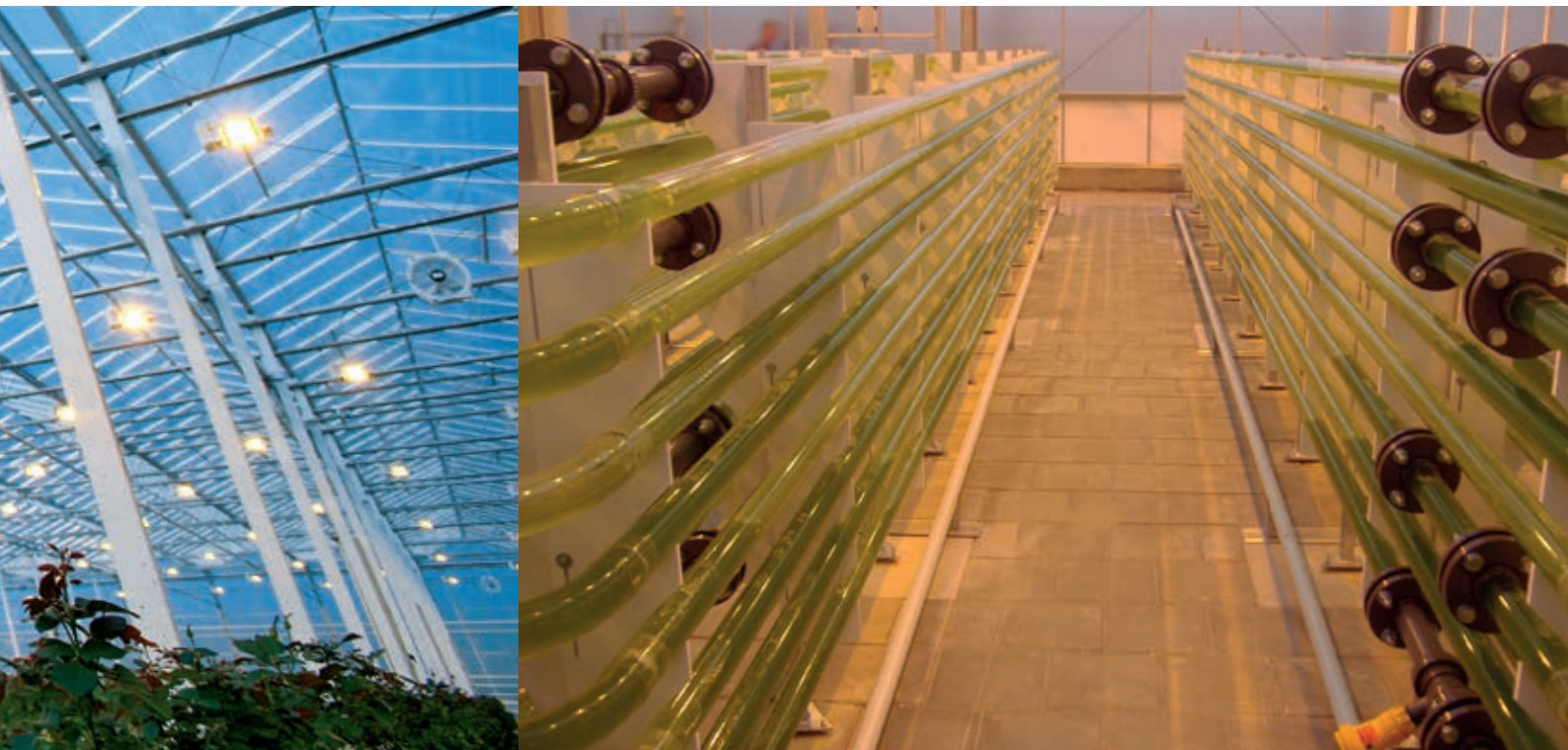




# Algenteeltsystemen voor de tuinbouw II

Op weg naar opschaling

Silke Hemming, Wim Voogt en Athanasios Sapounas



### **Abstract NL**

De productie van hoogwaardige stoffen zoals kleurstoffen of voedingssupplementen uit algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Tuinbouwondernemers hebben veel ervaring om de teeltcondities van hun huidige gewassen door klimaatregeling, CO<sub>2</sub> dosering, water- en nutriënten voorziening optimaal te sturen voor een hoogwaardig eindproduct. Ze hebben ervaring met de productie van voedingsmiddelen en om aan de daaraan gestelde kwaliteitseisen te voldoen en logistiek en afzet te organiseren. Het ligt voor de hand om deze ervaring te benutten voor de teelt van algen en hiermee nieuwe duurzame producten te leveren en bij te dragen aan de biobased economy. In dit project is experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de invloed van verschillende teeltfactoren op de algenproductie in een nieuwe proefafdeling met buisvormige algenreactoren in kassen in Bleiswijk. Daarnaast zijn in dit project economische getallen van investerings- en exploitatiekosten verzameld en is er een economisch rekenmodel ontwikkeld om een realistisch perspectief van algenteelt in kassen in schetsen. Hiermee wordt nieuw strategisch inzicht verkregen wat een geschikt teeltsysteem voor de teelt van hoogwaardige algen in combinatie met tuinbouwproductie op grote schaal in de toekomst is.

Trefwoorden: algen, fotobioreactoren, tuinbouw, kassen, opschaling, economisch model, experimenten, teeltfactoren, algengroei

### **Abstract EN**

The production of high-quality materials such as dyes or food supplements from algae offers opportunities for Dutch horticulture entrepreneurs. Horticultural entrepreneurs have a lot of experience to optimally control crop production and to control the quality of the end product by controlling the growing conditions light, temperature, CO<sub>2</sub> dosing, water- and nutrient supply for their current crops. They have experience in food production, in meeting the quality requirements of end-users and in organizing logistics and marketing of end products. It is obvious to use this experience for the cultivation of algae and thus to provide new sustainable high-quality products and to contribute to the bio-based economy. In the current project experimental research is carried out into the influence of various growing conditions for algae production in tubular photobioreactors placed in greenhouses in a new test facility in Bleiswijk. In addition, economic figures on investment and operating costs are collected, an economic calculation model has been developed to estimate a realistic prospect of algae cultivation in greenhouses. This leads to new strategic insight in suitable production systems of high-quality algae cultivation in greenhouses on a large scale in the future.

Keywords: algae, photobioreactors, horticulture, greenhouses, scaling-up, economic model, experiments, growing conditions, algae production

© 2014 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel. : 0317 - 48 60 01  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	Woord vooraf	5
1	Inleiding	7
2	Bestaande kennis	9
	2.1 Wat zijn microalgen?	9
	2.2 Groei van <i>Chlorella sorokiniana</i> als model alg	9
	2.3 Economische kengetallen algenproductie	10
3	Materialen en methodes	11
	3.1 Werkwijze project	11
	3.2 Experimenten algenteelt in een kas	11
	3.2.1 Kasuitrusting en regeling	11
	3.2.2 Algenbioreactoren en regeling	12
	3.2.3 Meetsysteem en data-acquisitie	13
	3.2.4 Algensoort en opkweek	14
	3.2.5 Metingen dichtheid, oogst en biomassaproductie	15
	3.2.6 CO <sub>2</sub> metingen	16
	3.3 Economisch model algenteelt in kassen	17
	3.3.1 Metingen economische kengetallen algenteeltsystemen in Bleiswijk	17
	3.3.2 Aannames economische kengetallen algenteeltsystemen op grote schaal	20
4	Resultaten experimenten algenteelt in een kas	25
	4.1 Algenteelten, groei en productie	25
	4.2 Groeifactoren	27
	4.2.1 CO <sub>2</sub>	27
	4.2.2 pH effecten	29
	4.2.3 Dichtheid	30
	4.2.4 Licht	31
	4.3 Kengetallen	33
	4.4 Uitdagingen tijdens het teeltproces	36
	4.5 Reinigen algenteeltsystemen	39
	4.6 Samenvatting	39
5	Resultaten economische berekeningen algenteelt in kassen	41
	5.1 Kostprijs algenproductie in kas in Bleiswijk	41
	5.2 Kostprijs algenproductie in kassen op grote schaal	42
	5.3 Samenvatting	43
6	Technisch en economisch perspectief algenteelt in Nederlandse kassen	45
7	Literatuur	47
Bijlage I	Gemeten lichttransmissie in de kas met algenreactoren.	49
Bijlage II	pH en CO <sub>2</sub> in teelt 3	51
Bijlage III	pH en CO <sub>2</sub> in teelt 4	53

Bijlage IV	pH en CO <sub>2</sub> in teelt 5	55
Bijlage V	Dichtheid en groei teelt 3	57
Bijlage VI	Dichtheid en groei teelt 4	59
Bijlage VII	Dichtheid en groei teelt 5	61
Bijlage VIII	Dichtheid en groei teelt 6.	63
Bijlage IX	Dichtheid en groei teelt 7	65
Bijlage X	Kengetallen licht, water, CO <sub>2</sub> en energiegebruik per algenteelt.	67
Bijlage XI	Kengetallen licht, water, CO <sub>2</sub> en energiegebruik onbelichte en belichte tomatenteelt.	69

## Woord vooraf

De productie van hoogwaardige stoffen zoals kleurstoffen of voedingssupplementen uit algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Tuinbouwondernemers nemen in een biobased keten de rol van producent van duurzame grondstoffen op zich. Ze hebben door hun innovatiekracht en marktgerichtheid de potentie om grootschalig algen voor een biobased economy te produceren. Een aantal ondernemers hebben eigen kleinschalige algenproductiesystemen opgezet *et al.* eerste ervaringen met de teelt van algen kunnen verzamelen.

Algen kunnen worden geteeld in plaatselijke en tijdelijke combinatie met traditionele tuinbouwgewassen, maar kunnen wellicht ook een alternatief gewas zijn voor telers. De overeenkomsten van algen teeltsystemen met teeltsystemen voor tuinbouwgewassen zijn vanuit een ontwerp oogpunt groot: algen hebben licht, water en nutriënten, CO<sub>2</sub> en een optimaal klimaat nodig om te kunnen groeien met een goede kwaliteit. Tuinbouwondernemers hebben veel ervaring om de teeltcondities van hun huidige gewassen optimaal te sturen, ze hebben ervaring met klimaatregeling, CO<sub>2</sub> dosering, water- en nutriënten voorziening en water behandelingssystemen. Het ligt voor de hand om deze ervaring te benutten voor de teelt van algen. Ze weten op een duurzame manier gewassen te telen. Hun bedrijf beschikt bovendien over de infrastructuur voor energievoorziening, waterbehandeling en CO<sub>2</sub> voorziening. Het is aannemelijk dat er synergie-effecten zijn tussen gewas- en algenproductie op een tuinbouwbedrijf. Het project beoogt strategisch inzicht in de technische en economische mogelijkheden van de toepassing van algenteeltsystemen in kassen.

Onze bijzondere dank geldt Aat van Winkel en Kees Scheffers, zonder hun daadkrachtige praktische ondersteuning was dit project niet mogelijk geweest.

Wij danken onze financiers die het mogelijk hebben gemaakt dit project uit te voeren: Productschap Tuinbouw, Ministerie van Economische Zaken, de tuinbouwondernemers Jelle van den Bos, Frans Bunnik, Kees Kap, Jaco Kieviet, Kees Kilsdonk, Cees van der Lans, Peter Schrama, Gerrit Vermeer, Bart van Wijlick. De tuindersbijeenkomsten en de kennismiddag is medegefinancierd door "Samenwerking aan Vaardigheden". Het realiseren van de testfaciliteit voor algen in kassen is mede mogelijk gemaakt door George Fischer, LGem, OCAP en Rabobank. Onderzoek naar de productie van een specifieke kleurstof van algen is opgestart met behulp van financiële ondersteuning van de provincie Zuid-Holland.



# 1 Inleiding

De productie van hoogwaardige stoffen zoals kleurstoffen of voedingssupplementen uit algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Tuinbouwondernemers nemen in een biobased keten de rol van producent van duurzame grondstoffen op zich. Ze hebben door hun innovatiekracht en marktgerichtheid de potentie om grootschalig algen voor een biobased economy te produceren. Een aantal ondernemers hebben eigen kleinschalige algenproductiesystemen opgezet *et al.* eerste ervaringen met de teelt van algen kunnen verzamelen.

Algen kunnen worden geteeld in plaatselijke en tijdelijke combinatie met traditionele tuinbouwgewassen, maar kunnen wellicht ook een alternatief gewas zijn voor telers. De overeenkomsten van algen teeltsystemen met teeltsystemen voor tuinbouwgewassen zijn vanuit een ontwerp oogpunt groot: algen hebben licht, water en nutriënten, CO<sub>2</sub> en een optimaal klimaat nodig om te kunnen groeien met een goede kwaliteit. Tuinbouwondernemers hebben veel ervaring om de teeltcondities van hun huidige gewassen optimaal te sturen, ze hebben ervaring met klimaatregeling, CO<sub>2</sub> dosering, water- en nutriënten voorziening en water behandelingssystemen. Het ligt voor de hand om deze ervaring te benutten voor de teelt van algen. Tuinbouwondernemers weten op een duurzame manier gewassen te telen. Hun bedrijf beschikt bovendien over de infrastructuur voor energievoorziening, waterbehandeling en CO<sub>2</sub> voorziening. Het is aannemelijk dat er synergie-effecten zijn tussen gewas- en algenproductie op een tuinbouwbedrijf.

Huidige algenteeltsystemen bij telers zijn divers, vaak zelf ontwikkeld, er bestaat geen standaard systeem: open - gesloten, buiten of binnen de kas, pondsystemen - buisreactoren, horizontaal - verticaal, verschillende afmetingen. Telers hebben behoefte aan ondersteuning om de juiste keuze voor een geschikt systeem te maken. Daarnaast is het noodzakelijk om voor een rendabele teelt van hoogwaardige algen de productie op te schalen en samen te werken.

De ontwikkeling en standaardisatie van traditionele tuinbouwkassen en teeltsystemen voor traditionele gewassen heeft plaatsgevonden in de loop van het laatste decennia. Modellen van klimaatregeling, energiebalansen, lichtbenutting, gewasgroei etc. hebben ontwikkelingen enorm versneld. Het verzamelen van kwantitatieve data op praktijkbedrijven en in proeven, data analyses en modelberekeningen helpen tuinders bij hun innovaties en om objectieve beslissingen te nemen. Dit geldt ook voor het ontwerp van algenteeltsystemen op een tuinbouwbedrijf. In een voorafgaande fase van het onderzoek is daarom een integraal fysisch model voor algenteelt in kassen ontwikkeld en gevalideerd met praktijkmetingen. In deze fase van het onderzoek ligt de nadruk op het beantwoorden van praktische vragen rond om algenteelt in kassen. Telers hebben de behoefte aan een experimentele opstelling voor algen in kassen om praktische vragen over het beïnvloeden van de teeltfactoren licht, temperatuur, CO<sub>2</sub>, pH en nutriënten en hun invloed op de algenproductie te beantwoorden. Wageningen UR Glastuinbouw heeft daarom een experimentele proefopstelling van zes buisvormige algenteeltsystemen in een kas gerealiseerd op hun locatie in Bleiswijk. Tevens werden meetdata van teeltfactoren, algenproductie en economische kengetallen verzameld. Alle data werd gebruikt voor het ontwikkelen van een economisch model waarin de kostprijs van de huidige experimentele systemen kon worden berekend en realistische scenario studies voor opgeschaalde algenteeltsystemen in kassen werden opgesteld.

Het doel van het hier beschreven project was het beantwoorden van de volgende voor de tuinbouwondernemers strategische vragen: Wat is een geschikt teeltsysteem voor de teelt van hoogwaardige algen in combinatie met tuinbouwproductie in de toekomst? Hoe kan de productie van algen op een tuinbouwbedrijf gerealiseerd worden door de instellingen van groeifactoren licht, CO<sub>2</sub> en nutriënten? Welke economisch rendabele mogelijkheden zijn er om op grote schaal algen op tuinbouwlocaties te produceren? Het doel van het project was om strategisch inzicht en achtergrondkennis op het gebied van algenteeltsystemen in combinatie met tuinbouwproductie te leveren.





## 2 Bestaande kennis

### 2.1 Wat zijn microalgen?

Microalgen zijn prokaryote of eukaryote fotosynthetisch actieve micro-organismen die snel kunnen groeien en die als gevolg van hun eencellig of meercellig eenvoudige structuur kunnen leven in diverse omstandigheden (Mata *et al.* 2010). Voorbeelden van prokaryote micro-organismen zijn cyanobacteriën (Cyanophyceae) en voorbeelden voor eukaryote microalgen zijn groene algen (Chlorophyta) en diatomeeën (Bacillariophyta). Microalgen zijn overal ter wereld aanwezig in alle bestaande ecosystemen, ze elven niet alleen in water, maar ook in de grond, wat resulteert in een grote diversiteit van soorten die in een breed scala van omstandigheden leven. Naar schatting bestaan meer dan 50.000 soorten, maar slechts een beperkt aantal hiervan, ongeveer 30.000, zijn bestudeerd en geanalyseerd (Figuur 1). Gedurende de afgelopen decennia zijn uitgebreide collecties van microalgen gemaakt door onderzoekers in verschillende landen. Microalgen kunnen worden geselecteerd voor gebruik in diverse toepassingen, zoals chemicaliën, kleurstoffen, farmaceutische doeleinden of voedingssupplementen voor dierlijke of menselijke consumptie.



Figuur 1. Morfologie van verschillende algen species

### 2.2 Groei van *Chlorella sorokiniana* als model alg

*Chlorella sorokiniana* is beschreven als een zoetwater alg met een hoge maximale groeisnelheid ( $\mu_{max} = 0.27 \text{ h}^{-1}$ ) en een hoge optimale temperatuur ( $T_{opt} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ ). *C. sorokiniana* tolereert hoge instralingsniveaus (Matsukawa *et al.* 2000; Sorokin, 1959). *Chlorella* soorten zijn ook interessant vanwege bepaalde inhoudsstoffen zoals koolhydraten, eiwitten en vitamines (Matsukawa *et al.* 2000). Cuaresma Franco (2011) onderzoekt *C. sorokiniana* in haar proefschrift o.a. met betrekking op licht- en temperatuurreactie om productie limiterende factoren vast te kunnen stellen. Het onderzoek wordt in het lab onder geconditioneerde omstandigheden doorgevoerd. In het onderzoek worden winterse en zomerse omstandigheden van een buitenteelt van *C. sorokiniana* in Zuid-Spanje nagebootst. Een maximale lichtintensiteit ( $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) samen met een suboptimale groeitemperatuur ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) leidden ertoe dat de algen meer licht ontvingen dan ze konden benutten. Er was sprake van lichtverzadiging bij te lage temperaturen, wat leidde tot een lage fotosynthetische efficiëntie (2.5%). Wanneer de temperatuur op de optimale groeitemperatuur van *C. sorokiniana* wordt gereguleerd ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ), werd bij gelijke lichtintensiteiten een hogere fotosynthetische efficiëntie (6.8%) behaald wat leidde tot een hogere productiviteit. Verder werd in het onderzoek vastgesteld dat extreem hoge lichtintensiteiten ( $2100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) in het onderzoek niet leidden tot fotoinhibitie indien de temperatuur optimaal voor de groei werd gehouden ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Een hoge productiviteit ( $7.7 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) en een fotosynthetische efficiëntie (5%) werd behaald bij lage biomassaconcentraties en een verdunningssnelheid die dichtbij de maximale specifieke groeisnelheid lag.

*C. sorokiniana* werd gebruikt als model alg in experimenten in Bleiswijk om de beïnvloeding van de groei door teeltfactoren in kassen praktisch te onderzoeken.

## 2.3 Economische kengetallen algenproductie

Er is tot nu toe weinig informatie beschikbaar over de economische aspecten van grootschalige commerciële algen productiesystemen ondanks het feit dat er wereldwijd een aantal grootschalige installaties zijn gerealiseerd. Vooral data van buisvormige BR systemen is schaars. Daarnaast is een vergelijking van wel gepubliceerde economische gegevens moeilijk, omdat de meeste studies zijn gebaseerd op laboratoriumexperimenten. Algen productiviteit gemeten in het laboratorium is veel groter dan die van het praktijk systemen (Stephens *et al.* 2013) wat resulteert in een relatief hoge mate van onzekerheid in de schikbare kostenramingen en berekeningsmethoden. Vooral data van installatiekosten zijn schaars. Aangezien het feit dat een aantal processtappen nog niet eens is aangetoond op een aanzienlijke schaal, is er ook onzekerheid over economische gegevens in deze processtappen (Rösch en Posten, 2012).

Norsker *et al.* (2011) publiceerde een studie over de economische aspecten van de drie belangrijkste types algen fotobioreactor systemen: open vijver fotobioreactoren, buisvormige fotobioreactoren en flat panel fotobioreactoren. Voor deze systemen werden de productiekosten per droge stof algen in detail geëvalueerd, werden de belangrijkste kostenfactoren bepaald en werden de productiesystemen geoptimaliseerd met betrekking tot deze kostenfactoren. De berekeningen zijn uitgevoerd voor productiesystemen met een aangenomen oppervlakte van ofwel 1 ha of 100 ha. Aannames zijn gemaakt voor diverse kostfactoren en de 'economy of scale'. De auteurs schatten dat een kostprijs van 4-6 € per droge stof algen realistisch zou kunnen zijn in de toekomst. De kosten analyse van een echte installatie voor de productie van waardevolle microalgen biomassa werd geanalyseerd door Acién *et al.* (2012). De installatie bestaat uit tien buisvormige fotobioreactoren á 3 m<sup>3</sup> die gebruikt werd om 2 jaar lang continue *Scenedesmus almeriensis* te produceren. Algen productiviteit en het gebruik van voedingsstoffen en energie in deze faciliteit werd gemonitord. De opbrengst in de faciliteit was dicht bij de maximaal te verwachten productiviteit voor de locatie Almería. De jaarlijkse productiecapaciteit wordt aangegeven met 3.8 t droge stof algen per jaar, dat betekent 90 t droge stof algen per ha per jaar en een fotosynthetische efficiëntie van 3,6%. De productie kosten waren 69 € per kg droge stof algen. De economische analyse toont aan dat arbeid en afschrijvingen de belangrijkste factoren waren. Vereenvoudiging van de techniek en een opschaling van de systemen naar een productiecapaciteit van 200 t per jaar zou het mogelijk moeten maken om de productiekosten te verlagen naar 12,6 € per kg volgens de auteurs.

Kwantitatieve gegevens voor de productie van microalgen in kassen onder Nederlandse omstandigheden zijn tot nu toe niet beschikbaar. Een eerste analyse is gedaan door Slager (2011) en Slager *et al.* (2012), een theoretische studie voor de productie van algen in kassen die gebaseerd is op aannames zoals eerder gedaan door Norsker *et al.* (2011). Slager komt uit op een minimale kostprijs van 11€ per droge stof algen voor een productie op 1 ha. Leijdekkers (2013) heeft voor het eerst échte economische data verzameld in een kleinschalig pilot systeem gerealiseerd bij een tuinder, waar de kostprijs geschat wordt op 155€ per droge stof algen voor een oppervlak van ca. 90 m<sup>2</sup>. Het systeem is zelf ontworpen en was in de opstartfase. Meer kwantitatieve economische gegevens voor de productie van algen in kassen zijn zeker nodig.

## 3 Materialen en methodes

### 3.1 Werkwijze project

Het project beoogt strategisch inzicht en levert achtergrondkennis op het gebied van algenteeltsystemen in combinatie met tuinbouwproductie. Binnen het hier beschreven project wordt kennis voor de middellange termijn opgebouwd om oplossingen voor tuinbouwondernemers te ontwikkelen. In een voorafgaande fase zijn integrale dynamische rekenmodellen van algen en tuinbouwteelt in kassen ontwikkeld. Met deze modellen kan de algenproductie in verschillende configuraties van algenteeltsystemen in kassen worden berekend. Met behulp van deze modellen kan een geschikt algen teeltsysteem op een tuinbouwbedrijf worden ontwerpen. In de huidige fase is een proeffaciliteit van algenteeltsystemen in een kas bij Wageningen UR Glastuinbouw gerealiseerd. Het uitvoeren van experimenten geeft inzicht in de instellingen van groeifactoren voor de productie van algen in kassen. Daarnaast worden economische getallen omtrent investerings- en exploitatiekosten verzameld om hiermee een economisch rekenmodel te ontwikkelen. Dit levert samen met eerder ontwikkelde fysische rekenmodellen inzicht in de technische en economische mogelijkheden van algenproductie op grotere schaal in Nederlandse kassen.

De proeffaciliteit biedt ook een ontmoetingsplek voor tuinders. Door open kennisuitwisseling van tuinbouwondernemers en onderzoekers zullen systemen voor een economisch rendabele teelt op grote schaal kunnen worden ontwikkeld.

### 3.2 Experimenten algenteelt in een kas

#### 3.2.1 Kasuitrusting en regeling

In de periode juni tot september 2012 zijn 6 verticale fotobioreactoren voor de productie van microalgen opgebouwd in een proefkas bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk (Figuur 2). De kas heeft een afmeting van 9.60 m \* 15 m en een bruto oppervlak van 144 m<sup>2</sup>, netto beteelbaar oppervlak is 125 m<sup>2</sup>. De kas is voorzien van een diffuus glas als kasdek materiaal met een hemisferische transmissie van 82% en een haze van 71%. Uit metingen in de kas bleek de transmissie gemiddeld uit te komen op 61.4%. Het geïnstalleerde energiescherm gaf bij gesloten doek een transmissie van 41%. De kas is voorzien van assimilatie lampen (SON-T) met in totaal 114 μmol/m<sup>2</sup>/s (5.000 lux/m<sup>2</sup>). De lichtverdeling in de kas is weergegeven op Bijlage 1. Om licht te reduceren en overdag te koelen is er een energiescherm aanwezig en een hogedruk verneveling. Daarnaast is er een installatie voor geforceerde luchtkoeling aanwezig met een koelcapaciteit van 300 W/m<sup>2</sup>; deze werd tot nu toe niet ingezet. De verwarming bestaat uit 6 eenheden buisrail verwarming (12 \* ø 51 mm) geplaatst onder de algenreactoren en een tweede verwarmingsnet boven de algenreactoren (6 \* ø 24 mm). In de zomer van 2013 zijn leidingen met sprinklers geïnstalleerd bovenop de bioreactoren om extra koelcapaciteit te genereren. Deze wordt aangestuurd door de klimaatcomputer, bijvoorbeeld op basis van tijd, straling of kasttemperatuur. Het kasklimaat wordt automatisch geregeld door een klimaatcomputer (Hoogendoorn). Voor de algenteelten is een setpoint van 25 °C voor verwarming en voor ventilatie een setpoint van 35 °C met een P-band van 5 °C aangehouden. De belichting is aan van 0:00 tot 16:30, indien de straling boven 250 W/m<sup>2</sup> kwam gaan de lampen uit. Het schermdoek gaat dicht in de nacht van zonsondergang tot zonsopgang. Bij een lichtniveau < 100 W/m<sup>2</sup> blijft het energiescherm ook overdag dicht. In de eerste proefperiode is verder niet verneveld of gekoeld.



*Figuur 2. Proeffaciliteit algenteeltsystemen in een kas bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk bestaande uit zes verticale algenbuisreactoren.*

### 3.2.2 Algenbioreactoren en regeling

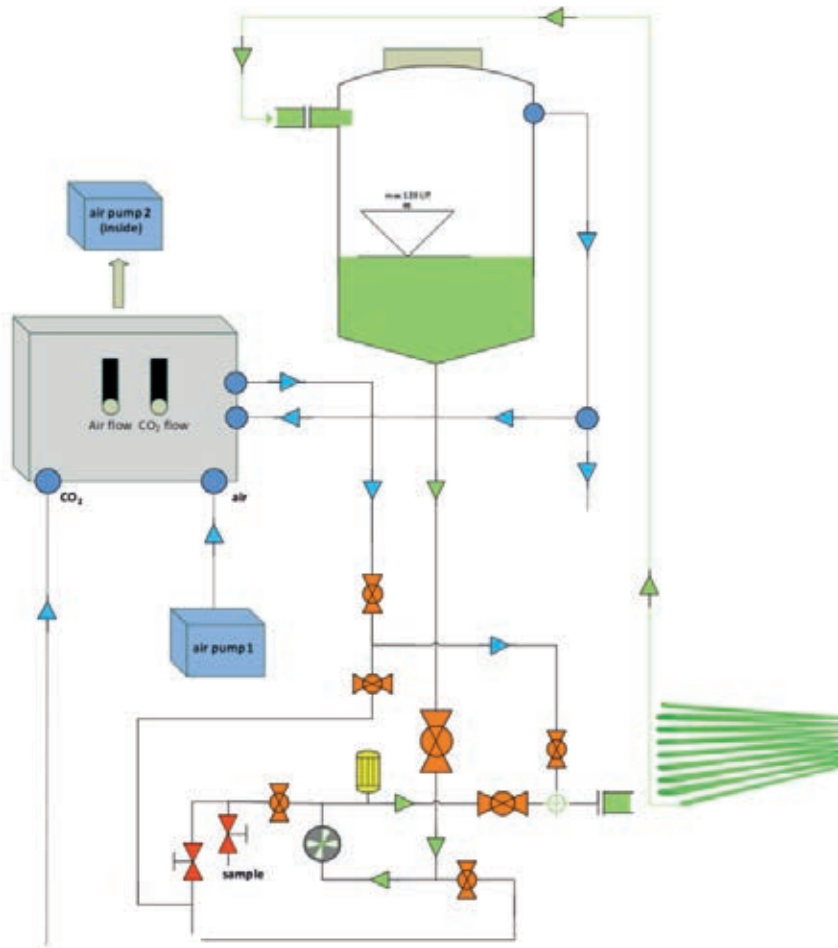
De reactoren zijn van het type zoals ontwikkeld door LGem (Figuur 2 en Figuur 3). De fotobioreactoren bestaan uit een buffervat van 100 liter met daaraan gekoppeld een doorlopende doorzichtige PVC groeibuis van met een diameter van 60 mm en 160 m lengte. Deze is opgebouwd in 8 lagen als een ellipsvormige spiraal van 10 m lengte en in de breedte 50 cm.

De reactoren zijn voor ca. 2/3 gevuld met het teeltmedium dat continu rondgepompt wordt door middel van een vloeistofpomp. Tegelijk met de vloeistof wordt lucht in het systeem rondgepompt zodat er continu golven in de reactor rondgaan. De lucht wordt gerecirculeerd waarbij CO<sub>2</sub> wordt bijgemengd. Naast een luchtcirculatiepomp is er een extra luchtpomp die voor overdruk in het systeem zorgt, zodat het binnendringen van ongewenste micro-organismen wordt voorkomen. Tegelijkertijd zorgt dit ervoor dat de geproduceerde O<sub>2</sub> uit de reactor wordt verwijderd. Zowel de overdruk luchtstroom als de CO<sub>2</sub> worden gemengd in de luchtcirculatiepomp en vandaaruit in de reactor gebracht. De dosering van CO<sub>2</sub> wordt gereguleerd door een controller op basis van de pH. De setpoint van de pH wordt gehandhaafd door meer of minder CO<sub>2</sub> te doseren. Dit CO<sub>2</sub> doseren kan door middel van een continue flow, of door een puls signaal die gemoduleerd kan worden. Er wordt zuivere CO<sub>2</sub> betrokken vanuit de OCAP levering.

Het vullen van het systeem met water en nutriënten vindt plaats vanuit hermetisch gesloten voorraadvaten van 500 liter. Deze worden gevuld met een directe leiding vanuit de productleiding van de omgekeerde osmose installatie.

Deze laatste gebruikt grondwater als waterbron. Voedingsoplossing wordt handmatig klaargemaakt vanuit geconcentreerde A/B/C bakken. Het vullen van de reactoren vindt plaats vanuit de voorraadvaten door middel van een dompelpomp met een leiding die is aangesloten op het voorraadvat.

Het oogsten vindt plaats door middel van een extra leiding en afsluiters aan de onderzijde van het buffervat. Ook is een voorziening aangebracht voor het aftappen van monstervloeistof.



Figuur 3. Schematische weergave van de opbouw van de fotobioreactoren in Bleiswijk

### 3.2.3 Meetsysteem en data-acquisitie

Relevante meetwaarden van de meteo gegevens van het buitenklimaat en van het kasklimaat worden gemeten en gelogd via de klimaatcomputer. Meteotoren en klimaatsensoren in de kas zijn standaard aanwezig (Tabel 1).

De algenreactoren zijn elk uitgerust met het standaard meetsysteem geleverd door LGem (CO<sub>2</sub> en pH). Het is daarnaast aangepast voor het doen van uitgebreide metingen. Om in het systeem meer metingen te kunnen doen zijn zogenaamde meetstraten ingebouwd in elk systeem. Hierin kunnen afhankelijk van de onderzoeksvraag bepaalde sensoren ingebouwd worden. Alle reactoren zijn uitgerust met vier meetstraten die om de andere laag zijn geplaatst. Bij alle reactoren is in ieder geval één extra pH sensor geplaatst in het onderste niveau. Bij alle pH sensoren wordt ook de temperatuur gemeten. Verder is een CO<sub>2</sub> sensor geplaatst in alle buffervaten, waarmee de CO<sub>2</sub> in de lucht in de reactor wordt gemeten. De data van de fotobioreactoren wordt geregistreerd en opgeslagen op aparte dataloggers, die via een netwerk PC toegankelijk zijn. Alle data worden gecombineerd en via een ftp server toegankelijk gemaakt. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van alle gemeten parameters.

Een monitoring tool is gemaakt in Excel om alle waarden van buitenklimaat, kas en fotobioreactor overzichtelijk te rangschikken en grafisch weer te geven. Deze tool is tevens beschikbaar voor de in het project participerende telers.

Tabel 1. Overzicht meetparameters en frequentie van data-acquisitie in fotobioreactoren in Bleiswijk

Parameter meting	Locatie meting	Frequentie meting
<i>Buiten</i>		
Stralingssom	meteotoren	5 min
<i>Kas</i>		
kastemperatuur	meetbox kas	5 min
CO <sub>2</sub> concentratie	meetbox kas	5 min
straling binnen	meetbox kas	5 min
schermdoekstand	meetbox kas	5 min
belichting aan/uit	meetbox kas	5 min
<i>Algenreactor</i>		
pH 1	alle BR's uitgestuurde voeding	1 min
pH 2	alle BR's na eerste omloop	1 min
pH 3, 4, 5	BR 4, om de andere omloop	1 min
water temperatuur	bij elke pH sensor	1 min
CO <sub>2</sub> concentratie	in elk buffervat	1 min
gedoseerde CO <sub>2</sub>	door middel van puls telling, tijd /hoeveelheid	1 min
ingebazen kaslucht	via flowmeters op luchtinlaat (nog te realiseren)	10 min
afgeblazen lucht	via overdrukleiding op buffervat (nog te realiseren)	10 min
dichtheid algen I	via droging van monster genomen bij oogst	wekelijks
dichtheid algen II	via een turbidity meting	dagelijks
dichtheid algen III	door middel van spectrofotometer analyse en formule	Aantal keren per teelt
chlorofyl gehalte	spectrofotometer analyse	wekelijks

### 3.2.4 Algensoort en opkweek

Voor de uitvoering van eerste experimenten is gekozen voor een snelgroeïende alg, *Chlorella sorokiniana*. Deze zoetwater alg heeft een diameter van 2 - 10 µm en heeft een verdubbelingsfactor van 17-25 uur. Vanwege de hoge groeisnelheid is dit een ideale alg om als model-alg te gebruiken voor eerste experimenten. De optimale groeitemperatuur ligt boven de 30 °C. Experimenten van Cuaresma Franco (2011) op labschaal beschrijven de optimale groeicondities van deze alg. Een reïncultuur en 2 l voorweek van *C. sorokiniana* zijn verkregen bij het CCALA (Culture Collection of Autotrophic Organisms, Institute of Botany, Academy of Sciences of the Czech Republic, Centre of Phycology, Dukelská 135, Třeboň CZ-379 82. Voor elke teelt is vanuit de reïncultuur een voorweek gemaakt. Geautoclaveerde voedingsoplossing (4 l) werd in gesteriliseerde maatkolven van 6 l gedaan, en via een luchtpomp werden luchtballen doorgeleid. Hierin werd de reïncultuur geënt. De kolven werden in de kas op een tafel geplaatst, voor voldoende licht en CO<sub>2</sub>. Indien nodig werd teveel licht geschermd door een vliesdoek over de kolven. De voorweek werd gedurende ca. 2 weken gedaan tot een dichtheid van 3-4 g/l. Totaal is er voor elke teelt 16 l opgekweekt. Voor het enten van de systemen werd dit in gelijke porties verdeeld. Telkens werd geënt na ontsmetting van de reactoren.

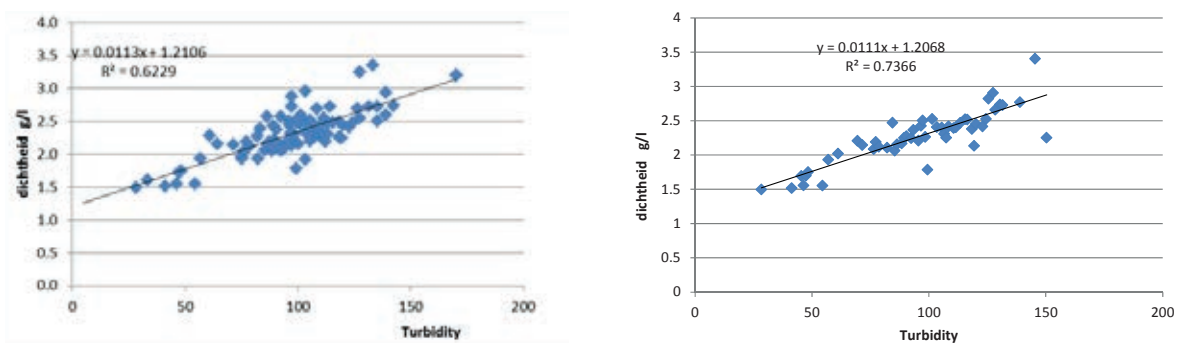
### 3.2.5 Metingen dichtheid, oogst en biomassaproductie

In dit eerste jaar van experimenten in Bleiswijk is telkens *Chlorella sorokiniana* geteeld. Een protocol is ontwikkeld voor de oogst van algen. Uitgangspunt was een dagelijkse oogst (5 dagen per week), in sommige perioden is er 6 of 7 dagen geoogst. Telkens is een gedeelte van de cultuuroflossing afgetapt zodat de gewenste dichtheid (setpoint tussen 2 en 3 g/l) aan algen is gehandhaafd. Een snelle methode voor het bepalen van de dichtheid was noodzakelijk. De dichtheid werd bepaald aan de hand van een turbidity meter (Dr Lange), hierin kunnen verse monsters direct worden doorgemeten. Uit een serie experimenten bleek een goede lineaire correlatie te bestaan tussen de werkelijke dichtheid op basis van terugdrogen en de turbidity.

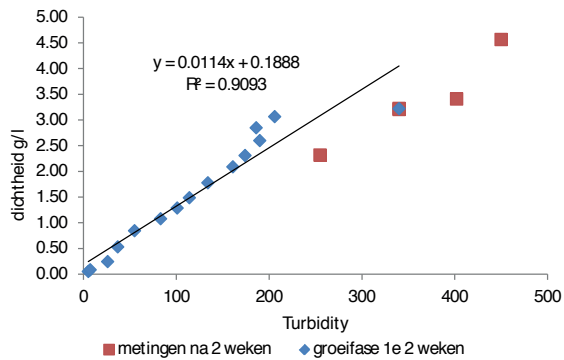
Met als doel een snelle, maar betrouwbare methode te vinden om de hoeveelheid algen te bepalen zijn diverse experimenten uitgevoerd. Uitgangspunt is dat de meest juiste methode is een totale droge stof bepaling. Een vergelijking is gemaakt tussen het totaal terugdrogen van cultuurvloeistof en het terugdrogen van gecentrifugeerde of van gefiltreerde cultuurvloeistof. Hier bleek praktisch geen verschil tussen te bestaan. Echter beide methoden zijn bewerkelijk en tijdrovend en daarom niet geschikt voor de dagelijkse oogstbepaling. Een complicatie is ook dat de bepalingen van de droge stof "vervuild" zijn met de hoeveelheid opgeloste nutriënten. Bij de toegepaste voedingsconcentraties in deze proef was dit gemiddeld 1.5 g/l. Bij terugdrogen is hiervoor telkens gecorrigeerd. Bij centrifugeren is de hoeveelheid achtergebleven voedingszouten verwaarloosbaar, immers deze blijven dan achter in de vloeistof.

Op het lab in Bleiswijk is een turbidity meter beschikbaar (Dr Lange). De procedure voor de turbidity metingen is dat er vanuit de reactoren een monster wordt afgetapt, vervolgens wordt op het lab uit het monsterflesje na goed schudden met een pipet een hoeveelheid van 10 cl vloeistof getrokken en in een cuvet gedaan. Dit wordt in de turbidity meter geplaatst en de waarde wordt bepaald. Deze procedure wordt een aantal keren herhaald en de gemiddelde waarde is de gemeten turbidity. Van belang is dat water + voeding ook een bepaalde turbidity waarde hebben, de meetresultaten worden daarom altijd gecorrigeerd aan de hand van een blanco meting van de voedingsoplossing. In een aantal proeven is de werkelijke dichtheid zoals gemeten via droge stof bepaling vergeleken met de turbidity meting. In het algemeen is er een goede correlatie te vinden (Figuur 4).

In een meetserie, waarbij vanaf dag 1 de droge stof is gemeten en de turbidity, bleek na 2 weken de relatie anders te liggen (Figuur 5). Indien de groei verstoord is ontstaan er vervuilende stoffen: suikers, eiwitten of andere afvalstoffen of ontstaat clustering van algen. In dat geval is de kan de meting niet gebruikt worden.



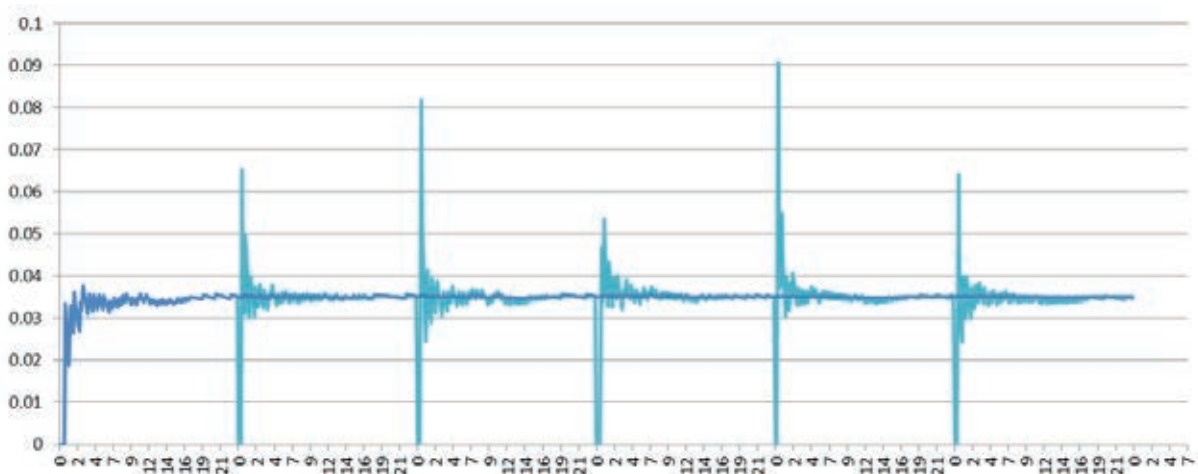
Figuur 4. Correlatie tussen de gemeten algendichtheid via de droge stof methode en de gemeten turbidity van verse algenmonsters uit de fotobioreactoren in Bleiswijk, periode dec 2012 (links) en in de periode jan-mrt 2013.



Figuur 5. Correlatie tussen de gemeten algendichtheid via de droge stof methode en de gemeten turbidity, vanaf de start van een teelt dagelijks gemeten en een aantal metingen na 2 weken teelt na ontstaan van vervuilende stoffen en algenclustering.

### 3.2.6 CO<sub>2</sub> metingen

In de experimenten is CO<sub>2</sub> gedoseerd via pulsen. Om de pulsen te kalibreren is een fles met vloeibare CO<sub>2</sub> op een weegschaal geplaatst en is gedurende een aantal weken het CO<sub>2</sub> verbruik gemeten en vergeleken met de tellingen van CO<sub>2</sub> pulsen. Omdat door het grote gewicht van de CO<sub>2</sub> flessen en de gewichtsafname per keer gering is, is de resolutie per waarneming laag. Aan de hand van het voortschrijdend gemiddelde over een dag (Figuur 6) kan een stabiele waarde per puls worden vastgesteld (Tabel 2).



Figuur 6. Voortschrijdend gemiddelde van de CO<sub>2</sub> dosering per puls gedurende een etmaal, gemeten over een periode van 6 dagen.

Tabel 2. Gemiddelde waarden van pulsen en gewichtsafname CO<sub>2</sub> fles per 10 min, en de gemiddelde berekende dosering in g CO<sub>2</sub> per puls, gemeten over een aantal dagen.

datum	pulsen per 10 min	g/10min	g/puls
31 jan.	71.2	2.5	0.0351
1 feb.	61.0	2.1	0.0352
2 feb.	67.0	2.3	0.0352
3 feb.	75.7	2.6	0.0348
4 feb.	82.5	2.9	0.0353
5 feb.	78.0	2.70	0.0347



### 3.3 Economisch model algenteelt in kassen

#### 3.3.1 Metingen economische kengetallen algenteeltsystemen in Bleiswijk

Om de kostprijs van algenproductie in Nederlandse kassen te berekenen is een economisch model ontwikkeld waarin alle vaste en flexibele kosten zijn opgenomen. Als input voor de berekeningen werd de droge stof algenproductie zoals gerealiseerd in een kas in Bleiswijk in 2013, de vaste en de flexibele kosten van het algenproductie systeem en de vaste en flexibele kosten van de kas en de nodige inrichting genomen. Er werd in alle berekeningen met een afschrijving over 10 jaar gerekend, een rente van 5% en een onderhoudspercentage van 4% op materiaalkosten.

##### **Algenproductie in Bleiswijk**

De algenproductie in de algenteeltsystemen in Bleiswijk werd in 2013 vastgesteld op gemiddeld 1.8 kg ds per m<sup>2</sup> per jaar in de zes fotobioreactoren (Tabel 17), dit werd gerealiseerd in 5 teelten. Modelberekeningen (referentie) met dezelfde groeicondities gaven een totale jaarproductie van 2.2 kg ds per m<sup>2</sup> per jaar in 1 jaarrond teelt.

##### **Vaste kosten algenproductiesysteem in Bleiswijk**

De totale vaste kosten van een bioreactor (BR) inclusief installatie was €15.080. Een opdeling van de totale kosten van een bioreactor in verschillende onderdelen was niet bekend, maar werd geschat en weergegeven in Tabel 3. Elk BR bestaat uit 8 lagen van twee buizen á 10 m met een totale buislengte van 160m. De totale materiaalkosten werden geraamd op €11.600 en de installatiekosten werden aangenomen als 30% van de totale materiaalkosten, namelijk €3480. De totale investeringskosten voor 6 bioreactoren waren €90480,- of €628.33 per m<sup>2</sup> teeltoppervlak. De afschrijvingskosten zijn €4,34 per l algen volume of €81,37 per m<sup>2</sup> teeltoppervlak.

Tabel 3. Vaste kosten van de bioreactoren en verschillende onderdelen voor een bioreactor in Bleiswijk

Componenten bioreactor	Kosten (€)
Transparante buis per m	€35
Recirculatiepomp	€300
Fittings, kleppen, tank	€900
Leidingen	€600
Luchtpomp	€200
Sensoren	€2,000
Instrumentatie en regeling	€2,000

##### **Vaste kosten voor kas en inrichting in Bleiswijk**

De totale vaste kosten van het kas compartiment met een oppervlakte van 144 m<sup>2</sup> in Bleiswijk werd geschat op €12.672 of €88 per m<sup>2</sup>. De kosten voor materiaal en bouw van een typische glazen Venlo-kas werd aangenomen (Vermeulen, 2010). Voor assimilatiebelichting waren 16 lampen in de kas geïnstalleerd. Daarnaast was de kas voorzien van verwarming, koeling (sprinklersysteem) en een scherminstallatie. De vaste kosten voor alle kasonderdelen wordt weergegeven in Tabel 4. De totale afschrijvingskosten voor de kas waren €11.40 per m<sup>2</sup> bruto teeltoppervlak.

Tabel 4. Vaste kosten kas en nodige inrichting in Bleiswijk

Componenten kas	Kosten (€/m <sup>2</sup> )
Kasconstructie	€31.00
Verwarming	€16.00
Koelsysteem	€8.75
Scherminstallatie	€10.00
Assimilatiebelichting	€200.00

### Vaste kosten voor grond

De berekeningen zijn uitgevoerd met en zonder de kosten voor de grond waarop de kas staat. In het geval dat de grondkosten meegenomen zijn, werden €200 per m<sup>2</sup> in rekening gebracht. Er werd aangenomen dat 5% meer grondoppervlak dan kasgrondoppervlak nodig zijn. In dit geval zijn de totale investeringskosten voor een kas compartiment met een oppervlakte van 144 m<sup>2</sup> €30.200, de totale afschrijvingskosten en rentekosten voor het land zijn dan €3911 per jaar.

### Flexibele kosten voor algenteelt in Bleiswijk

De flexibele kosten voor de algenteelt in Bleiswijk werden berekend op basis van de prijzen parameters vermeld in Tabel 5. Deze gebruiksparementen werden gemeten tijdens de experimenten en omgerekend op jaarbasis. De totale loonkosten waren €20.000. De totale exploitatiekosten voor algenproductiesystemen in Bleiswijk waren in 2013 op jaarbasis €23.358 of €8651 per m<sup>3</sup> volume algen geïnstalleerd of €162 per m<sup>2</sup> teeltoppervlak kas. In Tabel 6 wordt een overzicht van de totale flexibele kosten voor de algenteelt in Bleiswijk gepresenteerd.

Tabel 5. Prijzen voor flexibele kosten arbeid, energie, CO<sub>2</sub>, water en nutriënten en verbruik tijdens algenteelt in Bleiswijk per jaar

Kosten	Waarde
Arbeidskosten per uur [€/h]	€13.00
Arbeid benodigd [h/jaar]	1,785
Energieverbruik recirculatiepomp [W]	80
Energieverbruik luchtpomp [W]	90
Prijs elektriciteit [€/kWh]	€0.05
Prijs gas [€/m <sup>3</sup> ]	€0.29
Prijs CO <sub>2</sub> [€/kg]	€0.184
Prijs water [€/m <sup>3</sup> ]	€0.50
Elektriciteitsverbruik pompen [kWh/m <sup>2</sup> /jaar]	62
Elektriciteitsverbruik lampen [kWh/m <sup>2</sup> /jaar]	203
Gasverbruik verwarming [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /jaar]	14.5
CO <sub>2</sub> verbruik gemeten [kg/m <sup>2</sup> /jaar]	0.564
Efficiëntie CO <sub>2</sub> gebruik algen gemeten [kg CO <sub>2</sub> /kg ds]	0.32
Water verbruik gemeten [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /jaar]	0.705
Efficiëntie water gebruik algen [m <sup>3</sup> /kg ds]	0.39
Kosten nutriënten [€/kg ds]	€0.18
Kosten onderhoud [€/jaar]	€464.00

Tabel 6. Flexibele kosten algenteelt in Bleiswijk

Kostensoort	Kosten (€)	Kosten per volume (€/m <sup>3</sup> )*	Kosten per teeltoppervlak (€/m <sup>2</sup> )**
Arbeid	20,000.00	7,407.00	138.89
Onderhoud	2,784.00	1,031.00	19.33
Elektriciteit	446.76	163.00	3.10
Nutriënten	54.17	19.80	0.38
Water	57.82	21.12	0.40
CO <sub>2</sub>	14.94	5.46	0.10
Total	23,358	8,651	162

\* 450 l per bioreactor, 2.7 m<sup>3</sup> totaal

\*\* 144 m<sup>2</sup> kas

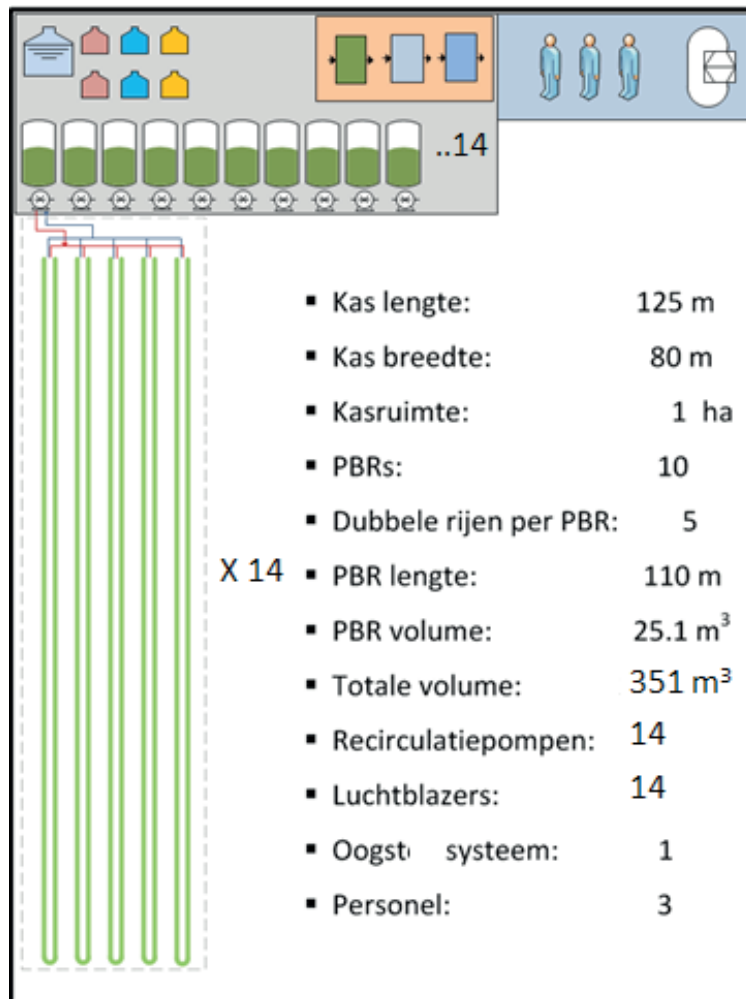
De flexibele kosten voor het gebruik van de kas tijdens de algenteelt is voornamelijk gerelateerd aan het gebruik van assimilatieverlichting. De totale bedrijfskosten voor de kas op jaarbasis zijn €2140 of €782 per m<sup>3</sup> algen volume geïnstalleerd of €15 per m<sup>2</sup> teeltoppervlak. In Tabel 6 zijn de totale bedrijfskosten van het kas compartiment in Bleiswijk weergegeven.

Tabel 7. Flexibele kosten kas en klimatisering algenteelt in Bleiswijk

Kostensoort	Kosten (€)	Kosten per volume (€/m <sup>3</sup> )	Kosten per teeltoppervlak (€/m <sup>2</sup> )
Elektriciteit voor assimilatiebelichting	1,461.00	534.51	10.16
Gas voor verwarming kas	605.32	221.24	4.21
Elektriciteit voor operatie kas	72.00	26.31	0.50
Totaal	2140	782	15

### 3.3.2 Aannames economische kengetallen algenteeltsystemen op grote schaal

Om de kostprijs van de algenproductie te berekenen voor een grootschalige kas van 1 ha is de lay-out van de bioreactoren op het teeltoppervlak in de heroverwogen (Figuur 7). Voor een kas van 1 ha zijn 14 soortgelijke bioreactoren naast elkaar aangenomen, elk een volume van 2.51 m<sup>3</sup> van algen cultuur. Hiermee is een 77% efficiëntie van de benutting van het teeltoppervlak verondersteld.



Figuur 7. Lay-out van bioreactoren op een teeltoppervlak van 1 ha voor economische berekeningen van een grootschalige algen productie unit.

#### Algenproductie in kas op 1 ha

Met het model AlgKas (Hemming *et al.* 2012) is de algen productiviteit van algen berekend. Het AlgKas model berekent de algen productiviteit afhankelijk van bioreactor lay-out (buisdiameter, aantal lagen, lengte buizen), buitenklimaat, klimatisering van kas en teelmaatregelen. Het model werd geverifieerd voor de situatie in Bleiswijk. Een productie van totaal 1.8 kg ds per m<sup>2</sup> per jaar werd in 2013 vastgesteld tijdens 5 teelten, het model berekend een productie van 2.2 kg ds per m<sup>2</sup> en jaar voor 1 teelt, 1.9 kg ds voor 3 teelten en 1.7 kg ds voor 5 teelten. De productie wordt dus door het model 5-6% onderschat. Voor een aantal scenario's is de algen productiviteit met het model AlgKas berekend (Tabel 8).

Tabel 8. Algen productiviteit berekend met het model AlgKas voor een aantal scenario's

Scenario	Assimilatie belichting	Aantal algen teelten	Benuttingsefficiëntie teeltoppervlak (%)	Algen productie (kg/m <sup>2</sup> )
1	NO	1	44%	1.39
2	YES	1	44%	2.19
3	NO	2	44%	1.29
4	YES	2	44%	2.04
5	NO	3	44%	1.22
6	YES	3	44%	1.92
7	NO	1	55%	1.76
8	YES	1	55%	2.86
9	NO	2	55%	1.64
10	YES	2	55%	2.66
11	NO	3	55%	1.54
12	YES	3	55%	2.57
13	NO	1	77%	2.46
14	YES	1	77%	4.00
15	NO	2	77%	2.29
16	YES	2	77%	3.72
17	NO	3	77%	2.16
18	YES	3	77%	3.51

#### Vaste kosten algenproductiesysteem in kas op 1 ha

Om de invloed van schaalvoordelen mee te nemen is de volgende aanname gemaakt voor de kosten per m transparante buis voor de algenreactoren. De kosten nemen af met de hoeveelheid (lengte) buis volgens vergelijking (1).

$$C_{tube} = 278.46 * t_{length}^{-0.301} \quad (1)$$

Waar:  $C_{tube}$  is de prijs van de buis per m en  $t_{length}$  is de totale buislengte.

Met behulp van deze aanname zijn de kosten per m buis berekend met €13.27 per m voor een kas van 1 ha met 14 bioreactoren. De kosten per bioreactor worden dan €165.329. De vaste kosten zijn €6.586 per m<sup>3</sup> algen volume geïnstalleerd of €231.46 per m<sup>2</sup> teeltoppervlak. De vaste kosten per eenheid bioreactor voor een commercieel algen productiesysteem in kassen groter dan 1 ha werd berekend volgens vergelijking (2). De vaste kosten verminderen bij toename van het teeltoppervlak, de vermindering is maximaal 35% voor algenteeltsysteem bestaande uit 140 bioreactoren geplaatst in een kas van 10 ha.

$$C_{PBR} = 264697 * nr_{PBR}^{-0.16} \quad (2)$$

Waar:  $C_{PBR}$  zijn de vaste kosten per BR eenheid en  $nr_{PBR}$  is het aantal geïnstalleerde BR eenheden.

Voor een commerciële algenproductie systeem zijn additionele componenten en apparaten nodig die in het huidige systeem in Bleiswijk niet werden gebruikt, zoals additionele pompen, een automatisch oogststelsysteem, additionele tanks en een weegstation enz. De kosten voor deze additionele componenten en apparaten zijn berekend op totaal €25.099 op 1 ha. Een onderverdeling van de kosten wordt weergegeven in Tabel 9. Het werd verondersteld dat 30% van de materiaalkosten installatiekosten zijn. De afschrijvingskosten zijn €26.66 per m<sup>2</sup> kas van 1 ha.

Tabel 9. Vaste kosten algenproductiesystemen en onderdelen voor bioreactor in een kas van 1 ha.

Componenten per bioreactor	Kosten per bioreactor (€)*
Transparante buis per m (voor 14 BR)	13,27
Recirculatiepomp	1,200
Fittings, kleppen, tank	1,800
Leidingen	900
Luchtpomp	1,500
Sensoren	3,000
Instrumentatie en regeling	2,000
<b>Additionele componenten algenteeltsystemen éénmalig</b>	
Centrifuge Westfalia	133,000
Centrifuge voedingspomp	24,000
Medium filter eenheid	13,500
Medium voedingspomp	4,800
Medium voorbereidingstank	20,000
Opslagtank oogst	20,000
Pompstation zeewater	15,000
Weegstation	40,000

\*Volume 25,1 m<sup>3</sup> per BR, 14 stuks op 1 ha

### Vaste kosten voor kas en inrichting in Bleiswijk

De vaste kosten voor kas en inrichting voor een commercieel algenproductie systeem in een kas van 1 ha of groter werden berekend volgens de waardes weergegeven in Tabel 4, rekening houdend met het teeltoppervlak en de benuttingsefficiëntie.

### Flexibele kosten algenproductiesysteem in kas op 1 ha

De flexibele kosten voor een commercieel algenproductie systeem van 1 ha of groter werden berekend volgens de waardes weergegeven in Tabel 6, rekening houdend met het teeltoppervlak en de benuttingsefficiëntie. Alleen de loonkosten werden berekend volgens vergelijking (3), omdat bij een grootschalig systeem meer automatisering mogelijk is.

$$C_{labour} = man_{year} * hourly\_labour_{cost} * 1785 * (1 + overhead) \quad (3)$$

Waar:  $C_{labour}$  zijn de loonkosten in €,  $hourly\_labour_{cost}$  is het uurtarief in €/h, hier 13€/h,  $overhead$  zijn de overheadkosten, hier 35% van de loonkosten en  $man_{year}$  zijn de man uren per jaar in h, berekend volgens vergelijking (4).

$$man_{year} = 0.301 * gr\_area^{0.2397} \quad (4)$$

Waar:  $gr\_area$  is het teeltoppervlak in m<sup>2</sup>.

### Beschrijving berekende scenario's

De kostprijs voor de algenproductie werd berekend voor verschillende scenario's door de volgende parameters te variëren:

1. Kasoppervlak bruto 1 ha - 10 ha
2. Assimilatiebelichting ja of nee
3. Aantal algenteelten per jaar 1 - 5
4. Benuttingsefficiëntie teeltoppervlak 44% - 77%
5. Type kasuitvoering glazen Venlo-kas of plastic multi-span kas
6. Variatie flexibele kosten voor CO<sub>2</sub>, energie, water
7. Variatie vaste investeringskosten algenteeltsysteem

Door het analytische oplossen alle mogelijke combinaties van de bovenstaande variabelen in het economische model (864 verschillende scenario's zijn berekend) en door een statistische regressie analyse werd een polynoom functie met R<sup>2</sup> 0.94 verkregen met de in Tabel 10 weergegeven coëfficiënten.

Tabel 10 .Coëfficiënten van een lineaire polynoom functie die gebruikt werd om de kostprijs van de algenproductie voor verschillende scenario's te berekenen

	Coëfficiënten	Standard Error
Interceptie	63.61327286	0.55899045
Kasoppervlak bruto	-4.57318E-05	2.66446E-06
Assimilatiebelichting	-11.38052309	0.631824919
Aantal algenteelten	2.23571452	0.131574619
Benuttingsefficiëntie teeltoppervlak	-44.735808	2.367501379
Type kasuitvoering glazen Venlo-kas of plastic multi-span kas	-0.659259259	0.168339694
Algenproductie	0.672552244	0.563876327





## 4 Resultaten experimenten algenteelt in een kas

### 4.1 Algenteelten, groei en productie

In totaal zijn in de periode oktober 2012 t/m november 2013 zeven algenteelten met *Chlorella sorokiniana* uitgevoerd in de zes fotobioreactoren in een kas in Bleiswijk. De eerste twee teelten waren vooral bedoeld om de techniek van de algenbioreactoren en de teeltmethodes te testen. Vanaf eind december 2012 zijn testen met diverse groeifactoren uitgevoerd (Tabel 12). Bij teelt 3 ging het om algemene groeiwaarneming en testen van de reactie van algen op CO<sub>2</sub> (4.2.1). Een dichtheid van 2 g/l werd aangehouden als setpoint. Bij teelt 4 en 5 zijn pH experimenten gedaan (4.2.2) en is eveneens een dichtheid setpoint van ca. 2 g/l aangehouden. In teelt 6 en 7 is geëxperimenteerd met hogere dichtheden van 2 en 3 g/l (4.2.3).

*Tabel 11. Algenteelten startdatum, einddatum, teeltduur, gemiddelde dichtheid, gemiddelde totale productie per teelt en gemiddelde dagelijkse productie per oppervlak of per volumen gerealiseerd in een kas in Bleiswijk in 2013.*

Teelt	start	einde	Teeltduur dagen	Gemiddelde dichtheid g/l	Gemiddelde productie		
					totaal g/m <sup>2</sup>	dagelijks per oppervlak g/m <sup>2</sup> /dag	dagelijks per volume g/l/dag
3	27-12	1-3	64	1.76	381	6.0	0.28
4	14-3	21-5	68	1.99	557	8.2	0.38
5	5-6	25-7	50	2.10	183	3.7	0.17
6	30-7	23-9	55	2.18	196	3.6	0.17
7	4-10	9-12	66	2.2	269	4.1	0.19

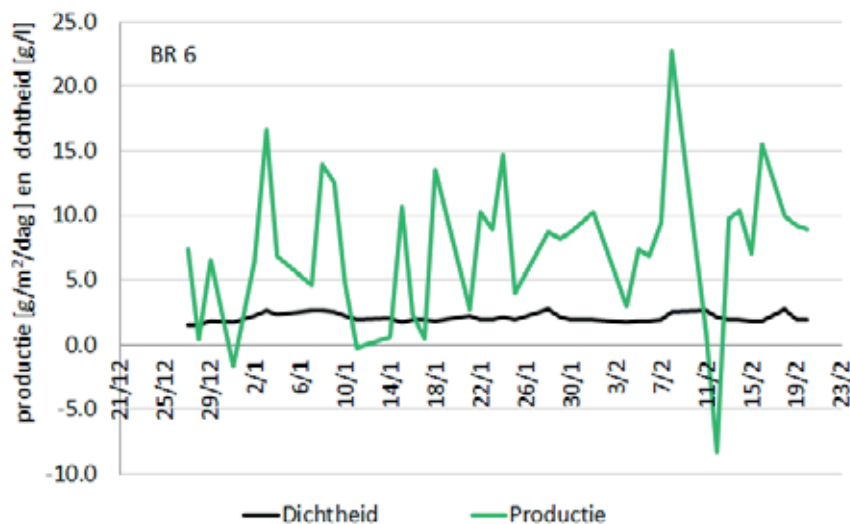
Opvallend is dat de hoogste groei gehaald werd bij teelt 4 in maart/april. Bij deze teelt waren de licht omstandigheden ideaal en de temperatuur, mede door lage buitentemperaturen, niet extreem. In de wintermaanden in teelt 3 was het lichtniveau ondanks de assimilatielampen lager. In de zomermaanden waren hoge temperaturen een beperkende factor. Teelt 5 was kort, de groei laag en die teelt kende veel problemen met aangroei. Dit is veroorzaakt door de hoge temperatuur in de reactoren vanwege hoge buiten (en kas-)temperatuur en hoge straling. Bij teelt 6 speelde het afnemende licht een rol, een aantal reactoren produceerden slecht. Bij teelt 7 nam de productie per dag weer toe.

Een overzicht over de teeltresultaten van teelt 3 t/m 7 in de verschillende bioreactoren BR 1 t/m 6 wordt weergegeven in Tabel 12. Daarnaast wordt een meer specifiek overzicht van het verloop van de dichtheid en groei per teelt en BR weergegeven in Bijlage V t/m Bijlage IX. Een typisch verloop van dichtheid en productie tijdens een teelt wordt weergegeven in Figuur 8. De waarden van de groei en productie per dag vertonen een zeer grillig verloop. Bij presentatie van de cumulatieve waarde zijn groei en productie beter te volgen (Figuur 9).

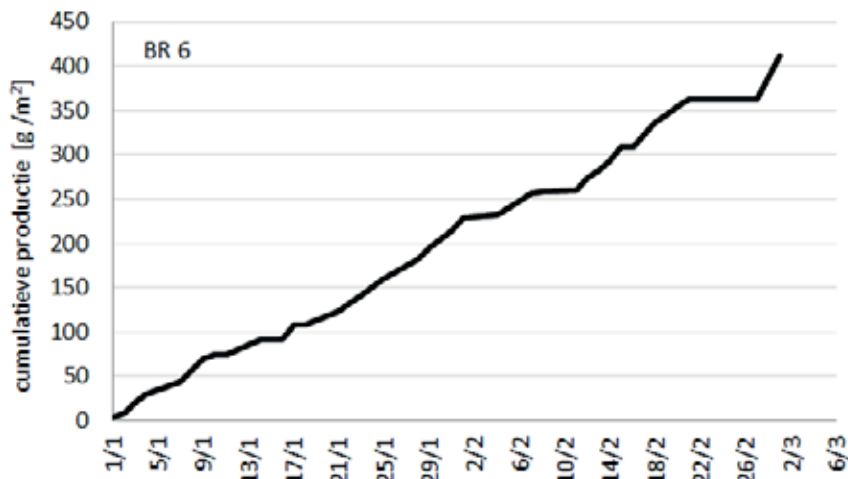
Bij alle teelten zijn er een aantal kenmerkende aspecten hetzelfde. Vanaf het begin, na inoculatie is er explosieve groei, waarbij na een week, soms al na 5 dagen de dichtheid bereikt wordt waarop dan de eerste keer kan worden geoogst. Na de initiële fase wordt er vervolgens een aantal weken geproduceerd, waarbij vijf dagen per week geoogst wordt en in het weekend incidenteel. Gedurende deze periode is er sprake van wisselende groeieresultaten. Er is niet altijd duidelijk een verband met groeiomstandigheden (licht, temperatuur) te leggen. Na verloop van tijd treden er problemen op, die dan steeds sterker worden. Dit is meestal na 5-7 weken het geval, zodat een teelt gemiddeld 50-70 dagen duurde. Er konden zo in 2013 5 teelten worden gerealiseerd.

Tabel 12. Overzicht teeltresultaten teelt 3 t/m7 in de verschillende bioreactoren BR 1 t/m 6.

productie totaal g/m <sup>2</sup>					
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	385	592	207	234	296
2	287	510	249	186	202
3	376	561	171	172	305
4	356	545	150	170	288
5	512	564	166	213	208
6	412	572	155	203	312
productie gemiddeld per dag g/m <sup>2</sup> /dag					
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	6.0	8.7	4.1	4.2	4.5
2	4.5	7.5	5.0	3.4	3.1
3	5.9	8.2	3.4	3.1	4.6
4	5.6	8.0	3.0	3.1	4.4
5	8.0	8.3	3.3	3.9	3.2
6	6.4	8.4	3.1	3.7	4.7
productie gemiddeld per volume g/l/dag					
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	0.28	0.40	0.19	0.20	0.21
2	0.21	0.35	0.23	0.16	0.14
3	0.27	0.38	0.16	0.14	0.21
4	0.26	0.37	0.14	0.14	0.20
5	0.37	0.38	0.15	0.18	0.15
6	0.30	0.39	0.14	0.17	0.22



Figuur 8. Verloop van dichtheid en productie van teelt 3 in BR 6.

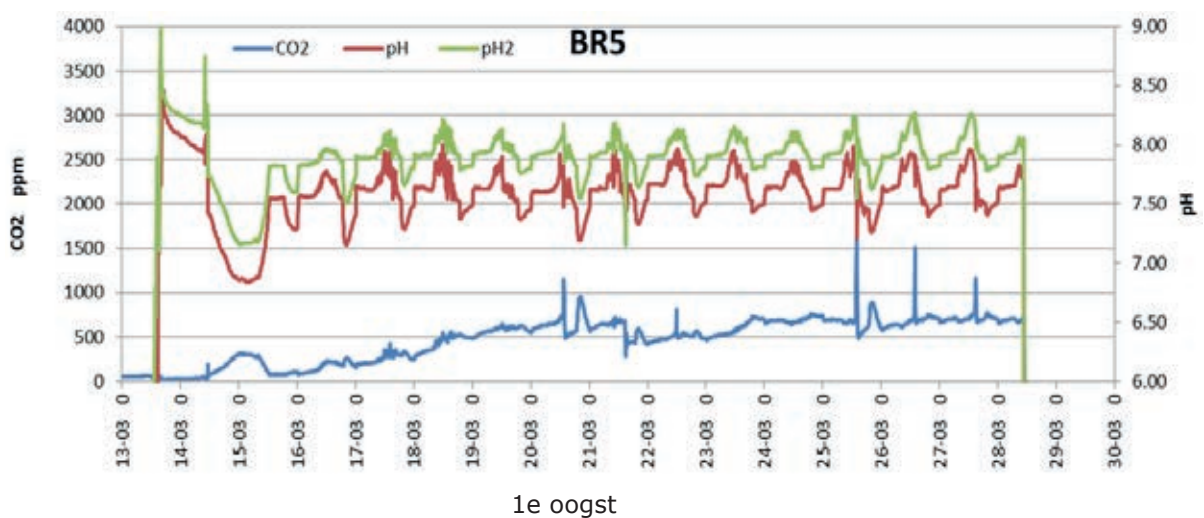


Figuur 9. Verloop van de cumulatieve productie van teelt 3 in BR 6.

## 4.2 Groeifactoren

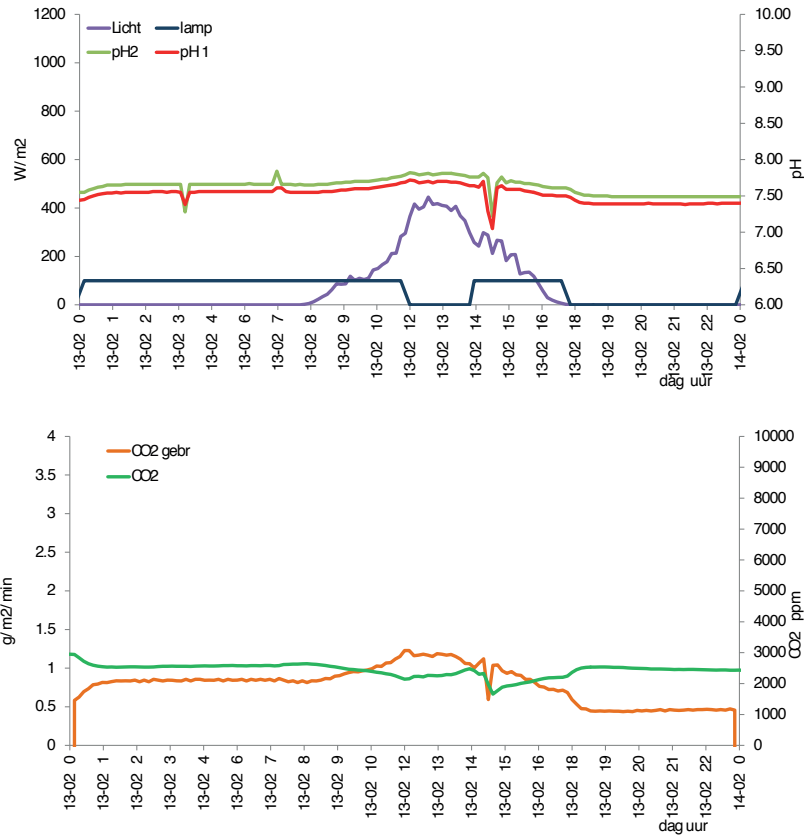
### 4.2.1 CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> is een belangrijke groeifactor voor algen. Tijdens teelt 3 werd het effect van CO<sub>2</sub> dosering en meting getest met behulp van een pulsregeling (3.2.1). Figuur 10 laat het verloop van pH en CO<sub>2</sub> concentratie in een reactor (BR 5) in een algenteelt (teelt 3) zien. Tijdens de groei in de eerste dagen van de teelt stijgt de CO<sub>2</sub> concentratie in de reactor tot dat er een evenwicht tot stand komt tussen de groei (CO<sub>2</sub>-vraag), de pH en de CO<sub>2</sub> concentratie in de reactorlucht. Tijdens de groeifase is een duidelijk dag-nachtritme te zien in de pH, door de snelle CO<sub>2</sub> consumptie overdag (pH stijging) en juist CO<sub>2</sub> afgifte in de nacht (pH daling). Er is ook een duidelijk dag-nachtritme te zien in de pH, door de snelle CO<sub>2</sub> consumptie overdag (pH stijging) en juist CO<sub>2</sub> afgifte in de nacht (pH daling). De dynamiek van de algenontwikkeling gedurende een etmaal is hiermee vrij groot. Figuur 11 laat het verloop van pH, CO<sub>2</sub> verbruik en concentratie en de straling op een dag in februari en een dag in april zien. Het niveau van algenactiviteit (CO<sub>2</sub> gebruik) op een donkere dag in februari is aanzienlijk lager dan op een lichte dag in april. Het uit- en anschakelen van de lampen is ook duidelijk zichtbaar in het CO<sub>2</sub> gebruik.

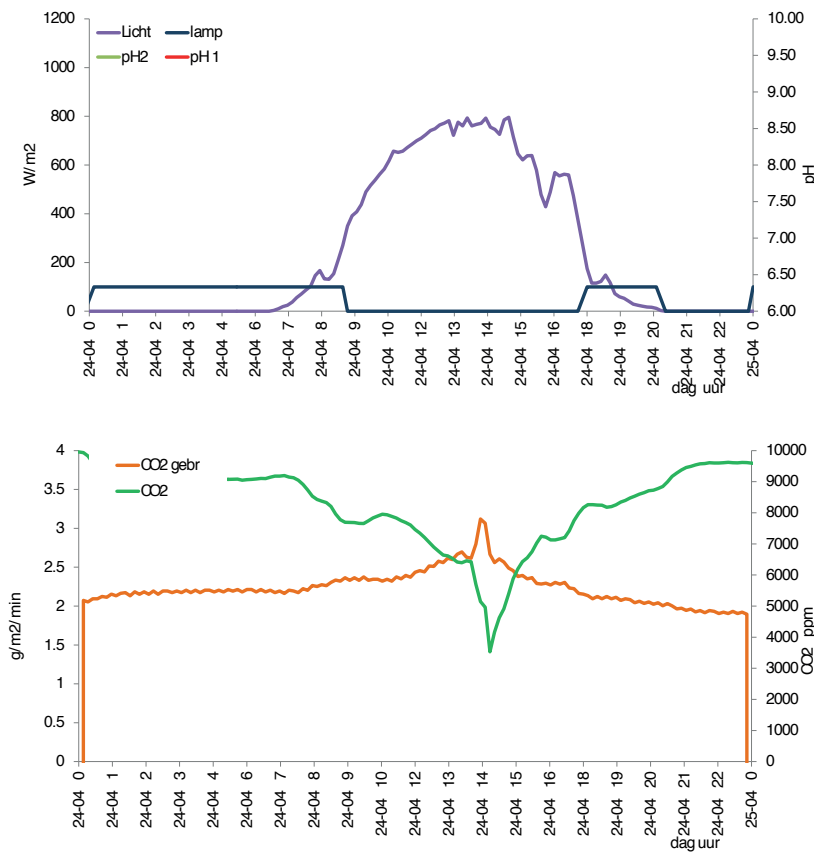


Figuur 10. Het verloop van de pH en de CO<sub>2</sub> concentratie in een reactor vanaf het begin van een teelt. Het dag-nachtritme van pH is te herkennen en de geleidelijke stijging van de CO<sub>2</sub> concentratie.

februari



april



Figuur 11. Het verloop van de pH (2 sensoren), buitenstraling ( $W/m^2$ ) en assimilatielampen (aan=100, uit=0) en het  $CO_2$  verbruik ( $g/m^2/min$ ) en de  $CO_2$  concentratie (ppm) op 13 februari (boven) en 24 april (onder).

## 4.2.2 pH effecten

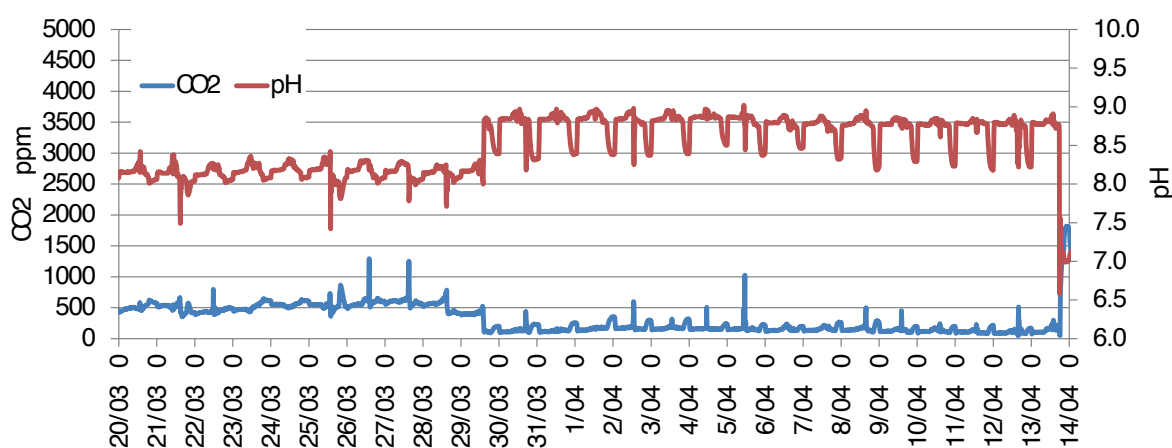
De pH in de reactorvloeistof hangt nauw samen met het 'carbonaat-evenwicht' en wordt geregeld via de CO<sub>2</sub> dosering. Gekozen is voor een CO<sub>2</sub> dosering via pulsregeling. In teelt 4 werden de volgende setpoints ingesteld, waarbij er na een aantal weken de pH behandeling van bioreactoren gewisseld is.

Tabel 13. Overzicht van de pH behandelingen en instellingen in teelt 4

BR	Periode	pH low	pH high	Pulse low	Pulse high
1 en 4	15/3 - 15/4	6.5	7.5	0	120
	16/4 - 23/5	8.5	9.5	0	120
2 en 5	15/3 - 15/4	8.5	9.5	0	120
	16/4 - 23/5	6.5	7.5	0	120
3 en 6	15/3 - 23/5	7.5	8.5	0	120

De pH regelen door middel van CO<sub>2</sub> doseren lukt vrij goed. De ervaring leert dat er een snelle reactie van het systeem op veranderingen is. Bij verandering van de CO<sub>2</sub> dosering verandert de pH (Figuur 12). De assimilatie van de algen (= CO<sub>2</sub> verbruik) is uiteraard sterk afhankelijk van de hoeveelheid licht. Bij toename van de hoeveelheid licht (lampen of zonlicht) stijgt het CO<sub>2</sub> verbruik van de algen en stijgt de pH.

Vanwege een aantal technische storingen lukte het niet altijd de pH waarden constant op de gewenste setpoints te houden, het niet goed functioneren van CO<sub>2</sub> klep of pH sensoren veroorzaakte storingen in de regeling of in de dataregistratie (Bijlage VI). Duidelijk zichtbaar is het effect van de ingestelde pH op de CO<sub>2</sub> concentratie, bij lage pH setpoints wordt veel meer CO<sub>2</sub> gedoseerd en ook gemeten in de lucht dan bij hoge pH. Het systeem reageert ook zeer snel op veranderingen van de setpoints, zoals te zien is in de figuren bij het moment van wisselen van de setpoints.



Figuur 12. Verloop van CO<sub>2</sub> en pH tijdens teelt 4 in BR 3 met een pH setpoint tussen 7.5-8.5. De samenhang tussen CO<sub>2</sub> dosering en pH is goed zichtbaar.

De testen met verschillende pH setpoints leverden geen duidelijk effect van de algengroei op. De cumulatieve groei was in alle behandelingen vergelijkbaar (Tabel 14). Verklaringen kunnen zijn dat *Chlorella sorokiniana* binnen een breed pH-gebied kan groeien. In een vergelijking van teelt 4 en teelt 5 wordt duidelijk dat veranderde omstandigheden in de tijd een grotere invloed hadden dan het pH setpoint. Opnieuw kwam er in beide teelten op gezette tijden aangroei voor van de buizen. Bij de behandelingen met lage pH was dit opmerkelijk vaker het geval dan bij de hoge pH.

Tabel 14. Overzicht van de groei bij de pH behandelingen in teelt 4 en 5

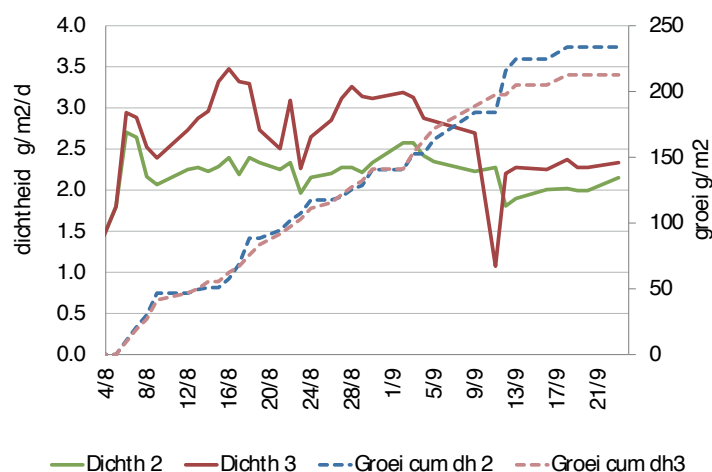
BR	pH setpoint	Teelt 4			Teelt 5		
		productie g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> /dag	g/l/dag	productie g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> /dag	g/l/dag
1	6.5-7.5 ∞ 8.5-9.5	592	8.70	0.40	207	4.13	0.19
2	8.5-9.5 ∞ 6.5-7.5	510	7.51	0.35	249	4.98	0.23
3	7.5-8.5	561	8.25	0.38	171	3.41	0.16
4	6.5-7.5 → 8.5-9.5	545	8.02	0.37	150	3.00	0.14
5	8.5-9.5 ∞ 6.5-7.5	564	8.29	0.38	166	3.33	0.15
6	7.5-8.5	572	8.41	0.39	155	3.10	0.14

### 4.2.3 Dichtheid

De dichtheid van algen in een bioreactor bepaald de hoeveelheid licht dat onderschept wordt en daarmee de groei en productie per teeltoppervlak. In teelt 6 en 7 is het effect van de dichtheid op de groei en ontwikkeling van de algen gemeten. Twee setpoints voor dichtheid werden gehanteerd, 2 g/l en 3 g/l. De setpoints werden als volgt toegepast: Voor het oogsten werd aan de hand van een monster de dichtheid bepaald. Op basis van het aanwezige volume werd dan berekend hoeveel geoogst moest worden om weer op het setpoint te geraken. Daarbij werd rekening gehouden met de oogstfrequentie, dat wil zeggen, vlak voor het weekeinde (normaliter geen oogst) werd dan een lager setpoint toegepast en meer geoogst dan bij dagen in de week.

Aanvankelijk verliep de groei in teelt 7 goed, echter er ontstond bij BR2 al snel aangroei aan de wanden en trad flinke clustering op. Ook was de stroomsnelheid duidelijk minder dan bij de overige BR's. De oorzaak bleek een lekkage in de luchtpomp (membranen verstopt door aangekoekte algen). Nadat dit verholpen verliep de groei beter. De clustering bleek effectief verholpen te kunnen worden door een behandeling met Baskal. Vanaf half september was de groei bij meerdere bioreactoren tot stilstand gekomen en trad ook bruinverkleuring op. Dit laatste bleek een duidelijk teken van afsterving, uit microscopische waarneming bleek dat er nauwelijks gezonde algencellen aanwezig waren, maar wel veel eencellige organismen. Vermoedelijk was er sprake van sterke predatie. Bij een aantal is alles afgeoogst, snel schoongemaakt en ontsmet en is met algencultuur uit nog wel goed draaiende reactoren verder gegaan in teelt 7. Een hogere dichtheid bleek ondanks het setpoint niet gemakkelijk te halen, al snel was er sprake van aangroei en clustering.

Figuur 13 geeft de cumulatieve groei van teelt 6 weer. Tabel 15 laat zien dat er geen duidelijke verschillen in groei en productie afhankelijk van de dichtheid konden worden vastgesteld, setpoints van de dichtheid konden vaak niet worden bereikt.



Figuur 13. De cumulatieve groei ( $\text{g/m}^2/\text{dag}$ ) en de gemeten dichtheid ( $\text{g/l}$ ) bij de twee niveaus van dichtheid in de teelt 6.

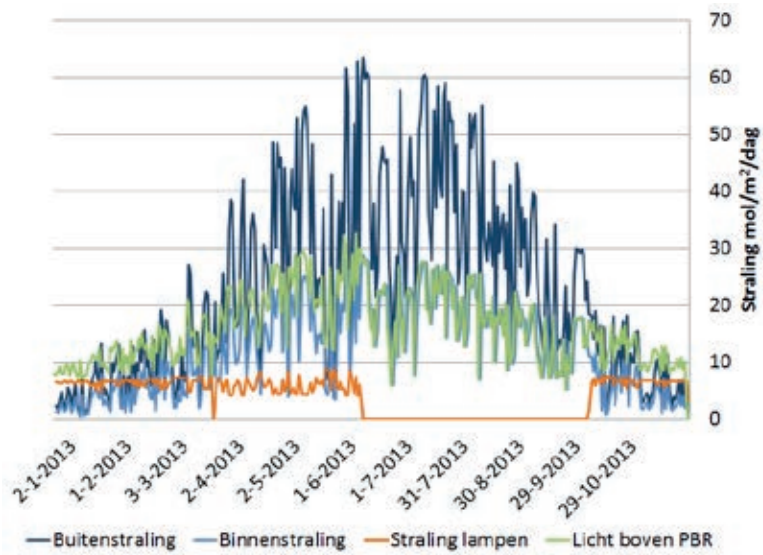
Tabel 15. Overzicht van de groei bij de dichtheid behandelingen in teelt 6 en teelt 7.

setpoint dichtheid	Teelt 6			Teelt 7			
	Gemiddelde dichtheid gemeten	productie		setpoint dichtheid	Gemiddelde dichtheid gemeten	productie	
g/l	g/l	$\text{g/m}^2$	$\text{g/m}^2/\text{d}$	g/l	g/l	$\text{g/m}^2$	$\text{g/m}^2/\text{d}$
3	2.50	234	4.25	2	2.0	255	4.55
3	2.36	186	3.39	3	2.3	157	2.81*
2	1.85	172	3.12	4	2.4	259	4.63
3	2.31	170	3.09	2	2.1	288	5.14
2	2.06	213	3.87	3	2.2	184	3.29
2	1.97	203	3.69	4	2.6	312	5.57

\* problemen met groei, niet representatief

## 4.2.4 Licht

Figuur 14 laat de hoeveelheid natuurlijk licht buiten de kas, de hoeveelheid licht na transmissie in de kas, de hoeveelheid assimilatielicht en de totale hoeveelheid licht boven de bioreactoren zien. De hoeveelheid licht boven de bioreactoren was in de zomermaanden drie keer hoger dan in de wintermaanden. Tabel 16 geeft de gemiddelde lichtbenuttingsefficiëntie per teelt weer, deze was gemiddeld 0.35. De laagste waardes waren minder dan 0.2, de hoogste waardes boven de 0.6. Het valt op dat de lichtbenuttingsefficiëntie in de winterteelten hoger was dan in de zomerteelten. In de zomer van april tot eind september was er zeker meer licht dan de algen konden benutten. Achterafgezien was assimilatiebelichting in de maanden april tot juni niet nodig geweest. Licht viel naast de algenreactoren omdat deze niet met een optimale dichtheid in de kas waren geplaatst. In de kas was namelijk ruimte voor de dubbele hoeveelheid algenreactoren. Dit had er mee te maken dat de zes beschikbare reactoren bij inrichting van de algenproefcellen gelijkmatig over het beschikbare teeltoppervlak werden verdeeld. Het dubbele aantal bioreactoren had tot veel hogere lichtbenuttingsefficiëntie geleid. Met deze maatregel had waarschijnlijk ook de productie per teeltoppervlak worden verdubbeld.



Figuur 14. Hoeveelheid natuurlijk licht buiten de kas, na transmissie in de kas, de hoeveelheid assimilatielicht en de totale hoeveelheid licht boven de bioreactoren in mol/m<sup>2</sup>/dag in 2013.



Tabel 16. Totale algenproductie per teelt in g ds/m<sup>2</sup>, lichtsommen per teelt in mol/m<sup>2</sup> en berekende gemiddelde lichtbenuttingsefficiëntie in g ds/mol licht.

productie totaal					
	g/m <sup>2</sup>				
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	385	592	207	234	296
2	287	510	249	186	202
3	376	561	171	172	305
4	356	545	150	170	288
5	512	564	166	213	208
6	412	572	155	203	312
lichtsom					
	mol/m <sup>2</sup>				
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	663	1485	1177	1018	709
2	663	1485	1177	1018	709
3	663	1485	1177	1018	709
4	663	1485	1177	1018	709
5	663	1485	1177	1018	709
6	663	1485	1177	1018	709
light use efficiency					
	g ds/mol				
BR	teelt 3	teelt 4	teelt 5	teelt 6	teelt 7
1	0.58	0.40	0.18	0.23	0.42
2	0.43	0.34	0.21	0.18	0.28
3	0.57	0.38	0.14	0.17	0.43
4	0.54	0.37	0.13	0.17	0.41
5	0.77	0.38	0.14	0.21	0.29
6	0.62	0.39	0.13	0.20	0.44

### 4.3 Kengetallen

De data van teelt 3 t/m 7 zijn samengevat in kengetallen over (drogestof) productie en water, energie en CO<sub>2</sub> verbruik (Tabel 17). Alle in- en uitputs zijn tijdens de algenteelten gemeten. Alle gemeten waarden zijn omgerekend naar een periode van 1 jaar. Bij deze omrekening wordt rekening gehouden met de gerealiseerde teeltduur plus 5 dagen voor schoonmaak van het systeem. Efficiëntie waarden zijn uitgerekend in kg drogestof algenproductie per eenheid inputfactor (water, energie, CO<sub>2</sub>, licht). Alle waarden worden vergeleken met typische waarden voor een onbelichte en belichte tomatenteelt (Tabel 18, Bijlage X, Bijlage XI).

Samenvattend kan worden gesteld dat er ca. 1.8 kg ds algen per m<sup>2</sup> teeltoppervlak of 82.8 g ds per l teeltvolume zijn geproduceerd in 2013 (Tabel 17). Aangezien er maar de helft van het technisch mogelijke aantal BR per teeltoppervlak was geïnstalleerd in de kas in Bleiswijk, kan worden geconcludeerd dat ca. 3.6 kg ds algen per m<sup>2</sup> in 5-6 teelten per jaar praktisch haalbaar zijn. In de kas was namelijk ruimte voor de dubbele hoeveelheid algenreactoren. Dit had ermee te maken dat de zes beschikbare reactoren bij inrichting van de algenproefeffaciteit gelijkmatig over het beschikbare teeltoppervlak werden verdeeld. Het dubbele aantal bioreactoren had dus ook tot een verdubbeling van de productie geleid.

De lichtbenuttingsefficiëntie was gemiddeld 0.32 g ds mol<sup>-1</sup> (Tabel 17) met laagste waardes in de zomer van minder dan 0.2 en hoogste waardes in het voorjaar van boven de 0.6 (Bijlage X). Indien in de kas het technisch mogelijke aantal BR per teeltoppervlak was geïnstalleerd in de kas in Bleiswijk, was de lichtbenuttingsefficiëntie gemiddeld verhoogd naar meer dan 0.6 g ds mol<sup>-1</sup> jaarrond.

In de algenteelt werd gemiddeld 564 g/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> verbruikt. Hiermee is de algenteelt met een productie van gemiddeld 3.3 g ds/g CO<sub>2</sub> efficiënter dan een tomatenteelt (Tabel 17), met laagste waardes onder de 1 g ds/g CO<sub>2</sub> en hoogste waardes boven de 6 g ds/g CO<sub>2</sub> (Bijlage X). Een algenteelt is efficiënter dan een tomatenteelt omdat CO<sub>2</sub> direct wordt toegevoegd aan het water, terwijl in een tomatenteelt CO<sub>2</sub> aan de lucht wordt toegevoegd en veel CO<sub>2</sub> bij opening van luchtramen uit de kas verdwijnt.

In de algenteelt werd gemiddeld 2.2 l/m<sup>2</sup> water verbruikt. De efficiëntie van het waterverbruik 2.5 g ds/l (Tabel 17), een waarde die jaarrond door alle teelten ongeveer constant was (Bijlage X). De efficiëntie van het waterverbruik van de algenteelt is lager dan bij een tomatenteelt. Deze kan in de toekomst worden verhoogd door bij de algenproductie het water na de oogst her te gebruiken, wat nu niet werd gedaan. Met deze maatregel kan het waterverbruik in de toekomst aanzienlijk worden verlaagd.

In de algenteelt werd in 2013 in totaal ca. 2000 MJ/m<sup>2</sup> warmte en elektriciteit verbruikt. Hiermee ligt het verbruik tussen een onbelichte tomatenteelt (ca. 1000 MJ/m<sup>2</sup>) en een belichte tomatenteelt (ca. 3000 MJ/m<sup>2</sup>). De efficiëntie van het energieverbruik van de algenteelt is met 0.9 g ds/MJ lager dan bij een tomatenteelt (1.6-3.9 g ds/MJ). Het energieverbruik kan in de toekomst worden geoptimaliseerd door de belichting beter op de behoefte van de algen op elk moment aan te passen. Daarnaast zou de energiebenuttingsefficiëntie worden verhoogd indien het technisch mogelijke aantal BR per teeltoppervlak was geïnstalleerd in de kas in Bleiswijk.

Tabel 17. Overzicht van de kengetallen algenteelt in kas in Bleiswijk gemiddeld over 5 teelten in 2013 omgerekend per jaar, vergeleken met een zuinige belichte en onbelichte tomatenteelt.

BR	Productie per oppervlak	Productie per volume	Waterverbruik	Lichtsom	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektriciteitsverbruik	Warmteverbruik	Totaal energieverbruik	water use efficiency	light use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency	energy use efficiency
	kg ds m <sup>-2</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	l m <sup>-2</sup>	mol m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	MJ m <sup>-2</sup>	MJ m <sup>-2</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds g <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>	g ds MJ <sup>-1</sup>
1	1.9	89.0	762	5669	453	203	461	2062	2.5	0.34	4.2	0.9
2	1.6	74.5	649	5669	649	203	461	2062	2.5	0.28	2.5	0.8
3	1.8	82.4	708	5669	676	203	461	2062	2.5	0.31	2.6	0.9
4	1.7	78.4	704	5669	371	203	461	2062	2.4	0.30	4.6	0.8
5	1.9	86.4	698	5669	581	203	461	2062	2.7	0.33	3.2	0.9
6	1.9	85.9	709	5669	653	203	461	2062	2.6	0.33	2.8	0.9
Algenteelt belicht	1.8	82.8	762	5669	564	203	461	2062	2.5	0.32	3.3	0.9
Tomaat onbelicht	3.9	*	615	5768	26500	0.0	1008	1008	6.3	0.7	0.1	3.9
Tomaat belicht	5.0	*	718	6983	34600	317	551	3055	7.0	0.7	0.1	1.6

## 4.4 Uitdagingen tijdens het teeltproces

Bij alle algenteelten traden er na verloop van tijd groeiproblemen op, die steeds sterker worden. Dit is meestal na ca.5 weken het geval, waarna het moeite kostte om de groei en ontwikkeling van de algen in stand te houden. De volgende verschijnselen traden op:

Groene waas. Een egale lichte, dunne groene waas is te zien, waar de cultuurvloeistof nog duidelijk door zichtbaar is, aan de bovenkant van de buizen, meestal beginnend bij de onderste buizen, maar daarna over het gehele systeem. Dit zijn algen die aangroeien en zorgen voor verminderde lichtinval. Indien niet wordt ingegrepen wordt het probleem erger en treedt aangroei op (Figuur 15).

Waargenomen bij stress-achtige omstandigheden, zoals het slecht functioneren van een luchtpomp, of te lage CO<sub>2</sub> concentratie.

Aangroei buizen. Te beginnen bij de onderste buizen vormt zich onderin de buizen een steeds dikker worden laag aangroeiende algen. De laag is donkergroen en vrijwel ondoorzichtig (Figuur 15).

Waargenomen bij alle teelten na verloop van tijd, klaarblijkelijk onvermijdbaar bij het huidige systeem. Bij stressachtige omstandigheden neemt het soms zeer sterk toe. Vooral bij lage pH waargenomen (ook bij een kapotte CO<sub>2</sub> klep waardoor tijdelijk teveel CO<sub>2</sub> werd gedoseerd).

Clustering. Duidelijk zichtbaar in de buizen dat algen samenklonteren in de vorm van fijne tot grovere vlokken. Bij bemonsteren treedt scheiding op, waarbij de geclusterde algen bezinken. In extreme situaties ook bezinking in de – toch snelstromende - vloeistof in de reactoren. Vaak hangt clustering samen met de aangroei (Figuur 15).

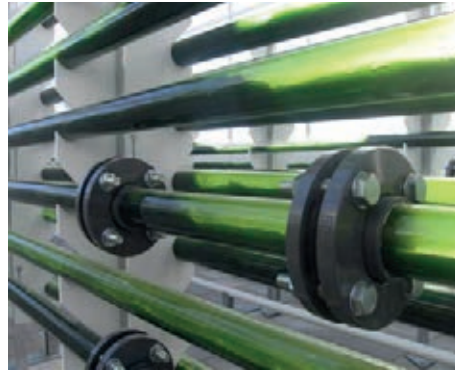
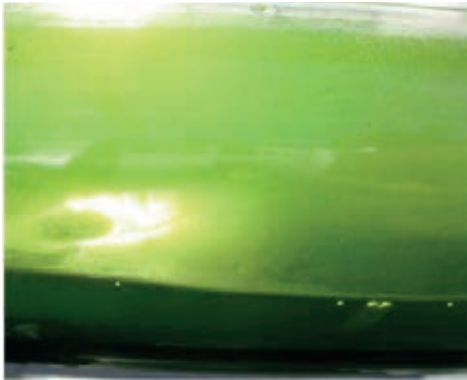
Waargenomen na stress. Te hoge temperaturen, lage of hoge pH en te lage of te hoge CO<sub>2</sub>.

Verkleuring. Naarmate de teelt vordert is soms een kleurverandering waarneembaar. Dit wordt grauwer/grijzer, soms ook bruinachtig. Dit blijkt een voorstadium van complete afsterving, waarbij de vloeistof groenbruin wordt (Figuur 15).

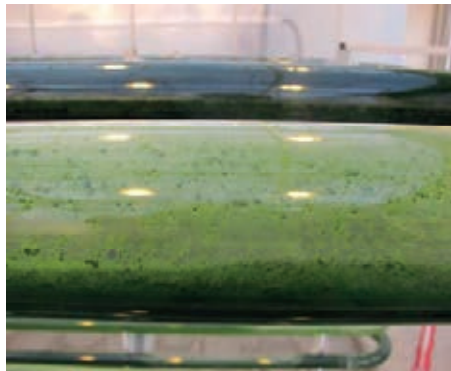
Waargenomen bij “oudere” teelten, waarbij ook stress optreedt. Vermoedelijk afsterving. Microscopisch waarnemingen doen vermoeden dat er (mede) sprake is van eencelligen (grazers).

Schuimvorming. In de buizen, maar vooral in de buffervaten treedt schuimvorming op. Soms zodanig dat het systeem overschuimt en er leidingen van luchtpompen vol raken (Figuur 15).

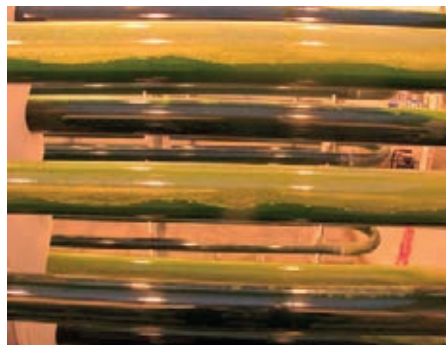
Waargenomen bij “oudere” teelten, vooral daar waar door remedie uit de eerdere proeven in de eerste teelten in 2012 was gebleken dat een dosering van Baskal (meststof, mengsel van KOH en K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) de aangroei kon verminderen of zelfs wegnemen en dat de algen – behalve tijdelijk stilzetten van de effecten. In een aantal gevallen is de behandeling succesvol gebleken, in een aantal andere gevallen duidelijk niet. Kortom er zijn omstandigheden die we nog onvoldoende kennen.



Groene was



Aangroei buizen

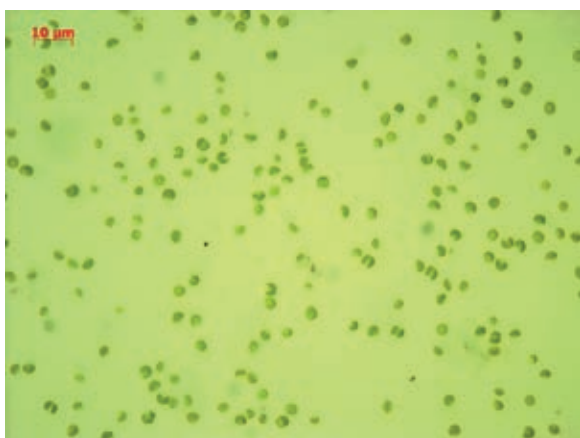


Clustering

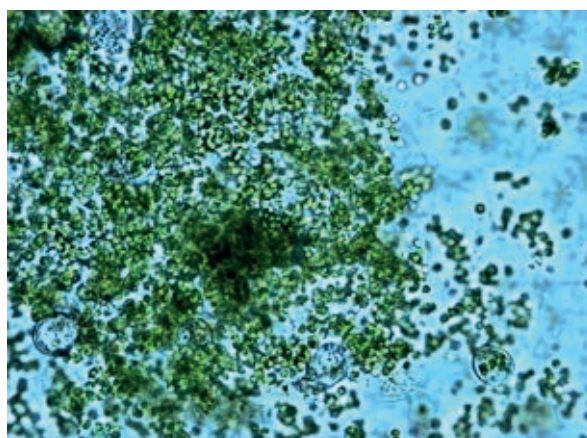


Schuimvorming

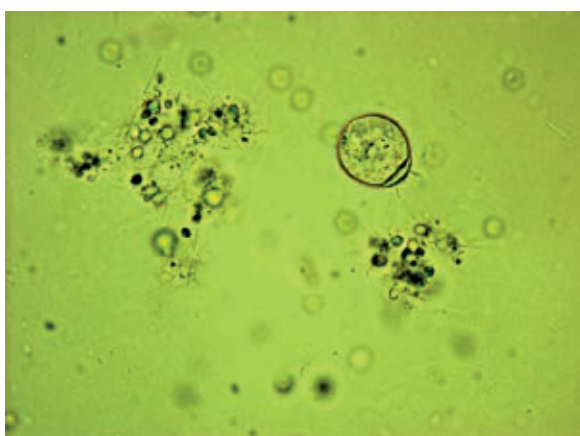
*Figuur 15. Verschijnselen tijdens het teeltproces*



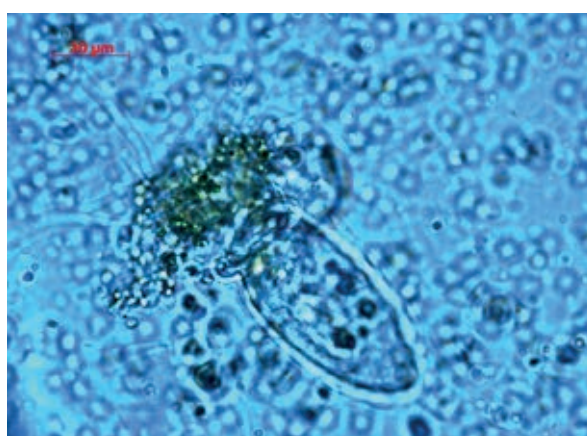
*Chlorella sorokiniana*, gezonde cellen



*Chlorella sorokiniana*, clustervorming



Besmetting



Besmetting

Figuur 16. Microscopieopnames van algen, Wageningen UR Glastuinbouw Bleiswijk van gezonde, gestreste en besmette teelten.

Tabel 18. Effect van de dosering van Baskal (50% KOH, 50% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) op het opheffen van de geclusterde en aangegroeide algen. Weergegeven is het aantal keren dat de behandeling succesvol was of niet succesvol was in de tijd.

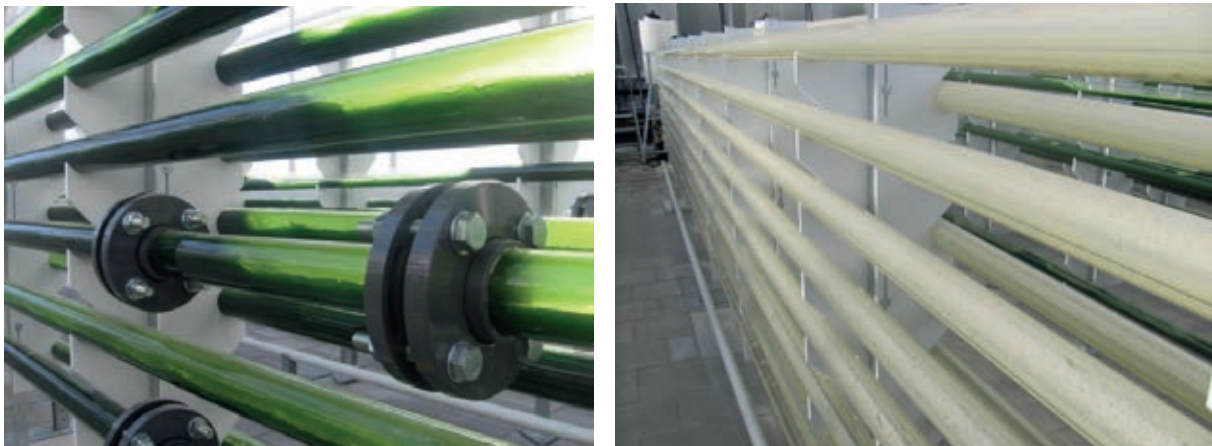
Dosering Baskal	Concentratie behandeling	Tijdsduur behandeling		na 48 h		na 72 h *	
		na 25 h		wel succes	geen succes	wel succes	geen succes
ml/reactor	mmol K /l	wel succes	geen succes	wel succes	geen succes	wel succes	geen succes
500 (eenmalig)	11.3	3	6	5	4		
500 (herhaaldelijk)		-	-	2	2	1	1
1000	22.7	2	2	3	1	-	1
1500	34.0	1	2	2	1		
2000	45.4	1	1	2			

## 4.5 Reinigen algenteeltsystemen

De gemiddelde teeltduur tijdens de proeven was ca. 8.5 weken. Een goede reiniging na beëindiging van de teelt is van belang. Echter, het verwijderen van aanslag van algen aan de binnenkant van de buizen bleek lastig. Waterstofperoxide is eerst geprobeerd, echter zonder succes, veel aanslag bleef zitten. Toedienen van Baskal of puur KOH gaf wel een sterke daling van de hoeveelheid neerslag, maar er bleef vaak een restant achter. Met natriumhypochloriet reinigen bleek wel alle “groene” materie te verwijderen, maar meestal bleef er een grijswitte aanslag over (Figuur 16). Niet onderzocht is wat dit is, maar vermoedelijk een neerslag van een zout, want na behandeling met zuur ( $\text{HNO}_3$ ) verdween ook dit. Uiteindelijk bleek een combinatie van middelen de beste manier voor goede reiniging.

De volgende stappen worden genomen in het vastgestelde reinigingsprotocol:

1. Na beëindigen van een teelt en leeghalen systeem wordt een paar keer met schoon water gespoeld, hiermee wordt een belangrijk deel van de inhoud van de bioreactor mechanisch verwijderd.
2. Het systeem wordt volgezet met Baskal: dosering van  $4.5 \text{ l/m}^3 = 32 \text{ mmol/l (OH}^- + \text{CO}_3^{2-})$ . dit wordt minimaal 24 h gecirculeerd. Een groot deel van de algen laat los van de binnenwand van de bioreactoren. Bij hevige vervuiling de behandelingen herhalen.
3. Hierna het systeem legen, doorspoelen met schoon water, volzetten met 1-2%  $\text{NaHClO}_4$  en opnieuw 24 h circuleren. Eventueel de pH licht aanzuren tot pH 7.5, dit verbetert de werking.
4. Na opnieuw doorspoelen. Afhankelijk van de situatie (als er witte neerslag te zien is) volzetten met zuur  $\text{HNO}_3$  pH 1.5. Opnieuw 24 uur circuleren.
5. Hierna is het systeem klaar en kan volgezet met voeding voor de volgende teelt. Dit moet eerst (24 h) ontsmet met 20 ppm  $\text{NaHClO}_4$ , vervolgens met 20 ppm  $\text{H}_2\text{O}_2$  om de  $\text{HClO}_4$  te neutraliseren, hierna kan de algencultuur geënt worden.



Figuur 17. Groene aanslag van algen aan buizen vóór het reinigingsproces, grijs-witte aanslag tijdens het reinigingsproces.

## 4.6 Samenvatting

In 2013 zijn bij Wageningen UR Glastuinbouw in een kas in Bleiswijk vijf teelten met de alg *Chlorella sorokiniana* uitgevoerd. De gemiddelde teeltduur was ca. 50-70 dagen (8.5 weken). Ondanks de nodige technische problemen konden met succes redelijke producties tot stand komen. Een productie van in totaal  $1.8 \text{ kg ds/m}^2$  oftewel  $82.8 \text{ g/l}$  zijn op jaarbasis te halen. Deze getallen zijn gebaseerd op een benutting van het teeltoppervlak van 44%. Bij installatie van het technisch mogelijke aantal BR per teeltoppervlak in de kas in Bleiswijk, kan worden geconcludeerd dat ca.  $3.6 \text{ kg ds}$  algen per  $\text{m}^2$  in 5-6 teelten per jaar praktisch haalbaar zijn.

Er is zeker verbeteringspotentiaal voor het teeltmanagement. Stress van algen moet worden voorkomen. Het blijkt dat schokken in  $\text{CO}_2$ , pH en temperatuur gemakkelijk leidt tot clustering, aangroei en neerslag van algen. Uit de experimenten bleek dat de pH in de range van 6.5 tot 9.5 pH weinig invloed had op de productie. Wel bleek een lage pH gemakkelijker aanslag te geven.

Experimenten met dichtheid gaven aan dat een hogere dichtheid het systeem ook gevoeliger maakt voor aangroei. Er was onder de gegeven omstandigheden geen groeiverschil door verschillende dichtheden in de range van 2-4 g/l vast te stellen. Door beter teeltmanagement in de toekomst kan de productie beter worden afgestemd aan de externe groeifactoren en kunnen daarmee grotere producties worden gehaald. Uit de productiegegevens en de monitoring van licht, water, CO<sub>2</sub> en energie blijkt dat bij extrapolatie van de data naar een systeem met een hogere oppervlaktebenutting, de droge stof productie vergelijkbaar is met een belichte tomatenteelt. De energie, CO<sub>2</sub> en water efficiëntie hebben eveneens de potentie tot hoge waarden. De lichtbenuttingsefficiëntie was gemeten met gemiddeld 0.32 g/mol, bij hogere benutting van het teeltoppervlak zou deze boven de 0.6 g/mol uitkomen, bijna vergelijkbaar met een belichte tomatenteelt. De CO<sub>2</sub> efficiëntie was vastgesteld op 3.3 g ds/g CO<sub>2</sub>, een factor 20 hoger dan een belichte tomaat. De energie efficiëntie was een factor 2 lager dan voor een belichte tomatenteelt. Bij hogere oppervlaktebenutting zou deze vergelijkbaar zijn met een belichte tomatenteelt.

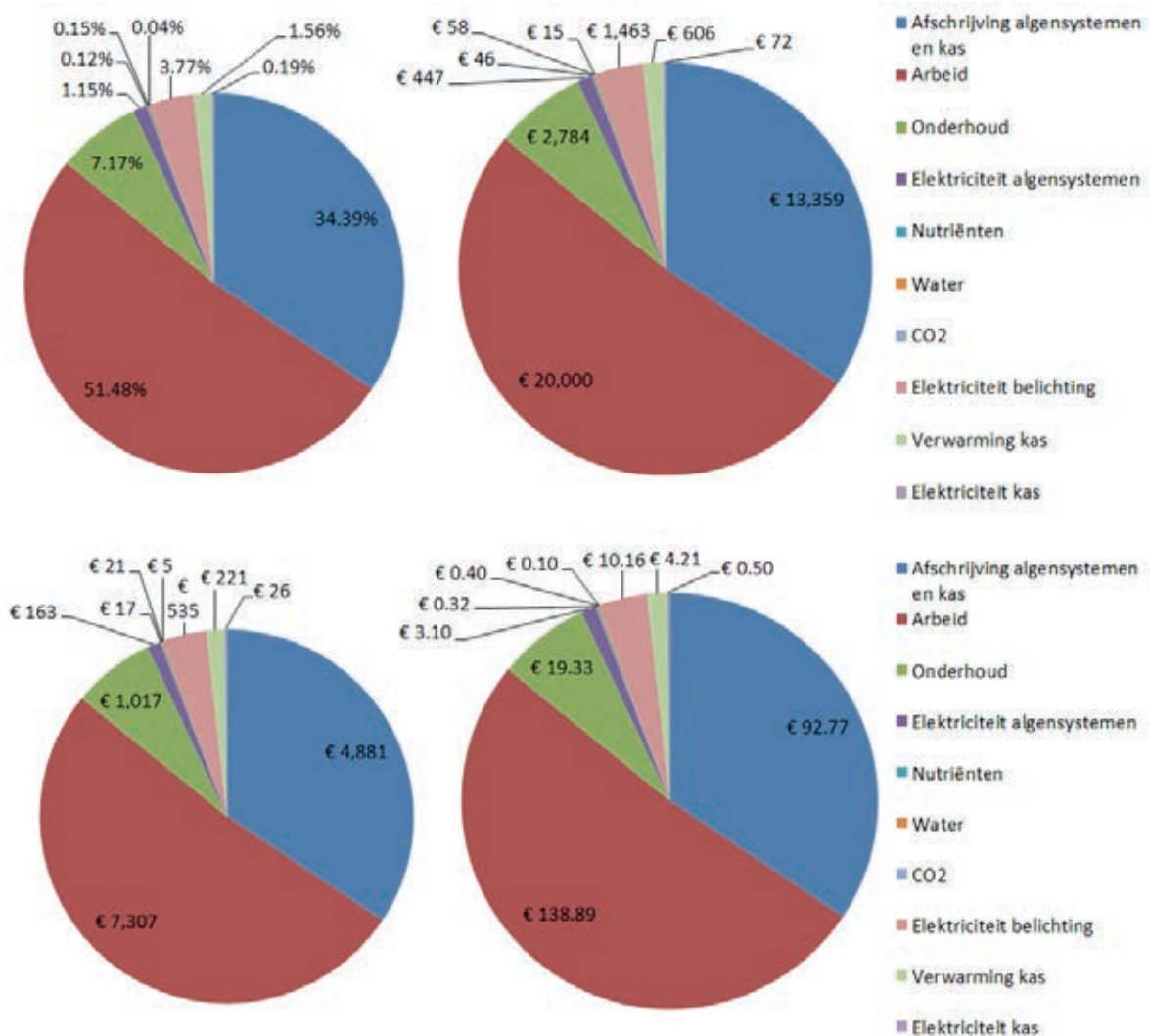
Het onderzoek was tot nu toe gericht op het vaststellen van groei en productie kengetallen in een kas in Nederland en de beïnvloeding van de biomassa productie door diverse groeifactoren. In de toekomst zal het onderzoek worden gericht op de specifieke productie van inhoudstoffen zoals kleurstoffen (astaxanthine). De in dit project opgebouwde kennis legt hiervoor de basis.



## 5 Resultaten economische berekeningen algenteelt in kassen

### 5.1 Kostprijs algenproductie in kas in Bleiswijk

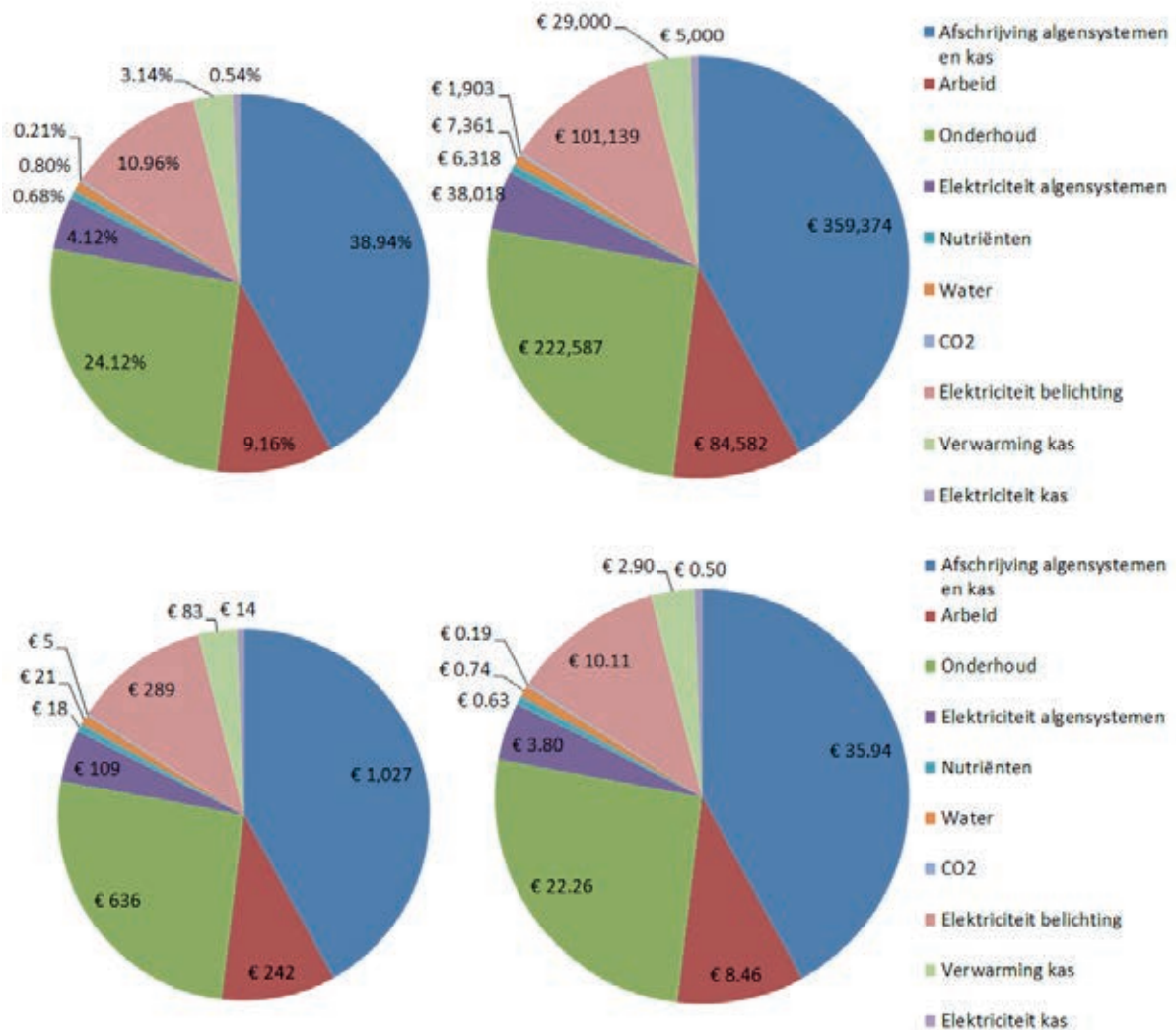
De kostprijs van de algenproductie in een kas in Bleiswijk is vastgesteld in 2013. Deze wordt beïnvloed door een aantal parameters. Voor de economische berekeningen werd de gerealiseerde productie, de vaste en de flexibele kosten van het algenproductie systeem en de kas meegenomen. De totale jaarlijkse kosten voor afschrijving en flexibele kosten waren €38,849 voor een teeltsysteem van 2.7 m<sup>3</sup> volume op een teeltoppervlak van 144 m<sup>2</sup>. De kosten per m<sup>3</sup> algen volume waren €14,194 en per m<sup>2</sup> teeltoppervlak €270. De kostprijs voor de productie van 1 kg drogestof algen werd berekend op €150,70/kg ds algen. De 6 algen bioreactoren in de kas in Bleiswijk nemen benutten slechts 42% van het kasgrondvlak. Door het installeren het technisch mogelijke aantal algen bioreactoren, namelijk 12 bioreactoren, wordt de kostprijs voor de productie van 1 kg drogestof algen teruggebracht tot €93.50 kg ds algen. De grootste kostenposten zijn afschrijving en arbeid (Figuur 17).



Figuur 18. Afschrijving en flexibele kosten algenteeltsystemen in een kas in Bleiswijk in percentage kosten (boven links), absolute kosten (boven rechts), kosten per m<sup>3</sup> algen volume (onder links) en kosten per m<sup>2</sup> teeltoppervlak (onder rechts).

## 5.2 Kostprijs algenproductie in kassen op grote schaal

De totale jaarlijkse kosten voor afschrijving en flexibele kosten voor een grootschalig algenteeltsysteem in een kas van 1 ha met een benuttingsefficiëntie van het teeltoppervlak van 77% wordt berekend op €922,956 voor een teeltsysteem van ca. 351 m<sup>3</sup> volume op een teeltoppervlak van 1 ha. De kosten per m<sup>3</sup> algen volume werden berekend op €2,637, vijf keer lager dan bij het pilotsysteem in Bleiswijk. De kosten per m<sup>2</sup> teeltoppervlak werden berekend op ca. €92, een factor drie lager dan bij het pilotsysteem in Bleiswijk. De kostprijs voor de productie van 1 kg drogestof algen werd berekend op €26.30/kg ds algen. De grootste kostenposten zijn nu afschrijving en onderhoud, gevold door arbeid en elektriciteit voor belichting (Figuur 18).



Figuur 19. Afschrijving en flexibele kosten grootschalig algenteeltsystemen in een kas van 1 ha in percentage kosten (boven links), absolute kosten (boven rechts), kosten per m<sup>3</sup> algen volume (onder links) en kosten per m<sup>2</sup> teeltoppervlak (onder rechts).

Variatie van diverse parameters laat zien dat de kostprijs per kg ds het meest gevoelig is voor de hoeveelheid algen productie die gerealiseerd kan worden. Indien geen assimilatiebelichting wordt toegepast, neemt de productie af en stijgt de kostprijs naar €37,10/kg ds. Indien het in de toekomst mogelijk zou zijn om met een betere teeltmanagement minder teelten per jaar te realiseren, stijgt de productie naar 4 kg ds/m<sup>2</sup> en neemt de kostprijs af naar €23.50/kg ds. Verdere productiestijgingen naar 5kg ds/m<sup>2</sup> zou de kostprijs per kg ds verlagen naar onder de €20. Schaalvergroting naar 10 ha laat de kostprijs afnemen van €26.30/kg ds naar €21.60/kg ds. Indien het in de toekomst de investeringskosten voor de algenteeltsystemen met meer dan 25% verlaagd kan worden dan in de huidige berekeningen aangenomen, kan de kostprijs per kg ds onder de €20 wordt verlaagd. Hier zijn leveranciers van systemen gevraagd.

De kostprijs is weinig gevoelig voor gebruik van energie, water en CO<sub>2</sub>. Indien het verbruik voor energie, water en CO<sub>2</sub> wordt gehalveerd verandert de kostprijs van €26.30/kg ds naar €25.20, indien de prijs voor elektriciteit, gas, water en CO<sub>2</sub> verdubbeld verandert de kostprijs naar €31.10. Resultaten van verdere scenario's zijn weergegeven in Tabel 19.

Tabel 19. Producties berekend met het groei-model AlgKas en kostprijs per kg droge stof algen berekend met het economische model voor verschillende scenario's.

Scenario	Assimilatie-belichting	Aantal algen-teelten	Benuttings-efficiëntie teeltoppervlak (%)	Productie algen (kg ds/m <sup>2</sup> )	Kostprijs algen zonder grond (€/kg ds)	Kostprijs algen met grond (€/kg ds)
1	NO	1	44%	1.39	43.9	63.5
2	YES	1	44%	2.19	33.9	46.3
3	NO	2	44%	1.29	47.2	68.2
4	YES	2	44%	2.04	35.9	49.3
5	NO	3	44%	1.22	50.0	72.3
6	YES	3	44%	1.92	37.8	52.0
7	NO	1	55%	1.76	38.4	53.9
8	YES	1	55%	2.86	28.3	37.8
9	NO	2	55%	1.64	41.3	57.9
10	YES	2	55%	2.66	30.1	40.3
11	NO	3	55%	1.54	43.7	61.3
12	YES	3	55%	2.57	30.9	41.4
13	NO	1	77%	2.46	32.7	43.7
14	YES	1	77%	4.00	23.5	30.3
15	NO	2	77%	2.29	35.1	47.0
16	YES	2	77%	3.72	25.0	32.3
17	NO	3	77%	2.16	37.1	49.7
18	YES	3	77%	3.51	26.3	34.0

## 5.3 Samenvatting

### Pilot algenproductie systeem in kas in Bleiswijk

De kostprijs voor de algenproductie in de pilot faciliteit in Bleiswijk is €150,7/kg ds algen. De kostprijs wordt verminderd met 40% tot €93.5/kg ds algen wanneer het technisch mogelijke aantal bioreactoren in de kas wordt geïnstalleerd en daarmee het teeltoppervlak beter wordt benut (12 BR in plaats van 6 BR). De investeringskosten per l algen volume waren €38. De belangrijkste kostenposten zijn arbeid (ca. 50%) en afschrijvingen voor algensysteem en kas (ca. 35%).

Sinds de algenproductiesystemen in de kas in Bleiswijk geen commercieel systeem zijn, zijn de hier weergegeven kostprijzen niet representatief voor een grootschalige productie. Wel kunnen de gegevens als basis worden gebruikt om met behulp van een economisch model een analyse van een grootschalig commercieel systeem door te voeren.

### Grootschalig commercieel algenproductie systeem in een kas

Met behulp van het ontwikkelde het economische model wordt de kostprijs voor de algenproductie in een kas van 1 ha berekend op €26.3/kg ds algen. De belangrijkste kostenfactoren zijn afschrijvingen (ca. 40%), onderhoud (ca. 30%) en elektriciteit voor assimilatiebelichting (ca. 10%). Hieruit wordt duidelijk dat een goed ontworpen algen systeem belangrijk is voor de vermindering van de kostprijs per kg ds.

Variatie van diverse parameters laat zien dat de kostprijs per kg ds het meest gevoelig is voor de hoeveelheid algen productie die gerealiseerd kan worden. Indien geen assimilatiebelichting wordt toegepast, neemt de productie af en stijgt de kostprijs. Indien het in de toekomst mogelijk zou zijn om met een beter teeltmanagement minder teelten per jaar te realiseren, stijgt de productie en neemt de kostprijs af. Schaalvergroting naar 10 ha laat de kostprijs verder afnemen. De kostprijs is weinig gevoelig voor gebruik van energie, water en CO<sub>2</sub>.

## 6 Technisch en economisch perspectief algenteelt in Nederlandse kassen

Binnen het hier voorgestelde project werd kennis en strategisch inzicht op het gebied van algenteeltsystemen in kassen in de tuinbouw opgebouwd. Een proeffaciliteit voor algen in kassen werd opgericht bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk. In deze proeffaciliteit werden een jaar lang kengetallen van algenteelten gemeten. Daarnaast werd een economisch model ontwikkeld om in het potentieel van algenproductie in kassen voor tuinbouwondernemers in te schatten. Technische en economische resultaten leiden tot de conclusie dat algenproductie door tuinbouwondernemers in Nederland potentieel rendabel kan zijn in de toekomst.

### Technische aspecten:

- In 2013 zijn bij Wageningen UR Glastuinbouw in een kas in Bleiswijk vijf teelten met de alg *Chlorella sorokiniana* uitgevoerd.
- De gemiddelde teeltduur was ca. 50-70 dagen (8.5 weken).
- Een productie van in totaal 1.8 kg ds/m<sup>2</sup> oftewel 82.8 g/l zijn op jaarbasis geproduceerd. Deze getallen zijn gebaseerd op een benutting van het teeltoppervlak van 44%. Bij installatie van het technisch mogelijke aantal algenbioreactoren per teeltoppervlak in de kas in Bleiswijk, kan worden geconcludeerd dat ca. 3.6 kg ds algen per m<sup>2</sup> in 5-6 teelten per jaar praktisch haalbaar zijn.
- Er is verbeteringspotentiaal voor het teeltmanagement. Stress van algen moet worden voorkomen. Het blijkt dat schokken in CO<sub>2</sub>, pH en temperatuur gemakkelijk leidt tot clustering, aangroei en neerslag van algen.
- Uit experimenten bleek dat de pH in de range van 6.5 tot 9.5 pH weinig invloed had op de productie. Wel bleek een lage pH gemakkelijker aanslag te geven.
- Uit experimenten met de algendichtheid bleek dat een hogere dichtheid het systeem ook gevoeliger maakt voor aangroei. Er was onder de gegeven omstandigheden geen groeiverschil door verschillende dichtheden in de range van 2-4 g/l vast te stellen.
- Door beter teeltmanagement in de toekomst kan de productie beter worden afgestemd op de externe groeifactoren en kunnen daarmee naar verwachting grotere producties worden gehaald.
- Een aantal kengetallen werden verzameld, monitoring van licht, water, CO<sub>2</sub> en energie vond plaats.
- De lichtbenuttingsefficiëntie was gemeten met gemiddeld 0.32 g/mol, bij hogere oppervlaktebenutting door installatie van het technisch mogelijke aantal algenbioreactoren per teeltoppervlak in de kas in Bleiswijk zou deze boven de 0.6 g/mol uitkomen, bijna vergelijkbaar met een belichte tomatenteelt.
- De CO<sub>2</sub> efficiëntie was vastgesteld op 3.3 g ds/g CO<sub>2</sub>, een factor 20 hoger dan een belichte tomaat.
- De energie efficiëntie was met 0.9 g ds/MJ een factor 2 lager dan voor een belichte tomatenteelt. Bij hogere benutting van het teeltoppervlak zou deze vergelijkbaar zijn met een belichte tomatenteelt.
- De totale drogestof productie van algen was een factor 2 lager dan van een onbelichte tomatenteelt en een factor 3 lager dan van een belichte tomatenteelt. Door beter teeltmanagement kan naar verwachting ook in de algenteelt in de toekomst een hogere productie worden gehaald. De biomassa productie is uiteraard ook sterk afhankelijk van het soort algen.
- Het onderzoek was tot nu toe gericht op het vaststellen van groei en productie kengetallen in een kas in Nederland en de beïnvloeding van de biomassa productie door diverse groeifactoren. In de toekomst zal het onderzoek worden gericht op de specifieke productie van inhoudstoffen zoals kleurstoffen (astaxanthine). De in dit project opgebouwde kennis legt hiervoor de basis.

### Economische aspecten:

- De kostprijs voor de algenproductie in de pilot faciliteit in Bleiswijk is €150.7/kg ds algen. De kostprijs wordt verminderd met 40% tot €93.5/kg ds algen wanneer het technisch mogelijke aantal bioreactoren in de kas wordt geïnstalleerd en daarmee het teeltoppervlak beter wordt benut (12 bioreactoren in plaats van 6 bioreactoren).
- De totale jaarlijkse kosten voor afschrijving en flexibele kosten waren €38,849 voor een teeltsysteem van 2.7 m<sup>3</sup> volume op een teeltoppervlak van 144 m<sup>2</sup>. De kosten per m<sup>3</sup> algen volume waren €14,194 en per m<sup>2</sup> teeltoppervlak €270. De investeringskosten per l algen volume waren €38 voor de pilot faciliteit in Bleiswijk.
- De belangrijkste kostenposten zijn arbeid (ca. 50%) en afschrijvingen voor algensysteem en kas (ca. 35%).
- Sinds de algenproductiesystemen in de kas in Bleiswijk geen commercieel systeem zijn, zijn de hier weergegeven kostprijzen niet representatief voor een grootschalige productie. Wel kunnen de gegevens als basis worden gebruikt om met behulp van een economisch model een analyse van een grootschalig commercieel systeem door te voeren.
- Met behulp van het ontwikkelde het economische model wordt de kostprijs voor een grootschalige commerciële algenproductie in een kas van 1 ha berekend op €26.3/kg ds algen.
- De totale jaarlijkse kosten voor afschrijving en flexibele kosten voor een grootschalig algenteeltsysteem in een kas van 1 ha met een benuttingsefficiëntie van het teeltoppervlak van 77% wordt berekend op €922,956 voor een teeltsysteem van ca. 351 m<sup>3</sup> volume op een teeltoppervlak van 1 ha. De kosten per m<sup>3</sup> algen volume werden berekend op €2,637, vijf keer lager dan bij het pilotsysteem in Bleiswijk. De kosten per m<sup>2</sup> teeltoppervlak werden berekend op ca. €92, een factor drie lager dan bij het pilotsysteem in Bleiswijk. De investeringskosten per l algen volume zijn dan €10 voor het grootschalige systeem.
- De belangrijkste kostenfactoren zijn afschrijvingen (ca. 40%), onderhoud (ca. 30%) en elektriciteit voor assimilatiebelichting (ca. 10%). Hieruit wordt duidelijk dat een goed ontworpen algen systeem belangrijk is voor de vermindering van de kostprijs per kg ds.
- Variatie van diverse parameters laat zien dat de kostprijs per kg ds het meest gevoelig is voor de hoeveelheid algen productie die gerealiseerd kan worden. Indien geen assimilatiebelichting wordt toegepast, neemt de productie af en stijgt de kostprijs. Indien het in de toekomst mogelijk zou zijn om met een beter teeltmanagement minder teelten per jaar te realiseren, stijgt de productie en neemt de kostprijs af. Schaalvergroting naar 10 ha laat de kostprijs verder afnemen. De kostprijs is weinig gevoelig voor gebruik van energie, water en CO<sub>2</sub>.
- De kostprijs voor algen per kg ds is order van grootte vergelijkbaar met de kostprijs voor tomaat (Vermeulen, 2010). Indien een drogestofgehalte van 5% voor tomaat wordt verondersteld, is de kostprijs voor een cherry tomaat ca. €30/kg ds en voor een trostomaat ca. €13/kg ds.

Met het uitgevoerde onderzoek in 2013 werd een belangrijk stap naar mogelijke opschaling van algenproductie in de tuinbouw genomen. Het is aangetoond dat algenproductie in Nederlandse kassen technisch haalbaar is. Op dit moment kunnen 3.6 kg ds/m<sup>2</sup>/jaar met *Chlorella sorokiniana* direct gerealiseerd worden in een buisvormige bioreactor in een kas. Er zijn duidelijk verbeteringen door teelttechnische maatregelen mogelijk om de productie verder te verhogen. Er is door ophalen van gerealiseerde economische cijfers en scenario berekeningen aangetoond dat algenproductie in Nederlandse kassen ook economisch perspectief heeft. De huidige kostprijs voor de productie per kg droge stof algen in de systemen in Bleiswijk was ca. €93 per kg ds. Door opschaling van het systeem naar 1 ha wordt de installatie goedkoper, arbeid wordt effectiever door automatisering en daalt de kostprijs naar ca. €26 per kg ds.

In de toekomst zal het onderzoek niet alleen gericht zijn op de productie van biomassa, maar op de productie van hoogwaardige inhoudstoffen. Indien een alg per kg ds 2% kleurstof (astaxanthine) bevat zou de kostprijs ca. €1300 per kg ds kleurstof zijn in een grootschalige productie. Indien een alg per kg ds 5% kleurstof bevat zou de kostprijs naar €500 per kg ds kleurstof dalen, een realistische waarde op de markt.

## 7 Literatuur

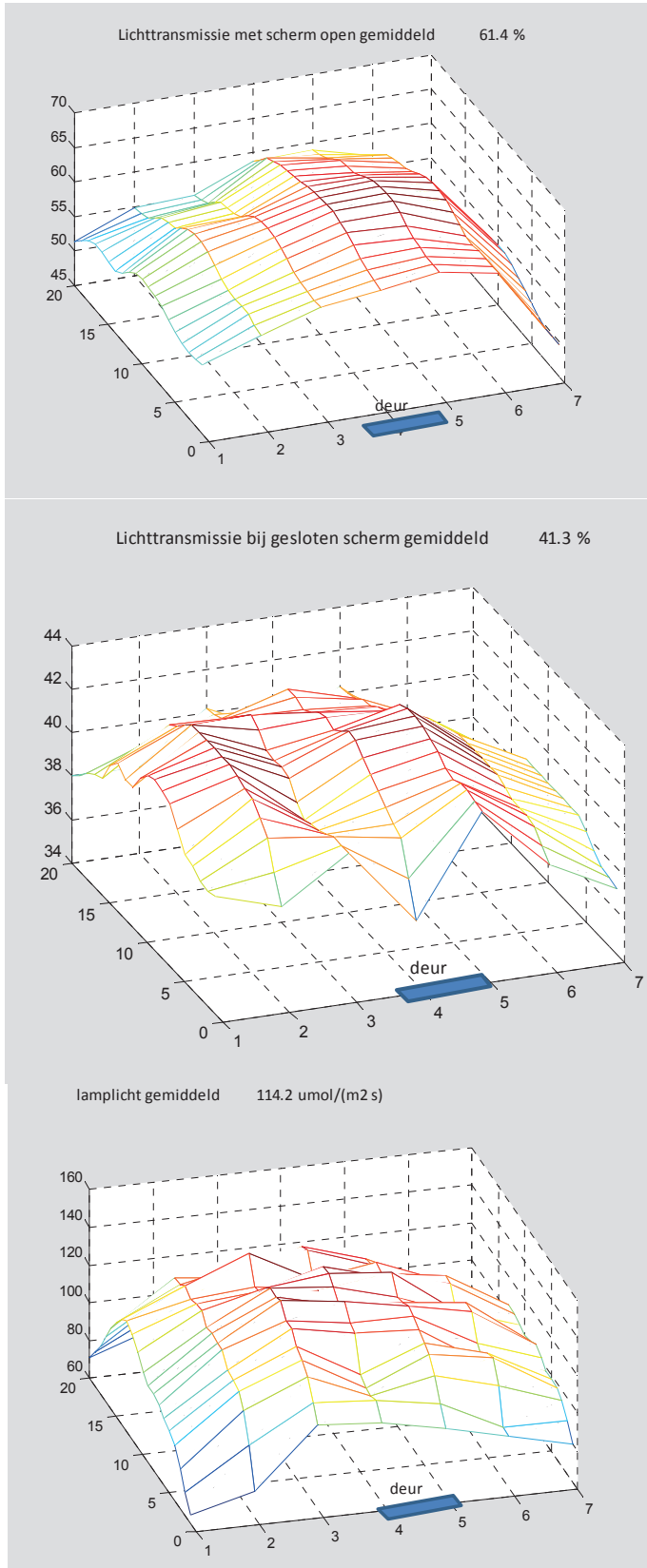
- Acién, F. G., Fernández, J. M., Magán, J. J., and Molina, E. (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances* 30, 1344-1353.
- Cuaresma Franco, M.C. (2011). Cultivation of microalgae in a high irradiance area. PhD Thesis, Wageningen University
- Hemming, S.; A. Sapounas; W. Voogt (2012).  
Algenteeltsystemen voor de tuinbouw -Integratie. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1221.
- Leijdekkers, C. M. M. 2013. Evaluation of algae production systems in Dutch greenhouses in practice. Wageningen: Wageningen University, MSc thesis Farm Technology Group.
- Mata, T. M., Martins, A. A., and Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 217-232.
- Matsukawa R, Hotta M, Masuda Y, Chihara M, Karube I. 2000. Antioxidants from carbon dioxide fixing *Chlorella sorokiniana*. *Journal of Applied Phycology* 12: 263-267.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., and Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production - A close look at the economics. *Biotechnology Advances* 29, 24-27.
- Rösch, C., and C. Posten. 2012. Challenges and Perspectives of Microalgae Production - introduction to the thematic focus - Schwerpunkt. *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 21(1):5-16.
- Slager, A. A., Sapounas, A. A., Van Henten, E., and Hemming, S. (2012). Feasibility study on combined production of algae and tomatoes in a Dutch greenhouse. *Acta Horticulturae*, Vol. 956, pp. 569-576.
- Slager, B. (2011). Feasibility of combined production of algae and tomatoes in a Dutch greenhouse, MSc thesis, Wageningen University.
- Sorokin C. 1959. Tabular comparative data for the low-temperature and high-temperature strains of *Chlorella*. *Nature* 184: 613-614.
- Stephens, E., I. L. Ross, and B. Hankamer. 2013. Expanding the microalgal industry-continuing controversy or compelling case? *Current opinion in chemical biology*.
- Tredici, M. R., Biondi, N., Ponis, E., Rodolfi, L., and Zittelli, G. C. (2009). "New technologies in aquaculture. Improving production efficiency, quality and environmental management. *Advances in microalgal culture for aquaculture feed and other uses*," Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK.
- Vermeulen, P. C. M. (2010). "Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2010." Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
- Wijffels, R. H., and Barbosa, M. J. (2010a). An outlook on microalgal biofuels. *Science* 330, 913.
- Wijffels, R. H., and Barbosa, M. J. (2010b). An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science* 329, 796-799.
- Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., and Eppink, M. H. M. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4, 287-295.





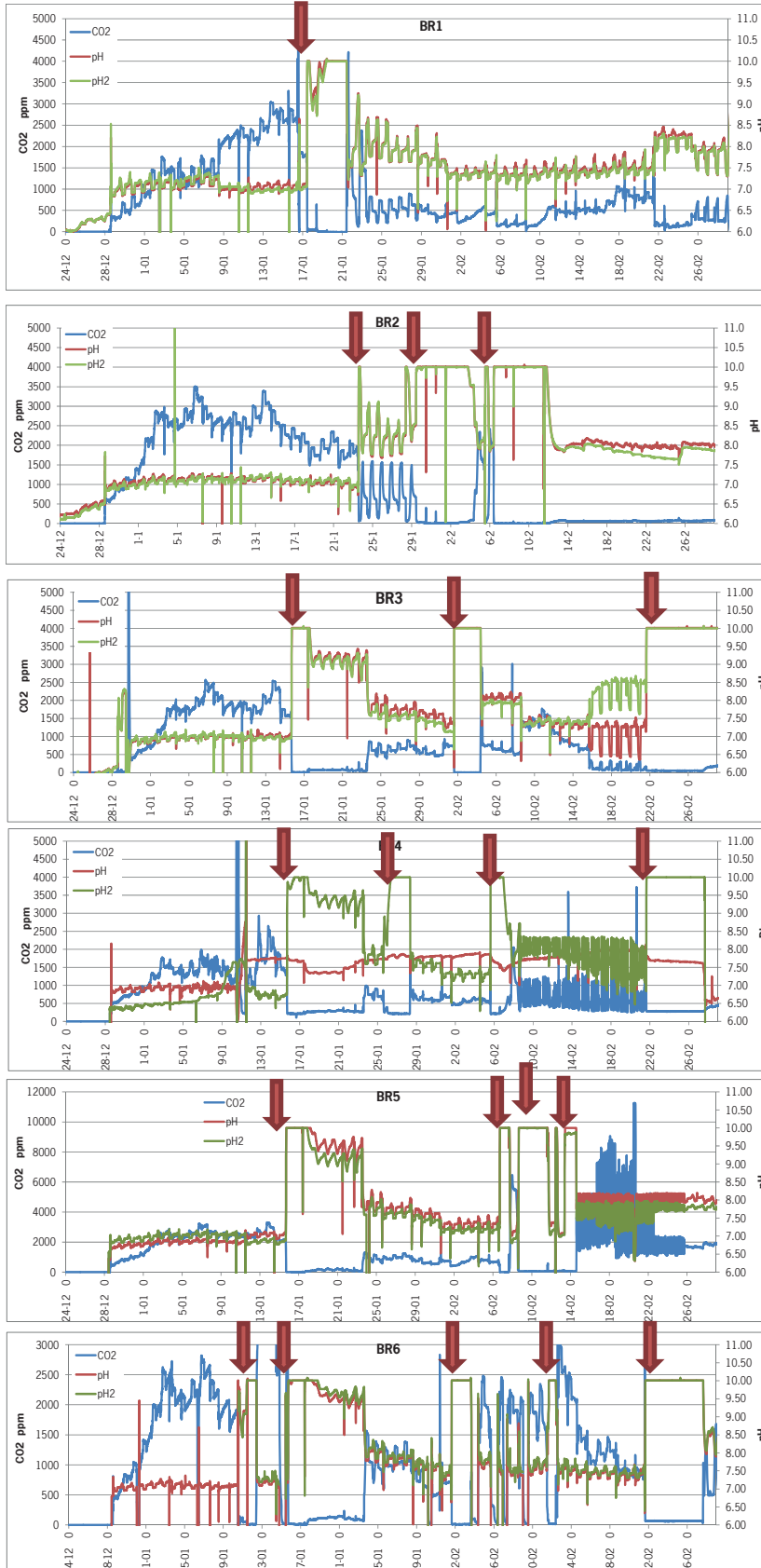
# Bijlage I Gemeten lichttransmissie in de kas met algenreactoren.

Resultaten van de gemeten lichttransmissie in de kas met algenreactoren (boven), in de kas met een volledig gesloten scherm (midden) en in de kas met assimilatiebelichting aan (onder).

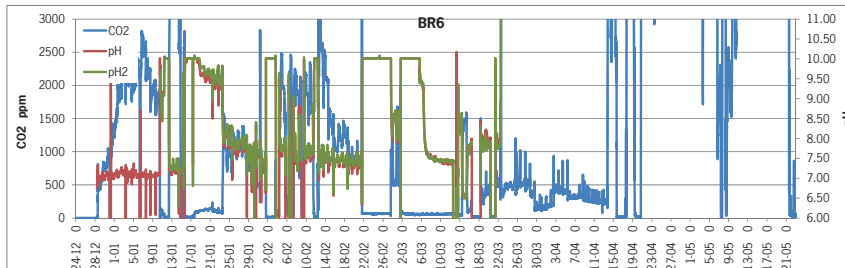
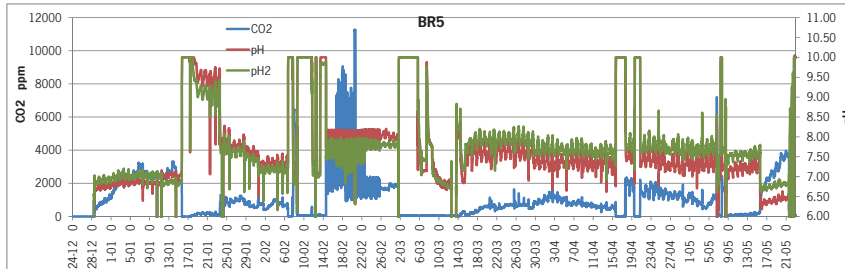
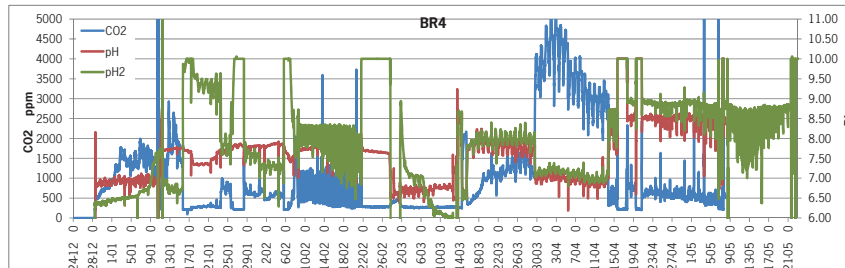
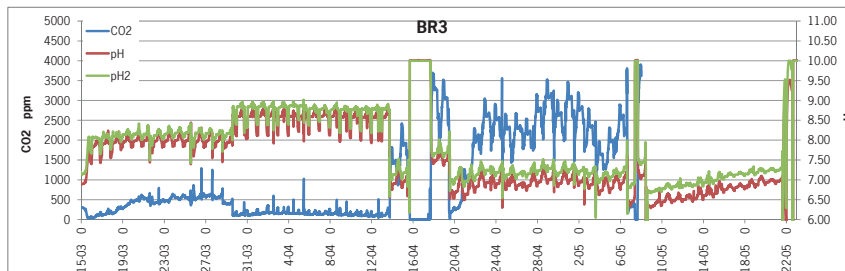
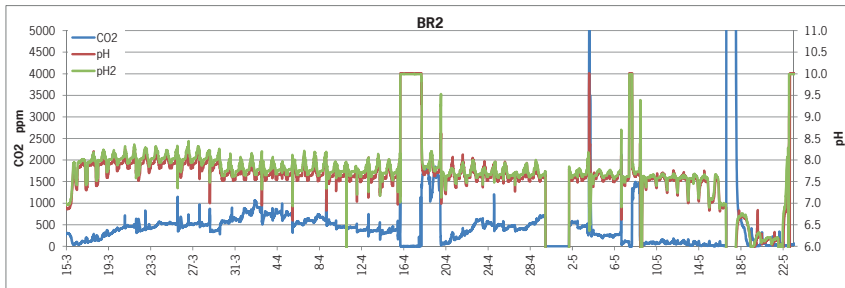
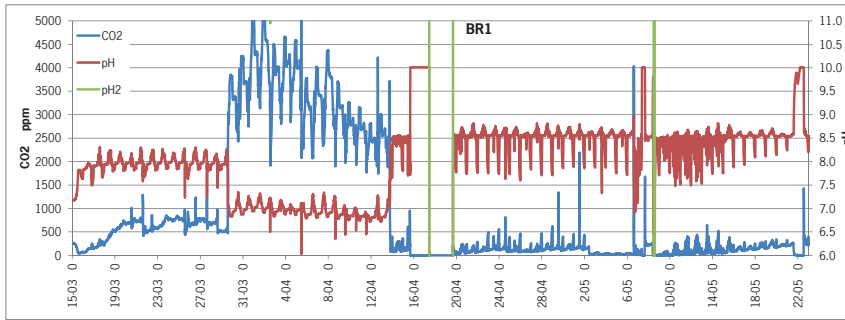


## Bijlage II pH en CO<sub>2</sub> in teelt 3

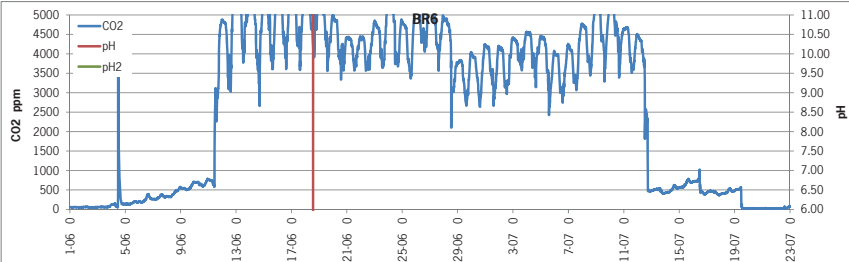
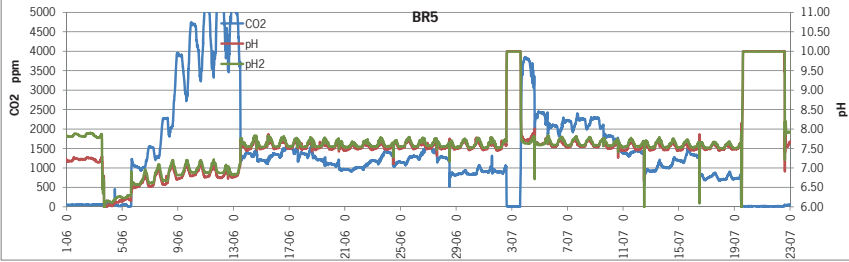
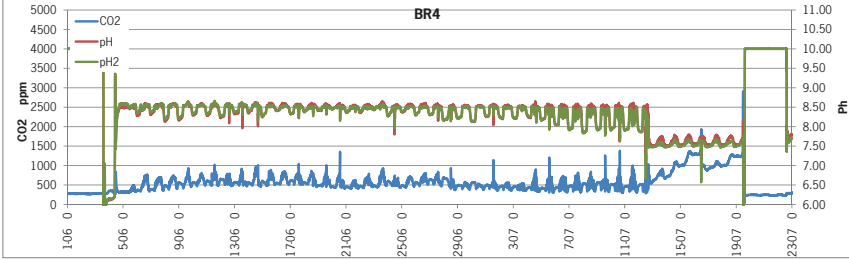
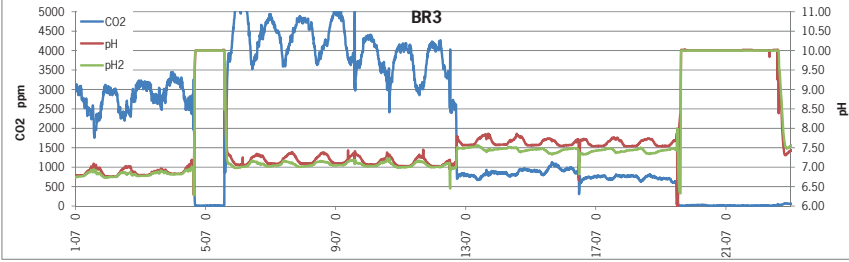
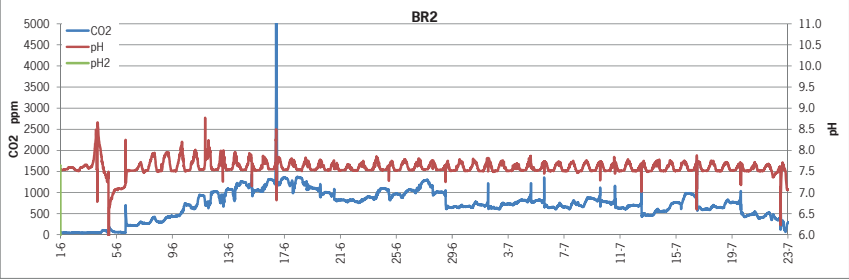
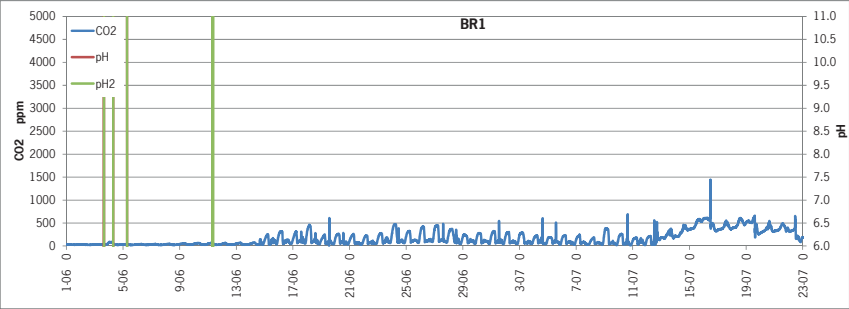
Gemeten pH (2 plaatsen) in de zes algenreactoren (BR1 t/m 6) en gemeten CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht van de buffertanks tijdens teelt 3. De rode pijlen zijn momenten dat er Baskal of kaliloog is toegevoegd.



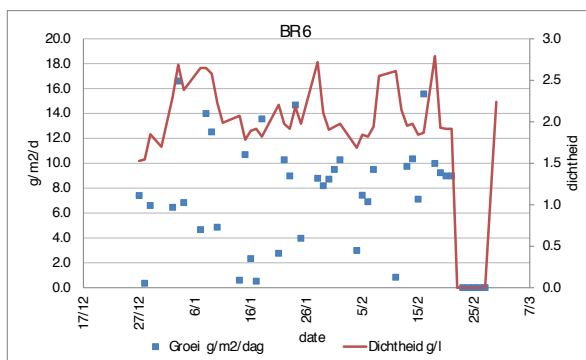
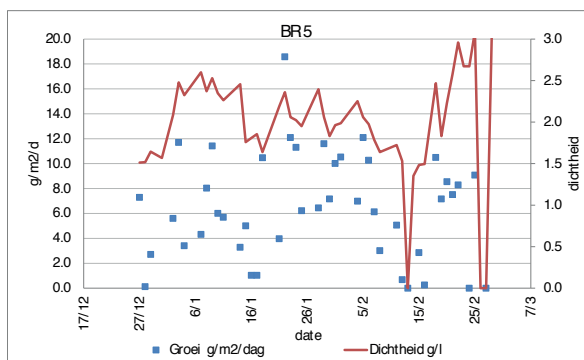
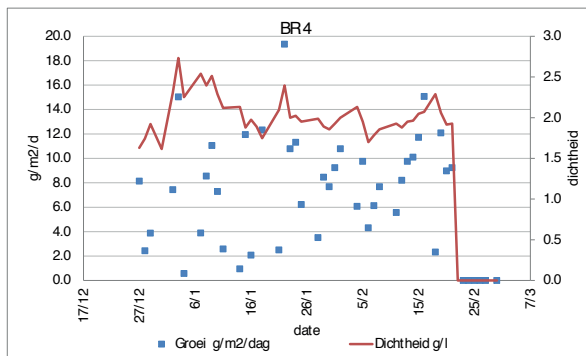
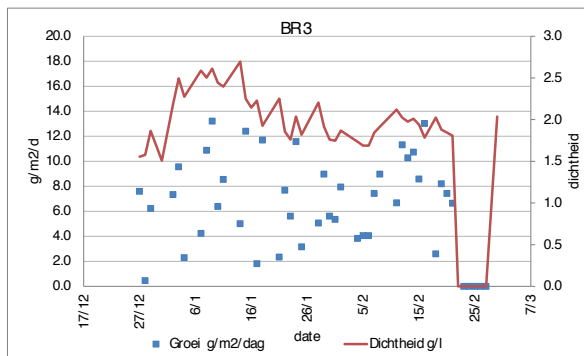
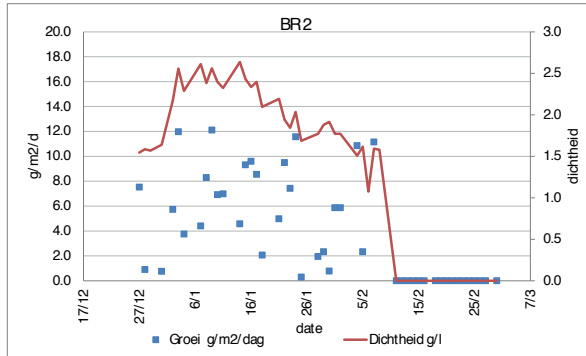
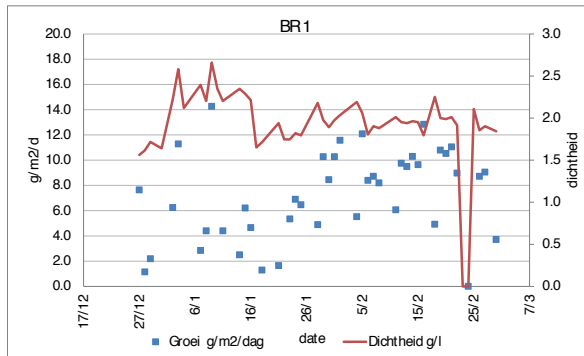
# Bijlage III pH en CO<sub>2</sub> in teelt 4



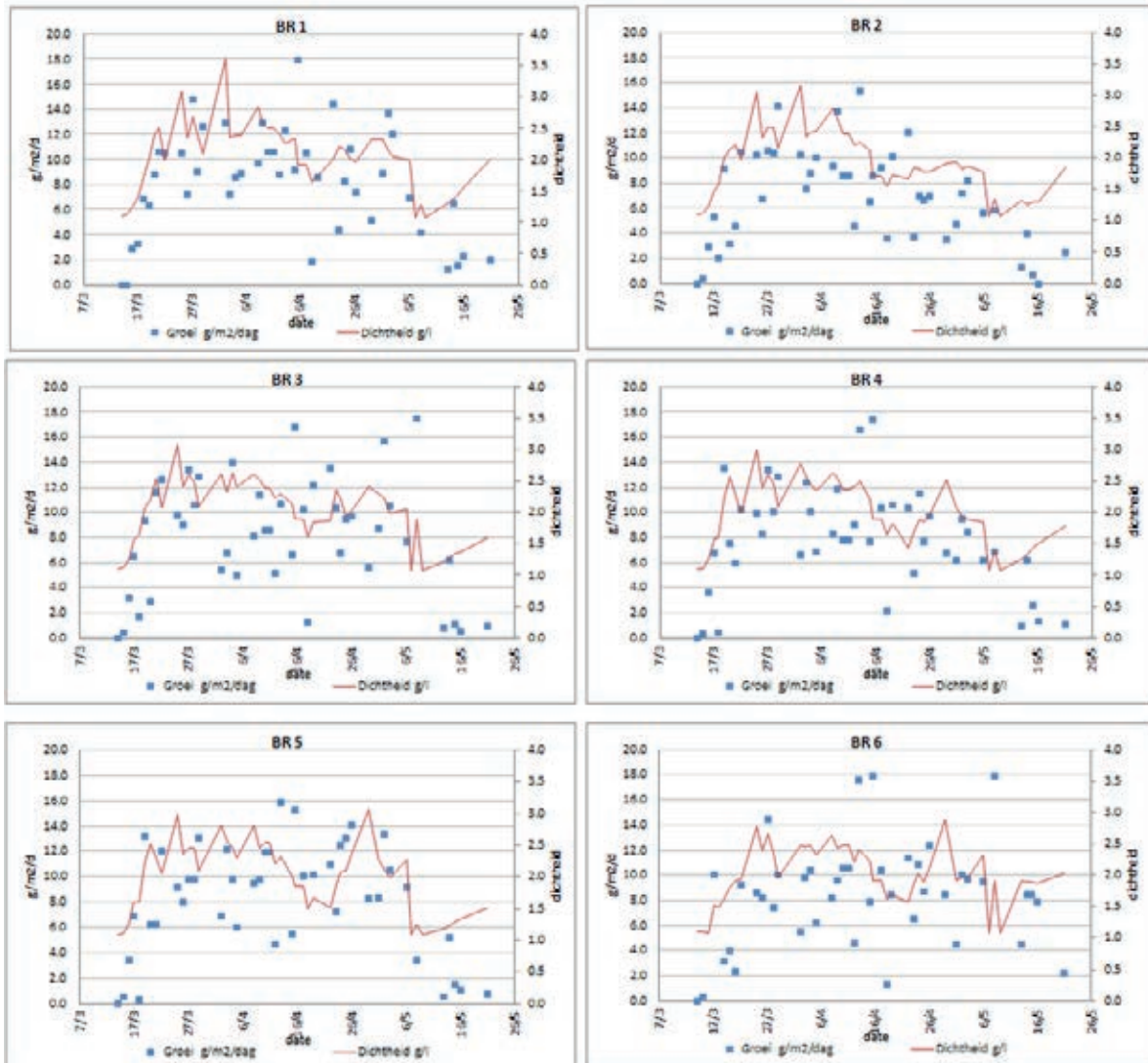
# Bijlage IV pH en CO<sub>2</sub> in teelt 5



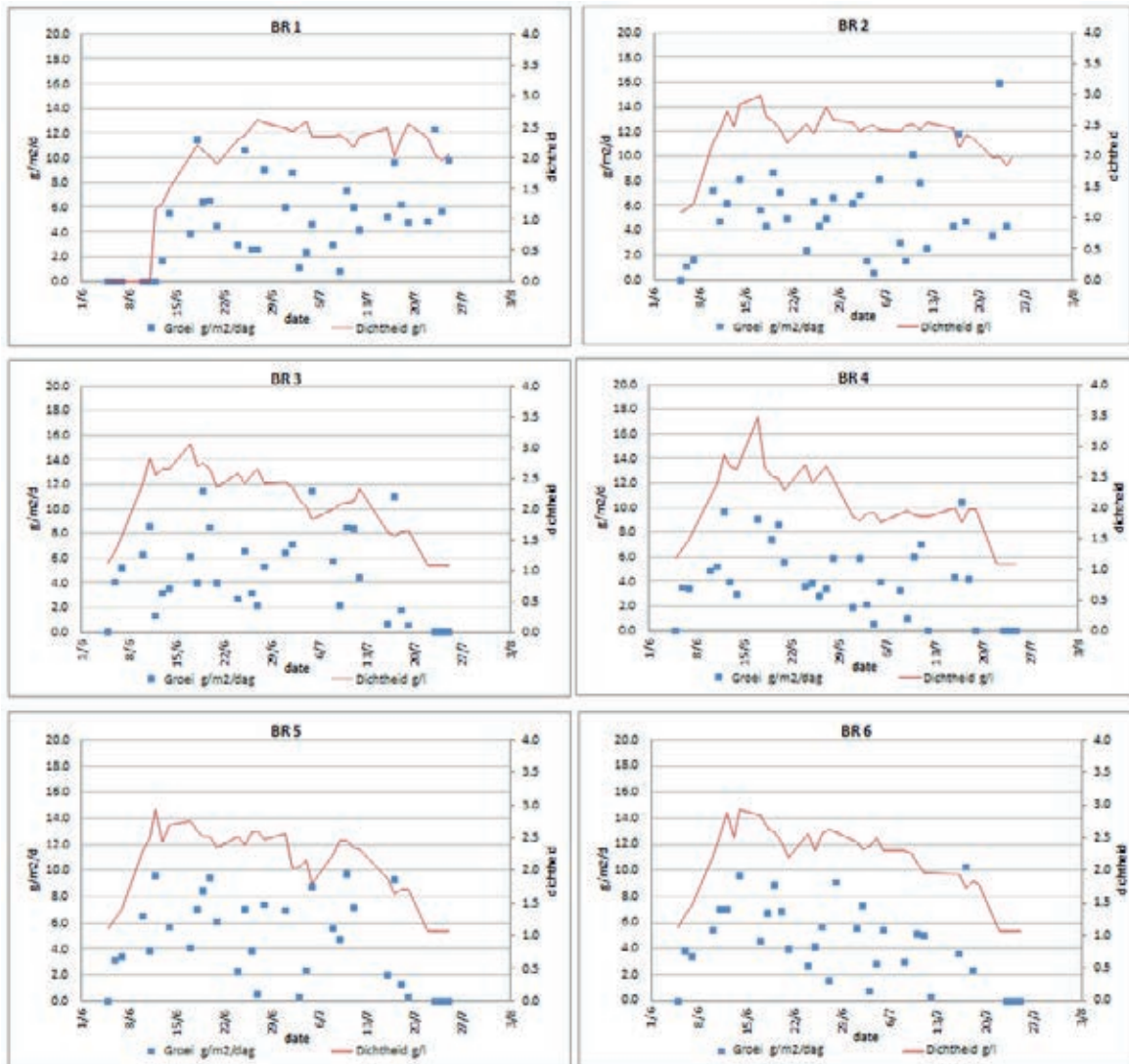
# Bijlage V Dichtheid en groei teelt 3



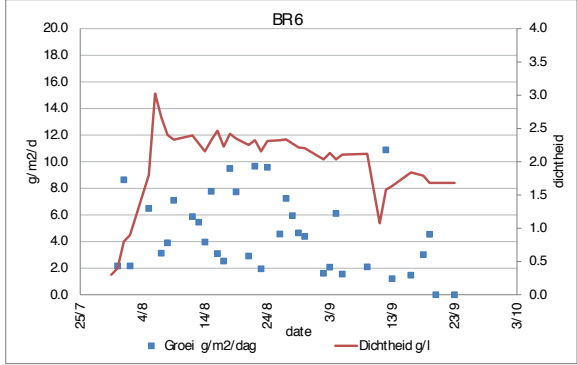
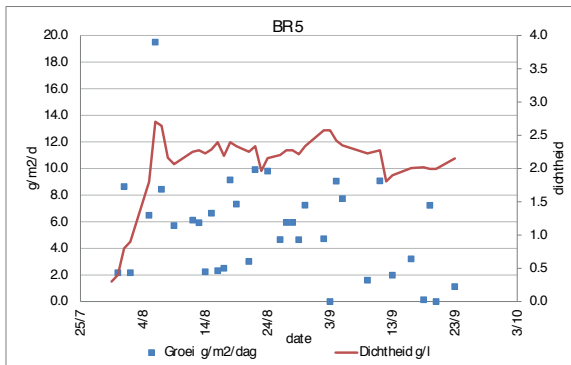
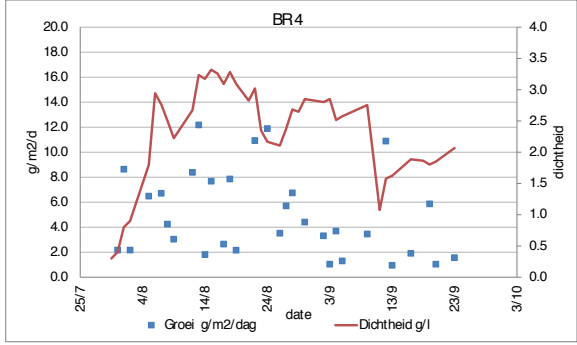
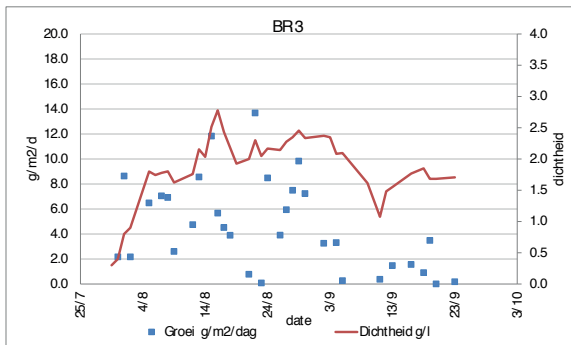
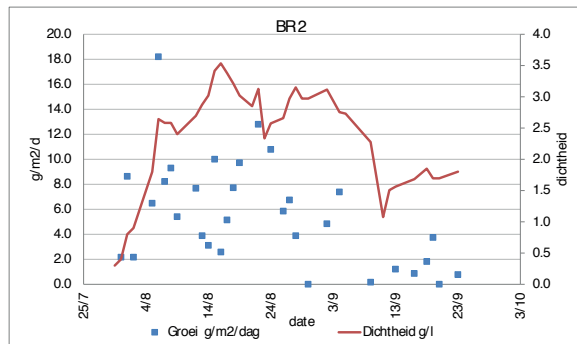
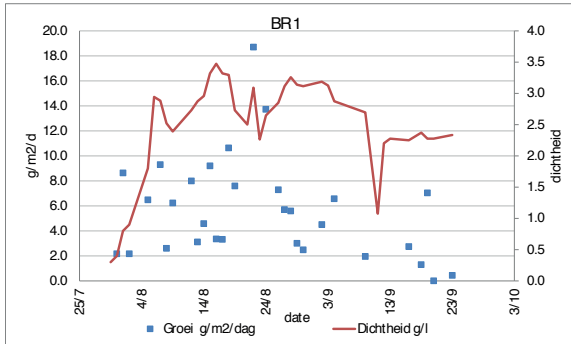
# Bijlage VI Dichtheid en groei teelt 4



## Bijlage VII Dichtheid en groei teelt 5

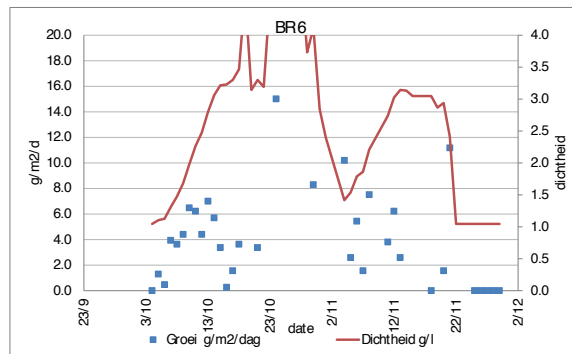
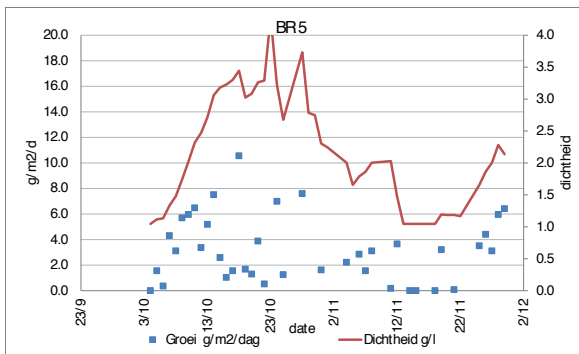
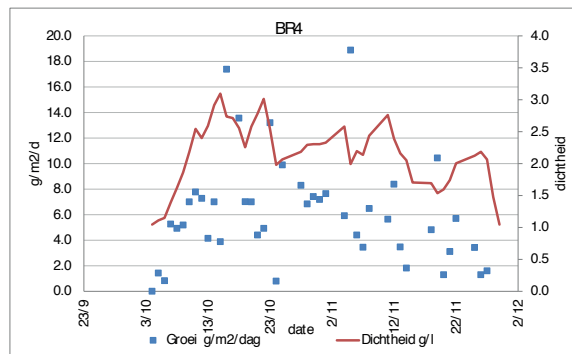
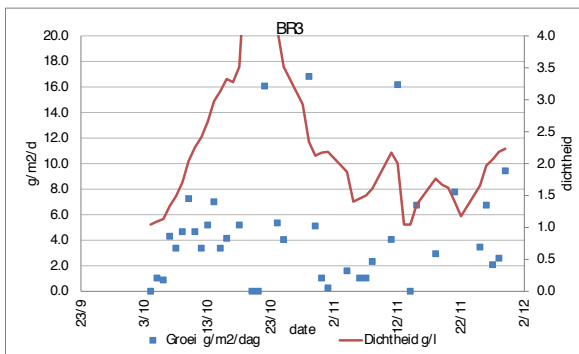
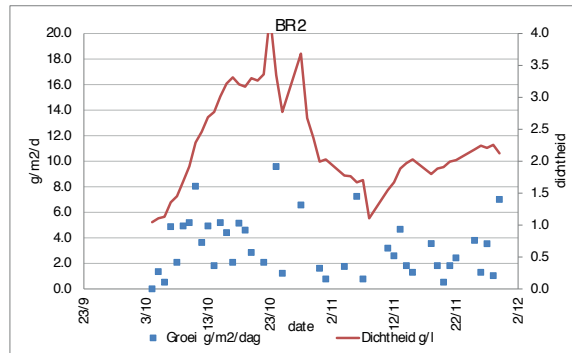
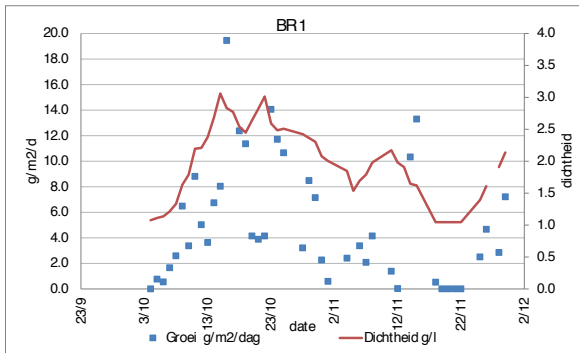


# Bijlage VIII Dichtheid en groei teelt 6.





# Bijlage IX Dichtheid en groei teelt 7



## Bijlage X Kengetallen licht, water, CO<sub>2</sub> en energiegebruik per algenteelt.

teelt 3	Licht-som	Water-verbruik	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektrici-teits-verbruik	light use efficiency	water use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency
BR	mol m <sup>-2</sup>	l m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	g ds g <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
1	663	191	83	51	0.58	2.0	4.7
2	663	145	60	51	0.43	2.0	4.7
3	663	181	57	51	0.57	2.1	6.6
4	663	172	73	51	0.54	2.1	4.9
5	663	186	80	51	0.77	2.8	6.4
6	663	190	87	51	0.62	2.2	4.7
teelt 4	Licht-som	Water-verbruik	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektrici-teits-verbruik	light use efficiency	water use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency
BR	mol m <sup>-2</sup>	l m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	g ds g <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
1	1485	268	178	61	0.40	2.2	3.3
2	1485	247	344	61	0.34	2.1	1.5
3	1485	257	209	61	0.38	2.2	2.7
4	1485	258	132	61	0.37	2.1	4.1
5	1485	264	250	61	0.38	2.1	2.3
6	1485	263	253	61	0.39	2.2	2.3
teelt 5	Licht-som	Water-verbruik	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektrici-teits-verbruik	light use efficiency	water use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency
BR	mol m <sup>-2</sup>	l m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	g ds g <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
1	1177	88	29	0	0.18	2.3	7.1
2	1177	113	53	0	0.21	2.2	4.7
3	1177	82	204	0	0.14	2.1	0.8
4	1177	74	38	0	0.13	2.0	3.9
5	1177	78	72	0	0.14	2.1	2.3
6	1177	74	143	0	0.13	2.1	1.1
teelt 6	Licht-som	Water-verbruik	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektrici-teits-verbruik	light use efficiency	water use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency
BR	mol m <sup>-2</sup>	l m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds l <sup>-1</sup>	g ds g <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub>
1	1018	86	67	0	0.23	2.7	3.5
2	1018	78	67	0	0.18	2.4	2.8

3	1018	90	60	0	0.17	1.9	2.8
4	1018	65	69	0	0.17	2.6	2.5
5	1018	94	68	0	0.21	2.3	3.1
6	1018	89	54	0	0.20	2.3	3.8
teelt 7	Licht-som	Water- verbruik	CO <sub>2</sub> verbruik	Elektrici- teits- verbruik	light use efficiency	water use efficiency	CO <sub>2</sub> use efficiency
	BR	mol m <sup>-2</sup>	l m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	kWh m <sup>-2</sup>	g ds mol <sup>-1</sup>	g ds l <sup>-1</sup>
1	709	114	47	69	0.42	2.6	6.3
2	709	59	54	69	0.28	3.4	3.7
3	709	87	72	69	0.43	3.5	4.2
4	709	121	18	69	0.41	2.4	15.7
5	709	69	49	69	0.29	3.0	4.3
6	709	84	45	69	0.44	3.7	6.9

## Bijlage XI Kengetallen licht, water, CO<sub>2</sub> en energiegebruik onbelichte en belichte tomatenteelt.

### Tomatenteelt onbelicht

maand	Productie (g ds/maand)	Lichtsom (mol/maand) (gewasniveau)	Verdamping (l/maand)	CO <sub>2</sub> dosering (kg/maand)*	Warmteverbruik (MJ/maand)	lichtbenutting (g ds/mol)	water efficiëntie (g ds/l verdamping)	CO <sub>2</sub> efficiëntie (g DS/g CO <sub>2</sub> )	energie efficiëntie (g ds/MJ)
jan	16	88	9	0.4	136	0.18	1.8	0.04	0.1
feb	80	158	20	0.7	119	0.51	4.0	0.12	0.7
mrt	364	488	49	1.9	113	0.75	7.5	0.19	3.2
apr	367	476	51	2.0	108	0.77	7.2	0.18	3.4
mei	655	913	91	3.7	65	0.72	7.2	0.18	10.1
jun	652	885	88	4.0	55	0.74	7.5	0.16	11.9
jul	624	963	108	4.5	31	0.65	5.8	0.14	20.1
aug	562	804	85	4.0	42	0.70	6.6	0.14	13.4
sep	376	538	57	2.9	60	0.70	6.6	0.13	6.3
okt	148	252	33	1.7	103	0.59	4.5	0.09	1.4
nov	26	129	23	0.7	124	0.20	1.1	0.04	0.2
dec	3	73	2	0.1	52	0.05	1.5	0.03	0.1
per jaar	3873	5768	615	26.5	1008	0.67	6.3	0.15	3.8

## Tomatenteelt belicht

maand	productie (g ds/maand)	lichtaanbod (mol/maand) (gewasniveau)	verdamping (l/maand)	CO <sub>2</sub> dosering (kg/maand) *	Warmteverbruik (MJ/ maand)	Elektriciteits- verbruik (kWh/maand)**	lichtbenutting (g ds/mol)	water efficiëntie (g ds/l verdamping)	CO <sub>2</sub> efficiëntie (g DS/gCO <sub>2</sub> )	energie efficiëntie (g ds/MJ)
jan	199	368	26	1.1	42	62	0.54	7.6	0.18	0.4
feb	339	398	41	1.6	42	52	0.85	8.2	0.21	0.7
mrt	486	566	57	2.6	68	46	0.86	8.5	0.19	1.1
apr	572	737	71	3.4	70	18	0.78	8.1	0.17	2.7
mei	547	753	76	3.6	87	0	0.73	7.2	0.15	6.3
jun	601	860	89	4.2	52	0	0.70	6.8	0.14	11.5
jul	639	977	108	4.3	20	0	0.65	5.9	0.15	32.5
aug	542	801	90	3.8	29	0	0.68	6.0	0.14	18.4
sep	343	483	55	3.0	60	0	0.71	6.3	0.11	5.7
okt	411	487	58	4.1	29	50	0.84	7.1	0.10	1.0
nov	250	314	36	2.4	26	49	0.80	6.9	0.10	0.6
dec	56	239	10	0.5	26	41	0.23	5.4	0.12	0.2
per jaar	4985	6983	718	34.6	551	317	0.71	6.9	0.14	1.6

\*(zuiver, max cap 100 kg/(ha/uur)

\*\* Belichting met 125 W elektrisch vermogen per m<sup>2</sup> per jaar, 2500 belichtingsuren





Productschap  Tuinbouw



**AlgaSpring**  **bosplant**

Kwekerij Kap  
Kwekerij Kieviet

**Bunnik Plants**  
VALUE ADDING GROWERS

*Newplant B.V.*



 **Samenwerken  
aan Vaardigheden**

**ocap**  
CD, voor de tuinbouw

 **LGem +GF+**

Georg Fischer



**Rabobank**



**Kansen  
voor West**  
G4P4 



DE SUBSIDIEREGELING CLUSTERPROJECTEN IS MEDE  
GEFINANCIERD MET STEUN VAN HET EUROPEES FONDS  
VOOR REGIONALE ONTWIKKELING VAN DE EUROPESE  
COMMISSIE.

