

Energierijk: Deelproject algenteelt

Auteurs: Roelof Schipperus, Joanneke Spruijt en Rommie van der Weide



EnergieRijk: deelproject algenteelt

Auteurs: Roelof Schipperus, Joanneke Spruijt en Rommie van der Weide

© 2013 Wageningen, ACRRES – Wageningen UR

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

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

Projectnummers: 3250175500, 3250106003

Dit project is tot stand gekomen dankzij:



Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie

ACRRES – Wageningen UR

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

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	7
2 VOORONDERZOEK ALGENTEELT	11
2.1 Gebruik van digestaat als voedingsbron.....	11
Deskstudie	11
Praktisch onderzoek	12
Conclusies	14
2.2 Vastleggen van CO ₂ door gebruik van rookgas met een verhoogd CO ₂ gehalte	15
Deskstudie	15
Praktisch onderzoek	15
2.3 Seizoensinvloed, gebruik van restwarmte en LED-licht	16
Seizoensinvloeden	16
Inzet LED-verlichting.....	19
Conclusies	20
2.4 De efficiëntie van algenoogst met een coalescer.....	20
Het oogsten van algen	20
Algenoogst met een combinatie van coalescer en centrifuge.....	20
Theoretische energiebesparing ten opzichte van centrifugeren.....	21
Maximale concentratiefactor	22
Te verwachten concentratiefactor	23
3 BUSINESS MODEL OPEN ALGENVIJVER.....	25
3.1 Uitgangspunten business case.....	25
Processchema	25
Biomassa opbrengst.....	26
Opbrengstprijzen.....	27
Kapitaalgoederen.....	27
Landgebruik	27
Watergebruik.....	27
Afvalwater	27
CO ₂ uit rookgassen.....	27
Warmtetoevoer.....	28
Elektriciteit.....	28
Arbeid.....	28
Kosten	28
3.2 Economische resultaten	28
Kostprijs	30
3.3 Scenario's.....	30
Effect EnergieRijk concept.....	30
SDE subsidie warmteterugwinning.....	31
Verkoopprijzen	31
Opschaling	31
Winterstop	32
4 REALISATIE ALGENPRODUCTIEFACILITEITEN	33

4.1	Algenvijvers.....	33
4.2	Fotobioreactoren	36
5	RESULTATEN INBEDRIJFSTELLING ALGENPILOT	39
5.1	Klimaatgegevens Lelystad 2012	39
5.2	Rookgastoevoer	40
5.3	Algenteelt.....	44
5.4	Oogstefficiency van de coalescer.....	47
	Behaalde concentratiefactor	47
	Percentage uitgevlokte algen.....	47
	Energiebesparing door gebruik te maken van een coalescer	48
6	REFERENTIES.....	51

Samenvatting

In de loop van 2012 heeft ACCRES-Wageningen UR in samenwerking met het bedrijf Algae Food & Fuel algenproductiefaciliteiten gerealiseerd op het terrein van ACRRES in Lelystad. Deze faciliteiten bestaan uit algenvijvers en fotobioreactoren met LED-verlichting. Het unieke van deze testfaciliteiten is dat verschillende productieprocessen aan elkaar gekoppeld worden door reststromen uit het ene proces toe te passen in het andere proces. Dit gebeurt binnen het zogenaamde EnergieRijk project. Centraal staat een co-vergister met warmtekrachtkoppeling. Het digestaat dat na het vergistingsproces overblijft, kan worden gebruikt als meststof voor de algenteelt. De gasmotor waarin het biogas verbrand wordt om stroom te produceren levert warmte en CO₂ die in de algenvijvers gebruikt worden.

Uit vooronderzoek is gebleken dat digestaat alleen in beperkte hoeveelheden toegediend kan worden als vervangende bron van voedingsstoffen. Door de troebelheid van het digestaat bij percentages boven de 0,5 vol% is er een remmende werking op de groei van algencultures.

Bij proeven met actieve CO₂ toediening aan algencultures bleek dat de cultures tot drie keer sneller groeiden als er CO₂ werd toegevoegd. Er is bewust gekozen voor diepere vijvers dan de algemene standaarddiepte van 25-30 cm. Hierdoor wordt de efficiëntie van CO₂ overdracht uit rookgassen verhoogd, maar wordt ook de noodzaak van CO₂ toediening verhoogd, omdat zonder actieve CO₂ toevoer een groter gebrek aan CO₂ ontstaat. Van de toediening van rookgassen in de diepe algenvijvers wordt een sterk positief effect op de algengroei verwacht.

Seizoensinvloeden hebben een grote impact op de productie van algen. Door verwarming van de algenvijvers kan vooral in die maanden dat er voldoende licht aanwezig is voor de algengroei (maart tot oktober) een hogere productie behaald worden. Het bijlichten van de algencultures is een andere mogelijkheid om de algengroei te verhogen. Hierbij is het grootste positieve effect uiteraard te verwachten in de donkere wintermaanden, maar ook gedurende de nachtelijke uren in de zomermaanden. Mogelijk is er bij diepe bassins en vijvers zelfs in de zomerperiodes een productieverhoging te bereiken met het bijlichten van donkere gedeeltes onderin de algencultures.

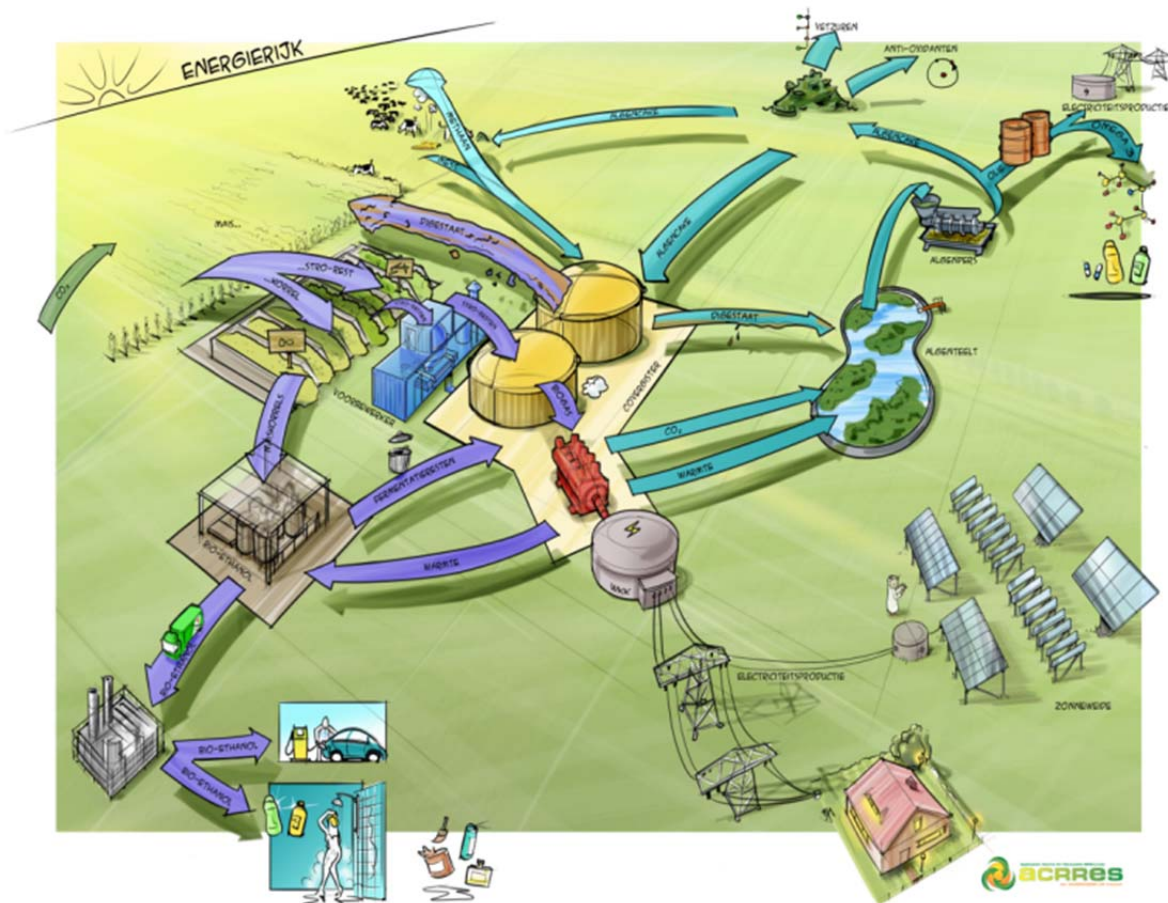
Voor het oogsten van de algen is bij de vijvers in Lelystad gekozen voor een gecombineerde coalescer en centrifuge. Het belangrijkste argument voor de keuze van flocculatie in een coalescer als oogstmethode is dat deze methode energiezuiniger wordt ingeschat dan andere methodes. Algenoogst met een coalescer heeft als grootste nadeel dat de hoeveelheid geoogste algen nauwelijks meer gestuurd kan worden, deze wordt namelijk afhankelijk van natuurlijke flocculatie. Na het indikken met de coalescer wordt in Lelystad verder ingedikt met behulp van een centrifuge, waarbij uiteindelijk een droge stofgehalte van 20% bereikt wordt, geschikt voor gebruik als likstenen voor vee.

Als business case is gerekend met een vijver met een oppervlakte van 1.000 m² en een diepte van 30 cm. Het economische resultaat is volgens de uitgevoerde modelberekening goed. De kostprijs is € 23,76 per kg ds, bij een verkoopprijs van € 35,-. Het EnergieRijk concept heeft een positief effect op de economische resultaten. Hergebruik van warmte en CO₂ uit de gasmotor van de biovergister verhogen de productie en kosten buiten de voorzieningen niets. Het grootste deel van de kostprijs bestaat uit kosten voor kapitaalgoederen. Ook arbeidskosten en stroomkosten bepalen een groot deel van de kostprijs. De economische resultaten zijn goed vanwege de hoge verkoopprijs van €35,- per kg ds voor gebruik in likstenen. Gebruikelijke algenverkoopprijzen zijn €1,- tot €10,- euro per kg ds. De resultaten zijn dan negatief. Bij opschaling naar grotere vijvers verbeteren de economische resultaten, maar de kostprijs blijft ook bij 1 ha nog vrij hoog met € 5,63 per kg ds. Verder blijkt uit de modelberekeningen dat bij een productiestop van november tot en met februari de algenopbrengst vanzelfsprekend afneemt, maar dat dit economisch interessanter is.

1 Inleiding

ACRRES - Wageningen UR is het landelijk toepassingscentrum voor duurzame energie en groene grondstoffen. Eén van de grootste projecten van ACRRES is het project EnergieRijk in Lelystad. In dit project werken Wageningen UR en ENeco samen met bedrijfsleven, overheid en onderwijs aan de ontwikkeling van duurzame energieproducten en toepassingen van groene grondstoffen rekening houdend met economische, ecologische en sociale aspecten.

EnergieRijk heeft diverse proefopstellingen gerealiseerd met betrekking tot co-vergisting met warmtekrachtkoppeling, bio ethanol productie, algenproductie, zonnestroom productie en een voorbewerkingsinstallatie. Het unieke van het EnergieRijk concept is dat de verschillende processen aan elkaar gekoppeld worden door reststromen uit het ene proces toe te passen in het andere proces.



Figuur 1. Visualisatie van het EnergieRijk concept

In de co-vergister wordt rundveemest samen met maïs of berm- of natuurgras omgezet in biogas. Het biogas wordt vervolgens verbrand in een motor (ook wel warmtekraftkoppeling genoemd) waardoor groene stroom wordt opgewekt, wat geleverd wordt aan het net. Bij de verbranding in de gasmotor komt warmte en rookgas vrij met daarin een verhoogd gehalte aan CO₂. De warmte wordt toegepast in de bio ethanol installatie en in de algenvijvers. De CO₂ uit het rookgas wordt in de algenvijvers benut om de algengroei te bevorderen. Nadat het gas uit de mest is gehaald heet het restproduct digestaat. Dit digestaat kan worden gebruikt voor bemesting van de grond en kan bijdragen aan het verminderen van het gebruik van kunstmest. Maar het zou ook kunnen worden gebruikt voor algenproductie, aangezien algen ook meststoffen nodig hebben.

Door het koppelen van een algenvijver aan een co-vergister worden drie belangrijke afvalstromen van de co-vergister nuttig gebruikt en worden lokale kringlopen gesloten:

1. Hergebruik van CO₂ uit rookgas ontstaan bij verbranding van biogas

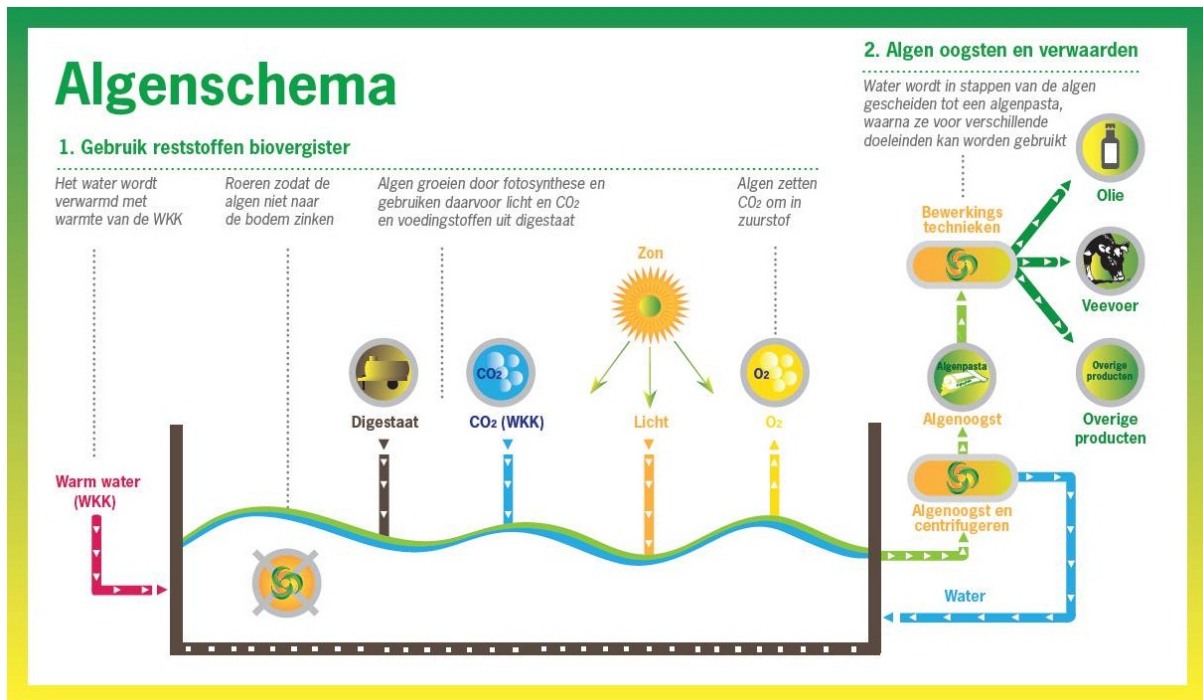
Bij verbranding van het geproduceerde biogas ten behoeve van elektriciteitsproductie komt rookgas vrij met een verhoogd gehalte aan kooldioxide (CO₂). Naast kooldioxide bevat het rookgas ook andere verbrandingsproducten, zoals bijvoorbeeld koolmonoxide (CO) en stikstofdioxide (NO_x), en componenten uit biogas als diwaterstofsulfide (H₂S) en methaan (CH₄). Bij de productie van algen wordt tijdens de fotosynthese CO₂ als koolstofbron gebruikt door de algen, waardoor de emissie van kooldioxide uit de gasmotor gereduceerd wordt. Mogelijk worden ook andere stoffen uit het rookgas door de algen worden benut en hiermee emissie naar het milieu voorkomen.

2. Optimale benutting van restwarmte

Ook de restwarmte die bij opwekking van elektriciteit vrijkomt, circa 60% van de totale hoeveelheid geproduceerde energie, kan middels de algenvijvers nuttig worden gebruikt. Deze restwarmte zorgt in de koude seizoenen voor een hogere temperatuur in de algenvijvers en stimuleert zo de algengroei. Het gebruik van restwarmte voor algen leidt tot hoge energiebenutting.

3. Toepassing van digestaat als voedingsstof voor algenteelt

Naast de CO₂ uit rookgas die als koolstofbron voor de algen dient, wordt ook het uit de co-vergister afkomstige digestaat gebruikt als voeding voor de algen. Dit digestaat voorziet de algen van de broodnodige stikstof en fosfaat. Het lokale gebruik van deze reststoffen en grondstoffen geeft een goede sluiting van de lokale kringlopen.



Figuur 2. **Algenschema**

Doelstellingen van het deelproject Algen van EnergieRijk zijn:

1. Realisatie van algenproductiefaciliteiten in de vorm van twee algenvijvers (één in de open lucht en één in de kas) en fotobioreactoren. Bij de vijvers zullen restromen van EnergieRijk toegepast worden en bij de fotobioreactoren wordt de algengroei gestimuleerd door LED-verlichting.
2. Vooronderzoek naar het mogelijk gebruik van digestaat als voedingsbron, de vastlegging van CO₂ door gebruik van rookgas, het nuttig gebruik van restwarmte uit de WKK, de potentiële productieverhoging door gebruik van LED-verlichting en de oogstefficiëntie met een coalescer.
3. Opstellen van een business model op basis van de open vijver waarmee zowel de potentiële productie en het gebruik van restromen als de economische resultaten inzichtelijk worden.
4. Behaalde resultaten met de pilotvijvers in 2012.

2 Vooronderzoek algenteelt

2.1 Gebruik van digestaat als voedingsbron

Deskstudie

Bij opstart van het onderzoek is literatuuronderzoek gedaan naar de kweek van algen op mest of digestaat. Daarbij zijn diverse voorbeelden gevonden van verschillende algensoorten die zijn gekweekt met mest of bewerkte mest van koeien en/of varkens als bron van voedingsstoffen [1-3]. Wat uit het literatuuronderzoek niet duidelijk blijkt is de mate waarin digestaat als voedingsbron gebruikt kan worden. Er wordt vermeld dat hoge concentraties van mest of digestaat een remmende werking hebben op de algengroei, en dat bij lagere concentraties de algencultures goed groeien. Onduidelijk blijft echter in hoeverre algencultures voor langere tijd op lage concentraties mest of digestaat kunnen overleven.

Naast het wetenschappelijke onderzoek is ook gebleken dat binnen Nederland de kweek van algen op mestresten al sinds midden jaren 90 wordt gezien als een commercieel interessant bedrijfsmodel. Nederlandse algenpioniers Algaetec en Aquacultura hadden beiden dit bedrijfsmodel als uitgangspunt, waarbij de geproduceerde algen werden ingezet (als toevoeging aan) veevoer. Beide bedrijven zijn echter failliet gegaan, mede omdat de toepassing van algen in diervoeders door de diervoederwetgeving niet was toegestaan.

Toepassing van algen in diervoeders is niet in strijd met de Europese of Nederlandse diervoederwetgeving, sinds enige tijd zijn algen zelfs expliciet aangewezen als goedgekeurd voedermiddel door het Permanent Comité voor de Voedselketen en Diergezondheid (PCVD). Een hindernis voor de kweek van algen op mest of digestaat komt vanuit de GMP+ regeling van productschap diervoeder waarin als voorwaarde staat dat in veevoeder en veevoedingrediënten geen mestresten mogen voorkomen. Aangezien het bij de teelt van algen op digestaat vrijwel onmogelijk is om te garanderen dat het eindproduct vrij is van mestresten, is het gebruik van digestaat als voedingsbron in combinatie met verkoop van algen als diervoeders uitgesloten. Wel blijft het mogelijk de op digestaat gekweekte algen aan de eigen veestapel bij te voeren, door verscheidene agrarische bedrijven wordt momenteel gedacht of gebouwd aan een algenproductie voor deze toepassing. Een andere mogelijkheid die wordt nagestreefd is het verkrijgen van een wettelijke goedkeuring voor het gebruik van nutriënten uit digestaat als kunstmest, met die goedkeuring kunnen ook algen gevoed worden met deze nutriënten.

Uit communicatie met AF&F blijkt dat er op de proeflocatie in Hallum al eerder tests met digestaat van rundmest uitgevoerd zijn. Tijdens deze tests bleek de stabiliteit van de algencultures negatief te worden beïnvloed, op onvoorspelbare momenten stopten de cultures met groeien. De oorzaak van de problemen is mogelijk het hoge gehalte aan koper dat destijds in Hallum in de mest en digestaat zat. Koper staat bekend als een metaal dat toxisch is voor diverse algen en dat ook in algenbestrijdingsmiddelen zit.

Praktisch onderzoek

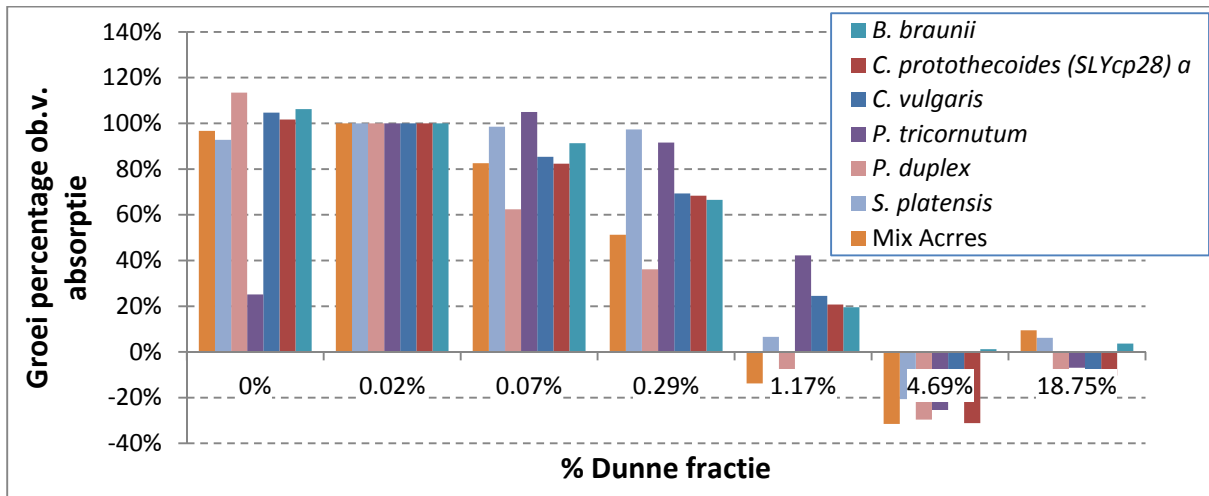
Om te testen of digestaat geschikt is als voedingsbron voor algen is een klein volume digestaat uit de ACRRES covergister heeft gescheiden in een dikke en een dunne fractie met behulp van een mobiele installatie. De samenstelling van de dunne fractie is geanalyseerd door Agrarisch Laboratorium Noord Nederland (Zie Tabel 1) en de dunne fractie is gekoeld opgeslagen en wordt gebruikt als bron van nutriënten voor het algenonderzoek. Wat in de analyseresultaten opvalt is de verhouding N:P, uitgaande van totaal stikstof is deze 6,6 g(N)/g(P) wat overeen komt met de Redfield ratio (7,2:1) welke over het algemeen genomen wordt als optimale verhouding N:P.

Als eerste praktijktest is in het laboratorium in microwellplaten onderzocht vanaf welke concentraties digestaat een remmende werking heeft op de groei van geselecteerde algensoorten door algen te groeien op een reeks met oplopende concentraties digestaat. Door steeds na 7 dagen middels een absorptiemeting en een celtelling de groei van de algencultuur te bepalen, kon de negatieve invloed van digestaat toevoeging per soort bepaald worden.

De resultaten van de beide bepalingen laten duidelijk zien dat toevoeging van dunne fractie digestaat al bij relatief lage concentraties de groei van de algencultures remt. Zo is vanaf 0.29 vol% dunne fractie al een duidelijk negatief effect op de groei waarneembaar voor alle geteste algensoorten. Omdat de invloed van digestaat op de verscheidene algensoorten niet erg verschilt is er voor gekozen een vervolgprouf te doen met een mix van een aantal algensoorten die relatief goed groeien op hetzelfde medium (enigszins zouttolerante soorten). In een toekomstige open vijver situatie kunnen fluctuaties in temperatuur, pH en lichtintensiteit dan opgevangen worden door verschuivingen in de dominante algensoort. De algenmix bevat 4 algensoorten; *Pheodactylum tricornutum*, *Pediastrum duplex*, *Chlorella protothecoides*, en *Scenedesmus dimorphus*.

	Gehalte (mg/kg)
droge stof	73000
totaal-N	5000
N-NH ₄	2600
P	760,7
K	4980
Mg	543
Na	519
Cl	24000
S	400
As	<0,219
Cd	0,023
Cr	0.876
Cu	3,7
Hg	<0,0073
Ni	0,606
Pb	<0,365
Zn	14

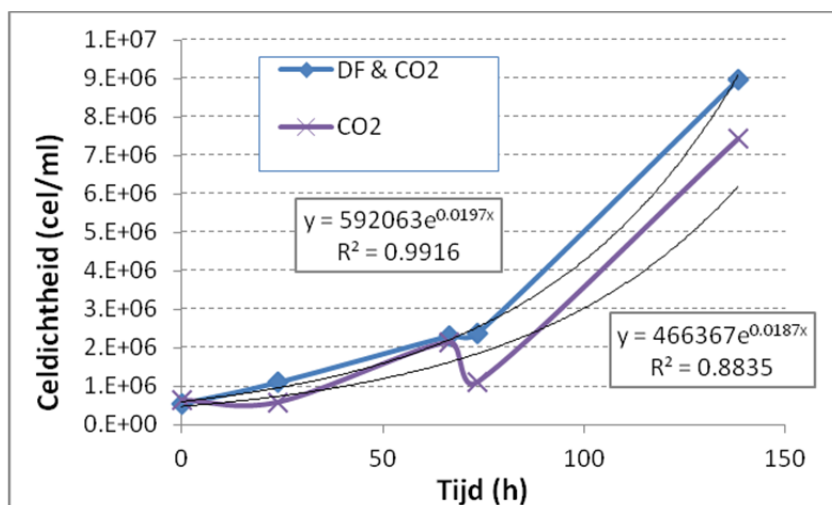
Tabel 1. **Samenstelling van de dunne fractie digestaat (analyse door ALNN)**



Figuur 3. Groeisnelheid bij oplopende dosering digestaat

Als vervolg op de laboratoriumexperimenten is er een aantal proeven uitgevoerd met 25 liter algencultuur in een kas, bij dit grotere volume is het mogelijk om de zuurtegraad van het medium onder controle te houden en om gecontroleerd CO₂ toe te voegen. Wel is het in de kas minder goed mogelijk om de temperatuur constant te houden, is de kans op besmetting veel groter dan in een laboratoriumomgeving, en is de groei afhankelijk van de intensiteit van het daglicht. De condities komen daarmee dichterbij de omstandigheden in een open vijver.

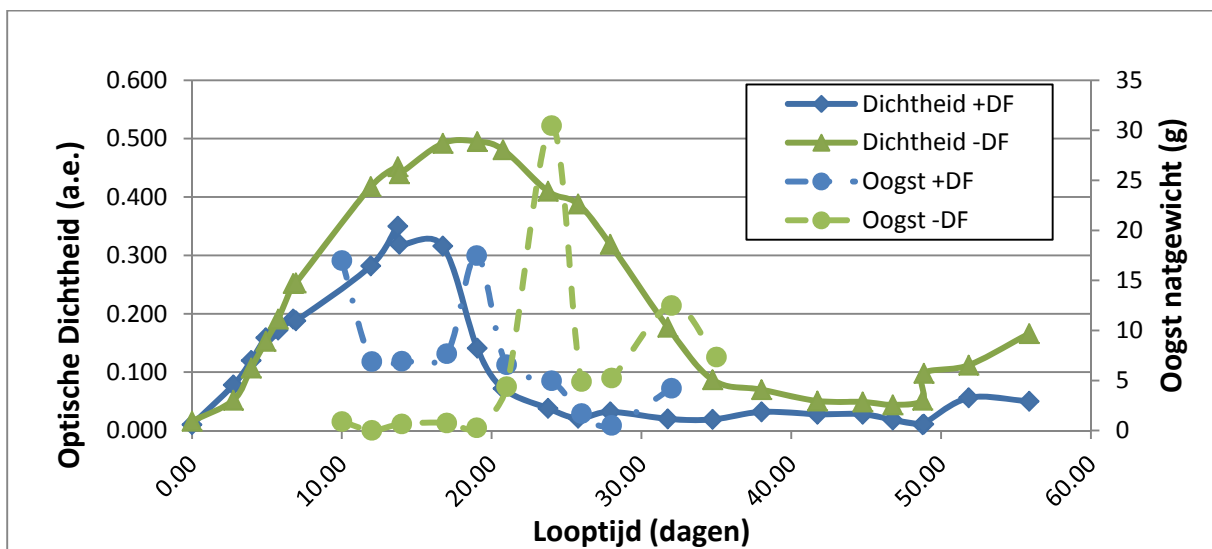
Bij de kasproeven is gekozen de proeven te beperken tot de kweek van de algemix, groei van de algencultures werd wederom bepaald door middel van absorptiemetingen en cellellingen. Qua toevoeging van digestaat bleek uit de kasproeven dat bij toevoegingen tot 0,5 vol% digestaat aan batchcultures de negatieve invloed op de initiële groeisnelheid beperkt blijft; de verdubbelingstijd tijdens de eerste 100-150 uur van de cultures is 86,6 uur voor de cultuur met 0,1% digestaat t.o.v. 70,7 uur voor de controlecultuur en voor een vervolgprouf met 0,5% digestaat is de verdubbelingstijd 37 uur t.o.v. 35 uur in de controlecultuur. (De verdubbelingstijden verschillen per proef door veranderende omstandigheden in bijvoorbeeld temperatuur en lichtintensiteit)



Figuur 4. Initiële groeisnelheid

De testresultaten uit batchproeven zijn vervolgens gebruikt om een continue-teelt van algencultures op te zetten om de situatie in de geplande vijvers zo dicht mogelijk te benaderen. Hiertoe werd op iedere kweekbak een bezinkbak geplaatst met een constante stroom algencultuur naar de coalescer door middel van een aquariumpomp. In de bezinkbak bezinkt dan een klein gedeelte van de algen, eens per 2 dagen of drie dagen werd de ingedikte algencultuur uit de bezinkbak geoogst.

Helaas vormde het crashen van algencultures een obstakel bij het onderzoek; algencultures lijken na verloop van tijd (circa 1 maand) onafhankelijk van de toevoeging van dunne fractie te crashen. Hierbij loopt de dichtheid van de algencultures plotseling terug omdat de algen neerslaan op de wanden en de bodem van de bak, bovendien wordt de algencultuur bruin (normaal is deze groen) en loopt de concentratie ammoniak in het medium op. Dit alles duidt er op dat de algencultuur niet alleen stopt met groeien maar ook dat de algen worden afgebroken. Omdat alle algencultures crashen lijkt dit niet veroorzaakt door de toevoeging van digestaat maar door andere factoren.



Figuur 5. **Overzicht van gemeten optische dichtheid en hoeveelheid geoogste biomassa**

Tijdens de eerste proef stopte de algencultuur waaraan iedere 2 à 3 dagen 0,04 vol% digestaat aan het groeimedium werd toegevoegd na 17 à 19 dagen met groeien. De cultuur waarbij geen digestaat is vertoont een minder scherpe crash, maar ook bij deze cultuur gaat vanaf dag 19 de dichtheid steeds achteruit. Bij beide cultures is vanaf de 10^e dag ook iedere 2 à 3 dagen een gedeelte van de algencultuur geoogst door middel van bezinking en centrifugatie, hierbij varieerde de oogst tussen de 0 en 30 gram.

Conclusies

Digestaat wordt gezien als een potentiële bron van voedingsstoffen voor de teelt van algen, al wordt de afzet van algenbiomassa door het gebruik van digestaat wel beperkt. Echter, toediening van digestaat aan algencultures kan in de praktijk (bij Hallum) tot problemen te leiden. Uit eigen onderzoek blijkt dat digestaat alleen in beperkte hoeveelheden toegediend kan worden als vervangende bron van voedingsstoffen, de troebelheid van het digestaat heeft bij percentages boven de 0,5 vol% een remmende werking op de groei van algencultures. Het herhaaldelijk toedienen van kleine hoeveelheden digestaat aan continue-cultures heeft niet tot extra problemen geleid, echter waren langdurige tests niet mogelijk omdat alle cultures (ook zonder digestaat toevoeging) na verloop van tijd stopten met groeien. Extra onderzoek naar de oorzaak van deze crashes is gewenst, mogelijk biedt het creëren van een doorstroming een oplossing.

2.2 Vastleggen van CO₂ door gebruik van rookgas met een verhoogd CO₂ gehalte

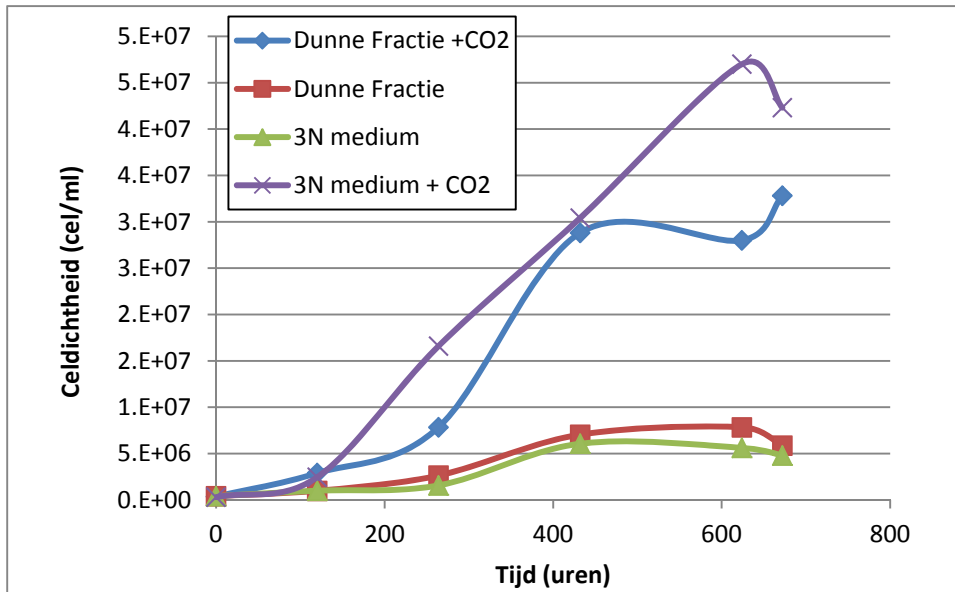
Deskstudie

Algen leggen CO₂ vast tijdens de fotosynthese. Daarbij hangt de te verwachten opname van CO₂ af van de gekozen algensoorten en de groeiomstandigheden; echte, exacte waarden zijn daarmee niet voorspelbaar en daarom wordt over het algemeen uitgegaan van een CO₂ opname van 1,83 gram per gram geproduceerde droge stof algenbiomassa [4-6]. Deze opname is gebaseerd op het percentage koolstof in algenbiomassa van 50% ofwel 0,5 gram per gram, als alle koolstof wordt opgenomen uit CO₂ is 1,83 gram CO₂ nodig per gram geproduceerde biomassa. In racewayponds zijn de beschikbaarheid van CO₂ en overmaat aan O₂ vaak de limiterende factoren voor de algengroei, beperkend hierbij is niet de opname en afgifte van CO₂ respectievelijk CO₂ en O₂ door de algen maar de snelheid waarmee CO₂ en O₂ worden overgedragen van omgeving aan het medium of andersom [7, 8]. Veel onderzoek heeft zich dan ook gericht op actieve toevoer van CO₂ (en afvoer van O₂) om zo de productie van algenbiomassa te verhogen. Hiervoor is het beluchten van de algencultuur met CO₂ rijke lucht één van de mogelijkheden, rookgas (een CO₂ rijk afvalproduct) is logischerwijs dan ook al vaker in de praktijk toegepast. Seabiotic is één van de bekendste voorbeelden waarbij rookgas wordt toegediend om de productie van algen te verhogen, recent opende Vattenfall in Duitsland een commerciële algenkwekerij waarbij rookgas wordt toegediend, en zo zijn er vele voorbeelden te noemen.

Voor de veiligheid in de kas is het daarnaast belangrijk de efficiëntie van CO₂ opname te kennen; bij een lage opname-efficiëntie blijft een hoger percentage CO₂ aanwezig in de afgassen en is een groter volume rookgas nodig om de algen van CO₂ te voorzien. Ondanks het vele onderzoek is het lastig om in te schatten met welke efficiëntie de opname van CO₂ zal plaatsvinden, aangezien waarden uit de literatuur uiteenlopen van 10% tot 95% en vaak niet beschreven wordt met welke systemen of vijverdieptes er gewerkt is. Uitgaande van de diepere ACRRES vijvers is een eerste inschatting dat een efficiëntie van 50% haalbaar is.

Praktisch onderzoek

Bij het onderzoek in de 25 litercultures in de PPO-proefkas is gekeken naar de invloed van CO₂ toediening op de groei van algencultures. Hierbij is in gebruik gemaakt van zuiver CO₂ dat op vaste tijdstippen werd toegediend aan algencultures. Uit het onderzoek bleek een duidelijk positief effect van CO₂ toediening op de initiële groeisnelheid van de algencultures; cultures groeiden tot 3 keer sneller als er CO₂ werd toegevoegd. In de literatuur[9] wordt wel groeiversnelling met een factor 20 gerapporteerd bij concentraties van 6% CO₂ i.p.v. 0.036%. In beide gevallen wordt het positieve effect invloed van CO₂ toevoeging veroorzaakt door een CO₂ limitatie in de uitgangssituatie; zonder actieve CO₂ toevoeging is er te weinig opgelost CO₂ om de algencultuur in zijn behoefte te voorzien, na CO₂ toevoeging is voldoende CO₂ voorradig en worden andere groeifactoren limiterend.



Figuur 6. *Betere groei door CO₂ toevoeging, zowel voor cultures op 3N medium als dunne fractie digestaat*

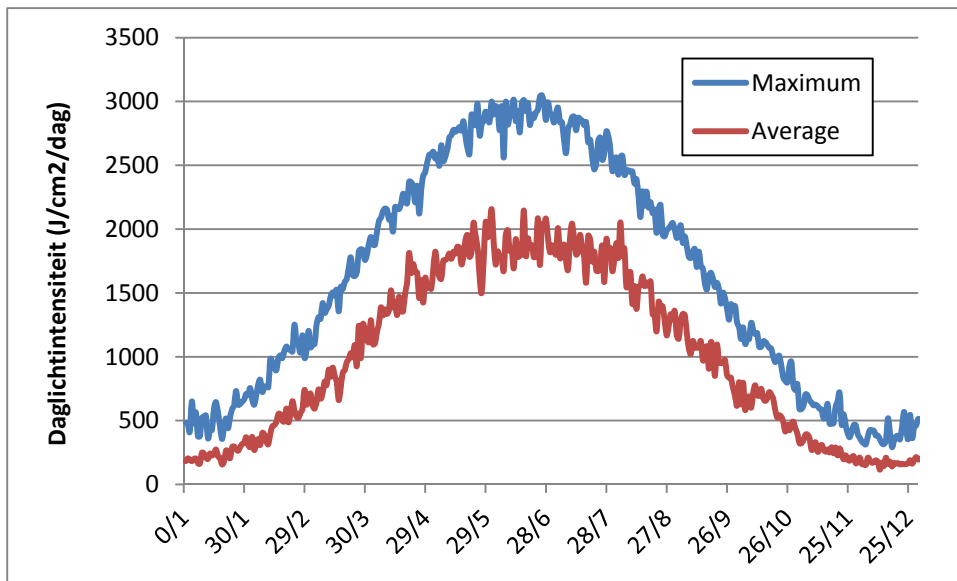
Conclusies

Bij het ontwerp van de algenvijvers is bewust gekozen om af te wijken van de algemene standaarddiepte van 25-30 cm. Hierdoor wordt de efficiëntie van CO₂ overdracht uit rookgassen verhoogd, maar wordt ook de noodzaak van CO₂ toediening verhoogd omdat zonder actieve CO₂ toevoer een groter gebrek aan CO₂ ontstaat. Van de toediening van rookgassen in de diepe algenvijvers wordt dan ook een sterk positief effect op de algengroei verwacht.

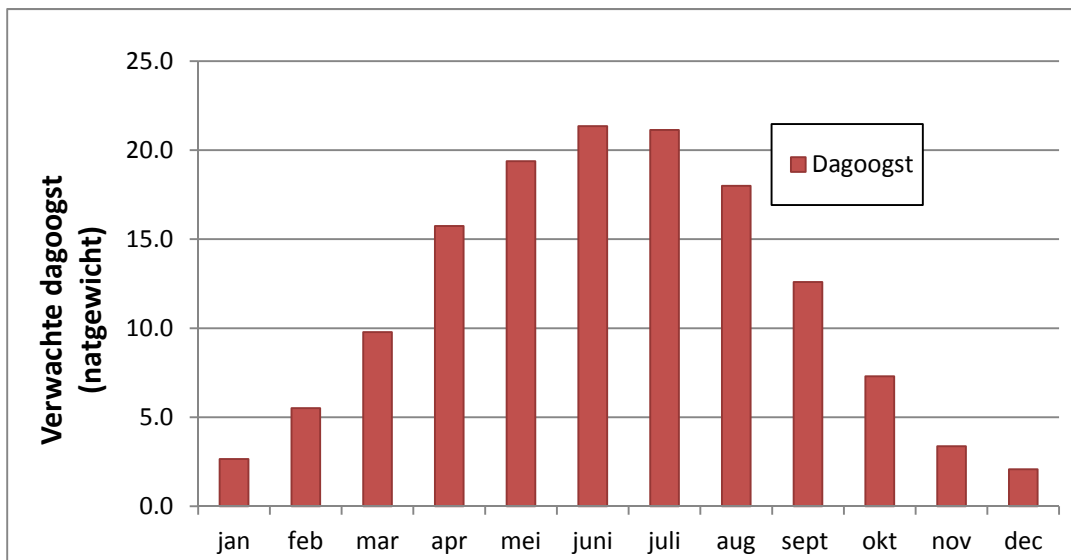
2.3 Seizoensinvloed, gebruik van restwarmte en LED-licht

Seizoensinvloeden

Bij een algenvijver hebben variaties in temperatuur en daglichtintensiteit grote invloed op de productie; daarom is het niet zinvol om een verwachte jaaropbrengst op simpele wijze om te zetten in een gemiddelde dagopbrengst. Hier wordt uitgegaan van een jaaropbrengst van 25 ton droge stof per ha, omgerekend zo ongeveer 625 kg droge stof algenbiomassa per vijver per jaar. Dit is gelijk aan een omzettings-efficiëntie van energie uit zonlicht naar algenbiomassa van 1,5%. In dit hoofdstuk wordt op basis van die verwachte opbrengst een indicatie gegeven van de te verwachten dagopbrengst door de seizoenen heen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een formule die de invloed van licht en temperatuur op de groei van algen beschrijft [10, 11]. De belangrijkste factor die hierbij de dagopbrengst zal bepalen is de daglichtintensiteit; in Figuur 7 is een overzicht gegeven van de gemiddelde en maximale daglichtintensiteit door het jaar heen. In Figuur 8 is de variatie in daglichtintensiteit omgezet naar een variatie in dagopbrengst aan biomassa (gebaseerd op een fotosynthetische efficiëntie van 1,5%, een vijveroppervlak van 250m², een energetische inhoud van algenbiomassa 22kJ/g, en een droge stof gehalte van 15%). De dagopbrengst varieert zo tussen de 10 kg in de relatief donkere wintermaanden en 60 kg op zonnige zomerdagen.

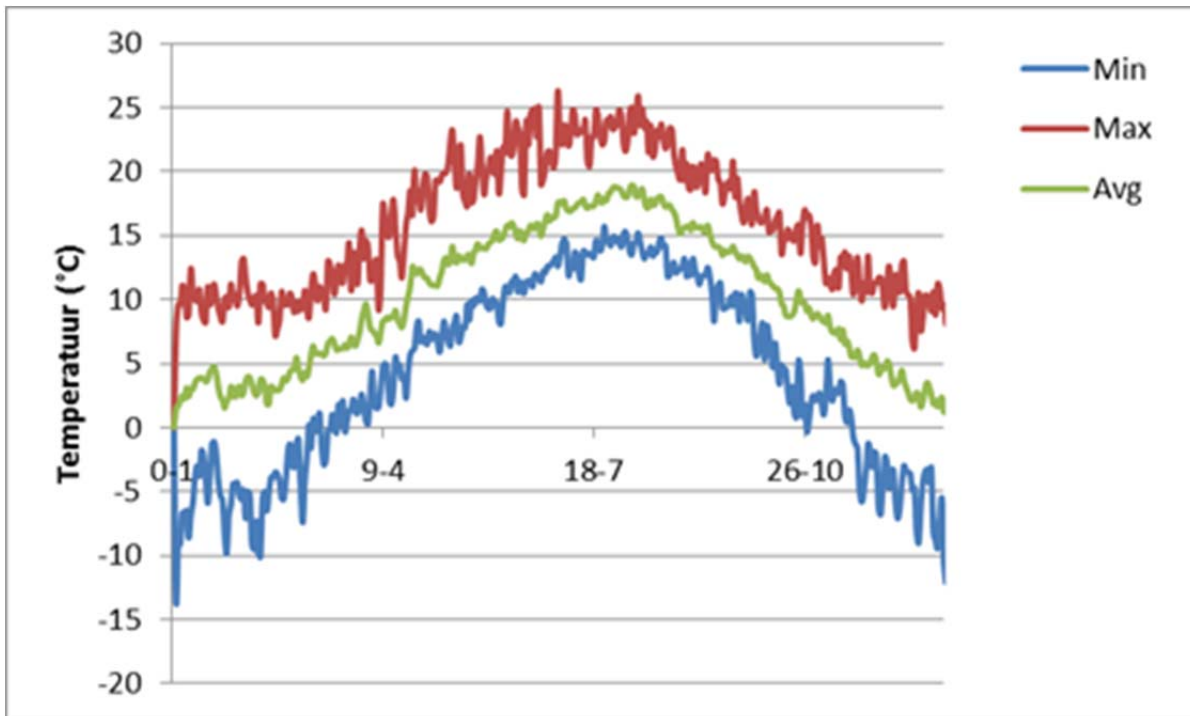


Figuur 7. Gemiddelde en maximale daglichtintensiteit gemeten in Lelystad in de periode 1991-2010

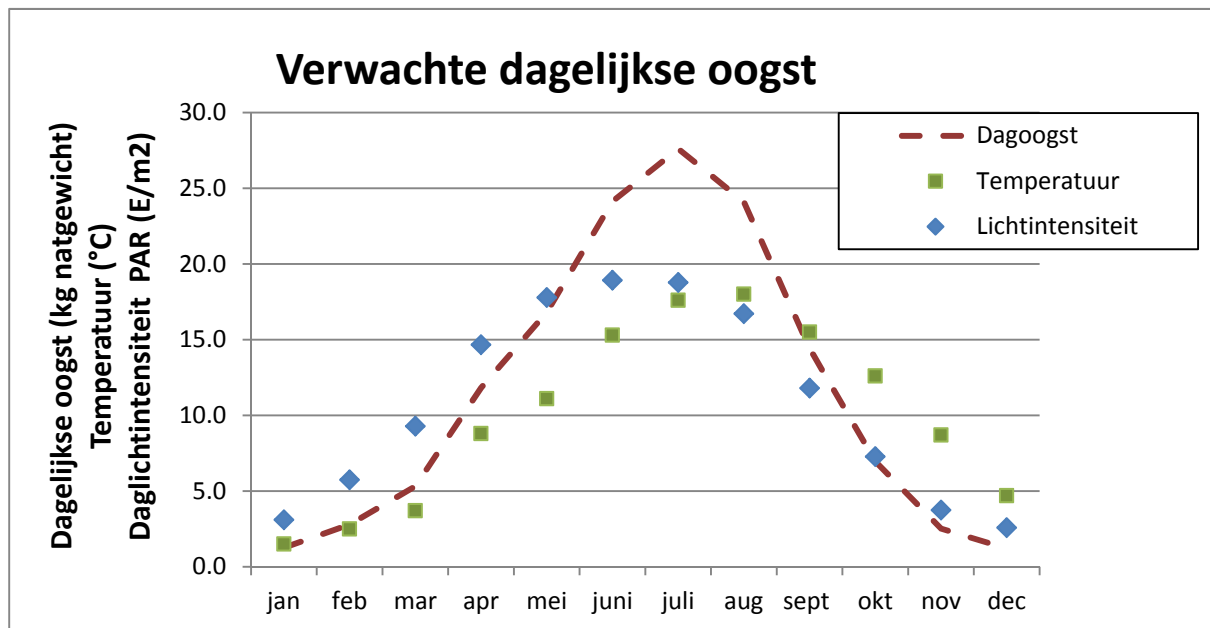


Figuur 8. Variatie in daglichtintensiteit omgerekend naar dagopbrengst algenbiomassa (o.b.v. 15% droge stof)

Naast daglichtintensiteit is ook de temperatuur van invloed op de productie van algenbiomassa, de variatie van temperatuur door het jaar heen is terug te vinden in Figuur 9. In Figuur 10 is de eerdere invloed van de daglichtintensiteit op de groeisnelheid aangevuld met de invloed van de variatie in temperatuur. De gebruikte temperatuur in deze grafiek is gebaseerd op de gemiddelde dagtemperatuur gemeten bij het KNMI meetstation in Lelystad in de periode 1991-2010, er wordt dus geen rekening gehouden met eventuele extra opwarming van het water of bevrozing van water door koude periodes. Net als in de eerdere grafiek is de dagooft weergegeven als natgewicht met een droge stof percentage van 15% en geeft een indicatie van de daadwerkelijk te oogsten hoeveelheden. De grafiek geeft duidelijk aan dat onder invloed van de temperatuur de oogst door het jaar heen nog sterker varieert, gedurende 3 à 4 zomermaanden wordt meer dan 15 kg oogst per dag verwacht met in de piekmaand bijna 22 kg oogst per dag, terwijl 3 [12]wintermaanden lang de oogst waarschijnlijk beneden de 5 kg per dag zal blijven met in de donkerste dagen een te verwaarlozen dagooft. Kanttekening bij deze inschatting is dat in de praktijk (bij Kelstein in Hallum) de variaties kleiner blijken te zijn als uit het model naar voren komt.



Figuur 9. *Etmaalgemiddelde temperatuur gemeten bij KNMI Lelystad in de periode 1991-2010*

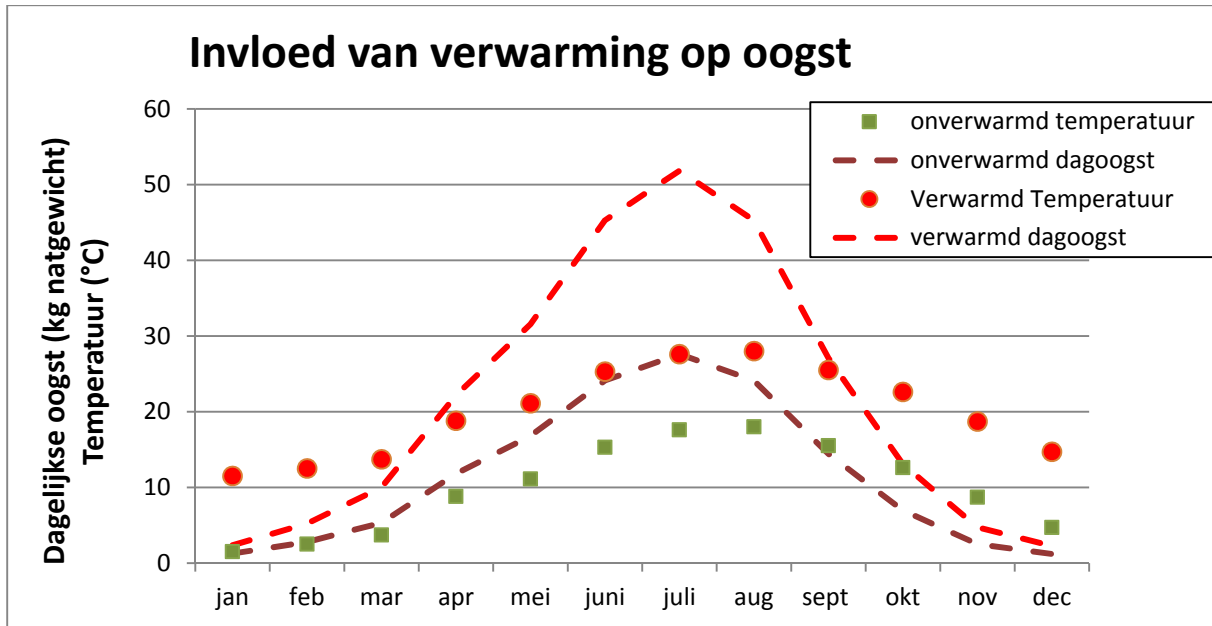


Figuur 10. *Verwachte dagopbrengst als gevolg van seizoensvariaties*

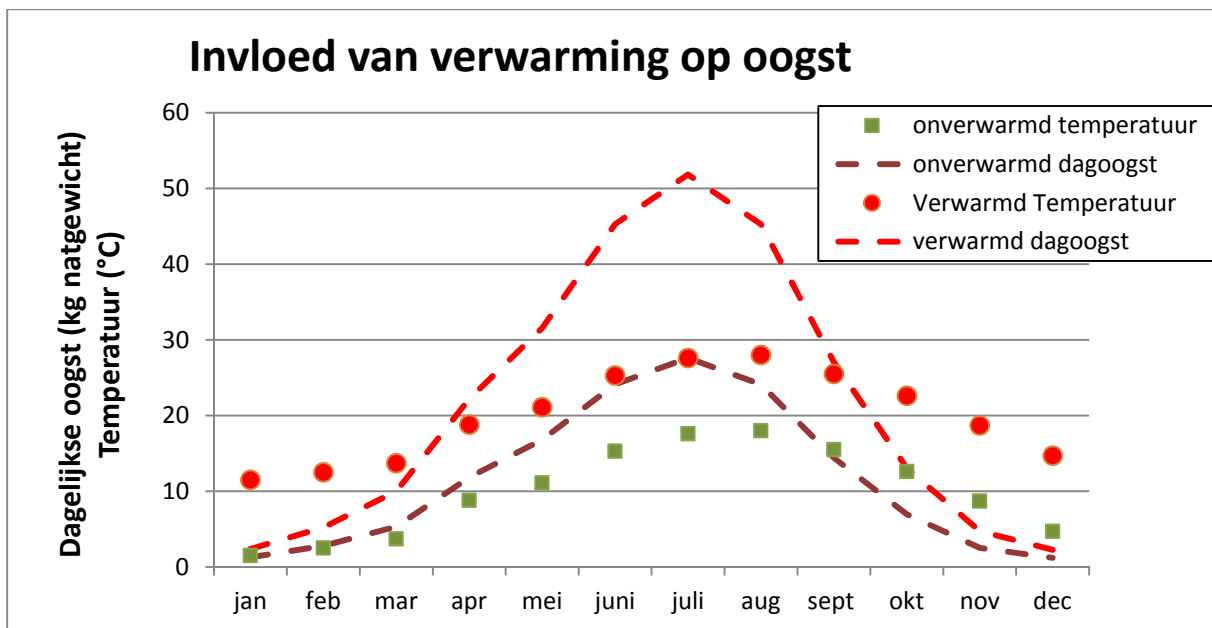
Nuttig gebruik van restwarmte

Met hulp van de bovenstaande omrekening kan het positieve effect van vijververwarming geschat worden, in Figuur 11 en Figuur 12 is de invloed van een temperatuursverhoging van respectievelijk 5°C & 10°C terug te vinden. Hierbij is de extra opbrengst als gevolg van een temperatuursverhoging het grootst in de voorjaarsmaanden omdat er dan voldoende daglichtintensiteit aanwezig is voor een snelle groei. In de wintermaanden is de intensiteit van het daglicht laag waardoor een temperatuursverhoging slechts een klein effect tot gevolg heeft. De vraag blijft in hoeverre de temperatuur in de vijvers precies verhoogd kan

worden met behulp van restwarmte uit de WKK, waarschijnlijk zal dit slechts een paar graden zijn voor de buitenvijver en minder als tien graden voor de binnenvijver.



Figuur 11. *Inschatting positief effect van 5°C verwarming*



Figuur 12. *Inschatting positief effect van 10°C verwarming (met maximum temperatuur 25°)*

Inzet LED-verlichting

De inzet van LED-verlichting om de algengroei te stimuleren is voor het onderzoek in de vijvers van ondergeschikt belang, maar is voor de toekomst voorzien als onderdeel van het onderzoek. Hierbij zal onder andere gekeken worden naar de efficiëntie van algengroei in diepere bassins. Hoewel het gebruik van LED-verlichting een extra kostenpost oplevert ten opzichte van de standaard situatie waarbij enkel zonlicht wordt gebruikt voor algenteelt, levert het gebruik van LED-licht een stabiel productieproces op. Zo wordt het mogelijk algengroei te stimuleren in de wintermaanden als de daglichtintensiteit beperkend wordt, en wordt het mogelijk de algen 's nachts door te laten groeien. Het voordeel van LED-verlichting komt dan ook

het best tot uiting in processen waarbij een stabiel productieproces benodigd is; bijvoorbeeld voor de zuivering van afvalwater door algen. Een kwantitatieve inschatting van het te verwachten positieve effect is op basis van de huidige gegevens niet te maken omdat de efficiëntie van lichtomzetting van het LED-licht een grote onbekende factor is.

Conclusies

Zoals in dit hoofdstuk is terug te vinden hebben seizoensinvloeden een grote impact op de productie van algen. Het verwarmen van de algenvijvers kan hierbij gebruikt worden om een hogere productie te bewerkstelligen, in het bijzonder in die maanden dat er voldoende licht aanwezig is voor de algengroei (maart tot oktober). Het bijlichten van de algencultures is een andere mogelijkheid om de algengroei te verhogen, hierbij is het grootste positieve effect uiteraard te verwachten in de donkere periodes, bijvoorbeeld de maanden oktober tot maart maar ook gedurende de nachtelijke uren in de zomermaanden. Hierbij geldt voor de diepe bassins en vijvers dat het mogelijk zelfs in de zomerperiodes productie-verhogend werkt om in de donkere gedeeltes onderin de algencultures bij te lichten.

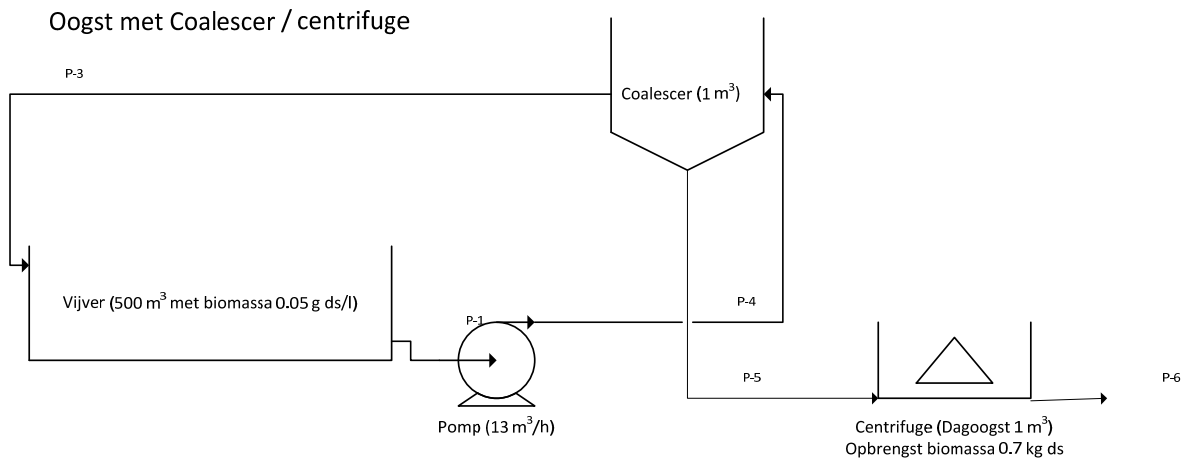
2.4 De efficiëntie van algenoogst met een coalescer

Het oogsten van algen

Bij algenteelt is de methode van oogsten vaak een discussiepunt. De reden hiervoor is de lage celdichtheid van een algencultuur in combinatie met het kleine formaat (enkele micrometers) van de algen, deze combinatie maakt dat het oogsten van algen een grote kostenpost is voor de productie van algen biomassa. Technisch gezien is het oogsten van algen echter geen bijzondere uitdaging, mogelijke methoden van algenoogst zijn flocculeren, floteren, centrifugeren en filtreren. Van elk van deze methodes is wel een voorbeeld bekend bij bestaande algenproducenten, vaak worden de methodes ook gecombineerd om tot een gewenst eindproduct te komen.

Algenoogst met een combinatie van coalescer en centrifuge

Bij de vijvers in Lelystad is voor de algenoogst gekozen voor een gecombineerde coalescer en centrifuge; in de coalescer wordt de algencultuur ingedikt om vervolgens met een centrifuge verder verwerkt te worden tot een algenpasta. Deze installatie wordt gebouwd naar het voorbeeld van Kelstein in Hallum, die situatie is in Figuur 13 weergegeven en dat is de situatie zoals in dit verslag wordt beschreven. De algenvijver (buiten, 500 m³) staat in verbinding met een algenbassin (binnen, 25 m³); er wordt 25 m³ per dag van de vijver naar het bassin gepompt en via een natuurlijk verloop teruggevoerd. Vanuit de vijver wordt ook continu algencultuur door de coalescer gepompt (13 m³ per uur). Periodiek wordt de ingedikte algencultuur geogst uit de coalescer; de volledige inhoud van de coalescer wordt dan gecentrifugeerd (1 m³). In de lente en zomer als de algen snel groeien wordt er meerdere keren per dag geogst, in de winter wordt daarentegen soms maar 1 keer per 3 dagen geogst.

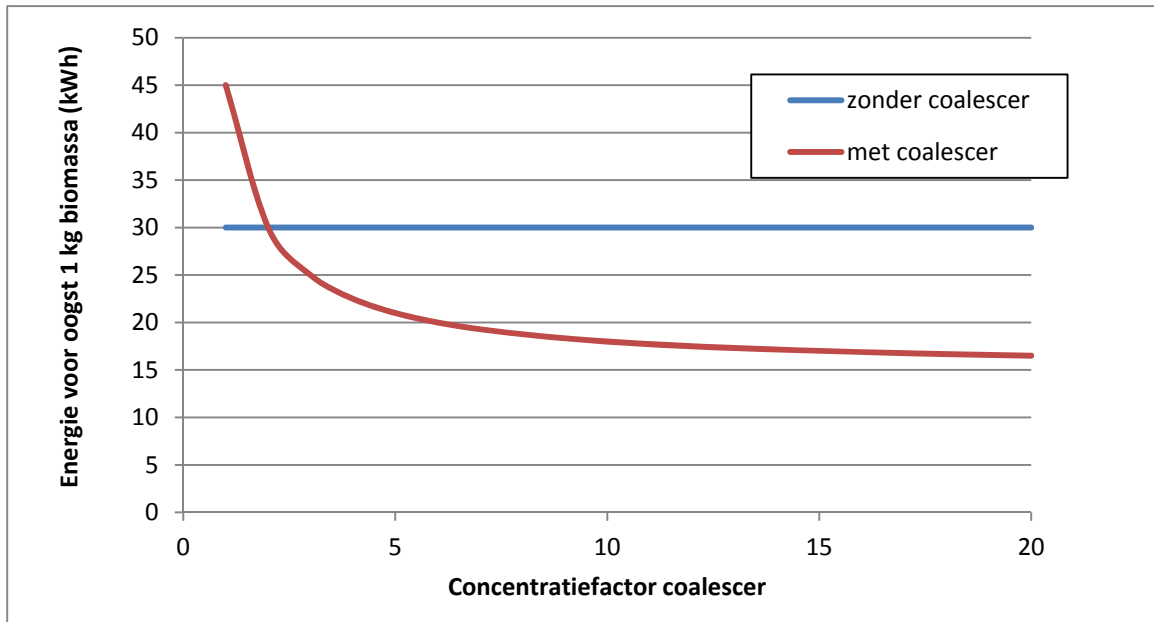


Figuur 13. **Schema van de in Hallum bestaande algenvijver met oogst via een coalescersysteem**

Theoretische energiebesparing ten opzichte van centrifugeren

De energiebesparing die het gebruik van de coalescer oplevert ten opzichte van het direct centrifugeren van de algencultuur is afhankelijk van de indikkingsfactor. Dit komt omdat de energie benodigd voor het centrifugeren afhankelijk is van het volume dat gecentrifugeerd moet worden. Stel dat er 1kg droge stof geogst moet worden uit een cultuur met een dichtheid van 0,1 kg_{ds}/m³ dan dient er 10 m³ cultuur gecentrifugeerd te worden (uitgaande van 100% recovery). Met een verbruik van 3kWh/m³ vergt dit in totaal 30 kWh.

Door voor de centrifuge een coalescer te plaatsen wordt de cultuur ingedikt voor het centrifugeren, zeg dat de coalescer de cultuur 5* voorgeconcentreerd naar 0,5kg_{ds}/m³. In dat geval hoeft nog maar 2m³ gecentrifugeerd te worden en is nog maar 6kWh nodig voor het centrifugeren. Wel is er extra energie benodigd om de cultuur naar de coalescer te pompen, circa 15kWh per dag. De besparing in de totale oogst is daarmee afhankelijk van de behaalde concentratiefactor in de coalescer (Zie grafiek 14).



Figuur 14. **Energieverbruik als functie van concentratiefactor in de coalescer ten opzichte van het energieverbruik zonder coalescer**

Maximale concentratiefactor

Om te bepalen in welke mate de coalescer de algencultuur verdikt, is tijdens het oogsten van de coalescers een aantal monsters genomen, vlak na de start van de oogst, halverwege en vlak voor het einde van de oogst. Het startmonster bevat voornamelijk de dikke slurry onderuit de coalescer en geeft een idee van de maximale concentratiefactor die bereikt wordt. De optische dichtheid en het drooggewicht van dit monster worden daarvoor vergeleken met de optische dichtheid en drooggewicht van algencultuur uit de vijver.

Tabel 2. **Maximale concentratie gemeten in de coalescer van vijver 3 in Hallum**

	Optische dichtheid	Drooggewicht (g/l)
Algencultuur	0,045	0,048
Sample begin oogst	2,75	3,1
Concentratiefactor	61	65

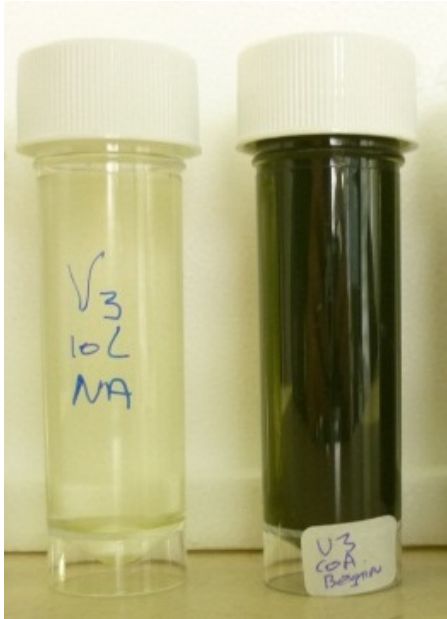


Foto 1. **Maximale concentratie van algencultuur in de coalescer**

Te verwachten concentratiefactor

Naast de bovenstaande maximale concentratiefactor is op basis van oogstgegevens van 4 tot 11 december 2011 een inschatting gemaakt van de te verwachten concentratiefactor. Dit is de een gemiddelde concentratiefactor per oogst, uitgaande van een gemiddelde concentratie voor de gehele inhoud van de coalescer berekend op basis van de geoogste hoeveelheid droge stof. Uit vijver 3 is in die week 25kg algenbiomassa geoogst met een dichtheid van circa 20% droge stof. Dit betekent een weekoogst van 5kg droge stof, bij 5 keer oogsten in de week betekent dit per oogst 1kg droge stof. Deze oogst komt uit de 1000 liter coalescer-volume, wat een oogstdichtheid oplevert van $1\text{kg}_{\text{ds}}/\text{m}^3$. Met een vijverdichtheid van $0,05\text{kg}_{\text{ds}}/\text{m}^3$ betekent dit een indikkingsfactor van circa 20 keer.

3 Business model open algenvijver

Als business case is een open algenvijver onderzocht, naar voorbeeld van het systeem dat in Lelystad gerealiseerd wordt. Hiervoor is een rekenmodel in Excel gemaakt waarmee het productieproces met alle verwachte in- en outputstromen en de daarbij behorende kosten en baten zijn doorgerekend. Met het model is het rendement op het geïnvesteerde vermogen en de terugverdientijd bepaald en zijn kostprijsanalyses gemaakt. Ook zijn er verschillende scenario's (bijvoorbeeld opschaling) mee doorgerekend.

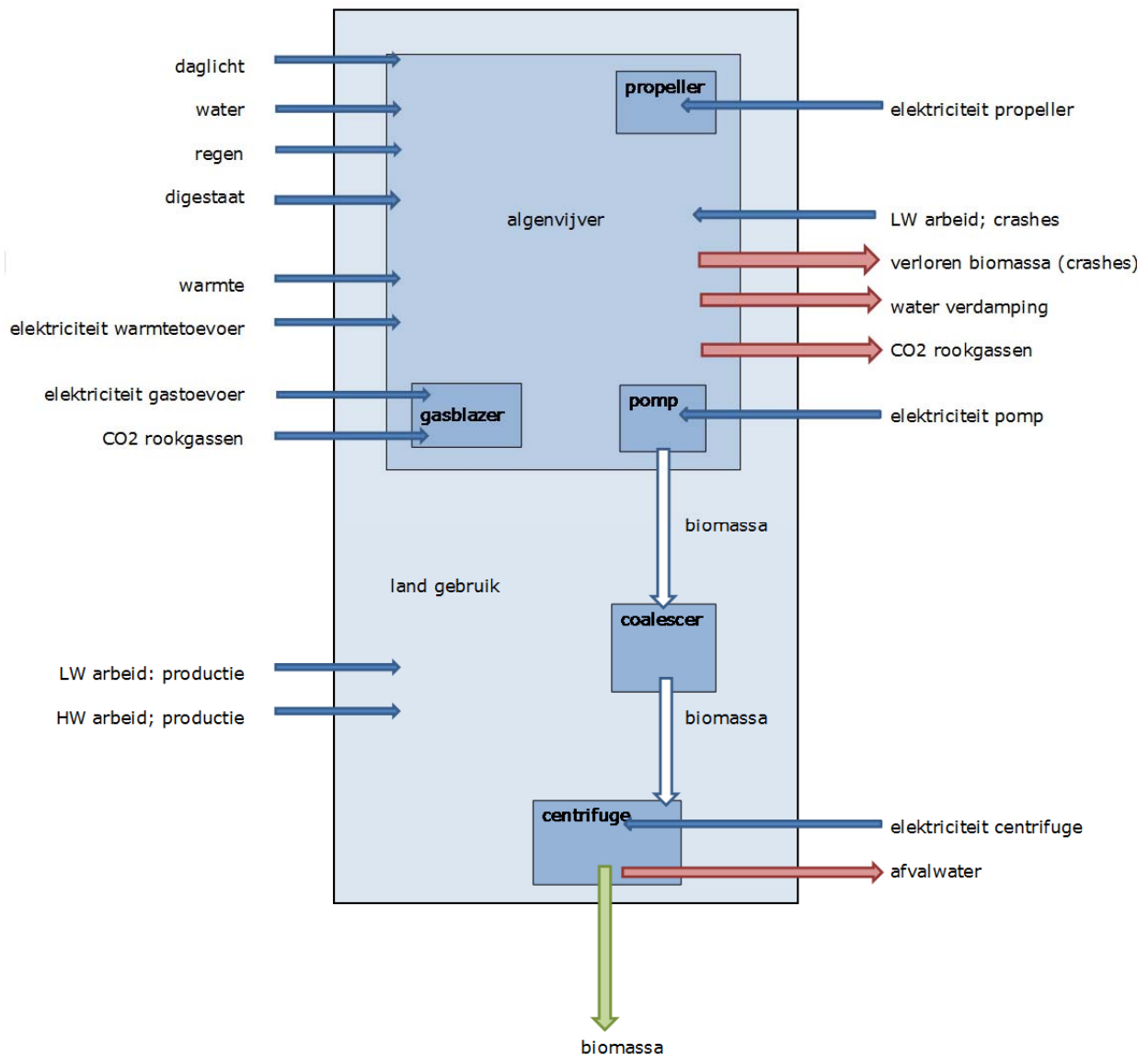
3.1 Uitgangspunten business case

In deze business case wordt uitgegaan van een vijver met een oppervlakte van 1.000 m² en een diepte van 30 cm¹. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de warmte en de rookgassen van de gasmotor van de biovergister. Voor het oogsten wordt gebruik gemaakt van een coalescer en een centrifuge. Het eindproduct is een algenpasta die kan worden gebruikt voor likstenen voor vee. In het model is (nog) niet uitgegaan van invriezen of indrogen van deze algenpasta of van verdere algenraffinage.

Processchema

In Figuur 15 is het productieproces van de open algenvijver met de in- en outputstromen schematisch weergegeven.

¹ Op de ACRRES locatie in Lelystad is de vijver i.p.v. 30 cm 80 cm diep. Omdat niet goed bekend is wat het effect van een extra diepe vijver is, is uitgegaan van een gebruikelijke diepte van 30 cm.



Figuur 15. **Processchema van de open algenvijver**

Biomassa opbrengst

Om de te verwachten biomassa opbrengst te bepalen is uitgegaan van de gemiddelde daglichtinstraling per maand van het KNMI op deze locatie en een verwachte fotosynthese efficiëntie door algen van 1,5 % in open vijvers [13]. Uitgaande van een energiewaarde van glucose van 15,63 kJ/g, het aandeel van de verschillende bestanddelen van algen en de PVI (Production Value Inverse) van deze bestanddelen in glucose is de potentiële opbrengst bepaald. Voor *Chlorella* spp is de samenstelling zetmeel 30%, eiwitten 40%, vet 25% en organische anionen en as 5%[12]. De PVI is 1.211 voor zetmeel, 1.793 eiwitten, 3.03 vetten, en 0.906 voor organische anionen en as[14].

Als optimale temperatuur voor de groei van de algen is in het model voor 25°C gekozen, omdat dit voor Nederlands klimaat met verwarmde vijvers een haalbare temperatuur lijkt voor meerdere maanden per jaar. Bij hogere of lagere temperaturen neemt de groei met een bepaalde factor af [15]. In het model is per maand aangegeven wat de gewenste temperatuur van de vijvers is, zie Tabel 3. In deze tabel is ook weergegeven met welke factor de algenproductie in het model dan vermenigvuldigd wordt.

Tabel 3. **Gewenste vijvertemperatuur per maand en de daarbij behorende groeifactor**

maand	temperatuur	groeifactor
januari	10 °C	0.41
februari	15 °C	0.67
maart	20 °C	0.90
april	25 °C	1.00
mei	25 °C	1.00
juni	25 °C	1.00
juli	25 °C	1.00
augustus	25 °C	1.00
september	25 °C	1.00
oktober	20 °C	0.90
november	15 °C	0.67
december	10 °C	0.41

Opbrengstprij

De opbrengstprij is gebaseerd op het gebruik van de algen biomassa in likstenen voor vee. In de praktijk levert dit €35 per kg droge stof op.

Kapitaalgoederen

Er wordt uitgegaan van een open vijver van 1000 m² met een propeller, een (rook)gasblazer, een pomp voor warmtetoevoer, een pomp van vijver naar coalescer, een coalescer, een centrifuge en de daarbij benodigde infrastructuur.

Landgebruik

De benodigde oppervlakte bij een vijver van 1000m² is ongeveer 1600m².

Watergebruik

Het waterverbruik is berekend aan de hand van de geproduceerde biomassa-hoeveelheid en de hoeveelheid afvalwater. Er is ook rekening gehouden met de plaatselijke neerslag, verdamping en extra verdamping door de extra warmtetoevoer aan de algenvijver.

Afvalwater

Na het centrifugeren ontstaat afvalwater, de hoeveelheid is gebaseerd op de geogste hoeveelheid biomassa en de volgende droge stof gehalten in de verschillende processtappen:

- in de algenvijver : 0,3 kg ds/m³
- na de coalescer : 3 kg ds/m³
- na centrifugeren : 120 kg ds/m³

CO₂ uit rookgassen

Er is uitgegaan van een CO₂ opname efficiëntie van 50% en van:

C in geproduceerde biomassa: 0,541 g/g

CO₂ in rookgas: 7%

Verder is ingeschat dat indien er geen CO₂ wordt toegevoerd de opbrengst met een opbrengstreductiefactor van 0,7 vermenigvuldigd moet worden.

Warmtetoevoer

De hoeveelheid benodigde warmte is berekend door de benodigde warmte voor opwarming van de vijver van de omgevingstemperatuur naar de gewenste temperatuur te berekenen, inclusief extra verdamping als gevolg van verwarming en langgolvlige uitstraling van de vijver met een compensatie voor instraling.

Elektriciteit

Het stroomverbruik is berekend aan de hand van het vermogen en de werkingsduur van de propeller, gasblazer, warmtetoevoer pomp, de pomp naar de coalescer en de centrifuge.

Arbeid

Voor een vijver van 1000 m² wordt ingeschat dat de benodigde laaggeschoolde arbeid 2 uur per dag is en hooggeschoolde arbeid 0,1 uur per dag.

Kosten

Voor de jaarlijkse kosten voor kapitaalgoederen is gerekend met rente (5,5%) en afschrijvings-, onderhouds- en verzekeringskosten afhankelijk van het onderdeel. De overige kosten en de bron worden in onderstaand overzicht weergegeven.

Tabel 4. **Kosten per eenheid en bron van diverse inputfactoren**

inputfactor	kosten	eenheid	bron
land	1,041	€/ha	KWIN-AGV 2012
water	0.878	€/m ³	ACRRES
afvalwater	0.1	€/m ³	ACRRES
elektriciteit	0.107	€/kWh	ACRRES
laaggeschoolde arbeid	11.53	€/uur	KWIN-AGV 2012
hooggeschoolde arbeid	25.57	€/uur	KWIN-AGV 2012

3.2 Economische resultaten

Het bedrijfseconomisch resultaat is volgens deze modelberekening goed. De algen opbrengst is 1.691 kg ds per 1000 m², dat is 16,9 ton droge stof per ha. Bij een omzet van € 59.170 per jaar is het jaarlijkse resultaat € 19.009. Het rendement op de investering is 18 % en de terugverdiendtijd is 5,6 jaar, zie onderstaand overzicht².

² Bij de bedrijfseconomische berekeningen worden bij de kosten ook rente- en afschrijvingskosten meegenomen, bij de Return On Investment en de terugverdiendtijd niet.

Tabel 5. **Economische resultaten van de open algenvijver business case**

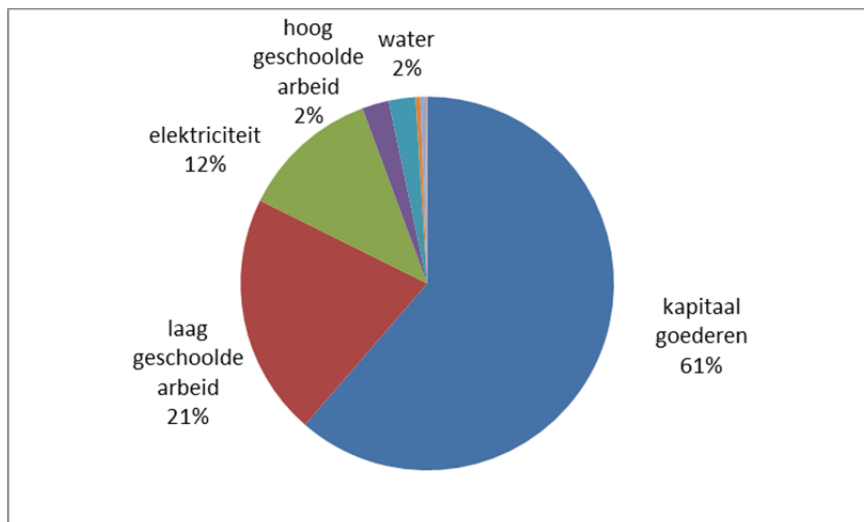
omzet					
algen biomassa	1.691	kg ds	35	€/kg ds	€ 59.170
vaste kosten					
afschrijving					€ 15.747
rente					€ 7.059
onderhoud					€ 671
verzekering					€ 1.167
land	0,16	ha	1.041	€/ha	€ 167
totaal vaste kosten					€ 24.811
variabele kosten					
water	1.056	m ³	0,878	€/m ³	€ 927
afvalwater	579	m ³	0,1	€/m ³	€ 58
kunstmest (N)	157	kg N	1,08	€/kg	€ 170
kunstmest (P)	7	kg P	2,22	€/kg	€ 15
CO ₂	3.530	kg	0	€/kg	€ 0
warmte terugwinning	1.004.933	kWh	0	€/kWh	€ 0
elektriciteit	45.142	kWh	0,107	€/kWh	€ 4.830
laaggeschoolde arbeid	730	hr	11,53	€/hr	€ 8.417
hooggeschoolde arbeid	37	hr	25,57	€/hr	€ 933
totaal variabele kosten					€ 15.350
totaal kosten					€ 40.161
resultaat					€ 19.009
Investing					€ 233,356
Return On Investment					18 %
terugverdientijd					5,6 jaar

Kostprijs

De berekende kostprijs van 1 kg droge stof in de vorm van algenpasta bedraagt € 23,76. Het grootste deel van de kostprijs bestaat uit kosten voor kapitaalgoederen (rente, afschrijving, onderhoud en verzekering). Ook arbeidskosten en stroomkosten bepalen een groot deel van de kostprijs, zie onderstaand overzicht en de figuur.

Tabel 6. **Kostprijs en aandeel in de kostprijs van diverse kostenposten per kilogram algen drogestof**

kostenpost	kostprijs per kg ds	aandeel kostprijs
kapitaalgoederen	€ 14,58	61,4%
laaggeschoolde arbeid	€ 4,98	21,0%
elektriciteit	€ 2,86	12,0%
hooggeschoolde arbeid	€ 0,55	2,3%
water	€ 0,55	2,3%
kunstmest (N)	€ 0,10	0,4%
land	€ 0,10	0,4%
afvalwater	€ 0,03	0,1%
kunstmest (P)	€ 0,01	0,0%
	€ 23,76	100,0%



Figuur 16. **Aandeel in de kostprijs van diverse kostenposten per kilogram algen drogestof**

3.3 Scenario's

Effect EnergieRijk concept

Deze algenvijver business is onderdeel van het EnergieRijk concept. Er wordt gebruik gemaakt van CO₂ en warmte van de warmtekrachtkoppeling bij de biovergister. In Tabel 7 wordt de business case vergeleken met een situatie zonder CO₂ toevoer uit rookgassen en warmteterugwinning.

Tabel 7. **Economische resultaten³ volgens het EnergieRijk concept en zonder CO₂ en warmteterugwinning**

	EnergieRijk	zonder CO₂ en warmtetoever
Opbrengst	1.691 kg ds	667 kg ds
Omzet	€ 59.170	€ 23.661
totaal kosten	€ 40.161	€ 29.938
Resultaat	€ 19.009	-€ 6.577
Kostprijs	€ 23,76	€ 44,85
investering	€ 233.356	€ 179.079
Return On Investment	18 %	6 %
terugverdientijd (jr)	5,6	17,0

Uit Tabel 7 blijkt dat de opbrengst 2,5 keer zo laag is zonder toevoer van warmte en CO₂ van de gasmotor van de covergister. Bij het EnergieRijk concept zijn er geen kosten voor de aangeleverde CO₂ en warmte gerekend, wel moet er bij het EnergieRijk concept worden geïnvesteerd in voorzieningen voor warmte- en rookgastoevoer. Hierdoor zijn de vaste kosten en is het benodigde investeringsbedrag bij het EnergieRijk concept hoger. Het bedrijfseconomisch resultaat is zonder warmte- en CO₂ toevoer negatief. De Return On Investment en de terugverdientijd zijn nog wel redelijk gunstig, omdat dan niet gerekend wordt met rente en afschrijvingskosten van de eigen investering.

SDE subsidie warmteterugwinning

Als er vanwege de warmteterugwinning SDE subsidie ontvangen wordt, kan het resultaat nog verbeterd worden. De SDE subsidie minus correctie in de 1e fase is voor 2012 19,444 – 13,7 = 5,744 €/GJ. Eén GJ is ca. 278 kWh dus dat is 0,02 €/kWh. Als hiervan de helft wordt toegerekend aan de biovergister en de helft aan de algenvijver is dit 1.004.933 kWh maal 0,02 €/kwh is €10.049 voor de algenvijver.

Tabel 8. **Economische resultaten zonder en met SDE subsidie voor warmteterugwinning**

	zonder SDE subsidie	met SDE subsidie
Resultaat	€ 19.009	€ 29.058
Return On Investment	18 %	22 %
terugverdientijd (jr)	5,6	4,5

Verkooprijzen

De economische resultaten zijn goed vanwege de hoge verkoopprijs van €35 per kg ds voor gebruik in likstenen. Gebruikelijke verkoopprijzen per kg ds liggen tussen de 1 en de 10 euro. De resultaten zijn dan negatief.

Tabel 9. **Economische resultaten bij verschillende verkoopprijzen**

verkoopprijs	35 €/kg	10 €/kg	1 €/kg
Resultaat	€ 19.009	-€ 23.255	-€ 38.470
Return On Investment	18 %	negatief	negatief
terugverdientijd (jr)	5,6	n.v.t.	n.v.t.

Opschaling

In het model wordt er vanuit gegaan dat de kosten voor arbeid en voor kapitaalgoederen afnemen bij schaalvergroting. Hierdoor verbeteren de economische resultaten bij grotere vijvers, maar de kostprijs blijft ook bij 1 ha nog vrij hoog met € 5,63 per kg ds.

³ Bij de bedrijfseconomische berekeningen worden bij de kosten ook rente- en afschrijvingskosten meegenomen, bij de Return On Investment en de terugverdientijd niet.

Tabel 10. *Economische resultaten bij verschillende vijvergroottes*

vijvergrootte	1.000m²	2.000m²	5.000m²	10.000m²
resultaat	€ 19.009	€ 72.074	€ 231.272	€ 496,600
kostprijs	€ 23,76	€ 13,68	€ 7,64	€ 5,63
Return On Investment	18 %	41 %	109 %	223 %
terugverdientijd (jr)	5,6	2,5	0,9	0,4

Winterstop

Door de lage instraling in de wintermaanden en de lage temperatuur is de productie laag en kan overwogen worden de productie enige tijd stil te leggen. Uit de modelberekeningen blijkt dat de algenopbrengst dan vanzelfsprekend afneemt, maar dat het economisch aantrekkelijker is om de productie van november tot en met februari stil te leggen.

Tabel 11. *Economische resultaten bij continu productie en bij winterstops*

productie	continu	dec-jan stop	nov-feb stop
Opbrengst	1.691 kg ds	1.666 kg ds	1.598 kg ds
resultaat	€ 19.009	€ 20.473	€ 20.478
kostprijs	€ 23,76	€ 22,71	€ 22,19
Return On Investment	18 %	19 %	19 %
terugverdientijd (jr)	5,6	5,4	5,4

4 Realisatie algenproductiefaciliteiten

Na een intensief engineering-traject, waarbij diverse experts op het gebied van algenkweek betrokken zijn geweest, is in samenwerking met het bedrijf Algae Food & Fuel in maart 2010 gestart met de bouw van algenproductiefaciliteiten op het terrein van ACRRES in Lelystad. Het bedrijf Algae Food & Fuel ontwikkelt, bouwt, verkoopt, installeert en beheert bioreactoren voor algenproductie. In het voorjaar van 2012 is de bouw van de algenfaciliteiten afgerond en is overgegaan tot inbedrijfstelling, sindsdien worden dagelijks algen geoogst. De faciliteiten bestaan uit algenvijvers en fotobioreactoren met LED-verlichting.

4.1 Algenvijvers

Er zijn identieke twee algenvijvers of racewayponds van elk 250 m² en een maximale diepte van 125 cm aangelegd waarin algen worden gekweekt. Eén in de open lucht en één in de kas, zie Foto 2. Beide vijvers zijn voorzien van een systeem waarmee rookgassen uit de nabijgelegen gasmotor van een mestvergister toegediend kunnen worden op basis van de zuurtegraad. Daarnaast kan restwarmte van diezelfde gasmotor gebruikt worden om middels vloerverwarming de temperatuur in de vijvers op peil te houden.



Foto 2. Algenvijver in de open lucht en in de kas

Een propeller op de bodem van de vijver zorgt voor een horizontale menging van de algencultuur, de algencultuur heeft een horizontale stroming van ongeveer 0,1 m/s. Daarnaast wordt door toediening van lucht en rookgasbellen onderin de vijver een verticale menging gecreëerd, samen met de mixer geeft dit een optimale belichting van de algen, zie Foto 2. De algen concentratie in de vijvers bedraagt 0,05-0,2 gram droge stof per liter.

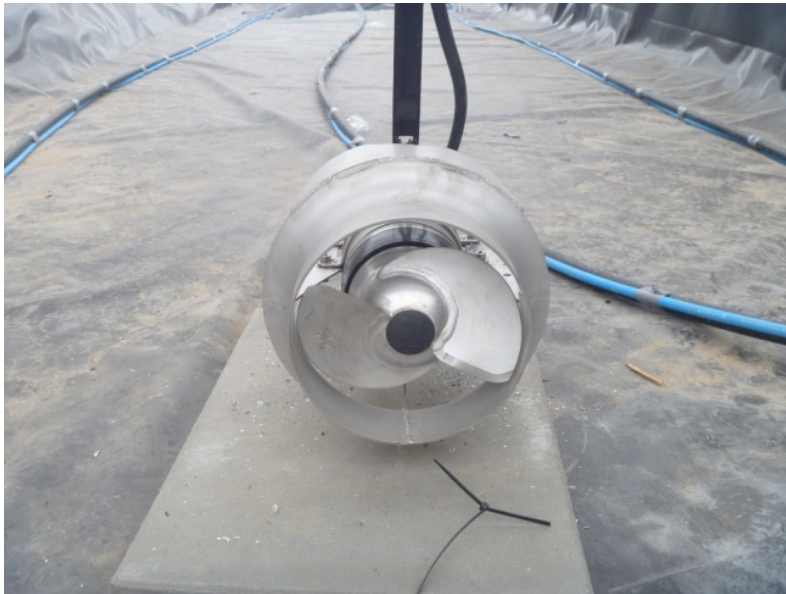


Foto 3. Propeller op bodem vijver, de blauw/zwarte slangen dienen voor rookgasaanvoer

Vanuit de vijver wordt continu algencultuur naar de coalescer gepompt (Foto 3 & 4). In deze coalescers komt de algencultuur in een rustige laminaire stroming waardoor een gedeelte van de algen de kans krijgt om te bezinken. Voor het gebruik van een coalescer als oogstmethode is aan Algae Food & Fuel patent verleend (patent NL 1035956). Het water met daarin de voedingsstoffen en de nog zwevende algen loopt op vrij verval terug naar de algenvijvers.



Foto 4. Overzicht van het oogststelsel. Op een frame staan de coalescers (bovenin de foto) voor de twee algenvijvers, 24 uur per dag stroomt algencultuur door de coalescer en een klein gedeelte van de algen bezinkt. Dagelijks worden de coalescers geoogst waarbij de inhoud van de coalescers terecht komt in het onderstaande kuubsvat (links op de foto). Vandaar wordt de cultuur gecentrifugeerd met behulp van de beide centrifuge (voor op de foto)

Het concentraat dat zich in de coalescer verzameld heeft na 24 uur een droge stofgehalte van ca. 0.1-2 g/l. Eenmaal daags wordt dit concentraat opgevangen en kort gecentrifugeerd, waarna deze algenpasta een droge stofgehalte heeft van ca. 100 - 150 g/l, zie foto 5. Het water uit de centrifuge wordt naar het riool afgevoerd.



Foto 5. **Centrifuge**

De algenpasta wordt na het centrifugeren verzameld in droogbakken en bij 70°C gedroogd voor een langere houdbaarheid.



Foto 6. **Algenpasta na centrifugeren**

4.2 Fotobioreactoren

Naast de productie van algen in de vijvers wordt gekeken naar de productiviteit van fotobioreactoren met LED-verlichting. Deze fotobioreactoren dienen tevens als voorkweekstelsel voor de algenvijvers. Stapsgewijs kan een klein volume algencultuur in de fotobioreactoren worden opgegroeid tot een entcultuur voor de productievijvers. De kleinste fotobioreactor heeft een inhoud van 1000 liter en is mobiel geconstrueerd, de reactor kan overal waar een 400V aansluiting beschikbaar is geplaatst worden. De reactor heeft een verwarmingsmantel waarmee de cultuur op temperatuur gehouden kan worden. In de reactor zit een mixer voor de menging en een 60W LED-lamp die het licht levert voor de fotosynthese. Het meet- en regelsysteem houdt continu de optische dichtheid, temperatuur, geleidbaarheid en zuurtegraad in de gaten. CO₂ wordt betrokken uit gasflessen en toegediend op basis van de zuurtegraad.



Foto 7. **De kleinste fotobioreactor met een inhoud van 1000 liter**

Nadat in de 1000 liter reactor de voorkweek vermeerderd is van labschaal naar 1000 liter wordt in 2 voorkweekbassins een schaalvergroting naar 20 m³ en 60 m³ gerealiseerd. Deze bassins zijn, uitgezonderd de doorsnede, identiek gebouwd; 2,31 m hoog, voorzien van LED-lampen, vloerverwarming, en rookgastoevoer. In de bassins wordt door het meet- en regelsysteem de temperatuur gecontroleerd. Is deze lager dan een ingesteld setpoint dan wordt met restwarmte van de naburige mestvergister de cultuur opgewarmd. Daarnaast wordt als de zuurtegraad oploopt (omdat de algencultuur CO₂ opneemt) rookgas door het bassin geleid om zo CO₂ in het water op te lossen. Verder wordt de dichtheid van de algencultuur continu gemonitord met behulp van een Algaelyzer, is de cultuur voldoende gegroeid dan kan deze naar een groter bassin of in de algenvijvers. De twee voorkweekbassins zijn 20 m³ en 60 m³ en kunnen naast hun functie als voorkweekbassins ook als zelfstandig productiesysteem gebruikt worden voor iets kleinschaliger onderzoek.



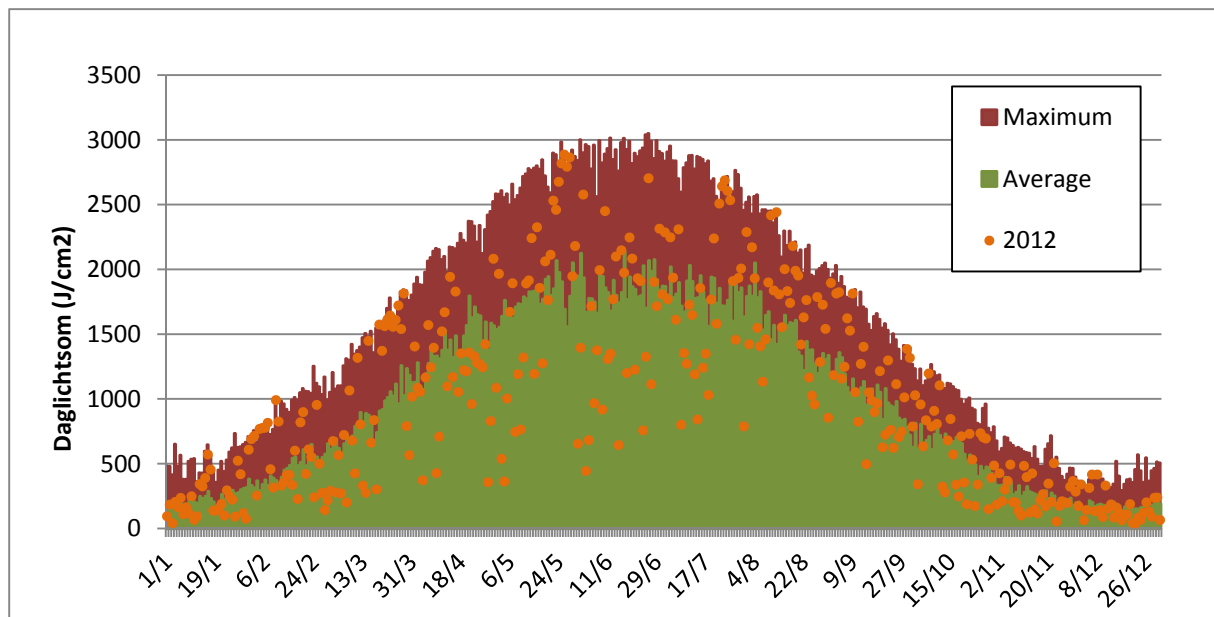
Foto 8. Eén van de twee bassins waar met LED-verlichting nieuwe algencultures worden gecultiveerd

5 Resultaten inbedrijfstelling algenpilot

5.1 Klimaatgegevens Lelystad 2012

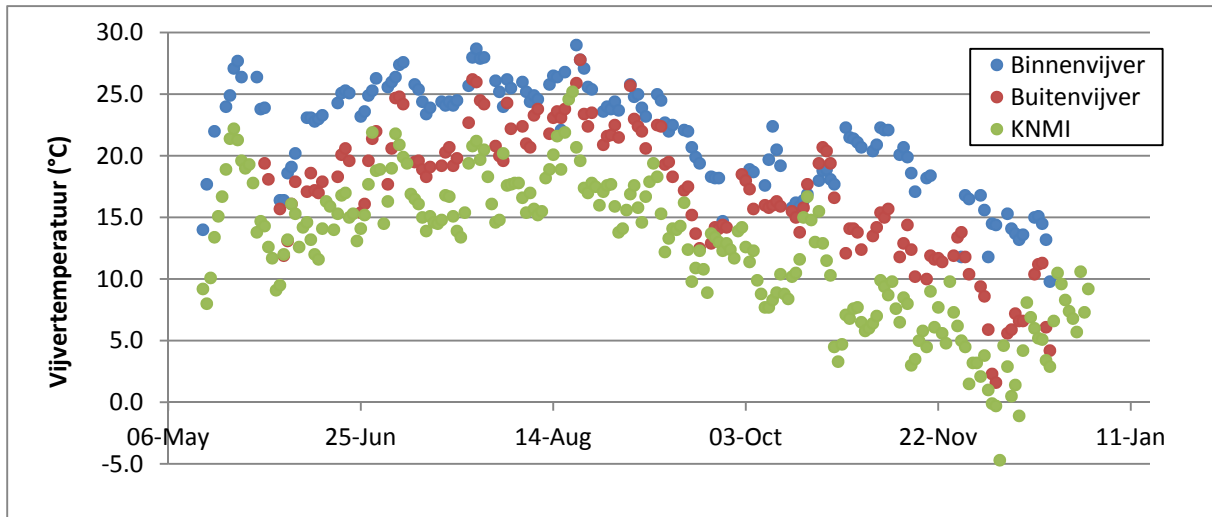
Voor productie van algen is het weer van grote invloed, met name de daglengte en de intensiteit van het zonlicht zijn bepalend [13, 15]. Daarnaast is ook de temperatuur van invloed op de groeisnelheid van algen. Op de algenkas is een klein weerstation geplaatst om de lokale weersomstandigheden te registreren. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de uitgebreide meetgegevens van het nabijgelegen KNMI meetstation Lelystad (<http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html>).

Van de genoemde weersinvloeden is met name daglichtintensiteit sterk variabel waarbij afhankelijk van het seizoen de daglengte en maximale zonkracht de totale hoeveelheid daglicht doen variëren. Deze seizoensgebonden variatie is goed voorspelbaar op basis van langjarige gemiddelden. Daarnaast is er echter ook een sterke invloed van bewolking op de daglichtintensiteit, deze invloed is minder goed voorspelbaar en geeft snelle fluctuaties in de daglichtintensiteit. In Figuur 17 is een overzicht te zien van de daglichtintensiteit gemeten bij het KNMI meetstation in Lelystad in 2012 in vergelijking met de langjarig gemiddelde waarden van hetzelfde meetstation.



Figuur 17. **Daglichtintensiteit in 2012 uitgezet tegen de gemiddelde en de maximale daglichtintensiteit van de periode 1991-2012**

Naast daglichtintensiteit is ook de temperatuur van belang, met name de temperatuur in de algenvijvers. In Figuur 18 is deze data weergegeven, globaal gezien zorgt de bescherming van de algenkas voor ongeveer 5°C hogere temperatuur in de binnenvijver ten opzichte van het daggemiddelde. Daarnaast geeft de verwarming met restwarmte van de WKK zowel binnen als buiten ook een verhoging van 5°C aan het vijverwater. Als de verwarming uitvalt loopt de temperatuur in de vijvers snel terug naar de omgevingstemperatuur, dit is bijvoorbeeld duidelijk terug te zien in de data van de buitenvijver van de maand december toen de warmtevoorziening voor de buitenvoorziening niet naar behoren werkte. Ook is gebleken dat zelfs in de zomermaanden nog gebruik gemaakt kan worden van de mogelijkheid om de vijvers te verwarmen, enkel in de binnenvijver wordt het setpoint van 25°C gedurende langere periodes gehaald.



Figuur 18. De temperatuur in de vijvers vergeleken met de gemiddelde dagtemperatuur

5.2 Rookgastoevoer

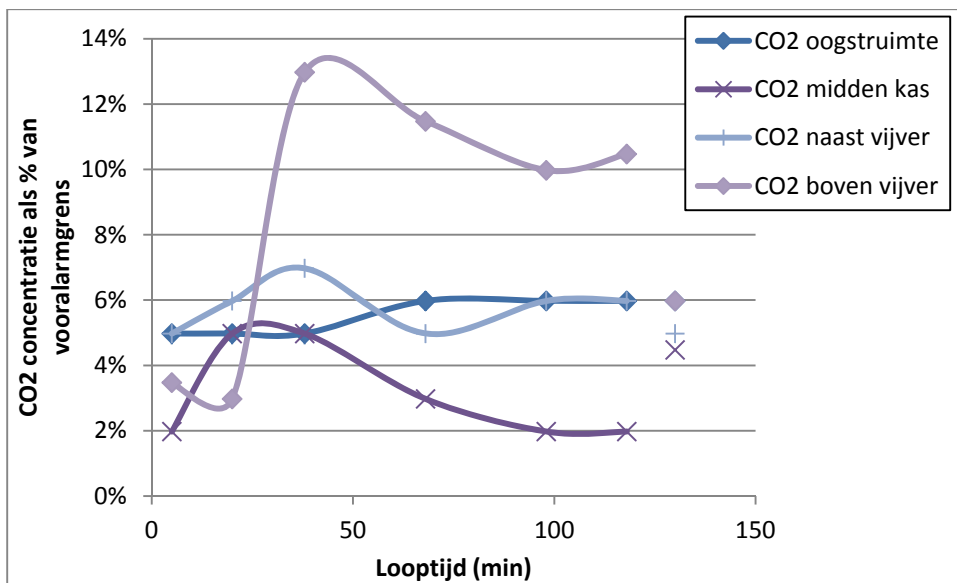
Om de groei van algen te stimuleren is gepland rookgassen toe te dienen aan de algencultures. Door toevoeging van rookgassen wordt namelijk de CO_2 concentratie in de vijvers verhoogd, en een lage CO_2 concentratie is over het algemeen de limiterende factor bij algenteelt in open vijvers. Dit plan roept echter vragen op over de veiligheid; immers, rookgassen bevatten toxische en schadelijke componenten. Afhankelijk van de aanwezige concentraties van deze componenten in het rookgas, de mate waarin rookgas wordt verdund bij toediening, en de mate waarin toxische componenten worden opgenomen of omgezet in een algencultuur, kan toediening in een gesloten omgeving kunnen leiden tot een onveilige werkomgeving. Omdat zowel de samenstelling van het rookgas, de mengverhouding rookgas / buitenlucht, en de mate van opname in de algencultuur niet voldoende kunnen worden ingeschat wordt de luchtkwaliteit in de algencas bewaakt middels gasdetectieapparatuur die de rookgastoevoer afsluit als de concentratie in de kas boven een grenswaarde komt. Aanvullend op deze beveiliging is in 2012 tijdens een aantal test gekeken hoe groot de kans is op het ontstaan van onveilige situaties.

Tabel 12. **De samenstelling van rookgas in vergelijking met de grenswaarden voor een veilige werkomgeving.** *1) geen gevalideerde meetmethode beschikbaar *2) geen grenswaarde aangegeven *3) niet gemeten

Component	Concentratie	SER-grenswaarde
O ₂	7,4%	- *2
CO ₂	7,6%	0,5%
CO	475 mg/m ³	29 mg/m ³
NO	268 mg/m ³	0.25 mg/m ³ *1
NO ₂	92 mg/m ³	0.40 mg/m ³ *1
NO _x	502 mg/m ³	- *2
H ₂ S	- *3	2,3 mg/m ³

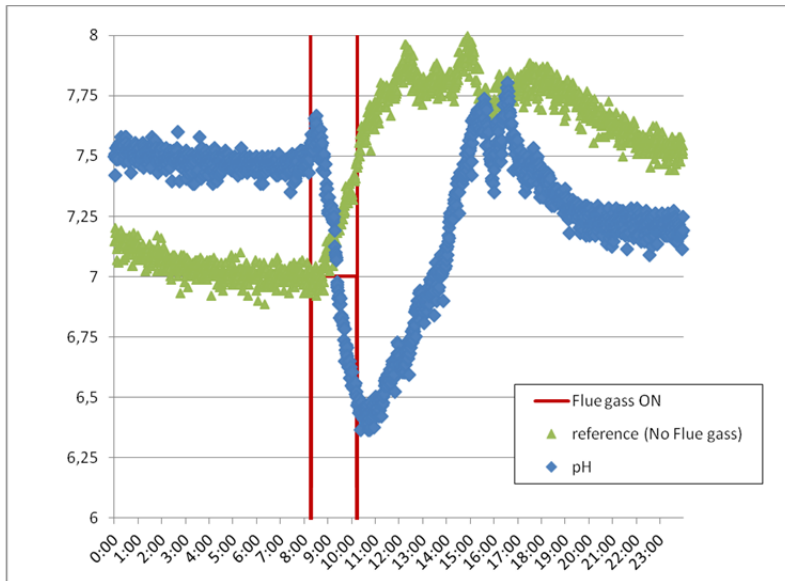
Een eerste test werd uitgevoerd om de werking van het systeem te testen. De rookgastoevoer werd handmatig aangezet op maximale stand voor een periode van 2 uur. Bij deze eerste test was ruime ventilatie aanwezig; ramen en deuren stonden open.

Gedurende de rookgastoediening was een lichte stijging van het CO₂ gehalte vlak boven de algenvijver waarneembaar. Ook de sensoren vlak naast de vijver en in het midden van de kweekruime detecteerden kortstondig een lichte stijging van het CO₂ gehalte. De overige sensoren geven gedurende de proef geen gestegen waarden (alle CO en H₂S sensoren en de CO₂ sensor in de oogstroomte).



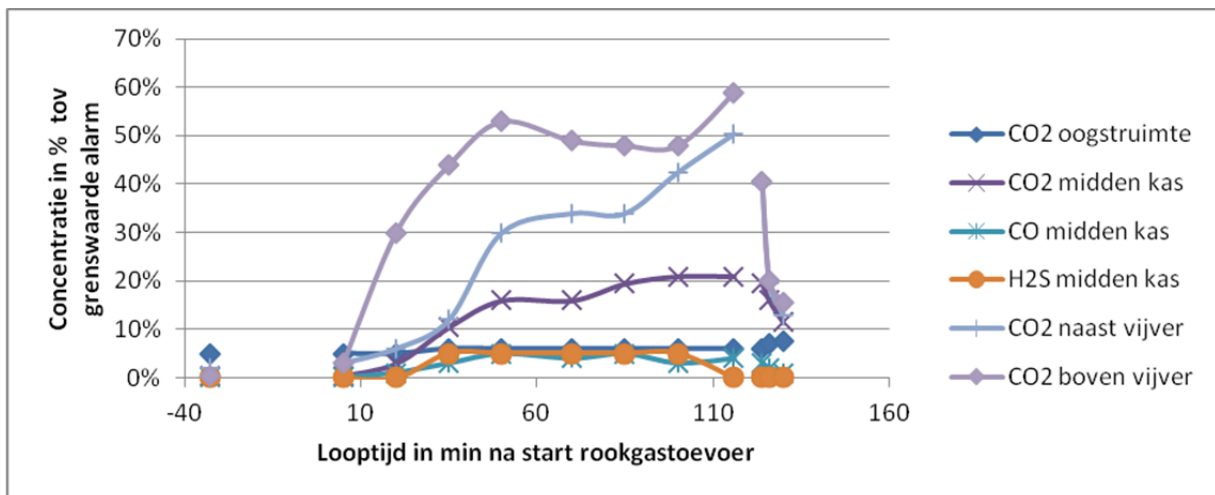
Figuur 19. **Gemeten CO₂ concentratie op verschillende punten in de kas**

Ook is gekeken naar het effect van de rookgastoediening op de algencultuur. In theorie lost CO_2 uit de rookgassen op in het water waardoor er een pH daling plaatsvindt, opname door algen leidt vervolgens tot een verlaagde CO_2 concentratie in het water met de bijbehorende pH stijging tot gevolg. In de toekomst moet de rookgastoevoer geregeld worden door middel van een pH setpoint; als de pH boven dit setpoint komt wordt dan de rookgastoevoer geopend. Het effect van rookgastoediening op de pH in de algencultuur bleek duidelijk tijdens de eerste test, na openen van de rookgastoevoer duikt de pH omlaag (Figuur 20). Omdat algen de CO_2 vervolgens gebruiken voor fotosynthese loopt de pH na het stoppen van de rookgastoediening ook weer terug op. Ter vergelijking is ook een referentiedag zonder rookgastoediening aan de grafiek toegevoegd, daar is duidelijk te zien dat tijdens de daglichtperiode de pH oploopt omdat CO_2 wordt opgenomen door de algen.



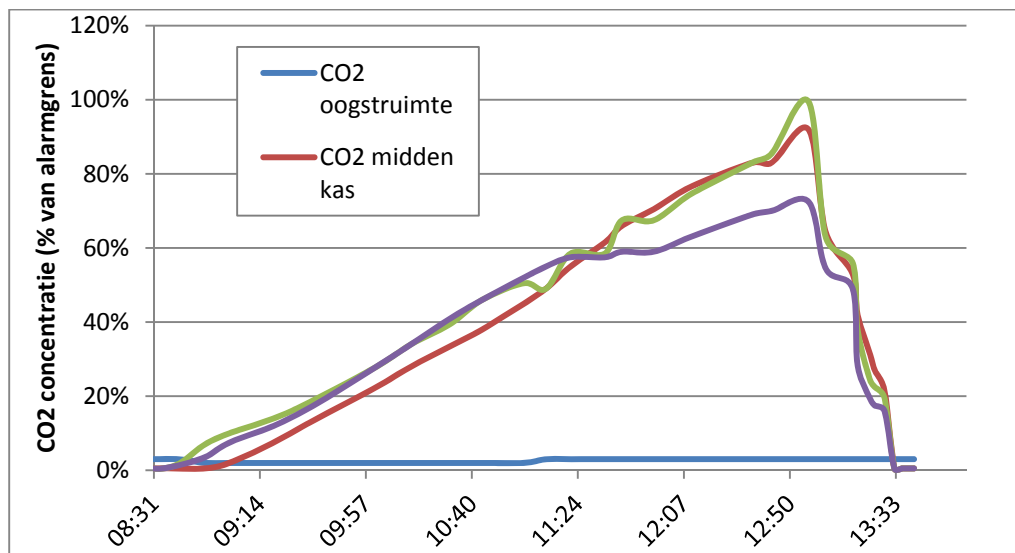
Figuur 20. Invloed van rookgastoediening op de zuurtegraad van de algencultuur door opname van CO_2 in het water vergeleken met een dag zonder rookgastoediening

Ook tijdens een tweede proef werd de rookgastoevoer maximaal geopend, maar ditmaal werd de ventilatie in de kas geminimaliseerd door ramen en deuren gesloten te houden als simulatie van een koude dag waarop de ventilatie minimaal is. Dit keer is er direct een stijgende concentratie CO_2 gemeten direct boven het vijveroppervlak, welke na 50 minuten een plateauwaarde van circa 2000 ppm bereikte (ofwel 50% van de alarm grenswaarde). Een laatste waarneming vlak voor de 120 minuten deadline valt nog iets hoger uit maar lijkt een uitschieter. Ook de CO_2 sensor vlak naast de vijver detecteerde al snel een stijgende concentratie, hoewel langzamer bereikt ook deze sensor uiteindelijk 2000 ppm. De CO_2 sensor midden in de kast detecteerde ook een stijgende concentratie, hier is na 120 minuten nog altijd een duidelijk stijgende lijn te zien in de CO_2 gehalten die op dat moment ongeveer 800 ppm bereiken. Als enige locatie wordt hier ook een stijging in gehalten aan CO en H_2S gedetecteerd, deze komen echter niet in de buurt van een alarm grenswaarde. Na 120 minuten is de rookgasaanvoer stopgezet en zijn de ramen van de kweekruimte geopend om te ventileren. Geholpen door een licht briesje werd hiermee de concentratie CO_2 in de kweekruimte binnen 10 minuten sterk teruggebracht naar concentraties net boven gehalten in de buitenlucht.



Figuur 21. **Gemeten concentratie van schadelijke stoffen uit rookgas van diverse meetpunten in de kas. De concentratie is weergegeven als percentage van de alarmgrenswaarde**

Als derde test werd een simulatie van leidingbreuk in de kas/kweekruimte uitgevoerd door de rookgassen via niet in gebruik zijnde leidingen direct de algenkas in te laten stromen, waarbij ramen en deuren gesloten blijven. In de grafiek is terug te vinden dat dit tot een lineair oplopende concentratie aan CO₂ in de kweekruimte leidt, waardoor na circa 5 uur rookgastoevoering de grenswaarde wordt bereikt en het CO₂ alarm ingrijpt en de rookgastoevoer afsluit. Deze afsluiting is direct zichtbaar in een sterke afname van de gemeten concentraties CO₂ naar circa 50% van de alarmgrens binnen 5 minuten. Dit overigens bij nog altijd gesloten ventilatieramen. Na het openen van de ramen om loopt de gemeten concentratie snel verder terug.



Figuur 22. **Gemeten CO₂ concentratie op verscheidene plaatsen in de kas tijdens een gesimuleerde leidingbreuk. Nadat de alarmgrenswaarde bereikt is schakelt automatisch de rookgasaanvoer uit en loopt de CO₂ concentratie snel terug**

Uiteraard zijn bij deze proef ook de concentraties H₂S en CO op de verschillende locaties bijgehouden, deze werden slechts op 1 locatie gemeten en bleven daar met maxima van respectievelijk 3 ppm en 13 ppm ruim beneden de alarmgrenswaarden.

Uitgaande van deze testresultaten is bij normaal functioneren geen alarmerende concentratie aan CO₂, CO, of H₂S te verwachten, en dat waarschijnlijk zelfs bij langdurig open blijven van de rookgastoevoer naar de

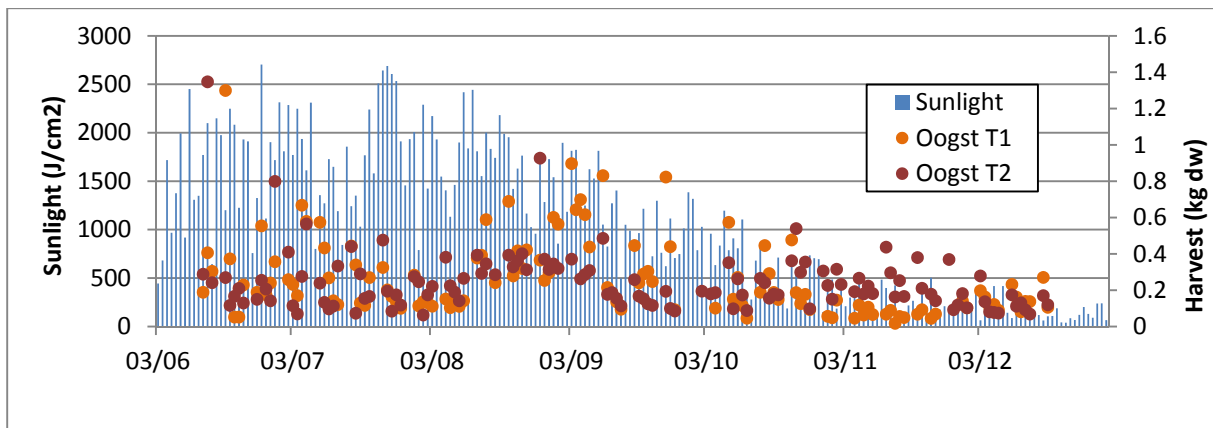
vijver de concentraties CO₂, CO en H₂S in de kweekruimte binnen de gestelde grenswaardes zullen blijven. Als de concentraties toch verder oplopen, bijvoorbeeld in het geval van een breuk in of lekkage uit de rookgasleiding, dan duurt het meerdere uren voordat de concentratie in de kas gevaarlijk wordt en is CO₂ de eerste component die een alarm af zal doen gaan. Nadat het alarm de rookgastoevoer afsluit nemen de concentraties in de kas weer snel af.

5.3 Algenteelt

Tijdens de inbedrijfstelling is de productiviteit van de algenvijvers gevolgd (Figuur 23). Hoewel in 2012 nog niet volgens ontwerp rookgas kon worden toegediend is wel een solide dataset ontstaan waarmee volgend jaar de invloed van rookgastoediening op de productiviteit kan worden. In totaal is in 2012 32,2 kg biomassa geoogst uit de binnenvijver en 30,1 kg uit de buitenvijver. Aangezien deze oogst plaatsvond in de 2^e helft van het jaar is de omrekening naar jaarproductie eenvoudig te maken; ongeveer 60 kg droge stof per vijver per jaar. Voor vergelijking met andere vijvers en landbouwgewassen wordt meestal gerekend in Ton_{ds}/Ha/jaar; de 60kg is geproduceerd in een vijver van 250m² oppervlak, omgerekend zo'n 3 Ton_{ds}/Ha/jaar. Willen we vergelijken met andere algenkweeksystemen dan wordt over het algemeen gekeken naar de efficiëntie waarin lichtenergie wordt omgezet naar algenbiomassa; bij een geschatte calorische waarde van 22 kJ/g is de omzetting in de vijvers over de 2^e helft van 2012 laag met 0,18%. Ter herinnering; deze getallen zijn verzameld tijdens de inbedrijfstelling, ten tijden werd geen of slechts beperkt rookgas toegediend. Een laag CO₂ gehalte in de vijvers is hiervan het gevolg met als resultaat een lage productie van algen. De getallen zijn dan ook niet representabel voor de productiviteit van het systeem. In 2013 wordt de productiviteit getest met rookgastoediening en zal een vergelijking tussen de productievijvers en andere productiesystemen mogelijk worden, de verwachting is dat de productiviteit in de vijvers te vergelijken is met een standaard open vijver van het type racewaypond. Daarbij wordt uitgegaan van een omzettingsefficiëntie van zonlicht naar biomassa van 1,5%, ofwel bij Nederlands klimaat een opbrengst van ongeveer 25 Ton_{ds}/Ha/jaar.

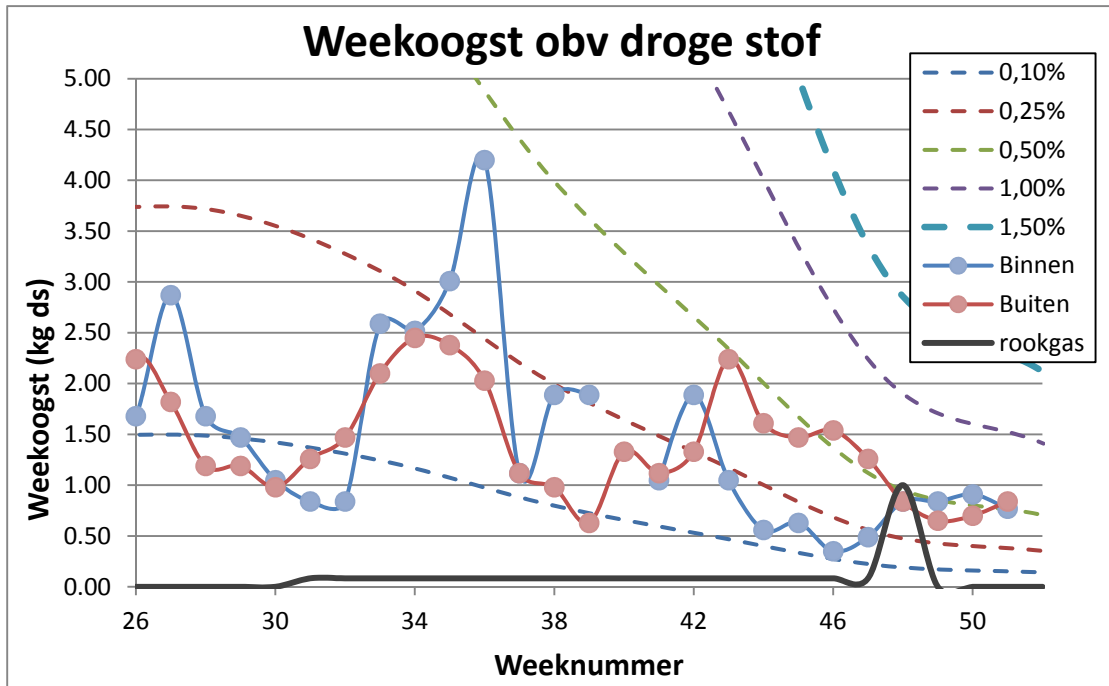
Tabel 13. **Omrekening van omzetting energie in procenten naar de opbrengst in drooggewicht per vijver en de opbrengst per hectare per jaar**

	0,5%	1%	1,5%	2%
Opbrengst per vijver per jaar (kg ds)	209	419	628	837
Opbrengst per hectare per jaar (Ton ds)	8,4	16,8	25,1	33,5



Figuur 23. **De gewogen oogst in kilogram droge biomassa uit de binnenvijver (T1) en de buitenvijver (T2) is uitgezet op de rechteras. Op de achtergrond is de gemeten daglichtintensiteit (bron KNMI meetstation Lelystad) weergegeven**

Zo is de oogst van week 26 tot en met week 30 behaald zonder toevoeging van rookgas. Wel zijn de vijvers belucht met buitenlucht. Van week 31 tot en met week 48 is getest met de toevoer van rookgas. In deze periode is (naast de uitgebreide rookgastests beschreven in hoofdstuk 5.2) op werkdagen handmatig rookgas toegevoerd voor een periode van 2 uur per dag. Na de testperiode is de continue rookgastoevoer op basis van pH sturing opgestart. Omdat echter vrij snel technische problemen ontstonden heeft deze rookgastoevoer alleen in week 49 gefunctioneerd, in de weken 50 tot en met 52 heeft de rookgastoevoer helemaal uitgestaan.



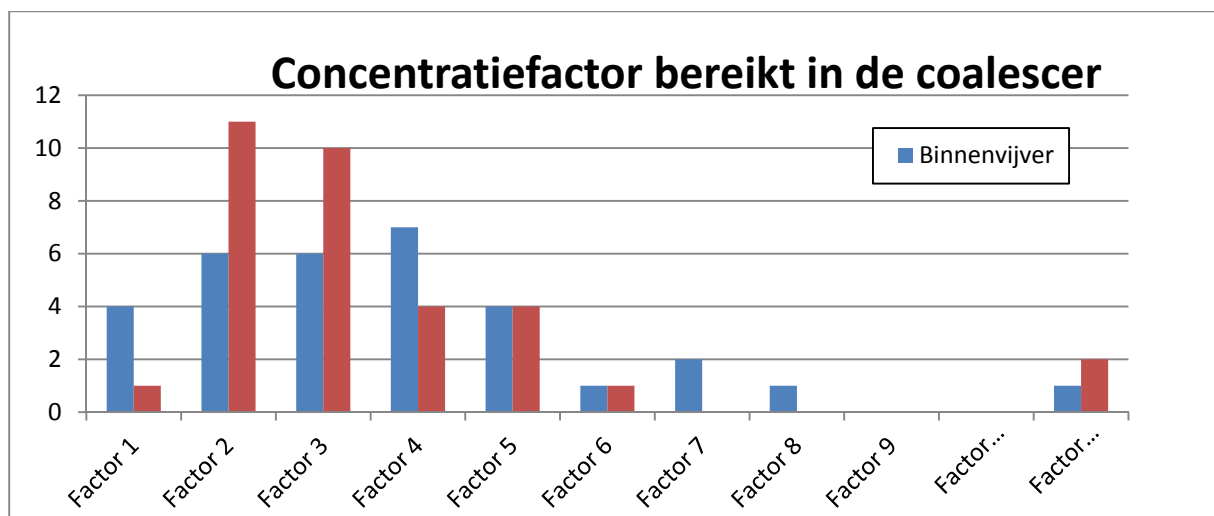
Figuur 24. De productiviteit van de algenvijvers in Lelystad in weekopbrengst aan kilogram droge stof biomassa, vergeleken met de theoretische productiviteit op basis van procentuele omzetting van zonneenergie in biomassa (gestippelde lijnen). In de grafiek is ook de rookgastoever verwerkt

In Figuur 24 is de behaalde oogst weergegeven als weektotaal in kilogram droge stof, hierbij is de daadwerkelijke oogst van de dagen dinsdag tot en met donderdag omgerekend naar een situatie waar 7 dagen per week wordt geoogst. Ter vergelijking is bovendien de gemiddelde daglichtopbrengst in Lelystad uit dezelfde periode omgerekend naar kilogram droge stof algenuitbrengst op basis van een procentuele omzetting. Uit de literatuur is bekend dat in standaard algenvijvers een omzetting van 1,5% behaald kan worden, met deze waarde is ook in het algemodell gerekend (zie hoofdstuk 3). In de grafiek is terug te vinden dat van week 26 tot 30 ongeveer 0,1% van de energie uit het zonlicht wordt omgezet in geoogste biomassa, dit is in een periode zonder rookgastoediening. In de langere periode met rookgastoediening voor 2 uur per dag wordt grofweg een omzetting van 0.25% ten opzichte van de gemiddelde daglichtintensiteit bereikt. Echter, er is ook duidelijk een toename van de omzettingsefficiëntie te zien in deze periode. Dit is niet het gevolg van een grotere hoeveelheid geoogste biomassa, maar van een afname van de daglichtintensiteit. Een deel van de toegenomen efficiëntie is waarschijnlijk het gevolg van een traagheid in het systeem, de oogst volgt niet direct de daglichtintensiteit maar neemt pas enige tijd later af. Daarnaast zijn de algen bij een lagere daglichtintensiteit mogelijk beter in staat om de energie om te zetten in biomassa.

5.4 Oogstefficiency van de coalescer

Behaalde concentratiefactor

Bij de ACRRES pilot is ook gekeken naar de concentratiefactor die in de coalescer bereikt wordt, hiervoor zijn de oogstgegevens van de periode juni tot december 2012 gebruikt. De geoogste hoeveelheid droge stof is hiertoe vergeleken met de dichtheid van de algencultuur in de vijver. De gegevens zijn uitgerekend voor die dagen dat alle benodigde data beschikbaar is, in Figuur 25. Vanuit de gemeten oogsthoeveelheden uit de 2e helft van 2012 en de dichtheid van de vijversop dat moment is gekeken met welke factor de coalescer de algencultuur die dag heeft geconcentreerd. In de grafiek zijn de dagen ingedeeld naar concentratiefactor zijn de resultaten samengevat. Over het algemeen wordt in de coalescer de algencultuur met een factor 2-5 ingedikt.



Figuur 25. Vanuit de gemeten oogsthoeveelheden uit de 2^e helft van 2012 en de dichtheid van de vijversop dat moment is gekeken met welke factor de coalescer de algencultuur die dag heeft geconcentreerd. In de grafiek zijn de dagen ingedeeld naar concentratiefactor en is het aantal keer dat deze categorie voorkwam weergegeven op de Y-as

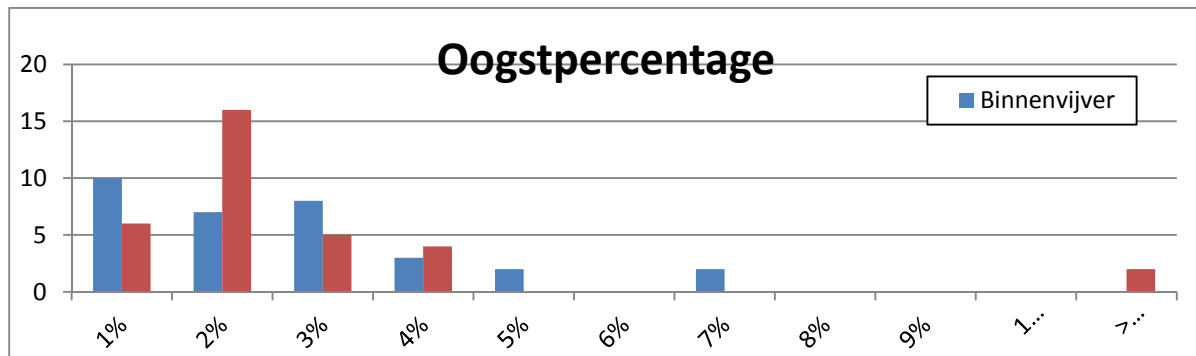
Percentage uitgevlokte algen

Naast de geoogste algenslurry zijn ook monsters genomen van de ingaande en uitgaande algencultuur, vlak voor en vlak na de coalescer. Met behulp van deze monsters is het theoretisch mogelijk om de efficiency van flocculatie te bepalen; de hoeveelheid neergeslagen algen als fractie van de totale hoeveelheid algen die door de coalescer is gegaan. In de praktijk bleek die bepaling niet mogelijk, omdat de meetfouten bij de analyse groter zijn dan het verschil in dichtheid tussen de ingaande en uitgaande stroom.

Vervolgens is getracht om middels een berekening een extra indicatie te krijgen van dit percentage. Hiervoor is gebruik gemaakt van oogstgegevens uit de ACRRES pilot opstelling van de periode juni tot december 2012. Het geoogste percentage algen is berekend als percentage van de totale hoeveelheid biomassa die in de oogstperiode door de coalescer is gestroomd met behulp van onderstaande formule.

$$Oogst\% = \frac{Oogst}{Totale\ biomassa} = \frac{Oogst\ (kg)}{Celdichtheid\ algencultuur\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) * Debiet\ \left(\frac{m^3}{h}\right) * Tijd\ (h)}$$

In Figuur 26 is een overzicht te vinden van de resultaten onderverdeeld naar vijver en in categorieën van efficiency. Zo is bijvoorbeeld heeft de oogst van de binnenvijver 9 keer een oogstefficiëncy van 1 tot 2% gehad. In de grafiek is duidelijk terug te zien dat in de coalescer 0-5% van de aangevoerde algen bezinkt.



Figuur 26. Per oogstmoment van 2012 is berekend percentage van de algen dat uitgevlokt is in de coalescer, vervolgens is een onderverdeling gemaakt in categorieën naar percentage uitgevlokte algen. In de grafiek is op de Y-as te zien hoe vaak een oogstmoment binnen elke categorie viel

Energiebesparing door gebruik te maken van een coalescer

Algenoogst met een coalescer heeft als grootste nadeel dat de hoeveelheid geoogste algen nauwelijks meer gestuurd kan worden, deze wordt namelijk afhankelijk van het de onvoorspelbare natuurlijke neiging tot flocculatie van de algencultuur. Natuurlijke flocculatie is van een hoop factoren afhankelijk, zoals bijvoorbeeld: de algensoort, de dichtheid van de algencultuur, de omgevingstemperatuur, licht, en zuurtegraad. Het belangrijkste argument voor de keuze van flocculatie in een coalescer als oogstmethode is dat deze methode energiezuiniger wordt ingeschat dan andere methodes. Bij nagaan blijkt in de afgelopen periode niet altijd het geval.

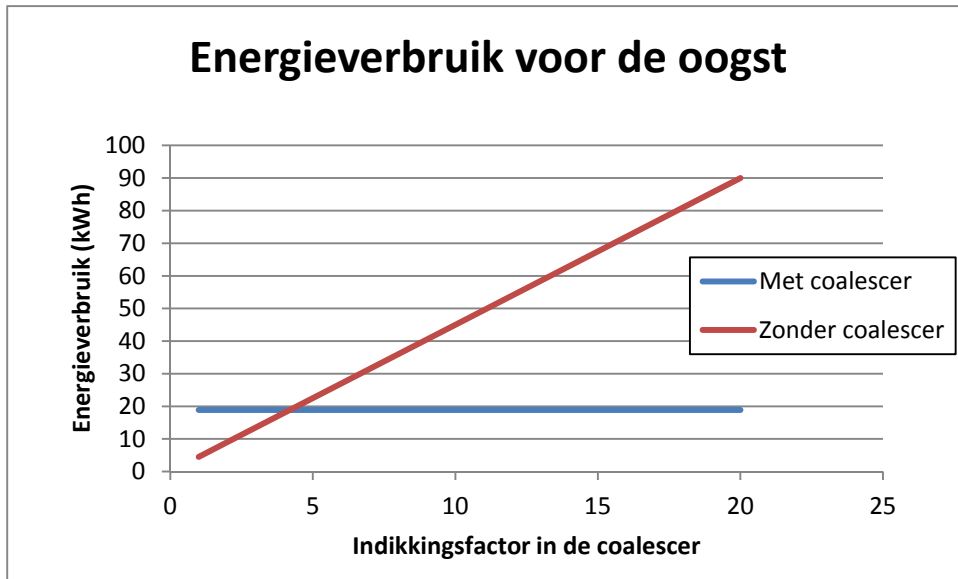
Met coalescer:

De pomp heeft een verbruik van 0,6 kW en draait 24 uur per dag. Voor een indikkingfactor van 2 à 5 keer is dus een energie input van 14,4 kWh nodig. De 1000 liter ingedikte slurry kan vervolgens in 1,5 uur verwerkt worden door de centrifuge, daarbij wordt 4,5 kWh aan elektriciteit gebruikt. Het totale verbruik komt daarmee op 18,9 kWh.

Zonder coalescer:

Om dezelfde hoeveelheid algen te oogsten zonder vooraf in de coalescer te verdikken zal een 2 tot 5 keer groter volume gecentrifugeerd moeten worden. Dit zou betekenen dat de centrifuge 2 tot 5 keer langer in gebruik is, daarmee komt het totaal verbruik op 3 tot 7,5 uur keer 3 kWh = 9 tot 22,5 kWh.

In de onderstaande grafiek zijn is de benodigde energie berekend afhankelijk van de indikkingsfactor in de centrifuge, vanaf een factor 4 indikking is het gebruik van de coalescer energetisch voordeliger.



Figuur 27. Berekend energieverbruik bij oogst met en zonder coalescer als functie van de indikkingsfactor die in de coalescer behaald wordt

Dat de coalescer in de afgelopen periode geen energetisch voordeel heeft opgeleverd komt mogelijk omdat de productie van algen lager is geweest dan waarvoor de oogstinstallatie is ontworpen. Uitgaande van een gelijke hoeveelheid algengroei en algenoogst zorgt de lagere productie, veroorzaakt door het niet of beperkt toevoegen van CO₂, immers voor een kleinere oogst. In de toekomst zal de CO₂ toediening verhoogd worden waardoor naar verwachting de oogst zal stijgen, waarschijnlijk stijgt de oogst sterker dan de dichtheid van de algencultuur en neemt daarmee de efficiency van de coalescer toe.

6 Referenties

1. Fallowfield, H.J. and M.K. Garrett, *The photosynthetic treatment of pig slurry in temperate climate conditions - a pilot-plant study*. Agricultural Wastes, 1985. **12**(2): p. 111-136.
2. Mulbry, W., et al., *Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers*. Bioresource Technology, 2008. **99**(17): p. 8137-8142.
3. Wang, L., et al., *Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp.* Bioresource Technology, 2010. **101**(8): p. 2623-2628.
4. Ono, E. and J.L. Cuello. *Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration in SECOND ANNUAL CONFERENCE ON Carbon Sequestration*. 2003. Alexandria, VA, USA.
5. Weissman, J.C., R.P. Goebel, and J.R. Benemann, *Photobioreactor design: Mixing, carbon utilization, and oxygen accumulation*. Biotechnology and Bioengineering, 1988. **31**(4): p. 336-344.
6. Chisti, Y., *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances, 2007. **25**(3): p. 294-306.
7. Andersen, R.A., *Algal Culturing Techniques* 2005: Academic Press.
8. Olaizola, M., E. Duerr, and D. Freeman, *Effect of CO₂ enhancement in an outdoor algal production system using *Tetraselmis**. 1991. **3**(4): p. 363-366.
9. Chinnasamy, S., et al., *Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO₂ and Temperature*. International Journal of Molecular Sciences, 2009. **10**(2): p. 518-532.
10. Lefebvre, S., et al., *Outdoor phytoplankton continuous culture in a marine fish-phytoplankton-bivalve integrated system: combined effects of dilution rate and ambient conditions on growth rate, biomass and nutrient cycling*. Aquaculture, 2004. **240**(1-4): p. 211-231.
11. Kamermans, P., et al., *Zeeuwse Tong Deelproject 8: Binnendijkse schelpdierkweek*, 2009, Imares.
12. Liang, Y., N. Sarkany, and Y. Cui, *Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions*. Biotechnology letters, 2009. **31**(7): p. 1043-1049.
13. Norsker, N.H., et al., *Microalgal production - A close look at the economics*. Biotechnology Advances, 2011. **29**(1): p. 24-27.
14. Vertregt, N. and F.W.T. Penning de Vries, *A rapid method for determining the efficiency of biosynthesis of plant biomass*. Journal of Theoretical Biology, 1987. **128**(1): p. 109-119.
15. James, S.C. and V. Boriah, *Modeling algae growth in an open-channel raceway*. J Comput Biol, 2010. **17**(7): p. 895-906.

