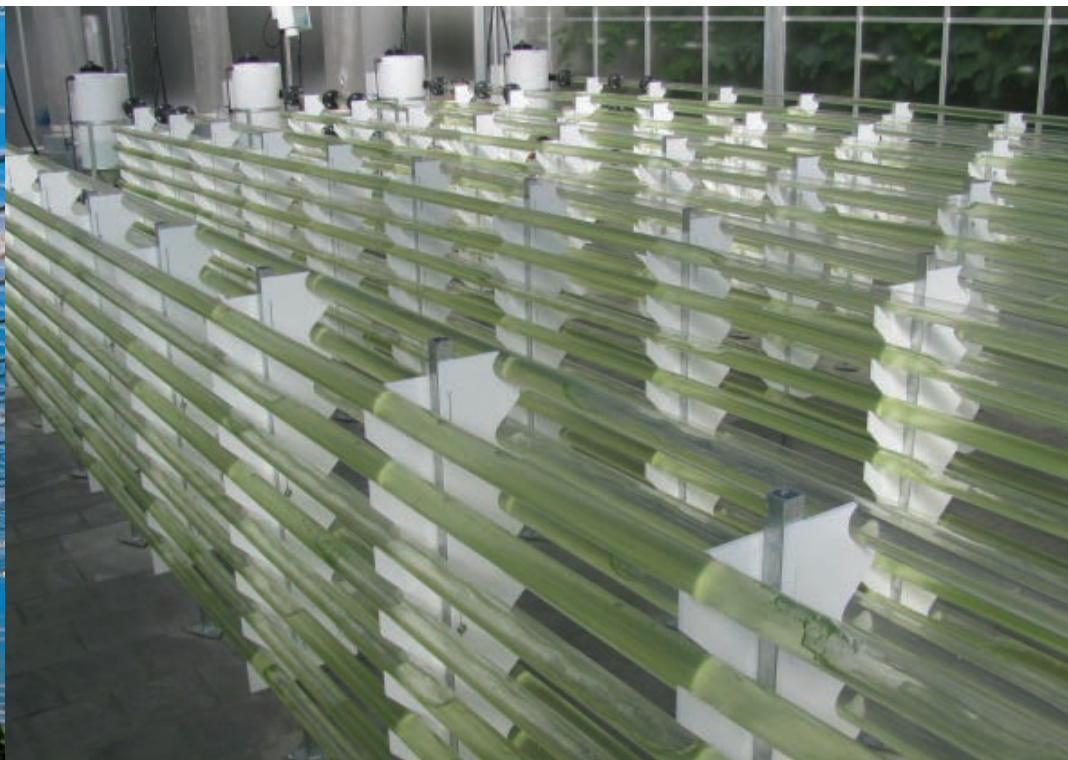




Algenteeltsystemen voor de tuinbouw

Integratie

Silke Hemming¹, Athanasios Sapounas¹, Wim Voogt¹ ¹ Wageningen UR Glastuinbouw



Referaat

De productie van algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Uit algen kunnen hoogwaardige producten worden gemaakt zoals voer voor vissen en mosselen, of stoffen als voedingssupplementen, eiwitten, vetzuren, pigmenten en antioxidanten. Algen kunnen worden geteeld in 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, CO₂ 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, CO₂ 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 CO₂ voorziening. Er zijn synergie-effecten tussen gewas- en algenproductie op een tuinbouwbedrijf.

In dit project wordt met behulp van modelberekeningen, metingen in algensystem en op tuinbouwbedrijven en het opzetten van een nieuwe proeffaciliteit voor algen in de tuinbouw strategisch inzicht verkregen naar een geschikt teeltsysteem voor de teelt van hoogwaardige algen in combinatie met tuinbouwproductie in de toekomst.

Trefwoorden: algen, tuinbouw, integratie, modellen, experimenten, praktijkmetingen, klimaat, groei

Abstract EN

The production of algae provides perspective for Dutch horticultural entrepreneurs. Quality products from algae can be made such as feed for fish and mussels, or substances for dietary supplements, proteins, fatty acids, pigments and antioxidants. Algae can be grown in combination with traditional horticultural crops, but could also be an alternative crop for growers. The agreements of algae cultivation systems with production systems for horticultural crops are large from a systems design point of view: algae need light, water and nutrients, CO₂ and an optimal climate to grow with good quality. Horticultural entrepreneurs have a lot of experience to control the growing conditions of their current crop in an optimum way, they have experience with CO₂ dosing, water and nutrient supply and water treatment systems. It is obvious to use this experience for the cultivation of algae. They know how to grow crops in a sustainable way. Their company also has the infrastructure for energy, water and CO₂ supply. There are synergies between plant and algal production in greenhouses. In this project strategic insight into suitable cultivation systems for growing algae in combination with high quality horticultural production is obtained by using model calculations, measurements in algal system at commercial growers and setting up a new test facility for algae in horticulture.

Keywords: algae, horticulture, integration, models, experiments, field measurements, climate, growth



© 2012 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1
: 6708 PD Wageningen
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Woord vooraf	5
1	Inleiding	7
2	Bestaande kennis	9
	2.1 Microalgae organisms	9
	2.2 Growth factors and productivity of microalgae	9
	2.3 Algae production systems	10
	2.3.1 Closed photobioreactor systems	11
	2.3.2 Open raceway pond system	12
	2.4 Products from microalgae and algae market	12
	2.4.1 Microalgae for aquaculture feed	14
	2.4.2 Microalgae as dietary supplements, animal feed and nutraceuticals	14
	2.4.3 High-value molecules from microalgae	15
	2.5 Economy of microalgae production	19
3	Materialen en methodes	21
	3.1 Werkwijze project	21
	3.2 Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers	21
	3.3 Modellen algenteelssystemen in kassen	22
	3.3.1 TomAlgS integraal model algenteelssystemen en tomatenproductie	22
	3.3.2 RAYPRO model lichtonderschepping, temperatuur en algenproductie	26
	3.4 Metingen algenteelssystemen op tuinbouwbedrijven	30
	3.4.1 Horizontale buisvormige fotobioreactor	31
	3.4.2 Raceway pond systeem	33
	3.5 Experimentele algenteelssystemen in een kas	35
	3.5.1 Kasuitrusting en regeling	35
	3.5.2 Algenbioreactoren en regeling	36
	3.5.3 Meetsysteem en data-acquisitie	37
	3.5.4 Algensoort en opkweek	38
	3.5.5 Algenoogst en biomassaproductie	39
4	Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers	41
	4.1 Algenteelstelsysteem Lans, Maasdijk	41
	4.2 Algenteelstelsysteem Newplant, De Lier	42
	4.3 Algenteelstelsysteem Bosplant, 's Gravenzande	43
	4.4 Algenteelstelsysteem Hydro Huisman, Bergerden	44
	4.5 Algenteelssystemen Algae Parc, Wageningen	45
	4.6 Algenteelssystemen LGem, Den Haag	46
	4.7 Sterktes en zwaktes algenteelssystemen bij tuinbouwondernemers	47
5	Modellen algenteelssystemen in kassen	51
	5.1 TomAlgS integraal model algenteelssystemen en tomatenproductie	51
	5.1.1 Algen productiviteit TomAlgS model	51
	5.1.2 Economische resultaten TomAlgS model	54
	5.1.3 Conclusies TomAlgS model	60
	5.2 RAYPRO model lichtonderschepping, temperatuur en algenproductie	60

	5.2.1	Lichtonderschepping in horizontale en verticale algenreactoren	60
	5.2.2	Temperatuur in horizontale en verticale algenreactoren	65
	5.2.3	Algengroei in horizontale en verticale algenreactoren	71
5.3		Energieverbruik	79
	5.3.1	Energieverbruik in horizontale algenreactoren	79
	5.3.2	Energieverbruik in verticale algenreactoren	83
	5.3.3	Energieverbruik in een race way pond systeem	83
6		Metingen algenteeltsystemen bij tuinbouwondernemers	85
	6.1	Metingen fotobioreactor Newplant	85
	6.2	Metingen racewaypond Bosplant	87
7		Experimenten algenteeltsystemen in een kas	91
	7.1	Start-teelt algen in Bleiswijk	91
	7.2	Vervolg-teelt algen in Bleiswijk	92
	7.3	Resultaten algenvoeding	94
	7.4	Resultaten reinigen algenbioreactoren	96
8		Integratie resultaten en conclusies	99
9		Aanbevelingen voor vervolg	103
10		Literatuur	105
Bijlage I		Voedingsoplossingen <i>Chlorella sorokiniana</i> uit literatuur	109
Bijlage II		Receptuur voedingsoplossingen voor experimenten met <i>Chlorella sorokiniana</i> in Bleiswijk	111

Woord vooraf

De productie van algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Uit algen kunnen hoogwaardige producten worden gemaakt zoals voer voor vissen en mosselen, of stoffen als voedingssupplementen, eiwitten, vetzuren, pigmenten en antioxidanten. 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 ontwerpoogpunt groot: algen hebben licht, water en nutriënten, CO₂ 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, CO₂ 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 CO₂ voorziening. Het is aannemelijk dat er synergie-effecten zijn tussen gewas- en algenproductie op een tuinbouwbedrijf. Het project beoogt strategisch inzicht en levert achtergrondkennis op het gebied van algenteeltsystemen in combinatie met tuinbouwproductie.

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. Het project is verder mede-gefinancierd door "Samenwerking aan Vaardigheden", George Fischer, LGem, OCAP en Rabobank.

1 Inleiding

De productie van algen biedt perspectief voor Nederlandse tuinbouwondernemers. Uit algen kunnen hoogwaardige producten worden gemaakt zoals voer voor vissen en mosselen, of stoffen als voedingssupplementen, eiwitten, vetzuren, pigmenten en antioxidanten. 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 ontwerpogpunt groot: algen hebben licht, water en nutriënten, CO₂ 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, CO₂ 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 CO₂ 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 zal ook gelden voor het ontwerp van algenteeltsystemen op een tuinbouwbedrijf.

Zo is het nodig om modellen van algenteeltsystemen in combinatie met tuinbouwproductie op te zetten. Met behulp van deze modellen kunnen dan bestaande algenteeltsystemen van telers kwantitatief worden geanalyseerd, knelpunten geïdentificeerd en nieuwe oplossingen aangedragen. Modellen kunnen worden gebruikt om de beslissing van tuinbouwondernemers over toekomstige investeringen in algenteeltsystemen te ondersteunen. Zij kunnen ook worden gebruikt als ontwerptool voor nieuwe algenteeltsystemen in de tuinbouw. Het verzamelen van kwantitatieve data van algenteeltsystemen op tuinbouwbedrijven is noodzakelijk. Deze data is nodig om modellen te valideren en om telers van informatie over hun systemen te voorzien. Daarnaast hebben telers behoefte aan een experimentele opstelling voor algen in de tuinbouw zodat hun praktische vragen over de teelt van algen in een kas kunnen worden beantwoord. Wageningen UR Glastuinbouw heeft binnen dit hier omschreven project modellen ontwikkeld, meetdata bij tuinders verzameld en een experimentele proefopstelling van algen systemen in een kas gerealiseerd op hun locatie in Bleiswijk. Hiermee wordt het proces van ontwerpen van toekomstige systemen voor tuinbouwondernemers ondersteund.

De Nederlandse tuinbouw heeft zijn huidige positie kunnen opbouwen door innovatieve ondernemers met een goede marktkennis. Actieve kennisuitwisseling van telers onderling en kennisuitwisseling tussen telers, toeleveranciers, voorlichters en het onderzoek hebben een grote bijdrage aan de huidige sterke positie van de Nederlandse tuinbouw. Bijeenkomsten van ondernemers en onderzoekers bevorderen de onderlinge kennisuitwisseling, het delen van eigen ervaringen en onderzoeksresultaten.

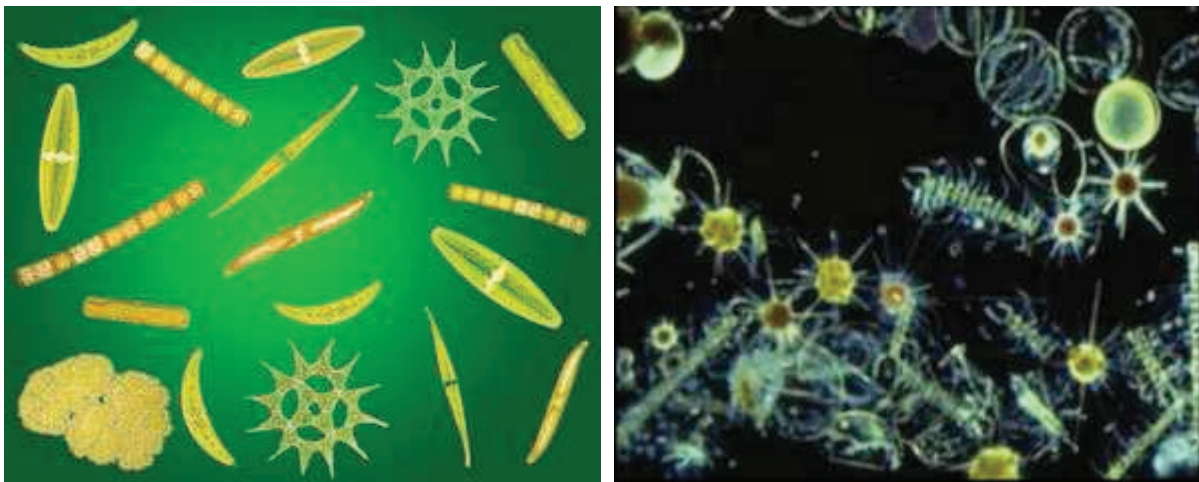
Kennisuitwisseling was daarom ook een essentieel onderdeel van het hier gepresenteerde project. Met een groep van negen ondernemers werden intensieve discussies gevoerd en werd informatie onderling uitgewisseld in regelmatige bijeenkomsten.

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, CO₂ 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 Microalgae organisms

Microalgae are prokaryotic or eukaryotic photosynthetic microorganisms that can grow rapidly and live in harsh conditions due to their unicellular or simple multicellular structure (Mata *et al.* 2010). Examples of prokaryotic microorganisms are Cyanobacteria (Cyanophyceae) and examples for eukaryotic microalgae are green algae (Chlorophyta) and diatoms (Bacillariophyta). Microalgae are present in all existing earth ecosystems, not just aquatic but also terrestrial, representing a big variety of species living in a wide range of environmental conditions. It is estimated that more than 50,000 species exist, but only a limited number, of around 30,000, have been studied and analysed (Figuur 1.). During the past decades extensive collections of microalgae have been created by researchers in different countries. An example is the freshwater microalgae collection of University of Coimbra (Portugal) considered one of the world's largest, having more than 4000 strains and 1000 species. This collection attests to the large variety of different microalgae available to be selected for use in a broad diversity of applications, such as value added products for chemicals, pharmaceutical purposes, food crops for human consumption and as energy source.



Figuur 1. Morphology of different algae species.

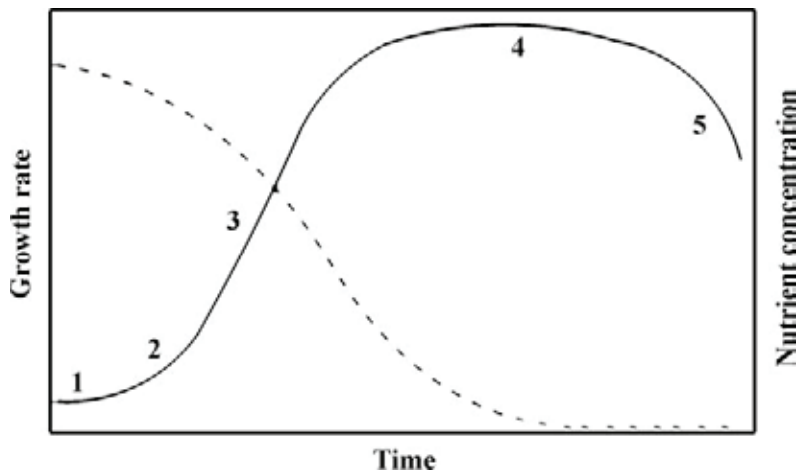
2.2 Growth factors and productivity of microalgae

Microalgae reproduce themselves using photosynthesis to convert sun energy into chemical energy, completing an entire growth cycle every few hours or days. They live in water, require sunlight, CO₂ and nutrients for growth (Barbosa, 2003; Beal *et al.* 2011; Singh and Olsen, 2011). Figuur 2. represents a typical algae growth curve in a batch culture (solid line) and nutrients concentration (dashed line), where five reasonably well defined growth phases can be recognized: (1) lag phase; (2) exponential growth phase, representing the maximum growth rate under the specific conditions; (3) linear growth phase; (4) stationary growth phase; (5) decline or death phase.

Optimum growth conditions differ per algae species. Important parameters for algae production are light, temperature, pH, mixing grade, salinity, and nutrients (Lavens and Sorgeloos, 1996). The biomass concentration in the photobioreactor influences the light intensity through self-shading. The higher the concentration, the less light can reach all the algae cells for a photosynthetic reaction, so the productivity of the system decreases. As a rule of thumb most algae know a temperature optimum between 20-30 °C, most species do not grow below 5 °C and above 35 °C. The optimal pH range depends on the algae species, but for most cultured algal species it is between 7 and 9 (Lavens and Sorgeloos, 1996). Culture can collapse due to the disruption of many cellular processes can result from a failing to maintain an acceptable pH. The latter is accomplished by aerating the culture. In the case of high-density algal culture, the addition of CO₂ allows to correct for increased pH, which may reach limiting values of up to pH 9 during algal growth (Lavens and Sorgeloos,

1996). CO₂ injection decreases the pH level. Algae production can be increased by increasing the CO₂ concentration in the water (Chiu *et al.* 2009). To provide more CO₂ than available in air, pure CO₂ has to be injected in the systems. Algae produces O₂ during photosynthetic activity. Degassing of the produced O₂ of the algae is important to prevent too high concentrations dissolved oxygen (DO₂) in the algae water. High O₂ concentrations reduce the algal productivity (Norsker *et al.* 2011a). Mixing of algae culture is required for turbulence in the system. In this way all algae are exposed to light, and nutrients, and CO₂ are mixed with the water. Mixing also prevents sedimentation of algae on the bottom. Stress conditions for algae are nutrient deprivation, high light intensities, and too high concentrations of O₂, too low ph. This leads to a decrease in growth rate and a consequent decrease in productivity (Wijffels and Barbosa, 2010b).

Microalgae are potentially the most efficient photosynthetic known organisms with very high growth rates, which in some species might represent a three-fold increase in biomass in 24 hours (Richmond 2004). However, also unrealistic estimates were published regarding the productivity of algae, sometimes these figures were even higher than theoretically possible, leading to unrealistic expectations. Wijffels *et al.* (Wijffels *et al.* 2010) explain that realistic estimates are in the order of magnitude of 40 - 80 t DM/ha/year, depending on the technology and location. But still most figures are based on results from lab-scale systems or conditions, little data is available of large-scale production. Often it is unclear what systems and conditions are used to come to figures for productivity (Beveren, 2011).



Figuur 2. Schematic representation of a typical algae growth curve in batch culture (solid line) and nutrients concentration (dashed line) (Mata *et al.* 2010).

2.3 Algae production systems

Systems for algae production can roughly be divided in two groups: open and closed systems. Open systems are pond-like systems open to the environment. Closed systems consist of tubes or panels in which the algae are produced, isolated from the environment. Systems have to provide good growing conditions for an algae monoculture like:

- Optimum light conditions to all algae.
- Temperature within optimal range.
- Adequate mixing of the culture. This can be achieved by a turbulent flow in order to get a homogeneous distribution of algae culture, nutrients, and temperature. In this way all the algae are exposed to light in the reactor. Mixing also prevents unwanted algae settling to surfaces.
- Enough CO₂ in the water for photosynthesis.
- Need for degassing to remove O₂ from photosynthesis and to prevent O₂ saturation.
- Optimum pH range.

The main differences between an open and closed algae production system are given in Tabel 1.

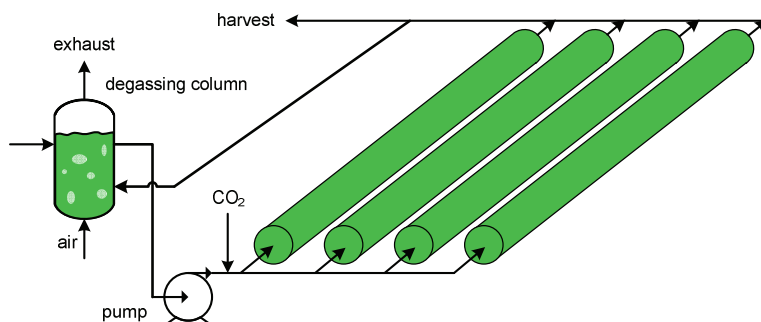
Table 1. General comparison of open and closed algae production systems.

Parameter	Closed photobioreactor	Open Raceway pond
Biomass concentration	high	low
Evaporation	low	high
Investment costs	high	low
Illumination A/V ratio	high	low
System conditions	controlled	uncontrolled
Energy required for harvesting	low	high
Running costs	high	low
Risk for incubation of other algae	low	high
Degassing O ₂	difficult	easy
Effective CO ₂ injection	easy	difficult

2.3.1 Closed photobioreactor systems

In a tubular photobioreactor system (PBR) microalgae are circulated through transparent tubes by a centrifugal pump (Figuur 3.). The PBRs are generally made from polyethylene, acrylic or glass which increases the investment costs (Brentner *et al.* 2011). The pump must produce enough liquid velocity in order to create a turbulent flow. Turbulent flow is required to mix the algae cells between illuminated and darker zones in the middle of the tube (Norsker *et al.* 2011a), for a homogenous mixture of nutrients and CO₂, and prevent algae settling on the bottom of the tubes. The algae stream pass a degassing unit that blows of the accumulated O₂ using an air stream. PBRs can cultivate more algal species compared to RWP and because of their heat retaining capabilities they can produce for longer periods in temperate climates (Alabi *et al.* 2009). Closed PBRs can achieve higher algae densities, higher productivity, and lower risk for contamination than open systems (Batan *et al.* 2010). On the other hand, in general more energy is needed for mixing and cooling in a closed PBR. PBRs are also technically more complex to build and more difficult to manage (Lardon *et al.* 2009; Wijffels and Barbosa, 2010b). The algae culture in a PBR can be overheated on sunny days and pumping and mixing can damage the algae culture of some fragile species (Alabi *et al.* 2009). Cooling of the algae is mostly done by evaporative cooling with sprinklers (Lundquist *et al.* 2010). Effect of cooling by sprinklers depends of tube diameter, filling rate of algae in tubes, heat transmission coefficient of tube material, capacity of sprinkler and the humidity in the greenhouse. Degassing stations are needed for the removal of produced O₂. This can be a design limitation and is a cost factor. CO₂ is used efficiently in closed systems, because the injected CO₂ cannot escape into open air (Lundquist *et al.* 2010).

Closed systems have potentially higher productivity and better control, but construction is complex and both construction and running costs are high. Besides that gradients for nutrients, CO₂ and O₂ exist within the system (Luque, 2010; Norsker *et al.* 2011b; Pulz, 2001). Especially closed systems are in need of further development to allow scaling up, increase light-use efficiency and decrease energy consumption mainly related to pumping and harvesting (Barbosa, 2003; Wijffels *et al.* 2010). The practical maximal photosynthetic efficiency of an outdoor tubular PBR system is 6% while the theoretical maximum is 9% (Norsker *et al.* 2011a).

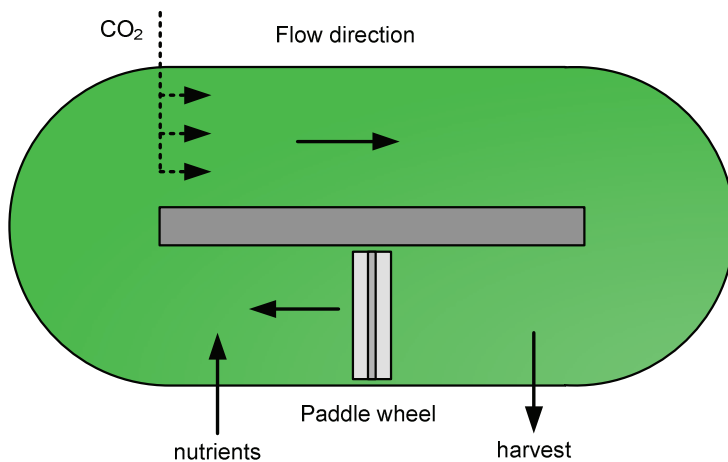


Figuur 3. Basic design of a horizontal tubular PBR (side view) (Leijdekkers, 2013).

2.3.2 Open raceway pond system

An open raceway pond system consists of a shallow channel system between 25 cm and 35 cm deep in which the algae circulates in water (Figuur 4.). Lower depths can potentially result in mixing problems, larger temperature variations and a higher rate of exchange of needed CO₂. Algae in RWP require constant operation of a paddle wheel to mix and move the algae and to prevent algal settling (Alabi *et al.* 2009). High rates of mixing consume more energy and too low mixing rates result in algae settling on the bottom and higher temperature differences in the pond. CO₂ can be supplied in the water. A pH controller keeps the pH in an optimal range by injecting CO₂ in the water flow by a tube with small holes (Lundquist *et al.* 2010). Most of the commercial scale algae cultivation is carried out in open RWPs (Stephenson *et al.* 2010).

Compared to PBR systems, RWPs are simple in construction and operation, have relative low investment costs and low energy consumption (Alabi *et al.* 2009; Brentner *et al.* 2011). Difficulties of open RWP are to control the algae conditions and to conserve an algae monoculture, because of the higher risk for contamination by undesirable algae species. This restricts the number of algae species that can be produced successfully in temperate climates, like the Netherlands (Alabi *et al.* 2009). Another disadvantage is the low light utilization rate. The maximal photosynthetic efficiency of an outdoor RWP is 1.5% (Norsker *et al.* 2011a). Other disadvantages compared to PBRs are the potential for high losses by evaporation, so refilling is needed with fresh water (Stephenson *et al.* 2010) and poor mixing. This can affect both areal and volumetric productivity (Brentner *et al.* 2011).



Figuur 4. Basic design of a RWP (top view) (Leijdekkers, 2013).

2.4 Products from microalgae and algae market

Becker (1994) and Barbosa (2003) indicate that microalgae could be produced for a large number of applications, including (health) food, feed, pharmaceuticals and cosmetics, pigments, as a source of chemicals, fuel and biomass, hormones, bio-fertiliser and for waste water treatment.

Nowadays, between 8,000 and 10,000 tons of algae biomass are produced annually, mainly for use as human food supplements and animal feed (Tredici *et al.* 2009). Tabel 2. shows the present status of commercial production and the main application areas of microalgae. The market size of microalgae products is estimated to have a retail value of \$3000-4000 million per year, of which \$800-1600 million generated by the health food sector, \$900 million by the DHA (docosahexaenoic acid (22:6 ω 3)) market and \$400 million from aquaculture products (Pulz and Gross, 2004). Currently, most of the research on culture systems is focused on cultivation of 'new' algal species and maximization of productivity in photobioreactors rather than on open ponds, which seem to have reached their technological limit.

Table 2. Commercially produced microalgae (Tredici et al. 2009)

Genus	Production (tons y ⁻¹)	Culture system	Location	Application area/product
<i>Arthrospira</i>	3000 (d. wt)	Raceway ponds, natural blooms	Asia, USA	Dietary supplements, cosmetics, phycobiliproteins, feed additives
<i>Aphanizomenon</i>	500 (d. wt)	Natural bloom	USA	Dietary supplement
<i>Nostoc</i>	600 (d. wt)	Arid, semi-arid soils	Asia ¹ , America	Health food
<i>Chlorella</i>	2000 (d. wt)	Circular ponds, fermenters, PBR	Asia, Germany	Dietary supplements, cosmetics, aquaculture
<i>Dunaliella</i>	1200 (d. wt)	Raceway ponds, lagoons	Australia, Israel, Asia	Dietary supplements, cosmetics, β-carotene
<i>Haematococcus</i>	300 (d. wt)	Raceway ponds, PBR	USA, Israel	Dietary supplements, aquaculture, astaxanthin
<i>Odontella</i>	na	Raceway ponds	France, Germany	Dietary supplement
<i>Cryptocodinium</i>	240 (oil)	Fermenters (10–100 m ³)	USA	ω3-PUFA (DHA) as dietary supplement, nutraceutical, feed additive
<i>Schyzochytrium</i>	10 (oil)	Fermenters (10–100 m ³)	USA	ω3-PUFA (DHA) as dietary supplement, feed additive
<i>Ulkenia</i>	na	Fermenters (80 m ³)	Germany	ω3-PUFA (DHA) as dietary supplement, nutraceutical
<i>Porphyridium</i>	na	Bags, PBR	Israel	Cosmetics, phycoerythrin ω6-PUFA (AA)
Various	1000 (d. wt)	Tanks, cylinders, bags	Worldwide	Aquaculture feeds

¹ In China *Nostoc* harvesting is restricted.

AA = arachidonic acid, d. wt = dry weight, DHA = docosahexaenoic acid, na = not available, PBR = photobioreactors, PUFA = polyunsaturated fatty acid.

2.4.1 Microalgae for aquaculture feed

The food value of microalgae for aquatic animals depends on their ingestibility, digestibility and biochemical composition. It is difficult to evaluate and compare the food value of different microalgal strains on the basis of the results reported in different studies, because microalgae biochemical composition is strongly modulated by factors such as light quality and intensity, photoperiod, temperature, nutrient availability, growth phase and harvesting regimen (Carvalho and Malcata, 2000). In Tabel 3. the major algae species used in aquaculture are presented. Microalgae in late-logarithmic growth phase contain 15-50% proteins, 5-20% lipids and 5-20% carbohydrates. Stationary phase microalgae can double carbohydrate or lipid levels at the expense of proteins. Most microalgae are richer in polar lipids during the exponential phase and accumulate triacylglycerols during the stationary phase (Tredici *et al.* 2009). Generally, the use of multispecific diets, including microalgae of different classes, balances the biochemical composition of the food and offers a better nutritional package for larval animals than monospecific diets.

The challenge for the future will be to improve the quality and reduce the cost of marine microalgal products. The major commercial manufacturers of preserved marine microalgal products are located in Europe and the USA, so that significant shipping costs must be taken into account by users in other areas (*e.g.* Asia and Australia), where an important part of the world aquaculture production is located.

Tabel 3. Major classes and genera of microalgae used in aquaculture (Tredici *et al.* 2009).

Class	Genus	Feeding target and frequency of use
Diatoms	<i>Skeletonema</i>	BL (+++), BP (+++), PL (++)
	<i>Thalassiosira</i>	BL (++) , BP (++) , PL (+)
	<i>Phaeodactylum</i>	FPL (+), PL (+), BL (±), BP (±), MZ (*)
	<i>Chaetoceros</i>	PL (+++), BL (++) , BP (++) , MZ (+)
	<i>Navicula</i>	AL (+++); PL (+)
	<i>Nitzschia</i>	AL (+++); PL (+)
	<i>Amphora</i>	AL (+)
Prymnesiophytes	<i>Isochrysis</i>	BL (+++), BP (+++), MZ (+++), PL (++), FPL (++)
	<i>Pavlova</i>	BL (+++), BP (+++), MZ (+++), PL (+), FPL (+)
Prasinophytes	<i>Tetraselmis</i>	MZ (+++), BL (+), BP (+), PL (+)
	<i>Pyramimonas</i>	BL (+), BP (+)
Cryptophytes	<i>Rhodomonas</i>	BL (+), BP (+)
Chlorophytes	<i>Dunaliella</i>	MZ (*)
	<i>Chlorella</i>	FPL (*), FZ (*), MZ (*)
	<i>Scenedesmus</i>	FZ (*), MZ (*)
	<i>Nannochloropsis</i>	MZ (+++)
Eustigmatophytes	<i>Arthrospira</i>	PL (±), MZ (*)

* no data.

AL = abalone larvae, BL = bivalve larvae, BP = bivalve postlarvae, FPL = freshwater prawn larvae, FZ = freshwater zooplankton, MZ = marine zooplankton, PL = penaeid shrimp larvae.

2.4.2 Microalgae as dietary supplements, animal feed and nutraceuticals

Microalgae for human nutrition are mainly marketed as nutritional supplements, in the form of tablets and capsules. Microalgae and their extracts are also incorporated into pastas, snack foods, candy bars or gums and beverages. The market is dominated by few genera: *Arthrospira*, *Chlorella*, *Dunaliella* and *Haematococcus*, mainly because of

their nutritive value and, not least, because they are easy to grow. Recent studies have suggested possible health and therapeutic effects of *Arthrospira* promoting this organism also for pharmaceutical and nutraceutical applications. The annual production of *Arthrospira* in the world exceeds 3000 tons (Tabel 2.), with most commercial producers located in Asia and the USA, (Cyanotech Corp pond area 75 000 m², 350 tons per year, <http://www.cyanotech.com> and Earthrise Nutritionals LLC pond area 150 000 m², 500 tons per year, <http://www.earthrise.com>) in Hawaii and California (USA).

Chlorella is commercially produced by more than 70 companies for health food and mariculture feed (Tredici *et al.* 2009). Although powder, pills or tablets are still the most popular *Chlorella* products, liquid extracts, such as the *Chlorella* Growth Factor, have now gained some share of the market. A novel immunostimulatory polysaccharide-peptide complex derived from *Chlorella pyrenoidosa* is offered by Ocean Nutrition Canada Ltd. Nowadays, the annual production of *Chlorella* exceeds 2000 tons, mainly obtained in open ponds or by heterotrophic cultivation in fermenters. The 700m³ closed photobioreactor operated in Germany by ALGOMED (<http://www.algomed.de/index.php?lang=eng>) is said to produce annually more than 80 tons of high quality *Chlorella* biomass for the health food market.

Dunaliella is exploited for its high β -carotene content. The global production of *Dunaliella* biomass is estimated at about 1200 tons per year. Open ponds and lagoons are the systems used in the commercial facilities, most of which located in Australia, Israel and China.

In general, the exploitation of new microalgal species for alimentary purposes must be carefully evaluated regarding their potential toxicity and long-term effects on human health. Today, strict food safety regulations for placing novel products on the market have been established within the European Community (Gantar and Svirčev, 2008).

2.4.3 High-value molecules from microalgae

Fatty acids

Humans and animals lack the necessary enzymes to synthesize more than 18 carbon-long PUFA (Polyunsaturated fatty acid), and have to obtain them from external sources. In particular, EPA (Eicosapentaenoic acid), DHA (Docosahexaenoic acid) and AA (Arachidonic acid) are most valuable ingredients of feed and food, owing to their important effects on health. Many studies suggest that EPA and DHA support cardiovascular health, have a beneficial effect in several forms of cancer and also in inflammatory and autoimmune disorders, and play an essential role in the brain and retina development. Currently, the typical Western diet leads to an imbalanced intake of PUFA, with a large prevalence of ω -6 over ω -3 (15:1). This is thought to be responsible for increased incidence of cancer, heart disease, allergies, diabetes and other afflictions (Simopoulos, 2003).

As fish oil fails to meet increasing PUFA demand, and there are also concerns about its use as supplement because of the possible presence of pollutants as heavy metals, alternative sources are being sought. Several microalgae represent an interesting alternative to fish oil since they contain high amounts of individual PUFA that may be more easily purified. Microalgae for PUFA may be cultivated in bioreactors, under controlled phototrophic, mixotrophic or heterotrophic conditions leading to a clean and safe oil. DHA is the only algal PUFA commercially available. At present, Martek Biosciences Corp (USA) cultivates the heterotrophic dinoflagellate *Cryptocodinium cohnii* in controlled fermenters to manufacture an oil (life's DHATM) that contains high (40-50%) DHA levels (<http://www.martek.com>).

Pigments

Microalgae are a natural source of a wide variety of pigments. The carotenoids and the phycobiliproteins are the most important from a commercial point of view. Carotenoids are a large family (over 700 types) of liposoluble pigments that are primarily produced by phytoplankton and plants. The worldwide market value of carotenoids is estimated at \$630 million. β -carotene (\$160 million) and the xanthophylls astaxanthin (\$160 million) and lutein (\$120 million) are the major carotenoids with commercial interest (Del Campo *et al.* 2007). Astaxanthin and canthaxanthin have been identified as the dominant pigment eliciting the pinkish-red hue in salmonids, being also responsible for the skin pigmentation of highly priced species such as seabreams and for the desirable body colour of shrimps and lobsters. In farmed animals, astaxanthin and canthaxanthin must be supplied with the diet, because of the animal inability to synthesize them *de novo*. Synthetic astaxanthin represents about 95% of the market. The natural pigment can be obtained from microorganisms such as the yeast *Phaffia rhodozyma* and the microalga *H. pluvialis*. When exposed to stress, this green microalga tends to form haematocysts in which astaxanthin can be accumulated to more than 3% of the biomass dry weight. Carotenoids are widely used also in ornamental aquaculture, skin pigmentation being an important characteristic affecting market price of ornamental

fish. Various non-algal products have been tested, but none has performed as effectively and consistently as natural pigments from microalgae such as *Haematococcus*, *Arthrospira* and *Chlorella*.

The most important process for natural production of β -carotene is the culture of the green halophilic flagellate *D. salina* that can accumulate this pigment up to 12% of its dry weight in response to various environmental stresses. Open ponds with no or scarce process control represent the conventional method used in commercial plants for *Dunaliella* production. The largest plant of ca. 800 ha is run by Cognis Nutrition and Health Co. (Australia) (<http://www.nutritionaloutlook.com/nutra-q/supplier/cognis-nutrition-and-health>), which produces β -carotene extracts and *Dunaliella* powder for human use and animal feed. Microalgal β -carotene has the advantage of supplying isomers in their natural ratio conferring superior bioavailability and antioxidant properties compared to synthetic forms (Tredici *et al.* 2009).

Cosmetics

Many compounds and extracts from microalgae are frequently used in cosmetics as thickening and water-binding agents and as antioxidants. *Arthrospira sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata* and *D. salina* are all used in cosmetics. Protulines® manufactured by Exsymol SAM (Monaco) incorporates *Arthrospira*, rich in γ -linolenic acid, to repair early skin aging. Codif St (France) produces a product called Dermochlorella® incorporating an extract of *C. vulgaris* to stimulate skin collagen synthesis. Pentapharm Ltd (Switzerland) (<http://www.pentapharm.com>) manufactures PEPHA®-TIGHT, a product containing a purified extract of *N. oculata* with skin-tightening properties and PEPHA®-CTIVE, a *D. salina*-based skin energy generator. Very promising for cosmetical applications are mycosporine and mycosporine-like aminoacids (MAAs), low-molecular-weight compounds absorbing UV radiation between 310 and 365 nm. MAAs have been commercially explored as sun care products, but at present only a product (HELIOGUARD®365) from the red macroalga 'nori' is available (Tredici *et al.* 2009). Another strongly UV-A absorbing compound with potential application in cosmetics is scytonemin, a pigment of the outer sheath envelope of many cyanobacteria. The microbial communities (mainly dominated by cyanobacteria) which naturally develop in hot spring waters are widely exploited for medical and cosmetic treatments in spas, though with inadequate scientific investigation.

Pharmaceuticals

The pharmaceutical industry is in continuous search for novel molecules, to be used directly or to serve as leads for the development of analogues for new drugs. The goal is to obtain more effective chemotherapeutics for treatment of chronic and degenerative diseases and novel antibiotic principles to overcome the increasing problem of resistant pathogens. In this frame, screening organisms of unexplored taxonomic groups and habitats is of fundamental importance to reduce the probability of rediscovering known compounds. Since the mid-1970s, particular efforts have been devoted to screen for 'bioactive molecules', a term referring to substances able to affect life processes in a beneficial or in a harmful way at low concentrations, in two microbial groups traditionally poorly investigated (compared with actinomycetes and fungi): cyanobacteria and microalgae.

Many studies, mainly screening of cyanobacteria have been carried out to investigate the antiviral, antifungal and antitumour properties of cyanobacteria and microalgae. However, antibacterial activity in cyanobacteria has a low potency so it is difficult to forecast its application in the pharmaceutical field. More interesting levels of activity were found for antifungal compounds, several of which have been patented, though not yet exploited. Microalgae have been less investigated than cyanobacteria until recently. Dinoflagellates represent the most investigated group, especially for antitumoural compounds.

The best known algal molecules are toxins, of which cyanobacteria and dinoflagellates are the most important producers. Algal toxins represent very interesting tools for pharmacological research. Their mechanism of action is generally known, so they are very useful to investigate the cell targets of other substances or the mechanism of action of other toxins.

Wastewater reclamation and biofuel production

Applications of mass algae cultures to wastewater treatment are very limited. The need for large land areas, the strong influence of climatic conditions on the process rate and efficiency, the expensive separation of the algal cells from the liquid and difficulty in finding an appropriate use for the algal biomass have strongly hampered the diffusion of this technology until now. The shortage of fossil fuels and growing concern that biofuel production from agriculture crops may jeopardize food security and increase agricultural commodities prices have changed this perspective. Algae cultivation in wastewater may be now viewed as a process able to economically produce a valuable source of renewable, carbon-neutral

fuel (and possibly feed and fertilizer) not competing for resources with agriculture. Liquid wastes (human, agricultural, industrial) provide nutrients at no cost, and together with the disposal credits, may offer the possibility to bridge the gap between the current cost of algal biomass production in clean artificial media (€3-30 kg⁻¹) and the very low cost required when the biomass is intended for biofuel production (<€0.25 kg⁻¹) (Michael and John, 2009).

Microalgae cultivation in wastewater has traditionally been viewed from the water purification perspective with algae providing the oxygen necessary for the breakdown of the organic load. For this, the process has been also termed 'photosynthetic oxygenation'. Indeed algae play a crucial role by photosynthetically releasing the oxygen (1.5-1.7 grams per gram of algae biomass synthesized) required by aerobic heterotrophic bacteria for the oxidation (mineralization) of the organic substances present in the waste. Bacterial degradation of the organics releases nutrients (CO₂, ammonia, phosphate, etc.) that are newly fixed in the algae-bacterial biomass leaving a relatively clean water. As production of 1 g of algae biomass requires about 0.5 g of carbon, 0.1 g of nitrogen and 0.01 g of phosphorus, the relative balance of these nutrients in the sewage is of prime importance. However, some adjustment is possible since algae can take up nitrogen and phosphorus in large excess (luxury consumption) and may take advantage from their heterotrophic ability, meaning that not only inorganic but also organic carbon may be directly used.

Microalgae produce substances like oils or proteins are depending on the species. Most common algae, like *Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis*, have oil levels between 20 and 50%. Tabel 4. presents both lipid content and biomass productivities of different marine and freshwater microalgae species, showing significant differences between the various species. As shown in Table 1, oil content in microalgae can reach 75% by weight of dry biomass but associated with low productivities (e.g. for *Botryococcus braunii*). The chemical composition can also be changed depending on the experimental conditions used. They react on temperature, light and nutrient composition. Algae are considered as a potential source of raw material for biofuel production to replace the fossil fuels (Wijffels *et al.* 2010) although the production costs are still very high at this moment and not competitive with fossil fuels (Faria *et al.* 2012). The main objective of research in algae production systems is to reduce production costs and energy requirements and to increase the biomass value by making use of all algae biomass components (Wijffels and Barbosa, 2010a).

Table 4. Lipid content and productivities of different microalgae species (Mata et al. 2010).

Marine and freshwater microalgae species	Lipid content (% dry weight biomass)	Lipid productivity (mg/L/day)	Volumetric productivity of biomass (g/L/day)	Areal productivity of biomass (g/m ² /day)
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	24.0–31.0	–	–	11.5–17.4
<i>Botryococcus braunii</i>	25.0–75.0	–	0.02	3.0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	21.8	0.07	–
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14.6–16.4/39.8	17.6	0.04	–
<i>Chlorella emersonii</i>	25.0–63.0	10.3–50.0	0.036–0.041	0.91–0.97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14.6–57.8	121.4	2.00–7.70	–
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19.0–22.0	44.7	0.23–1.47	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0–58.0	11.2–40.0	0.02–0.20	0.57–0.95
<i>Chlorella</i> sp.	10.0–48.0	42.1	0.02–2.5	1.61–16.47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2.0	–	2.90–3.64	72.5/130
<i>Chlorella</i>	18.0–57.0	18.7	–	3.50–13.90
<i>Chlorococcum</i> sp.	19.3	53.7	0.28	–
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20.0–51.1	–	10	–
<i>Dunaliella salina</i>	6.0–25.0	116.0	0.22–0.34	1.6–3.5/20–38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23.1	–	0.09	14
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16.7–71.0	–	0.12	–
<i>Dunaliella</i> sp.	17.5–67.0	33.5	–	–
<i>Ellipsoidium</i> sp.	27.4	47.3	0.17	–
<i>Euglena gracilis</i>	14.0–20.0	–	7.70	–
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.0	–	0.05–0.06	10.2–36.4
<i>Ischrysis galbana</i>	7.0–40.0	–	0.32–1.60	–
<i>Ischrysis</i> sp.	7.1–33	37.8	0.08–0.17	–
<i>Monodus subterraneus</i>	16.0	30.4	0.19	–
<i>Monallanthus salina</i>	20.0–22.0	–	0.08	12
<i>Nannochloris</i> sp.	20.0–56.0	60.9–76.5	0.17–0.51	–
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7–29.7	84.0–142.0	0.37–0.48	–
<i>Nannochloropsis</i> sp.	12.0–53.0	37.6–90.0	0.17–1.43	1.9–5.3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.0–65.0	90.0–134.0	–	–
<i>Nitzschia</i> sp.	16.0–47.0	–	–	8.8–21.6
<i>Oocystis pusilla</i>	10.5	–	–	40.6–45.8
<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4	0.16	–
<i>Pavlova lutheri</i>	35.5	40.2	0.14	–
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18.0–57.0	44.8	0.003–1.9	2.4–21
<i>Porphyridium cruentum</i>	9.0–18.8/60.7	34.8	0.36–1.50	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0–55.0	–	0.004–0.74	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9–18.4	35.1	0.19	–
<i>Scenedesmus</i> sp.	19.6–21.1	40.8–53.9	0.03–0.26	2.43–13.52
<i>Skeletonema</i> sp.	13.3–31.8	27.3	0.09	–
<i>Skeletonema costatum</i>	13.5–51.3	17.4	0.08	–
<i>Spirulina platensis</i>	4.0–16.6	–	0.06–4.3	1.5–14.5/24–51
<i>Spirulina maxima</i>	4.0–9.0	–	0.21–0.25	25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20.6	17.4	0.08	–
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5–23.0	27.0–36.4	0.12–0.32	19
<i>Tetraselmis</i> sp.	12.6–14.7	43.4	0.30	–

Future trends of algae market

It is possible to foresee a huge increase in the demand for cultured algae, in terms of both quantity and diversity. The depletion of natural resources, such as fish stocks, will greatly amplify the necessity to produce seafood through aquaculture and, then, higher amounts of algal biomass will be required (Tredici *et al.* 2009). The increasing number of people having the economic capacity to access aquaculture products will determine a widening of the market and thus an enhancement of production, not only in terms of quantity of product from already reared species, but also in terms of number of species to be reared. New animal species imply also new microalgae to fulfil their nutritional requirements. At the same time, the general perception that natural products are ‘healthier’ and more ‘friendly’ than synthetic ones is continuously increasing the necessity to produce algal biomass for dietary supplements and cosmetics. Last but not least, algal biomass might become a source of biofuels, especially if its production can be associated with wastewater treatment and greenhouse gas abatement. Microalgae have potentially the ability to produce fuels without entering into competition with food production, as is the case of other crops like corn or sugarcane.

The production of algae for high-value markets (aquaculture, food supplements, nutraceuticals, pharmaceuticals) will be developed through the search for, isolation and cultivation of new algal strains endowed with interesting activities or able to produce the desired compound more efficiently or in higher amounts. In-depth investigations on their physiology and genetics will be necessary in order to grow them and understand the cellular/molecular mechanisms that trigger the synthesis of the high-value compound, and allow the complete exploitation of their potential. These kinds of studies will also be useful for species which are already cultivated.

2.5 Economy of microalgae production

Little information is available on the economics of commercial algae production systems.

Norsker *et al.* (2011a) published a detailed study on the economics of three main types of algae photobioreactor systems: open pond photobioreactors, tubular photobioreactors and flat panel photobioreactors. For these systems the production costs of algal dry matter were assessed in detail, the most important cost factors were determined and the production systems were optimised with respect to these cost factors. Calculations were done for production systems occupying an area of either 1 ha or 100 ha. Assumptions are made for the economy of scale. They authors estimate that a cost price of 4-6€ could be realistic in the future.

The cost analysis of a real facility for the production of high value microalgae biomass was analysed by Acién *et al.* (2012). The facility is based on ten 3 m³ tubular photobioreactors operated in continuous mode for 2 years, data of *Scenedesmus almeriensis* productivity but also of nutrients and power consumption from this facility being used. The yield of the facility was close to maximum expected for the location of Almería, the annual production capacity being 3.8 t/year (90 t/ha-year) and the photosynthetic efficiency being 3.6%. The production cost was 69 €/kg. Economic analysis shows that labour and depreciation are the major factors contributing to this cost. Simplification of the technology and scale-up to a production capacity of 200 t/year allows to reduce the production cost up to 12.6 €/kg. Moreover, to reduce the microalgae production cost to approaches the energy or commodities markets it is necessary to reduce the photobioreactor cost (by simplifying its design or materials used), use waste water and flue gases, and reduce the power consumption and labour required for the production step.

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. Integrale dynamische modellen van algen en tuinbouwteelt dragen bij aan het ontwerpproces voor een geschikt algen teeltsysteem op een tuinbouwbedrijf voor de lange termijn. Door metingen uit te voeren op tuinbouwbedrijven met algenteeltsystemen wordt data verzameld om meer inzicht in huidige systemen bij telers te krijgen en deze te verbeteren op de korte termijn. De realisatie van een proeffaciliteit en het uitvoeren van experimenten bij Wageningen UR Glastuinbouw geven inzicht in de instellingen van groeifactoren in een algenteeltsysteem in een kas. De proeffaciliteit biedt een ontmoetingsplek voor tuinders, door experimenten worden pre-competitieve praktische vragen beantwoord. Door open kennisuitwisseling van tuinbouwondernemers en onderzoekers zullen systemen voor een economisch rendabele teelt op grote schaal kunnen worden ontwikkeld.

3.2 Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers

In 2011 en 2012 hebben regelmatig interactieve sessies met een groep van negen tuinbouwondernemers plaatsgevonden (Tabel 5.). De bijeenkomsten hebben om de 4 tot 6 weken plaatsgevonden op diverse locaties, roulerend bij één van de telers of op een andere locatie waar algen werden geteeld. De interactieve sessie waren opgebouwd uit de volgende elementen:

- bezoek algen teeltsysteem op locatie indien aanwezig
- presentatie door betreffende teler over zijn huidige technische layout, over de performance (zo ver bekend: energieverbruik, productie), over de sterktes en zwaktes van zijn algenteeltsysteem, daarnaast een lijst met vragen, die hij graag beantwoord zou zien;
- indien geen algen pilot aanwezig op locatie, dan toelichting plannen van betreffende teler, verwachtingen van een toekomstig systeem, formulering vragen om de juiste keuzes voor een algenteeltsysteem te kunnen maken;
- discussie in de groep over eigen ervaringen, delen van eigen kennis;
- identificatie van onderzoeksvragen welke tot de volgende sessie beantwoord dienden te worden door de aanwezige onderzoekers van Wageningen UR Glastuinbouw;
- in volgende sessie presentatie resultaten onderzoek Wageningen UR Glastuinbouw, antwoord op vragen uit de vorige sessie(s), discussie hierover, betekenis voor reeds bezochte algenteeltsystemen op praktijkbedrijven.

Tabel 5. Interactieve sessies met als doel kennisuitwisseling van tuinbouwondernemers.

Datum	Plaats	Algenteeltsysteem
17 februari	Lans, Maasdijk	Fotobioreactoren met drie verschillende afmetingen onder een tomatenteelt
10 maart	Newplant, De Lier	Fotobioreactoren en gootsysteem naast een tomatenteelt
7 april	Bosplant, 's Gravenzande	Plan: afvalwaterzuivering met algen, boven potplanten of boven verwerkingsruimte
12 mei	Bunnik Plants, Bleiswijk	Plan: afvalwaterzuivering met algen, boven potplanten of boven verwerkingsruimte
30 juni	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	geen
18 augustus	Zuppi, Venlo	Plan: algenproductie in kas naast tomatenteelt

29 september	Algae Parc, Wageningen	Diverse algenteeltsystemen buiten
13 oktober	LGem, Den Haag	Fotobioreactor horizontaal en fotobioreactor verticaal in kas
30 november	Bosplant, 's Gravenzande	Plan: afvalwaterzuivering met algen, boven potplanten of boven verwerkingsruimte
15 december	Lans, Maasdijk	Fotobioreactoren met drie verschillende afmetingen onder een tomatenteelt
11 januari	Bunnik Plants, Bleiswijk	Plan: afvalwaterzuivering met algen, boven potplanten of boven verwerkingsruimte
7 maart	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	Plan: zes verticale algenbuisreactoren in een kasafdeling als nieuwe proeffaciliteit
21 maart	LGem, Den Haag	Fotobioreactor horizontaal en fotobioreactor verticaal in kas
28 maart	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	Plan: zes verticale algenbuisreactoren in een kasafdeling als nieuwe proeffaciliteit
11 april	Bunnik Plants, Bleiswijk	Plan: afvalwaterzuivering met algen, boven potplanten of boven verwerkingsruimte
16 mei	Newplant, De Lier	Nieuw systeem fotobioreactoren naast een tomatenteelt
21 juni	Bosplant	Realisatie racewaypond naast potplantenteelt
5 juli	Hydro Huisman, Bergerden	Algenproductie boven potplantenteelt
16 augustus	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	Realisatie zes vergelijkbare verticale fotobioreactoren in kas
3 oktober	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	Eerste algenteelt in zes vergelijkbare verticale fotobioreactoren in kas
14 november	Algae Parc, Wageningen	Diverse algenteeltsystemen buiten
13 december	Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk	Algenteelt en schoonmaken in zes verticale vergelijkbare fotobioreactoren in kas

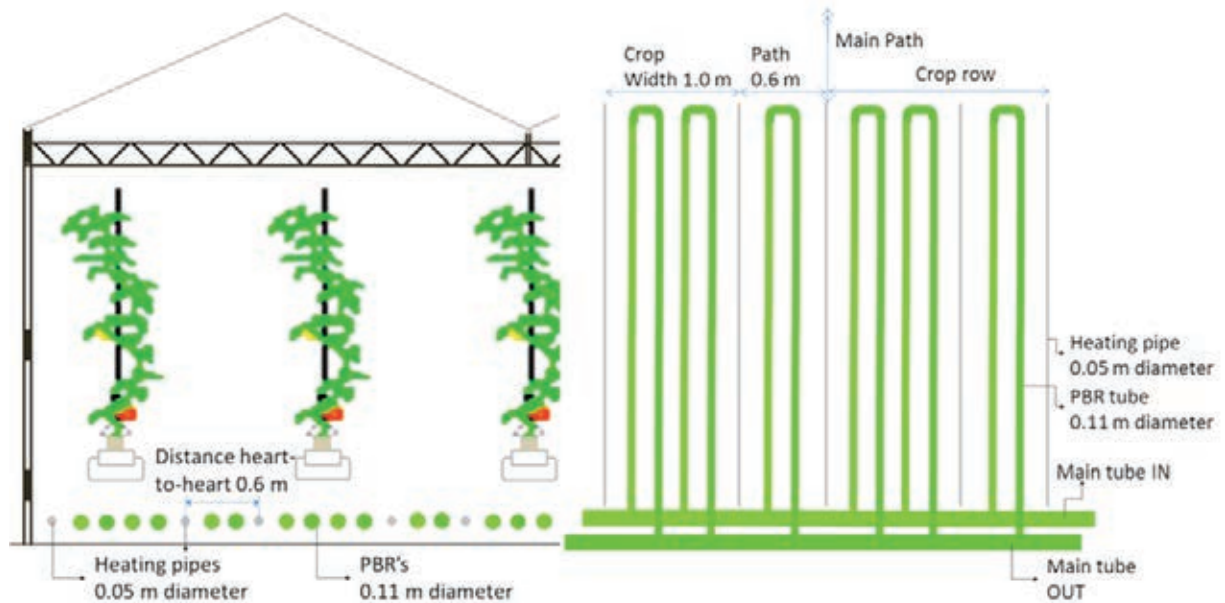
3.3 Modellen algenteeltsystemen in kassen

3.3.1 TomAlgS integraal model algenteeltsystemen en tomatenproductie

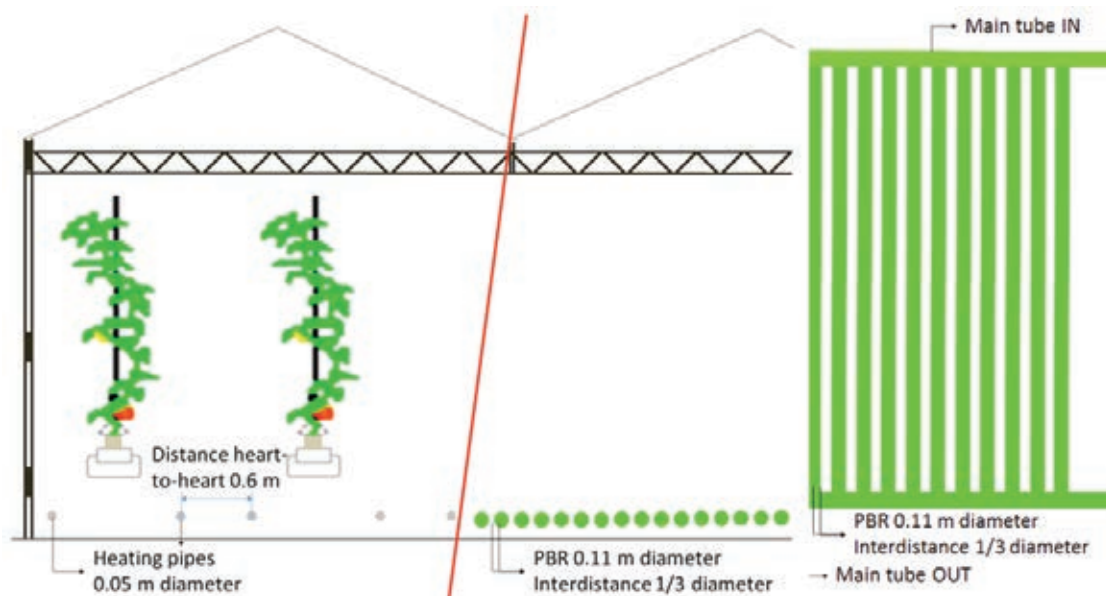
Voor de integrale berekening van de algenproductie, de productie van tomaten en de economische haalbaarheid van de productie van algen in kassen is een integraal model ontwikkeld, TomAlgS (Slager, 2011). Het model simuleert de productie van een horizontale buisvormige fotobioreactor (PBR) in een kas met en zonder tomatenteelt en vergelijkt de economische prestaties van verschillende algen reactor configuraties met behulp van een economisch model. Twee productiemethoden onderzocht:

- De “geïntegreerde productie”, die was gebaseerd op het systeem uitgevoerd door een Nederlandse teler (Lans, Maasdijk). PBR werden geplaatst onder de tomatenteelt of op het pad. Figuur 5. toont schematisch de opbouw van het bioreactorsysteem voor een 0.11m-PBR en de hoe de PBR is aangebracht in combinatie met de tomatenproductie. In het systeem van de teler werden zes algenbuizen per rij onder het gewas met een buisdiameter van 0,06 m, vier met een diameter van 0,11 m en twee met een diameter van 0,16 m aangebracht. Dit resulteerde in PBR installaties met een inhoud van respectievelijk 107, 238 en 252 m³. Elke lus van de PBR had een lengte van 192 m (twee maal de effectieve lengte van de kas).
- De “gescheiden productie”, waar tomaat en algenproductie worden gescheiden in verschillende kascompartimenten (Figuur 6.). Dezelfde kas afmetingen werden gebruikt, maar het aantal rijen voor de tomatenteelt werd gereduceerd.

De tomaten werden verwijderd en de algenbuizen werden enkele centimeters boven de vloer geïnstalleerd. De configuratie van de bioreactoren was vergelijkbaar met de opstelling in de geïntegreerde productie zoals hierboven beschreven. De afzonderlijke productie was altijd gerelateerd aan de geïntegreerde productie. Twee methoden werden gekozen om te beslissen hoeveel buizen geïnstalleerd moeten worden in het gescheiden compartiment: Ten eerste, evenveel buizen zoals gebruikt in het gecombineerde systeem maar geïmplementeerd in het afzonderlijke compartiment. Ten tweede, een vergelijkbare totale droge stof productie als in de geïntegreerde productie.

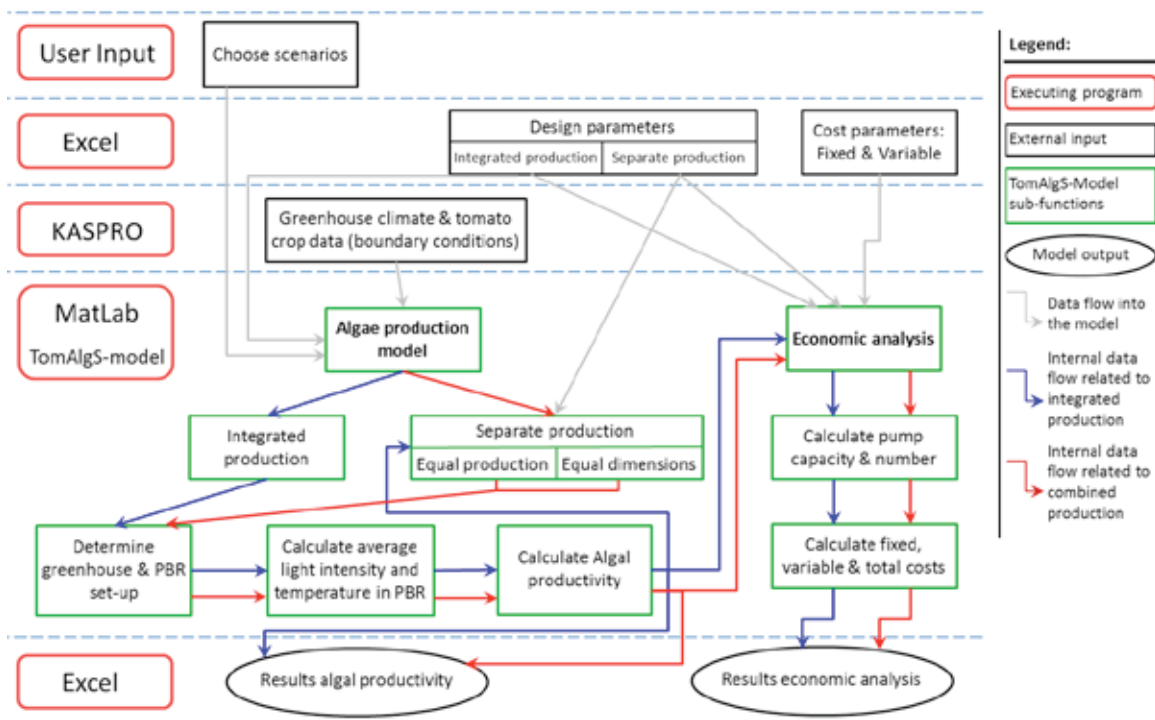


Figuur 5. Schematische weergave van de "geïntegreerde productie" van een tomatenteelstelsel met een algenbioreactor onder het gewas of op het pad (links), bovenaanzicht van algen reactoren en verwarmingsbuizen (rechts) (Slager, 2011).



Figuur 6. Schematische weergaven van de "gescheiden productie" van een compartiment met een tomatenteelstelsel naast een compartiment met een algenteelstelsel (links) en bovenaanzicht van de algenreactoren (rechts) (Slager, 2011).

Een volledig deterministisch MatLab[®]-model is ontwikkeld dat kan worden gebruikt om diverse scenario's en systeem configuraties te berekenen met als resultaat de algen productiviteit en economische kengetallen van een gecombineerde productie van algen en tomaten in een kas. Het model zelf bestaat uit drie delen, een kasklimaat model, een algenproductie model en een economisch model. De kern van het model is een algen groei model, waarbij de algen groei op basis van de PBR temperatuur en een lichtintensiteit wordt bepaald. Figuur 7. geeft de structuur van het simulatiemodel weer.



Figuur 7. Schematische weergave van het integrale model TomAlgS voor de analyse van een gecombineerde tomaten en algenproductie in een kas en economische analyse (Slager, 2011).

Kasklimaat Model

In het TomAlgS model werd een typische Venlo-kas verondersteld met een oppervlakte van ongeveer 1 hectare. Er was een hoofdpad over de breedte van de kas, de resterende ruimte van de kas wordt gebruikt voor tomaten- en algenproductie. De breedte van de kas was verdeeld in secties van 8 meter, elk met 5 rijen planten van 1,6 m breedte. Een gewas rij werd verdeeld in de ruimte voor de teelt van het gewas (gewas goot, 1 m) en een pad (0,6 m voor logistiek). Het centrum van de verwarmingsbuizen werd genomen als de grens tussen gewas en pad. Meer details over de afmetingen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Overzicht van de afmetingen van kas en tomatengewas in het TomAlgS model, (Slager, 2011).

Kas afmetingen	Dimensies	Eenheid
Lengte kas	100	m
Breedte kas	104	m
Kas grondoppervlak	1.04	ha
Teeltoppervlakt	0.9984	ha
Goothoogte	6	m
Breedte hoofdpad	4	m
Breedte kassegment	8	m
Aantal gewasrijen per segment	5	-
Aantal gewasrijen over hele kasbreedte	65	-
Lengte gewasrij	96	m
Breedte gewasrij	1.6	m
Breedte pad	0.6	m
Breedte gewas	1	m
Diameter verwarmingsbuis	0.05	m

Het kasklimaat en de tomatengroei werden gesimuleerd met behulp van de kasklimaat simulatiemodel KASPRO (De Zwart, 1996). KASPRO is een dynamisch simulatiemodel waarin de fysische parameters van de kas, de gewas fotosynthese en droge stof productie en de energiebalans op uur basis worden berekend. Voor de simulatie zijn de externe klimaatgegevens, het kas ontwerp, materiaal eigenschappen, teeltmethoden en de klimaat besturing geïntegreerd. Het kasklimaat wordt bestuurd door een replica van commercieel gebruikte klimaatregelaars en de instellingen worden gedefinieerd door de gebruiker. Het model is gevalideerd in diverse onderzoeksprojecten voor verschillende klimatologische omstandigheden wereldwijd.

Voor de modelberekening werd het SEL-jaar gebruikt. Het SEL-jaar bevat de weergegevens van een 'gemiddeld' jaar in Nederland. Het is samengesteld uit de gegevens van de meest gemiddelde maand in de jaren 2000-2009, zoals gemeten door het KNMI (Swinkels, 2009) op basis van de methodologie beschreven door Breuer en Van de Braak (1989).

Algenproductie Model

Verschillende algen groei modellen zijn beschikbaar en in de literatuur (Thornton *et al.* 2010;. Zonneveld, 1998). Vrijwel alle modellen zijn gebaseerd op labschaal experimenten. In de studie van Slager *et al.* (2012), werd een empirisch model gekozen dat de groei van *Porphyridium cruentum* onder invloed van temperatuur en straling beschrijft. Zoals beschreven door Dermoun *et al.* (1992) zijn temperatuur en licht twee van de belangrijkste groeifactoren voor de totale biomassa productiviteit van algen. Er wordt verondersteld dat er geen beperkingen zijn door voeding, O₂, CO₂ of pH en dat het systeem perfect gemengd is.

KASPRO-output gegevens met betrekking tot straling, kaslucht temperatuur en LAI van de tomatenteelt werden gebruikt als input voor het algenproductie model. Hiermee werden uur waarden verkregen voor de straling boven de PBR en de temperatuur in de PBR. In de "geïntegreerde productie" gaat de straling eerst door het tomatengewas voordat zij de PBR bereikt. Het licht in de PBR is derhalve gerelateerd aan de LAI van de tomatenteelt. Metingen gedaan door Kempkes (ongepubliceerde gegevens) laten zien dat in een volwassen tomatengewas met een LAI van 3 nog maar 5% van de straling de vloer bereikt, op het pad was dit 20%. In de "gescheiden productie" was geen gewas boven de PBR aanwezig, daarom werd aangenomen dat 100% van de straling in de kas de PBR bereikt. De PBR wand bestaat uit polyethyleen dat ongeveer 15% van de straling reflecteert. Voor de berekening van de lichtomstandigheden in de PBR werd de methode van gemiddelde lichtintensiteit gebruikt. De gemiddelde lichtintensiteit in de PBR wordt berekend op basis van de invallende zonnestraling op de PBR en de lichtweg door de PBR (Quinn *et al.* 2011). In de "geïntegreerde productie" werd aangenomen dat de temperatuur van de PBR steeds gelijk is aan de temperatuur van de kaslucht zoals bepaald door KASPRO, omdat nagenoeg geen directe straling de PBR bereikt en de totale hoeveelheid straling vrij laag. In de "gescheiden productie" ontvangt de het PBR de volledige zonnestraling in de kas en de bioreactor temperatuur werd afzonderlijk gemodelleerd naar Bechet *et al.* (2010).

Voor het oogstproces werd aangenomen dat de biomassa geoogst werd met een centrifuge. De bioreactor werd op een biomassaconcentratie van 1-3 kg DM/m³ gehouden. Oogsten gebeurde indien de biomassa-concentratie 3 kg/m³ bereikte, vervolgens werd twee derde van de biomassa van het systeem geoogst. Meer details over het algen groeiemodel is te vinden in Slager (2011).

Economisch Model

In het TomAlgS model werden voor de berekening van de kosten en opbrengsten van de tomaten productie zowel de vaste als de variabele kosten en opbrengsten verkregen uit Vermeulen (2010). De gegevens voor trostomaten in combinatie met een WKK werden gebruikt. Het aantal pompen en de totale pompcapaciteit is speciaal berekend voor alle systemen (Tabel 7.). Norsker *et al.* (2011) geven de vaste en variabele kosten voor algen installaties. Gegevens uit deze studie werden gebruikt en aangepast aan de onderzochte systemen in dit onderzoek. Vaste kosten en variabele kosten zijn gecorrigeerd met behulp van een volumeverhouding, het volume van de systemen in verhouding tot het volume van het systeem zoals bestudeerd door Norsker *et al.* (2011). Voor de "gescheiden productie" werden twee wijzigingen gedaan in de berekening van de kosten. Ten eerste werd de minimale vloeistofsnelheid verdubbeld om zuurstofinhibitie van de algen te voorkomen. Ten tweede zijn de vaste kosten van de kas en kasapparatuur toegevoegd aan de algenproductie voor elke m² kas waar een algensysteem wordt geïnstalleerd. In de "geïntegreerde productie" zijn deze kosten volledig opgenomen in de kosten voor de tomaten teelt. In het TomAlgS model werd een prijs van 50€/kg DM verondersteld voor de berekeningen. Meer details over het economische analysemodel is te vinden in Slager (2011).

Tabel 7. Vaste en variabele kosten voor de algenproductie in horizontale buisvormige fotobioreactoren (Norsker et al. 2011, Slager, 2011).

Vaste kosten	Einheid kosten [€]	Aangepast volgens	Opmerking
Circulatie pomp	26100	# pompen	Het aantal pompen is berekend door drukverschil en snelheid vloeistof
Centrifuge	133000	Kosten factor	
Centrifuge pomp	4800	Kosten factor	
Filter vloeistof	13500	Kosten factor	
Pomp vloeistof	4800	Kosten factor	
Tank vloeistof	20000	Kosten factor	
Bewaartank oogst	20000	Kosten factor	
Zoutwater pomp station	15000	Kosten factor	
Weegstation	40000	Kosten factor	
Luchtpomp	22000	Kosten factor	
Installatie kosten	30%		Percentage van vaste kosten
Instrumentatie en regelsysteem	30%		
Buizen	30%		

Variable kosten	Waarde	Einheid	Aangepast volgens	Opmerking
Arbeid	62653	€/ha/year	Oppervlakte ratio	Gebaseerd op 2 arbeiders per ha, gebaseerd op Vermeulen (2010)
Onderhoud	4	%		Percentage van de vaste kosten
CO ₂	0.33	€/kg DM algae		
Nutrienten	18040	€/ha/year	Volume ratio	
Vloeistof filters	10355	€/ha/year	Volume ratio	
PE-buizen	0.03	€/m/year	Oppervlakte buiswanden	Rest van de kosten berekend als vaste kosten
Elektriciteitskosten	0.09	€/kWh		
Vermogen nodig voor oogst	1	kWh/m ³		Energieverbruik per m ³ vloeistof
Vermogen nodig voor pompen		kW * h		Berekend op basis van drukverschil en snelheid vloeistof

3.3.2 RAYPRO model lichtonderschepping, temperatuur en algenproductie

Licht omstandigheden in een fotobioreactor PBR systeem zijn plaatsafhankelijk. Hoogste lichtintensiteiten treden op aan de bovenkant van een systeem en langs de wanden van de buizen en de lichtintensiteit neemt af met toenemende lengte

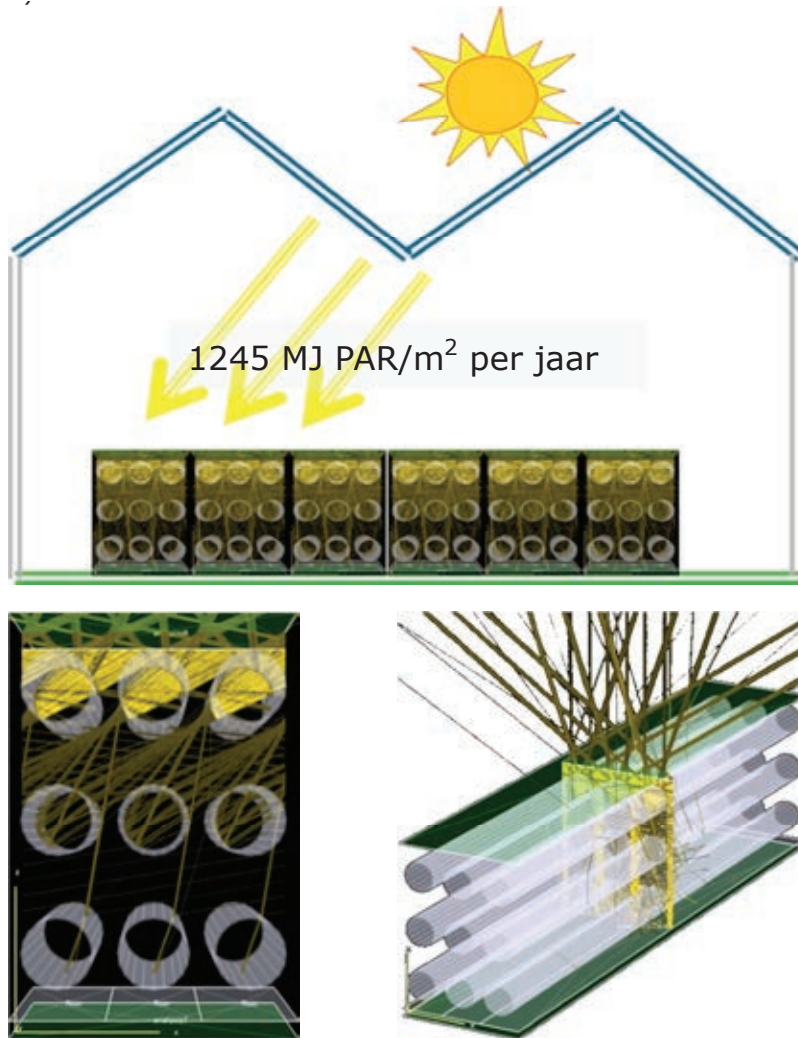
van het lichtpad door de buizen ten gevolge van absorptie en reflectie. Het mengen van de algen in de fotobioreactor resulteert in continu veranderende lichtomstandigheden voor de individuele algen omdat deze als gevolg van turbulentie steeds veranderen van locatie.

Het licht dat invalt in de fotobioreactor buizen werd berekend met behulp van het ray tracing model RAYPRO. Dit model is ontwikkeld door Wageningen UR Glastuinbouw in het laatste decennia en is gebruikt en gevalideerd in een aantal onderzoeksprojecten op het gebied van kasdekmaterialen (Swinkels *et al.* 2001), microstructuren voor PV-cellen (Sonneveld en Swinkels, 2005) en zonne-energie systemen (Sonneveld *et al.* 2010). Het model is gebaseerd op het volgen van lichtstralen. Ray tracing is een methode voor het berekenen van de baan van lichtstralen door een systeem met gebieden van verschillende voortplantingssnelheid, absorptiekenmerken en reflecterende oppervlakken. Onder deze omstandigheden kunnen lichtstralen buigen, van richting veranderen, of weerkaatsen op oppervlakken en zo afnemen in lichtintensiteit, dit kan tot gecompliceerde analyses leiden. Ray tracing lost het probleem op door herhaaldelijk geïdealiseerde smalle lichtbundels, genaamd stralen, door het medium te sturen met discrete hoeveelheden. Zonnestraling wordt gesimuleerd door vele stralen te produceren met verschillende invalshoeken en golflengtes.

De algen reactor geometrie wordt vertaald in een verzameling van oppervlaktes in de ruimte met individuele optische eigenschappen zoals brekingsindex, diffuse reflectie en absorptiecoëfficiënt als functie van de golflengte. Directe zonnestraling wordt gesimuleerd door een groot aantal loodrechte lichtstralen. Diffuus licht (bewolkt weer) wordt gesimuleerd door toevallig gerichte stralen met een gelijke afstand van elkaar in de richting van de cosinus ruimte (Lambertiaan). Vanuit de lichtbron (zon) wordt een groot aantal lichtstralen getraceerd door het object (kas en algenreactoren), totdat de intensiteit van de lichtstraal daalt onder een bepaalde drempelwaarde. In de berekeningen zijn de volgende parameters van het model RAYPRO beschouwd als variabelen.

- Intensiteit en richting directe straling
- Intensiteit diffuse straling
- Diameter buizen algenteeltsysteem
- Aantal buizen algenteeltsysteem in verticale en horizontale richting
- Afstand van buizen tot elkaar horizontaal en verticaal
- Materiaaleigenschappen (absorptie, reflectie en transmissie van zowel directe en diffuse straling)

Met het RAYPRO model wordt de hoeveelheid zonne-energie die door de algenfotobioreactoren wordt ontvangen voor verschillende systeemconfiguraties berekend. De berekeningen worden gedaan voor een typische Venlo-kas in Nederland, waardoor op jaarbasis 1245 MJ PAR /m²/jaar binnenvalt (Figuur 8.).



Figuur 8. PAYPRO lichtmodel berekent alle lichtstralen in een algenfotobioreactor in een kas

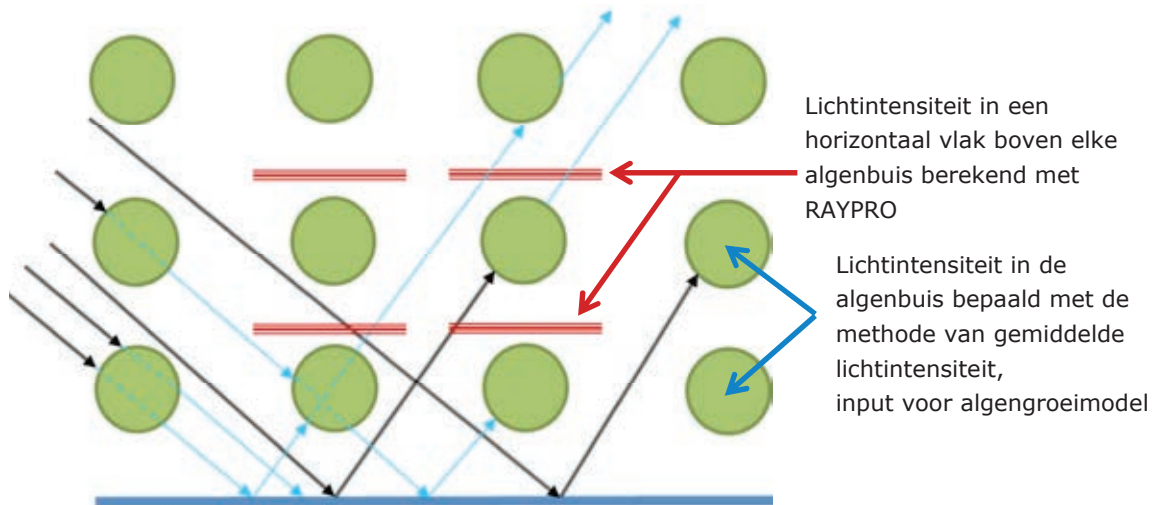
In de volgende stap werd het RAYPRO licht model gecombineerd met een algen groeimodel uit de literatuur. Hiervoor wordt het RAYPRO lichtmodel gecombineerd met een algengroei model dat uitgaat van de methode van gemiddelde lichtintensiteit. De gemiddelde lichtintensiteit is de lichtsterkte aan die alle algencellen zijn blootgesteld per tijdseenheid. Deze methode is gebruikt door een aantal onderzoekers in de literatuur (Martínez *et al.* 2012; Molina Grima *et al.* 1994; Pal *et al.* 2011; Quinn *et al.* 2011; Sánchez *et al.* 2008). De gemiddelde lichtintensiteit past de Beer-Lambert wet toe (Holland en Wheeler, 2011; Mairet *et al.* 2011). De wet stelt dat er een logaritmische afhankelijkheid is tussen de transmissie van het licht door een stof en de absorptiecoëfficiënt van de stof en de afstand die het licht aflegt door het materiaal (de weglengte van het licht). De absorptiecoëfficiënt is het product van de molaire absorptie (extinctiecoëfficiënt) van de absorberende stof en de molaire concentratie van de absorberende stof in het materiaal, of het product van de absorptie doorsnede en de dichtheid (aantal) van de absorberende stof. De gemiddelde lichtintensiteit wordt weergegeven door de volgende vergelijking:

$$I_{av} = I_o \times \tau_{wall} \frac{1 - \exp(-\alpha \times C_b \times d_{tube})}{\alpha \times C_b \times d_{tube}}$$

I_o is de hoeveelheid PAR op de reactor wand ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), τ_{wall} is de transmissie van de reactorwand, α is de absorptie coëfficiënt van de biomassa gelijk aan $0.0752 \text{ (m}^2\text{g}^{-1}\text{)}$, C_b is de biomassa concentratie (g m^{-3}) en d_{tube} is de diameter van de reactorbuis (m), (Quinn *et al.* 2011; Slager *et al.* 2012).

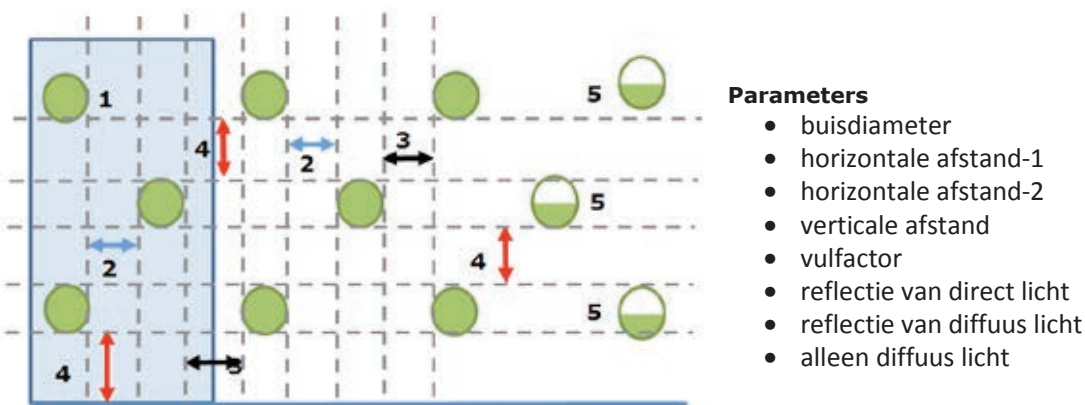
Om de algengroei te berekenen is het nauwkeurige lichtstralen model RAYPRO gekoppeld met een algengroeimodel dat uitgaat van de methode van de gemiddelde lichtintensiteit. Hiervoor werd eerst de lichtverdeling van de in de kas

komende lichtstralen berekend met RAYPRO. Vervolgens werd de lichtintensiteit in het vlak boven elke algenbuis bepaald. Daarna werd de lichtintensiteit in elke algenbuis bepaald met de methode van de gemiddelde lichtintensiteit. Dan kan de algengroei worden uitgerekend met het algengroei-model. Deze methode is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9. Schematische weergave van de koppeling van het RAYPRO lichtmodel met een algengroei-model gebaseerd op de methode van gemiddelde lichtintensiteit.

De berekening van de algengroei en -productie werd gedaan volgens het algengroei-model zoals beschreven in hoofdstuk 3.3.1. Verschillende scenario's voor verschillende systeemconfiguraties van de algenbioreactoren werden onderzocht. Het doel was om een geschikt algenteeltsysteem te vinden met een goede performance uitgedrukt in algenproductiviteit per teeltoppervlak of per volume water. De berekeningen zijn gedaan voor verschillende buis diameters 6cm, 11cm en 16cm, voor horizontale en verticale systemen, verschillende afstanden van de buizen van elkaar, verschillende vulfactoren van de buizen met water en lucht en voor verschillende lichtcondities zoals diffuus licht (Figuur 10.).



Figuur 10. Schematische weergave van de input parameters voor verschillende systeemconfiguraties van algenteeltsystemen in een kas

Elke algensoort bereikt alleen een maximale fotosynthetische efficiëntie wanneer naast andere parameters ook de temperatuur in de bioreactor optimaal is. Wanneer de bioreactor temperatuur niet optimaal is zal de algen productiviteit afnemen. Als we de algen productiviteit willen voorspellen is het dus belangrijk om de invloed van de omgevingsparameters op de bioreactor temperatuur te begrijpen en te modelleren (Bechet *et al.* 2010). Zonnestraling heeft de grootste invloed op de bioreactor temperatuur. Wanneer een bioreactor wordt geplaatst onder een tomatengewas bereikt vrijwel geen directe straling de bioreactoren en de totale hoeveelheid straling is vrij klein. Dit betekent ook dat de invloed van de zonnestraling op de bioreactor temperatuur klein is. Daarom kan worden aangenomen dat de temperatuur van een algenreactor onder een tomatengewas steeds gelijk is aan de temperatuur van de kaslucht. Wanneer de fotobioreactor in een afzonderlijk kascompartiment wordt geplaatst wordt deze beïnvloed door de volledige zonnestraling. In dit geval wijkt de reactor

temperatuur sterk af van de kaslucht temperatuur en is het niet aanvaardbaar ervan uit te gaan dat deze gelijk is aan de kasluchttemperatuur. De bioreactor temperatuur moet afzonderlijk worden gemodelleerd. Bechet *et al.* (2010) ontwikkelde hiervoor een mechanistisch model dat de bioreactor temperatuur beschrijft voor een verticaal fotobioreactorsysteem als functie van statische en dynamische parameters op basis van de warmtebalans in de volgende vergelijking:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = Q_{ra,pbr} + Q_{ra,d} + Q_{ra,D} + Q_{re,s} + Q_{ra,a} + Q_{re,a} + Q_{ra,g} + Q_c + Q_{ev} + Q_b + Q_{cond}$$

T is de temperatuur in de fotobioreactor (K), ρ is de dichtheid van de vloeistof (kg m^{-3}), C_p is de specifieke warmtecapaciteit van de vloeistof (J kg^{-1}), V is het volume van de vloeistof (m^3), $Q_{ra,pbr}$ is de straling van de reactor zelf, $Q_{ra,d}$ en $Q_{ra,D}$ zijn de diffuse en directe zonnestraling, $Q_{re,s}$ en $Q_{re,a}$ zijn de van de grond gereflecteerde zonnestraling en warmtestraling, $Q_{ra,a}$ and $Q_{ra,g}$ zijn de warmtestraling van lucht en grond, Q_c is de warmteoverdracht door convectie, Q_{ev} is warmteoverdracht door evaporatie, Q_b is de warmteoverdracht door luchtballen en Q_{cond} is de warmtegeleiding naar de grond in Watts [W].

De warmtecapaciteit van de plastic buizen zelf werd verwaarloosd omdat deze klein in vergelijking met de warmtecapaciteit van het water. Dit mechanistische model werd als basis genomen om de temperatuur in de fotobioreactoren te modelleren. Als input werd de straling gebruikt die op elke buis werd berekend met het RAYPRO lichtmodel. Voor elke buis werd de temperatuur uitgerekend.

3.4 Metingen algenteeltsystemen op tuinbouwbedrijven

Op de bedrijven van twee tuinbouwondernemers werden de fysieke gegevens van hun experimentele algen productiesystemen verzameld. De groei omstandigheden (licht, temperatuur, pH, CO_2) werden gevolgd met verschillende sensoren en de algen productiviteit werd bepaald door meting van de biomassa. Het eerste algen productie systeem bestaat uit horizontale buisvormige fotobioreactoren (PBR systeem) en het tweede systeem was een race way pond (RWP systeem). Een overzicht over de twee algenproductie systemen geeft Tabel 8. In de gemonitorde systemen werden verschillende soorten algen gekweekt. In het PBR systeem werd *Nannochloropsis oculata* geproduceerd en in het RWP systeem *Nannochloropsis salina*. Beide opkweek culturen werden verkregen van het bedrijf LGem en vereisen zoute omstandigheden om te groeien.

Tabel 8. Overzicht twee algenteeltsystemen op tuinbouwbedrijven voor het monitoren van groeiomstandigheden en algenproductie

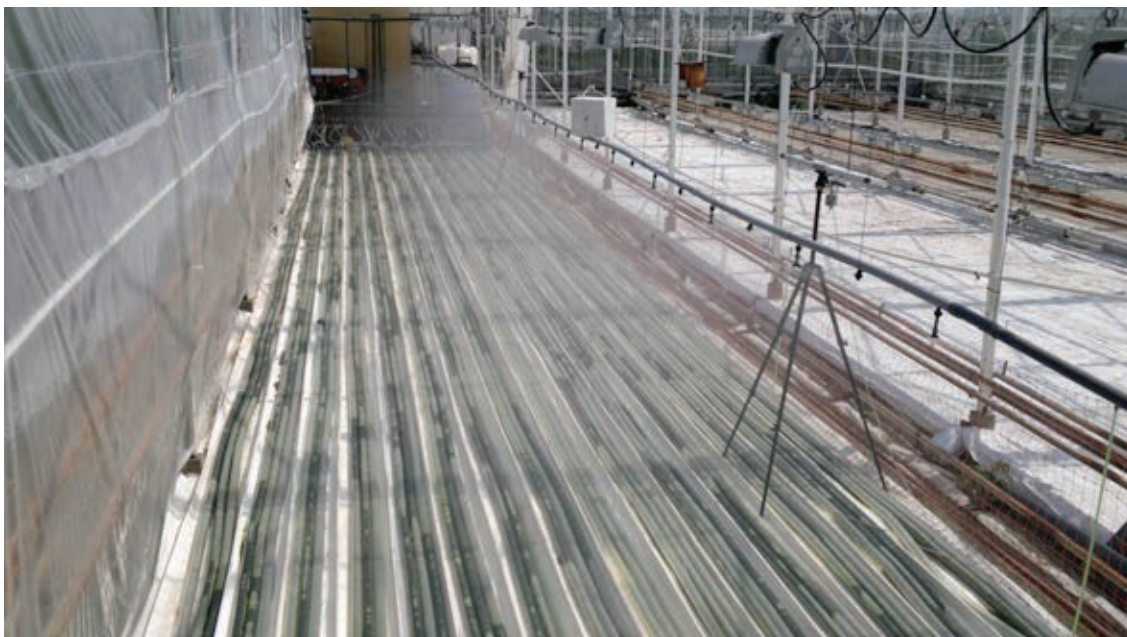
Specificaties	PBR	RWP
Teler	1	2
Algen soort	Nannochloropsis oculata	Nannochloropsis salina
Productie systeem	Buisvormige horizontale fotobioreactoren	Race way pond, algenvijver
Teeltopervlak reactor (m^2)	87.5	48.8
Diepte/diameter reactor (cm)	5.5	19
Volume reactor (m^3)	2.5	9.3

3.4.1 Horizontale buisvormige fotobioreactor

Een horizontale buisvormige fotobioreactor (PBR systeem) is geïnstalleerd op het tuinbouwbedrijf NewPlant (teler 1) in De Lier (52 ° 0'N 4 ° 26'E), welke tomaten en algen naast elkaar produceert in een kas. Een van de compartimenten in de Venlo-kas is gereserveerd voor algenproductie. De teler ontwierp en bouwde zijn eigen gesloten PBR systeem (Figuur 11. en Tabel 9.). Dit systeem is gebaseerd op ervaring en kennis uit eerdere algensystemen van de teler . Het gemonitorde PBR systeem werd door de teler gebruikt als start-up systeem voor een groter algenproductiesysteem. Het systeem bestaat uit de volgende componenten (Figuur 12.):

- Tank 1 als buffer aan de voorkant van de algenbuizen
- Mengbuizen voor lucht en algen aan de voorkant van de algenbuizen
- Transparante algenbuizen uit polyethyleen (PBR)
- Tank 2 als buffer van algen aan de achterkant
- Algen verdeelbuizen (groen)
- Lucht verdeelbuizen (blauw)
- 1 water pomp om algen te laten recirculeren
- 1 luchtpomp voor circuleren van lucht en voor ontgassing
- 1 luchtpomp voor overdruk in het systeem
- Sprinkler voor het koelen van de PBR met water

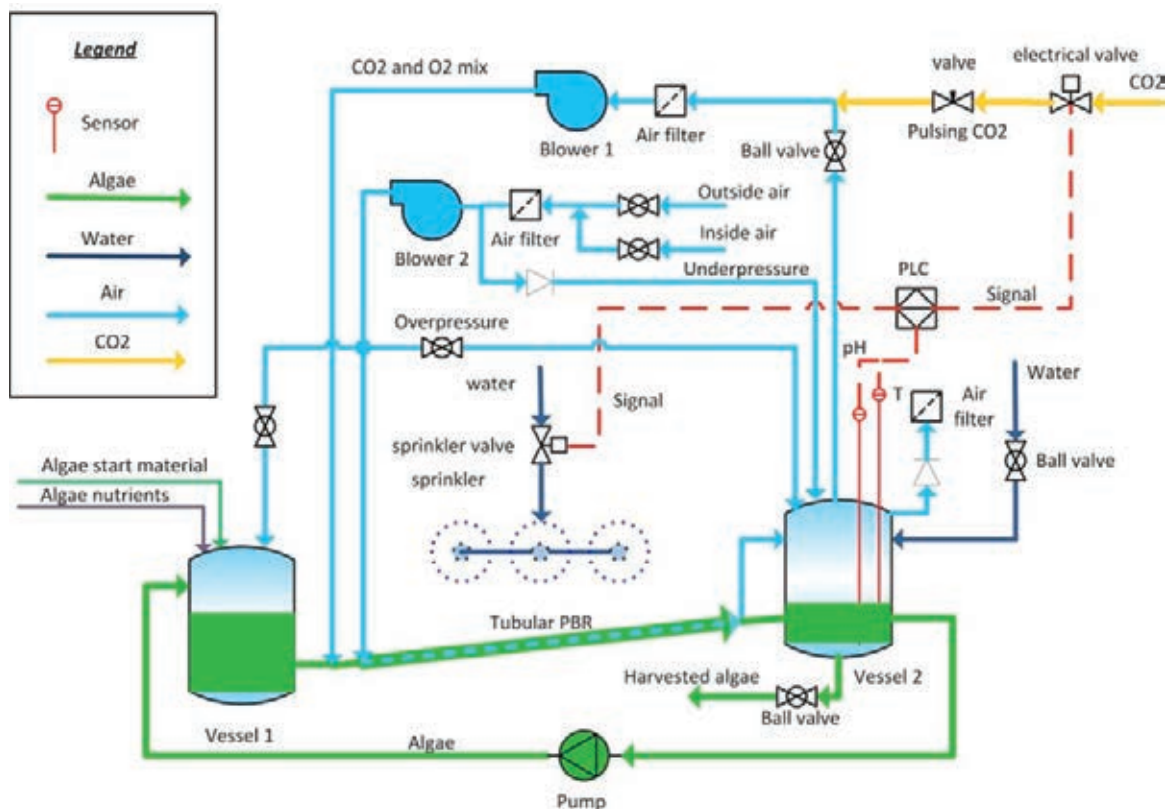
Algen groeiomstandigheden werden gemonitord met behulp van diverse sensoren. In Tabel 10. worden de in de PBR geplaatste sensoren weergegeven en Figuur 12. toont de posities van de 17 geïnstalleerde sensoren in het systeem. Gemeten parameters in het PBR systeem waren: pH van de algenvloeistof, CO₂ concentratie van de circulerende lucht, hoeveelheid gedoseerde zuivere CO₂, algen temperatuur en de DO₂ niveau van de algenvloeistof. De algen temperatuur werd gemeten op drie plaatsen aan het begin van een buis, aan het einde van dezelfde buis en in tank 2. DO₂ en de pH werden gemeten in tank 1 en 2. Variaties in pH, DO₂ en temperatuur in het systeem kan op deze manier worden vastgesteld. De tijd dat de sprinklerinstallatie voor koeling is geactiveerd werd gemeten met een 0/1 contact in de datalogger. Met sensor *Ee* werd het totale elektriciteitsverbruik van de waterpomp en de twee luchtpompen gemeten. Daarnaast werd de droge stof van de geoogste algen bepaald. Hiervoor werden de algen gedroogd.



Figuur 11. PBR systeem bij Newplant, kascompartiment met algenproductie naast tomatenproductie

Tabel 9. Afmetingen PBR systeem bij Newplant

Afmetingen	Waarde	Eenheid
Volume algen	2475	l
Totaal teeltoppervlak reactoren	87.5	m ²
Afmetingen tussen buizen	0	m
Reactor lengte	25	m
Reactor breedte	3,5	m
Aantal buizen	45	-
Diameter buizen	55	mm



Figuur 12. Layout van het PBR systeem bij Newplant en plaatsen van sensoren

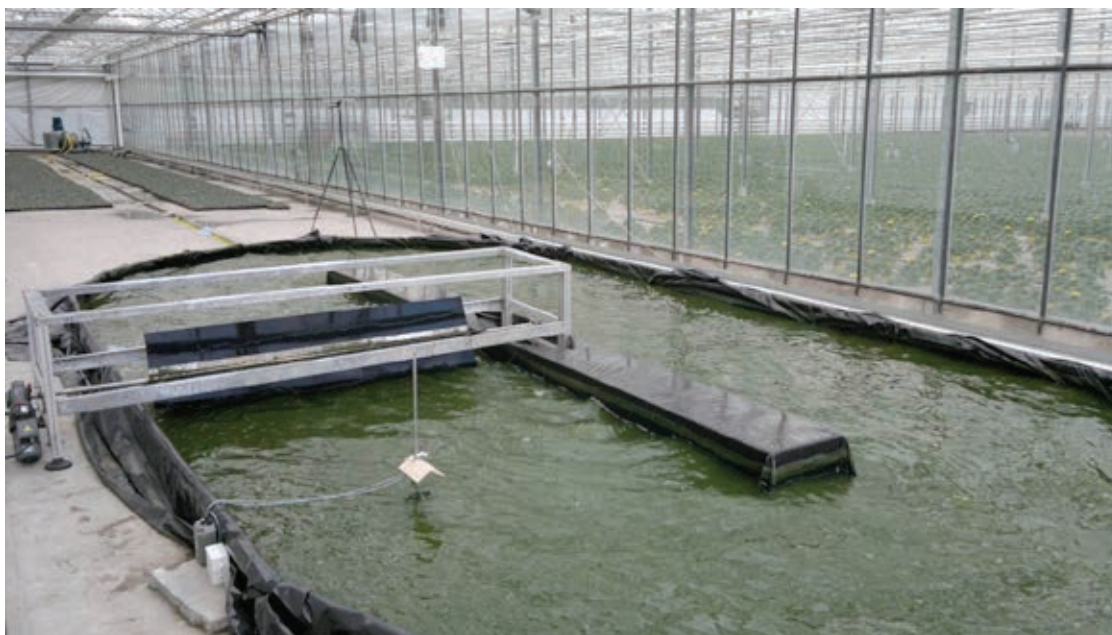
Tabel 10. Sensoren geplaatst in PBR systeem bij Newplant

Meting	Sensor	Eenheid	Aantal sensoren	Interval meting
pH algenvloeistof	pH	pH	2	1 min
PAR licht in de kas	PAR	W/m ²	2	1 min
CO ₂ gas concentratie in systeem	CO ₂	%	1	1 min
Relatieve luchtvochtigheid kaslucht	RH	%	2	1 min
Temperatuur kaslucht	T	°C	2	1 min
Hoeveelheid CO ₂ dosering	CO ₂ flow	L/min	1	1 sec
Opgelost O ₂ in algenvloeistof	DO ₂	mg/L	2	1 min
Temperatuur algenvloeistof	Talg	°C	3	1 min
sprinkler systeem voor koeling	Sprinkler	on/off	1	1 sec
Electriciteits verbruik	Ee	kWh	1	Counter

3.4.2 Raceway pond systeem

Het tuinbouwbedrijf Bosplant (teler 2) kweekt potplanten in 's Gravenzande (52 ° 0'N 4 ° 15'E). De kweker heeft zelf een open race way pond, een algenvijver gebouwd met een volume van 9,3 m³ in een aparte kasafdeling (Figuur 13.). Het systeem is geïnstalleerd door de teler zelf om ervaring op te doen met algenproductie. De teler is geïnteresseerd in het kweken van algen op een eenvoudige en goedkope manier, dus bouwde hij een low-cost systeem door gebruik te maken van hergebruikt materiaal. De groeistrategie van de teler was om voor een korte tijd in de zomermaanden algen te telen, wanneer de potplanten prijzen laag zijn. De afmetingen van de RWP en de procesparameters worden in Tabel 11. en Tabel 12. weergegeven.

Tabel 13. toont een lijst met geïnstalleerde sensoren om het RWP-systeem te monitoren. De posities van de geïnstalleerde sensoren zijn weergegeven in Figuur 14. Sensor Ee meet het elektriciteitsverbruik van het meng rad. Andere sensoren monitoren in de RWP de temperatuur en de pH van de algenvloeistof. De sensoren werden gemonteerd op een statief. Aangezien directe bestraling van zonlicht de meting zou kunnen beïnvloeden, werd voor de temperatuur metingen een afdekking geïnstalleerd net boven het wateroppervlak, zodat de drie sensoren geen direct zonlicht opvangen. Twee temperatuur sensoren werden geïnstalleerd om temperatuurverschillen tussen bodem en oppervlak van de vijver te meten. Daarnaast werd de droge stof van de geoogste algen bepaald. Hiervoor werden de algen gedroogd.



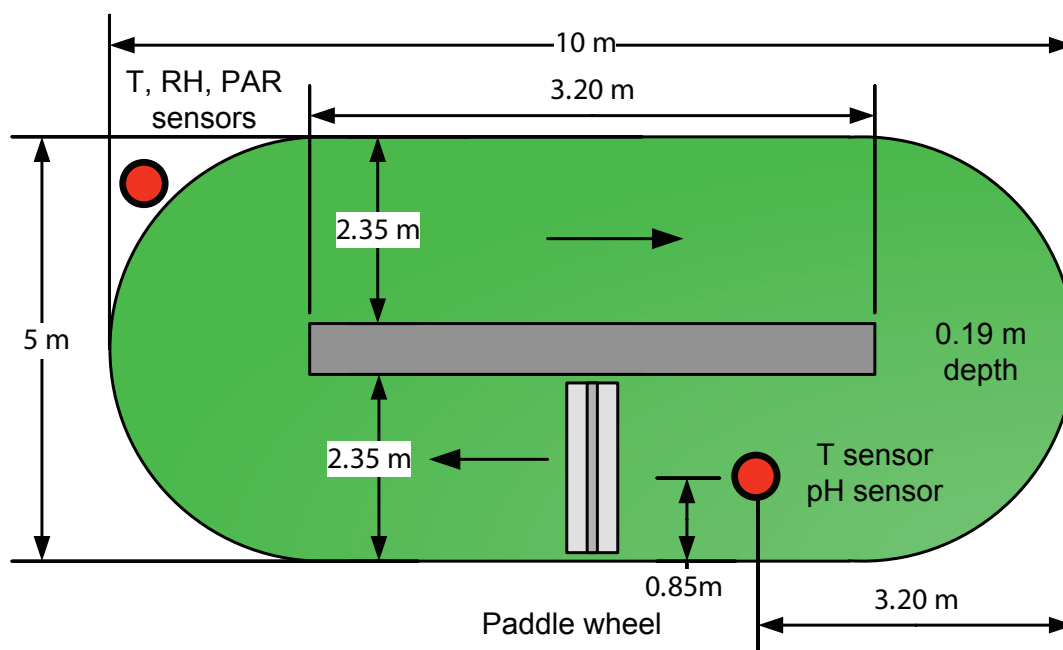
Figuur 13. RWP systeem bij Bosplant, algenvijver in een kas naast de potplanten productie in de zomermaanden

Tabel 11. Afmetingen RWP systeem bij Bosplant

Afmeting	Waarde	Eenheid
Volume algen	9267	l
Totaal teeltoppervlak	48.8	m ²
Lengte vijver	10	m
Breedte vijver	5	m
Diepte vijver	0.19	m

Tabel 12. Procesparameter in RWP systeem bij Bosplant

Procesparameter	Waarde	Eenheid
Capaciteit meng rad	10.5	m ³ /h
Circulatie tijd algen in vijver	53	s
Snelheid algen in vijver	0.39	m/s
Maximaal elektriciteitsverbruik	0.18	kW



Figuur 14. Layout van het RWP systeem bij Bosplant en plaatsen van sensoren

Tabel 13. Sensoren geplaatst in PBR systeem bij Newplant

Meting	Sensor	Eenheid	Aantal sensoren	Interval meting
pH algenvloeistof	pH	pH	1	1 min
PAR licht in kas	PAR	W/m ²	1	1 min
Relatieve vochtigheid kaslucht	RH1	%	1	1 min
Temperatuur kaslucht	T1	°C	1	1 min
Temperatuur algenvloeistof	T	°C	2	1 min
Electriciteits verbruik	Ee	kWh	1	Counter

3.5 Experimentele algenteeltsystemen in een kas

3.5.1 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 15.). De kas heeft een afmeting van 9.60 m * 15 m en een bruto oppervlak van 144 m², netto betaalbaar oppervlak is 125 m². De kas is voorzien van een diffuus glas als kasdek materiaal met een hemisferische transmissie van 82% en een haze van 71%. Om ook in de wintermaanden experimenten uit te kunnen voeren is de kas voorzien van assimilatie lampen (SON-T) met in totaal 90 µmol/m²/s (5.000 lux/m²). 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/m². 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).

De kas wordt automatisch geregeld door een klimaatcomputer (Hoogendoorn). Voor de eerste 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 in de winterperiode. Het schermdoek gaat dicht in de nacht van zonsondergang tot zonsopgang. Bij een lichtniveau < 100 W/m² blijft het energiescherm ook overdag dicht. In de eerste proefperiode is verder niet verneveld of gekoeld.



Figuur 15. Proeffaciliteit algenteeltsystemen in een kas bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk bestaande uit zes verticale algenbuisreactoren.

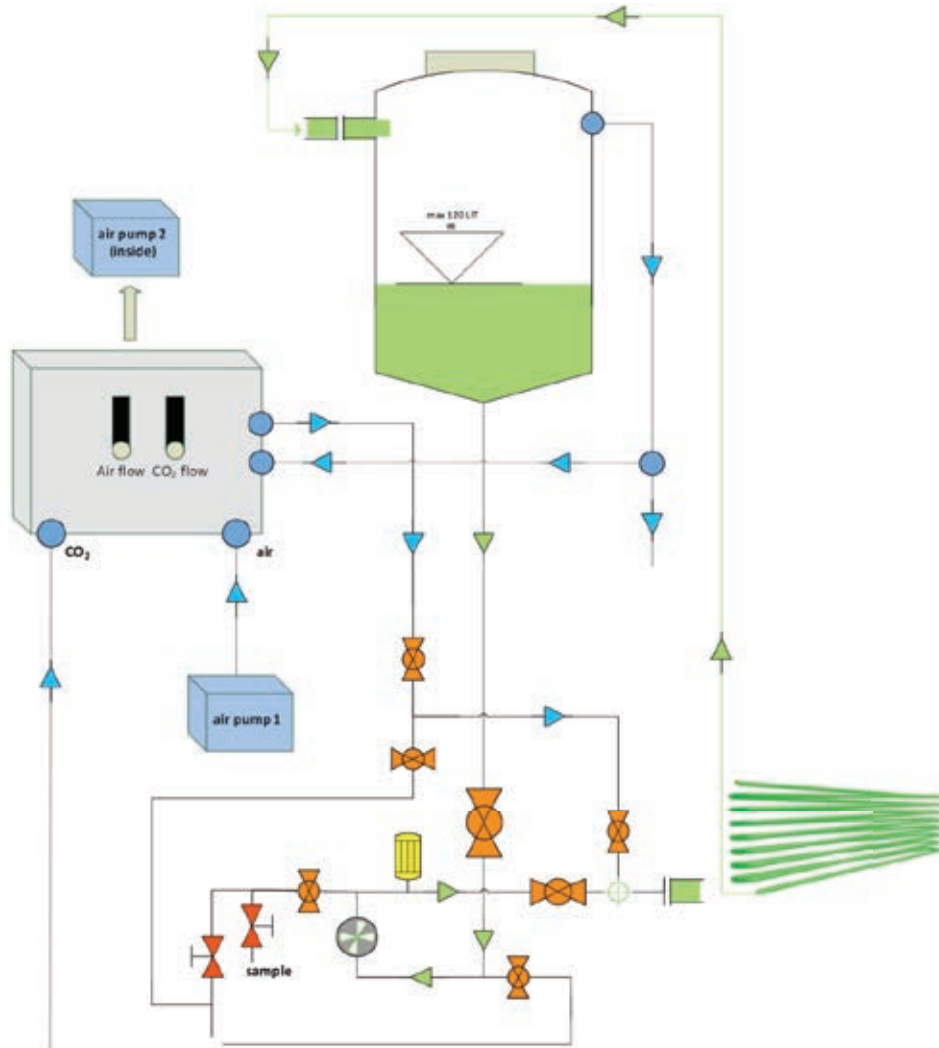
3.5.2 Algenbioreactoren en regeling

De reactoren zijn van het type zoals ontwikkeld door LGem (hoofdstuk 4.6 en Figuur 16.). 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 CO₂ 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. Zowel de overdruk luchtstroom als de CO₂ worden gemengd in de luchtcirculatiepomp en vandaaruit in de reactor gebracht. De dosering van CO₂ wordt gereguleerd door een controller op basis van de pH. De setpoint van de pH wordt gehandhaafd door meer of minder CO₂ te doseren. Dit CO₂ doseren kan door middel van een continue flow, of door een puls signaal die gemoduleerd kan worden. Er wordt zuivere CO₂ 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, volgens receptuur (hoofdstuk 7.3) wordt handmatig klaargemaakt vanuit geconcentreerde A/B/C bakken. Het vullen van de reactoren vindt plaats vanuit de voorraadvaten door middel van een pomp 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 16. Schematische weergave van de opbouw van de fotobioreactoren in Bleiswijk

3.5.3 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.

De algenreactoren zijn elk uitgerust met het standaard meetsysteem geleverd door LGem (CO₂ 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 CO₂ sensor geplaatst in alle buffervaten, waarmee de CO₂ 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.

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.

In Tabel 14. is een overzicht gegeven van alle gemeten parameters.

Tabel 14. Overzicht meetparameters en frequentie van data-acquisitie in fotobioreactoren in Bleiswijk

Parameter meting	Locatie meting	Frequentie meting
Buiten		
Stralingssom	meteotoren	5 min
Kas		
kastemperatuur	meetbox kas	5 min
CO ₂ concentratie	meetbox kas	5 min
straling binnen	meetbox kas	5 min
schermdoekstand	meetbox kas	5 min
belichting aan/uit	meetbox kas	5 min
Algenreactor		
pH 1	alle PBR's uitgestuurde voeding	1 min
pH 2	alle PBR's na eerste omloop	1 min
pH 3, 4, 5	PBR 4, om de andere omloop	1 min
water temperatuur	bij elke pH sensor	1 min
CO ₂ concentratie	in elk buffervat	1 min
gedoseerde CO ₂	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

3.5.4 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.

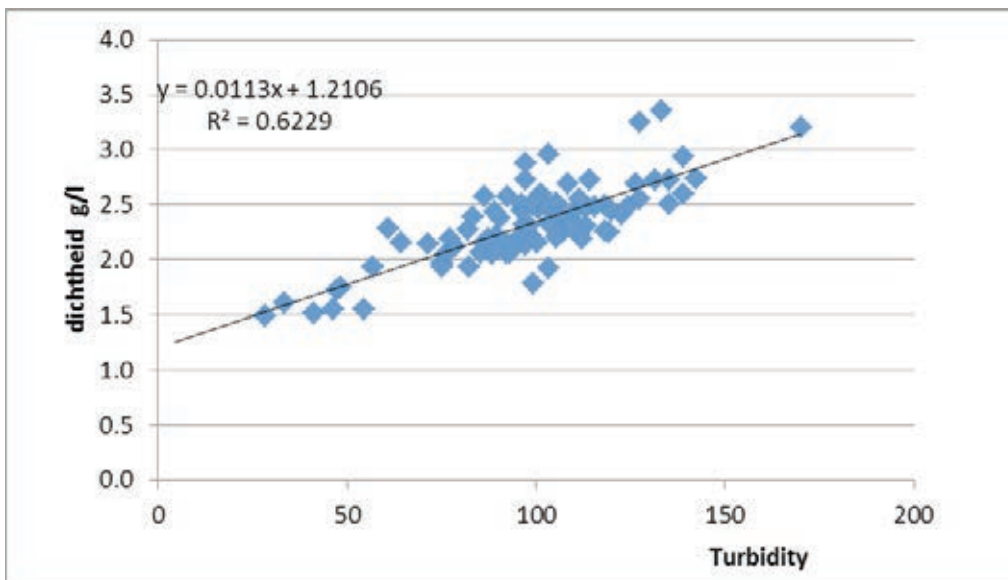
Een reïncultuur en 2 liter voorkweek van *C. sorokiniana* zijn besteld bij het CCALA (Culture Collection of Autotrophic Organisms, Institute of Botany, Academy of Sciences of the Czech Republic, Centre of Phycology, Dukelská 135, T EBO CZ-379 82. De dichtheid van de voorkweek bedroeg 0.5 g/l. Van hieruit is een verdere voorkweek uitgevoerd, tot 6 liter met een dichtheid van ruim 4 g/l. Na ontsmetting van alle reactoren werd de voorkweek van op 2 oktober 2012 geënt in de zes PBR (1 l per reactor). Na verdunning bedroeg de dichtheid ca. 0.03 g/l. De eerste teelt werd beëindigd op 14 december 2012.

3.5.5 Algenoogst en biomassaproductie

In de eerste experimenten in Bleiswijk wordt *Chlorella sorokiniana* geteeld. Een protocol is ontwikkeld voor de oogst van algen. Uitgangspunt is een dagelijkse oogst (5 dagen per week), waarbij een zodanig gedeelte van de oplossing wordt afgetapt dat een dichtheid tussen 2 en 3 g/l aan algen wordt gehandhaafd. De monsters voor droge stof bepaling worden gefiltreerd over gewoon filtreerpapier en na weging gedroogd in porseleinen schaaltes en na enkele uren drogen bij 80 °C terug gewogen.

Er is geëxperimenteerd met een turbidity meter (Dr Lange), hierin kunnen verse monsters direct worden doorgemeten. Uit een serie parallel bepalingen bleek een goede lineaire correlatie te bestaan tussen de werkelijke dichtheid en de turbidity, zodat deze methode kan worden benut om direct en snel de dichtheid te kunnen schatten (Figuur 17.). Voor productie bepaling werd de droge stof methode worden gehanteerd. Dit werd wekelijks doorgevoerd aan koel en donker geplaatste verzamelmonsters.

Ook zijn er experimenteel metingen gedaan met de spectrofotometer aan monsters. Deze methode moet nog verder uitgewerkt worden, maar biedt zeker mogelijkheden om ook de dichtheid te meten. Dit zal in toekomstig onderzoek nader worden uitgezocht.



Figuur 17. Correlatie tussen de gemeten algendichtheid via de droge stof methode en de gemeten turbidity van verse algenmonsters uit de fotobioreactoren in Bleiswijk

4 Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers

Tijdens regelmatige interactieve sessies met als doel kennisuitwisseling van tuinbouwondernemers zijn verschillende algenteeltsystemen in kassen bezocht en geanalyseerd. In dit hoofdstuk zal een korte technische beschrijving van de diverse systemen worden weergegeven. Foto's zullen het werkingsprincipe uitleggen. Een sterkte-zwakke analyse wordt gegeven welke is vastgesteld door discussie in de ondernemersgroep.

4.1 Algenteeltsysteem Lans, Maasdijk

Het algenteeltsysteem bij Lans, Maasdijk is sinds januari 2010 operationeel op de locatie Maasdijk. Eerder is er ervaring opgedaan met een ander type algensysteem in op de locatie Zeeland. De algen werden afgezet als voer voor mosselen aan Koninklijke Prins & Dingemans.

Het systeem bestaat uit drie groepen algenbuizen met dezelfde inhoud. De buisdiameter varieert: 160 mm, 110 mm, 63 mm. Om de inhoud hetzelfde te houden varieert ook de totale lengte van de buizen per groep. De buizen zijn geïnstalleerd in een kas onder tomatengoten: 2 naast elkaar, vier naast elkaar, zes naast elkaar per goot afhankelijk van de diameter. De buizen liggen een stukje boven de grond om lichtpenetratie van de onderkant mogelijk te maken. Het algenwater wordt met ca. 5 m³ per h rondgepompt, een verversing van 3 keer per h. Dit werd eerst gedaan met een membraanpomp, echter deze verrotte snel, nu is deze vervangen door een centrifugaal pomp. OCAP CO₂ wordt met behulp van een compressor in de buis gepompt. Gemeten worden de volgende gegevens: temperatuur, EC, pH in algenwater, CO₂ boven mengbak.

De algenproductie is nog te laag. Ca. 6-7% van het invallende licht in de kas bereikt de bioreactoren. De buizen worden schoongehouden door middel van een spons welke automatisch door het systeem wordt gestuurd. De kosten voor de installatie worden geschat op ca. €6-8 per m² buis.



Figuur 18. Algenteeltsysteem bij Lans, Maasdijk

Vragen die opkomen tijdens het bezoek aan het systeem: Is de hoeveelheid licht die de algenreactoren bereikt voldoende? Is het CO₂ niveau in de reactoren voldoende? Is de nutriëntensamenstelling op order?

Nadere analyses laten zien dat algen en tomaten concurreren om licht in de configuratie bij Lans. De relatief lage groei percentage algen kan (voor een groot gedeelte) verklaard worden door lage lichtintensiteiten. Of er nog andere factoren voor de groei beperkend zijn is niet in detail onderzocht. De algen groei is lager met grotere buisdiameters. Het systeem zou t.a.v. van de groeifactor licht verder kunnen worden verbeterd door naar verhouding de hoeveelheid licht voor de algen te verhogen. Mogelijkheden hiervoor zijn: algen in lege kas zonder tomaat: meer reactoren naast elkaar, reactoren stapelen; kortere groeiperiode tomaat: algen alleen in bepaalde periodes van het jaar groeien, minder tomatenrijen, minder LAI zonder groeireductie tomaat; algenbuizen op andere locatie in kas: pad, gevel.

4.2 Algenteeltsysteem Newplant, De Lier

Er zijn in 2011 twee algen teeltsystemen aangelegd bij Newplant, De Lier. 1. Gesloten systeem voor opkweek algen en 2. Open systeem voor productie algen. Geteeld wordt op in 2011 *Nannochloropsis spp.*, eerder was dit *Chlorella spp.* Van *Chlorella* werd eerder ca. 1.5 kg/m²/jaar geoogst.

Het gesloten systeem bestaat uit 15*6 groeibuizen met een diameter van ca. 30 mm en een lengte van ca. 25 m. De buizen bestaan uit stevige CO₂ darmen, de toevoerpijpen zijn gemaakt van PVC met kranen erop. Door een hoogteverschil loopt het algen-water van een verzamelvat passief door de buizen, aan de achterkant zorgt een pomp voor het terugpompen naar het vat aan de overkant. CO₂ wordt toegevoerd door een RVS spiraal.

Uitdagingen van dit systeem zijn: opwarming bij veel instraling, hiervoor wordt gebruik gemaakt van een schaduwdoek; lage stroomsnelheid, wat is een goede stromingssnelheid?

Het open systeem bestaat uit 3*16 goten op de grond met een breedte van ca. 20cm en een lengte van 38m. 40m³ water worden per uur rondgepompt om voldoende stroomsnelheid te halen. Het pompvermogen is 1.1 kW op 600m². De pH wordt gehouden op ca. 8.0, naar inmengen van CO₂ wordt deze lager, soms tot 6.0. Gemeten worden: pH en temperatuur, CO₂ wordt niet gemeten. Geoogst wordt met behulp van een centrifuge. Op dit moment worden geen algen afgezet.

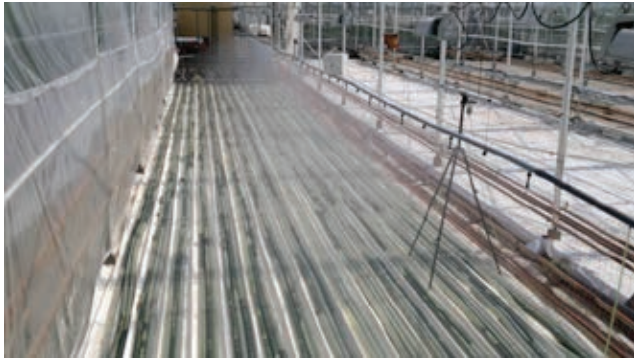
Uitdagingen van dit systeem zijn: zinken van algen; lage stroomsnelheid, wat is een goede stromingssnelheid?; vervuiling systeem (chloren nodig); wat is een geschikte bemesting?.

Voordeel: verdampingskoeling; geen accumulatie O₂ (ca. 8% O₂ in systeem).



Figuur 19. Algenteeltsystemen 2011 bij Newplant, De Lier

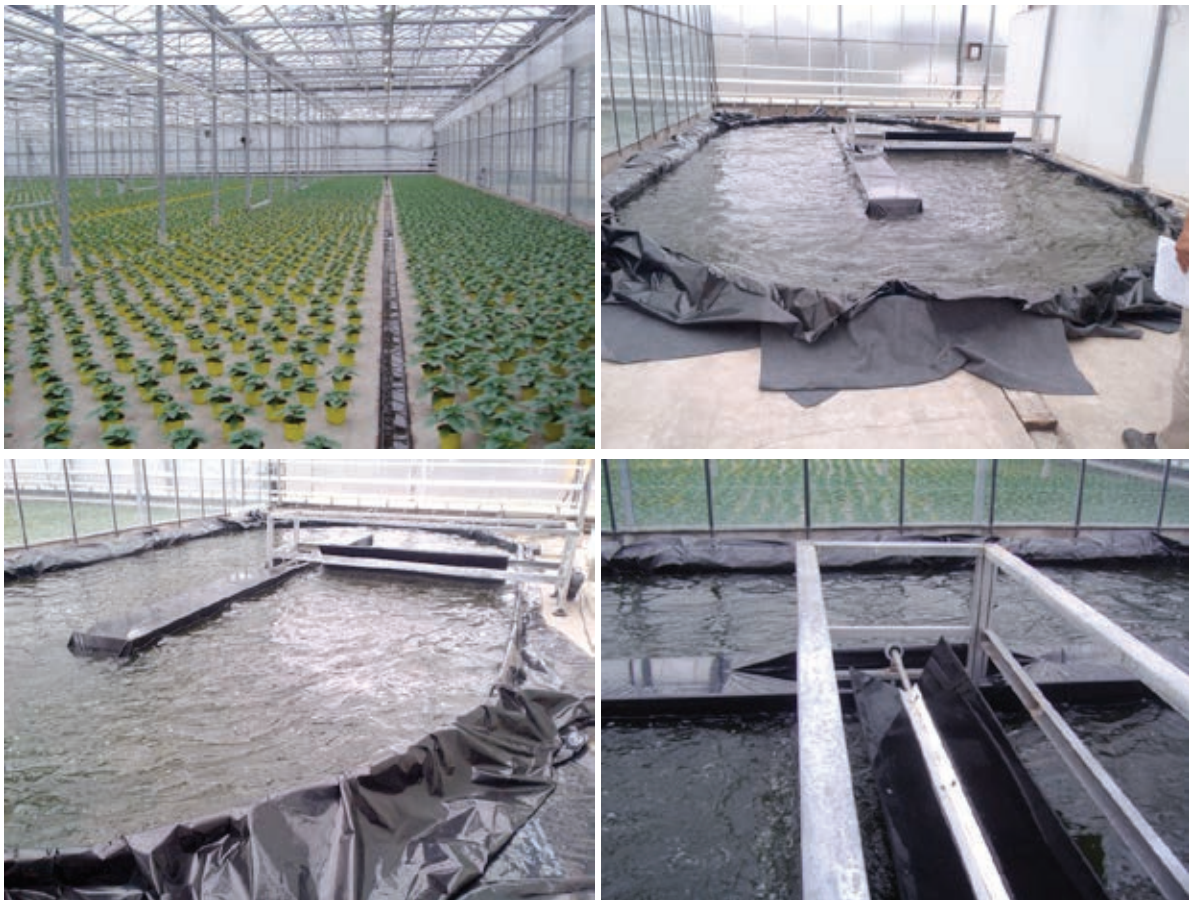
In 2012 werden beide systemen vervangen door een verder doorontwikkeld systeem bestaande uit buizen met luchttoevoer. Het nieuwe systeem heeft een oppervlak van 87.5 m² en een volume van 2.5 m³. Het systeem bestaat uit twee tanks voor ontgassing, mixen van algen en als buffer, transparante algenbuizen, luchttoevoerslangen, een waterpomp, twee luchtpompen en een sprinklerinstallatie voor koeling. Geteeld wordt *Nannochloropsis oculata*.



Figuur 20. Algenteeltsysteem 2012 bij Newplant, De Lier

4.3 Algenteeltsysteem Bosplant, 's Gravenzande

Bosplant, 's Gravenzande, heeft een open race way pond, een algenvijver, op het potplantenbedrijf opgebouwd. Het gaat om een open pond systeem welke op een eenvoudige manier met beschikbare materialen zelf ontworpen en gebouwd is. Het systeem heeft een volume van ruim 9000 l op een oppervlak van ca. 50 m². De lengte is 10m, de breedte 5m en de diepte van de waterlaag 19 cm. Een meng rad van ca. 180 W zorgt voor menging en turbulentie. Gasuitwisseling vindt plaats aan het wateroppervlak met de lucht. Het idee is om een tijdelijke combinatie van potplanten- en algenproductie te creëren. In de zomer maanden bij lage prijzen voor potplanten en hoge instraling worden op het teeltoppervlak algen geproduceerd als additionele bron van inkomsten. Uitdagingen van het systeem: goede menging; voldoende CO₂ in het systeem; vervuilingsgevaar. Voordelen: verdampingskoeling, laag energieverbruik, lage kosten voor installatie.



Figuur 21. Algenteeltsysteem bij Bosplant, 's Gravenzande

4.4 Algenteeltsysteem Hydro Huisman, Bergerden

Het algenteeltsysteem bij Hydro Huisman in Bergerden is ontwikkeld en gebouwd door de projectgroep bestaande uit KEMA/ Ingrepro/Ideeuwes/Hydro Huisman. Het algenteeltsysteem is bedoeld als schermvervanging voor een potplantenproductie, op deze manier kan meerwaarde per teeltoppervlak worden gecreëerd. Het gaat om een open systeem van een algen laag boven een potplantentafel. De kosten van het systeem qua investering en verbruik moeten nog worden in kaart gebracht, de minimaal nodige prijs om rendabel met dit systeem te telen evenwel. Koppelingen tussen potplanten productie en algen productie in dit systeem zijn als volgt te omschrijven: Recirculatiewater van potplantenproductie wordt voor algenteelt gebruikt; zonlicht wordt eerst door algen, rest door potplanten gebruikt; CO₂ in kas wordt door algen en potplanten gebruikt; energietoevoer aan kas voor potplantenproductie, temperatuur voor algen gelijk.

Metingen worden uitgevoerd aan kas klimaat, PAR boven en onder algensysteem, nutriënten samenstelling, energieverbruik en algengroei.

De sterktes en zwaktes van dit systeem per groeifactor zijn samengevat in Tabel 15.



Figuur 22. Algenteeltsysteem bij Hydro Huisman, Bergerden

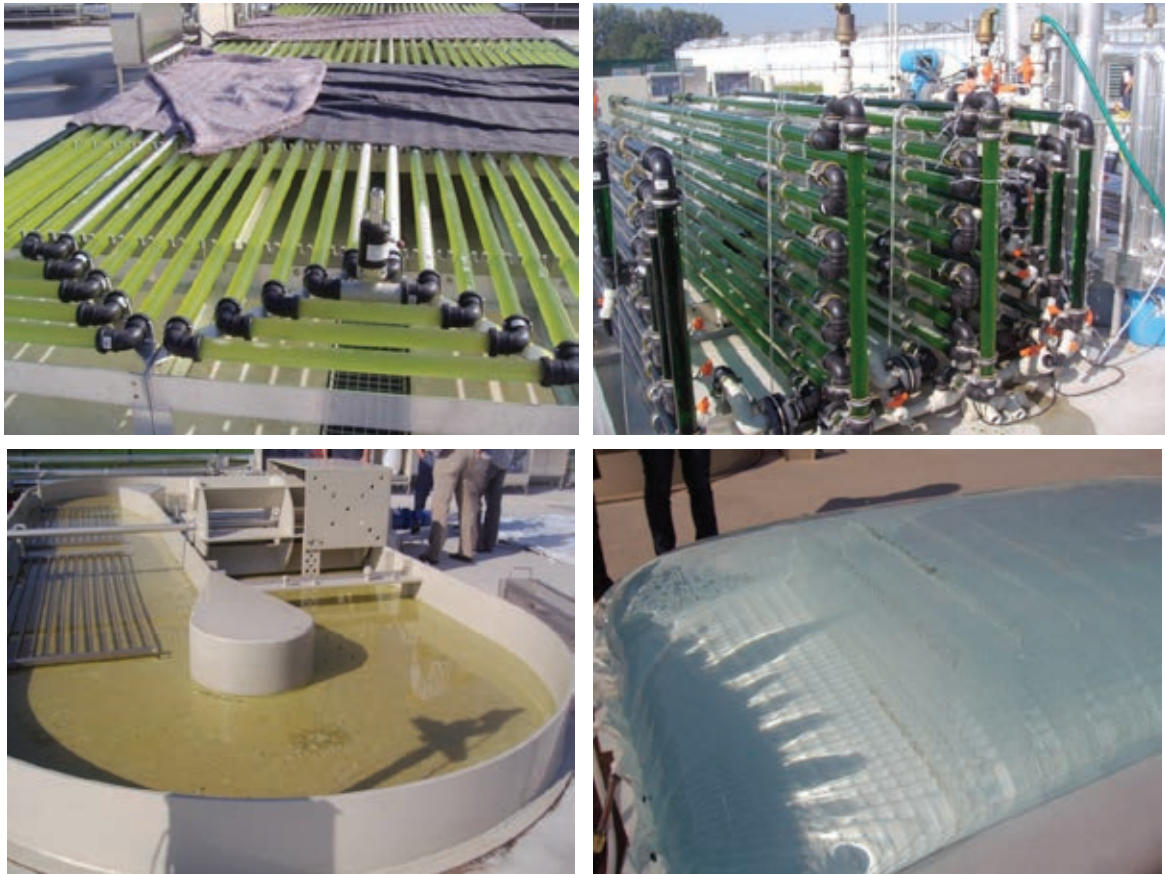
Tabel 15. Sterktes en zwaktes van het algenteeltsysteem bij Hydro Huisman per groeifactor

Groeifactor	Sterktes	Zwaktes
Licht	<ul style="list-style-type: none"> - Algen ontvangen veel licht boven het potplanten gewas 	<ul style="list-style-type: none"> - Alleen lage algencentraties mogelijk anders te veel lichtonderschepping voor potplanten - Opstelling in kas waar scherm vaak dicht gaat, niet apart voor proef te regelen - Lichtintensiteit opgevangen door algen, op donkere dagen te laag voor potplanten - Indien per dag regelbaar gevaar van te veel licht voor potplanten.
Temperatuur	<ul style="list-style-type: none"> - Gelijk aan kastemperatuur - Geen extra energie voor verwarming algen nodig in winter - Verdampingskoeling door open systeem, koelt algen in zomer, verhoogt vocht in kas 	
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ concentratie in kas hoog, CO₂ in algensysteem niet beperkend? 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ concentratie daalt indien kasluchting open, bij hoge instraling naar verwachting dus lager
Nutriënten	<ul style="list-style-type: none"> - Gebruik van recirculatie water van potplanten 	<ul style="list-style-type: none"> - Gevaar van verontreiniging, nutriënten niet optimaal voor algen?
Systeem divers	<ul style="list-style-type: none"> - In algemeen kosten voor systeem beperkt? 	<ul style="list-style-type: none"> - Extra constructie boven potplanten voor algensysteem neemt licht weg, extra kosten - Lage turbulentie, algen op diverse plekken geclusterd - Open systeem: besmettingsgevaar andere algensoorten - Reiniging?

4.5 Algenteeltsystemen Algae Parc, Wageningen

Het doel van AlgaePARC (Algae Production And Research Centre) is kennis, technologieën en proces strategieën te ontwikkelen voor de duurzame productie van microalgen gebruikt als diervoeder, brandstoffen of chemicaliën op een industriële schaal. Hiervoor is in Wageningen een pilotinstallatie van diverse algenteeltsystemen buiten neergezet. Diverse installaties worden met elkaar vergeleken:

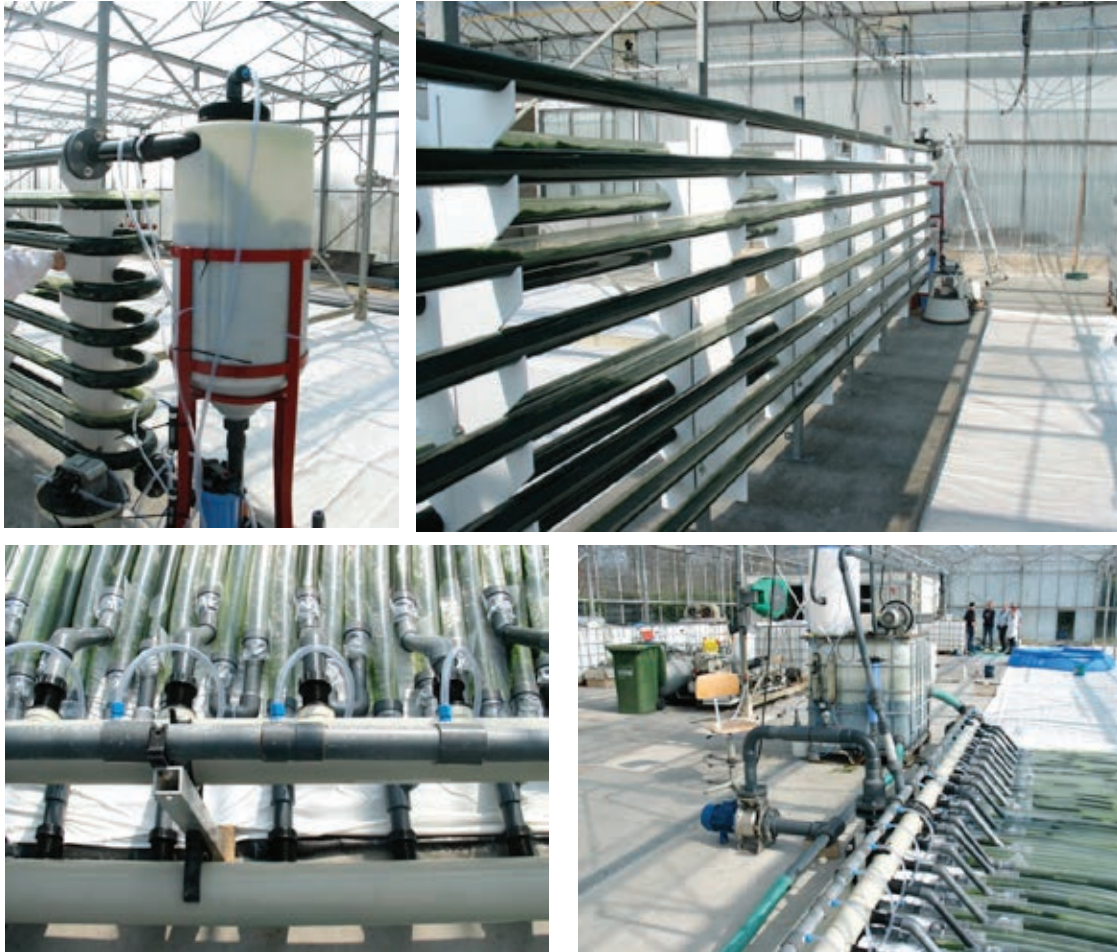
Vier grote (24 m²) en drie kleinere (2.4 m²) fotobioreactoren zijn beschikbaar. De systemen worden parallel onderzocht en vergeleken op technische, economische en duurzaamheidsaspecten. Meer informatie is te vinden op www.algaeparc.com.



Figuur 23. Algenteeltsystemen bij Algae Parc, Wageningen

4.6 Algenteeltsystemen LGem, Den Haag

LGem produceert algen in fotobioreactoren in een kas in Den Haag op een commerciële schaal. Sinds 2007 wordt vries-droog algen poeder geproduceerd en wereldwijd verkocht als voedingssupplement. Sinds 2009 is LGem een samenwerking met George Fischer Piping Systems aangegaan om gezamenlijk nieuwe fotobioreactoren te ontwikkelen en te patenteren. LGem treedt hierdoor op als leverancier van algenteeltsystemen. Meer informatie is te vinden op www.lgem.nl.



Figuur 24. LGem, Den Haag

4.7 Sterktes en zwaktes algenteeltsystemen bij tuinbouwondernemers

Verskillende aspecten van de algenteeltsystemen en de diverse groeifactoren werden separaat onderzocht, turbulentie, pompenergie, licht, temperatuur, economie. Dit leidde tot de identificatie van de in Tabel 16. samengevatte sterktes en zwaktes van de huidige algenteeltsystemen bij tuinbouwondernemers.

Tabel 16. Samenvatting sterktes en zwaktes van de huidige algenteeltsystemen bij tuinbouwondernemers

Systeem	Teler	Gewas	Sterktes +	Zwaktes -
gesloten buissysteem	Lans	tomaat	controle groeifactoren hoog	investeringskosten hoog
onder gewas			temperatuur prima	licht te laag
			turbulentie prima	productie te laag
gesloten buissysteem	Newplant	tomaat	controle groeifactoren okay	Investeringskosten hoog
naast gewas			turbulentie prima	koeling nodig
open racewaypond	Bosplant	potplanten	temperatuur prima (verdampingskoeling)	licht niet optimaal CO ₂ toevoer beperkt
naast gewas			investeringskosten laag	productie lager dan in buissystemen
(seizoen afhankelijk)			energiekosten laag	besmettingsgevaar hoog
open algen laag boven gewas	Hydro Huisman	potplanten	temperatuur prima (verdampingskoeling)	licht voor potplanten niet optimaal
			geen extra energie voor algen nodig	besmettingsgevaar hoog
			CO ₂ in kas en voor algen hoog	investeringskosten hoog turbulentie laag

Kennisuitwisseling en een aantal modelberekeningen leidden tot een aantal aanbevelingen voor huidige en toekomstige algenteelers:

- Kies afhankelijk van je markt voor een pondsysteem of een buissysteem voor meer hoogwaardige productie onder gecontroleerde omstandigheden.
- Seizoen afhankelijke combinatie van potplanten en algenteelt is mogelijk: potplanten in winter/voorjaar/najaar en algen in zomer
- Plaatselijke combinatie van algen en tomaat is weinig zinvol. In het huidige systeem krijgen algen te weinig licht. In een plaatselijke combinatie met half tomaat, half algen zijn beide systemen niet optimaal. Dus, plaatselijk van elkaar scheiden.
- Algenteeltsysteem boven werkhof i.p.v. in combinatie tomaat.
- Benut synergie-effecten infrastructuur telers voor algenteelt

Voorlopig kunnen de volgende specifieke aanbevelingen voor open pond systemen worden gegeven:

- Pond systeem in kas kan eventueel seizoen afhankelijk bijvoorbeeld als zomerteelt.
- Koeling door verdamping in principe voldoende. Zorg wel voor verhoging evaporatie op kritische momenten door een verhoogde evaporatie middels ventilatoren in kas en grote ventilatieopening.
- Gebruik eventueel schermen, alleen op piekmomenten (lichtbenutting kritischer dan temperatuur)
- Zorg voor een hoge menging van de algensoep in de racewayponds door een tweede menger voor optimale turbulentie en lichtbenutting algen (lichtbenutting kritischer dan temperatuur)
- Zorg voor een betere menging van de algensoep door luchtballen van CO₂ in het systeem te blazen voor en hogere CO₂ benutting (CO₂ benutting kritischer dan temperatuur)
- Voorkom besmetting door extra schoon te werken

Daarnaast kunnen de volgende aanbevelingen worden gegeven voor buisreactoren:

- Algen productie plaatselijk gescheiden van tuinbouwproductie zinvoller omdat dan geen concurrentie om licht.
- Het plaatsen van buisreactoren in een kas heeft voordelen, omdat de kas voor een groot gedeelte als zonnecollector werkt, en gratis energie verzameld en vasthoudt
- Buisreactoren in een kas moeten additioneel worden geklimatiseerd zowel in zomer als ook in winter
- Gebruik buffer voor afvangen temperatuurpieken (al dan niet samen met extra warmte/koude toevoer)
- Management van algenteelt enorm belangrijk, door verlengen teeltperiode kan winst worden gehaald
- Hou systeem schoon door goede ontsmetting bij teeltwisseling
- Maak niet te grote groepen i.v.m. risicomanagement.

5 Modellen algenteeltsystemen in kassen

5.1 TomAlgS integraal model algenteeltsystemen en tomatenproductie

5.1.1 Algen productiviteit TomAlgS model

De volumetrische productiviteit in DM kg/m³/jaar is een maat voor de lichtbenuttingsefficiëntie van een fotobioreactor PBR, welke toeneemt met afnemende buisdiameter en met toenemende beschikbare straling. De productiviteit per teeltoppervlak in kg DM/m²/jaar geeft aan hoe effectief het teeltoppervlak wordt gebruikt voor de algenproductie.

“Geïntegreerde productie”

Tabel 17. toont de belangrijkste kenmerken van de PBR systemen en de algenproductie in het geïntegreerde systeem bij standaardomstandigheden. De gemiddelde invallende straling op de PBR was 2,7 maal hoger bij een productie van algen op het pad dan bij de productie van algen onder het tomaten gewas. Een kleinere buisdiameter leidde tot betere lichtomstandigheden. Dit resulteerde in een volumetrische productiviteit die op de pad 3 keer hoger was dan onder het gewas in de 0.06m-PBR. De volumetrische productiviteit in de 0.06m-PBR was hoger dan in de 0.11m-PBR en 0.16m-PBR. De productiviteit was het hoogst voor de 0.11m-PBR zowel onder het gewas als op het pad, resulterend uit een relatief hoog volume en een matige lichtbenuttingsefficiëntie in vergelijking met de 0,06 M-PBR en de 0.16m-PBR.

Tabel 17. PBR afmetingen, lichtcondities en productiviteit in een gecombineerde productie van algen en tomaten in een kas, met een standaard LAI van de tomaat

Algen systeem	Onder het gewas			Op het pad		
	0.06m	0.11m	0.16m	0.06m	0.11m	0.16m
PBR	0.06m	0.11m	0.16m	0.06m	0.11m	0.16m
Aantal buizen	390	260	130	130	130	65
Volume bioreactor [m ³]	106	237	251	35	119	126
Jaarrond gemiddelde buitenstraling [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	527			527		
Jaarrond gemiddelde straling boven het tomatengewas [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	359			359		
Jaarrond gemiddelde straling boven de algenreactoren [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	30.6			82.4		
Jaarrond gemiddelde straling in de algenreactoren [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	3.2	1.8	1.2	8.7	4.7	3.3
Totale DM productie [kg/jaar]	1485	1900	1507	1487	2854	2012
Volumetrische productiviteit [kg/m ³ /jaar]	14.0	8.0	6.0	42.2	24.1	16.0
Productiviteit per teeltoppervlak [kg/m ² /jaar]	0.15	0.19	0.15	0.15	0.29	0.20
PBR volume per teeltoppervlak [m ³ /m ²]	0.0106	0.0238	0.0251	0.0035	0.0119	0.0126

“Gescheiden productie”

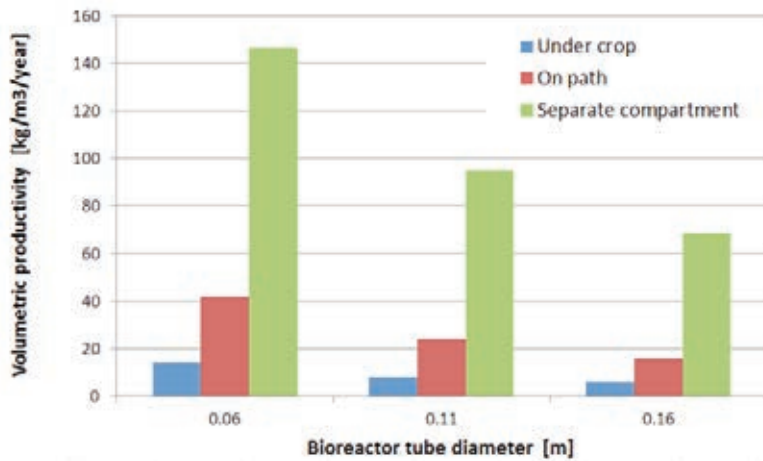
Tabel 18. geeft de belangrijkste kenmerken van de PBR systemen van een “gescheiden productie” van algen en tomaten in verschillende kascompartimenten naast elkaar weer. Twee methoden werden gebruikt om het aantal algenbuizen te plaatsen in het gescheiden compartiment. In de eerste methode wordt dezelfde hoeveelheid DM algen geproduceerd als in de “geïntegreerde productie”, dit resulteert in een kleinschalig systeem. In de tweede methode werd dezelfde hoeveelheid

buisen geplaatst als in de “geïntegreerde productie”, dit resulteert in een grootschalig systeem. De minimumbreedte van het kascompartiment voor de algen productie was 2,4 m (2,3% van het areaal), de maximale breedte was 57,2 m (55% van het areaal). De gemiddelde straling in de buizen was 14,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ voor de 0.16m-PBR, 21,0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ voor de 0.11m-PBR en 39,2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ voor de 0.06m-PBR . Dit was ongeveer 12 keer meer dan de gemiddelde stralingsintensiteit berekend voor PBR systemen onder het gewas. Door de toename in lichtintensiteit verhoogde de volumetrische productiviteit met vergelijkbare grootte. De productiviteit van de PBR per teeltoppervlak was 21 keer hoger dan in de “geïntegreerde productie”. De volumetrische productiviteit was het hoogst voor de 0.06m-PBR als gevolg van een hogere lichtbenuttingsefficiëntie, terwijl de productiviteit per teeltoppervlak het hoogst was voor de 0.16m-PBR als gevolg van meer volume per teeltoppervlak.

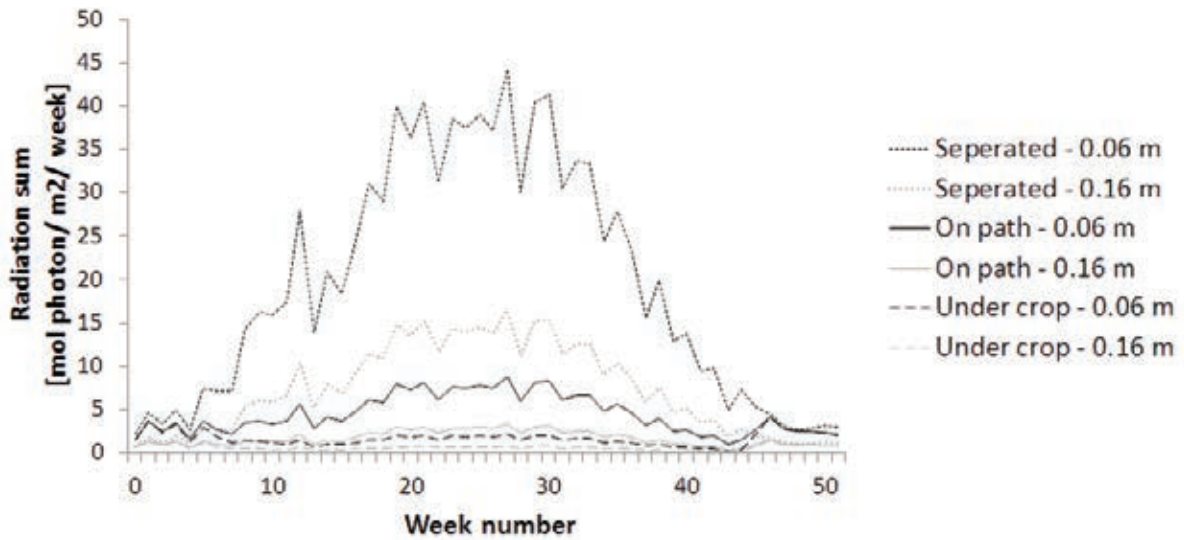
De productiviteit nam af met toenemende buisdiameter. Figuur 25. toont duidelijk de invloed van de locatie en de buisdiameter op de jaarlijkse volumetrische productiviteit. In de “geïntegreerde productie” was de productiviteit veel kleiner dan in de “gescheiden productie”. De volumetrische productiviteit was 11 keer hoger in de “gescheiden productie” vergeleken met de productie onder het gewas. De maximale volumetrische productiviteit werd gevonden in de PBR met een diameter van 0,06 m in de “gescheiden productie” met een waarde van 146,7 kg DM/ m^3 /jaar. De productiviteit per teeltoppervlak in DM kg/ m^2 /jaar was in de “geïntegreerde productie” het hoogst in de PBR met 0,11 m diameter, vanwege het hoge reactorvolume gecombineerd met een matige volumetrische productiviteit. Onder het gewas was de productiviteit was 0,19 kg DM/ m^2 /jaar in de “geïntegreerde productie”. In de “gescheiden productie” nam de productiviteit per teeltoppervlak toe met toenemende buisdiameter, de maximale volumetrische productiviteit was 6,46 kg DM/ m^3 /jaar in de PBR met 0,16 m diameter. Figuur 26. toont de wekelijkse som (mol fotonen/ m^2 /week) van de gemiddelde straling in de PBR. Figuur 27. toont de wekelijkse som (DM kg/ m^3 /week) van de volumetrische productiviteit. Het verlagen van de LAI door extra blad plukken beïnvloedde de productiviteit in de “geïntegreerde productie” positief. Wanneer de LAI werd verlaagd met 5% nam de volumetrische productiviteit met gemiddeld 52% toe, werd de LAI met 10% verlaagd was de gemiddelde toename in productiviteit 110%.

Tabel 18. PBR afmetingen, lichtcondities en productiviteit van algen en tomaten in gescheiden kascompartimenten

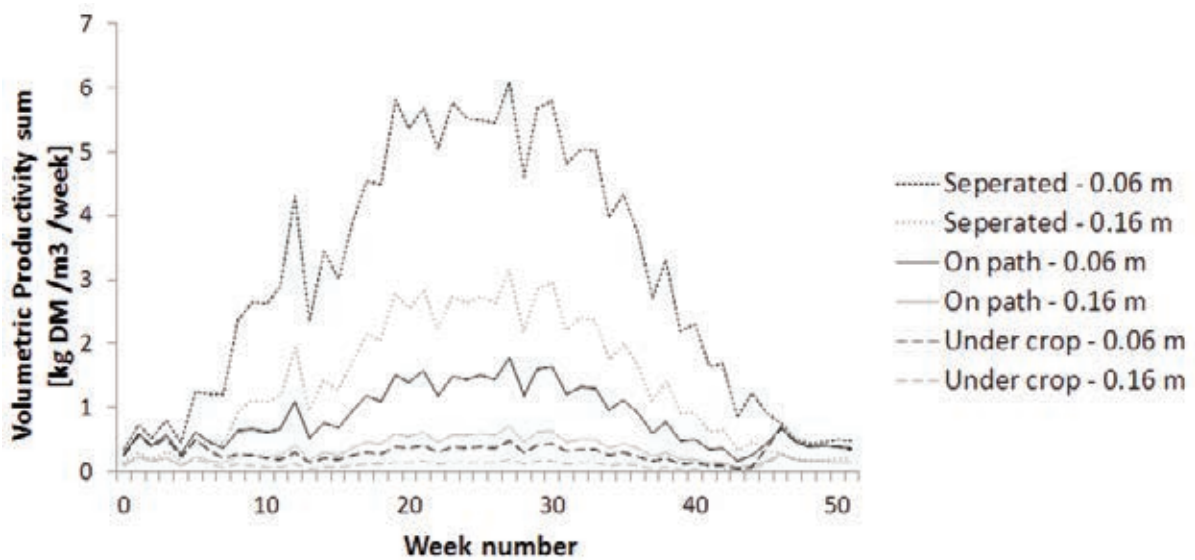
Algen systeem	Kleinschalig systeem			Grootschalig systeem		
	0.06m	0.11m	0.16m	0.06m	0.11m	0.16m
PBR						
Aantal algenbuizen geïnstalleerd	37	22	11	520	390	195
Volume bioreactoren [m^3]	10	20	21	141	356	376
Breedte kascompartiment [m]	3.0	3.2	2.4	41	57	42
Jaarrond gemiddelde buitenstraling [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	527			527		
Jaarrond gemiddelde straling boven algenreactoren [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	361	361	361	361	361	361
Jaarrond gemiddelde straling in de algenreactoren [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]	39.2	21.0	14.3	39.2	21.0	14.3
Volumetrische productiviteit [kg/ m^3 /year]	146.7	95.1	68.5	146.7	95.1	68.5
Productiviteit per teeltoppervlak [kg/ m^2 /year]	5.18	6.16	6.46	5.18	6.16	6.46
PBR per teeltoppervlak [m^3/m^2]	0.04	0.06	0.09	0.04	0.06	0.09



Figuur 25. De volumetrische productiviteit van een algensysteem in $\text{kg}/\text{m}^3/\text{jaar}$ op drie locaties in een kas met drie verschillende diameter



Figuur 26. Wekelijkse som van de gemiddelde straling in de PBR, berekend voor twee buisdiameter voor een “geïntegreerde productie” van algen onder een tomatengewas of op het pad en voor een “gescheiden productie van algen en tomaten in verschillende kasafdelingen naast elkaar.



Figuur 27. Wekelijkse som van de volumetrische productiviteit van algen in de PBR, berekend voor twee buisdiameter voor een “geïntegreerde productie” van algen onder een tomatengewas of op het pad en voor een “gescheiden productie van algen en tomaten in verschillende kasafdelingen naast elkaar.

5.1.2 Economische resultaten TomAlgS model

“Geïntegreerde productie”

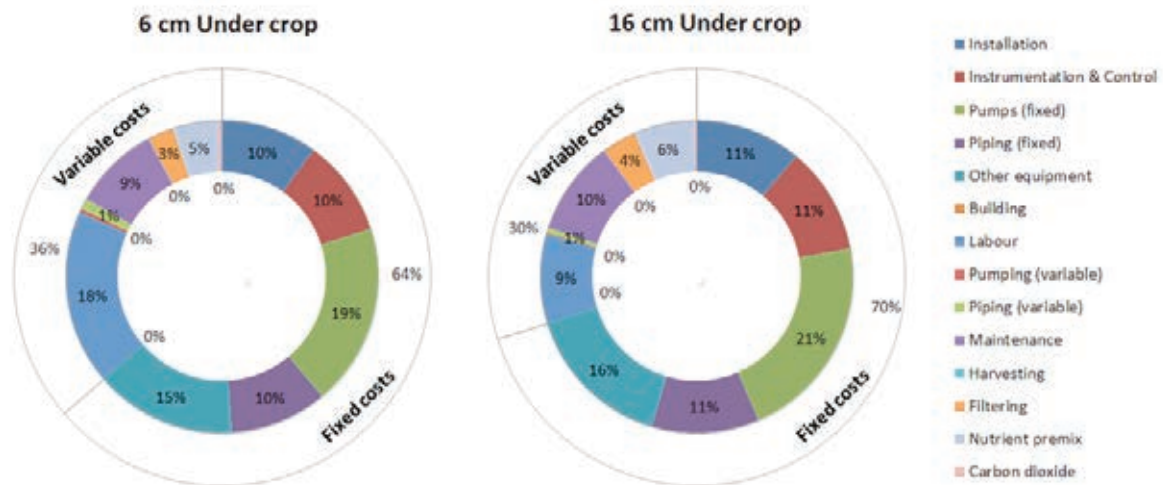
Tabel 19. geeft de economische resultaten voor de “geïntegreerde productie” van algen onder een tomatenteelt in een kas weer. Een toenemende buisdiameter leidde altijd tot hogere kosten per m² als gevolg van een hogere volume verhouding. Daarnaast waren de kosten voor de productie onder het gewas hoger dan voor de productie op het pad van een tomatenkas als gevolg van een lagere volumetrische productiviteit. De resulterende winst voor de algenproductie bij een aangenomen prijs van 50 €/kg DS is negatief voor de productie onder het gewas en meer negatief met een toenemende buisdiameter. De winst van algenproductie op het pad is positief voor de 0.06m-PBR en de 0.11m-PBR en licht negatief voor de 0.16m-PBR. De totale winst van algen en tomaten productie was voor alle diameters en locaties in combinatie negatief als gevolg van de negatieve economische resultaten van een tomatenteelt volgens Vermeulen (2010). Een van de onderzochte scenario's was de invloed van bladplukken op de algen productiviteit en daarmee op de economie. Het effect van bladplukken was in alle gevallen positief, omdat de investeringskosten per kg DM verlagen en gelijktijdig de productiviteit verhoogt door meer licht, maar de resulterende winst per m² is nog steeds negatief of vrij klein.

Figuur 28. toont de relatieve bijdrage van vaste en variabele kostenelementen van de productie van algen onder het gewas per kg DM algen. De vaste kosten zijn ongeveer twee derde van de totale kosten. Dit betekent dat een mogelijke daling van de prijs van de gebruikte apparatuur in de toekomst een sterke invloed op de kosten per kg DM algen heeft. Het aandeel variabele kosten was een derde van de totale kosten. Vooral energie kosten in verband met het oogsten en het pompen waren lager dan verwacht. Naast de loonkosten hebben ook onderhoudskosten een relatief groot aandeel van de variabele kosten. Deze werden vastgesteld op 4% van de investeringskosten.

Verschillen in de kostenverdeling bij de 0.06m-PBR en de 0.11m-PBR waren voornamelijk gerelateerd aan de arbeidskosten. In deze studie waren de arbeidskosten gerelateerd aan het teeltoppervlak, terwijl de meeste andere kosten gerelateerd waren aan het volume. Het verhogen van de buisdiameter resulteerde in een toenemend volume per teeltoppervlak, het relatieve aandeel van de arbeidskosten nam af met toenemende diameter, het aandeel variabele kosten steeg. Er was een lichte stijging van het aandeel vaste kosten met de buisdiameter veroorzaakt door grotere pompen.

Tabel 19. Jaarlijkse economische resultaten van een “geïntegreerde productie” van tomaten en algen bij een aangenomen algenprijs van 50 €/kg DM.

Locatie	PBR	Kosten algen [€/m ²]	Baten algen [€/m ²]	Winst algen [€/m ²]	Winst totaal [€/m ²]
Algen onder het tomatengewas	0.06m	10.44	7.44	-3.00	-10.81
	0.11m	17.23	9.51	-7.72	-15.53
	0.16m	18.38	7.55	-10.38	-18.64
Algen op het pad van tomatenteelt	0.06m	4.69	7.45	2.76	-5.05
	0.11m	9.78	14.29	4.51	-3.30
	0.16m	10.13	10.08	-0.05	-7.86
Algen onder gewas en op het pad	0.06m	12.94	14.89	1.95	-5.86
	0.11m	26.35	23.81	-2.54	-9.55
	0.16m	27.18	17.63	-9.55	-17.36



Figuur 28. Relative share of cost items to the cost of algae per kg DM in integrated production. When 0% is depicted, this means that the share of this cost item is not absolutely zero, but very small.

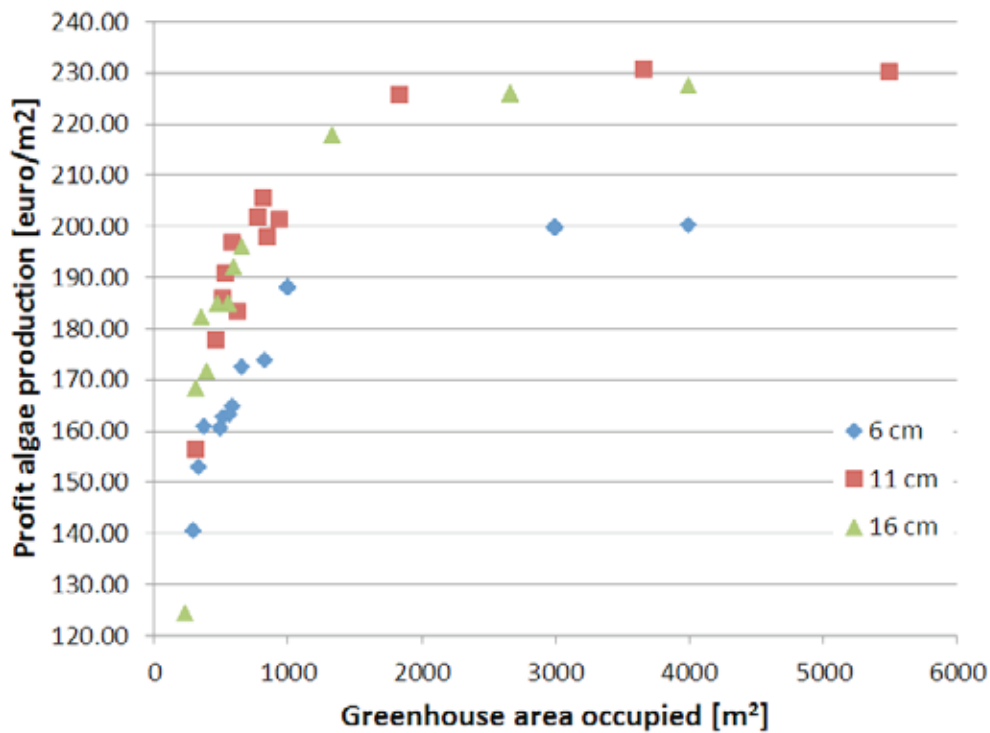
“Gescheiden productie”

Productiviteit per volumen en teeltoppervlak waren in “gescheiden productie” veel hoger dan in “geïntegreerde productie” als gevolg van de betere lichtomstandigheden voor algen fotobioreactor. Twee systeem-groepen kunnen worden gedefinieerd, namelijk kleinschalige en grootschalige systemen. Vanuit economisch oogpunt hebben grootschalige systemen twee voordelen in vergelijking met kleinschalige systemen: Het effect van schaalvoordelen leidt tot lagere investeringskosten per vierkante meter en een positieve algemene winst, de negatieve winst voor tomaten wordt gecompenseerd door de positieve winst op algenproductie. Tabel 20. geeft de economische analyse voor klein- en grootschalige PBR systemen met betrekking tot de kosten voor algenproductie. Kosten verminderen sterk met een grotere schaal, het rendement is onafhankelijk van de schaal. De totale winst van algen en tomaten samen was nog negatief voor kleinschalige systemen, maar sterk positief voor grootschaligere systemen.

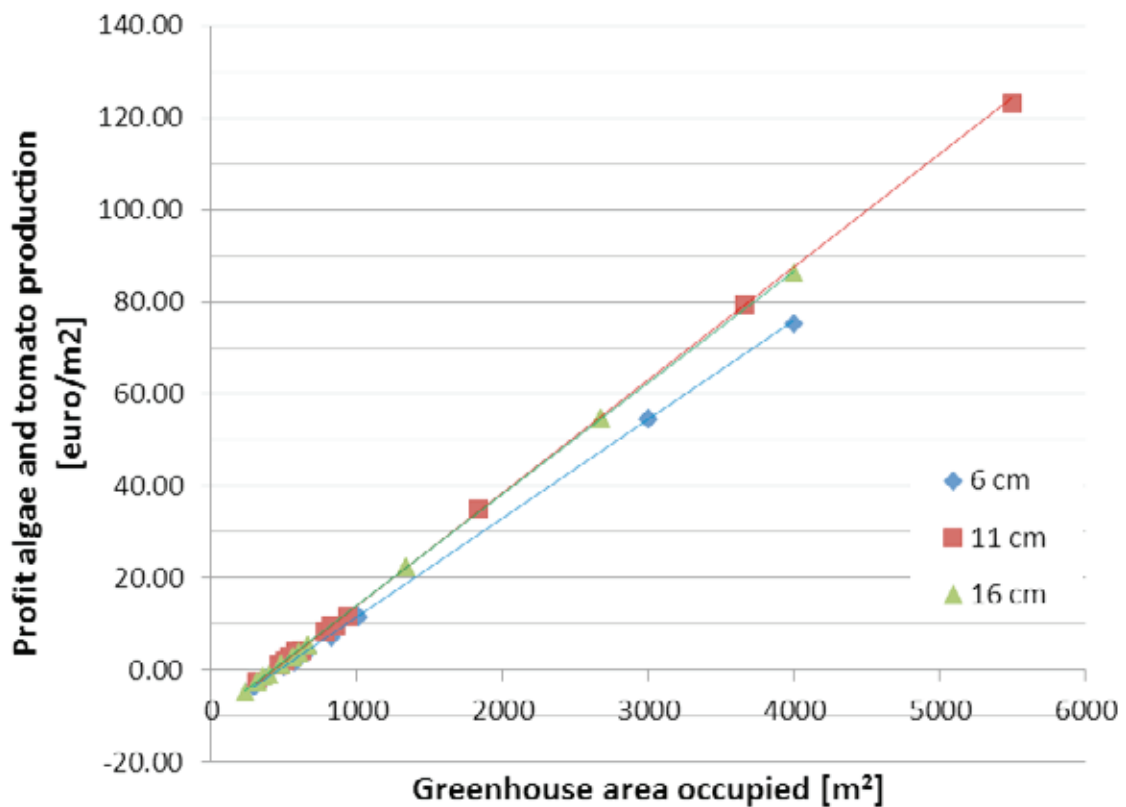
Figuur 29. en **Figuur 30.** geven de winst voor de algenproductie en de totale winst van algen en tomaten in meer detail weer. De winst voor de algenproductie nam toe met het oppervlak van de algenproductie en varieerde van 125 tot 231 €/m². De winst was het laagst voor de 0,06 m PBR. Op grote schaal was de winst voor de 0,11 m PBR iets hoger dan voor de 0,16 m PBR. De investeringskosten per kg DM algen waren gerelateerd aan de omvang van de PBR-systemen. In Figuur 31. is duidelijk te zien dat een groter systeem de investeringskosten vermindert als gevolg van de schaalvoordelen. De investeringskosten verhogen met toenemende PBR diameter door de afnemende volumetrische productiviteit. Figuur 32. toont de relatieve verdeling van de investeringskosten over de verschillende kostenposten in een “gescheiden productie” van algen en tomaten in verschillende kasafdelingen naast elkaar.

Tabel 20. Resultaten van de economische analyse van klein- en grootschalige algen systemen in een gescheiden kascompartiment naast tomaten bij een aangenomen algenprijs van 50 €/kg DM

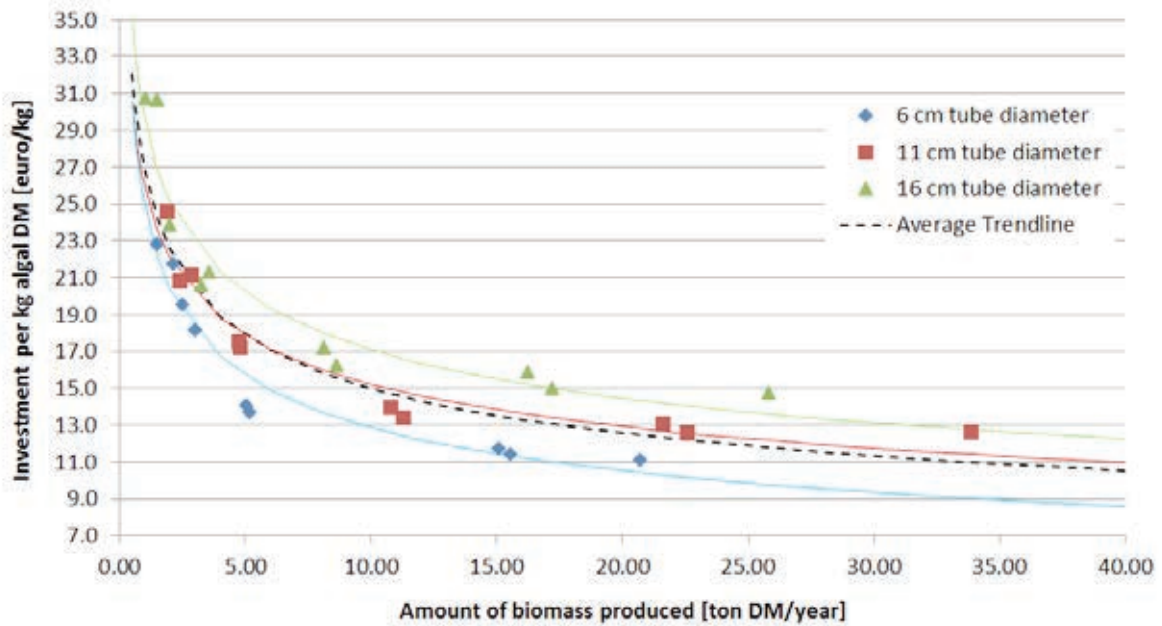
	PBR	PBR volume [m ³]	Kosten algen [€/m ²]	Opbrengst algen [€/m ²]	Winst algen [€/m ²]	Winst totaal [€/m ²]
Kleinschalig systeem	0.06m	10	118	259	141	-3.65
	0.11m	20	152	308	156	-2.60
	0.16m	21	198	323	125	-4.76
Grootschalig systeem	0.06m	106	59	259	200	54.58
	0.11m	237	77	308	231	79.66
	0.16m	250	97	323	226	54.61



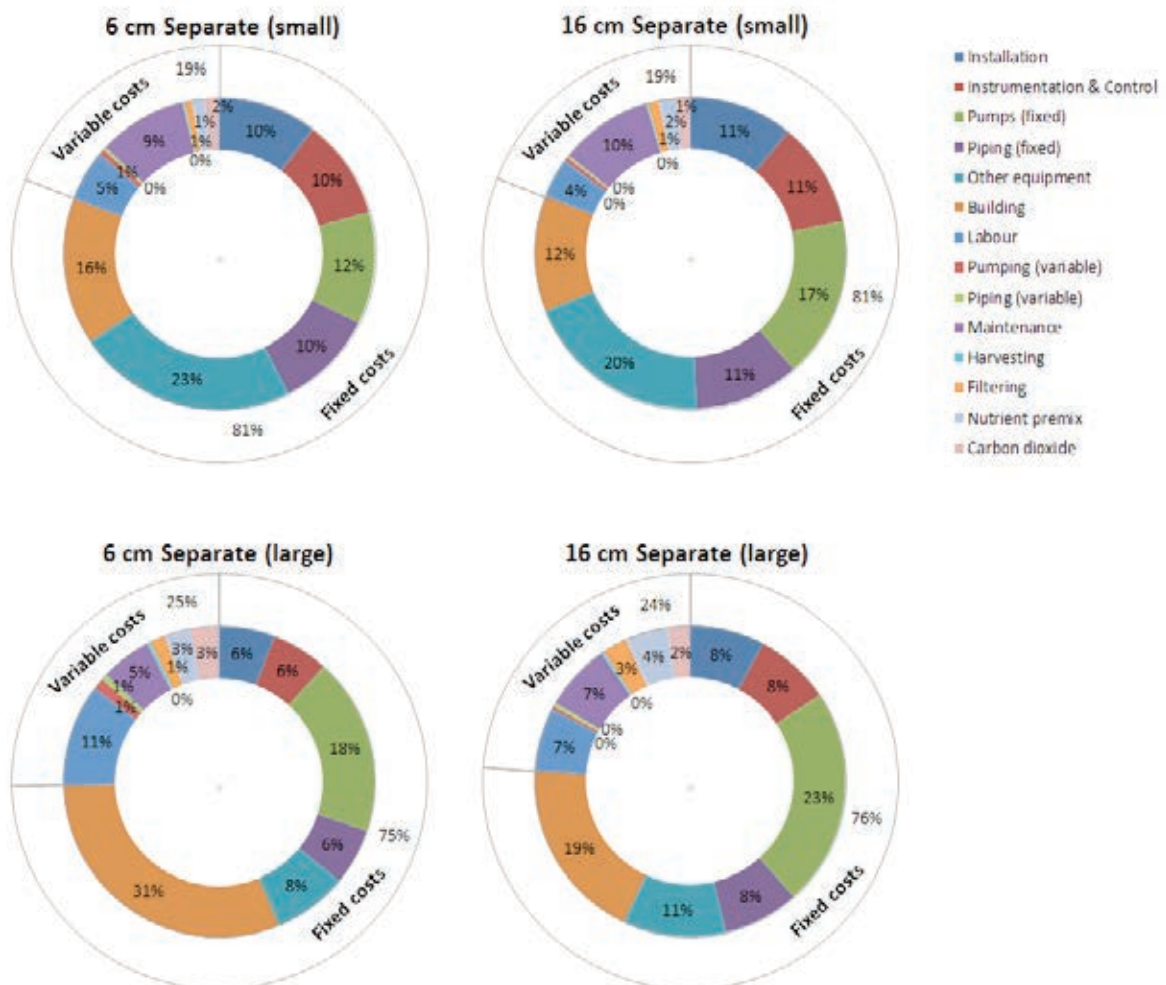
Figuur 29. Winst algen productie (€/m²) in een gescheiden kascompartment naast tomaten afhankelijk van de buisdiameter en het teeltoppervlak (m²)



Figuur 30. Gezamenlijke winst van algen- en tomatenproductie (€/m²) naast elkaar twee kascompartmenten afhankelijk van de buisdiameter en het teeltoppervlak (m²)



Figuur 31. Investeringskosten per kg DM algen afhankelijk van de totale hoeveelheid algenproductie per jaar



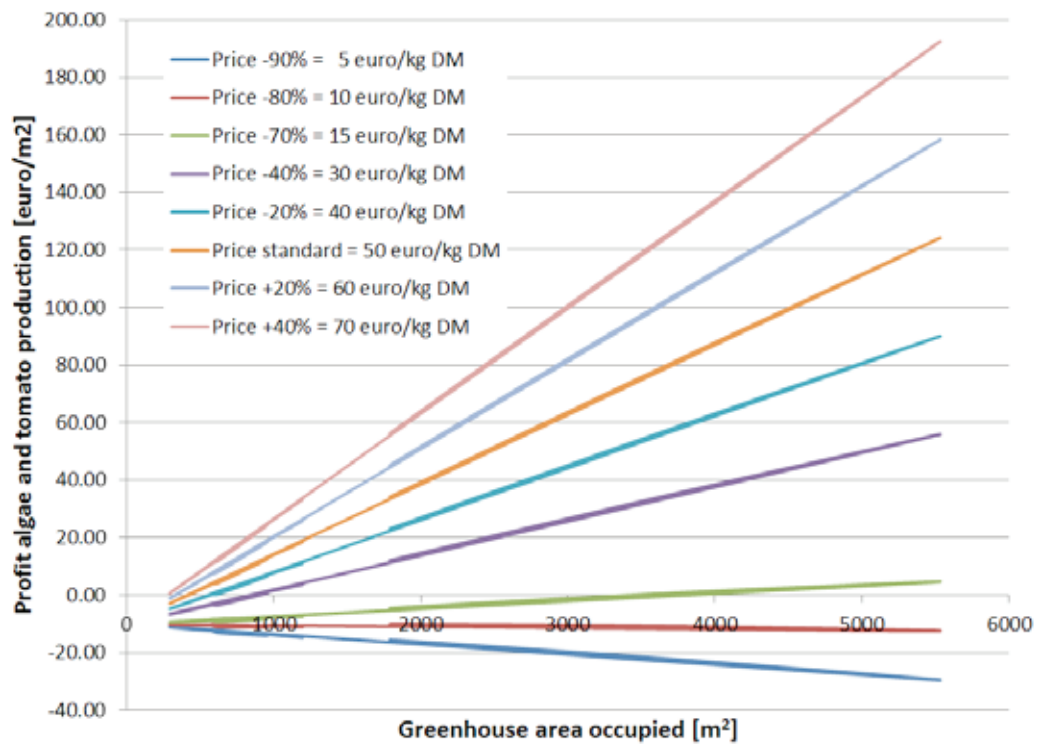
Figuur 32. Relatief aandeel kostenelementen per kg DM algen in "gescheiden productie" van algen en tomaten naast elkaar in verschillende kascompartimenten voor een kleinschalig systeem (250 m² teeltoppervlak) en een grootschalig systeem (4000 m² teeltoppervlak).

Voor de “gescheiden productie” was de totale winst van algen en tomaten gezamenlijk gerelateerd aan de grootte van het teeltoppervlak, welke voor de algenproductie werd gebruikt. Een groter areaal leidde altijd tot een hogere totale winst, het verband was lineair. Een verhoging van de prijs van tomaten had maar een kleine invloed op het totale resultaat (Figuur 33.).

Een prijs 50 €/kg DM algen werd verondersteld voor de eerdere berekeningen. Deze prijs is sterk afhankelijk van de markt voor de algen. Een sensitiviteitsanalyse voor de algenprijs werd daarom uitgevoerd. Figuur 34. geeft het effect van een veranderde algenprijs voor het economisch resultaat in een “gescheiden productie” van algen en tomaten in een kas. Een verhoging van de algenprijs leidde tot een toename van de totale winst. De lijnen zijn niet helemaal lineair als gevolg van schaafeffecten. Op basis van Figuur 34. kan worden geschat dat de kostprijs voor de algenproductie 11 €/kg DM is in een kascompartiment naast een tomatenteelt.



Figuur 33. Het effect van een veranderde tomatenprijs op de gezamenlijke winst van een algen- en tomatenproductie in twee gescheiden kascompartimenten naast elkaar.



Figuur 34. Het effect van een veranderde algenprijs per kg DM op de gezamenlijke winst van een algen- en tomatenproductie in twee gescheiden kascompartimenten naast elkaar

5.1.3 Conclusies TomAlgS model

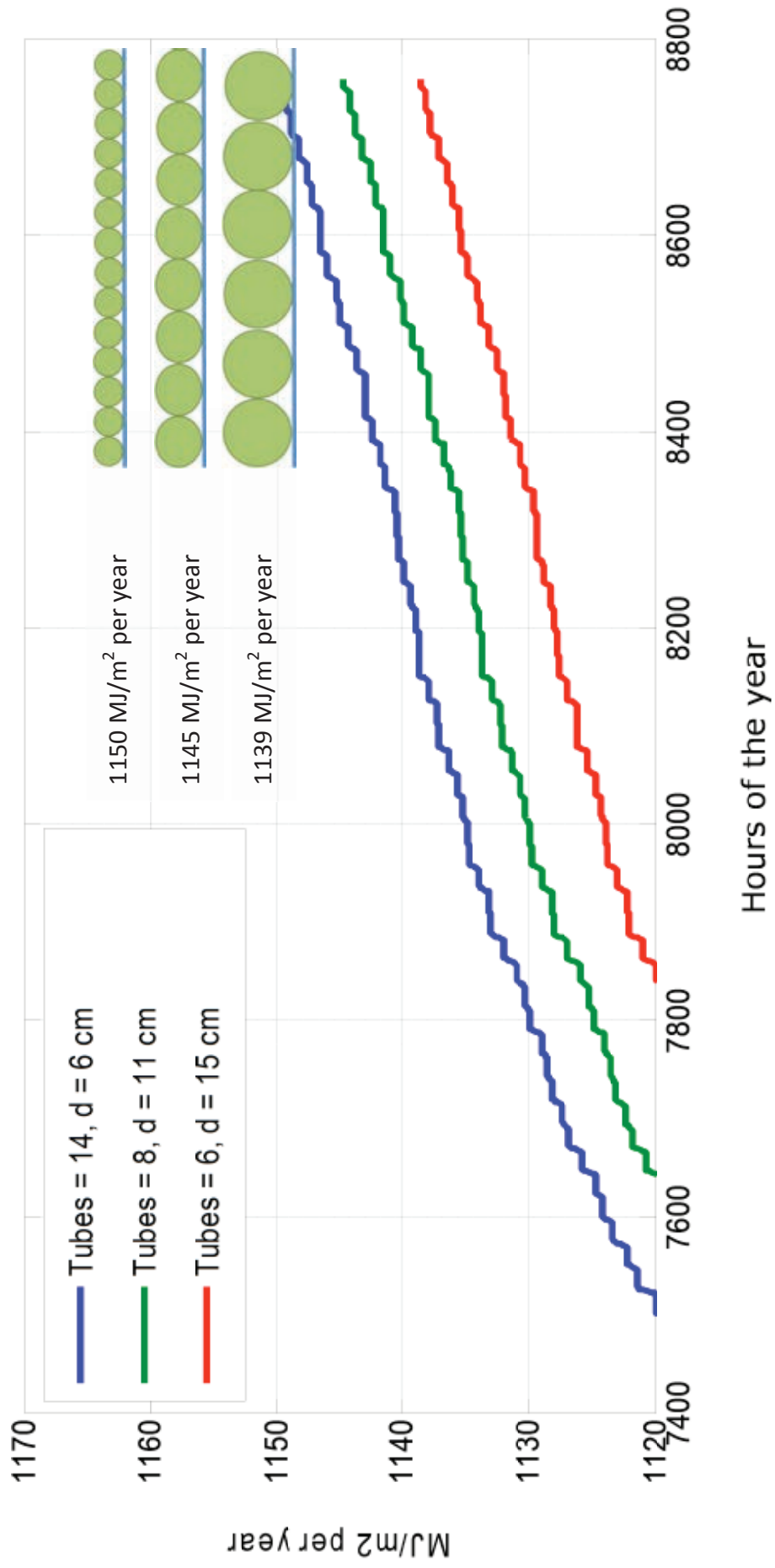
- De beschikbaarheid van licht is de belangrijkste factor voor zowel de productiviteit en de economische haalbaarheid van algenproductie in combinatie met tomaten productie in een kas;
- Het verhogen van de buisdiameter van een horizontale buisvormige fotobioreactor vermindert de lichtbenuttingsefficiëntie en verhoogt de kostprijs zowel voor een “geïntegreerde productie” van algen onder een tomatengewas als ook voor een “gescheiden productie” van algen naast tomaten in verschillende kascompartimenten;
- De economische haalbaarheid van de “geïntegreerde productie” van algen en tomaten is laag. Als gevolg van te weinig licht onder het gewas voor de algen is de productiviteit laag. Voor een 0.06m-PBR is een minimumprijs voor algen nodig van 70 €/kg DS bij een productie onder het gewas en van 30 €/kg DS voor productie op het pad. Wanneer de lichtonderschepping door de tomatenteelt wordt vermindert door het verlagen van de LAI met 10% door bladplukken is een minimumprijs voor algen nodig van 31 €/kg DS bij productie onder het gewas en van 26 €/kg DS bij productie op het pad;
- Het is economisch haalbaar om algen en tomaten in gescheiden kascompartimenten te produceren. Voor een grootschalig systeem is de kostprijs 11 €/kg in de 0.06m-PBR. Dit is gelijk aan jaarlijkse vaste en variabele kosten van ongeveer 59 €/m² voor het algenproductie systeem;
- In de “gescheiden productie” van algen en tomaat neemt de economische haalbaarheid toe met de omvang van het systeem. De vaste kosten bestaan uit een groot deel van de kostprijs, waardoor de haalbaarheid van de algenproductie verbeterd kan worden door het verlagen van de vaste kosten.

5.2 RAYPRO model lichtonderschepping, temperatuur en algenproductie

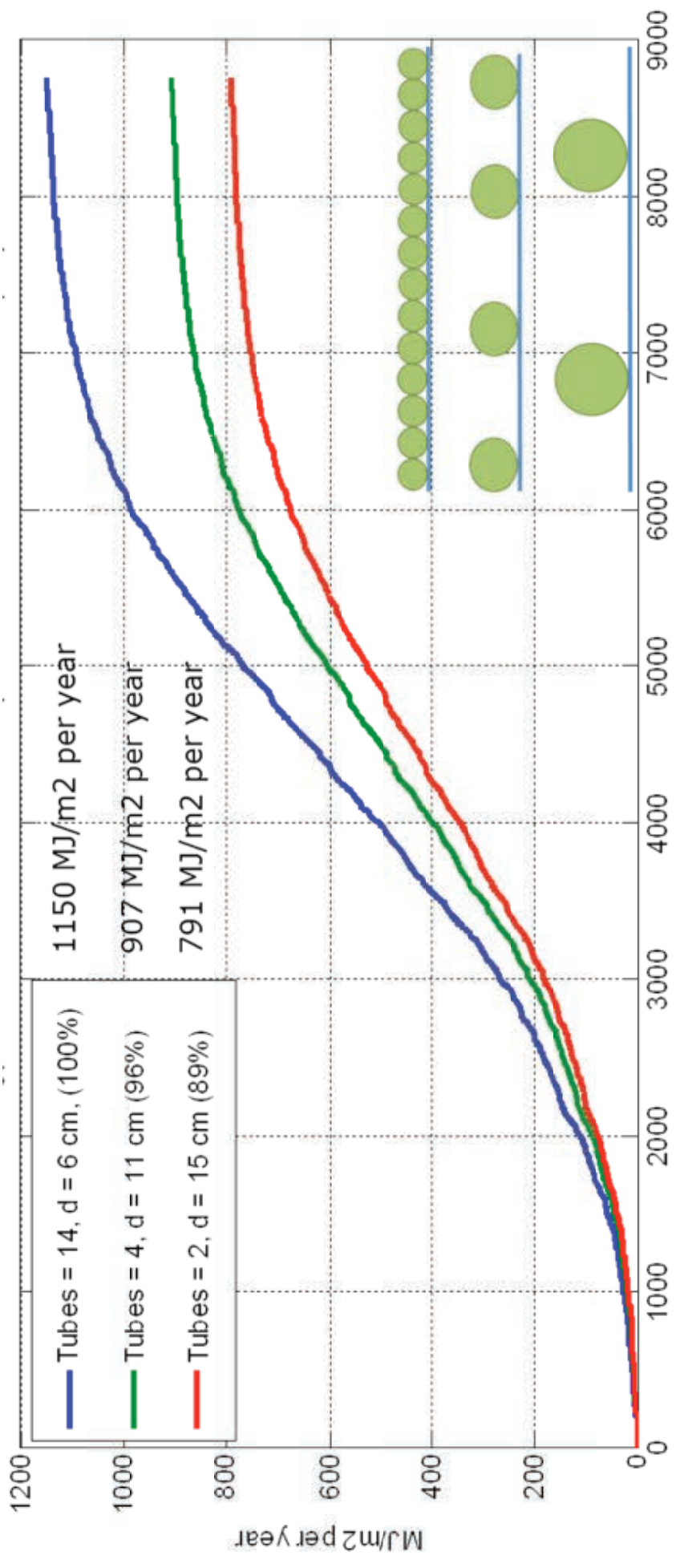
5.2.1 Lichtonderschepping in horizontale en verticale algenreactoren

Met het model RAYPRO (gebaseerd op Swinkels, 2009) is de lichtonderschepping en lichtverdeling in verschillende systeemconfiguraties van algenbuisreactoren in een kas berekend. Berekeningen zijn gedaan voor een typische Venlo-kas in Nederland. 1245 MJ/m²/jaar PAR komt een kas binnen en kan maximaal door een algenreactor worden onderschept. Berekeningen zijn voor elk moment van het jaar gedaan en plaatsafhankelijk in de kas. Verschillende systeemconfiguraties zijn verondersteld, buisreactoren met een diameter van 6cm, 11cm en 15cm, verschillende opbouw van reactoren horizontaal of verticaal met verschillende afstanden van elkaar. De resultaten ten aanzien van lichtonderschepping van de algenbuisreactoren kunnen als volgt worden samengevat:

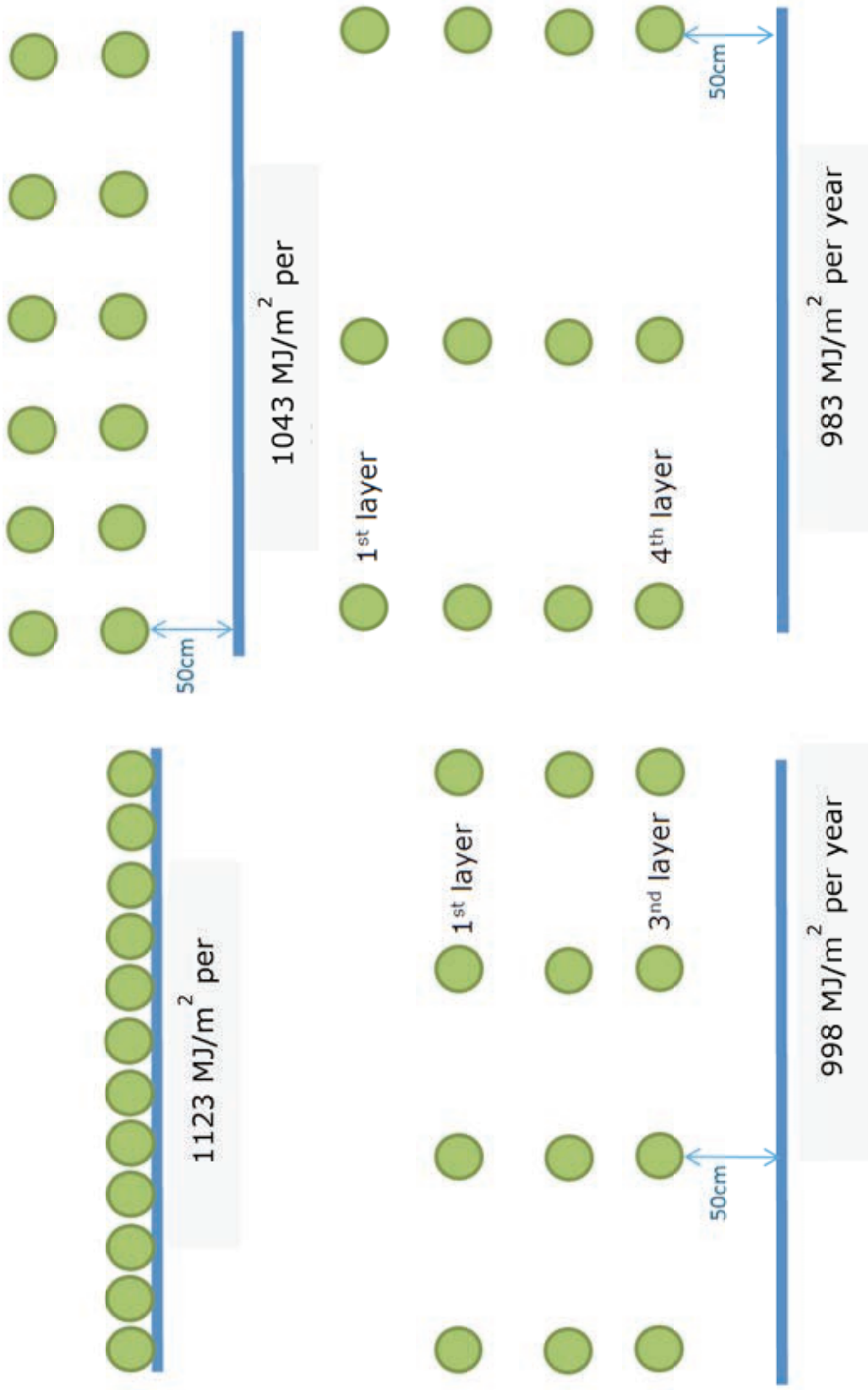
- Een kleinere buisdiameter (6cm) onderschept iets meer licht dan een grotere buisdiameter (11cm of 15cm) als deze horizontaal naast elkaar in een kas worden geplaatst (Figuur 35.). Dit kan worden verklaard door de geometrie van de buizen, bijna al het licht wordt onderschept, kleine reflectieverliezen ontstaan.
- Indien gelijke volumes van de algenreactoren met verschillende diameters (6cm, 11cm en 15cm) per teeltoppervlak worden vergeleken, is de lichtonderschepping door buizen met een kleine diameter veel gunstiger (Figuur 36.), bij grotere diameters valt veel licht onbenut naast de buizen omdat deze bij een gelijk volume met afstand van elkaar worden geplaatst.
- Door algenbuizen verticaal in 2 tot 4 lagen boven elkaar te stapelen wordt bij een gelijk geïnstalleerd volume per teeltoppervlak niet meer licht onderschept dan in een horizontaal systeem (Figuur 37.).
- Wel geeft het verticaal stapelen van buizen de mogelijkheid om meer volume te installeren per teeltoppervlak, waardoor ook de lichtonderschepping van het gehele systeem stijgt (Figuur 38.). In een configuratie zoals in een “tomaten” teeltsysteem onderscheppen de bovenste buizen het meeste licht, maar is een hoge totale lichtonderschepping van het systeem te bereiken door ca. 8 lagen boven elkaar te stapelen.



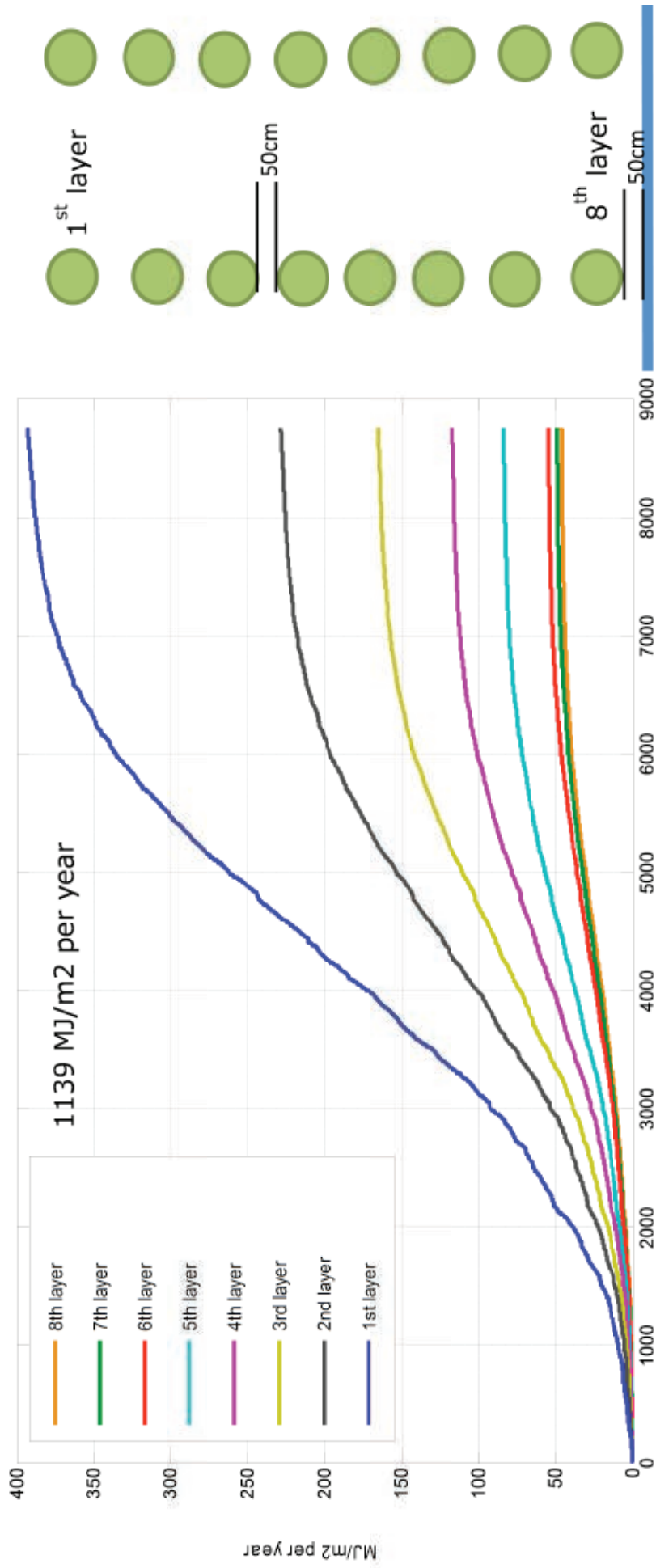
Figuur 35. Lichtonderschepping voor algenbuisreactoren in een kas . Case 1: Horizontaal systeem, buis diameters 6cm, 11cm & 15cm



Figuur 36. Lichtonderschepping voor algenbuisreactoren in een kas. Case 2: Horizontaal systeem, buis diameters 6cm, 11cm en 15cm, systemen met een gelijk volume per teeltoppervlak



Figuur 37. Lichtonderschepping voor algenbuisreactoren in een kas. Case 7: Verticaal systeem, buis diameter 6cm, stapeling buizen verticaal 12x1, 6x2, 4x3, 3x4 met een gelijk volume per teeltoppervlak.

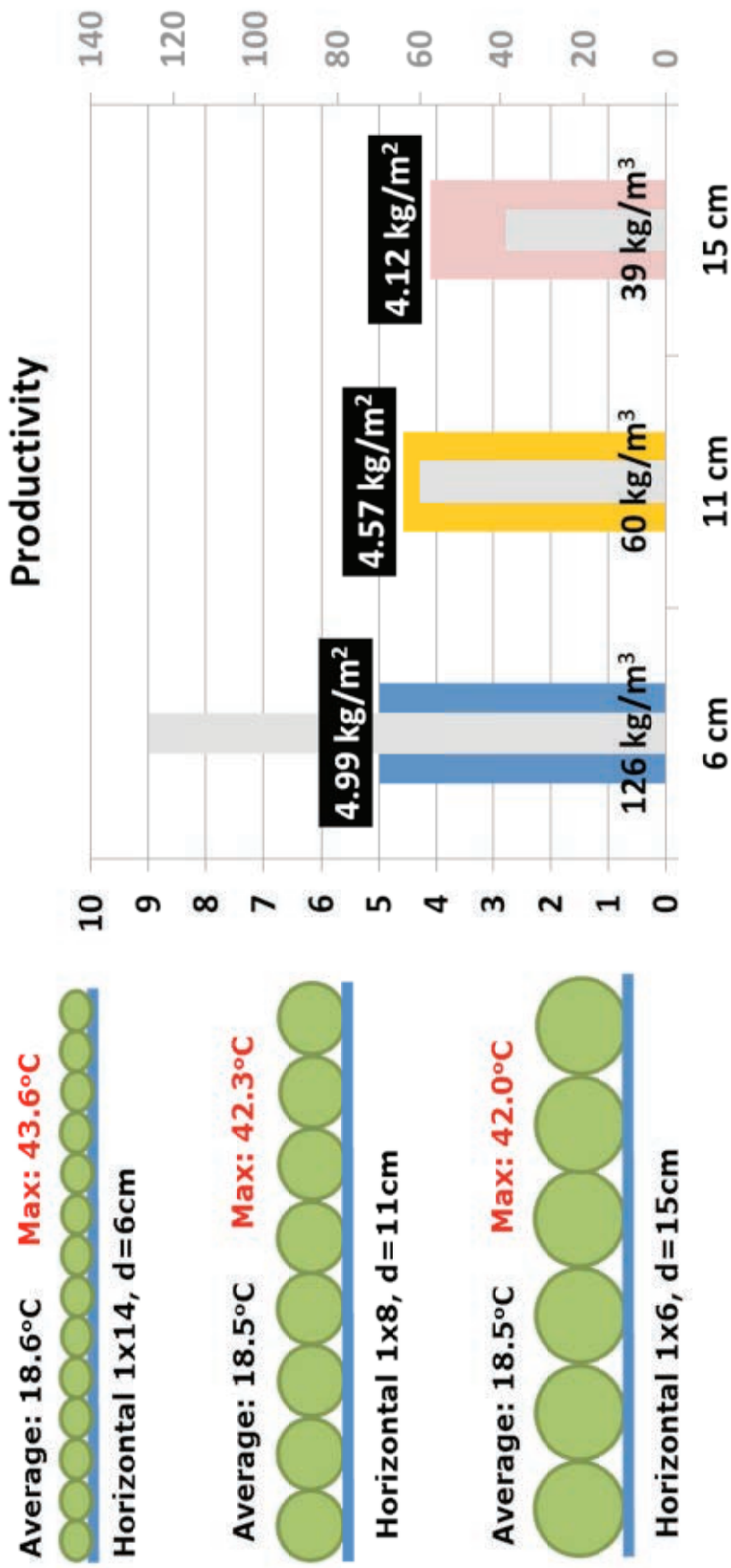


Figuur 38. Lichtonderschepping voor algenbuisreactoren in een kas. Case 8: Verticaal systeem, buis diameter 11cm. Configuratie 2x8 met een verticale afstand van de buizen van 50cm.

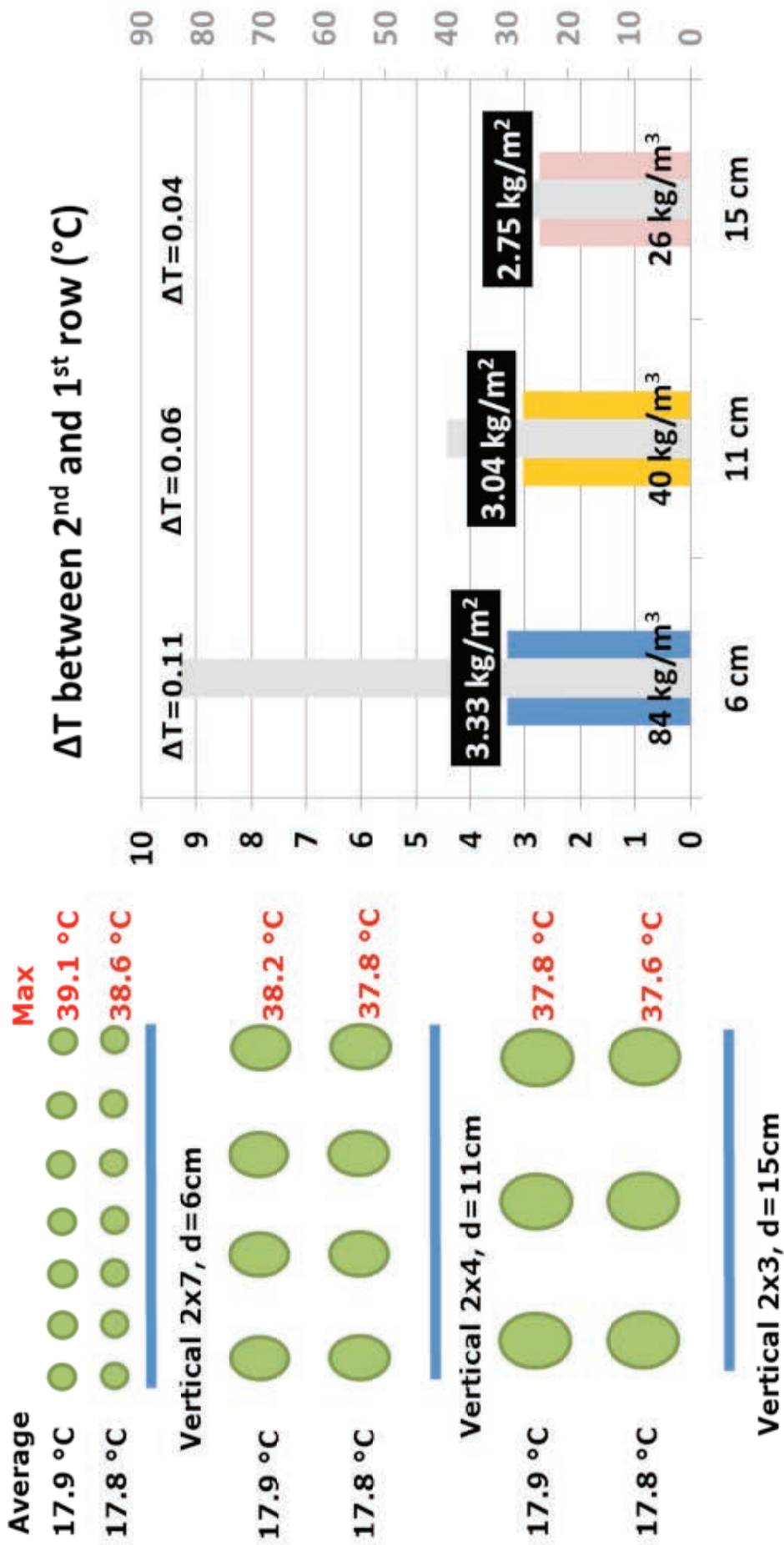
5.2.2 Temperatuur in horizontale en verticale algenreactoren

Naast licht is de temperatuur in een algenreactor een belangrijke groeifactor. De algengroei in horizontale en verticale algenreactoren in een kas zijn berekend met het algengroeiemodel zoals beschreven onder 3.3.1 en het model RAYPRO zoals beschreven onder 3.3.2. Ten aanzien van de temperatuurverdeling in diverse systeemconfiguraties kunnen de volgende resultaten worden samengevat:

- In horizontale algenteeltsystemen lopen maximale temperaturen op tot 43.6 °C in 6 cm buizen en tot 42.0 °C in 15 cm buizen (Figuur 39.).
- Maximale temperaturen in verticale systemen zijn lager dan in horizontale systemen bij een vergelijkbaar volume (Figuur 40.).
- In een verticaal systeem met twee rijen buizen boven elkaar was de temperatuur 67% van de tijd tussen 20-30 °C (Figuur 41.), dit temperatuurgebied wordt beschouwd als optimaal voor veel algensoorten.
- Uit berekeningen voor verschillende verticale systemen is gebleken dat in de buizen met de kleinere diameters de maximale algen temperaturen hoger zijn dan in buizen met grotere diameters (Figuur 40. en Figuur 42.). Voor het tomatensysteem is de kleinste buisdiameter minder geschikt ten aanzien van optredende maximum temperaturen.
- Verschillende horizontale en verticale afstanden tussen de buizen van de verticale algenreactoren hebben een gering invloed op de algen temperatuur indien de systemen goed verlicht zijn.
- De vulfactor van de algenreactoren met lucht en water heeft een geringe invloed op de algen temperatuur in de tank (Figuur 43.). Hoewel de warmtelast hoger is bij de bovenste buizen van een verticaal systeem leidt de korte buislengte tot bijna dezelfde temperatuur in het mengvat indien systemen met verschillende vulfactoren worden vergeleken. Deze conclusie moet eventueel worden herzien na experimenten. Tot nu toe zijn er geen nauwkeurige modellen om de algen temperatuur voorspellen wanneer maar een deel van de algenbuizen gevuld is met water, ook experimentele waardes zijn niet gerapporteerd.
- Alle systemen vereisen een goede temperatuurregeling strategie om oververhitting te voorkomen of om een te lage temperatuur te voorkomen. De temperatuurregelstrategie hangt af van de algensoort en de toegepaste technologie.
- De optimale temperatuur voor snelle algengroei is verschillend voor verschillende soorten algen. Alle resultaten kunnen wijzigen indien een verschillend algensoort wordt gebruikt. Hier zijn alle berekeningen gedaan met *Porphyridium cruentum*.



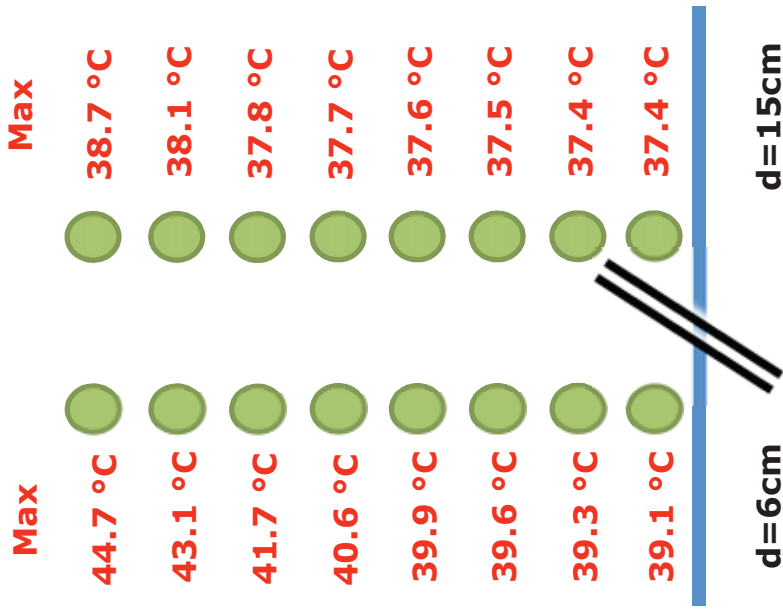
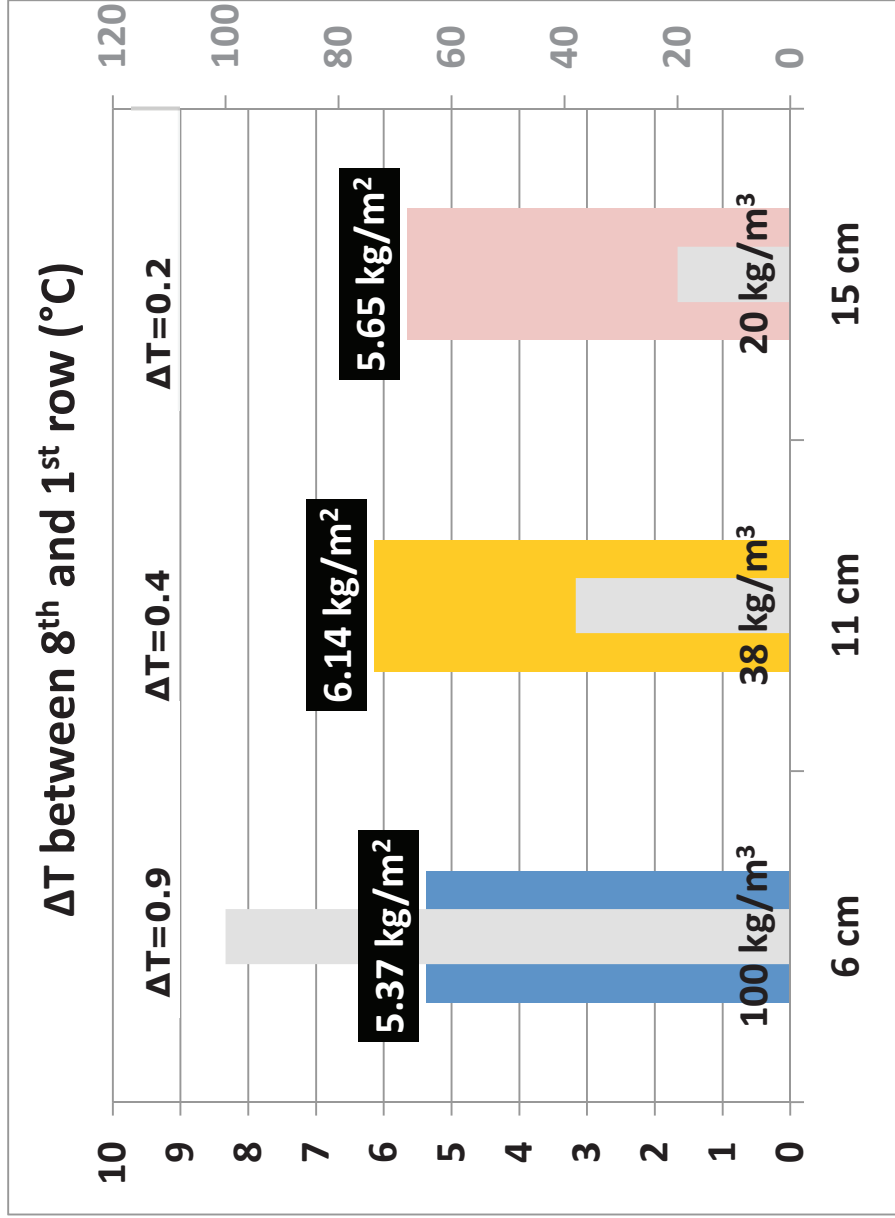
Figuur 39. Temperatuurverdeling in horizontale PBRs in een kas, berekening voor verschillende buisdiameter (6cm, 11cm en 15cm)



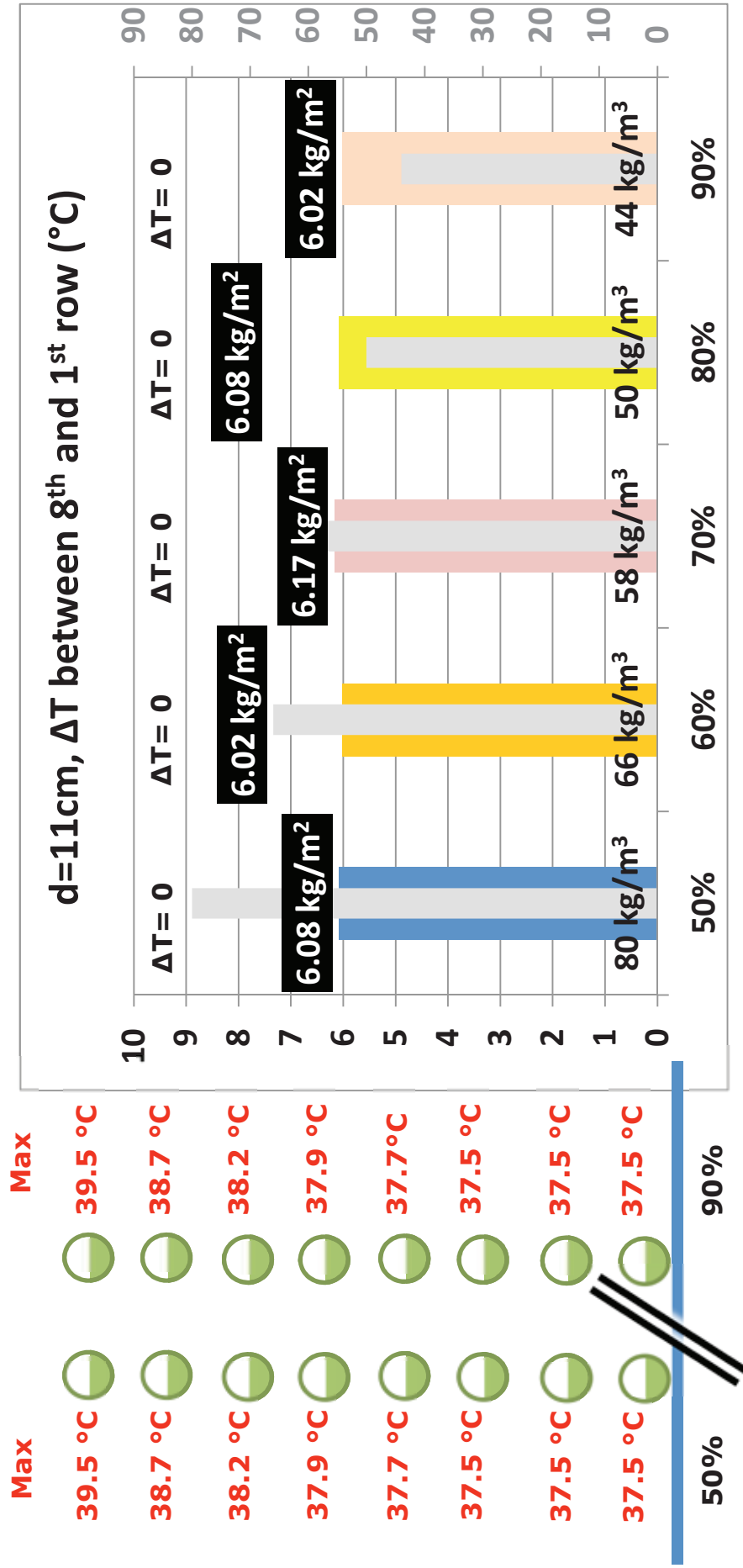
Figuur 40. Temperatuurverdeling in verticale PBRs in twee lagen in een kas, berekening voor verschillende buisdiameter (6cm, 11cm en 15cm) bij een gelijk volume per teeltoppervlak



Figuur 41. Temperatuurverloop gedurende een jaar voor verticale PBRs in twee lagen in een kas, berekening voor verschillende buisdiameter (6cm, 11cm en 15cm)



Figuur 42. Temperatuurverdeling in verticale PBRs in een tomatensysteem configuratie in een kas, berekening voor verschillende configuraties (6cm, 11cm en 15cm)

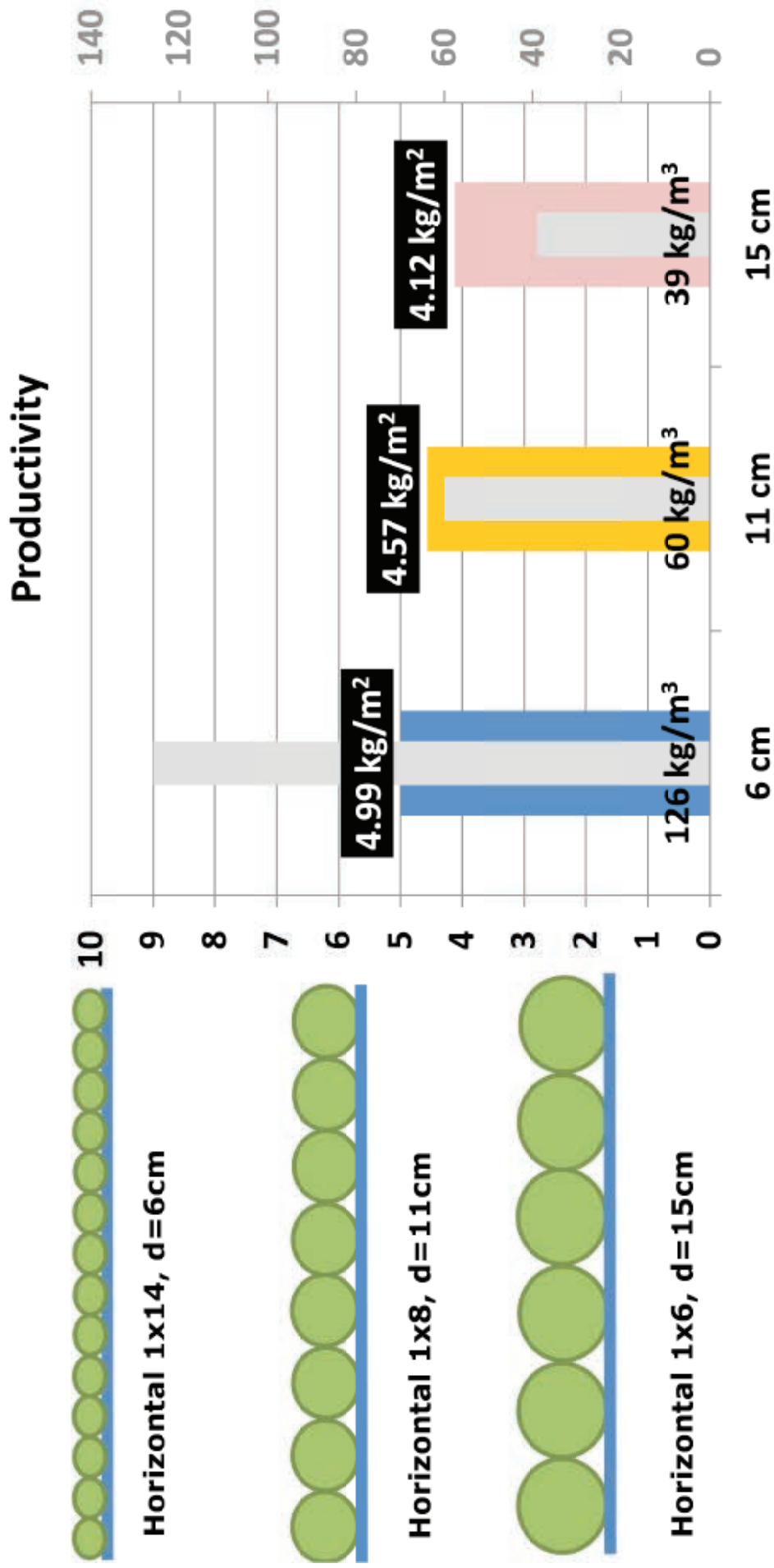


Figuur 43. Temperatuurverdeling in verticale PBRs in een tomatensysteem configuratie in een kas, berekening voor verschillende vulfactoren (6cm, 11cm en 15cm)

5.2.3 Algengroei in horizontale en verticale algenreactoren

In een volgende stap is een algengroeimodel (3.3.1) toegevoegd aan het RAYPRO lichtmodel (3.3.2). Verschillende scenario's zijn berekend voor verschillende systeemconfiguraties van algenbuisreactoren in een kas. Het doel was om erachter te komen welke systemen beter presteren ten aanzien van algenproductiviteit per teeltoppervlak en per volume. De berekeningen zijn gedaan met verschillende diameters van de algenbuizen 6cm, 11cm en 16cm, zowel horizontale als verticale systemen zijn bekeken, verschillende afstanden van buizen, verschillende vulfactoren van buizen met lucht en water en verschillende lichtomstandigheden, zoals diffuus licht, zijn geanalyseerd. De resultaten ten aanzien van de algenproductie kunnen als volgt worden samengevat:

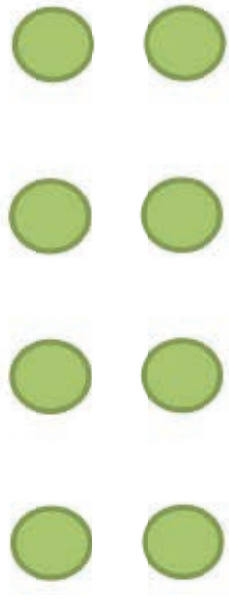
- Voor horizontale systemen was de maximaal berekende productiviteit 5 kg DM/m² teeltoppervlak bij een volumetrische productiviteit van 126 kg DM/m³ (Figuur 44.). Een kleine buisdiameter (6cm) heeft een hogere lichtbenutting efficiëntie dan grotere buizen (11cm en 15cm).
- Verticale systemen met twee lagen resulteren in een lagere productie vergeleken met horizontale systemen met een gelijke volume (Figuur 45.). Dit is het gevolg van het verlies van licht naar de grond, niet al het licht wordt onderschept door de algenreactoren.
- Een verticaal systeem presteert goed wanneer 8 lagen buizen boven elkaar worden gestapeld in een tomatenconfiguratie (Figuur 46.), er is een optimum te vinden voor de afstanden en afmetingen van de buizen van elkaar in verticale (hoogte systeem) en horizontale richting (rijafstanden). Uit het beperkt aantal berekeningen van ons kwam als beste een verticaal tomatensysteem met een berekende max. productiviteit van 6.25 kg/m² en een volumetrische productiviteit van 84 kg/m³ naar voren. Bij een buisdiameter van 11 cm was de beste berekende horizontale afstand van de buizen 40 cm en de verticale afstand 25cm (Figuur 47.). De buisdiameter van 11 cm lijkt uit deze berekeningen het meest geschikt, omdat de lichtbenutting verbeterd met afnemende diameter (Figuur 36.) maar de maximaal optredende temperaturen stijgen met afnemende diameter (Figuur 42.).
- Een configuratie waarin de algenbuizen in kruisverband zijn geïnstalleerd geeft geen hogere productie ten opzichte van het tomatensysteem (Figuur 48.).
- Een verticaal systeem met minder algen in de buizen (vulfactor 50%-90%) geeft een vergelijkbare productie per teeltoppervlak dan een 100% met algenvloeistof gevuld systeem, maar de volumetrische productiviteit wordt hoger wanneer de vulfactor wordt verlaagd (Figuur 49.), de oorzaak is een betere lichtdoordringing in het systeem door een kleiner volume.
- Diffuus licht heeft een positief effect op de productiviteit. Deze verbeterd volgens de berekeningen met ca. 4-5% (Figuur 50.).
- In de toekomst is aan te bevelen om het algengroeimodel uit de literatuur met praktijkmetingen uit een grootschalig systeem in een Nederlandse kas te valideren. Aanbevolen wordt om het groeimodel te gebruiken voor een simulatie van het algenteeltsysteem geïnstalleerd in Bleiswijk. Door lichtmetingen en algenproductiemetingen in het systeem kan het model gevalideerd worden.
- Daarnaast is op te merken dat de hier voorgestelde resultaten gebaseerd zijn op een algengroeimodel ontwikkeld voor de algensoort *Porphyridium cruentum*. De hoogte van de hier berekende productie kan geheel afwijken voor andere algensoorten. Een groeimodel voor de in Bleiswijk gebruikte algensoort *Chlorella sorokiniana* wordt aanbevolen. Voor een systeemvergelijking is het huidige model desalniettemin nu al geschikt.



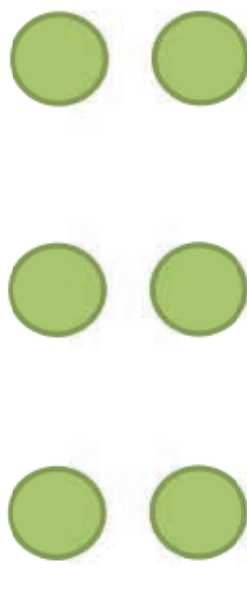
Figuur 44. Algenproductiviteit berekend voor een horizontale PBR geïnstalleerd op het teeltoppervlak in een kas, berekening voor verschillende buisdiameter (6cm, 11cm en 15cm) diameters



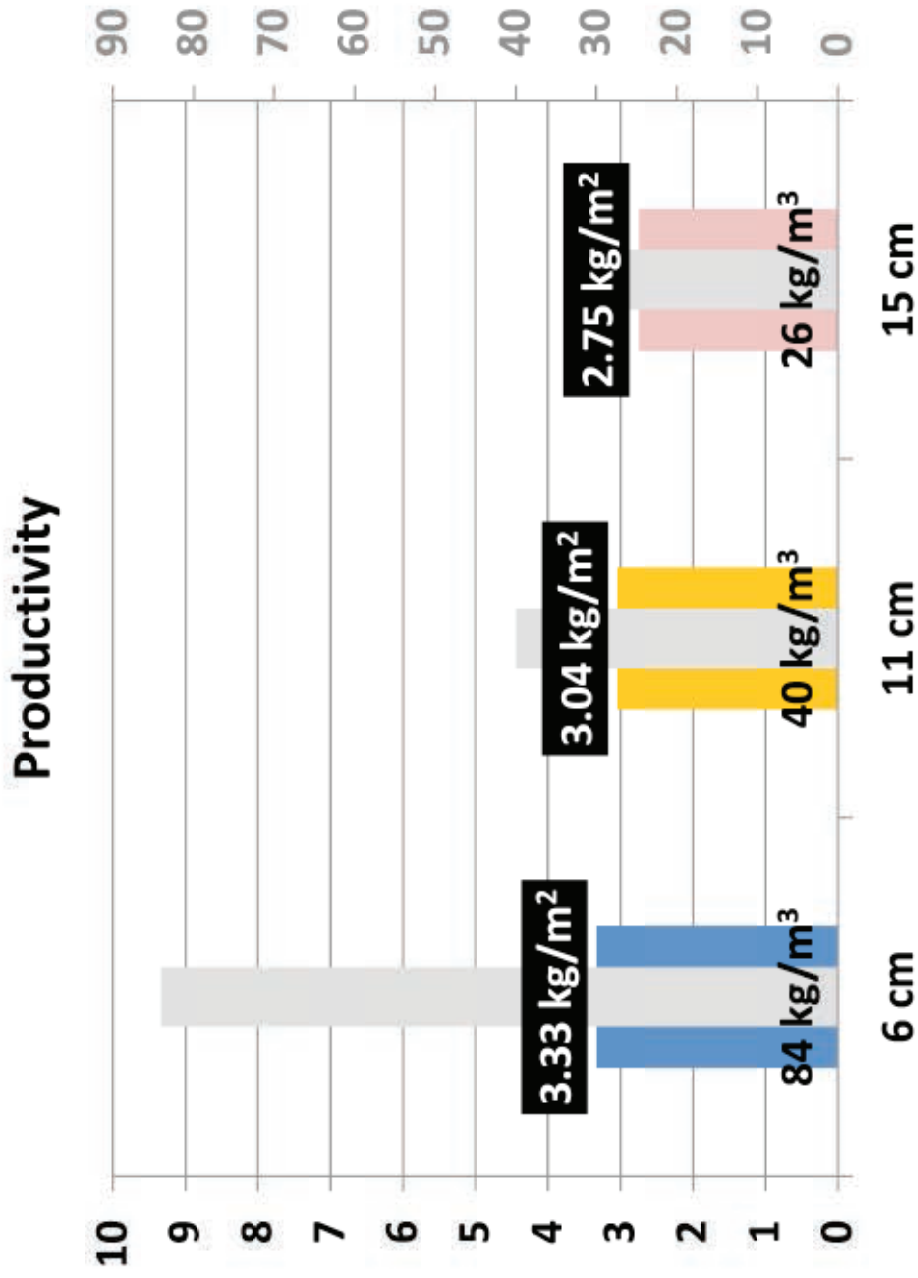
Vertical 2x7, d=6cm



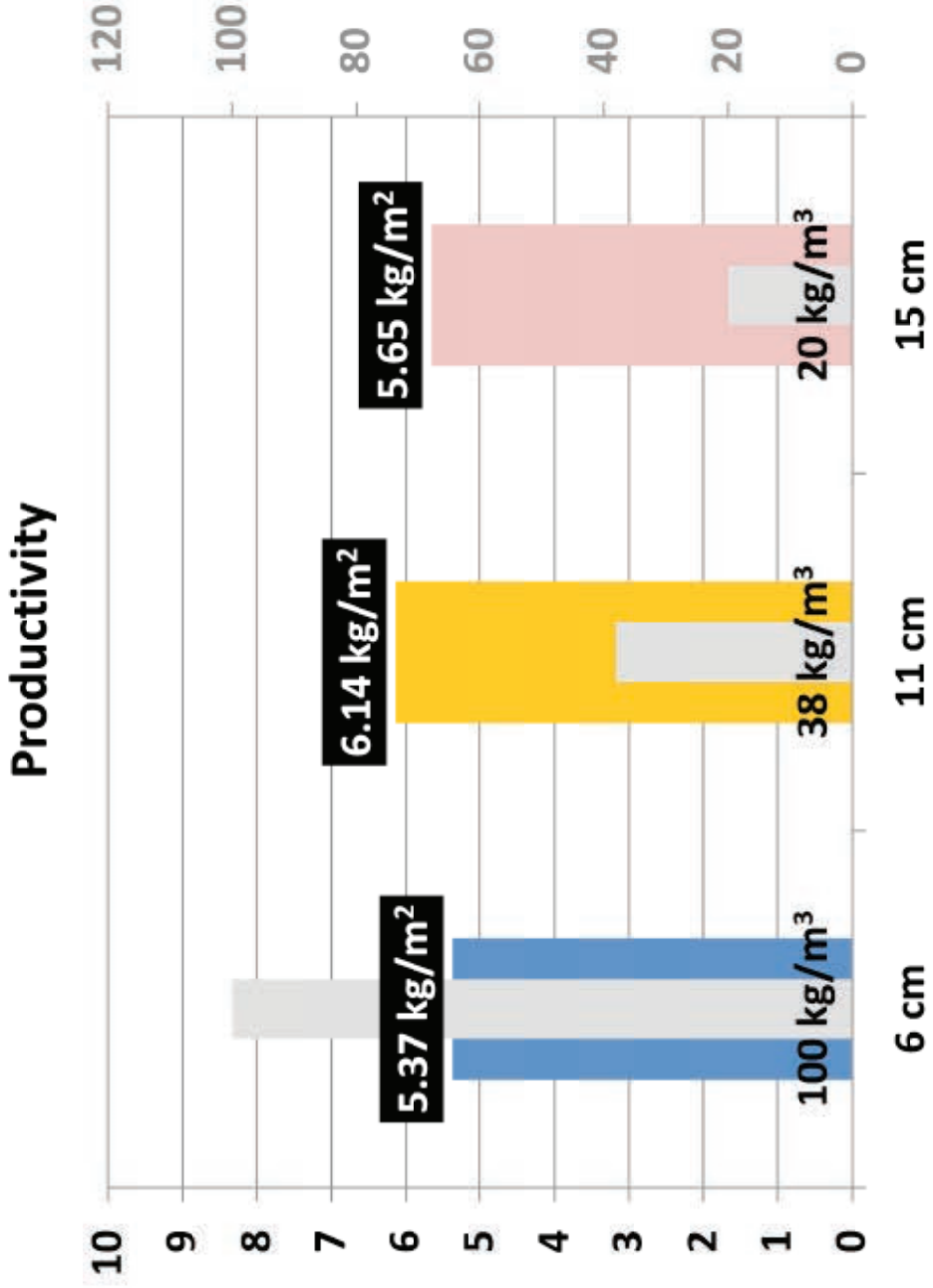
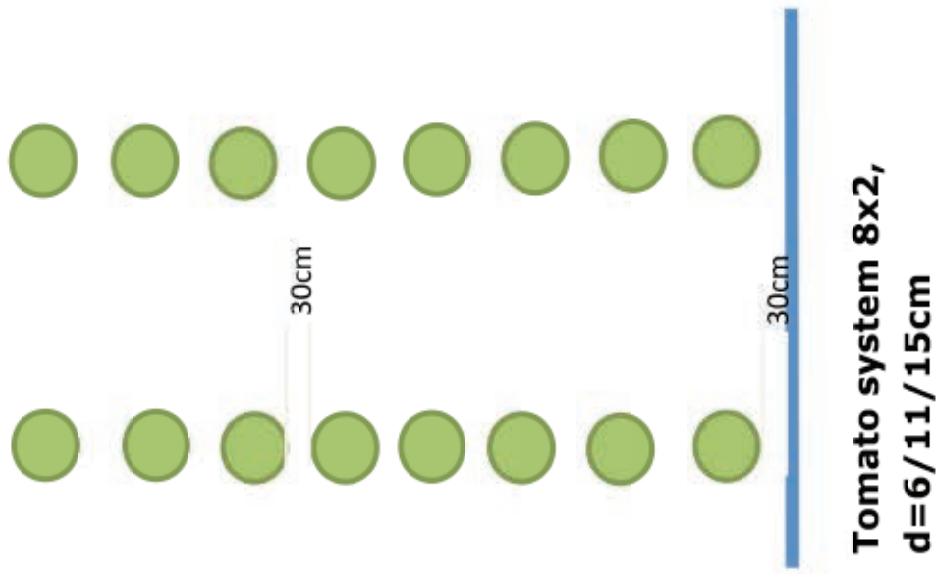
Vertical 2x4, d=11cm



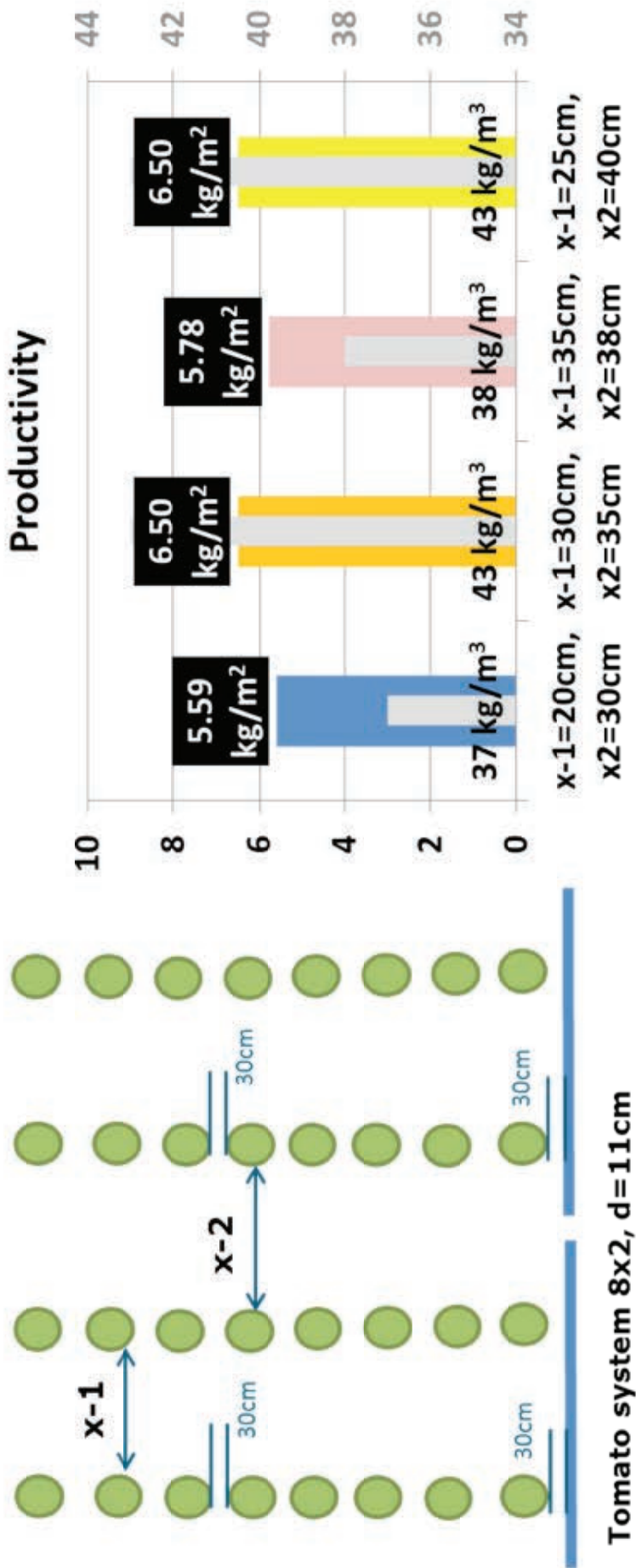
Vertical 2x3, d=15cm



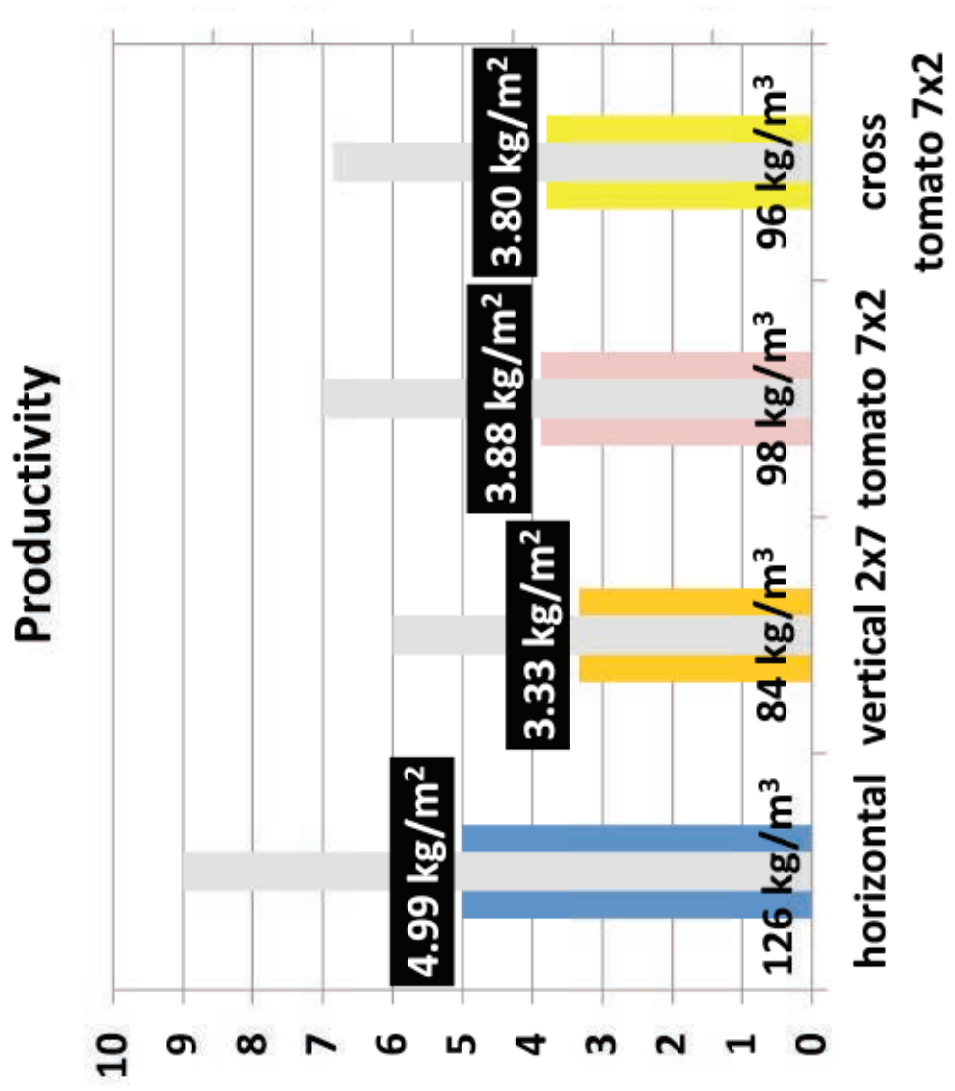
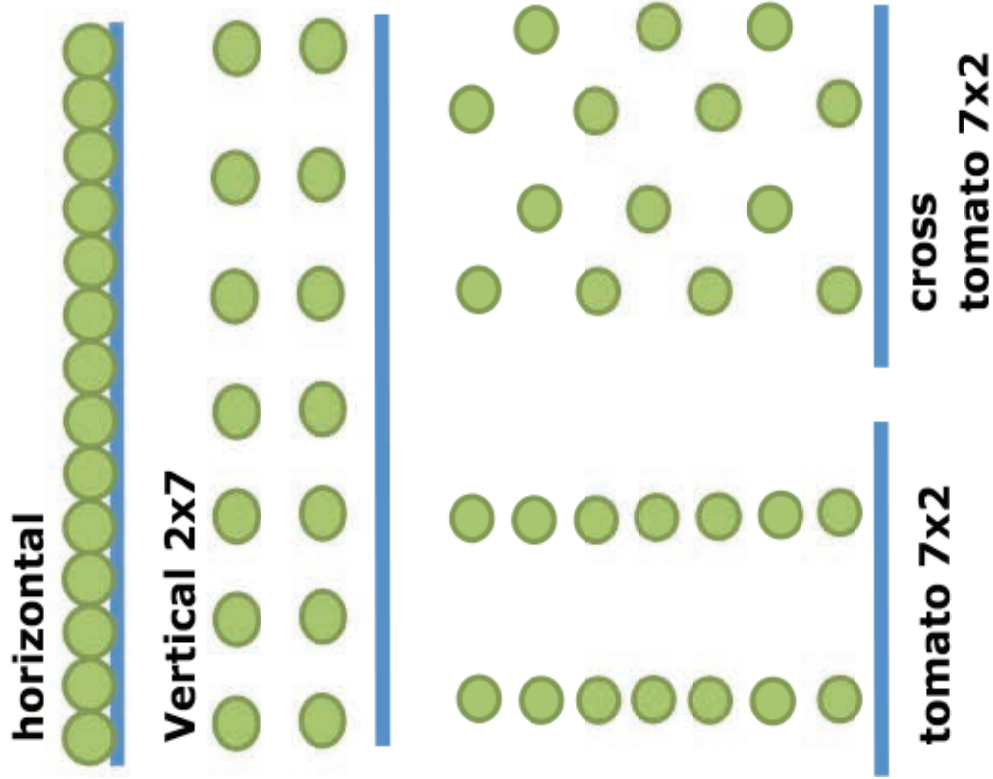
Figuur 45. Algenproductiviteit berekend voor een verticale PBR geïnstalleerd in een kas, berekening voor verschillende buis diameter (6cm, 11cm en 15cm) en voor verschillende lagen boven elkaar (2, 3 en 4)



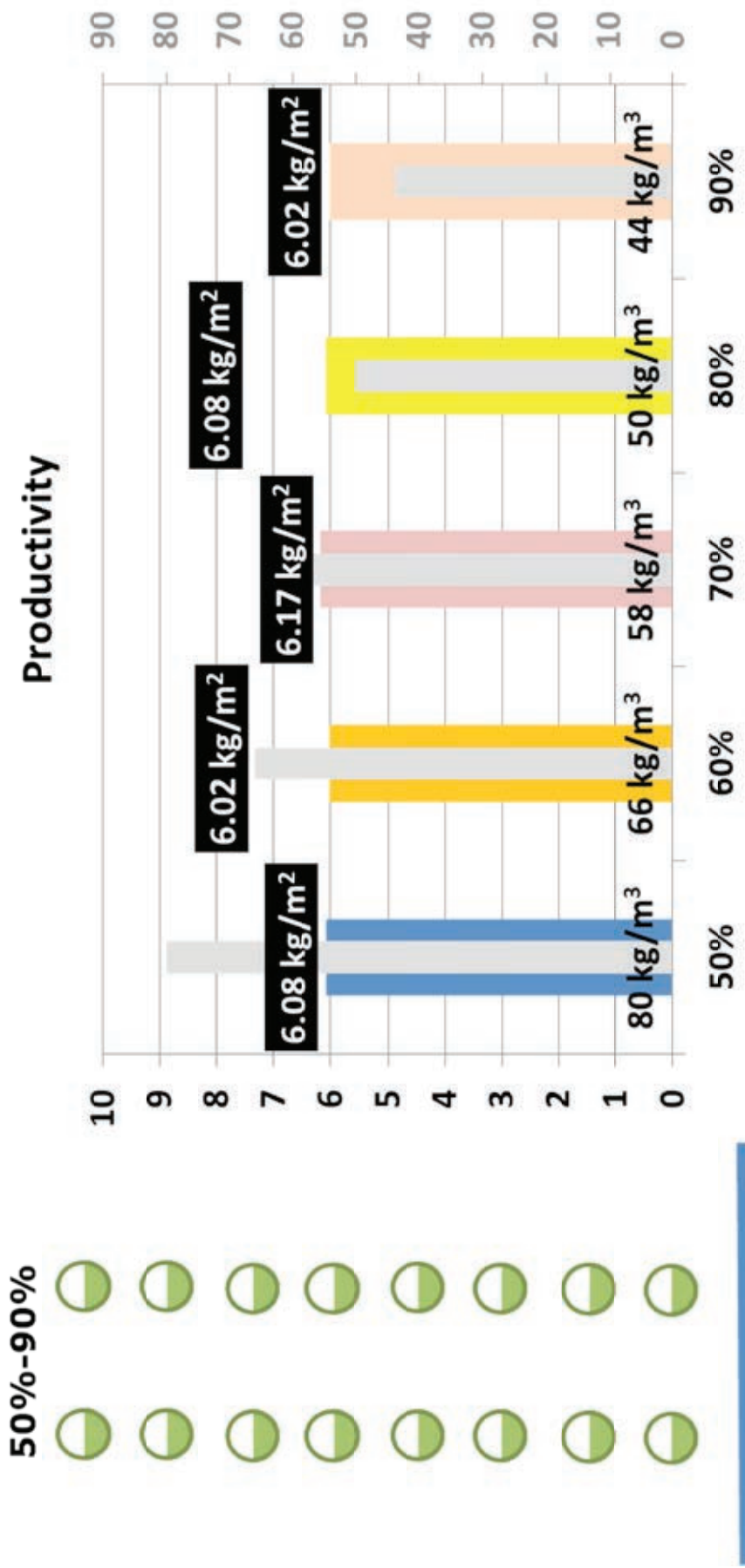
Figuur 46. Algenproductiviteit berekend voor een verticale PBR in de vorm van een "tomatensysteem" geïnstalleerd in een kas, berekening voor verschillende buisdiameters (6cm, 11cm en 15cm)



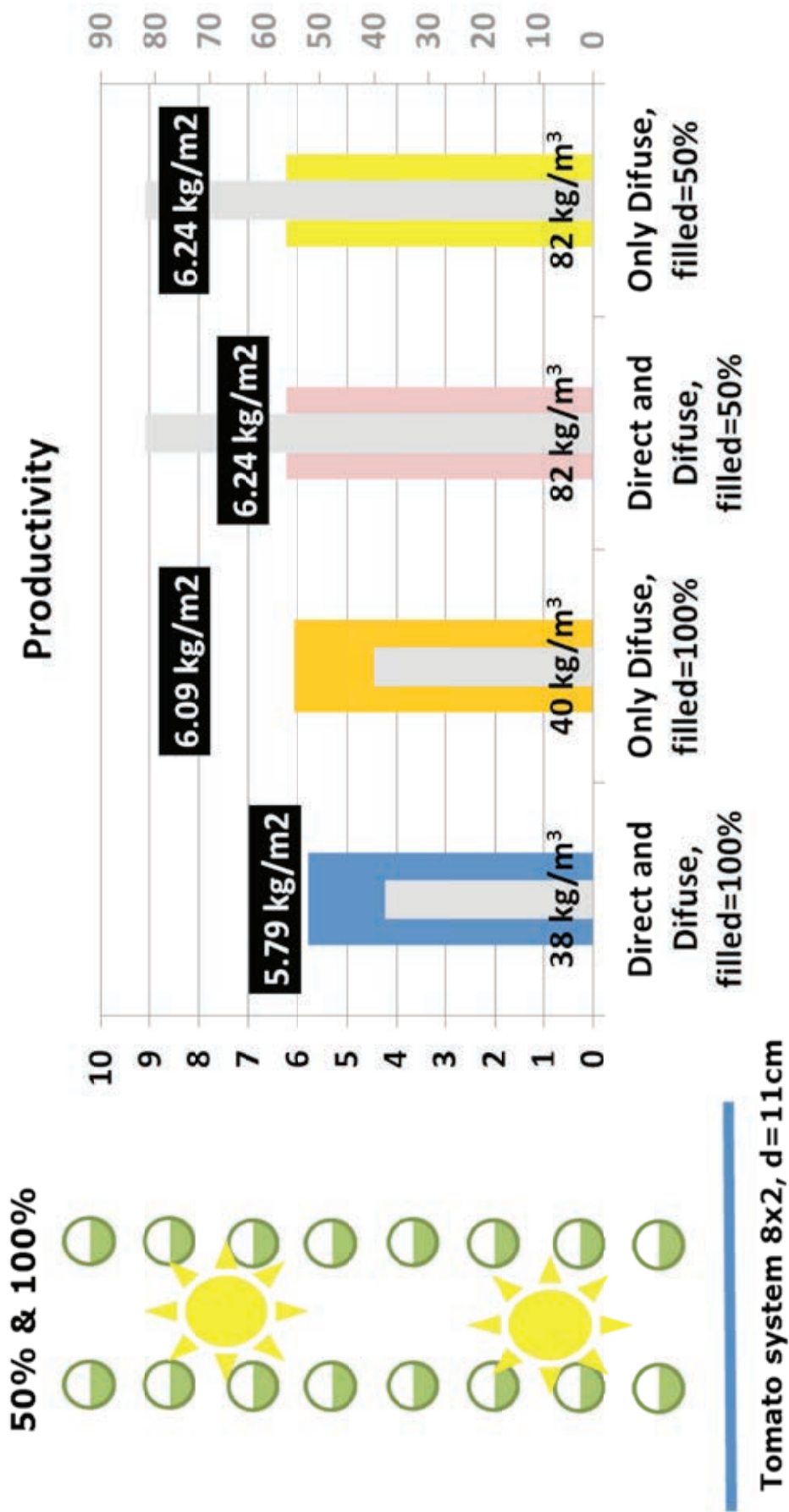
Figuur 47. Algenproductiviteit berekend voor verticale PBR in de vorm van een "tomatensysteem" geïnstalleerd in een kas, berekening voor verschillende horizontale afstanden (x-1, 20-35cm) en verticale afstanden (x-2, 30-40cm) voor een buisdiameter van 11cm.



Figuur 48. Algenproductiviteit berekend voor diverse PBR geïnstalleerd in een kas (verticaal, tomatensysteem, kruissysteem), berekening voor verschillende buis diameter (6cm, 11cm en 15 cm) met een vergelijkbaar volume per teeltoppervlak



Figuur 49. Algenproductiviteit berekend voor een verticaal PBR in een tomatensysteem configuratie in een kas, berekening voor verschillende vulfactoren van het systeem met lucht en water (50-90%) voor een buisdiameter van 11cm.



Figuur 50. Algenproductiviteit berekend voor een verticaal PBR in een tomatensysteem configuratie in een kas, berekening voor verschillende lichtcondities (diffuse licht) en voor verschillende vullfactoren van het systeem met lucht en water (50% en 100%) voor een buisdiameter van 11cm.

5.3 Energieverbruik

5.3.1 Energieverbruik in horizontale algenreactoren

Het energieverbruik wordt beïnvloed door de recirculatie van algen (pompcapaciteit, pomp energie), het drukverlies in het leidingsysteem, het ontgassing proces, de toevoer van CO₂, de koeling en koelmethode en het oogstproces.

Het energieverbruik is berekend voor het algen fotobioreactor systeem geïnstalleerd op het tuinbouwbedrijf Newplant (Figuur 51. links). De configuratie van het systeem is in meer detail beschreven in hoofdstuk 3.4.1. Het belangrijkste kenmerk van dit systeem is dat de buizen maar gedeeltelijk gevuld zijn met algen, waardoor gelijktijdig vloeistof (algen) en een gas (lucht) door het systeem stroomt. Het is een typische twee-fasen stroming. Het systeem kan worden onderverdeeld in twee delen. Het eerste deel bestaat uit het algen verdeelbuisnetwerk, alle componenten (buizen, kleppen, enz.) worden volledig gevuld met algen. De tweede deel bestaat uit de horizontale transparante algengroei buizen op de grond van een kas, deze zijn gedeeltelijk gevuld met algen, gedeeltelijk met lucht.



Figuur 51. Algen fotobioreactoren bestaande uit horizontale transparante buizen op het teeltoppervlak van een kas zoals geïnstalleerd bij de tuinbouwonderneming Newplant (links) en bij het bedrijf LGem (rechts)

Voor het eerste deel van het systeem werd het drukverlies berekend met de Darcy Weisbach vergelijking. De vergelijking is een veel gebruikte empirische relatie tussen verschillende buisstroming variabelen en wordt beschreven door de vergelijking hieronder.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

waarin:

L = buis lengte, m

D = buis diameter, m

V = gemiddelde snelheid van de vloeistof (= Q/A), m/s

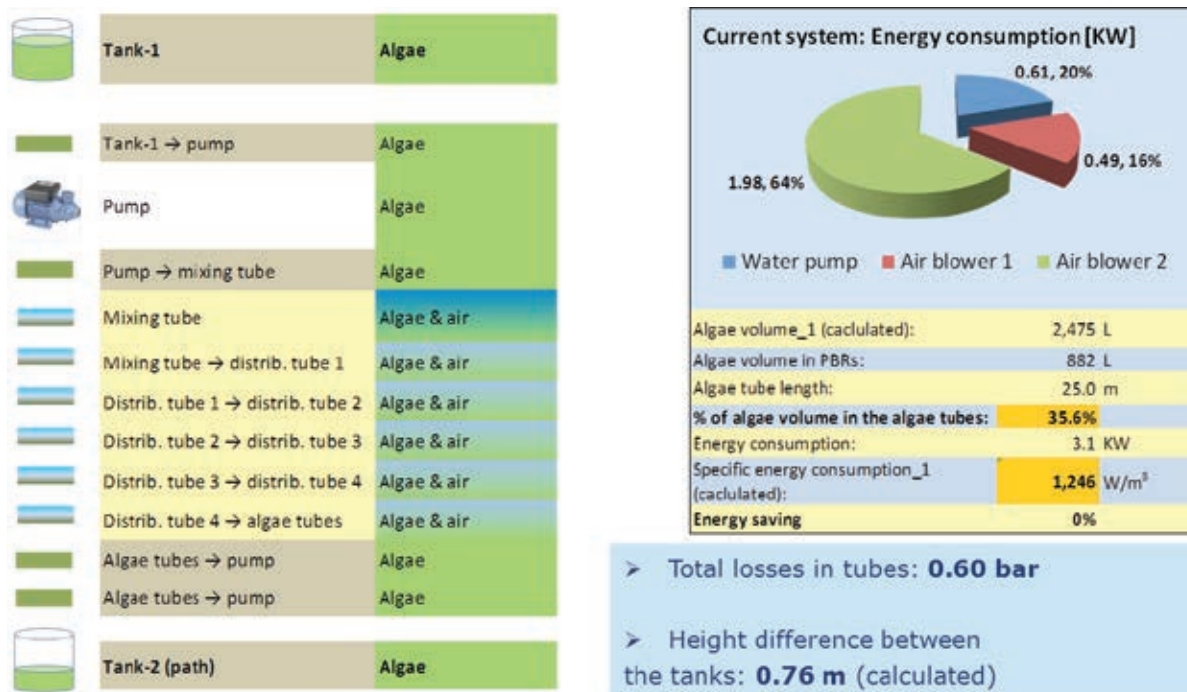
h_L = frictieverliezen bij een stroming van een vloeistof met een gemiddelde snelheid V door een buis met een diameter D en een lengte L , (m or N-m/N).

g = zwaartekracht = 9.81 m/s²

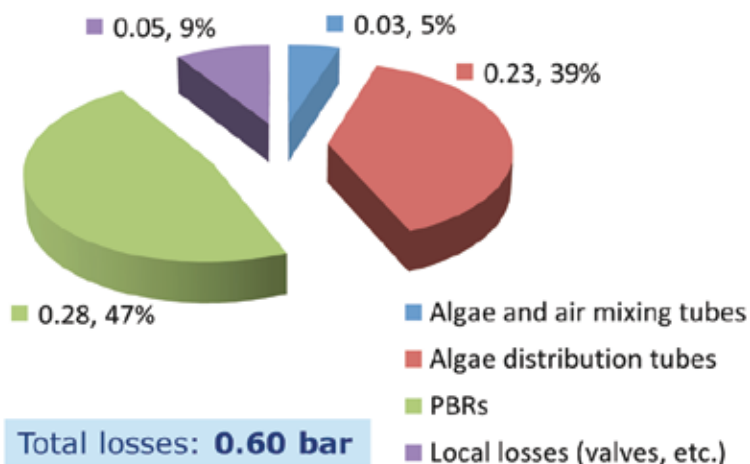
f = Moody frictie factor (een dimensievrije empirische factor welke een functie van Reynolds nummer en ϵ/D is, met ϵ = een empirische ruwheid van de pijp, m)

Het drukverlies van het tweede deel van de algen fotobioreactor werd berekend door de Lockhart-Martinelli correlatie (1949) en de Chisholm correlatie (1973) (Shah en Sekulic, 2003). Er werd een gemiddelde waarde voor het drukverlies door deze twee correlaties beschouwd voor de berekeningen. Tenslotte werd het karakteristieke pompdebiet voor de geïnstalleerde pomp gebruikt om het energieverbruik van de pomp te bepalen. In Figuur 52. zijn de stappen voor de berekening van het drukverlies in het systeem gepresenteerd. In de berekeningen werd ervan uitgegaan dat de buizen 33% gevuld waren met algen. Het hoogteverschil tussen de twee tanks varieerde van 0,7-0,8 m, en werd berekend met 0.76m.

De resultaten van de modelberekeningen komen zeer goed overeen met het gemeten drukverlies in het systeem in situ. Het totale energieverbruik van het systeem was 3,1 kW (berekend en gemeten). Slechts 20% (0,61 kW) van de energie wordt gebruikt voor algen recirculatie. Als we alleen kijken naar de energie die nodig is voor recirculatie was het specifieke energieverbruik 246 kW/m³ algen. Ongeveer de helft van het totale drukverlies van 0,6 bar werd veroorzaakt door de transparante fotobioreactor buizen en bijna 40% werd veroorzaakt door de algen verdeelingsleidingen (Figuur 53.). Hieruit blijkt dat er mogelijkheden voor energiebesparing zijn met betrekking tot het ontwerp van het systeem in de toekomst.



Figuur 52. Berekening van het drukverlies in een horizontale algenfotobioreactor in een kas op het tuinbouwbedrijf Newplant (pijpen met een grijs-blauwe kleur zijn gedeeltelijke met algen gedeeltelijk met lucht gevuld)

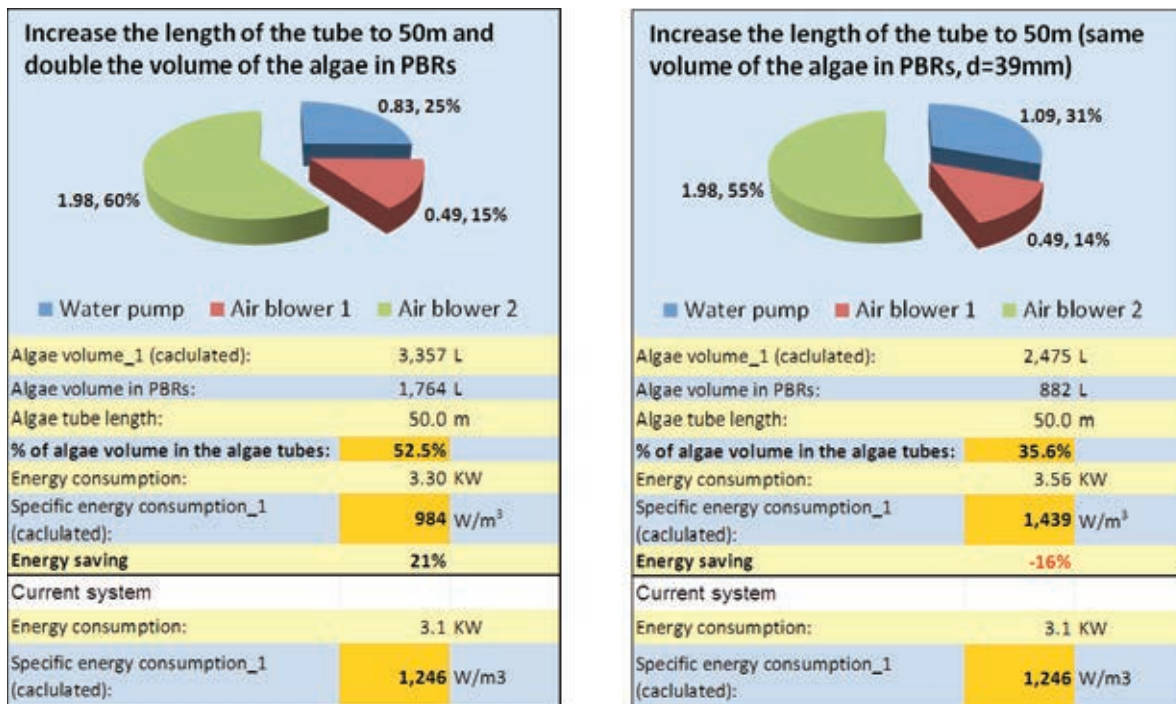


Figuur 53. Invloed van verschillende systeemcomponenten op het drukverlies een horizontale algenfotobioreactor in een kas op het tuinbouwbedrijf Newplant

Verschiedende scenario's zijn onderzocht om mogelijke oplossingen voor energiebesparing voor een toekomstig ontwerp van het systeem te vinden. Een verdubbeling van de lengte van de algenbuizen levert een energiebesparing van ca. 21% indien tegelijkertijd het algenvolume in het systeem wordt verdubbeld (Figuur 54a). Het energieverbruik neemt toe als de lengte van de buizen wordt verdubbeld, maar het volume van het systeem gelijk wordt gehouden (Figuur 54b). Indien de capaciteit van de tweede luchtpomp wordt gehalveerd kan 19% van de energie worden bespaard (Figuur 55a). Als de capaciteit van de tweede luchtpomp verder wordt verlaagd en tegelijkertijd het volume van het systeem wordt verdubbeld door verdubbeling van de lengte van de buizen kan zelfs meer dan 50% van de energie wordt bespaard (Figuur 55b). En

tenslotte, als de capaciteit van de tweede luchtpomp wordt gehalveerd en het systeem volume vier keer wordt vergroot met vier keer langere buizen, is een energiebesparing van bijna 70% mogelijk (Figuur 56.), er blijft een verbruik van ca. 400 W/m³ over. Door verdere verbetering van de installatie, bijvoorbeeld door een andere keuze van fittings en andere configuratie van fittings en buizen kan het systeem waarschijnlijk verder worden verbeterd.

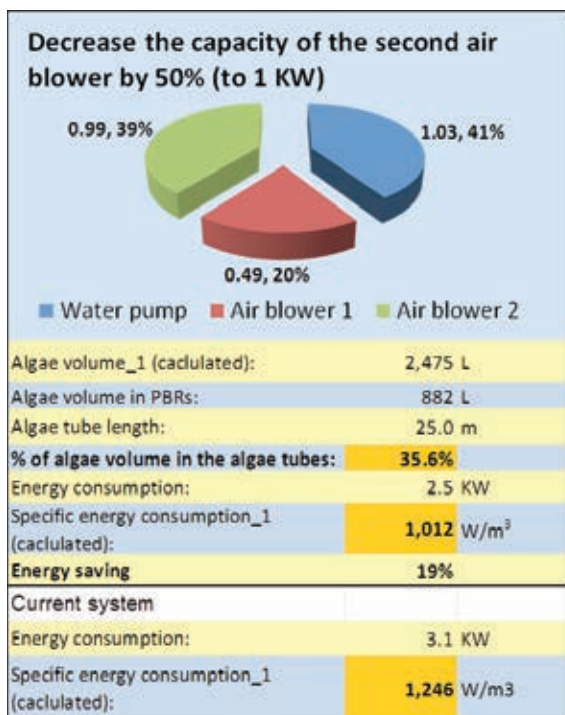
Het bedrijf LGen heeft een horizontaal algenbuissysteem ontwikkeld en gebruik dit voor de commerciële productie van algen in een kas (Figuur 51. rechts). Volgens de gegevens van het bedrijf is het specifieke energieverbruik van dit systeem 217 W/m³.



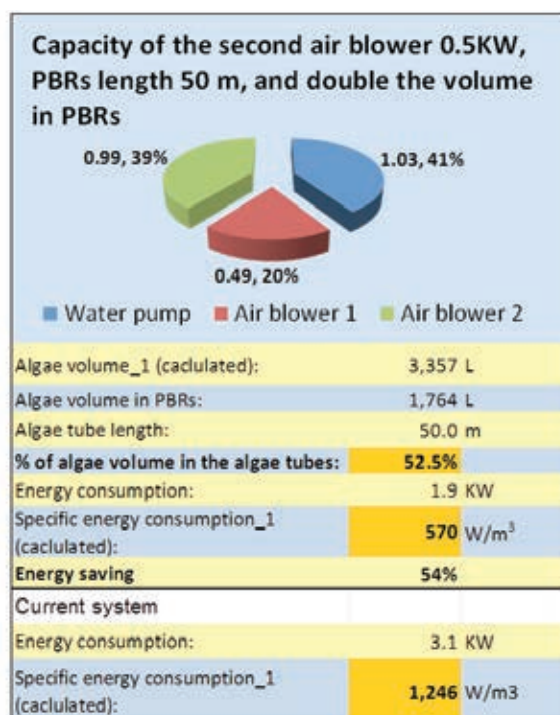
a)

b)

Figuur 54. Scenario berekening van het energieverbruik van het systeem bij Newplant. a) Verhoging van de buislengte van 25 naar 50m en verdubbeling van het algenvolume b) verhoging van de buislengte van 25m naar 50m bij een gelijk algenvolume.

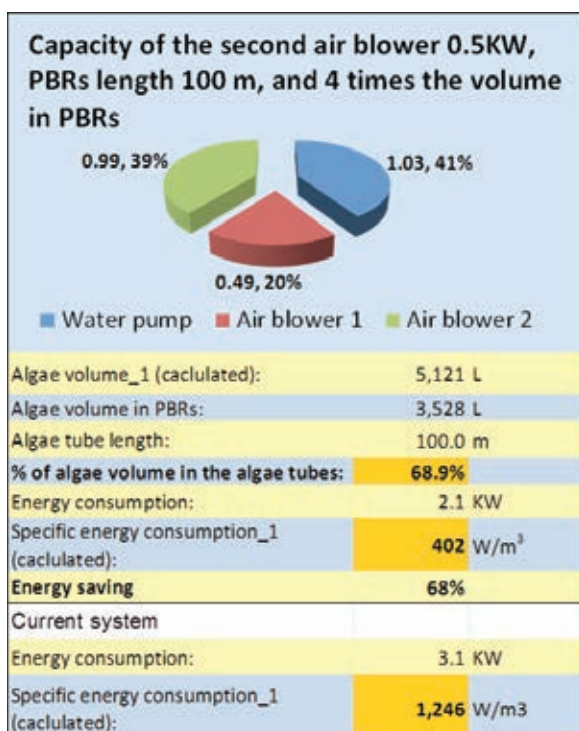


a)



b)

Figuur 55. Scenario berekening van het energieverbruik van het systeem bij Newplant. a) Verlaging van de capaciteit van de tweede ventilator naar 1kW b) verlaging van de capaciteit van de tweede ventilator naar 0.5 kW en verdubbeling van de pijplengte tot 50m bij een gelijktijdige verdubbeling van het algenvolume

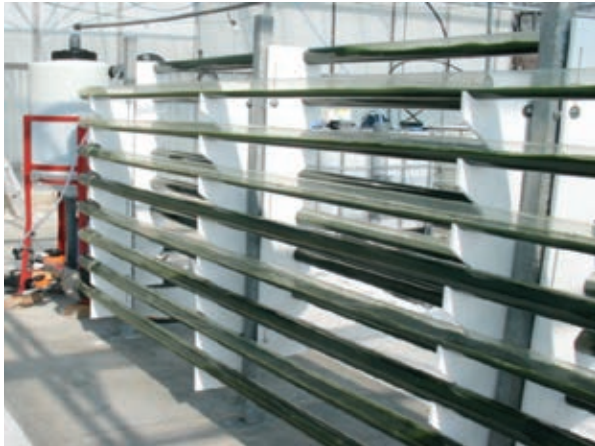


Figuur 56. Scenario berekening van het energieverbruik van het systeem bij Newplant. Verlaging van de capaciteit van de tweede ventilator naar 0.5 kW verhoging van de pijplengte naar 100m bij een verviervouding van het algenvolume.

5.3.2 Energieverbruik in verticale algenreactoren

Het wordt aanbevolen om het energieverbruikmodel gepresenteerd in hoofdstuk 5.3.1 uit te breiden om hiermee ook verticale algenreactoren te kunnen analyseren. Daarnaast zou het model worden vergeleken met meetgegevens van de verticale systemen geïnstalleerd in Bleiswijk.

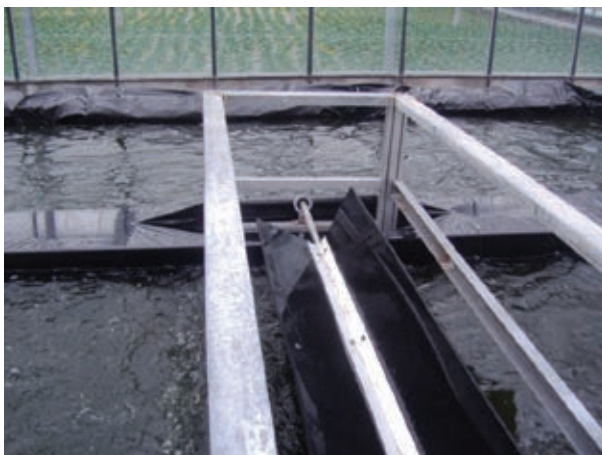
et bedrijf LGem heeft een verticale fotobioreactor ontwikkeld en gebruikt deze voor commerciële productie van algen in kassen. Volgens de gegevens van het bedrijf heeft de verticale configuratie een energieverbruik van 105 W/m³ wanneer deze in werking is zonder luchtpomp en 229 W/m³ wanneer de luchtpomp wordt gebruikt.



Figuur 57. Algen fotobioreactoren bestaande uit verticale transparante buizen in een kas zoals geïnstalleerd bij het bedrijf LGem, 8 rijen algenbuizen zijn gestapeld in een "tomaten" configuratie.

5.3.3 Energieverbruik in een race way pond systeem

Het energieverbruik van een algenvijver systeem wordt alleen bepaald door de capaciteit en de bedrijfsuren van het mengrad. Het energieverbruik in het open race way pond systeem geïnstalleerd op het bedrijf Bosplant is gemeten (Figuur 58.). Het elektriciteitsverbruik van de motor voor het mengrad is met een capaciteit van 180W gemeten. Het systeem werd 24 uur per dag gebruikt. Het algenvolume van het systeem was 9,3 m³. Dit resulteerde in een totaal energieverbruik van 4,3 kWh per dag en een specifiek energieverbruik van slechts 19,7 W/m³. Een modelmatige benadering is niet nodig voor dergelijke systemen.



Figuur 58. Het mengrad van een open pond algenreactor zoals geïnstalleerd op het tuinbouwbedrijf Bosplant.

6 Metingen algenteeltsystemen bij tuinbouwondernemers

6.1 Metingen fotobioreactor Newplant

De groeiomstandigheden voor het PBR-systeem bij Newplant werden gevolgd van 8 mei tot 20 juni 2012. Tabel 21. geeft een samenvatting van de groeifactoren gemeten zoals temperatuur, licht, pH en CO₂.

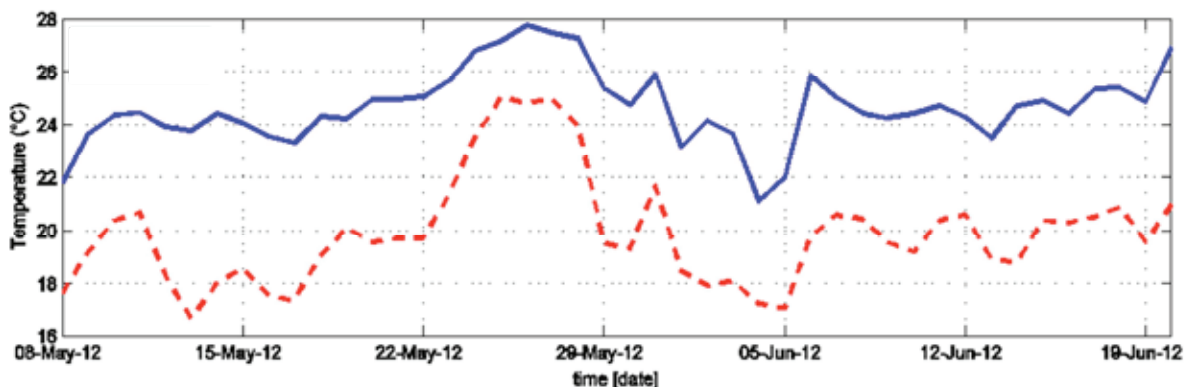
De temperatuur in de PBR volgt duidelijk het verloop van de kasluchttemperatuur, dit blijkt uit Figuur 59. Straling had een grote invloed op de algen temperatuur, ook was in dit systeem altijd maar 32% van het totale algenvolume blootgesteld aan licht, de rest van de algen bevond zich in de algenverdeelbuizen. De temperatuur schommelingen in de PBR zijn kleiner dan de schommelingen in luchttemperatuur, omdat de twee aanwezige tanks als warmtebuffer dienden en omdat water een hogere warmtecapaciteit heeft dan lucht. Een gedeelte van de algen verdeelbuizen is ingegraven in de grond, waardoor ook een koelend effect optreedt. Opeenvolgende zonnige dagen zoals van 14 tot 27 mei, resulteren in een verhoging van de algen temperatuur van 4 °C.

Figuur 60. toont de algen temperatuur gemeten op drie plaatsen in het PBR op een zonnige dag. Er werden geen significante temperatuur verschillen gemeten tussen het begin en het einde van een algenbuis. Dit kan worden verklaard door de korte reactorbuizen (25 m) en de hoge stromingssnelheid van de algen in de buizen. De verwijlduur van de algen in de reactorbuizen is zeer kort (114 s). De verhoging van de temperatuur door straling gedurende deze korte verwijlduur is klein. De temperatuur in de tank is constant.

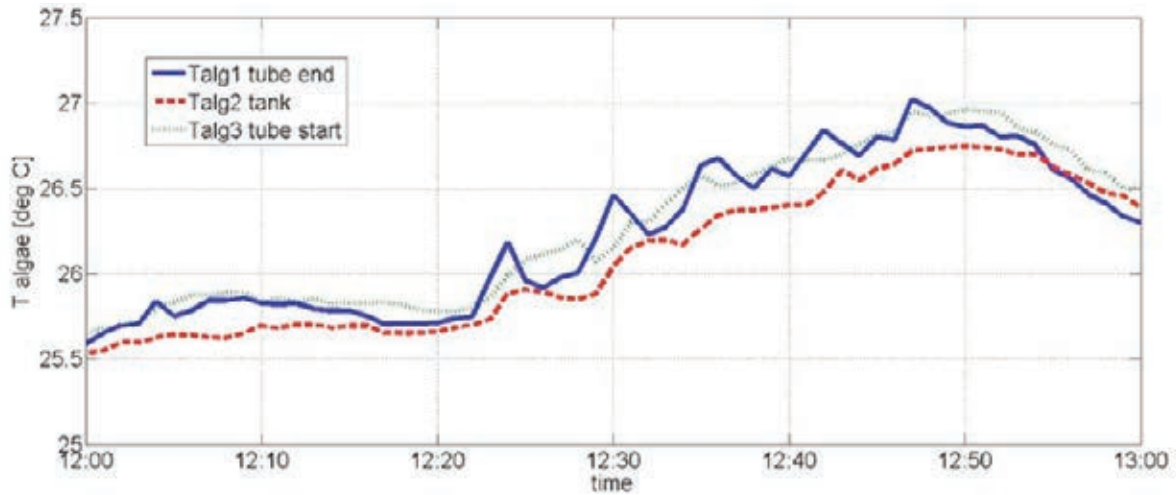
Koelen van het PBR systeem met water door een sprinkler werkt effectief zoals weergegeven in Figuur 61.

Tabel 21. Samenvatting van de groeiomstandigheden in de PBR bij Newplant tijdens de monitoring periode van 8 mei tot 20 juni 2012

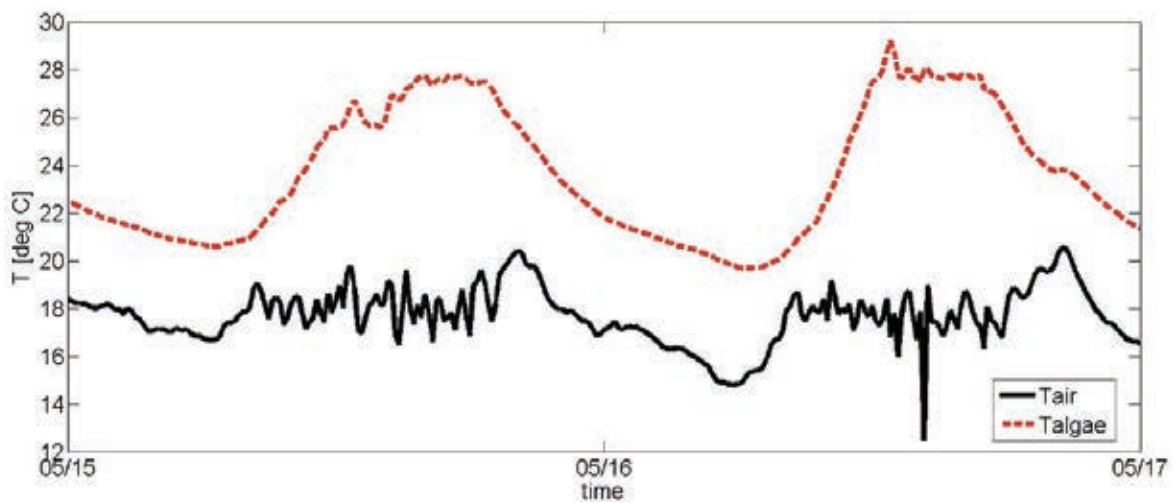
Meting	Sensor	Eenheid	Absoluut minimum	Absoluut maximum	Gemiddelde	Standaard afwijking
T algen	Talg2	°C	18.5	32.8	24.7 (dag)	1.4 (dag)
T kaslucht	Tair1	°C	13.9	31.5	19.9 (dag)	2.0 (dag)
PAR	PAR1	W/m ²		283.0		
pH	pH2	pH	7.18	10.68	8.74	0.21
CO ₂	CO ₂	ppm	40.5	2414	751.7	239.3
Electriciteitsverbruik	Ee	kWh/m ³	-	-	1.11	-



Figuur 59. Gemiddelde algentemperatuur in de PBR (blauw) en gemiddelde kasluchttemperatuur (rood) tijdens de monitoring periode van 8 mei tot 20 juni 2012 bij Newplant

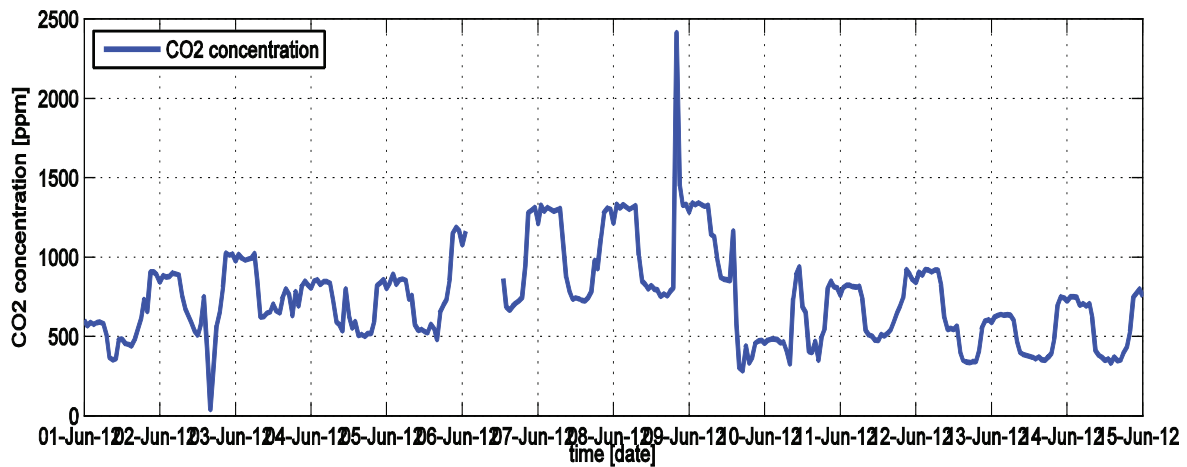


Figuur 60. Verloop van de algentemperatuur op twee plekken in de PBR en in de buffertank op 15 mei 2012 bij Newplant

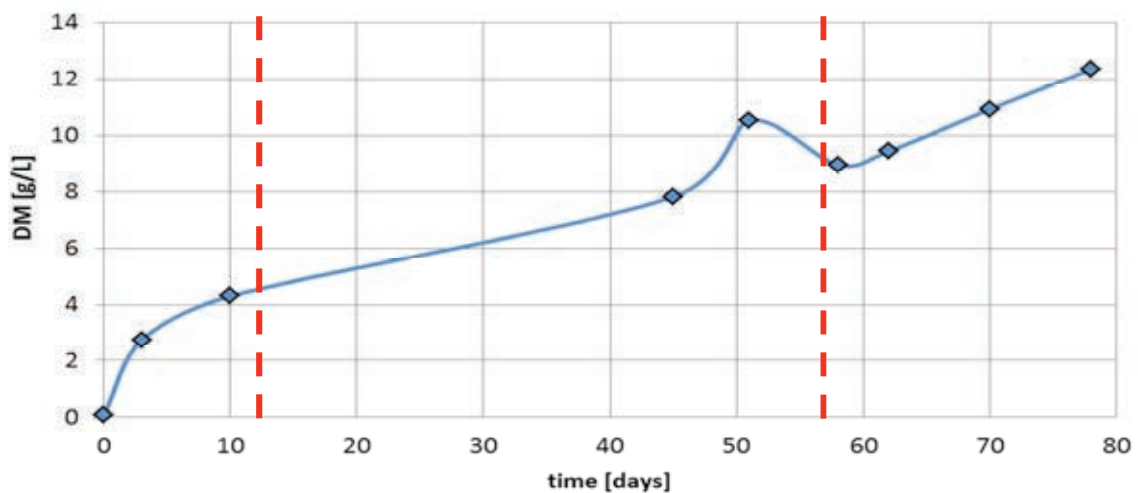


Figuur 61. Verloop van de algentemperatuur (rood) in de PBR en de kasluchttemperatuur (blauw) op 15 mei en 16 mei 2012 bij Newplant, koeling door water uit sprinkler (grijze gebieden)

CO₂ werd in het systeem geïnjecteerd met een stroomsnelheid van 90 l/min in pulsen van 10 seconden elke 3 minuten. De teler heeft de instellingen gewijzigd tijdens de monitoring periode. Er werd geen CO₂ geïnjecteerd tussen 23:00 en 7:30 uur als gevolg van het OCAP contract van de teler, de teler had alleen druk op de CO₂ leiding overdag. Dit kan worden gezien aan de dalende CO₂ concentraties tussen twee opeenvolgende dagen in Figuur 62. In totaal werd 3218 m³ CO₂ geïnjecteerd gedurende 84 dagen. Gemiddeld was dit 4,46 l CO₂/l algen/dag. De algen biomassa productie in de PBR systeem Newplant tijdens de meetperiode is weergegeven in Figuur 63. Er werd tijdens de meetperiode van 80 dagen in het PBR systeem 12 g/l, omgerekend 150 g/m³/dag, *Nannochloropsis oculata* geproduceerd in de vroege zomermaanden.



Figuur 62. CO₂ concentratie in de PBR van 1 juni tot 15 juni 2012 bij Newplant



Figuur 63. Algen biomassa productie in de PBR tijdens de monitoring periode bij Newplant, verticale lijnen geven aan wanneer water werd bijgevoerd in systeem

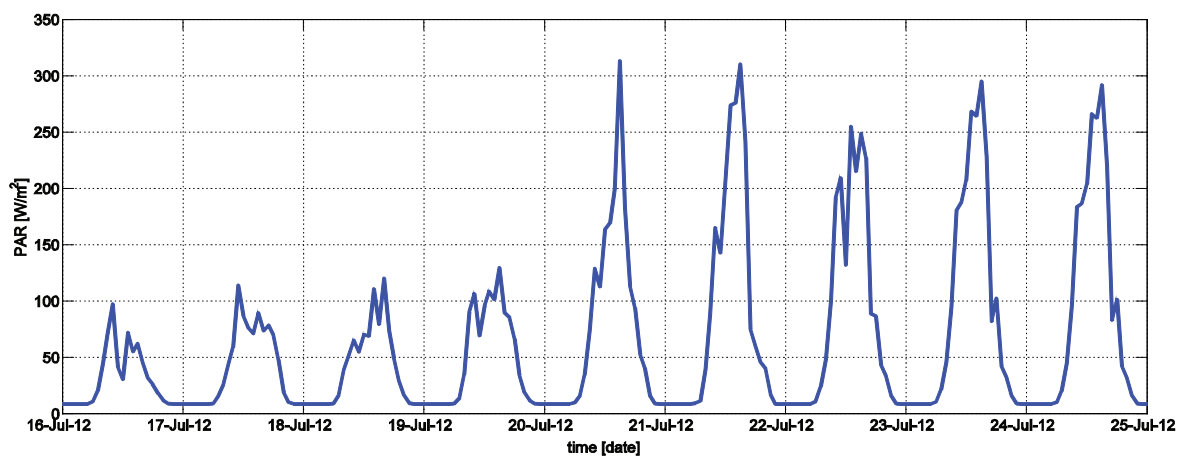
6.2 Metingen racewaypond Bosplant

De groeicondities voor het RWP systeem bij Bosplant werden gevolgd van 28 juni tot 26 juli 2012. Tabel 22. geeft een samenvatting van de groeifactoren temperatuur, licht en pH in het RWP systeem weer. Figuur 64. laat het verloop van de PAR straling in de kas boven de RWP zien en Figuur 65. de resulterende kaslucht en water temperaturen in de algenvijver. Een hogere instraling zorgt voor het opwarmen van het systeem. Door verdampingskoeling van water uit het systeem blijven de algentemperaturen ongeveer op het niveau van de kasluchttemperatuur, anders dan in het eerder gepresenteerde PBR systeem.

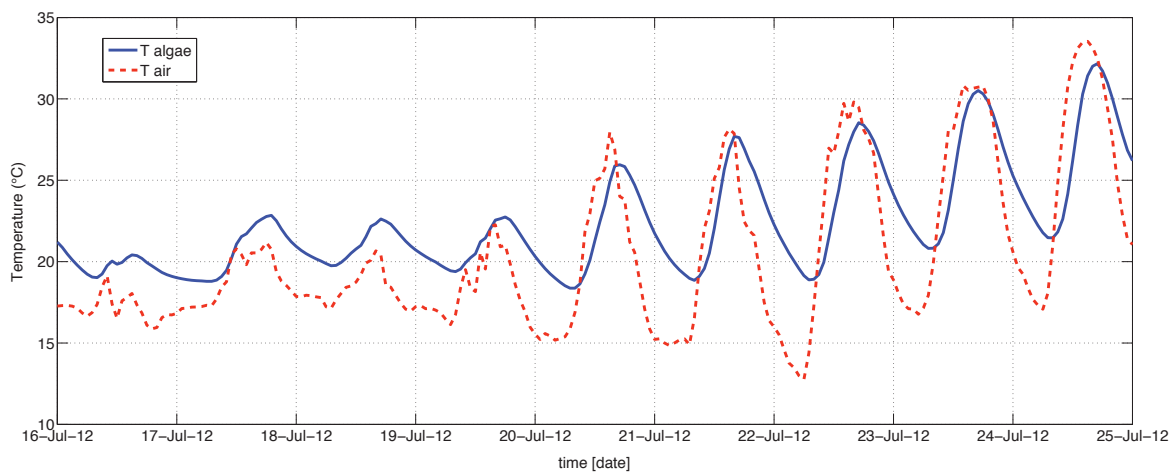
De algen biomassaproduktie in het RWP systeem van Bosplant tijdens de meetperiode is weergegeven in Figuur 66. Bosplant produceerde 0.27 g/l *Nannochloropsis salina* in 27 dagen, omgerekend 10 g/m³/dag in de zomermaanden.

Tabel 22. Samenvatting van de groeicondities in de RWP bij Bosplant tijdens de monitoring periode van 28 juni tot 26 juli 2012

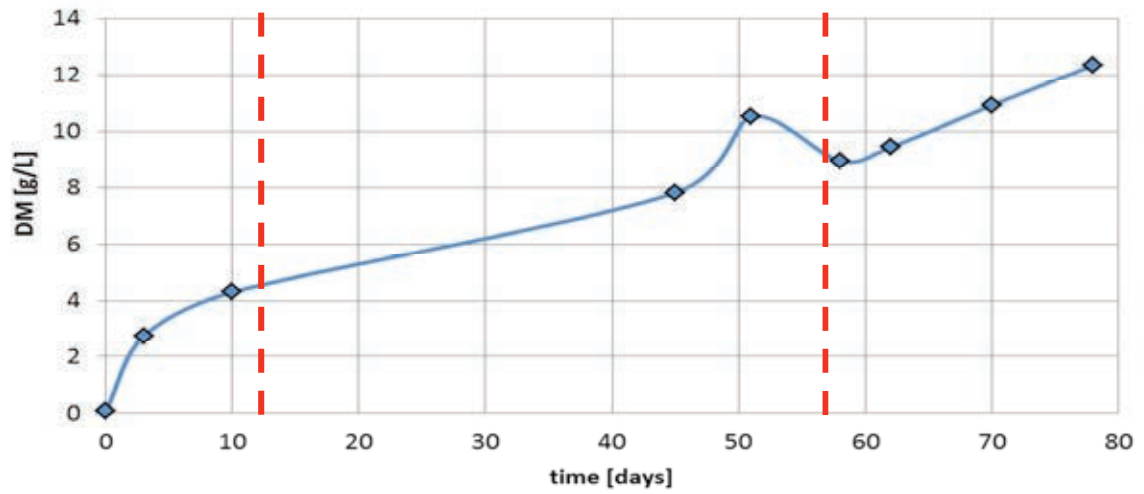
Meting	Eenheid	Absoluut minimum	Absoluut maximum	Gemiddelde	Standaard afwijking
T algen	°C	18.4	32.2	23.0 (day)	2.2 (day)
T kaslucht	°C	12.8	33.6	20.7 (day)	2.8 (day)
PAR	W/m ²	8.8 (night)	313.2	62.2	19.6
pH	pH	7.29	11.32	8.56	0.96
Electriciteitsverbruik	kWh/m ³	-	-	0.02	-



Figuur 64. PAR straling in kas boven RWP gemeten van 16 juli tot 25 juli 2012 bij Bosplant



Figuur 65. Temperatuur kaslucht en algenvloeistof in de RWP gemeten van 16 juli tot 25 juli bij Bosplant



Figuur 66. Algenbiomassa productie in de RWP tijdens de monitoring periode bij Bosplant, verticale lijnen geven aan wanneer water werd bijgevoerd in het systeem.

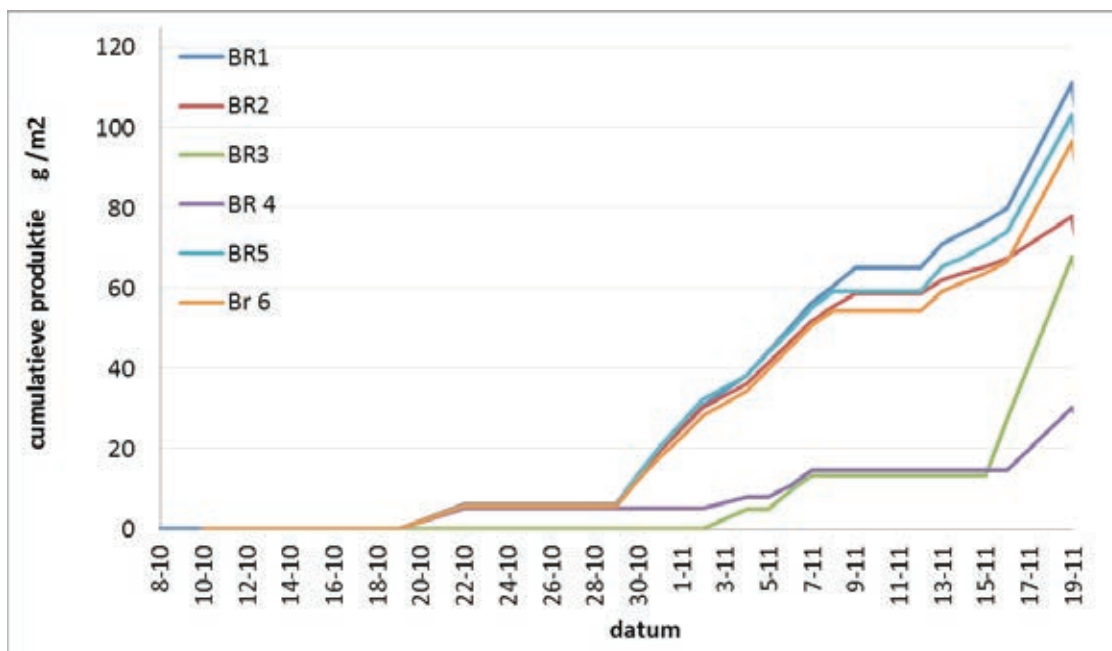
7 Experimenten algenteeltsystemen in een kas

De eerste fase van de experimenten had als doel de techniek van de bioreactoren (BR) te testen en te leren kennen, de algehele data-acquisitie op te zetten en daarnaast de techniek van het telen van algen te leren kennen en ervaring op te doen met oogsten en de bepalingen van de hoeveelheid algen. Er heeft een start-teelt plaatsgevonden van 2 oktober tot 19 november en een vervolgteelt van 20 november tot 17 december. Daarna zijn alle systeem gereinigd en opnieuw opgestart voor vervolgonderzoek in 2013.

7.1 Start-teelt algen in Bleiswijk

Voor de eerste algenteelt in Bleiswijk is gekozen voor een snelgroeende alg, *Chlorella sorokiniana*. De voorkweek is op 2 oktober geënt in de bioreactoren BR. Na verdunning bedroeg de dichtheid ca 0.03 g/l. De groeisnelheid ging zeer snel en zat in twee weken tijd op ruim 2 g/l. De eerste vier weken, waarbij het systeem nog niet voorzien was van alle technische apparatuur zijn gebruikt om ervaring op te doen en kenmerken te verzamelen van het systeem. Hiervan zijn de volgende ervaringsfeiten van belang om te vermelden.

- Bij een te lage vulgraad van het systeem (buffervat < 20 l) zuigt de vloeistofpomp regelmatig de tank leeg en gaat caviteren.
- Bij een te hoge vulgraad (> 80 l) is de kans aanwezig dat het systeem gaat overlopen
- Bij een vulling van 40 liter is de totale systeeminhoud 450 l. Dit is empirisch bepaald uit het verbruik aan water uit het voorraadvat.
- De theoretische vulgraad, op basis van inhoudsberekeningen komt uit op 590 l maximaal. Bij 40 l vulling (buffer) van de buizen is de theoretische inhoud 389 l, echter de inhoud van de bochten en de inhoud van de laatste onvolledig gevulde buis laat zich lastig vaststellen.
- De omloopsnelheid is gemeten aan de stroomsnelheid van kleurstof (algen, Fe-chelaat) en is 5 minuten. Dit is later een aantal keren herhaald aan de hand van kleurverschil van de vloeistof (bij hervullen na oogst). Dit blijkt wat variabel en ligt tussen 4.5 en 5 minuten.
- Bij uitzetten van de CO₂ dosering, bij een normale dichtheid loopt de CO₂ in de BR snel terug en kan dalen tot waarden ver onder 100 ppm.
- Bij een maximale flow-rate van CO₂ is de CO₂ in de kaslucht (vanwege de overdruk op het systeem lekt er CO₂ weg) snel ver boven de 1000 ppm.
- Bij de hoge CO₂ flow rate komt de CO₂ in het reactorvat ver boven de 10000 ppm. Dit is boven het maximum dat de sensoren registreren.
- Verhoging van het pH setpoint gaf een flinke verlaging van de CO₂ concentratie, zodat wel gemeten kan worden met de geïnstalleerde CO₂ sensoren
- De outflow van lucht uit de overdrukleiding, vanwege de overdruk door de extra luchtpomp lijkt nihil te zijn.
- Er zijn soms duidelijke kleurverschillen van de algensuspensie waarneembaar. Het is niet duidelijk waar dit op terug te voeren is. N-tekort geeft duidelijk wel lichte kleuren, zeker na drogen van een algenmonster.
- De algen hebben de neiging te klonten (coaguleren). Bij een aantal BR trad al snel aangroei op van de buizen op, waardoor de groei sterk stagneerde. Bij de start van de systemen was een vlokkerige bruine substantie aan de wand zichtbaar, met een onbekende oorzaak. Soms trad zeer snel aangroei op (BR3), bij een andere reactor (BR6) waren over de hele periode geen opvallende afwijkingen waar te nemen, deze reactor gaf een goede groei. De oorzaak van de aangroei is nog duidelijk, waarschijnlijk stress, wat diverse oorzaken kan hebben gehad: lage pH, laag CO₂, laag N.
- De cumulatieve productie van de start-teelt in de zes BR wordt weergegeven in Figuur 67. Het effect van de sterke aangroei op de buiswanden is zichtbaar in groei in BR3 en BR4.

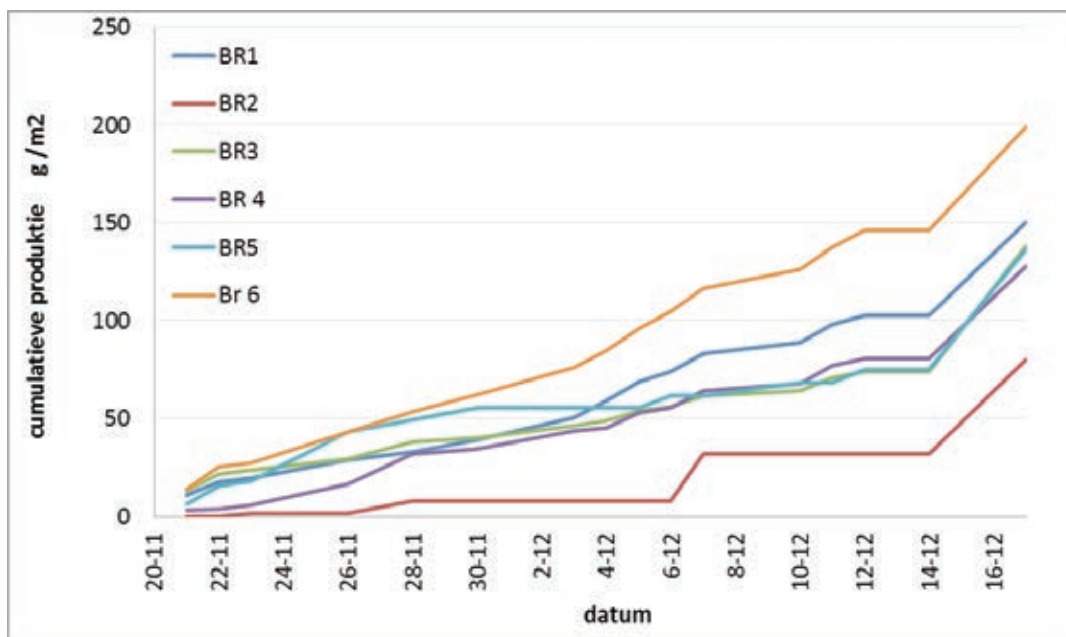


Figuur 67. De cumulatieve productie van *Chlorella sorokiniana* (g/m^2) van de start-teelt in alle zes bioreactoren BR1 t/m 6 tijdens de periode van 2 oktober t/m 19 november in Bleiswijk.

7.2 Vervolg-teelt algen in Bleiswijk

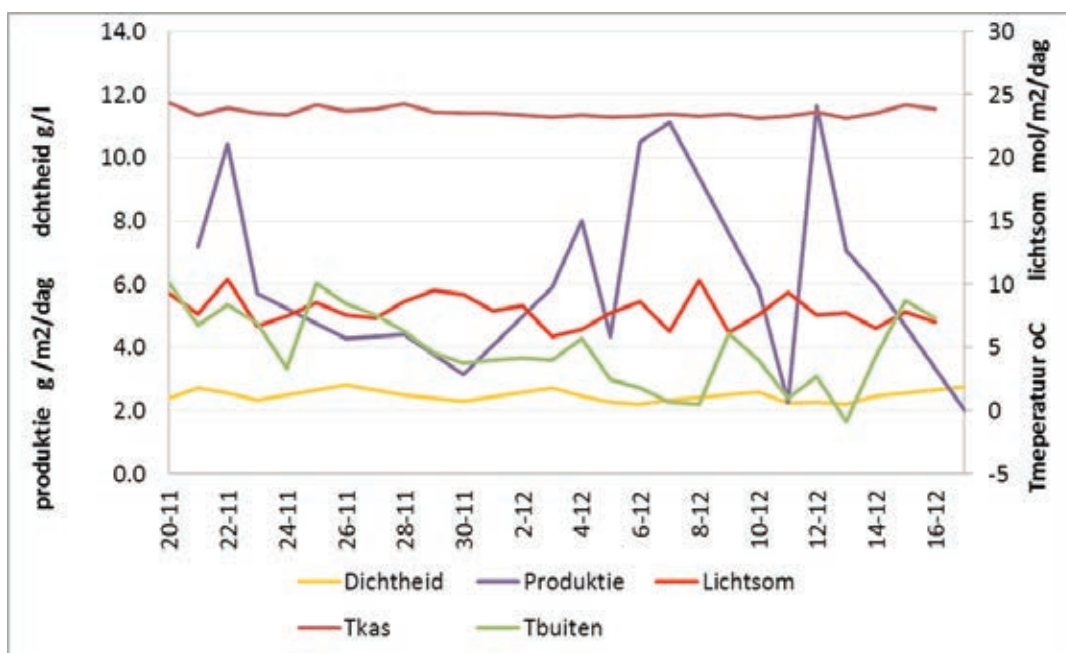
De eerste teeltperiode, van 2 oktober tot 19 november, is gebruikt om ervaring met het systeem op te doen. Omdat veel systemen ernstig aangegroeid waren door suboptimale groeiomstandigheden onder andere door technische kinderziekten, is op 20 november een reset gedaan van alle zes algenreactoren. Dit is gedaan door ze allen op dezelfde uitgangsdichtheid te brengen, aan de hand van een dichtheidsbepaling en een evenredige afoogst. De systemen zijn bijgevuld, nu met verschillende voedingsoplossingen. Uitgangspunt hierbij was dezelfde N-hoeveelheid, maar verschillende N-vormen (Tabel 24.).

Al snel na de start bleek een probleem op te treden met BR2, de groei verliep dramatisch slecht en in samenhang daarmee ontstond er zeer snel een sterke aangroei op de buizen. Tussen 3 en 6 november werd een herstart van het systeem doorgevoerd (Figuur 68. en 7.4). Ook bij BR3 en BR4 verliep de groei wat minder goed en trad vrij snel weer aangroei aan de buizen op. Bij BR1, 5 en 6 verliep de teelt aanvankelijk zonder problemen. Helaas ging bij BR5 begin november de controller stuk, waardoor gedurende ca. een week geen CO_2 automatisch werd gedoseerd. Al snel trad toen aangroei op aan de wanden. Af en toe is handmatig CO_2 toegediend, echter vanwege ontbreken van meetwaarden kon dit niet goed worden uitgevoerd. Ongeveer drie weken na de start trad ook bij BR1 steeds meer aangroei op. De groeiverschillen zijn duidelijk zichtbaar in het verloop van de cumulatieve groei van alle bioreactoren (Figuur 68.).

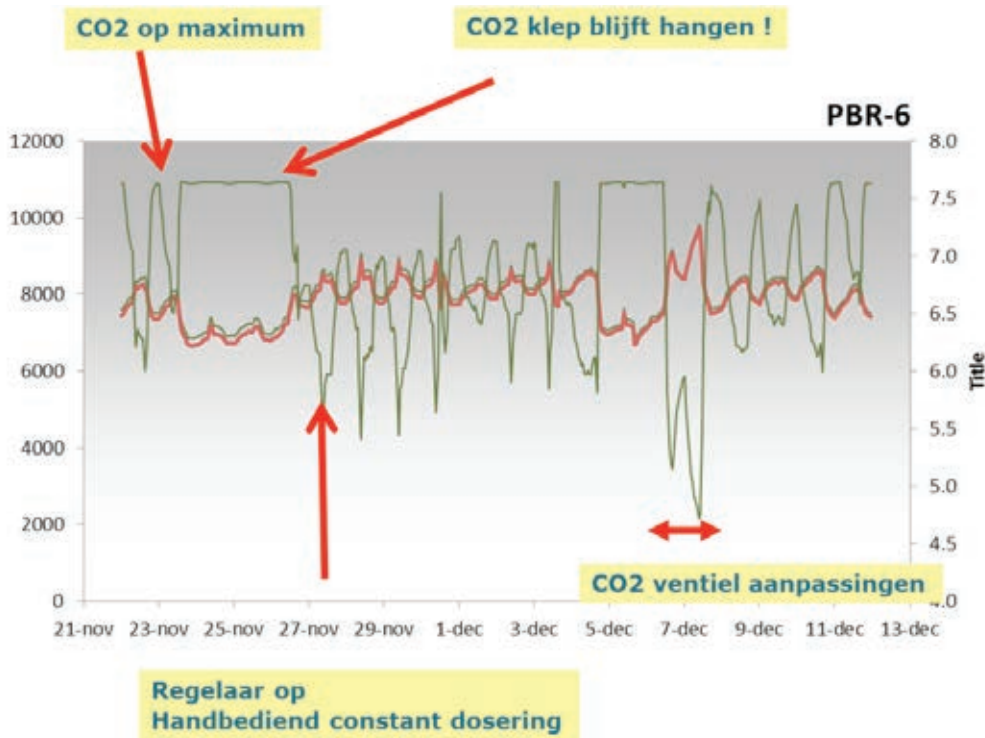


Figuur 68. Cumulatieve productie van *Chlorella sorokiniana* (g/m^2) van de vervolgteelt in alle zes bioreactoren BR 1 t/m 6 in Bleiswijk in de periode 20 november tot 17 december.

Bij andere reactoren verliep de groei en ontwikkeling een tijdlang probleemloos. Er is gedurende ca. vier weken onafgebroken gekweekt en werd gemiddeld vijfmaal per week geoogst. Een voorbeeld van de resultaten die dan behaald worden is weergegeven in Figuur 69. Hier moet nog wel bij opgemerkt worden dat ook hier de techniek niet altijd vlekkeloos werkte, gedurende een tijd bleef de CO_2 klep hangen, waardoor een zeer hoge CO_2 concentratie werd gemeten. Omdat de klep niet snel vervangen kon worden is de flow rate op een minimaal laag niveau gezet, zodat de CO_2 concentratie beheersbaar bleef. Niettemin is de CO_2 concentratie sterke wisselend geweest (Figuur 70.). Onder deze condities blijkt in de winter met de geïnstalleerde en toegepaste belichting een productie van ca. $7 \text{ g}/\text{m}^2/\text{dag}$ of $330 \text{ g}/\text{m}^2/\text{dag}$ haalbaar. In verhouding tot de lichtsom komt dit neer op $0.9 \text{ g}/\text{mol}$ fotonen. Dit is goed in overeenstemming met de data van Cuaresma (2011), waar $1.2 \text{ g}/\text{mol}$ fotonen is gevonden onder optimale groeicondities in het lab voor *Chlorella sorokiniana*. Op 17 december is de eerste experimentele teeltfase beëindigd en zijn de systemen gereinigd.



Figuur 69. De groei van *Chlorella sorokiniana* ($\text{g}/\text{m}^2/\text{dag}$) en de dichtheid (g/l) gedurende vier weken stabiele algenkweek in bioreactor BR 6 in Bleiswijk.



Figuur 70. Het verloop van de CO₂ concentratie en de pH gedurende vier weken bij bioreactor BR6 in Bleiswijk.

7.3 Resultaten algenvoeding

Uit de literatuur was getracht een beeld te krijgen van de noodzakelijke samenstelling van de voedingsoplossing. Helaas bleken de referenties nogal tegenstrijdige gegevens op te leveren.

Een samenvatting van de resultaten staat in Bijlage i. Uit deze dataset is een gemiddelde voedingsoplossing gedestilleerd. Aangezien nergens informatie over de EC waarde is gevonden, is deze berekend uit de geselecteerde voedingsoplossingen. Omdat ook de kationen- en anionensom niet kloppend was, is er een correctie uitgevoerd om deze op gelijk niveau te krijgen. Ook is de HPO₄⁻ weggelaten en omgezet naar H₂PO₄²⁻. Door de pH instelling van de oplossingen zal deze namelijk toch ook veranderen in uiteindelijk de HPO₄⁻ vorm. De merkwaardig hoge B concentratie is uiteindelijk verlaagd tot normale waarden. Omdat de NH₄ dosering vrij laag leek, is een vergelijk gemaakt met een voedingsoplossing die afgeleid is uit de substraat-groenteteelt. Voor de eerste start-teelt van 2 oktober tot 19 november is de helft van de BR gevuld met een uit de literatuur standaard voedingsoplossing, de andere helft is gevuld met de 'substraatoplossing'. De uiteindelijk toegepaste voedingsoplossing is vermeld in Tabel 23. De bijbehorende recepten staan in Bijlage II.

Als snel bleek in de start-teelt dat de pH bij alle reactoren in het begin daalde. Dit was sterker bij de 'substraatoplossing'. Het is vrijwel zeker dat dit veroorzaakt is door de hogere NH₄ concentratie. Uit ervaring met plantenvoeding is bekend dat planten preferent NH₄ opnemen, waarbij de ionen uitwisseling tussen wortel en bodemoplossing (netto H⁺ uitscheiding) de pH laat dalen. Andersom is bij NO₃⁻ opname de pH stijgend. Algen reageren klaarblijkelijk identiek. Doordat een voedingsoplossing voor substraat ontwikkeld is voor een dosering met druppelaars, als aanvulling op het verbruik, wordt slechts een geringe hoeveelheid NH₄ aangevoerd. In het geval van een gevulde BR is het gehele teeltmedium gevuld met de totale NH₄ hoeveelheid. Dit is vergelijkbaar als zou bij de start van de teelt de substraatmat gevuld zijn met de standaardoplossing, dus met normaal NH₄. In dat geval daalt dan ook de pH zeer sterk. Dit is mede verholpen door geregeld wat KOH toe te dienen.

Tijdens deze periode is handmatig de CO₂ flow op een laag niveau aangezet, om toch de algen van CO₂ te kunnen voorzien. De pH is daardoor soms erg laag geweest, waarden ver beneden 5 zijn gemeten. Na ongeveer drie weken normaliseerde pH, klaarblijkelijk hadden de algen alle aanwezige NH₄ geconsumeerd. Vanaf die tijd zijn er geen problemen meer geweest met de pH.

In de start-teelt is er de eerste weken niet geoogst. Doordat er ook geen verversing van voeding was, bleek de N op een

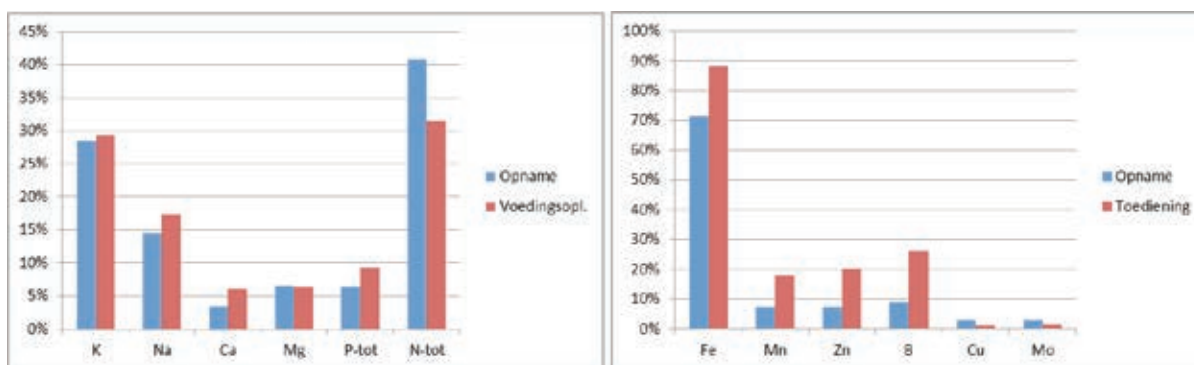
gegeven moment uitgeput. Dit was als eerste zichtbaar uit lage groeisnelheden, maar ook bleek de kleur van de algen na drogen plotseling zeer licht tot geelachtig te worden. Uit voedingsanalyses bleek dan ook de NH_4 en NO_3^- concentratie nagenoeg nul. Er is vervolgens 5 mmol/l ureum $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ toegevoegd, waarna de groei weer normaal verliep.

Van deze teelt is een gedroogd algenmonster geanalyseerd op nutriënten. De resultaten laten zien dat in vergelijking met de verhoudingen in de dosering, bij de opname naar verhouding ca. 20% meer N is opgenomen (Figuur 71.). Voor de kationen, maar speciaal voor Ca en ook voor P geldt dat ze minder zijn opgenomen dan aanwezig in de voeding. In deze analyse ware S en Cl niet betrokken. De spoorelementen zijn allen beduidend minder opgenomen dan de dosering.

De eerste conclusie uit de start-teelt ten opzichte van de voedingsoplossing is dat er geen goede voedingsrecepten beschikbaar zijn in de literatuur die voor commerciële algenproductie in de tuinbouw bruikbaar zijn. Een verdere verbetering op onderdelen is nog nodig. Wij kunnen verder concluderen dat de “substraat oplossing” zoals bekend in de tuinbouw voor de gewasproductie minder geschikt was voor de opstart van een algenteelt. Ten slotte kan worden geconcludeerd dat de algensoort *Chlorella sorokiniana* een hoge behoefte aan N heeft. Een goede vorm van N toediening hangt af van het moment van toediening en de gewenste pH.

Tabel 23. Behandelingsschema voedingsoplossing voor de start-teelt algen in de periode van 2 oktober tot 19 november in Bleiswijk.

Nutriënten	Concentratie	Literatuur gemiddeld	Literatuur na correctie	Voedingsoplossing voor start-teelt algen	'Substraat oplossing' voor start-teelt algen
EC	me/l	1.0	1.8	1.5	1.5
NH_4	mmol/l	1.0	2.0	1.7	3.9
K	-	2.9	5.0	4.3	5.6
Na	-	4.2	5.0	4.3	0.4
Ca	-	0.4	1.0	0.9	0.9
Mg	-	0.5	1.8	1.5	1.7
NO_3	-	4.7	13.0	11.1	11.1
Cl	-	0.9	1.5	1.3	0.4
SO_4	-	0.5	0.5	0.4	0.9
H_2PO_4	-	1.3	2.0	1.7	1.7
HPO_4^-	-	0.5			
HCO_3	-	0.9	0.0		
SiO_3^-	-	0.1	0.0		
Fe	$\mu\text{mol/l}$	11.9	10.0	8.6	8.6
Mn	-	4.2	4.0	1.7	1.7
Zn	-	7.9	2.0	1.7	1.7
B	-	57.6	25.0	12.9	12.9
Cu	-	2.5	0.5	0.1	0.1
Mo	-	1.2	0.1	0.1	0.1
Co	-	0.8	0.1	0.0	0.0



Figuur 71. De gehalten aan hoofd- en sporelementen in de toegediende voedingsoplossingen genalyseerd in de droge algenmassa, uitgedrukt als % van de totale hoeveelheid nutriënten.

De start-teelt van 2 oktober tot 19 november werd gebruikt om ervaring met het systeem op te doen. Omdat veel systemen ernstig aangegroeid waren door suboptimale groeicondities onder andere door technische kinderziektes, is op 20 november een reset gedaan van alle zes algenreactoren. Dit is gedaan door ze allen op dezelfde uitgangsdichtheid te brengen, aan de hand van een dichtheidsbepaling en een evenredige afoogst. De systemen zijn bijgevuld, nu met verschillende voedingsoplossingen. Uitgangspunt hierbij was dezelfde totaal N-hoeveelheid in de aanvul-oplossing, maar verschillende N-vormen (Tabel 24.).

Door de sterke aangroei van de systemen in deze teelt, gevoegd bij het feit dat de techniek hier en daar op onderdelen haperde, is het resultaat ten aanzien van de proef met N-vormen helaas niet te duiden. Er zijn wel een aantal ervaringen vermeldenswaard. De pH daalde bij de behandelingen in BR3 en BR4, in het begin, door de aanwezige NH_4 . Dit wordt veroorzaakt door een snellere (preferente) opname van het positief geladen NH_4^+ ion vergeleken met de opname van NO_3^- ; de pH daalde niet onder pH 6.5. Omdat de CO_2 dosering aan de pH gekoppeld is, blijft de automatische CO_2 dosering uit. Om te voorkomen dat de CO_2 te laag zou worden is tijdelijke een vaste CO_2 flow ingesteld. Uit het verdere verloop van de groei en ontwikkeling zijn geen duidelijke verschillen naar voren gekomen tussen de behandelingen met de verschillende N-vormen (Figuur 68.). Uit het feit dat BR6 de beste resultaten gaf, en hier met een flinke dosis ureum-N is gewerkt, zou kunnen worden afgeleid dat deze N-vorm prima geschikt is. Aangezien dit ook de goedkoopste N-vorm is, lijkt dit een logische keuze voor vervollexperimenten. Een complicatie is echter, dat om voldoende andere (kat-) ionen in het meststofrecept te kunnen krijgen, zijn er flinke hoeveelheden Cl nodig. Het is nog niet duidelijk in hoeverre dit mogelijk tot groei-problemen zou kunnen leiden.

Tabel 24. Behandelingen schema voor de voedingsoplossing van de algenteelt in de periode van 20 november tot 17 december in Bleiswijk.

		EC mS/cm	NO_3^- mmol/l	NH_4^+ mmol/l	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ mmol/l
EC verhoging	NO_3^-	2.0	14.8		
EC verhoging	NO_3^-	2.0	14.8		
ammoniumnitraat	$\text{NH}_4^+ \text{NO}_3^-$	1.5	10.3	4.5	
ammoniumnitraat	$\text{NH}_4^+ \text{NO}_3^-$	1.5	10.3	4.5	
ureum	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	1.2	5.8		9.0
ureum	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	1.2	5.8		9.0

7.4 Resultaten reinigen algenbioreactoren

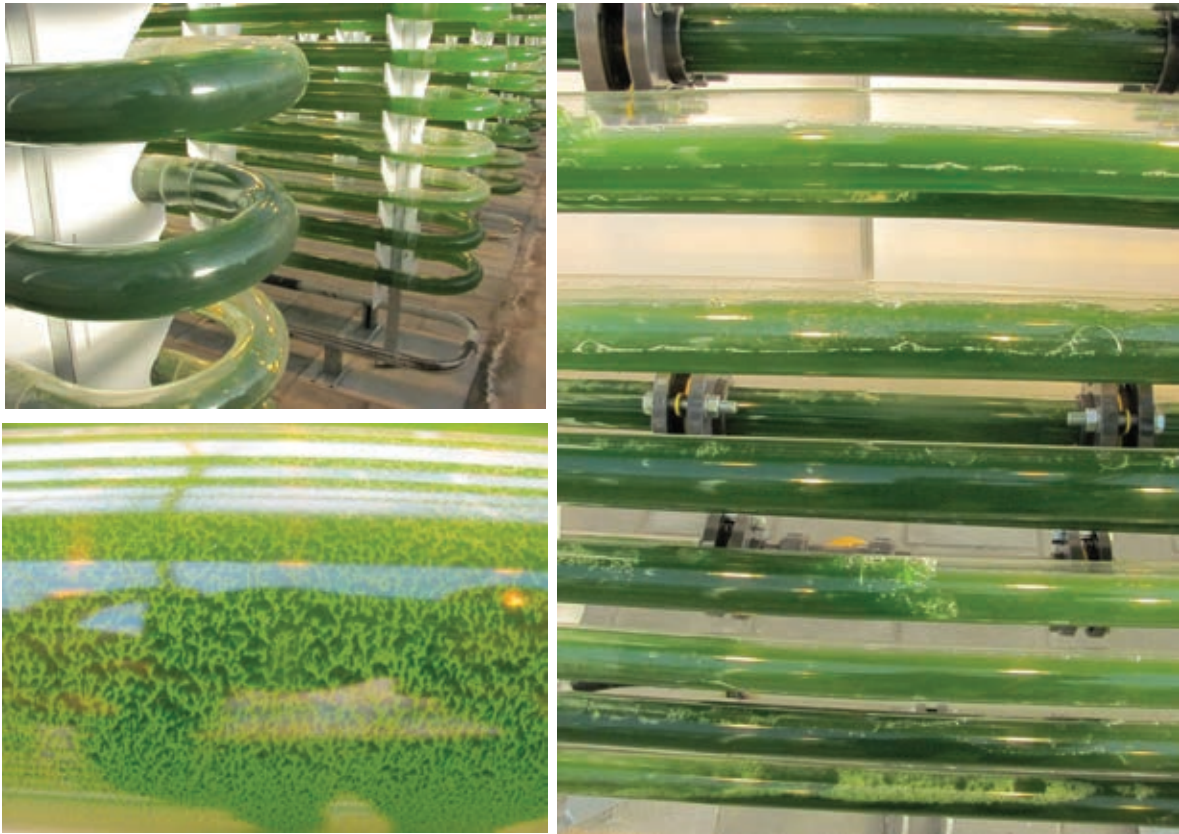
Bij aanvang van de eerste algenteelt zijn de zes fotobioreactoren in Bleiswijk ontsmet. De systemen werden hiervoor eerst volgezet met RO water en dan ontsmet met 100 ppm waterstofperoxide H_2O_2 . Na 24 uur is vervolgens is een evenredige

hoeveelheid Natriosulfaat toegevoegd om het peroxide te reduceren. Vervolgens is geconcentreerde voedingsoplossing toegevoegd tot een EC waarde van ca. 1.5 en is 25 ppm Natrihypochloriet (75 ml/reactor) als vrij chloor toegediend. Na nogmaals 24 uur is Na-thiosulfaat toegediend (24 g/reactor). Daarna kon de eerste algenteelt worden opgestart.

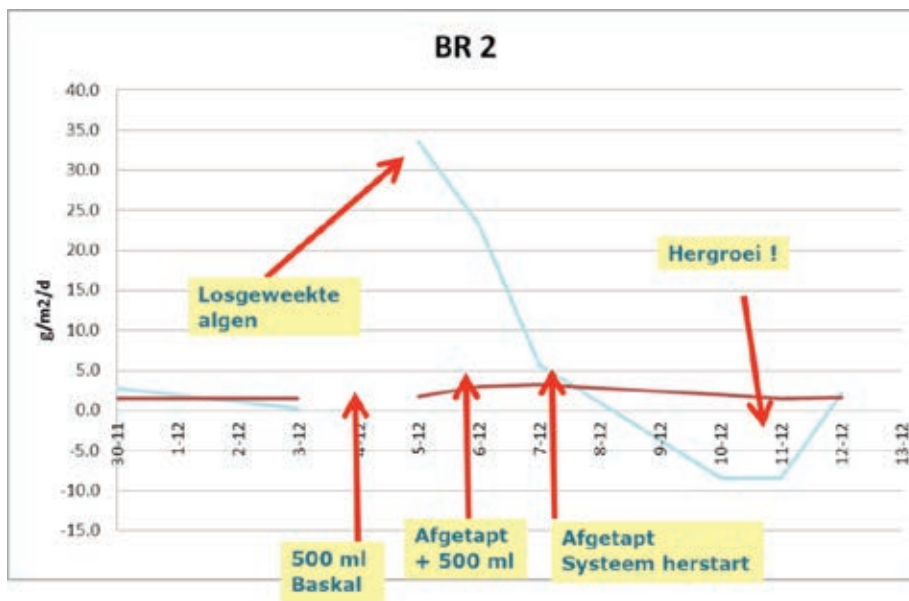
Door technische kinderziektes in de algenteeltsystemen in Bleiswijk en daarom suboptimale groeicondities begonnen algen in de start-teelt te klonteren en aan te groeien aan de binnenwanden van de transparante buizen (Figuur 72.). Reiniging en herstart of reset van enkele systemen was nodig zoals beschreven in 7.1 en 7.2. De eerste bioreactor die moest worden herstart was BR 3 op 18 oktober. De reiniging met achtereenvolgens waterstofperoxide (100 ppm), salpeterzuur (2 ppm = 5.3 ppm salpeterzuur 38%) en natriumhypochloriet (eerst 150 ppm, na 2 dagen 300 ppm) hadden niet het gewenste resultaat. De groene algenkleur verdween weliswaar, maar er bleef een wit residu achter op de wanden. Vervolgens werd Baskal (KOH + K_2CO_3) toegediend (dosering 500 ml = ca. 1 ml/l), hiermee was na 2 dagen het systeem schoon.

Tijdens de experimenten later bleek, dat niet de volgorde van verschillende zuren en logen en daarna Baskal het gewenste ontsmettingsresultaat veroorzaakte, maar dat dit enkel de toediening van Baskal was toe te schrijven. Verder bleek dat de toediening van Baskal in lagere concentraties tijdens de teelt mogelijk was om algen aangroei in een systeem op te lossen. Eind november was de aangroei bij BR2 dramatisch groot, op 3 december werd besloten deze reactor te stoppen. Vanwege de goede ervaring met het reinigen met Baskal in de start-teelt is dit zonder voorbehandeling met zuur of loog toegepast. Een dosering van 1 ml/l, overeenkomend met 7.4 mmol K en OH⁻, is toegepast in het lopende systeem en gaf binnen een dag een groot deel van de algenaanslag op de binnenwanden weer terug aan de oplossing in de buis. Na herhaling waren de buizen weer redelijk schoon. Opmerkelijk was dat de kleur van de algen groen bleef. Een deel van de algenoplossing uit BR2 is afgetapt en op een voorkweek in een erlenmeyer kolf gezet. De algen bleken snel weer te hergroeien. BR2 is vervolgens niet helemaal gelegd zoals eerst gepland was, maar voor de helft afgetapt en aangevuld met voedingsoplossing en op die manier weer herstart. De groei verliep direct weer goed. Een illustratie van de gang van zaken bij BR2 is weergegeven in Figuur 73.

Als voorlopige conclusie kan worden vastgesteld dat ten aanzien van het reinigen van het systeem een goede manier van ontsmetting van het systeem gevonden lijkt te zijn met de toediening van Baskal. Tevens lijkt Baskal in staat om algen aangroei op de binnenwanden van de buizen op te lossen zonder beschadiging van algencellen indien het in lagere concentraties wordt toegediend.



Figuur 72. Aangroei algen op binnenwand bioreactor



Figuur 73. Het verloop van de groei, de dichtheid en de acties genomen bij BR2 tijdens de laatste teelt.

8 Integratie resultaten en conclusies

Het doel van het 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, CO₂ en nutriënten? Welke economisch rendabele mogelijkheden zijn er om op grote schaal algen op tuinbouwlocaties te produceren? Binnen het project werd strategisch inzicht en achtergrondkennis op het gebied van algenteelssystemen in combinatie met tuinbouwproductie verkregen. Hiervoor werden diverse activiteiten binnen het project uitgevoerd zoals

- Telersbijeenkomsten en kennisuitwisseling tuinbouwondernemers
- Modellen algenteelssystemen in kassen
- Metingen algenteelssystemen op tuinbouwpraktijkbedrijven
- Experimenten in algenproeffaciliteit bij Wageningen UR Glastuinbouw Bleiswijk
- Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers:

In dit hoofdstuk worden de resultaten en conclusies per activiteit beschreven.

Kennisuitwisseling tuinbouwondernemers:

- Het te kiezen algenteelstelsysteem is afhankelijk van je markt, open pondsysteem of een gesloten buisreactor systeem voor meer hoogwaardige productie onder gecontroleerde omstandigheden.
- Het plaatsen van buisreactoren in een kas heeft voordelen, omdat de kas voor een groot gedeelte als zonnecollector werkt, en gratis energie verzamelt en vasthoudt.
- Temperatuur in de algen reactoren is goed te sturen met de beschikbare infrastructuur. Een eenvoudige controle is hiervoor toereikend.
- CO₂ is op de meeste tuinbouwbedrijven beschikbaar, vaak duurzaam opgewekt met een WKK of er is een toegang tot de OCAP leiding.
- Licht is de meest kritische groeifactor die zowel tuinbouwteelten als ook algen nodig hebben.
- Een plaatselijke combinatie van algen en tomaat is weinig zinvol. Algen onder een tomatengewas krijgen te weinig licht. In een plaatselijke combinatie met half tomaat, half algen zijn beide systemen niet optimaal. De plaatselijke scheiding in afzonderlijke kascompartimenten lijkt het meest perspectief te bieden.
- Een seizoen afhankelijke combinatie van potplanten en algenteelt is mogelijk: potplanten in winter/voorjaar/najaar en algen in zomer.
- Algenteelssystemen kunnen op tuinbouwbedrijven op plekken zonder gewas worden geplaatst zoals boven een verwerkingsruimte.
- Een geschikt ontwerp van algenreactoren kan door modellen worden ondersteund.
- Management van algenteelt is enorm belangrijk in verband met de economische haalbaarheid. Door de goede controle van de groeiomstandigheden worden problemen in algenteelt door klonteren en aangroei voorkomen. Door verlengen teeltperiode kan winst worden gehaald.
- Schoon werken en een goede ontsmetting bij teeltwisseling zijn belangrijk voor het zuiver houden van de algenkweek in een hoogwaardige teelt.
- De eenheden moeten niet te groot gemaakt worden i.v.m. risicomanagement.
- De beschikbare teeltkennis van telers en aanwezige infrastructuur op tuinbouwbedrijven kan prima worden benut voor de productie van algen.
- Men ziet in de toekomst potentie voor de teelt van hoogwaardige algen in kassen in Nederland.

Modellen algenteelssystemen in kassen:

- Met het model RAYPRO (gebaseerd op Swinkels, 2009) is de lichtonderschepping, de temperatuur en de algengroei in verschillende systeemconfiguraties van algenbuisreactoren in een kas berekend. Hiervoor werd een raytracing lichtmodel gekoppeld aan een algengroeimodel uit de literatuur.
- De lichtonderschepping van horizontale systemen is heel goed indien het gehele teeltoppervlak wordt vol gelegd. Een kleinere buisdiameter onderschept iets meer licht dan een grotere buisdiameter als deze horizontaal naast elkaar in een kas worden geplaatst. De hogere lichtbenutting efficiëntie van de algen in kleine buizen leidt tot

een hogere volumetrische productie. Modelmatig is uitgerekend dat de maximale productiviteit 5 kg DM/m² teeltoppervlak is in een horizontaal systeem bij een volumetrische productiviteit van 126 kg DM/m³.

- Nadelig is dat in horizontale algenteeltsystemen de maximale temperaturen hoger oplopen, in kleinere buizen meer dan in grotere buizen. Maximale temperaturen in verticale systemen zijn lager dan in horizontale systemen bij een vergelijkbaar volume.
- Het verticaal stapelen van buizen geeft de mogelijkheid om meer volume per teeltoppervlak te installeren, waardoor ook de lichtonderschepping van het gehele systeem stijgt. Een verticaal systeem presteert goed wanneer 8 lagen buizen boven elkaar worden gestapeld in een tomatenconfiguratie. Er is een optimum te vinden voor de afstanden en afmetingen van de buizen van elkaar in verticale (hoogte systeem) en horizontale richting (rijafstanden). Een goed verticaal systeem had een buisdiameter van 11 cm, een horizontale afstand van de buizen van 40 cm en een verticale afstand van 25 cm. Voor dit tomatensysteem was de berekende max. productiviteit 6.25 kg/m² bij een volumetrische productiviteit van 84 kg/m³.
- Wordt het systeem gedeeltelijk met lucht gevuld en dus met minder algen in de buizen (vulfactor 50% -90%) is de berekende productie per teeltoppervlak vergelijkbaar met een 100% gevuld systeem, maar de volumetrische productiviteit wordt hoger wanneer de vulfactor wordt verlaagd omdat dan lichtdoordringing in het systeem verbeterd.
- Diffuus licht heeft een positief effect op de productiviteit (ca. 4-5%).
- Een integraal model voor de berekening van algenteeltsystemen in kassen in combinatie met tomatenproductie is ontwikkeld (TomAlgS, Slager, 2011). Deze houdt rekening met het buitenklimaat op elk moment van het jaar. Kasklimaat, algenproductie en tomatenproductie worden berekend afhankelijk van de gekozen systeemconfiguratie. Het algenteeltsysteem bestaat uit een buisreactor en kan verschillende diameters en lengtes hebben en op verschillende plekken horizontaal in de kas worden geplaatst. Een economisch model berekend de kosten en opbrengsten van de gekozen systeemconfiguratie.
- Met het integrale model TomAlgS kan worden berekend dat een algenbioreactor onder een tomatenkas niet voordelig is voor de algen productie, het is economisch niet haalbaar. Met hetzelfde model kan worden berekend dat een algenproductie in een horizontaal buizensysteem in een separate kasafdeling naast een tomatengewas wel potentie heeft. Minimale algenprijzen van ca. 11 €/kg DM zijn nodig voor een rendabele teelt volgens dit model en de aangenomen uitgangspunten voor de berekening. De economische haalbaarheid neemt toe met de schaal van de productie.
- Alle modelberekeningen zijn gedaan met *Porphyridium cruentum*, het groeimodel is afkomstig uit de literatuur. Andere algensoorten kunnen tot andere resultaten leiden.

Metingen in algenteeltsystemen op tuinbouwbedrijven:

- Ten aanzien van de groeifactoren licht en temperatuur kan worden gesteld dat er voldoende licht in kassen beschikbaar is voor de teelt van algen. De temperatuur van het teeltmedium is afhankelijk van de instraling en is in geval van raceway pond RWP op het niveau van de kasluchttemperatuur, in geval van de fotobioreactor PBR hoger dan de kasluchttemperatuur. De temperatuur kan goed worden gestuurd in een PBR in een kas door water te verdampen in een sterke verneveling of met een sprinkler. In RWP zorgt de verdamping uit de open algenvijver koelend.
- Een betrouwbare toegang tot CO₂ is essentieel voor de teelt van algen in fotobioreactoren. Het tijdelijk niet beschikbaar hebben van CO₂ op een tuinbouwbedrijf zou kunnen leiden tot een ongewenste pH en het afsterven van algen.
- De sturing van pH en CO₂ moet door een zeer goed regelsysteem gebeuren, anders kunnen snel groeistoringen optreden. Betrouwbaardere regelsystemen zijn wenselijk voor tuinders in de toekomst.
- Door "stress" omstandigheden kunnen algen snel klonteren of aangroeien aan de transparante buizen.
- Tijdens de meetperiode was de productie in het PBR systeem 12 g/l in 80 dagen hoog, omgerekend 150 g/m³/dag *Nannochloropsis oculata* in de vroege zomermaanden. De productie in de RWP was met een productie van 0.27 g/l in 27 dagen een stuk lager, de productie was omgerekend 10 g/m³/dag *Nannochloropsis salina* in de zomermaanden.
- Het energieverbruik was in het gemonitorde PBR systeem zeer hoog met ca. 1.2 kW/m³ zeer hoog, vooral de tweede luchtpomp gebruikte veel energie. In berekeningen is aangetoond dat er veel mogelijkheden zijn om meer

dan 60% energie te besparen. Het energieverbruik in het gemonitorde RWP systeem was daarentegen met ca. 20 W/m³ laag, energie werd alleen gebruikt voor het mengrad.

- Technische aandachtspunten algenreactoren op tuinbouwbedrijven: vervuiling sensoren, lekkage systemen.
- Economische aandachtspunten algenreactoren op tuinbouwbedrijven: totale kosten installatie, energiekosten PBR, arbeidskosten voor management systemen.

Experimenten in algenproeffaciliteit in Bleiswijk:

- Er is een proeffaciliteit voor algen in de tuinbouw aangelegd bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk.
- Eerste teeltovervaring met algen in een kas werd opgebouwd. *Chlorella sorokiniana* werd als snel groeiende alg gekozen. *Chlorella sorokiniana* groeit snel en reageert snel op veranderende groeicondities.
- De kas werkt als zonnecollector en vangt zonnewarmte op waardoor de temperatuur in de kas wordt verhoogd. In onze experimenten in de winterperiode met een alg die hoge temperaturen nodig heeft, werd additioneel warmte toegevoerd met een verwarmingssysteem. Voor een snellere groei in de winterperiode werd assimilatiebelichting gebruikt, ook deze geeft warmte aan het systeem. Het temperatuurverloop in de systemen tijdens de proefperiode was goed.
- PH sturing en CO₂ dosering zijn gekoppeld wat een goede regeling en bewaking van het systeem vereist. CO₂ concentraties wijzigen snel, afwijkende pH waarden kunnen zo ook snel tot uitputting aan CO₂ leiden en daarmee tot suboptimale algengroei.
- Door het instellen van een hogere setpoint van de pH regeling kon in de eerste algenteelt veel CO₂ worden bespaard. Overbodig hoge concentraties in het systeem konden zo worden vermeden.
- Algen hebben de neiging te klonteren door “ stress” omstandigheden . Deze kunnen ontstaan door technische problemen in de systemen (uitval luchtpomp, uitval CO₂ klep, uitval controller) of door slechte sturing (tekort aan N, te lage pH). Problemen traden vooral aan begin op in de teelt in Bleiswijk.
- Als voorlopige conclusie uit dit de eerste algenteelt ten opzichte van de voedingsoplossing kan worden vastgesteld dat er geen voedingsrecepten beschikbaar zijn in de literatuur die voor de commerciële algenproductie in de tuinbouw optimaal zijn. Wij kunnen verder concluderen dat een “substraat oplossing” zoals bekend in de tuinbouw voor gewassen minder geschikt was voor de opstart van een algenteelt, vanwege de aanwezige NH₄. Ten slotte kan worden geconcludeerd dat algen (*Chlorella sorokiniana*) een hoge behoefte aan N heeft. Een geschikte vorm van N toediening hangt af van het moment van toediening en de gewenste pH. Vooralsnog lijkt het goed mogelijk de helft van de N als ureum-N te doseren.
- Als voorlopige conclusie ten aanzien van het reinigen van het systeem kan worden vastgesteld dat een goede manier van reiniging van het systeem gevonden lijkt te zijn met de toediening van Baskal. Ook lijkt Baskal in staat om algen aangroei op de binnenwanden van de buizen op te lossen tijdens de teelt zonder beschadiging van algencellen indien het in lagere concentraties wordt toegediend.
- De productie van *Chlorella sorokiniana* was in de start-teelt in de beste bioreactoren (BR 1, 5 en 6) 150 g/m³/dag en in de vervolgteelt was deze door betere groeicondities al 330 g/m³/dag (of 7.1 g/m²/dag) in de beste bioreactor (BR6) tijdens de vroege wintermaanden onder assimilatiebelichting. Het mag worden geconcludeerd dat er een prima productie is gerealiseerd met een hoge lichtbenuttingsefficiëntie van 0.9 g/mol fotonen in de vervolgteelt.

Overall

- Een geschikt ontwerp van een algenbioreactor is een randvoorwaarde voor een succesvolle teelt van algen in kassen. De reactoren in de proeffaciliteit in Bleiswijk komen grotendeels overeen met de resultaten van een geschikt ontwerp van een algenteeltsysteem uit de modelberekeningen, namelijk een systeem met transparante verticale buizen in een tomatenconfiguratie, gedeeltelijk gevuld met lucht en water en geplaatst in een kas met diffuus licht.
- Een goede meting van alle groeicondities en een goede controle van de parameters licht, temperatuur, CO₂ en pH is enorm belangrijk voor een hoge groeisnelheid van algen en het vermijden van stresscondities. Een betrouwbaar meet- en regelsysteem moet beschikbaar komen voor tuinders als dan niet gekoppeld aan hun klimaatcomputer.
- Er is veel teeltovervaring nodig voor de productie van algen met een goede kwaliteit. Management van het teeltproces vraagt veel aandacht en verdere verbetering.

- De combinatie algenteelt en tuinbouwproductie (tomaten of potplanten) is mogelijk en lijkt haalbaar voor de productie voor een hoogwaardig marktsegment.
- Algenteeltrecepten moeten worden ontwikkeld voor tuinbouwondernemers.
- Diverse algensoorten met hoge waarde voor diverse marktsegmenten moeten worden gezocht.
- Tuinbouwondernemers kunnen goed de rol van producent van algen op zich nemen in een alliantie met andere ketenpartners. Zij kunnen gebruik maken van hun kas (zonnecollector, langere teeltperiode vergeleken met buitenproductie), hun technische infrastructuur (klimaatcomputer, water- en nutriënten installatie) en hun kennis (sturen groeifactoren, beheersen water- en nutriëntentoevoering).
- Door het open uitwisselen van kennis kunnen tuinbouwondernemers ontwikkelingen versnellen. Door samen te coöpereren kunnen zij optreden als sterke partner voor andere ketenpartijen.

9 Aanbevelingen voor vervolg

Binnen het hier voorgestelde project werd kennis en strategisch inzicht op het gebied van algenteeltsystemen in combinatie met tuinbouwproductie opgebouwd. De resultaten uit de kennisuitwisseling van tuinbouwondernemers, metingen van algenteeltsystemen op tuinbouwbedrijven, het oprichten van een proeffaciliteit voor algen in kassen en daaraan gerelateerde modelberekeningen zijn weergegeven in hoofdstuk 8. Hieruit kan worden afgeleid dat algenproductie door tuinbouwondernemers in Nederland potentieel rendabel kan zijn in de toekomst. Toch blijven er een aantal vragen over en kunnen de volgende aanbevelingen voor vervolg worden gegeven.

- Ten aanzien van de economische haalbaarheid wordt aanbevolen om nog meer economische kengetallen bij producenten van algen in het algemeen en bij (tuinbouw)ondernemers met een algenteelt in kassen in het bijzonder te verzamelen. Hierdoor kunnen tezamen met de uit de literatuur verkregen economische getallen haalbaarheidsstudies betrouwbaarder en relevanter voor de praktijk voor systemen in Nederland worden gemaakt. Hier is een eerste stap gemaakt door economische data in experimentele systemen bij twee tuinders op te halen. Meer data is echter nodig om een realistisch beeld van de kostprijs van de productie van algen in kassen alsmede ook voor de naoogst fase te kunnen schetsen.
- Ten aanzien van de marktprijs voor algen zijn onvoldoende gegevens beschikbaar voor tuinbouwondernemers. Meer gegevens zijn nodig om de economische haalbaarheid van verschillende business cases van algenproducten uit kassen te kunnen uitwerken.
- Het wordt tuinbouwondernemers aanbevolen hun krachten te bundelen en door het vormen van een coöperatie gezamenlijk op te treden. Het is belangrijk dat zij de open kennisuitwisseling voortzetten om snel innovatiestappen te kunnen maken.
- Het kan verder worden aanbevolen dat tuinbouwondernemers allianties aangaan met andere ketenpartners, waarin de telers de rol van producent op zich nemen. Gezamenlijk met andere partners in de keten moeten diverse algen met hoge waarde voor diverse marktsegmenten worden gevonden.
- Opschaling is nodig voor kostendaling en voldoende marktvolume.
- Kennis over het telen van andere algensoorten zou moeten worden opgebouwd. Hierbij zal de focus op termijn verschuiven van de productie van algenbiomassa naar de productie van specifieke inhoudsstoffen.
- Met het oog op de hoogwaardige productieomstandigheden in kassen is er potentie voor de kweek van juist de moeilijkere algensoorten. Een verkenning hiernaar is zinvol.
- Algenteeltrecepten moeten worden ontwikkeld voor telers voor diverse algensoorten.
- Het kan worden aanbevolen om door te gaan met experimenteel praktijkonderzoek naar geschikte groeicondities van algen voor een hoge en hoogwaardige (inhoudsstoffen) productie en hoge lichtbenuttingsefficiëntie. De nadruk ligt hierbij op de combinaties van licht, CO₂, pH en de dosering van nutriënten.
- In een proeffaciliteit zou moeten worden aangetoond dat het mogelijk is om op grotere schaal voor een langere periode algen met een goede kwaliteit te telen in een kas.
- Het kunnen voorkomen of bestrijden van aangroei van de groeibuizen verdient hoge prioriteit.
- Een goede meting van alle groeicondities en een goede controle van de parameters licht, temperatuur, CO₂, O₂ en pH is enorm belangrijk voor een hoge groeisnelheid van algen en het vermijden van stresscondities. Een betrouwbaar meet- en regelsysteem moet beschikbaar komen voor tuinders zodat ze hierop volop kunnen vertrouwen net als nu op een klimaatcomputer. Regelingen van algenreactoren zijn veelal eenvoudig en moeten in de komende jaren worden doorontwikkeld naar robuuste systemen. Het pH onafhankelijke sturen van de CO₂ dosering zou voor de toekomst moeten worden ontwikkeld.
- Tijdens het hier voorgestelde project zijn een aantal bruikbare modellen ontwikkeld voor de berekening van algenteeltsystemen in de tuinbouw. Deze zijn gebaseerd op fysische modellen voor kassen en algengroeimodellen uit de literatuur. Aangezien veel groeimodellen gebaseerd zijn op empirische factoren en deze verkregen zijn in kleinschalige lab experimenten, is het nodig om meer praktijkdata in grotere algensystemen te verzamelen en modellen hiermee te kalibreren en te valideren.
- Zo geldt ten aanzien van de gemodelleerde algengroei: In de toekomst is aan te bevelen om het ontwikkelde model niet alleen met literatuurwaardes maar ook met praktijkmetingen in een Nederlandse kas te valideren.

Aanbevolen wordt om het algemene groeimodel te gebruiken voor een simulatie van het algenteeltsysteem geïnstalleerd in Bleiswijk. Door lichtmetingen, stoffenbalansen en algenproductiemetingen in het systeem kan het model gevalideerd worden. Het ontwikkelen van een specifiek groeimodel voor de in Bleiswijk gebruikte algensoort *Chlorella sorokiniana* wordt aanbevolen. Het verzamelen van temperatuur- en stromingsdata in de halfgevulde systemen in Bleiswijk is nodig om deze modelmatig beter te kunnen benaderen aangezien er geen nauwkeurige modellen beschikbaar zijn die de algen temperatuur voorspellen wanneer maar een deel van de algenbuizen gevuld is met water, ook experimentele waardes zijn niet gerapporteerd.

10 Literatuur

- Ación, 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.
- Alabi, A. O., Tampier, M., and Bibeau, E. (2009).
Microalgae technologies and processes for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current technology, sustainability and barriers to implementation.
- Barbosa, M. J. G. V. (2003).
Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation, PhD thesis, Wageningen University.
- Batan, L., Quinn, J., Willson, B., and Bradley, T. (2010).
Net Energy and Greenhouse Gas Emission Evaluation of Biodiesel Derived from Microalgae. *Environmental Science & Technology* 44, 7975-7980.
- Beal, C., Smith, C., Webber, M., Ruoff, R. and Hebner, R. (2011).
A Framework to Report the Production of Renewable Diesel from Algae 4(1): 36-60.
- Béchet, Q., Shilton, A., Fringer, O. B., Munoz, R., and Guieysse, B. (2010).
Mechanistic modeling of broth temperature in outdoor photobioreactors. *Environmental Science and Technology* 44, 2197-2203.
- Becker, E. W. (1994).
"Microalgae: biotechnology and microbiology," Cambridge University Press.
- Bevern, P. J. M. v. (2011).
Algal growth in horizontal tubular reactors, MSc thesis, Wageningen University.
- Brentner, L. B., Eckelman, M. J., and Zimmerman, J. B. (2011).
Combinatorial Life Cycle Assessment to Inform Process Design of Industrial Production of Algal Biodiesel. *Environmental Science & Technology* 45, 7060-7067.
- Breuer, J. J. G., and van de Braak, N. J. (1989).
Reference Year for Dutch Greenhouses. In "Acta Horticulturae", Vol. 248, pp. 101-108.
- Carvalho A.P. and Malcata F.X. (2000).
Effect of culture media on production of polyunsaturated fatty acid by *Pavlova lutheri*, *Cryptogam Algol*, 21(1), 59-71.
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Tsai, M.-T., Ong, S.-C., Chen, C.-H., and Lin, C.-S. (2009).
Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresour Technol* 100, 833-838.
- Chisholm, D. (1973).
Pressure Gradients Due to Friction During the Flow of Evaporating Two-Phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16:347-348.
- Cuaresma Franco, M.C. (2011).
Cultivation of microalgae in a high irradiance area. PhD Thesis, Wageningen University
- De Zwart, H. F. (1996).
Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD, Wageningen University, Wageningen
- Del Campo, J. A., García-González, M., and Guerrero, M. G. (2007).
Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 74, 1163-1174.
- Dermoun, D., Chaumont, D., Thebault, J.-M., and Dauta, A. (1992).
Modelling of growth of *Porphyridium cruentum* in connection with two interdependent factors: Light and temperature. *Bioresource Technology* 42, 113-117.
- Faria, R. G., Paes, R. P. S. C., Castro, J. F. A. D., Tinoco, A. B. N., Barbarino, E., and O.S., L. (2012).
Effects of the availability of CO₂ on growth, nutrient uptake, and chemical composition of the marine microalgae *Chlorella* sp. and *Nannochloropsis oculata*, two potentially useful strains for biofuel production. *International*

- Research Journal of Biotechnology 3, 65-75.
- Gantar, M., and Svir ev, Z. (2008).
Microalgae and cyanobacteria: Food for thought. *Journal of Phycology* 44, 260-268.
- Holland, A. D., and Wheeler, D. R. (2011).
Intrinsic autotrophic biomass yield and productivity in algae: Modeling spectral and mixing-rate dependence. *Biotechnology Journal* 6, 584-599.
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., and Bernard, O. (2009).
Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental Science & Technology* 43, 6475-6481.
- Lavens, P., and Sorgeloos, P. (1996).
"FAO Fisheries technical paper 361," University of Ghent, Ghent.
- Leijdekkers, S. 2013.MSc thesis, unpublished.
- Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C. (1949).
Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.* 45: 39-48.
- Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., and Benemann, J. R. (2010).
A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production.
- Luque, R. (2010).
Algal biofuels: the eternal promise? *Energy & Environmental Science* 3, 254-257.
- Mairet, F., Bernard, O., Lacour, T., and Sciandra, A. (2011).
Modelling microalgae growth in nitrogen limited photobioreactor for estimating biomass, carbohydrate and neutral lipid productivities. In "IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)", Vol. 18, pp. 10591-10596, Milano.
- Martínez, L., Morán, A., and García, A. I. (2012).
Effect of light on *Synechocystis* sp. and modelling of its growth rate as a response to average irradiance. *Journal of Applied Phycology* 24, 125-134.
- 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.
- Michael, H., and John, B. (2009).
Biofuels from Microalgae. In "The Alga *Dunaliella*", pp. 445-474. Science Publishers.
- Molina Grima, E., Garcia Camacho, F., Sanchez Perez, J. A., Fernandez Sevilla, J. M., Acien Fernandez, F. G., and Contreras Gomez, A. (1994).
A mathematical model of microalgal growth in light-limited chemostat culture. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 61, 167-173.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermue, M. H., and Wijffels, R. H. (2011a). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnol Adv* 29, 24-7.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., and Wijffels, R. H. (2011b). Microalgal production - A close look at the economics. *Biotechnology Advances* 29, 24-27.
- Pal, D., Khozin-Goldberg, I., Cohen, Z., and Boussiba, S. (2011).
The effect of light, salinity, and nitrogen availability on lipid production by *Nannochloropsis* sp. *Applied Microbiology and Biotechnology* 90, 1429-1441.
- Pulz, O. (2001).
Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57, 287-293.
- Pulz, O., and Gross, W. (2004).
Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 65, 635-648.
- Quinn, J., de Winter, L., and Bradley, T. (2011).
Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems. *Bioresource Technology* 102, 5083-5092.
- Richmond, A., and Becker, E. (1986).
"Technological aspects of mass cultivation - A general outline," In Richmond A (ed.), *Handbook of Microalgal Mass*

- Culture. CRC Press, Inc., Boca Raton.
- Sánchez, J. F., Fernández-Sevilla, J. M., Acién, F. G., Cerón, M. C., Pérez-Parra, J., and Molina-Grima, E. (2008). Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: Influence of irradiance, dilution rate and temperature. *Applied Microbiology and Biotechnology* 79, 719-729.
- Shah, R.K. and Sekuli, D.P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. page 915. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey
- Simopoulos, A. P. (2003). Importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids: evolutionary aspects. *World review of nutrition and dietetics* 92, 1-22.
- Singh, A. and Olsen, S.I. (2011). A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy* 88(10): 3548-3555.
- 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. In "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.
- Sonneveld, P. J., and Swinkels, G. L. A. M. (2005). Micro-V covering materials for photovoltaic cells. In "20th European photovoltaic solar energy conference and exhibition", Barcelona, Spain.
- Sonneveld, P. J., Swinkels, G. L. A. M., Bot, G. P. A., and Flamand, G. (2010). Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. *Biosystems Engineering* 105, 51-58.
- Stephenson, A. L., Kazamia, E., Dennis, J. S., Howe, C. J., Scott, S. A., and Smith, A. G. (2010). Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy & Fuels* 24, 4062-4077.
- Swinkels, G. L. A. M. (2009). "Simulatiemodel lichtuitstoot Waddenkas : simulatiemodel voor kasklimaat en lichtuitstoot voor kassen in het Waddengebied." Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.
- Swinkels, G. L. A. M., Sonneveld, P. J., and Bot, G. P. A. (2001). Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79, 91-97.
- Thornton, A., Weinhart, T., Bokhove, O., Zhang, B., Sar, Kumar, K., Pisarenco, M., Rudnaya, M., Savcenco, V., Rademacher, J., Zijlstra, J., Szabelska, A., Zyprych, J., Schans, Timperio, V., and Veerman, F. (2010). Modeling and optimization of algae growth. In "Proceedings of the 72nd European Study Group Mathematics with Industry (SWI 2010, Amsterdam, The Netherlands, January 25-29, 2010)", pp. 54-85. CWI.
- 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.
- Zonneveld, C. (1998). Light-limited microalgal growth: A comparison of modelling approaches. *Ecological Modelling* 113, 41-54.

Bijlage I Voedingsoplossingen *Chlorella sorokiniana* uit literatuur

		Bristol		Bold		Bold 2		Rigano 1993		Vona 2004		Ilavarasi 2011			Cuaresma 2009	
		internet	internet	internet	internet	internet	internet	Hoagland	ac. Bold	Bolds basal	Half Strenght CHU	BG11				
C+	me/l	6.5	6.9	6.0	33.7	13.7	15.2	15.3	12.9	65.9	19.2	106.9				
A ₋	me/l	6.5	6.9	6.0	33.7	13.7	15.2	15.3	12.9	65.9	19.2	106.7				
NH ₄	mmol/l	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	1.4	2.9	0.0	0.0	0.0	60.0				
Na	-	3.4	3.6	3.4	0.3	1.7	0.0	9.3	9.3	35.3	17.6	8.1				
K	-	2.2	2.3	1.7	21.4	9.3	3.0	2.1	2.7	2.9	0.5	35.4				
Ca	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	2.9	0.2	0.2	8.8	0.3	0.1				
Mg	-	0.3	0.3	0.3	0.8	1.2	2.5	0.3	0.3	5.1	0.3	1.6				
NO ₃	-	2.9	3.1	2.9	0.0	5.0	10.2	8.8	8.8	17.6	17.6	30.0				
Cl	-	0.8	0.8	0.8	0.7	2.0	5.0	0.8	0.8	0.0	0.5	0.1				
SO ₄	-	0.3	0.3	0.3	0.8	1.2	0.0	1.8	0.3	5.1	0.3	1.6				
H ₂ P ₀ 4	-	1.3	1.4	1.7	12.8	2.2	0.0	1.3	1.3	0.0	0.0	5.4				
HP ₀ 4-	-	0.4	0.5	0.0	9.3	1.0	0.0	0.4	0.4	1.4	0.2	1.5				
HCO ₃	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	18.9	0.0	65.0				
SiO ₃ ⁻	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	0.0	0.0				
Fe	µmol/l	0.0	35.1	0.0	3.6	19.9	6.7	3.7	4.8	0.2	49.4	300.0				
Mn	-	0.0	7.7	9.1	0.0	0.0	0.1	1.6	3.4	0.9	9.1	70.0				
Zn	-	0.0	32.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.2	36.4	0.1	0.8	10.0				
B	-	0.0	196.6	46.4	46.0	48.5	48.5	0.0	184.8	4.0	46.3	1.0				
Cu	-	0.0	10.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.0	9.9	0.1	0.5	7.0				
Mo	-	0.0	5.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	4.9	0.0	1.6	0.0				
Co	-	0.0	2.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	4.9	0.1	0.2	0.0				

Bijlage II Receptuur voedingsoplossingen voor experimenten met *Chlorella sorokiniana* in Bleiswijk

meststofrecept	28-sep-12	28-sep-12	
Aanduiding	Standaard	Substraatoplossing	
watersoort	regenwater	regenwater	
doseer EC	1.5	1.5	
aantal liters mestoplossing	10	10	
	200 maal geconcentreerd	200 maal geconcentreerd	
A bak			
Kalksalpeter vast	370	370	gram
Ammoniumnitraat vloeibaar	388	927	ml
IJzerchelaat 7%	14	14	gram
IJzerchelaat 3%	32	32	gram
Kalisalpeter	520	433	gram
Keukenzout	150	50	
Salpeterzuur	0	0	ml
			ml
B bak			
Kalisalpeter	0	0	gram
Bitterzout	211	0	gram
Magnitra vloeibaar	635	1016	ml
Kalisulfaat	0	299	gram
Fosforzuur	0	0	ml
Salpeterzuur	0	0	ml
Monokalifosfaat	466	466	gram
Monoammoniumfosfaat	0	0	gram
Mangaansulfaat	579	579	mg
Zinksulfaat	986	986	mg
Borax	2451	2451	mg
Kopersulfaat	43	43	mg
Natriummolybdaat	41	41	mg

