuur 9. Verloop cumulatieve biogasproductie van de drie submonsters gedurende de proefperiode.

2.4 Conclusie

De flotatiebehandeling leidde tot een helderder en minder gekleurd effluent dan het ingaande UASB-influent. De fosfor werd voor een groot deel verwijderd en het COD-gehalte daalde sterk. De resultaten van de algengroeitesten zijn echter wisselend. Voor een betere beoordeling van het systeem is een langere duurtest vereist waarbij voor een langere periode in een steady state situatie de samenstelling wordt bepaald en de massabalans kan worden bepaald in combinatie met verschillende vlokmiddelen en in vergelijking met andere voorbehandelingstechnologie (bv. van het bedrijf PURE Waterwell)

3 Effecten van flashen op lichtefficiëntie

3.1 Inleiding

Een belangrijk aandachtspunt bij LED reactoren is het energieverbruik. In de beproefde kuubsreactor zijn vier lampen aangebracht van elk 180 W, dat geeft een totaal elektrisch vermogen van 720 W. Bij een verblijftijd van 5 dagen betekent dit een stroomverbruik van ruim 86 kWh per kuub afvalwater. Dat is te hoog voor een rendabele bedrijfsvoering. Er moet daarom worden gezocht naar oplossingen om het energieverbruik te beperken. Eén van de opties is door te flashen. Dit houdt in dat de lamp een deel van de tijd uitstaat en waarbij volgens een vast patroon licht-donker periodes zich elkaar afwisselen. De tijdsduur van een volledige cyclus (licht- en donkerperiode) is meestal op het niveau van microseconden. Het aantal cycli per sec wordt de flashfrequentie genoemd. Een ander veel gebruikte parameter bij flashen is de duty cycle, deze geeft aan welk deel van de cyclus het licht aanstaat.

Het principe van de energiebesparing bij flashen berust o.a. op het beter afstemmen van de duur van de lichtperiode op die van de reacties in de fotosystemen in de algen. Dit leidt er toe dat een kleiner deel van de toegevoerde lichtenergie via warmte verdwijnt. Daarnaast nemen ook de risico's van fotoinhibitie af (Abu-Ghosh et al., 2016). Literatuur op dit gebied geeft aan dat hierdoor de fotosynthetische efficiency kan worden verhoogd (Terry, 1885; Degen et al., 2001, Lunka et al., 2013; Grobbelaar et al., 1996).

Met behulp van kleine LED-reactoren is op labschaalniveau een eerste verkenning uitgevoerd naar de effecten van flashen op lichtefficiëntie bij microalgen. In dit hoofdstuk worden de resultaten daarvan besproken.

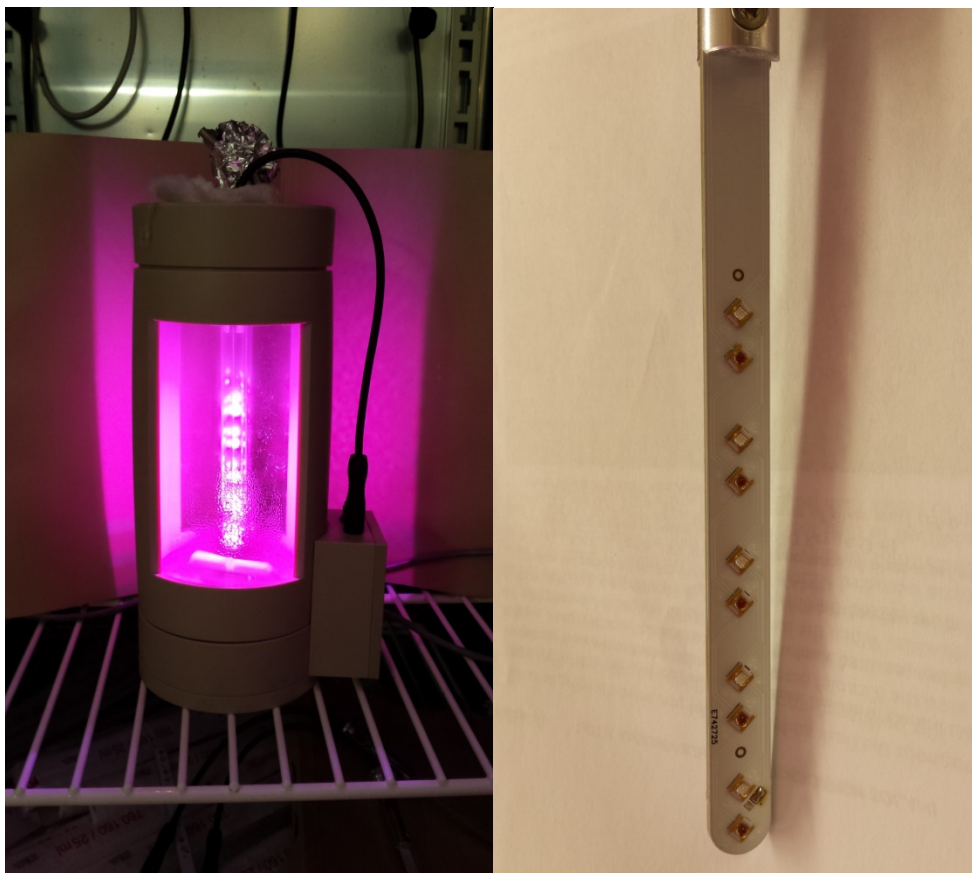
3.2 Proefopzet

In het onderzoek is gebruik gemaakt van kleine LED reactoren met een inhoud van 1 liter (zie Figuur 10). Hiervan waren er vier beschikbaar.

De LED-lamp bevindt zich centraal in de reactor en bevat zowel rode en blauwe LED's. De lichtsterkte van beide LED-soorten kan separaat worden ingesteld, zodat zowel de totale lichtoutput als de lichtsamenstelling (aandeel rood en blauw) kan worden gevarieerd. De maximale lichtoutput van de lamp bedraagt 4,9 en 2,6 $\mu\text{mol/s}$ voor respectievelijk de rode en blauwe LED's (totaal 7,5 $\mu\text{mol/s}$). Na een aantal testen zijn de lampen vervangen. De nieuwe lampen hadden een hogere maximale lichtoutput dan de oude, namelijk 6,9 en 3,7 $\mu\text{mol/s}$ voor respectievelijk de rode en blauwe LED's (totaal 10,6 $\mu\text{mol/s}$).

In de reactor wordt de temperatuur en de pH continu gelogd. De CO_2 -dosering is gebaseerd op de pH, waarbij een setpunt van pH 7 is aangehouden. Zo gauw de pH daar bovenkomt, wordt er CO_2 gedoseerd via een sparger die in de reactor is aangebracht. Er is gewerkt met een mengsel van lucht en CO_2 met een CO_2 -gehalte van 10%.

Het mixen vindt plaats via een roermagneet onderin de reactor.



Figuur 10. De 1 liter reactor zoals gebruikt bij de flashproeven (links) en de LED-lamp (rechts) met rode en blauwe LED's.

De reactoren stonden in een broedstovf die op een temperatuur van 23 °C stond. Tussen de reactoren is een wandje geplaatst om onderlinge beïnvloeding via invallend licht te voorkomen.

In Tabel 6 zijn de vergeleken lichtinstellingen weergegeven voor de vier reactoren. De herhalingen zijn opvolgend in de tijd uitgevoerd.

In het onderzoek zijn drie flash-instellingen vergeleken met de referentie: continue belichting. Bij de laatste is getracht de lichtintensiteit zo in te stellen dat de hoeveelheid lichtenergie per volume van dezelfde grootte orde is dan de hoeveelheid lichtenergie in de kuubsreactor zoals gebruikt in Zoeterwoude (1,6 $\mu\text{mol/s/l}$). Bij de eerste lampen was dit mogelijk bij een lichtintensiteit van 25% en 15% van het maximum voor respectievelijk de rode en blauwe LED's. In dat geval bestond de totale lichtoutput uit 76% rode fotonen en 24% blauwe fotonen. Bij de nieuwe lampen is gekozen voor een lichtintensiteitsinstelling van 19% voor rood licht en 15% voor blauw licht. De totale lichtoutput bedroeg hiermee 1,87 $\mu\text{mol/s/l}$. Dit is wat hoger dan bij de oude lampen. De reden hiervoor is de lampen niet lager dan op 15% van maximum kunnen worden ingesteld. Gekozen is daarom om alleen de output van de rode LED's te verlagen. Het aandeel rode fotonen in de totale fotonenoutput daalde hierdoor naar 70%.

De continue belichting is vergeleken met een drietal flashinstellingen. Bij de eerste twee flashinstellingen is bij eenzelfde lichtintensiteit als bij continu licht de duty cycle verlaagd naar 70% (Flash1) en 40% (Flash2). Bij de derde flashinstelling (Flash3) is uitgegaan van een duty cycle van 40%, maar is de lichtsterkte in de periode dat het licht aanstaat dermate verhoogd dat de totale lichtoutput weer gelijk is aan die bij continue belichting. Bij de eerste twee proefruns bleek achteraf dat de totale lichtoutput bij flashinstelling 3 hoger was dan bij de continue belichting. Dat maakt een directe vergelijking niet meer mogelijk. Deze data zijn daarom weggelaten bij deze twee runs.

Bij alle instellingen is uitgegaan van een flashfrequentie van 10 kHz. Deze is in het onderzoek niet gevarieerd.

Tabel 6. Reactorinstellingen bij de vier LED-reactoren.

	Continu	Flash1	Flash2	Flash3
Continu – flashen	Continu	Flashen	Flashen	Flashen
Frequentie flashen, kHz	-	10	10	10
Duty cycle, %	100	70	40	40
Lichtintensiteit, % van maximum				
- Rood	25/19	25/19	25/19	63/49
- Blauw	15/15	15/15	15/15	38/19
Lichtoutput, $\mu\text{mol/s/l}$				
- Rood	1,23/1.31	0.86/0.92	0.49/0.52	1.23/1.31
- Blauw	0,39/0.56	0.27/0.39	0.16/0.22	0.39/0.56
- Rood + blauw	1,62/1.87	1.13/1.31	0.65/0.75	1.62/1.87
Aandeel rood o.b.v. fotonen, %	76/70	76/70	76/70	76/70
Aandeel blauw o.b.v. fotonen, %	24/30	24/30	24/30	24/30

In de proeven is gebruikt gemaakt van de algensoort *Chlorella sorokiniana*. Van tevoren is een basiscultuur opgekweekt vanuit de bewaarstock. Deze is vervolgens in de koeling bewaard in buisjes van 10 ml. Een week voorafgaand aan een proefrun is een buisje overgeënt in een erlenmeyer en bij licht en kamertemperatuur weggezet. Met deze werk-ent zijn vervolgens de vier reactoren geënt (15 ml werk-ent op 1 liter).

Voor zowel de basis-ent, werk-ent als de algencultuur in de reactoren is uitgegaan van een BBM-3N-medium. Het medium is voor gebruik 15 min geautoclaveerd op 121 °C.

De reactoren, de roermagneet en de sparger zijn voor gebruik 15 min geautoclaveerd bij 80 °C. Er is voor een wat lagere dan gebruikelijke temperatuur gekozen, om te voorkomen dat de hoge temperatuur schade veroorzaakt aan de reactoren.

De temperatuur en pH-sensoren zijn gereinigd door ze een uur lang in 0.2 M natronloog te zetten.

3.3 Resultaten

In Tabel 7 is het drogestofgehalte en de optische dichtheid (440 nm) van de algencultuur weergegeven aan het einde van de proefrun. Bij beide parameters was er sprake van een sterk effect van de hoeveelheid toegediend licht. Op basis van de uitkomsten is een besparingseffect van flashen berekend waarmee aangegeven wordt hoeveel lichtenergie kan worden bespaard met flashen om eenzelfde hoeveelheid biomassa te produceren.

$$\text{Besparing (\%)} = 100 - ((DS_c/L_c)/(DS_{fl}/L_{fl})) * 100$$

Waarbij:

DS_c = drogestofgehalte continu licht

DS_{fl} = drogestofgehalte flash licht

L_c = lichtinput bij continue belichting

L_{fl} = lichtinput bij flashbelichting

Op dezelfde manier is een besparingseffect berekend op basis van effect op optische dichtheid. De resultaten staan vermeld in Tabel 8.

Flashen bij een duty cycle van 70% (flash 1) levert op basis van het drogestofgehalte een berekende besparing op van gemiddeld 8% en varieerde van -3% tot +16%. Op basis van de optische dichtheid bedroeg de besparing 9-11%. Bij een duty cycle van 40% (flash 2) was er geen sprake van een besparing. Om een zelfde resultaat te bereiken was bij flashen 20% (op basis van drogestofgehalte) en 10% (op basis van optische dichtheid) meer energie nodig dan bij continue belichting). Bij eenzelfde lichtinput (flash 3) werd op basis van het drogestofgehalte bij flashbelichting een besparing berekend van 3%, op basis van de optische dichtheid was er 5% meer energie nodig.

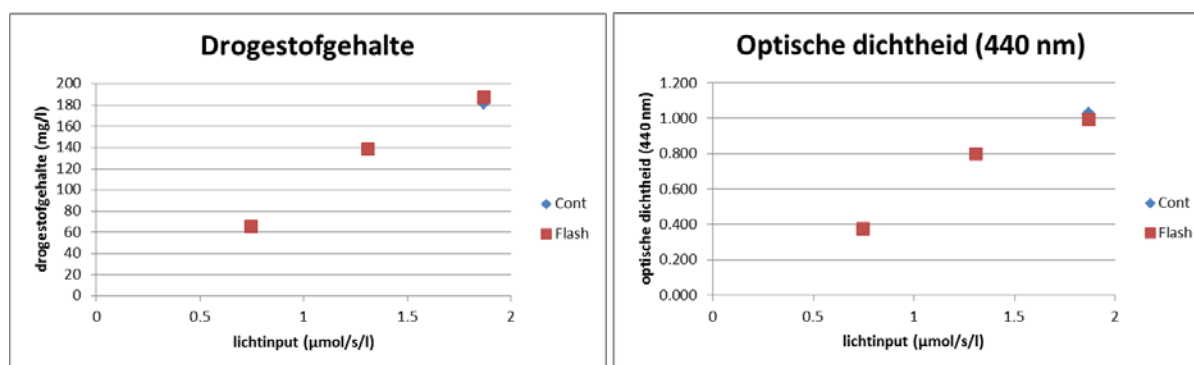
Bij de berekende besparing moet de volgende opmerking worden gemaakt. Idealiter zou bij elke lichtinput niveau (100, 70 en 40%) continu licht moeten worden vergeleken met flashlicht. Door de beperkte aantal reactoren was dit niet mogelijk. Alleen bij de hoogste lichtinput is dit gedaan (standen cont en flash 3). Zo lang er sprake is van een lineair verband tussen lichtinput en drogestofgehalte/optische dichtheid is de bovenstaande berekeningswijze goed te gebruiken. Als dat niet het geval is en het verband zou kromlijinig zijn met een afnemend effect bij toename van de lichtinput, dan leidt dit tot een overschatting van het besparingseffect bij hogere lichtinput en een onderschatting bij lagere lichtinputs. Het negatieve besparingseffect bij 40% licht (flash 2) zou daarvoor een aanwijzing kunnen zijn. In Figuur 11 is het verband weergegeven tussen lichtinput enerzijds en drogestofgehalte en optische dichtheid anderzijds. Met name bij de optische dichtheid lijkt er sprake te zijn van een afnemend effect van lichtinput.

Tabel 7. Drogestofgehalte en optische dichtheid (440 nm) aan het einde van de proefrun.

	Continu licht	Flash 1	Flash 2	Flash 3
Drogestofgehalte (mg/l)				
- Proefrun 1	206	162	70	-
- Proefrun 2	141	108	42	-
- Proefrun 3	186	145	47	197
- Proefrun 4	171	143	81	184
- Proefrun 5	189	128	68	181
Gemiddelde run 1-5	179	137	61	-
Gemiddelde run 3-5	182	139	65	188
Optische dichtheid (440 nm)				
- Proefrun 1	1,018	0,865	0,340	1,188
- Proefrun 2	0,808	0,619	0,346	0,912
- Proefrun 3	1,103	0,794	0,338	1,118
- Proefrun 4	0,853	0,875	0,385	0,727
- Proefrun 5	1,120	0,732	0,400	1,130
Gemiddelde run 1-5	0,980	0,777	0,362	-
Gemiddelde run 3-5	1,025	0,800	0,374	0,992

Tabel 8. Berekende besparing op lichtinput (%) op basis van effect op drogestofgehalte en optische dichtheid.

	Flash 1	Flash 2	Flash 3
Drogestofgehalte			
- Proefrun 1	11	-19	-
- Proefrun 2	8	-34	-
- Proefrun 3	10	-60	5
- Proefrun 4	16	15	7
- Proefrun 5	-3	-11	-4
Gemiddelde run 1-5	8	-22	-
Gemiddelde run 3-5	8	-19	3
Optische dichtheid (440 nm)			
- Proefrun 1	18	-20	
- Proefrun 2	9	7	
- Proefrun 3	3	-31	1
- Proefrun 4	32	11	-17
- Proefrun 5	-7	-12	1
Gemiddelde run 1-5	11	-9	-
Gemiddelde run 3-5	9	-10	-5



Figuur 11. Verband tussen lichtinput en drogestofgehalte (links) en optische dichtheid (rechts) op basis van gemiddelden van de 5 proefruns.

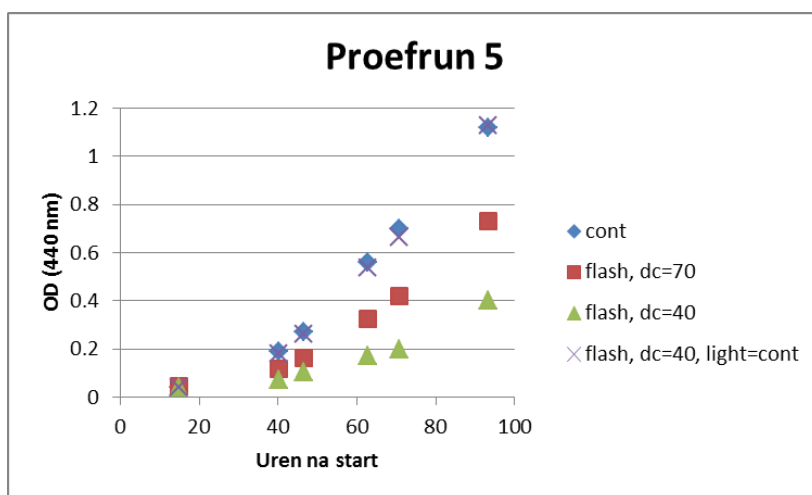
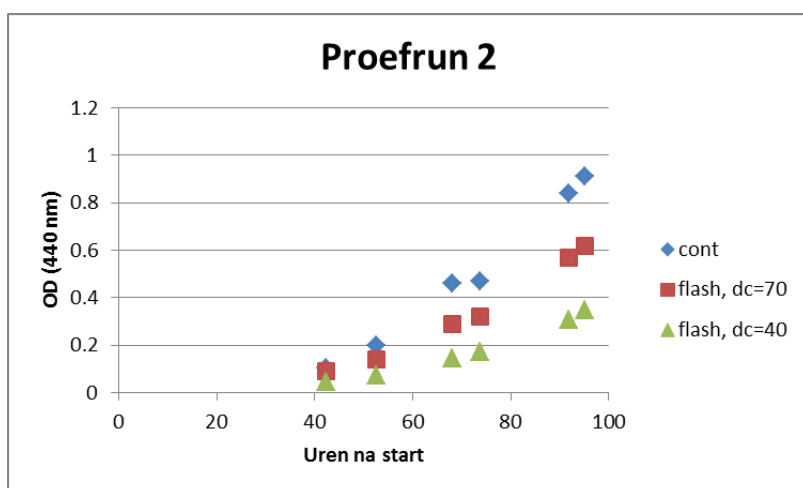
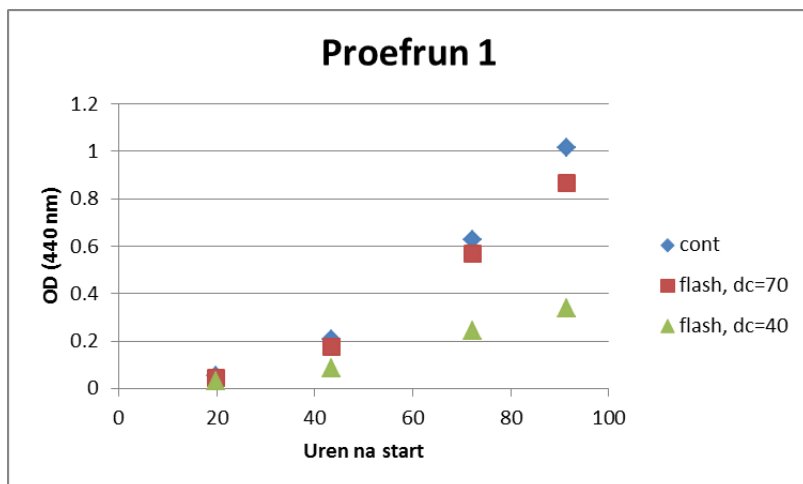
In Tabel 9 is de efficiency weergegeven waarmee lichtenergie is omgezet in energie in algenbiomassa (fotosynthetische efficiency). Dit is in eerste instantie gedaan door de hoeveelheid energie in algenbiomassa te berekenen aan het einde van de run en deze te delen door de hoeveelheid lichtenergie die gedurende de gehele proefperiode is toegevoerd. Bij de energie-inhoud van de algenbiomassa is uitgegaan van een waarde van 22 kJ/g. De lichtenergie is berekend door de hoeveelheid toegevoerde rode en blauwe fotonen te vermenigvuldigen met de energie-inhoud van de fotonen (181 en 266 kJ/mol fotonen voor respectievelijk rood en blauw licht). De berekende efficiency liep uiteen van 2,7 tot 3,5%. Gemiddeld over de proeven leidde het flashen bij 100% en 70% lichtinput tot een iets hogere efficiency, terwijl bij een lichtinput van 40% de efficiency wat lager was.

Tabel 9. Efficiency (%) van omzetting lichtenergie¹ naar energie in algenbiomassa (fotosynthetische efficiency).

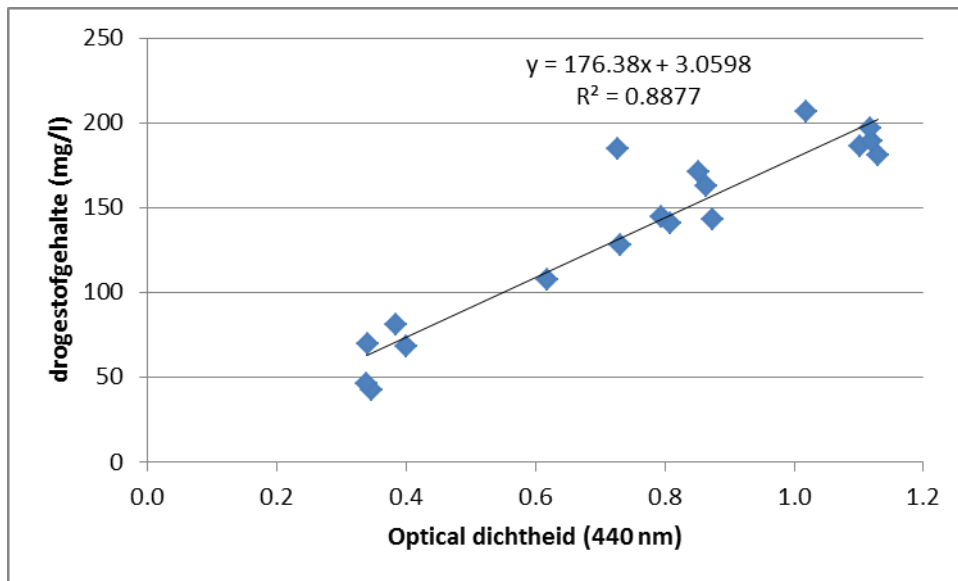
	Continu licht	Flash 1	Flash 2	Flash 3
O.b.v. drogestofgehalte einde run en duur run				
- Proefrun 1	4,00	4,49	3,37	
- Proefrun 2	2,53	2,77	1,89	
- Proefrun 3	3,14	3,49	1,96	3,32
- Proefrun 4	2,87	3,43	3,39	3,09
- Proefrun 5	3,20	3,10	2,89	3,07
Gemiddelde run 1-5	3,15	3,45	2,70	
Gemiddelde run 3-5	3,07	3,34	2,75	3,16
Op basis groei in lineaire traject				
- Proefrun 1	5,52	6,76	4,41	
- Proefrun 2	5,30	5,12	4,94	
- Proefrun 5	4,93	4,61	4,13	4,99
Gemiddelde run 1,2 en 5	5,25	5,50	4,49	-

¹ de elektrische efficiency is de helft van de fotosynthetische energie uitgaande dat 50% van de elektrische energie van de lamp wordt omgezet in lichtenergie

In een deel van de proefperiode, aan het begin en aan het eind, is er geen sprake van maximale groei. In de periode van maximale groei zal de lichtefficiency hoger zijn. Omdat er geen tussentijdse drogestofmetingen zijn gedaan kan niet rechtstreeks de lichtefficiency in dit deel van de groeiperiode worden berekend. Er zijn echter wel tussentijdse metingen van de optische dichtheid gedaan (Figuur 12). Hieruit blijkt dat de optische dichtheid vanaf 40 uren na start lineair toeneemt in de tijd. Alleen in runs 1, 2 en 5 zijn voldoende metingen gedaan om in de periode van maximale groei een lineair verband te kunnen afleiden. De optische dichtheid heeft een goede relatie met de drogestofgehalte van de cultuur (Figuur 13). Op basis van deze relatie kan de OD-toename in de tijd worden omgerekend naar een drogestoftoename in de tijd. Op basis van dit kengetal kan de lichtefficiency worden berekend in de periode van maximale groei. Voor de genoemde runs zijn deze weergegeven in Tabel 9 (onderste deel). In vergelijking met de berekening van de lichtefficiency op basis van de gehele proefperiode is de berekende lichtefficiency in de periode van maximale groei circa 2% (absoluut) hoger. Er werd een maximale lichtefficiency van bijna 7% waargenomen. Dit komt overeen met elektrische efficiency van 3,5%.



Figuur 12. Verloop optische dichtheid (OD, 440 nm) gedurende de proefperiode bij de verschillende lichtinstellingen bij de proefruns 1, 2 en 5.



Figuur 13. Verband tussen optische dichtheid en drogestofgehalte algencultuur (alle meetdata van de 5 proefruns).

In de literatuur worden wisselende resultaten gevonden over het effect van flashen. Yago et al. (2012), Park & Lee (2000) en Nedbal et al. (1996) vonden een 30-40% hogere productiviteit bij een gelijke totale hoeveelheid ingebrachte lichtenergie. Dit betekent een lichtenergiebesparing van 25-30% door flashen om een gelijke hoeveelheid biomassa te produceren. Katsuda et al. (2006) vonden bij een lichtintensiteit die lager was dan in onderhavige proeven dat circa een 1/3 kon worden bespaard op de lichtinput om eenzelfde productie te realiseren als bij continue belichting. Mathijs et al. (1995) vonden een energiebesparing uiteenlopend van 0-80% afhankelijk van de gekozen instelling (flashfrequentie en duty cycle). Lunka & Bayless (2013) lieten zien dat door flashen het benodigde elektrische vermogen per eenheid geproduceerde algenbiomassa met circa 80% kon worden teruggebracht.

In vergelijking met de hierboven genoemde literatuurreferenties is het effect van flashen op de biomassaproduktie in onze proeven beperkt. Mogelijk dat ook de lichtverdeling hierbij een rol speelt. In onze proeven is gebruikt gemaakt van een cilindrische reactor met de lamp in het midden, terwijl in de genoemde publicaties vaak een vlakke plaat reactor is gebruikt waarbij de lichtverdeling per volume waarschijnlijk beter is. Verder is gewerkt met een relatief lage lichtintensiteit per reactorvolume, waardoor de risico's van fotoinhibitie bij continue belichting geringer zijn. Daarnaast zal door de lagere hoeveelheid licht per volume door meer donkere zones via de menging al een 'flash-effect' optreden.

Door de beperkte capaciteit die beschikbaar was voor dit onderzoek is niet gekeken naar het effect van flashfrequentie en effecten van flashen bij hogere lichtintensiteit. De resultaten moeten daarom worden gezien als een eerste indicatie van effecten van flashen.

3.4 Conclusie

De resultaten van het flashonderzoek wijzen uit dat bij lichtinput die aansluit bij de prototypen algenreactor van 1 m³ een beperkte besparing mogelijk is van 5-10% met behulp flashbelichting. Op basis van geraadpleegde literatuur op dit gebied kan verwacht worden dat bij andere reactortypen en algensoorten deze besparing hoger kan zijn.

4 Verwaarding algenbiomassa

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op potentiële gebruiksdoelen voor algenbiomassa waarbij de nadruk ligt op gebruik als component van vee en visvoer en gebruik bij de teelt van landbouwgewassen. Hierbij wordt o.a. gebruik gemaakt van informatie die door Spruijt et al. (2014b) en Spruijt & van der Weide (2016) werd verzameld.

Op dit moment wordt algenbiomassa nog vooral gebruikt voor specifieke inhoudsstoffen, humane consumptie (o.a. voeding, cosmetica) en visvoer. De economische waarde van algen en haar inhoudsstoffen kan sterk variëren, afhankelijk van het soortenspectrum, de locatie en productiemethode, de zuiverheid en de actuele marktsituatie. Recent zijn een tweetal review artikelen (Koller et al, 2014; Van der Voort et al., 2015) verschenen waarin de huidige marktomvang en de marktprijs per kilogram van diverse microalgen en cyanobacteriën wordt weergegeven. De hoogste waarden hebben de inhoudsstoffen astaxanthine uit *Haematococcus* en phycobiliproteïnen uit *Spirulina* met prijzen tussen de 3000 en 25000 per kg. Algenbiomassa geschikt voor menselijke consumptie heeft een waarde tussen de 30 en 110 euro per kilogram.

4.1 Veevoer/visvoer

De visvangst uit open zee is sinds 1990 op zijn maximum en in de groeiende vraag wordt in toenemende mate voorzien middels kweekvis. De gestaag groeiende visconsumptie wordt sinds de 80er jaren mogelijk door de groeiende aquacultuur. In 2010 werd al 40% van de vis gekweekt en hierbij wordt veel gebruikt gemaakt van vismeel. De tekorten worden zichtbaar in de sterke stijging van de vismeelprijzen (Van der Voort et al., 2015). Algen kunnen hierin een goed alternatief worden, waarbij ze gebruik kunnen maken van reststromen en hieruit nutriënten (w.o. P dat eindig is) kunnen recycleren.

Microalgen biotechnologie is vergelijkbaar met de conventionele landbouw, maar heeft een veel hoger productiepotentieel dan de traditionele gewassen en kan worden verplaatst naar gebieden en klimaten die ongeschikt zijn voor agrarische doeleinden (zoals woestijn- en kustgebieden). (Gouveia et al., 2008) Algen kunnen meer eiwitten per hectare grond produceren dan de huidige akkerbouwgewassen en ook meer stikstof per oppervlakte-eenheid gebruiken. In open vijvers met een licht efficiëntie van 1,5%, produceren algen nu nog 15 ton drooggewicht per hectare bij Nederlands daglicht in water van 25 °C, maar ze kunnen in theorie maar liefst 25 ton drooggewicht per hectare produceren. Met een eiwitgehalte in de geoogste algen van ongeveer 50%, zou dit een eiwit opbrengst van 12,5 ton per hectare betekenen. De eiwit opbrengst van akkerbouwgewassen bedraagt ongeveer 1-2 ton per hectare. (Van der Weide et al., 2014)

Algen zijn potentieel een belangrijke eiwitbron voor de toekomst. Echter is hun kostprijs op dit moment nog te hoog in vergelijking met soja eiwit en vismeel. Marktperspectief moet in eerste instantie komen van de specifieke waarde van algen als bron van meervoudige onverzadigde vetzuren (PUFA) of als voederadditief met gezondheid of kwaliteit bevorderende eigenschappen.

In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens ingegaan op de voedingswaarde van algen, de gezondheid bevorderende effecten van algen, de kwaliteit bevorderende effecten van algen, de regelgeving en de economische waarde.

4.1.1 Voedingswaarde van algen

De variatie in nutriëntensamenstelling tussen verschillende soorten microalgen is groot, maar de eiwit-, koolhydraat- en vetgehaltes zijn vergelijkbaar met, zo niet beter dan die in conventionele voedingsmiddelen (zie Tabel 10, Lum et al., 2013).

Tabel 10. Nutriëntensamenstelling van conventionele voedingsmiddelen en diverse algen (% in droge stof) (Lum et al., 2013).

Bron	ruw eiwit	koolhydraten	vetten
Sojabonen	37	30	20
Maïs	10	85	4
Tarwe	14	84	2
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Arthrospira maxima</i> (<i>Spirulina</i>)	60-71	13-16	6-7
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-16	14-22
<i>Spirogyra</i> sp.	6-20	33-64	11-21
<i>Synechococcus</i> sp.	73	15	11

Algen zijn belangrijk als eiwitbron. In vergelijking met het aminozuurprofiel van sojabonen zijn de gehalten van de essentiële aminozuren lysine, cysteïne en tryptofaan in sommige algensoorten wat lager, terwijl de gehalten van de essentiële aminozuren methionine, tryptofaan en isoleucine vergelijkbaar of hoger zijn. Met uitsluiting van extreme waarden kan gesteld worden dat na geschikte verwerking de voedingskwaliteit van onderzochte algen gelijk of zelfs beter is dan andere conventionele plantaardige eiwitten. (Becker, 2013).

Microalgen vormen een waardevolle bron van vrijwel alle belangrijke vitaminen (o.a. Vitaminen A, B1, B2, B6, B12, C, E, Niacine, Biotine, foliumzuur en pathotheenzuur) wat de voedingswaarde van algen biomassa verbetert. Naast natuurlijke fluctuaties als gevolg van omgevingsfactoren hebben de naoogstbehandelingen en droogmethoden van de algen-biomassa een aanzienlijk effect op de vitamine inhoud. Dit geldt vooral voor de warmte-instabiele vitaminen B1, B2, C en nicotinezuur, waarvan de concentraties aanzienlijk verminderen tijdens het droogproces. Sommige *Chlorella* soorten bevatten meer vitamines dan de meeste geteelde planten. Ook *Spirulina* bevat meer dan tienmaal zoveel β -caroteen als enig ander voedsel, zoals wortelen en meer vitamine B12 in vergelijking met welke verse plantaardige of dierlijke voedselbron dan ook. Vergeleken met groene algen, spinazie en de lever vertegenwoordigt *Spirulina* de rijkste bron van vitamine E, thiamine, cobalamine, biotine en inositol. Verschillende microalgen soorten produceren α -toco-pherol (α -T, de biologisch actieve vorm van vitamine E) in zeer hoge concentraties. Rodriguez Zavala et al. ondervonden dat de productie van α -tocoferol in de heterotroof gekweekt microalg *Euglena gracilis* na 120 uur $3,7 \pm 0,2$ mg / g bereikte, wat in vergelijking met zonnebloemolie, sojaolie, olijfolie en maïs (sommige van de meest voorkomende natuurlijke bronnen vitamine E) respectievelijk ongeveer een 13, 18, 95 en 56 keer hogere productiviteit betekent. Ook als de gerapporteerde hoge biomassa opbrengst van de microalg *Tetraselmis suecica* kan worden bereikt, kan het concurreren met *E. gracilis* als kandidaat voor commerciële α -T productie. (Becker, 2013)

4.1.2 Gezondheid bevorderende aspecten van algen

Microalgen vertegenwoordigen een zeer groot, relatief onaangetast reservoir aan nieuwe verbindingen, waarvan vele waarschijnlijk biologische activiteit vertonen en unieke interessante structuren en functies hebben. In de laatste decennia zijn micro-organismen, met name cyanobacteriën, gescreend voor

nieuwe geneesmiddelen en antibiotica. Gepubliceerde gegevens tot 1996 onthullen 208 cyanobacteriële verbindingen met biologische activiteit, terwijl in 2001 het aantal gescreende verbindingen de 424 bereikte, met inbegrip van lipoproteïnen (40%), alkaloiden, amiden en andere. De gerapporteerde biologische activiteiten bestaan uit cytotoxische, antitumor, antibiotica, antimicrobiële (antibacteriële, antifungale, antiprotozoa), antivirale (bijvoorbeeld anti-HIV) activiteiten, alsmede immunosuppressieve en anti-inflammatoire effecten. De cytotoxische activiteit, van belang voor de ontwikkeling van geneesmiddelen tegen kanker, is waarschijnlijk gerelateerd aan verdedigingsstrategieën in het sterk competitieve waterige milieu, omdat meestal alleen die organismen waarbij een immuunsysteem ontbreekt goede producenten van secundaire metabolieten zoals toxinen zijn.

Zelfs zeer kleine hoeveelheden microalgen-biomassa kunnen de fysiologie van dieren positief beïnvloeden door verbeterde immuunrespons, wat resulteert in groeiverbetering, ziekteresistentie, antivirale en antibacteriële werking, verbeterde darmwerking, prebiotische werking, waardoor de gewenste bacteriën de darmen kunnen koloniseren, alsmede door verbeterde voederconversie, reproductievermogen en gewichtsbeheersing. Ook uiterlijke eigenschappen kunnen worden verbeterd, wat resulteert in een gezonde huid en een glanzende vacht, voor zowel landbouw huisdieren (pluimvee, koeien, stieren) als kleine huisdieren (katten, honden, konijnen, siervissen en vogels). Er is al een groot aantal voedings- en toxicologische evaluaties uitgevoerd die de geschiktheid van algen biomassa als waardevol voedingssupplement heeft aangetoond. (Gouveia et al., 2008) Meer gedetailleerde informatie over de inhoudsstoffen die een rol spelen en de onderzoeksresultaten die bij verschillende landbouwhuisdieren werden gevonden staan werden samengevat door Spruijt et al (2014 b).

4.1.3 Kwaliteit bevorderende aspecten van algen in voer

Algen worden ook wel als aanvullende voedingsbron gebruikt om de kwaliteit van de geproduceerde veehouderijproducten te verbeteren.

Toevoeging van microalgen aan rantsoenen van herkauwers geeft een verhoogde concentratie van n-3 PUFA in melk met een wisselend effect op het melkvetgehalte. (Lum et al, 2013)

Leghennen kunnen worden gevoed met speciale microalgen (zoals heterotroof groeiende *Schizochytrium* resp. *Cryptocodium*) om "OMEGA" eieren te produceren. Hiermee kan via de diervoeding voedsel geproduceerd worden dat de humane gezondheid positief kan beïnvloeden. (Pulz & Gross, 2004) *Dunaliella* Bardawil is een bron van vitamine A en een dooierkleur verbeterend middel bij legkippen. Er is gerapporteerd dat het effect van carotenoïden uit *Chlorella vulgaris* microalgen biomassa op de pigmentatie van de eidooier vergelijkbaar is met commerciële synthetische pigmenten. *Haematococcus* microalga kan ook worden gebruikt als een natuurlijke kleurstof in de voeding van vleeskuikens. Studies met leghennen gevoed met de rode microalg *Porphyridium* sp. biomassa (5% en 10% van het rantsoen) toonden een verlaagd cholesterolgehalte en een gewijzigde vetzuursamenstelling in de eidooier aan, zonder verschillen in lichaamsgewicht, eieraantal en eiergewicht. Legkippen gevoed met algen-biomassa verbruikten 10% minder voedsel voor beide groepen en hun serum cholesterol niveaus waren significant lager (namelijk 11% en 28% voor de groep gevoederd met respectievelijk 5% en 10% algentoevoeging) in vergelijking met de waarden van de controlegroep. Eigeel van leghennen gevoed met algen gaven verlaagde cholesterol spiegels (10%) en verhoogde linolzuur en arachidonzuur spiegels (29% en 24%, respectievelijk). Bovendien was de kleur van de dooier donkerder als gevolg van de hogere carotenoïde concentraties (2,4 maal hoger) bij leghennen die gevoed werden met 5% algen. (Gouveia et al., 2008)

Uit een recente studie bleek niet alleen 10% groeiverbetering, maar ook een potentiële productie van jodium-rijk varkensvlees voor menselijke consumptie wanneer varkens werden gevoed met algen die een natuurlijke hoog jodiumgehalte hebben. Bij varkens die gevoed werden met microalgen waren er verhoogde DHA concentraties in de lendenen en het onderhuidse vet. Echter, deze toename gaf geen dosis-afhankelijke respons (Lum et al., 2013). Bij kalveren werd in het vlees minder cholesterol gevonden na gebruik van algen in de voeding (Becker, 2013).

In de schelpdierenteelt en de visteelt kunnen en worden algen gebruikt worden om de smaak en kleur van het product te verbeteren.

4.1.4 Regelgeving gebruik van algen in voer

De regelgeving voor het in de handel brengen van diervoeders is vastgelegd in de EG Verordening 767/2009. Een diervoeder of diervoederingsrediënt moet opgenomen zijn in de lijst met toegelaten producten: via het 'Feed Materials Register' (www.feedmaterialsregister.eu). Wanneer een diervoeder niet in de lijst voorkomt dient deze te worden aangemeld via een notificatie (art. 24 lid 6, Verordening 767/2009/EG). Het aanmelden van een nieuw diervoeder is tevens via dit register mogelijk.

Het in de handel brengen van diervoeders brengt tevens voedselveiligheidseisen met zich mee van de Verordening 767/2009/EG (o.a. Art. 4), de Algemene Levensmiddelen Verordening (o.a. Art. 15) en de hygiëne voorschriften uit Verordening 1831/2003/EG.

Toelating van veevoederadditieven is opgenomen in Verordening 1831/2003. Ook voor veevoederadditieven is er een lijst met toegelaten producten: het European Union Register of Feed Additives (ec.europa.eu/food/food/animalnutrition/feedadditives/registeradditives_en.htm)

De algen die vanuit Azië geïmporteerd worden in Europa en gebruikt worden voor menselijke en dierlijke consumptie groeien veelal in nutriëntrijk restwater en worden gecontroleerd op producteigenschappen. In Europa wordt echter voorsnóg ook gecontroleerd op het proces en zijn er daarbij een aantal belangrijke regeltechnische belemmeringen om algen op afvalwater te kweken.

In het verleden was het niet toegestaan om algen als veevoederadditief te verhandelen als er mest of digestaat als voeding voor de algen was gebruikt. Sinds 2013 is de GMP+ regelgeving gewijzigd en een nieuwe voedselveiligheid standaard vastgesteld. De regelgeving voor teelt van diervoeders staan in <https://www.gmpplus.org/bestand/4224/gmp-b6---en-20130301.pdf.ashx>. Algen biomassa kan worden gebruikt als toevoegingsmiddel voor diervoeding, mits er een risicoanalyse is uitgevoerd op de productiemethode en de te verkopen producten zijn geanalyseerd om te verzekeren dat zij een minimaal niveau van bepaalde stoffen en geen ziekteverwekkers bevatten (Van der Weide et al., 2014).

4.1.5 Regelgeving gebruik van algen in voer

Algenbiomassa als veevoer en visvoer component kan sterk in prijs wisselen. Als specifiek voer voor opkweek van jonge vissen en schelpdieren bedraagt de prijs tussen de 40 en 500 euro per kilogram (Van der Voort, 2015). Volgens Koller ligt de prijs voor feed rond de 9 euro per kilogram. Spruijt et al (2014b) berekenden op grond van een veel gebruikt model in de veevoerindustrie een waarde van 5 euro per kilogram. Deze waarde houdt echter nog geen rekening met mogelijk verminderd gebruik van antibiotica.

De marktperspectieven voor gebruik van microalgen als voederadditieven zijn positief vanwege de verschillende positieve effecten op diergezondheid. Bovendien is het feit dat diverse landen het gebruik van antibiotica in voer willen verminderen een stimulans voor het gebruik van andere gezondheid bevorderende voederadditieven. (Voort et al., 2014) De waarde van algen voor veevoer moet dan ook in eerste instantie in dit additief effect gezocht worden. Naar de toekomst is echter ook de productie van omega 3 en 6 vetzuren en de eiwitproductie die met algen op een klein oppervlak bereikt kan worden belangrijk voor de productie van voer en voedsel.

4.2 Toepassing bij teelt van landbouwgewassen

Nieuw of relatief onbekend zijn de mogelijkheden voor gebruik van algen bij de teelt van landbouwgewassen. Spruijt & van der Weide (2016) zetten resultaten van diverse toepassingen van algen in de open teelten bij elkaar. Algen is hierbij breed geïnterpreteerd en bevat zowel de groene microalgen als ook de blauwgroene algen of cyanobacteriën.

Hieronder wordt achtereenvolgens ingegaan op gebruik als biomeststof en bodemverbeteraar, biopesticide (bestrijding van ziekten, plagen, onkruiden en schadelijke algenbloei), biostimulant (verhoging van de weerstand van planten) en biogroeieregulator (beïnvloeding van vrucht- en zaadzetting etc.).

4.2.1 Biomeststof en bodemverbeteraar

De toepassing van cyanobacteriën in de natte rijstteelt (*Nostoc*, *Spirulina* e.a.) is al lang bekend en in gebruik. Deze algen leggen naast CO₂ ook stikstof uit de lucht vast. Sinds de vruchtbaarheid van tropische rijstvelden in 1939 werd toegeschreven aan de aanwezigheid van cyanobacteriën, zijn vele proeven uitgevoerd met het aanbrengen van deze bacteriën om de opbrengst te verhogen. Niet alleen zorgen deze organismen voor extra N-vastlegging uit de lucht (20-30 kg N per hectare), ze geven vaak ook een groeibevordering en hogere opbrengsten van de rijst onafhankelijk van het stikstofeffect.

Minder bekend is dat algen ook op droge gronden belangrijk zijn. Stikstofbindende cyanobacteriën in woestijnkorsten leveren zelfs een belangrijke bijdrage aan de vruchtbaarheid van woestijnbodems en kunnen uiteindelijk vegetatie van woestijnen vergemakkelijken. Veel van de algensoorten die bij de algenbanken besteld kunnen worden komen uit de grond. Recent onderzoek bij het Franse INRA (Crouzet et al., 2013) meldt dat microalgen en cyanobacteriën een niet te verwaarlozen rol spelen in de bodemvruchtbaarheid en 10% van de microbiële biomassa in de bodem bedraagt (vooral in bovenste 5 cm). Daar deze organismen nauwer verwant zijn aan de hogere planten zouden met name de onkruidbestrijdingsmiddelen die veel gebruikt worden in de landbouw, een negatief effect hierop kunnen hebben en dit is in een aantal onderzoeken aangetoond.

Behalve dat de algen ook op gewone landbouwgronden N en CO₂ uit de lucht kunnen vastleggen en daarbij belangrijk zijn voor de bodemvruchtbaarheid, kunnen ze ook direct of indirect een positief effect hebben op hogere planten. Ze kunnen de vochthoudendheid van de bodem verbeteren of helpen behouden, erosie tegengaan en de beschikbaarheid van voor plantengroei essentiële micro-elementen in de bodem verbeteren. De algen kunnen bodemdeeltjes samenbinden, dankzij klevende eigenschappen van het overvloedige slijm dat door vele algensoorten uitgescheiden wordt. Doordat gedroogde algen via korsten een relatief ondoordringbare deklaag over het grondoppervlak vormen, kunnen ze bodemerosie en waterverlies door verdamping uit de bodem verminderen. Microalgen worden in de landbouw naast biologische meststof ook als bodemverbeteraar toegepast. Op kleine schaal zijn slijm-producerende microalgen van het geslacht *Chlamydomonas* gebruikt als bodemverbeteraars bij erosiebestrijding van pivot (cirkel) geïrrigeerde gronden in Noord-Amerika. Sommige rapporten geven aan dat blauwgroene algen biologisch actieve verbindingen in de bodem kunnen afgeven en dat deze verbindingen dan door hogere planten geassimileerd kunnen worden, waarmee hun groei significant verbeterd wordt (met diverse hier niet opgenomen referenties in Spruijt & van der Weide (2016)).

In Egypte zijn veldproeven in bonen (*Phaseolus vulgaris*) uitgevoerd om het gebruik van minerale stikstof te verminderen door toepassing van de blauwgroene algen *Nostoc muscorum*, *Nostoc humifusum*, *Anabaena oryzae*, *Wolleea spp*, *Phormidium spp* en *Spirulina platensis*. Mengsels van deze cyanobacteriën zijn als zaad- en/of bodembehandeling toegepast bij 50 en 85 % van de aanbevolen minerale stikstof. De verschillende toepassingen van cyanobacteriën resulteerden in positieve significante opbrengsteffecten tot ca 25%. De resultaten geven aan dat een kwart of de helft van de aanbevolen minerale stikstofgift kan worden bespaard door het gebruik van cyanobacteriën. Verder werd ook de biologische activiteit in de bodem verbeterd wat bleek uit een toename van bacteriële en cyanobacteriële

tellingen, CO₂-ontwikkeling, dehydrogenase en nitrogenase activiteiten (Hegazi et al., 2010 in Spruijt et al. 2016).

Behandelingen met een microalgen suspensie hadden een significant positief effect op het organische stofgehalte, CEC en pH en het soortenspectrum van microalgen in de bodem. Dit bleek in een onderzoek in de VS, waarbij de microalgen suspensie Gogreen@ tijdens en na de maïsoogst via irrigatie werd toegediend na intensief met maïs beteelde en met herbicide behandelde grond (Hastings et al., 2014). Ook de maisteelt in Nederland staat onder druk door een afnemende bodemvruchtbaarheid en strengere regelgeving t.a.v. (organische) meststofgebruik met verhoogde risico's van opbrengstreductie als gevolg. Toepassing van een algenpreparaat zou, zeker indien dit meerjarige effecten heeft op de bodemvruchtbaarheid en de N beschikbaarheid en daarmee de opbrengst, interessant kunnen zijn (persoonlijke mening op basis van expertise v.d. Weide).

Positieve effecten van inoculatie van de grond met cyanobacteriën werden ook gemeld voor de gewassen gerst, haver, tomaat, katoen, suikerriet, mais, chilipeper en sla (Van der Voort et al., 2015) en tarwe (Spruijt & van der Weide, 2016).

Recent werd ook onderzoek bekend uit België waar de algensoort *Nannochloropsis* en op afvalwater gegroeide algen/bacterievlokken werden gebruikt als meststof in tomaat. De tomaten bevatten hierdoor 30% meer suikers en 70% meer caretenoïden, met meer kleur en smaak als resultaat (Coppens et al, 2015).

4.2.2 Biopesticiden

Microalgen blijken in diverse onderzoeken uit de literatuur een goede bestrijding te geven van verschillende schimmels en aaltjes die in landbouwgewassen schade aanrichten. Bij schimmels zijn onderzoeksresultaten bekend van de werking van cyanobacteriën tegen zowel bodem- als bladschimmels. Meerdere aaltjes, maar vooral wortelknobbelaaltjes blijken in onderzoeken gevoelig te zijn voor microalgen. Nematicide-werking treedt niet alleen op bij gebruik van cyanobacteriën, maar ook bij de groene alg *Chlorella vulgaris*. Verder is er (buiten de landbouw) insecticide-, molluscicide-, herbicide- en algacidewerking met cyanobacteriën aangetoond. Mogelijk kunnen microalgen naast schimmels en aaltjes ook diverse insecten, slakken en onkruiden bestrijden die een bedreiging vormen voor landbouwgewassen.

De manier waarop microalgen worden toegepast ter bestrijding van andere organismen is erg divers. In de literatuurbronnen varieert het van algenextracten, algenfiltraten en gevriesdroogde biomassa tot uitscheidingsproducten en sporen van microalgen. Uit de in de literatuur gevonden onderzoeksresultaten is niet altijd op te maken of de microalgen zelf of dat hun metabolieten een bestrijdingseffect geven. EU-richtlijnen en de Green Deal Groene Gewasbeschermingsmiddelen zijn een stimulans om gewasbeschermingsmiddelen op basis van algen te ontwikkelen. De marktverwachting voor biopesticiden op de langere termijn is goed. De verwachting is dat veel oudere en minder selectieve synthetische pesticiden met een grote marktomvang gedeeltelijk uitgefaseerd gaan worden en er grote behoefte ontstaat aan alternatieven (Van der Voort et al., 2015).

4.2.3 Biostimulant

Biostimulanten hebben een effect op de plant waardoor deze minder gevoelig is voor ziekten en plagen, analoog zoals vaccins dat hebben tegen ziekten bij mens en dier of vitaminen en gezonde voeding in de preventie voor ziekten. Er zijn ook algenextracten die deze werking hebben (Burketova et al, 2015).

4.2.4 Groeiregulatie

Er zijn ook interessante toepassingen gerapporteerd voor microalgen in de groeiregulatie. Verschillende cyanobacterie soorten produceren groeibevorderende stoffen als auxinen, aminozuren, vitaminen en gibberellinen. Uit de vele onderzoeksresultaten blijken positieve effecten van diverse extracten van cyanobacteriën op kieming, blad- en/of stengelgroei, bloei en/of vruchtvorming van landbouwgewassen als rijst, katoen, vlas, mango, komkommer, pompoen, tomaat, radijs en alfalfa. Deze positieve effecten op de plantengroei hangen vaak nauw samen met de stikstoflevering door cyanobacteriën en de bodem verbeterende eigenschappen. Maar ook door bespuiting worden opmerkelijke resultaten behaald in bijvoorbeeld de fruitteelt. In Spruijt & van der Weide (2016) wordt een onderzoek aangehaald waarbij in Egypte de opbrengst van mangobomen in kg/ha verdubbelt na bespuiting met algenextract. Ook vanuit Nederlandse telers worden positieve, maar niet wetenschappelijke, ervaringen gemeld t.a.v. vruchtzetting bij fruitbomen na bespuiting met algenwaters (persoonlijke communicatie v.d. Weide). Verder kunnen cyanobacterie extracten vermeerderingstechnieken verbeteren (Spruijt & van der Weide, 2016).

De hiervoor gerapporteerde resultaten concentreren zich op microalgen inclusief de cyanobacteriën. Voor de zoutere proceswaterstroom zouden ook wieren overwogen kunnen worden. Ook van de wieren zijn diverse meerwaarden bekend (Sharma et al., 2014) en de vermarkting van wieren (uit zee) heeft al enige omvang. Wieren hebben het voordeel dat ze groter zijn en gemakkelijker geoogst kunnen worden. Makkelijker oogsten geldt overigens ook voor sommige microalgen (zoals *Spirulina*) en zoetwaterplanten die ook voor effluent reiniging gebruik kunnen worden.

4.2.5 Regelgeving

Voor meststoffen is er binnen Europa een toelatingsprocedure (EG verordening 2003/2003), daarnaast zijn in Nederland alle andere producten die voldoen aan de Meststoffenwet en aanhangende besluiten en regelingen toegelaten. Een uitzondering geldt wel voor meststoffen die geproduceerd zijn uit afval- of reststromen. Daarvoor geldt eveneens een toelatingsprocedure, toegelaten producten zijn vermeld in Bijlage Aa van de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet.

Gewasbeschermingsmiddelen mogen alleen op de Europese markt gebracht worden als zij voldoen aan de goedkeuringscriteria voor werkzame stoffen binnen De Verordening gewasbescherming 1107/2009. Dit geldt zowel voor chemische gewasbeschermingsmiddelen als voor gewasbeschermingsmiddelen van natuurlijke oorsprong. Zeewier- en algenextracten zijn krachtens verordening 1107/2009 als werkzame stof goedgekeurd voor de groeiregulatie van planten. Er zijn nog geen specifieke toelatingen voor algen of algenextracten voor gebruik als fungicide, nematicide, insecticide of herbicide.

Het gebruik als biostimulant en bodemverbeteraar is vooralsnog veel minder gereguleerd. Er wordt gewerkt aan een revisie van de EG verordening 2003/2003 inzake meststoffen. Daarbij worden niet alleen de regels voor de toelating van minerale meststoffen herzien, maar wordt het toepassingsgebied ook uitgebreid met organische meststoffen, bodemverbeteraars en biostimulanten. De herziene versie zal op zijn vroegst in 2017 in werking treden (Spruijt en van der Weide, 2016).

De noodzaak voor hergebruik van reststromen wordt ook door de politiek gezien. Dit blijkt uit de activiteiten van de interdepartementale commissie Corbey (www.corbey.nl) en de op 27 januari door minister Kamp en staatssecretaris Dijkzema naar de tweede kamer gestuurde brief met een strategische visie voor de inzet van biomassa op weg naar 2030. Pijlers hierin zijn o.a. het inzetten op een stimulerende wet- en regelgeving, innovatie en slimme marktprikkels.

4.2.6 Economische waarde algen bij landbouw toepassingen

Algen hebben in de landbouw dus naast toepassing in veevoer een waarde als o.a. biostimulant, biopesticide, biofertilizer, biogroeieregulator en bodemadditief. Het is echter moeilijk om de actuele marktprijs voor deze type toepassingen te bepalen. Dit komt omdat bij veel producten in onderzoek niet of onvoldoende gemeld wordt hoeveel algen ze precies bevatten of hoeveel algen nodig waren om een extract te maken. Verder is het duidelijk een gebied waar pas recent met aandacht naar wordt gekeken en het onderzoek nog relatief beperkt is en de marktwaaarde soms nog onvoldoende onderbouwd is voor een goede commercialisering.

Er is slechts een beperkt aantal producten op de markt waarvan de verkoopprijzen gemeld worden. Agroplasma S.A. (Spanje) verkoopt Ferticell bio stimulatoren op basis van microalgen voor €1300-1500 per ton. Soley Biotechnology Institute verkoopt bio meststoffen in de vorm van mengsels van Spirulina, Haematococcus, Chlorella en Nannochloropsis voor €9-23 per kg (Van der Voort et al., 2015). Bij beide producten is niet bekend hoeveel algen er eigenlijk inzitten per kg product en wat dan de daadwerkelijke kilogram prijs voor de gebruikte algen zijn.

De maximale waarde die rationeel voor een product gevraagd kan worden, moet zich reflecteren in de meerwaarde die de teler er mee bereikt, bijvoorbeeld doordat een gewasbehandeling kan worden vervangen of bij het ontbreken van een concurrerend alternatief. Dat laatste speelt bijvoorbeeld in de biologische landbouw waar bestrijding van ziektes met huidige maatregelen vaak onvoldoende is.

Hieronder worden enkele voorbeelden gegeven:

- Wanneer een tomatenteler per m² 10% meer krijgt voor zijn smaakvollere tomaten dan mag de toepassing per m² maximaal €5 kosten,
- Wanneer een biologische aardappelteler met behulp van een algentoepassing een geslaagde bestrijding van de aardappelziekte kan uitvoeren, kan een 25% hogere opbrengst worden behaald en levert dit maximaal €2240/ha extra op (KWIN-AGV, 2015),
- Wanneer een maisteler (die op grond van de huidige regelgeving niet meer maximaal mag bemesten) met een algentoepassing eenmalig 5% extra opbrengst weet te bereiken, is dat €150 per ha meer (KWIN-AGV 2015),
- Wanneer een granulaattoepassing tegen aaltjes in zetmeelaardappelen vervangen kan worden met gelijk bestrijdend effect, dan mag de toepassing niet duurder zijn dan het nu beschikbare product: 125 euro/ha (KWIN-AGV 2015),
- Wanneer een fungicidebespuiting bij een gangbare teler vervangen kan worden door een algenwaterbespuiting, dan mag de toepassing tussen €25 en € 250 kosten (KWIN-AGV 2015),
- Wanneer door toepassing van N-fixerende cyanobacteriën eenmalig 20 kg N uit kunstmeststof kan worden vervangen bedraagt de meerwaarde slechts €21/ha (KWIN-AGV 2015).

4.3 Conclusie

Er zijn interessante kansen voor toepassing van microalgen als veevoer en bij de teelt van landbouwgewassen. Wat betreft veevoer toonden diverse onderzoeken aan dat algen een positief effect kunnen hebben op diergezondheid en productkwaliteit. Vanwege de kostprijs van algenbiomassa moet de waarde bij gebruik als veevoer in eerste instantie worden gezocht in dit additief effect.

Verder blijken microalgen, en stoffen die door microalgen geproduceerd worden, potentie te hebben als gewasbeschermingsmiddel. Microalgen kunnen ook als bodemverbeteraar worden toegepast en met cyanobacterie toepassingen kan bespaard worden op de minerale stikstofgift. Bij bemesting met micro-algen kan de smaak en kleur van voedselproducten verbeterd worden en mogelijk ook de weerstand van de plant. Verder kunnen extracten van cyanobacteriën de groei bevorderen. De meerwaarde van algentoepassingen zou vooral in de combinatie van deze effecten kunnen liggen.

Bij toepassing van algenproducten als veevoer, biomeststof en biopesticide moet wel rekening worden gehouden met regelgeving op o.a. gebied van toelating van veevoeders, meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen. Het gebruik als biostimulant en bodemverbeteraar is vooralsnog veel minder gereguleerd. Verder wordt door de politiek (Commissie Corbey) inmiddels de noodzaak voor hergebruik van reststromen gezien waarbij de focus ligt op stimulerende wet- en regelgeving.

5 Slotbeschouwing

In de periode 2012-2015 is gekeken naar de mogelijkheden van het zuiveren van brouwerijprocesafvalwater met behulp van microalgen. Het procesafvalwater bevatte circa 30-40 mg N/l en 6-8 mg P/l en heeft een rood-bruinachtige kleur en is licht troebel. Groeitesten op het laboratorium lieten zien dat microalgen er goed op wilden groeien (Van Dijk et al., 2013a). Verder bleek dat met een labopstelling van een 2 l doorstroomreactor (chemostaat) het mogelijk was om bij een verblijftijd van circa 5 dagen 80-90% van de stikstof en fosfor te verwijderen. Bij een verblijftijd van 1 dag bedroeg de stikstof- en fosforverwijdering circa 50%.

Vervolgens is opgeschaald naar een kuubsreactor met 4 LED-lampen met een totaal elektrisch vermogen van 720 W. Bij een verblijftijd van 5 dagen werd een stikstofverwijdering bereikt van 70-80%. Voor fosfor bedroeg de verwijdering 30-40%. Het zuiveringsresultaat was qua grootte orde vergelijkbaar met die van de huidige aerobe zuivering. Het behaalde resultaat met de kuubsreactor was minder dan bij de 2 l reactor. Dit hangt mogelijk samen met een verschil in lichtinput, deze was bij de 2 l reactor per volume-eenheid hoger dan bij de kuubsreactor. Ook de lichtverdeling in de kuubsreactor is waarschijnlijk nog niet optimaal. Modelberekeningen lieten zien dat met name bij een groenere cultuur (hogere optische dichtheid) in zones het verst van de lamp verwijderd de lichtsterkte waarschijnlijk onvoldoende is voor optimale groei (Van Dijk et al., 2013b). Inmiddels is een nieuwe versie van de kuubsreactor ontwikkeld met een ronde in plaats van een vierkante vorm en 6 lampen in plaats van 4 lampen. Het laatste geeft een betere lichtverdeling in de reactor. Met deze reactor zijn overigens geen proeven gedaan in onderhavig project.

LED-belichting versus zonlicht reactor

Het voordeel van een LED-reactor is dat de algenproductie en daarmee de zuivering van het proceswater stabiel is dan bij gebruik van zonlicht. In het laatste geval is er sprake van een dag/nachtritme en is er in de wintermaanden weinig licht en daardoor weinig algengroei en nutriëntenopname. Het nadeel van gebruik van LED-belichting is het hogere energieverbruik. Daarnaast kan, afhankelijk van de lichtinput, koeling van de reactor nodig zijn.

In Tabel 11 zijn voor zowel LED-belichting als zonlicht een aantal scenario's met elkaar vergeleken waarbij gekeken is naar de algengroei, het ruimtebeslag en de energiekosten voor LED-belichting. Bij scenario LED 1 is uitgegaan van de lichtinput zoals bij de kuubsreactor (720 W/m^3 reactorinhoud). Uitgaande van een efficiency van LED-lampen van 50% (nieuwste generatie LED-lampen) levert dit een lichtvermogen van 360 W/m^3 reactorinhoud. Door de hoeveelheid lichtenergie te vermenigvuldigen met de fotosynthetische efficiency (PE) kan de hoeveelheid algenbiomassa energie worden berekend. De PE geeft aan welk deel van de lichtenergie van de LED-lamp wordt omgezet in algenbiomassa-energie. Door laatstgenoemde te delen door de energie-inhoud van algenbiomassa (hier is uitgegaan van 22 kJ/g) kan de biomassaproductie worden berekend bij een bepaalde lichtinput. In scenario LED 1 is uitgegaan van een PE van 5% en een lampefficiency van 50%, in deze situatie wordt 2,5% van de elektrische energie omgezet in biomassa-energie, hierna aangeduid als elektrische energie efficiency (EEE). Een waarde van 2,5% is de maximale waarde die is gerealiseerd in de kuubsreactor bij testen met kunstmestmedium (Van Dijk et al., 2013b). Om een P-gehalte van 1 mg P/l te realiseren is op basis van de bovengenoemde uitgangspunten een verblijftijd vereist van ruim 9 dagen. Het energieverbruik voor de LED-verlichting bedraagt dan 147 kWh/m^3 te zuiveren proceswater. Bij een prijs van $\text{€}0,08/\text{kWh}$ komt dit overeen met bijna $\text{€}13/\text{m}^3$ proceswater. In de flashproeven (hoofdstuk 3) is een maximale PE gemeten van bijna 7%, bij een lampefficiency van 50% betekent dit een EEE van circa 3,5%. Als met verdere verbeteringen van het reactorontwerp een EEE mogelijk zou zijn van 5% kan het elektriciteitsverbruik worden gehalveerd (LED 2). Theoretisch bedraagt de lichtefficiency circa 21% ervan uitgaande dat er 10 fotonen nodig zijn om 1 molecuul CO_2 vast te leggen. Als van de elektrische energie van een LED-lamp circa 50% wordt omgezet in lichtenergie betekent dit een EEE van circa 10% (LED 3). In dat geval zou het energieverbruik van de LED-verlichting ruim 35 kWh/m^3 proceswater bedragen. Om de kosten voor de elektriciteit voor de lampen te compenseren zou een kg algenbiomassa $\text{€}21$, $\text{€}11$ en $\text{€}5$ moeten opbrengen bij een EEE van respectievelijk 2,5, 5 en 10%.

Uitgaande van een bepaalde reactorhoogte (hier is uitgegaan van 2 m) en de benodigde verblijftijd in de reactor kan het benodigde reactoroppervlak worden uitgerekend. Deze loopt uiteen van ruim 1 tot bijna 5 m² per m³ te zuiveren afvalwater voor respectievelijk een EEE van 2,5 en 10%.

In Tabel 10 zijn tevens berekeningen weergegeven bij gebruik van zonlicht (open vijver). In scenario ZON 1 is uitgegaan van een gemiddelde stralingsvermogen van 117 W/m² (gemiddelde van zomer en winter). Voor de PE is uitgegaan van 1,5%, deze waarde is ook gebruikt in het bio-economische algenmodel (Spruijt et al., 2014). Om het P-gehalte van het proceswater te verlagen van 7 naar 1 mg/l is bij een waterhoogte van 0,3 m een verblijftijd nodig van 32 dagen en bedraagt het grondbeslag 105 m²/m³ te zuiveren proceswater. In de zomer (juni) bedraagt de gemiddelde straling circa 115 W/m². In dat geval bedraagt de verblijftijd 17 dagen en is een reactoroppervlak nodig van 57 m²/m³ proceswater. In vergelijking met een LED-reactor is bij zonlicht een aanzienlijk groter oppervlak nodig.

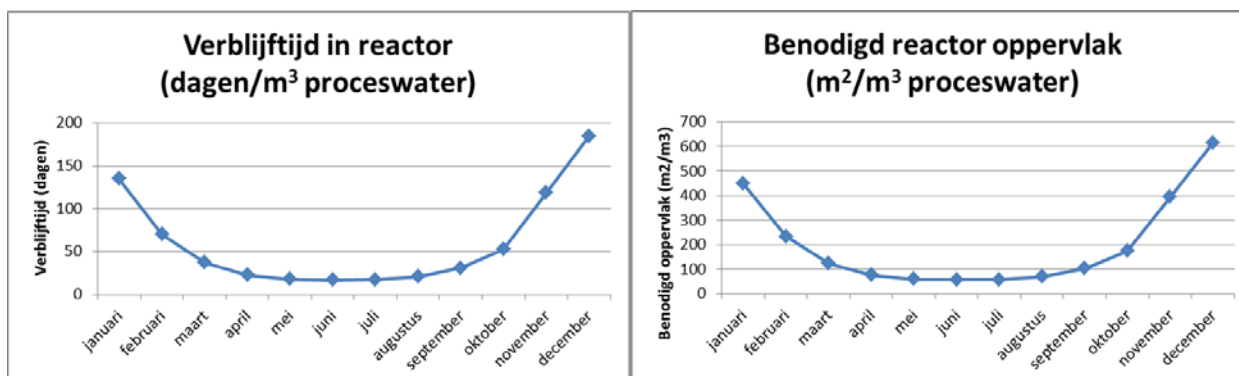
In Figuur 14 is weergegeven hoe de benodigde verblijftijd en het benodigd reactoroppervlak varieert door het jaar heen. In de periode maart-oktober varieerde het benodigde reactoroppervlak van 55 tot 150 m² per m³ te zuiveren proceswater, in de periode nov-feb van 250 tot 600 m² per m³ te zuiveren proceswater.

Tabel 11. Effect van lichtinput en –efficiency bij zowel LED-belichting als zonlicht (open vijver) op de fosforverwijdering, verblijftijd in de reactor, benodigd reactoroppervlak en energieverbruik en elektriciteitskosten voor LED-belichting.

	Lichtbron						
	LED				ZON		
	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	ZON 1	ZON 2	ZON 3
Elektrisch vermogen, W/m ³	720	720	720	720			
Lichtvermogen, W/m ²	-	-	-	-	117	217	217
Lichtvermogen, W/m ³	360	360	360	360	390	723	723
Efficiency lichtenergie --> biomassaenergie (PE), %	5	10	20	5	1,5	1,5	1,5
Efficiency elektriciteit --> biomassaenergie (EEE), %	2,5	5	10	2,5	-	-	-
Potentiële groeisnelheid ¹ , g ds/m ³ /dag	71	141	283	71	23	43	43
Correctiefactor crashes	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Correctiefactor, temp					0,90	0,90	0,90
Actuele groeisnelheid, g ds/m ³ /dag	65	130	260	65	19	35	35
P-opnamesnelheid, g P/m ³ /dag	0,65	1,30	2,60	0,65	0,19	0,35	0,35
P-gehalte proceswater, mg/l	7	7	7	3	7	7	3
Streef P-gehalte effluent, mg/l	1	1	1	1	1	1	1
Verblijftijd in reactor, dagen	9,2	4,6	2,3	3,1	31,6	17,0	5,7
Geproduceerde biomassa, g/m ³ proceswater	600	600	600	200	600	600	200
Waterhoogte reactor, m	2	2	2	2	0,3	0,3	0,3
Benodigd reactoroppervlak, m ²	4,6	2,3	1,2	1,5	105	57	19
Energieverbruik lamp, kWh/m ³ proceswater	147	73	37	49			
Energiekosten lamp, €/m ³ proceswater ²	12,8	6,4	3,2	4,3			
Energiekosten lamp, €/kg ds algen ²	21,3	10,6	5,3	21,3			

¹ berekend op basis van lichtinput, lichtefficiency en energie-inhoud algenbiomassa van 22 kJ/g

² gehanteerde prijs elektriciteit (€0,08/kWh)



Figuur 14. Benodigde verblijftijd (bij een reactordiepte van 30 cm) en reactoroppervlak per m³ te zuiveren proceswater in relatie tot maand in het jaar om met behulp van zonlicht (open vijver) via algengroei het P-gehalte van het proceswater te verlagen van 7 tot 1 mg P/l.

Door het hoge energieverbruik voor de LED-belichting cq. hoge grondbeslag bij een zonlichtreactor (open vijver) kan ook overwogen worden eerst een voorbehandeling uit te voeren. In het onderzoek zijn eerste experimenten uitgevoerd met een cavitatie-flotatie behandeling. Hierdoor werd het N- en P-gehalte van het effluent sterk verlaagd. In Tabel 10 is een variant meegenomen waarin door een voorbehandeling het fosforgehalte van het proceswater is verlaagd van 7 naar 3 mg/l (LED 4 en ZON 3). Hierdoor is het mogelijk het energieverbruik voor de LED-verlichting en het benodigde grondoppervlak met een factor drie omlaag te brengen. Bij een voorbehandeling moet nog wel een duurzame bestemming worden gevonden voor de biomassa en nutriënten in de vaste fractie die hierbij ontstaat. Via een vergistingsstap zou hieruit energie kunnen worden gewonnen en het digestaat zou kunnen worden ingezet voor bemestingsdoeleinden.

In vergelijking met Noordwest-Europa kan in klimaatregio's met meer zonlicht (dichter bij de evenaar) een (volledige) zonlichtreactor aantrekkelijker zijn. Modelberekening hebben laten zien dat op locaties dicht bij de evenaar de potentiële jaarproductie hoger is en bovendien weinig spreiding vertoont over het jaar heen (Spruijt et al., 2014).

Optimalisatie en kostenreductie

Bovenstaande geeft aan dat afvalwaterzuivering met microalgen perspectieven biedt, maar dat er nog een optimalisatieslag nodig is met betrekking tot productie en kostenreductie.

Naast de reactoroptimalisatie (o.a. lichtinbreng, menging) en voorbehandeling van het afvalwater, kan ook de voorbehandeling van de algen mogelijkheden bieden het systeem te verbeteren, bijvoorbeeld door de algen eerst op te kweken onder N- en P-arme omstandigheden (uithongeren). Een eerste labproef, uitgevoerd in dit project, liet zien dat het uithongeren van algen leidde tot een significant verhoogde N- en P-afname in het groeimedium (Van Dijk et al., 2014). Deze algen moeten eerst wel worden opgekweekt. Belangrijke vraag is of bij dit systeem netto minder energie nodig is dan bij een systeem zonder uitgehongerde algen.

Uit oogpunt van kostenbeheersing is ook de oogstmethode van belang. De huidige manier van oogsten via centrifugeren is bedrijfszeker, maar kost veel energie. Een mogelijk energiezuiniger alternatief is dissolved air flotation (DAF) in combinatie met vlokmiddelen (Barros et al., 2016; Laamanen et al., 2016). In het algenonderzoek in Lelystad wordt hier ook naar gekeken. De tot nu toe behaalde resultaten laten zien dat met behulp van de juiste vlokmiddelen een goede verwijdering van de algenbiomassa kan worden gerealiseerd (> 90%), maar dat er wel contaminatie van de algenbiomassa met het vlokmiddel plaatsvindt (Van Dijk et al., 2016). Recent onderzoek van DAF gecombineerd met ozon heeft veelbelovende resultaten laten zien (Cheng et al., 2011). Ozon kan als voordeel hebben dat het niet meer in het terug te voeren water aanwezig zal zijn, noch in de geoogste biomassa. In 2016 zullen hiermee ook testen in Lelystad worden uitgevoerd.

Met het oog op een energiezuinigere oogst zou ook het systeem van MAB-vlokken interessant kunnen zijn. Dit betreft een kweekstelsel waarbij wordt geselecteerd op een combinatie van algen en bacteriën die grotere aggregaten/vlokken vormen (Van den Hendt et al., 2014b). De bacteriën breken met behulp van zuurstof (door algen geproduceerd) het organisch materiaal af tot CO₂ en minerale N en P die weer als voedingsbron dienen voor de algen. Een voordeel van dit stelsel is dat de algen eenvoudig via sedimentatie kunnen worden geoogst. Het betreft dan wel een gemengde biomassa met zowel algen als bacteriën, waarvan overigens de gebruikswaarde als voer voor garnalen en bij de teelt van tomaten al wel is aangetoond. Mogelijk valt het stelsel van MAB-vlokken ook te combineren met de aerobe zuivering, waarbij de algen de zuurstof leveren voor de bacteriën en er kan worden bespaard op beluchtingskosten.

Tenslotte zal ook verder gekeken moeten worden naar de bedrijfszekerheid van het stelsel met name wat betreft de beheersing van predatoren. Ervaringen met open algenvijvers laten zien dat de productie hierdoor tijdelijk sterk kan worden beperkt. In de kuubsreactoren zijn daarom grazerfilters aangebracht, maar daarmee worden alleen de grotere grazers eruit gehaald.

Voordelen algen t.o.v. huidige zuivering

Afvalwaterzuivering via algenkweek heeft echter ook een aantal specifieke voordelen. Anders dan bij de gangbare zuivering van afvalwater zijn algen in staat om de stikstof en fosforconcentraties zodanig te verlagen dat de strengste milieunormen worden gehaald. Dat komt, omdat pas bij lage concentraties duidelijke groei-limitaties optreden. De half-verzadigingsconstanten (concentraties waarbij de groei halveert) zijn voor microalgen aanzienlijk lager dan de strengste KRW-normen voor oppervlaktewater (1-2 mg N/l en 0.05-0.15 mg P/l). In de literatuur worden half-verzadigingsconstanten genoemd van 10-650 µg N/l en 0,03-19 µg/l (Genkai-Kato, 2004; Klausmeier et al., 2004; Hein et al., 1995; Rhee, 1974).

Verder wordt er een biomassa geproduceerd die een hogere waarde heeft dan het slib dat ontstaat in de gangbare waterzuivering. In hoofdstuk 4 zijn diverse toepassingsmogelijkheden voor algenbiomassa weergegeven. Omdat de algenbiomassa op afvalwater is gekweekt vragen de veiligheidsaspecten wel aandacht (aanwezigheid micro-verontreinigingen, pathogenen en zware metalen). Bij gebruik van de algenbiomassa voor veevoer moet bijvoorbeeld worden voldaan aan de GMP+-normen. Echter voor proceswaters uit de voedingsmiddelenindustrie gelden minder strenge normen, waardoor de biomassa gekweekt op deze waters waarschijnlijk beter verwaard kunnen worden.

Het ander voordeel van algenuivering in vergelijking met gangbare zuivering is dat nutriënten worden gerecycled. Dat is van belang omdat deze nutriënten deels eindig zijn, zoals fosfor, of met inzet van veel energie moeten gemaakt (stikstof). Overigens kunnen de nutriënten ook via andere methoden (fysisch/chemisch) worden teruggewonnen uit de afvalwater. Voor fosfor lopen er pilots via terugwinning via struvietvorming en een aantal grote slibverwerkers (SNB en HVC) hebben onlangs een overeenkomst getekend voor het terugwinnen van fosfor uit de verbrandingsassen van slib. Het voordeel van recycling via algenbiomassa is dat er naast fosfor ook andere nutriënten worden teruggewonnen en dat CO₂ (uit verbrandingsgas of vrijkomend bij fermentatie) en eventuele restwarmte wordt gebruikt en in nuttige massa vastgelegd. Bovendien zijn alternatieve eiwitbronnen en bronnen van omega 3 en 6 vetzuren naar de toekomst nodig voor de voedselvoorziening bij een groeiende wereldbevolking.

Vanuit het oogpunt van de genoemde voordelen verdient zuivering van rest- en afvalstromen via microalgen (of andere aquatische biomassa) verder aandacht in het onderzoek en bij de inrichting van een circulaire economie.

6 Referenties

- Abu-Gosh, S., D.Fixler, Z. Dubinsky & D. Iluz (2016). Flashing light in microalgae biotechnology. *Bioresource Technology* 203, 357-363.
- Barros, A.I., A.L. Goncalves, M.Simoes, J.C.M. Pires (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1489-1500.
- Becker, E.W. Microalgae for Human and Animal Nutrition. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology* , Chapter 25. 2013.
- Boelee, N.C., H. Temmink, M. Janssen, C.J.N. Buisman & R.H. Wijffels (2011). Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms. *Water Research* 45, 5925-5933.
- Bruketofa, L., TRDA, L., Ott, P.G. & Valentova, O. (2015) Bio-based resistance inducers for sustainable plant protection against pathogens. *Biotechnology Advance* 33, 994-1004.
- Cheng, Ya-Ling, Y-Chuan Juang, Guan-Yu Liao, Pei-Wen Tsai, Shih-Hsin Ho, Kuei-Ling Yeh, Chun-Yen Chen, Jo-Shu Chang, Jhy-Chern Liu, Wen-Ming Chen & Duu-Jong Lee (2011). Harvesting of *Scenedesmus obliquus* FSP-3 using dispersed ozone flotation. *Bioresource Technology* 102, 82-87.
- Coppens, J., Grunert, O., Van Den Hende, S. Vanhoutte, I.Boon, N. Haesaert, G. & Leen De Gelder, L. (2015) The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of Applied Phycology*, p 1-11.
- Crouzet, O., Wiszniowski, J., Donnadiou, F., Bonnemoy, F. , Bohatier, J. & Mallet (2013) C. Dose-Dependent Effects of the Herbicide Mesotrione on Soil Cyanobacterial Communities. *Arch Environ Contam Toxicol* (2013) 64:23–31
- Degen, Jorg, Andrea Uebele, Axel Retze, Ulrike Schmid-Staiger& Walter Trösch, 2001. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect . *Journal of Biotechnology* 92, p. 89–94
- Gouveia, L., Batista, A.P., Sousa, I., Raymundo, A. and Bandarra, N. M. Microalgae in Novel Food Products. *Food Chemistry Research Developments*, 2008.
- Grobbelaar, Johan U., 2013. Mass Production of Microalgae at Optimal Photosynthetic Rates. In: *Agricultural and Biological Sciences, Photosynthesis*, edited by Zvy Dubinsky, ISBN 978-953-51-1161-0, Published: June 12, 2013 under CC BY 3.0 license, p. 357-371.
- Grobbelaar, J.U., L. Nedbal & V. Tichy, 1996. Influence of high frequency light/dark fluctuations on photosynthetic characteristics of microalgae photoacclimated to different light intensities and implications for mass algal cultivation. *Journal of Applied Phycology* 8, p. 335-343
- Hastings, K.L., Smith, L.E., Lindsey, M.L., Blotsky, L.C., Downing, G.R., Zellars, D.Q., Downing, J.K., Corena-McLeod, M. (2014) Effect of microalgae application on soil algal species diversity, cation exchange capacity and organic matter after herbicide treatments *F1000Research* 2014, 3:281.
- Hegazi, A.Z., Mostafa, S.S.M. & Ahmed, H.M.I. (2010) Influence of different cyanobacterial application methods on growth and seed production of common bean under various levels of mineral nitrogen fertilization. *Nature and Science* 2010; 8(11)

Hein, M., Pedersen, M. and Sand-Jensen, K. (1995). Size-dependant nitrogen uptake in micro- and macroalgae. *Marine Ecology Progress Series* 118, 247-253.

Kim, Tae-Hyeong, Yunhee Lee, Su-Hyun Han, Sun-Jin Hwang, 2013 The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus* sp. For wastewater treatment, *Bioresource Technology* 130, 75-80

Klausmeier, C., Litchman, E., Daufresne, T. and Levin, S. (2004). Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature* 429, 171-174

Koller, M., A. Muhr & G. Braunegg (2014) Microalgae as versatile cellular factories for valued products. *Algal Research* 6: 52-63

Laamanen, C.A., G.M. Ross & J.A. Scott (2016). Flotation harvesting of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58, 75–86.

Lum, K.K., Kim, J. and Lei, X. G. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 2013, 4:53

Lunka, Alex A. & David J. Bayless, 2013. Effects of flashing light-emitting diodes on algal biomass productivity. *Journal of Applied Phycology* 25, p. 1679-1685.

Matthijs, Hans C.P., Hans Balke, Udo M. van Hes, Bernd M.A. Kroon, Luuc R. Mur & Roger A. Binot, 1996. Application of light-emitting diodes in bioreactors; flashing light effects and energy economy in algal culture (*Chlorella pyrenoidosa*). *Biotechnology and Bioengineering* 50, 98-107.

Mooij, Peter R., Gerben R. Stouten, Jelmer Tamis, Mark C. M. van Loosdrecht & Robbert Kleerebezem, 2013. Survival of the fattest. *Energy and Environmental Science* 2013, 6, 3404-3406.

Nedbal, Ladislav, Vladimir Tichy, Fusheng Xiong & Johan Grobbelaar, 1996. Microscopic green algae and cyanobacteria in high-frequency intermittent light. *Journal of Applied Phycology* 8, 325-333.

Park, Kyong-Hee & Choul-Gyun Lee, 2001. Effectiveness of flashing light for increasing photosynthetic efficiency of microalgal cultures over a critical cell density. *Biotechnol. Bioprocess. Eng.* 2001 (6), 189-193.

Rhee, G. (1974). Phosphate uptake under nitrate limitation by *Scenedesmus* Sp. and its ecological implications. *Journal of Phycology* 10, 470-475.

Sharma, H.S.S., C. Fleming, C. Selby, J.R. Rao & T. Martin (2014). Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stress. *Journal of Applied Phycology* 26, 465-490.

Spruijt, J., R. Schipperus, M. Kootstra, C. de Visser & B. Parker (2014a). *AlgaEconomics; bio-economic production models of microalgae and downstream processing to produce bioenergy carriers*. Public Output report of the EnAlgae project, Swansea, report WP2A7.10.

Spruijt, J., van der Weide, R.Y. & van Krimpen, M.M. (2014b) Kansen voor micro-algen als grondstofstroom in diervoeders Lelystad : WUR/PPO, (PPO rapport 619) - p. 51

Spruijt, J. & van der Weide, R. (2016) Kansen voor toepassing van microalgen in landbouwgewassen,... aanvullen landbouwtoepassingen Lelystad : WUR/PPO, (PPO rapport concept 60p)

STOWA, 2011. Effluentpolishing met algen. Hoofdrapport.

STOWA, 2013. Symbaalzuivering. Theoretische verkenning van de haalbaarheid. Rapport nr. 2013-10.

Terry, Kenneth L., 1985. Photosynthesis in modulated light: Quantitative dependance of photosynthetic enhancement on flashing rate. *Biotechnology and Bioengineering* Vol. XXVII, p. 988-995.

Yago, T. H. Arakawa, K. Akima, Y. Okumura & T. Morinaga, 2014. Effects of flashing light-emitting diode (LED) of several colors on the growth of the microalga *Isochrysis galbana*. *African Journal of Microbiology Research* 8 (47), 3815-3820.

Van Den Hende, S. Vanhoutte, I. Boon, N. Haesaert, G. & Leen De Gelder, L. (2015) The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of Applied Phycology*, p 1-11

Van den Hende, S., Claessens, L., De Muyler, E., Boon, N. & Vervaeren, H. (2014a) Microalgal bacterial flocs originating from aquaculture wastewater treatment as diet ingredient for *Litopenaeus vannamei* (Boone) Aquaculture research , 1-15.

Van den Hende, S., E. Carré, E. Cocaud, V. Beelen, N. Boon & H. Vervaeren (2014b). Treatment of industrial wastewaters by microalgal bacterial flocs in sequencing batch reactors. *Bioresource Technology* 161, 245-254).

Van Dijk, Wim, Roelof Schipperus, Saskia Grobben & Rommie van der Weide (2013). Zuivering brouwerijprocesafvalwater met behulp van microalgen. Resultaten onderzoek 2012. ACRRES-Wageningen UR, publicatie nr. PPO-530, 42 pp.

Van Dijk, Wim, Arthur Kroon, Arnout van Diem, Gertjan Kleinhout, Patrick Doornbusch, Saskia Grobben & Rommie van der Weide (2014). Zuivering brouwerijprocesafvalwater met behulp van microalgen. Resultaten onderzoek 2013. ACRRES-Wageningen UR, publicatie nr. PPO-591, 39 pp.

Van Dijk, Wim, Rommie van der Weide & Coen van Gennip (2016). Algae production pilot open ponds Lelystad. Results 2013 – 2015. Wageningen UR, Applied Plant Research, publication number 583.

Van der Voort, M.P.J., Vulsteke, E. & C.L.M. Visser (2015). Macro-economics of algae products. Public Output report of the Enalgae project, Swansea, 47 pp. (available at www.enalgae.eu).

Van der Weide, R.Y., Schipperus, R., Dijk, W. van. Algae Cultivating using Digestate as Nutrient Source: Opportunities and Challenges. Proceedings European Biomass Conferention and Exhibition Hamburg, p. 1778-1784, 2014.

