

Proefonderzoek Algenfarming

Terugwinnen van stikstof en fosfaat als grondstof uit afvalwater



Proefonderzoek Algenfarming

Terugwinnen van stikstof en fosfaat als grondstof uit afvalwater

Dit project is mede mogelijk gemaakt met financiële ondersteuning van:

- **provincie Gelderland**
- **Waterschap Rijn en IJssel**
- **Agentschap NL**

Tekst:

- Bart Verberkt (Waterstromen b.v.)

Waterstromen BV
Postbus 8
7240 AA Lochem
(0573) 29 85 51
info@waterstromen.nl
www.waterstromen.nl

Ingrepro Renewables BV
Heure 6b
7271 PA Borculo
(0545) 27 59 46
info@ingrepro.nl
www.ingrepro.nl

Samenvatting

Afvalwater is een goede voedingsbodem voor het kweken van algen. Afhankelijk van welke algen er worden gekweekt, zijn deze geschikt als grondstof voor medicijnen, voedingsmiddelen, diervoer, bioplastics, harsen, oliën en biodiesel. Dat blijkt uit een grootschalige proef door Waterstromen, Ingrepo Renewables en ingenieursbureau Witteveen & Bos.

Tijdens het proefonderzoek is onderzocht of er algen gekweekt kunnen worden uit afvalwater, en wat de maximale productie is. Uit het onderzoek blijkt de productie technisch zeer goed mogelijk, maar economisch op dit moment niet rendabel. De kostprijs van het hoogwaardige veevoer kan (nog) niet concurreren met die van traditionele producten als bijvoorbeeld snijmaïs.

In een eerste fase is door middel van laboratoriumproeven vastgesteld dat er algen gekweekt kunnen worden op afvalwater van een aardappelverwerker. Normaliter wordt dit afvalwater volledig in een waterzuiveringsinstallatie gezuiverd. Dit afvalwater bevat echter waardevolle nutriënten waar dan niets mee gedaan wordt. In de nieuwe opstelling worden deze nutriënten niet als afval behandeld, maar als grondstof ingezet voor algenfarming, waarna het water ook van deze stoffen is gezuiverd.

De labtesten gaven een grote potentie aan voor deze manier van algenfarming.

Na die labtesten zijn daarom niet ver van aardappelverwerker Aviko, in Olburgen, drie proefvijvers aangelegd met een gezamenlijk oppervlak van 1.000 m². Hiermee werd voldoende schaalgrootte gecreëerd om onder realistische praktijkomstandigheden te kunnen werken.

Uit de proef op deze grotere schaal blijkt het succes van veel factoren afhankelijk. Het gaat dan om lichtinbreng, nutriëntenaanbod, CO₂ dosering, overkapping, temperatuur en menging. Tijdens het algenonderzoek is gezocht naar het optimale “voedingsmenu” in combinatie met bijbehorende procesinstellingen, waarbij de algenproductie optimaal is. Hiervoor zijn verschillende onderzoeken verricht, waarbij de omstandigheden/factoren per vijver verschilden.

Uit dit praktijkonderzoek zijn de volgende resultaten naar boven gekomen:

- De algenproductie kan worden verhoogd door de vijver te overkappen in de wintermaanden. In de zomermaanden heeft dat een negatief effect op de algengroei. Voor een demontabele overkapping wegen de kosten niet op tegen de extra productie, zodat dit op dit moment niet rendabel is.
- Een verhoogde mengsnelheid van het water leidt tot een hogere algenproductie. De extra menging zorgt voor een homogenere verdeling van de algen in de vijver, waardoor de hoeveelheid zonlicht beter wordt verdeeld. Deze ingreep is wel rendabel.
- CO₂ dosering gaf tegenstrijdige resultaten. Uit nader onderzoek blijkt dat in het afvalwater van een aardappelverwerker veel bicarbonaat aanwezig is. Algen kunnen naast CO₂ ook bicarbonaat gebruiken als koolstofbron. CO₂ dosering is niet de beperkende factor te voor een optimale algengroei.
- De algenvijvers dienen permanent gefilterd te worden, om te voorkomen dat predatoren, zoals raderdiertjes en watervlooien, de algenvijver ‘leegeten’. Zonder filtratie kan dit binnen een paar dagen gebeurd zijn.

Het onderzoek heeft veel inzicht in optimaliseringsfactoren voor algenfarming opgeleverd. De jaarlijkse algengroei die bereikt is, op deze schaal, is 18,3 ton droge stof per hectare.

Naast beïnvloedingsfactoren voor optimalisering is ook gekeken naar de economische haalbaarheid anno 2012. Als algen ingezet worden als veevoer blijken de productiekosten van soja en snijmaïs op dit moment lager dan

die van veevoeder op basis van algen. Daardoor is op korte termijn niet te verwachten dat er voldoende afzetmarkt gevonden kan worden voor bulkhoeveelheden. Er moet actief gezocht gaan worden naar andere toepassingen.

Algenfarming is een duurzame manier om afvalwaterstromen die stikstof en fosfaat bevatten op te waarderen naar waardevolle producten met een economische waarde. Algen hebben naast stikstof en fosfaat ook een koolstofbron nodig om te groeien. Hiervoor halen ze voornamelijk CO₂ uit de lucht wat het gehele proces CO₂ neutraal maakt.

Op langere termijn is te verwachten dat algenfarming economisch haalbaar en lucratief kan worden. Dit is echter afhankelijk van verschillende factoren zoals bijvoorbeeld de ontwikkeling van de kostprijs van snijmaïs en soja, de bereidheid om duurzame biomassa te kweken tegen een hogere kostprijs dan gebruikelijk en alternatieve algenafzet in nichemarkten tegen een hogere opbrengst. Het gaat dan om de productie van algen ten behoeve van bijvoorbeeld medicijnen, voor de voedingsmiddelenindustrie, maar wellicht ook bioplastics, harsen, oliën en biodiesel.

Dit proefonderzoek naar algenfarming heeft technische en technologische verbeteringen opgeleverd waardoor algen efficiënter gekweekt kunnen worden. Om algenfarming op afvalwater een succes te maken is vervolgonderzoek naar een gegarandeerde algenafzet tegen een goede prijs nodig.

Inhoud

Samenvatting	3
1. Inleiding	7
1.1 Aanleiding en achtergrondinformatie	7
1.2 Doelstelling van het project	8
1.3 Deelnemers in het project	9
1.4 Leeswijzer	10
2. Resultaten laboratoriumonderzoek	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Materialen en methoden	11
2.3 In het lab	11
2.4 Deelconclusie	12
3. Technologisch onderzoek algenvijvers	12
3.1 Inleiding	12
3.2 Materialen en methoden	12
3.2.1 Metingen en analyses	14
3.3 Resultaten	15
3.3.1 Opstart vijvers	15
3.3.2 Stromingsprofiel en stroomsnelheid algenvijvers	15
3.3.3 Lichtinbreng versus waterhoogte	16
3.3.4 Seizoensinvloed op algengroei	16
3.3.5 Invloed ammonium in het afvalwater op algengroei	18
3.3.6 Invloed CO ₂ -dosering op algengroei	19
3.3.7 Invloed overkapping op algengroei	22
3.3.8 Invloed menging op algengroei	23
3.3.9 Algenkwaliteit en afzet	24
3.3.10 Maximaal behaalde algenproductie	25
3.4 Deelconclusies	25
3.5 Operationele aspecten algenfarming	26
3.5.1 Winterperiode	26
3.5.2 Overkapping	27
3.5.3 Filtratie van het algenwater	27
4. Modelontwikkeling en haalbaarheid	28
5. Conclusies	31

Bijlage 1	33
Bijlage 2	50
Bijlage 3	61
Bijlage 4	65

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergrondinformatie

De huidige productie- en consumptiepatronen leggen een grote druk op het milieu. De welvaart neemt wereldwijd toe. Dit leidt tot uitputting van natuurlijke hulpbronnen, verontreiniging en verlies van biodiversiteit. Om dit tegen te gaan, moet er meer aandacht zijn voor een duurzamer omgaan met deze natuurlijke hulpbronnen en een andere houding ten opzichte van het afval(water) dat geproduceerd wordt.

Voor de productie van algen zijn de nutriënten stikstof, fosfaat en CO_2 noodzakelijk. Deze nutriënten zijn veelal in voldoende mate aanwezig in (industriële) afvalwaterstromen. Dit maakt afvalwater een ideale bron waarop algen kunnen worden geproduceerd. De geproduceerde algen kunnen nuttig worden toegepast als vervanger van reguliere food-gewassen en (non)food toepassingen.

Waterstromen Steenderen zuivert het afvalwater van een aardappelverwerkende industrie. Bij de industriële verwerking van aardappelen komt afvalwater vrij dat stikstof en fosfaat bevat.

Het industriële afvalwater doorloopt verschillende zuiveringsstappen:

- 1) In de eerste stap wordt het zetmeel in een UASB reactor (upflow anaerobic sludge blanket) omgezet naar biogas.
- 2) Hierna komt het afvalwater in de fosfaatreactor waar het fosfaat verwijderd wordt met behulp van magnesium. Fosfaat en stikstof, aanwezig in de vorm van ammonium, worden geprecipiteerd. Hierbij ontstaat struviet als eindproduct. Struviet is een magnesiumammoniumfosfaat dat momenteel in de (buitenlandse) landbouw wordt afgezet.
- 3) In de laatste zuiveringsstap wordt in de CANON reactor (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) het ammonium omgezet in stikstofgas. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de anammox bacterie. Het voorgezuiverde water wordt verder gezuiverd bij de RWZI Olburgen.

Deze zuiveringsstappen zorgen ervoor dat er verschillende afvalwaterstromen beschikbaar zijn, met allemaal een andere nutriënten samenstelling, waarop algen kunnen worden gekweekt.

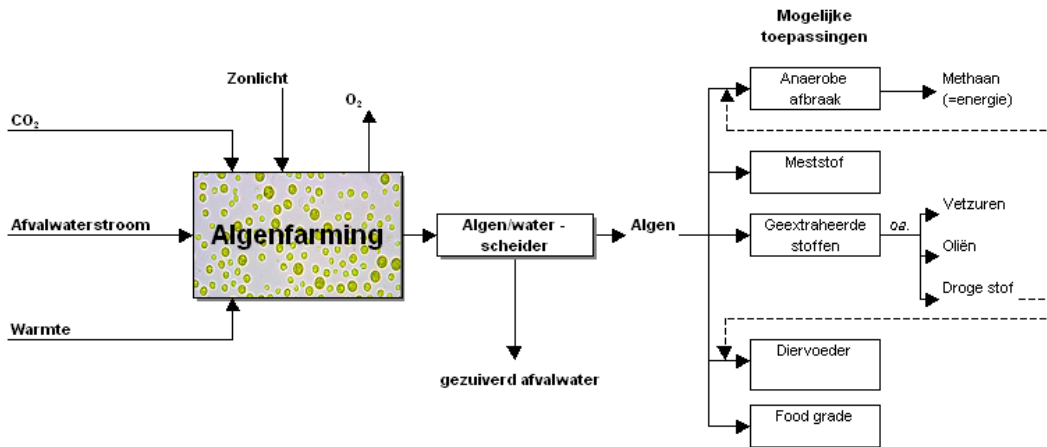
De huidige generatie afvalwaterzuiveringstechnieken gebruikt veel energie in de vorm van elektriciteit (onder andere voor beluchting), chemicaliën voor fosfaatverwijdering en produceert in veel gevallen zuiveringsslib dat als afvalstof moet worden afgevoerd.

De teelt van algen en de zuivering van (industriële) afvalwaterstromen lijken de ideale ingrediënten voor een geheel nieuw en duurzaam concept; algenfarming. Hierbij worden de aanwezige nutriënten in het afvalwater omgezet in een waardevolle grondstof, namelijk algen.

Andere voordelen van algenfarming zijn dat het energieverbruik relatief laag is en dat er sprake is van een positieve CO_2 balans, algen nemen CO_2 op tijdens de groei.

Dit project richt zich specifiek op het toepassen van algentechnologie voor de maximale productie van hoogwaardige algen, waarbij afvalwaterstromen worden gebruikt als een duurzame energiebron voor nutriënten. Daarnaast richt het project zich op het vaststellen van een optimaal reactorontwerp en afzetmogelijkheden van de algen.

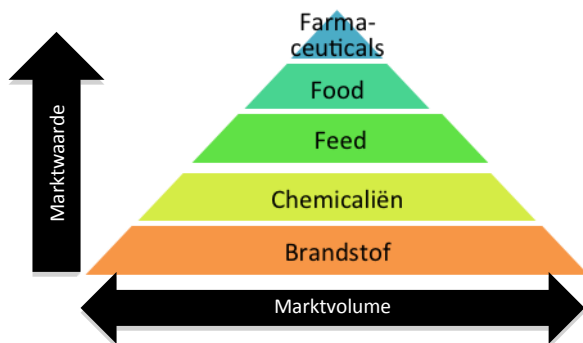
In figuur 1 is een prinsipeschema van het concept weergegeven.



Figuur 1: prinsipeschema algenfarming op afvalwater

In het te behandelen afvalwater zijn de benodigde nutriënten voor algengroei aanwezig in de vorm van ammonium, nitriet, nitraat en ortho-fosfaat.

Algen zijn eencellige plantaardige micro-organismen, die groeien in water. Door middel van fotosynthese, maken ze biomassa in de vorm van vetten, eiwitten en suikers. De algen zijn bruikbaar in verschillende marktsegmenten. Hierbij ligt de focus niet zozeer op het maken van biobrandstof, maar wordt de toepassing van de algen geconcentreerd op de veevoederindustrie, huisdiervoedingsmarkt, cosmetica-industrie, bioplastics en voedingssupplementen. Deze marktsegmenten en hun aandeel is weergegeven in figuur 2. Aangenomen wordt dat de inzet van algenfarming op afvalwater, duurzame businesscases op kan leveren. Echter moet nog veel onderzoek verricht worden naar verschillende omstandigheden waarin het groeien van algen op afvalwaterstromen rendabel is.



Figuur 2: volume proportionele markten voor de afzet van algen in een waardepiramide

1.2 Doelstelling van het project

Algenfarming is een veelbelovende technologie om afvalwaterstromen op een duurzame manier op te werken naar nuttig toepasbare producten. Op dit moment ontbreekt echter specifieke kennis en praktijkervaring met het toepassen van algenfarming op afvalwater. De vraag die met dit project beantwoord moet worden is:

“Kunnen afvalwaterstromen worden ingezet als nutriëntenbron voor algenfarming, om daarmee zo maximaal mogelijk duurzame grondstoffen te produceren die nuttig toegepast kunnen worden?”

Met het pilotonderzoek wordt er meer kennis gegenereerd over het effect van klimatologische omstandigheden (licht, temperatuur) op algengroei. Tevens wordt er meer kennis vergaard over de dimensioneringsgrondslagen, de optimale configuratie van de algenreactor en op welke wijze CO₂ het meest efficiënt kan worden ingebracht.

Met deze kennis kan gekomen worden tot het ontwerp van een pilotinstallatie en daarmee ook tot een onderbouwde kostenraming van algenfarming.

Ook wordt onderzocht wat de kwaliteit van de geproduceerde alg is, overige stoffen in het afvalwater kunnen deze kwaliteit beïnvloeden. De kwaliteit van de alg bepaalt in sterke mate de toepassing en daarmee ook de opbrengst.

Met het vaststellen van de groei en de kwaliteit van de algen kan de financiële haalbaarheid van algenfarming bepaald worden.

1.3 Deelnemers in het project

Voor de uitvoer van het project is een unieke samenwerking aangegaan tussen 3 bedrijven, te weten Ingrepro B.V. te Borculo, Waterstromen B.V. te Lochem en Witteveen+Bos B.V. te Deventer. Hieronder volgt een korte omschrijving van de 3 bedrijven:

Ingrepro Renewables B.V. is een onderdeel van Ingrepro B.V. en is gevestigd in Borculo. Ingrepro Renewables consulteert bedrijven en overheden op het gebied van afvalwaterverwerking met behulp van algen. Daarbij wordt zowel met open systemen (algenvijvers) als met gesloten systemen (algenbioreactors) geëngineerd.

Het moederbedrijf Ingrepro B.V. is sinds 2005 actief op het gebied van het kweken van algen en de verwerking van de geproduceerde biomassa tot waardevolle micro ingrediënten voor de food en feed industrieën. Daarnaast worden de algen afgezet in de plantvoeding en aquacultuur.

Ingrepro heeft een uitgebreid onderzoeksprogramma gericht op het optimaliseren van productieprocessen. Het algen productieproces is HACCP en GMP+ gecertificeerd en Ingrepro is geregistreerd bij de VWA (Voedsel en Waren Autoriteit).

Waterstromen B.V. is een waterzuiveringbedrijf opgericht in 1998. De aandelen worden gehouden door **Waterschap Rijn en IJssel**. Waterstromen exploiteert afvalwaterzuiveringen voor bedrijven en doet dat op een economische en milieutechnisch verantwoorde wijze. Zij exploiteert installaties voor de zuivering van afval-, proces- en industriewater en de verwerking van organisch slib, afkomstig van industrieën. Het bedrijf is gevestigd in Lochem en beheert installaties in Dongen, Lichtenvoorde, Lomm en Olburgen. Waterstromen telt 25 medewerkers. Waterstromen past hierbij naast conventionele ook innovatieve technieken toe. Voorbeelden daarvan zijn de stikstofverwijdering met anammox-bacteriën, struviet (kunstmest) productie uit afvalwater en biogasproductie en -reiniging. Waterstromen opereert op de Nederlandse afvalwaterzuiveringsmarkt.

Witteveen+Bos B.V. levert advies- en ingenieursdiensten voor projecten in de sectoren water, infrastructuur, milieu en bouw. Het werkgebied van de sector water beslaat de gehele waterketen en het gehele watersysteem: waterwinning, bereiding van drinkwater, riolering, afvalwaterbehandeling, integraal waterbeheer, hergebruik en procesautomatisering. Witteveen+Bos heeft uitgebreide kennis en ervaring bij het uitvoeren van (semi)praktijk-onderzoek naar innovatie.

Het onderzoek wordt financieel ondersteund door het innovatiefonds van **Waterschap Rijn en IJssel**, de **provincie Gelderland** en een bijdrage van het **Ministerie van Economische Zaken** (zie figuur 3).



Figuur 3: projectbord bij de algenvijver op het terrein van Waterstromen Olburgen.

1.4 Leeswijzer

In voorliggend rapport is het volledige onderzoekstraject weergegeven. In hoofdstuk 1 is de aanleiding en achtergrond informatie omtrent het project uiteengezet. Hoofdstuk 2 behandelt de laboratoriumproeven voorafgaand aan het pilotonderzoek. Vervolgens gaat hoofdstuk 3 verder in op het onderzoeksprogramma dat is uitgevoerd. Hierin is ondermeer de invloed van CO₂ dosering, menging, nutriënten en overkapping op de algengroei onderzocht. In hoofdstuk 4 is de financiële haalbaarheid bepaald bij vertaling van algenfarming naar een full-scale installatie. De conclusies van het onderzoek volgen in hoofdstuk 5.

2. Resultaten laboratoriumonderzoek

2.1 Inleiding

Alvorens gestart is met de pilotproeven op locatie is gekozen om voorbereidend labonderzoek te doen naar de algengroei bij verschillende mengverhoudingen van de voeding. Afvalwater van Aviko wordt bij Waterstromen in verschillende trappen gezuiverd:

- UASB (=Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), een anaerobe reactor waarmee uit zetmeel biogas wordt gewonnen. Het effluent hiervan loopt naar de volgende stap.
- Fosfaatreactor (= fosfaatverwijderingsstap, waarbij met behulp van magnesiumoxide, struviet wordt neergeslagen), het effluent loopt naar de volgende stap.
- Anammox (=stikstofverwijderingsstap, waarbij met behulp van anammox-bacteriën stikstof wordt verwijderd). Het effluent loopt normaliter naar de RWZI Olburgen.

Vanwege het feit dat de benodigde nutriënten voor het groeien van algen in verschillende verhoudingen aanwezig zijn in bovenstaande proceswaters, en deze mogelijk toxische componenten kunnen bevatten, is het nuttig uit te zoeken in welke verhouding deze effluenten het beste kunnen worden toegediend aan de algen voor de grootst mogelijke groei.

2.2 Materialen en methoden

Voor alle groeiproeven is gebruik gemaakt van de “huisalg” van Ingrepro, *Chlorella fusca*. Ingrepro kweekt deze alg al jaren in open vijvers. Onderzocht wordt of deze alg ook succesvol kan groeien op het afvalwater van Aviko.

De groeiproeven zijn gedaan met vier verschillende soorten water die beschikbaar zijn op de waterzuivering van Waterstromen in Olburgen:

- ruw aardappelinfluent (RAW);
- effluent van anaeroob gezuiverd aardappelwater (ANA);
- effluent van de fosfaatverwijderingsstap (PHOS);
- effluent van de anammox reactor (ANMX).

Er is ook gekeken naar de algengroei bij verschillende afvalwatercombinaties.

De groeiproeven zijn uitgevoerd in het laboratorium van Ingrepro te Borculo. Zie bijlage 1 voor een uitgebreid verslag van de groeiproeven.



Figuur 4: uitvoering van de groeiproeven op het lab van Ingrepro

2.3 In het lab

De groeiproeven geven geen eenduidig beeld, er is steeds een andere afvalwaterstroom waarop de algen het beste groeien (zie figuur 5). Uit de resultaten blijkt wel dat er twee afvalwater stromen zijn die bij de

groeiproeven steeds in de top drie van beste groeimediums terugkomen. Dit zijn effluent anammox water (ANMX) en een combinatie van anaeroob effluent en anammox effluent (ANA-ANMX).

	1	2	3
Proef 1	ANA-ANMX	ANA	ANMX
Proef 2	ANA-ANMX	ANMX	PHOS-ANMX
Proef 3	RAW-ANMX	ANMX	ANA-ANMX
Proef 4	ANA-PHOS	ANA-ANMX	ANMX
Proef 5	PHOS-ANMX	ANA-ANMX	ANMX
Proef 6	ANMX	ANA-ANMX	PHOS-ANMX

Figuur 5: samenvatting resultaten groeiproeven (beste groeimedium), in de verticale kolommen staat onder nummer 1 de afvalwatercombinatie waarmee de hoogste groei gerealiseerd is

2.4 Deelconclusie

Uit de groeiproeven is gebleken dat het mogelijk is om met verschillende afvalwaters van Waterstromen algen te kweken. De “huisalg” van Ingrepo “*Chlorella fusca*” is hier ook zeer geschikt voor.

Bij het opstarten van de pilot vijvers is er daarom ook voor gekozen om deze te enten met de *Chlorella fusca*. Aan de hand van de groeiproeven (zie figuur 5) is besloten de vijver te voeden met een combinatie van effluentwater afkomstig van de anaerobe reactor en de anammox reactor (ANA-PHOS).

3. Technologisch onderzoek algenvijvers

3.1 Inleiding

Tijdens het technologisch onderzoek is de invloed van CO₂ dosering, overkapping, menging en nutriënten op de algengroei onderzocht. Er zijn gedurende de onderzoeken ook andere factoren naar voren gekomen die van belang zijn voor de algengroei. Zo is gebleken dat het belangrijk is om de algenvijvers goed te filteren om predatoren van de alg uit de vijver te houden.

3.2 Materialen en methoden

Om voldoende schaalgrootte te krijgen zijn op de AWZI Olburgen drie algenvijvers aangelegd met een gezamenlijk oppervlak van 1.000m² (zie figuur 6). Om het water door te vijvers te laten stromen is gebruik gemaakt van schoepenraden. Deze schoepenraden zorgen ervoor dat de algen in de vijvers goed gemengd worden zodat de algen allemaal evenveel licht, CO₂ en nutriënten kregen.



Figuur 6: de drie algenvijvers op locatie van Waterstromen te Olburgen

Ook is er gebruik gemaakt van filters met een poriegrootte van 70 μm . De filters zijn nodig om slib van de voeding uit de vijvers te filteren, maar in de praktijk is gebleken dat de belangrijkste functie van de filters is om de predatoren van de alg uit het water te filteren.

De gebruikte schaalgrootte is noodzakelijk om onder praktijkcondities te kunnen werken, waardoor op basis van behaalde resultaten in één stap naar een full-scale realisatie kan worden opgeschaald. Tijdens de pilot periode zijn er onderstaande parameters onderzocht in blokken van drie weken:

- invloed van overkapping op algengroei;
- invloed van CO_2 dosering op algengroei;
- invloed van menging op algengroei;
- invloed van nutriënten (ammonium) op algengroei.

Er is bewust voor meerdere vijvers gekozen. Dit heeft het mogelijk gemaakt om per onderzoeksblok één vijver als referentie te nemen en in de andere vijvers parameters te variëren (zie figuur 7 voor de uitvoering van de proeven).

		Winter						Zomer													
		24-1-2011	20-2-2011	21-2-2011	13-3-2011	14-3-2011	3-4-2011	4-4-2011	25-4-2011	23-5-2011	12-6-2011	13-6-2011	10-7-2011	11-7-2011	27-7-2011	28-7-2011	25-8-2011	29-8-2011	18-9-2011	19-9-2011	9-10-2011
		blok 1	blok 2	blok 3	blok 4	blok 5	blok 6	blok 7	blok 8	blok 9	blok 10										
Overkapping	Vijver 1							X	X	X											
	Vijver 2																				
	Vijver 3							X	X	X											
CO ₂	Vijver 1		X												X	X	X				
	Vijver 2														X	X	X				
	Vijver 3		X					X							X	X	X				
Menging	Vijver 1					X															
	Vijver 2																				
	Vijver 3					X															
Nutriënten setpoint	Vijver 1			X																	
	Vijver 2																				
	Vijver 3			X																	

Figuur 7: overzicht van de uitgevoerde onderzoeksblokken

Tijdens de onderzoeksblokken zijn er veel metingen gedaan om de condities in de algenvijver en de groei van de alg te registreren.

3.2.1 Metingen en analyses

Het is voor het onderzoek van belang dat de ontwikkelingen in de algenvijvers goed gevolgd worden en dat er zoveel mogelijk data wordt gegenereerd. Een aantal parameters worden continue gemeten en andere worden dagelijks of wekelijks bepaald. Dit levert informatie op over de omstandigheden en de algengroei in de vijvers.

Alle data is opgeslagen in een Excel bestand en geanalyseerd.

3.2.1.1 Online metingen

In deze vijvers zijn vier sensoren gehangen, namelijk een ammoniumsensor, een nitraatsensor, een droge stof sensor en een pH elektrode.

De ammonium en de nitraatsensor zijn in de vijver gehangen om de nutriënten in de vijver nauwkeurig bij te houden en de voeding hierop te sturen. In de praktijk bleek dit niet werkbaar omdat de sensoren in het lagere meetbereik onnauwkeurig zijn, deze sensoren zijn daarom in het vervolg niet meer gebruikt en uit de vijver gehaald.

De pH elektrode fungeerde als regeling voor de CO₂ dosering. Komt de pH boven het ingestelde setpoint dan wordt er CO₂ gedoseerd en daalt de pH.

De drogestof sensor is belangrijk om de dagelijkse algengroei te bepalen. Om dit nauwkeurig te doen is het belangrijk dat deze sensor goed geijkt wordt. De werking van de drogestof sensor is dagelijks gecontroleerd door deze te vergelijken met handmetingen.

3.2.1.2 Optische Dichtheid

Dagelijks is de optische dichtheid bepaald in de algenvijvers, dit is gedaan bij 820 nm en 690 nm met een 1 cm cuvet. De optische dichtheid geeft een indicatie voor de hoeveelheid drogestof in de vijver.

3.2.1.3 pH- en O₂-meting

Zoals vermeld wordt de CO₂ dosering gestuurd door een pH setpoint dat continue gemeten wordt. Er wordt dagelijks een handmeting gedaan om de online pH sensor te controleren.

Ook is het zuurstofgehalte in de vijvers tweemaal daags gemeten. Hieruit is de zuurstofverzadiging in de vijvers op te maken. Het zuurstofgehalte is een indicatie voor de groei van de algen. Bij algengroei (fotosynthese) ontstaat er namelijk zuurstof.

3.2.1.4 Temperatuur

De temperatuur van het vijverwater is van invloed op de algengroei. Deze is tweemaal daags gemeten.

3.2.1.5 Drogestof handmeting

Om de hoeveelheid algen in de vijvers te bepalen werden drogestof metingen gedaan. Hierbij werd een bepaalde hoeveelheid (20 ml algenwater) van een monster over een glasvezelfilter van 1-2 µm gepipetteerd. Deze werden vervolgens gedroogd in een stoof bij 105°C. Door de filters voor en na het drogen te wegen kon het drogestofgehalte uit de vijvers bepaald worden.

3.2.1.6 Cuvettentests

Om de daadwerkelijke waarden van de nutriënten in de vijvers en de voeding te weten werden cuvetentests gedaan. De volgende cuvetentests zijn uitgevoerd:

- Magnesium: Uit de verkregen waarde van deze cuvettest kan samen met de fosfaten en ammonium berekend worden hoeveel struviet(Mg (NH₄) PO₄ · 6(H₂O)) er mogelijk gevormd kan worden. Dit wordt

gedaan omdat het struviet op de sensoren kan aanslaan en deze kan beïnvloeden. Deze test wordt eenmaal per week gedaan.

- CZV: Dit geeft aan hoeveel oxideerbaar materiaal in het water aanwezig is. Oftewel hoeveel zuurstof er nodig is om het chemisch materiaal aanwezig in het monster af te breken. Deze test wordt eenmaal per week gedaan.
- Totaal stikstof: Deze test wordt uitgevoerd om te bepalen hoeveel totaal stikstof er aanwezig is in het water, inclusief de algen. Deze test wordt eenmaal per week gedaan.
- Totaal fosfaat: Deze test wordt uitgevoerd om te bepalen hoeveel fosfor er in totaliteit aanwezig is in het water, inclusief de algen. Deze test wordt eenmaal per week gedaan.
- Ammonium: Dit is één van de voedingsstoffen van algen. Met deze waarden wordt aangegeven of er voldoende beschikbaar ammonium in het water aanwezig is voor de algen.
- Nitraat: Algen kunnen ook nitraat als voedingsstof gebruiken. Om te bepalen hoeveel nitraat aanwezig is in de vijvers wordt deze cuvettest dagelijks gedaan.
- Nitriet: Om het totaalplaatje van de hoeveelheid aanwezige stikstof te bepalen is het nodig om ook te kijken naar de hoeveelheid nitriet in het water. Deze test wordt eenmaal in de week uitgevoerd.
- Ortho fosfaat: Deze test wordt uitgevoerd om te bepalen hoeveel opgelost fosfaat er aanwezig is in het water zonder de algen. Fosfaat is één van de voedingsstoffen van algen. Deze test wordt wekelijks uitgevoerd.
- Kalium: Om de ammoniumsensoren te kalibreren is het nodig de hoeveelheid kalium te weten. Deze waarden worden eenmaal per week bepaald. Meting is komen te vervallen na verwijdering van de online ammoniumsensor.
- Chloride: Om de nitraatsensoren te kalibreren zijn ook de chloride waarden in de vijvers nodig. Deze wordt ook berekend van de voeding om te weten welke hoeveelheden toegevoegd worden wanneer de vijvers gevoed worden. Meting is komen te vervallen na verwijdering van de online nitraatsensor.

3.2.1.7 Alkaliniteit

Alkaliniteit is een meting op het zuurbufferend vermogen van een monster. De alkaliniteit van het vijverwater van de vijvers werd bepaald op een monster van 50 ml. Dit werd gedaan door de pH te meten van het monster en 0.1M HCl toe te voegen aan het monster totdat een waarde van 4.4 bereikt was. Bij deze pH mag men er vanuit gaan dat alle carbonaat omgezet is naar H_2CO_3 .

3.3 Resultaten

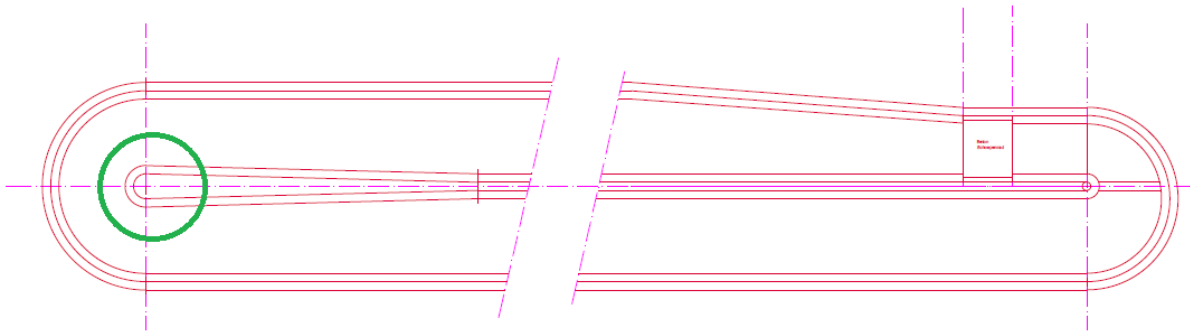
3.3.1 Opstart vijvers

De vijvers zijn aangelegd in juni en juli 2010. Vanaf augustus 2010 zijn de drie algenvijvers operationeel en vond de officiële opening plaats op 23 september 2010 (zie bijlage 2 voor de gegeven presentatie en enkele foto's van de opening).

In de eerste maanden na ingebruikname is de besturing van de vijvers geoptimaliseerd en is de CO_2 dosering geïnstalleerd. Er is per vijver een filterinstallatie geïnstalleerd om het voedingswater en predatoren van de alg uit het vijverwater te filteren. Deze maanden zijn ook gebruikt om te onderzoeken of alle drie de vijvers gelijk zijn. Dit bleek inderdaad het geval.

3.3.2 Stromingsprofiel en stroomsnelheid algenvijvers

Voordat de vijvers gebouwd werden is er onderzoek gedaan naar de meest ideale configuratie van een algenvijver. In de meest ideale configuratie stroomt het water overal in de vijver met dezelfde snelheid. Dit is in de praktijk onmogelijk omdat er een bocht in de vijver zit. Om ondanks deze bocht toch een zo ideaal mogelijke situatie te creëren is gekozen voor onderstaand model (zie figuur 8). De gekozen hoek voor de zijwand is 45° .



Figuur 8: bovenaanzicht van het meest ideale stromingsprofiel van een algenvijver. Het water stroomt tegen de klok in

De stroomsnelheid in de vijvers is onderzocht. De snelheid van de schoepenraderen zijn te regelen met een frequentieregelaar. Gebleken is dat bij de gebruikte instelling van ± 25 Hz de stroomsnelheid in de vijver 0.40 m/s is. Tijdens het mengonderzoek zijn er tevens snelheden van 0,3 m/s (± 21 Hz) en 0,5 m/s (± 31 Hz) gebruikt.

3.3.3 Lichtinbreng versus waterhoogte

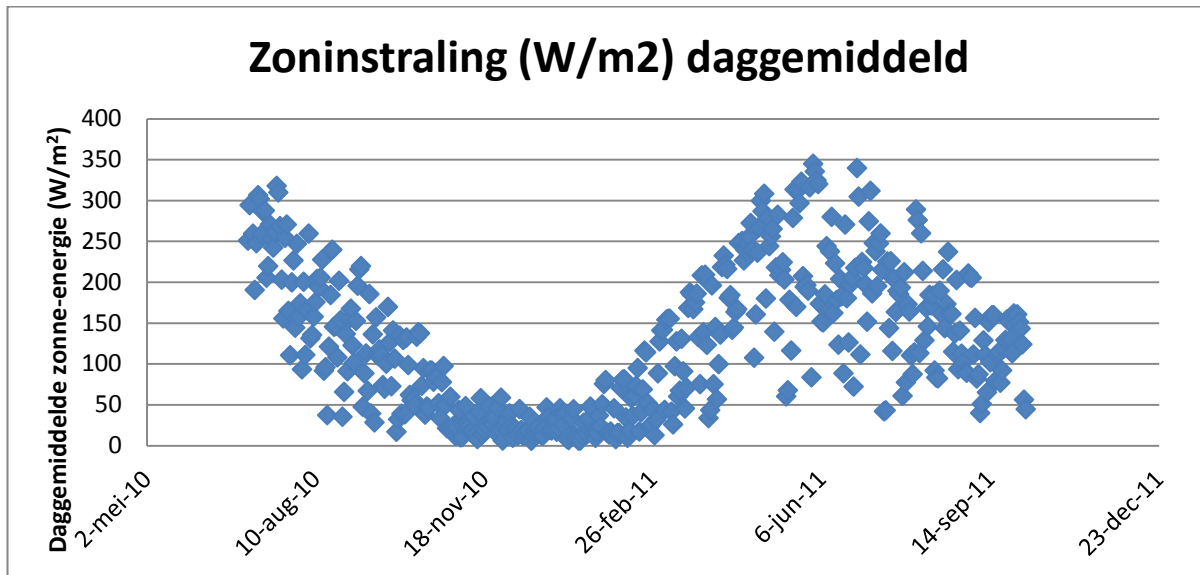
Licht in de vorm van zonlicht is niet te controleren. Echter is het wel zo dat de groei van de algen rechtstreeks afhankelijk is van de hoeveelheid zonlicht. Dit is tevens de oorzaak dat algen in de zomermaanden veel meer groeien dan in de wintermaanden. Een ondermaat aan beschikbaar zonlicht zorgt voor een slechtere groei, maar ook een overmaat kan de groei negatief beïnvloeden. Teveel zonlicht kan foto-inhibitie veroorzaken. Hierbij worden de eiwitten in de algen beschadigd en zal er minder groei plaatsvinden. 's Nachts is er geen licht en dus vindt er geen fotosynthese plaats. Wanneer de algen geen licht krijgen vindt verademing, het omgekeerde van fotosynthese, plaats. Hierbij verbruiken de algen hun eigen organisch materiaal en neemt de hoeveelheid algen in het systeem af.

In het vijverontwerp is gekozen voor een vijverdiepte van 30 cm. Deze vijverdiepte kan desgewenst aangepast worden door middel van een in hoogte instelbare overloop. Een vijverdiepte van 30 cm is een typische waarde voor het kweken van algen. Bij deze diepte wordt er verondersteld dat er voldoende licht door kan dringen in het algenwater.

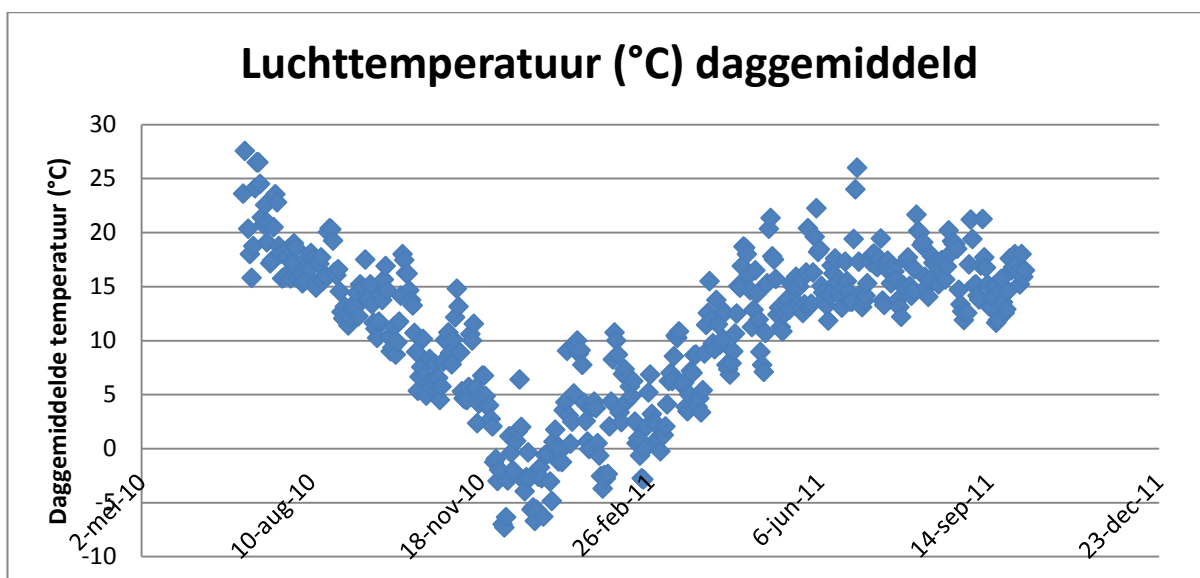
In Olburgen deed zich de situatie voor waarbij het grondwater zo hoog stond, dat het vijverzeil omhoog gedrukt werd tegen het schoepenrad. Om beschadigingen aan het vijverzeil te voorkomen is ervoor gekozen om de vijverdiepte te verhogen van 30 cm naar 45 cm. Hierdoor ontstond er genoeg tegendruk om het vijverzeil weer op de bodem te laten rusten.

3.3.4 Seizoensinvloed op algengroei

In Nederland is de algengroei sterk seizoensgebonden, indien er voldoende nutriënten aanwezig zijn voor de groei. Dit komt omdat de algengroei sterk afhankelijk is van de lichte-hoeveelheid en ook afhankelijk van de temperatuur. Tijdens de onderzoeksperiode zijn de daggemiddelden voor zoninstraling (W/m^2) en temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) opgevraagd bij het KNMI (gemiddelde van de KNMI meetstations Hupsel en Deelen). In de grafieken is duidelijk te zien dat de zoninstraling en temperatuur sterk verschillen met de seizoenen. Voor het kweken van algen is het belangrijk om in de zomermaanden een goede productie te halen.

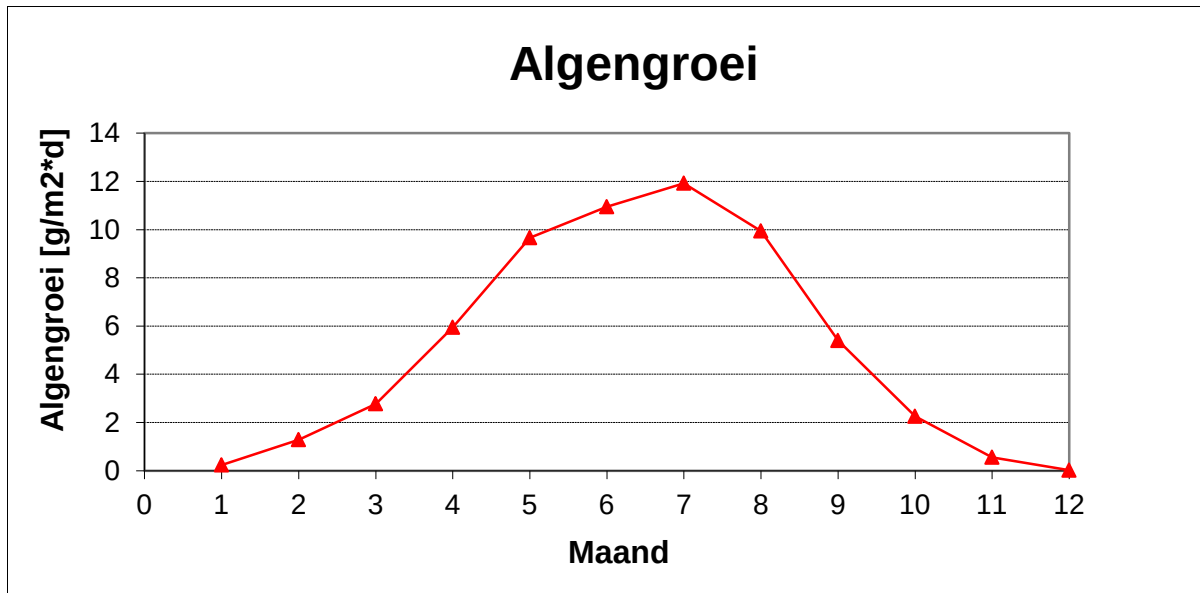


Grafiek 1: zoninstraling gedurende de onderzoeksperiode in W/m². De gegevens zijn afkomstig van de KNMI stations Hupsel en Deelen



Grafiek 2: luchttemperatuur gedurende de onderzoeksperiode in °C. De gegevens zijn afkomstig van de KNMI stations Hupsel en Deelen

Radmer heeft, in het artikel “Analysis of the Productivity of a Continuous Algal Culture System”, een model opgesteld waarin de algengroei is beschreven. De groei is in dit model onder andere afhankelijk van de lichtintensiteit, temperatuur en vijverdiepte. Met behulp van dit model, en de door ons te verwachten algenproductie van 18,3 ton/ha/jaar, is berekend hoeveel groei er per maand behaald moet worden om tot deze jaarlijkse algenproductie te komen. Dit is te zien in grafiek 3. Uit deze grafiek blijkt hoe groot de seizoensinvloeden zijn. Dit is ook weergegeven in tabel 1. Hieruit blijkt dat er in de wintermaanden nauwelijks algengroei plaatsvindt.



Grafiek 3: benodigde maandelijkse algengroei om aan een productie van 18,3 ton/ha/jaar te komen

Seizoen	Algenproductie (%)
Winter	2,5 %
Lente	30,2 %
Zomer	53,8 %
Herfst	13,5 %

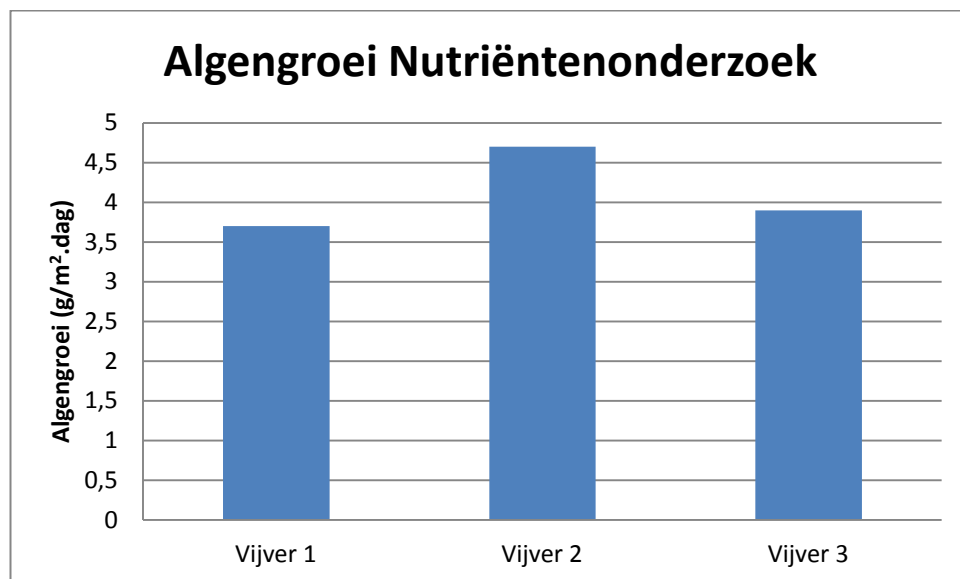
Tabel 1: verdeling van de algenproductie over de vier seizoenen, gebaseerd op het model van Radmer en KNMI waarden voor temperatuur en lichtintensiteit

3.3.5 Invloed ammonium in het afvalwater op algengroei

De invloed van de ammoniumconcentratie in de vijver op de algengroei is onderzocht. Alle drie de vijvers zijn gestuurd op verschillende ammoniumconcentraties en per vijver is de algengroei bepaald.

Vijver	Ammoniumconcentratie NH ₄ -N (mg/l)
1	10
2	20
3	40

Tabel 2: sturingsparameters tijdens het nutriënten onderzoek



Grafiek 4: tijdens het nutriënten onderzoek is het ammoniumgehalte in de vijvers gevarieerd. Er is een klein verschil in algengroei te zien tussen de vijvers

Uit het onderzoek blijkt dat de groeiwaarden dicht bij elkaar liggen. Vijver twee laat een iets hogere groei zien dan de andere vijvers. Uit dit onderzoek blijkt dat ammonium niet de limiterende factor is voor algengroei tijdens dit onderzoek, wat ook logisch is omdat er in alle vijvers constant ammonium aanwezig is. Hieruit blijkt ook dat het geen zin heeft om onnodig veel ammonium aan de vijvers toe te voegen.

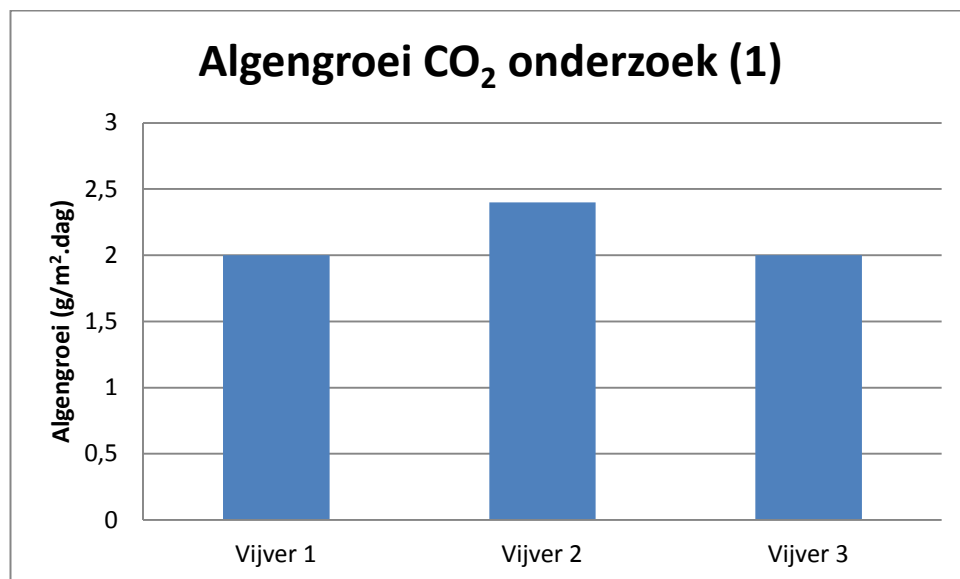
3.3.6 Invloed CO₂-dosering op algengroei

De invloed van CO₂ toevoeging aan de algenvijvers is onderzocht. Algen kunnen de CO₂ die aanwezig is in de lucht gebruiken. Echter is de hoeveelheid beschikbare CO₂ in de lucht niet genoeg om optimale algengroei te verkrijgen. Om te bepalen of de algen meer CO₂ konden opnemen is onderzocht of het toevoegen van CO₂ aan de vijvers de groei bevorderde.

Voor deze test is gebruik gemaakt van een injectiesysteem. Het CO₂-injectiesysteem bestaat uit een opslagsysteem voor vloeibare CO₂ en een meet en regelenheid (pH-regelaar) voor de juiste dosering. Het geheel wordt gecompleteerd door de CO₂-doseringsslangen, deze zorgen ervoor dat de CO₂ door kleine gaatjes in de vijvers wordt geïnjecteerd. Er is een pH-setpoint ingesteld per vijver, komt de pH van een vijver boven zijn setpoint dan wordt er CO₂ gedoseerd. Bij de referentie vijver is er geen CO₂ gedoseerd.

Vijver	SetpointCO ₂ sturing (pH)	Overkapping
1	8,0	nee
2	geen CO ₂ dosering	nee
3	8,5	nee

Tabel 3: sturingsparameters tijdens het CO₂ onderzoek

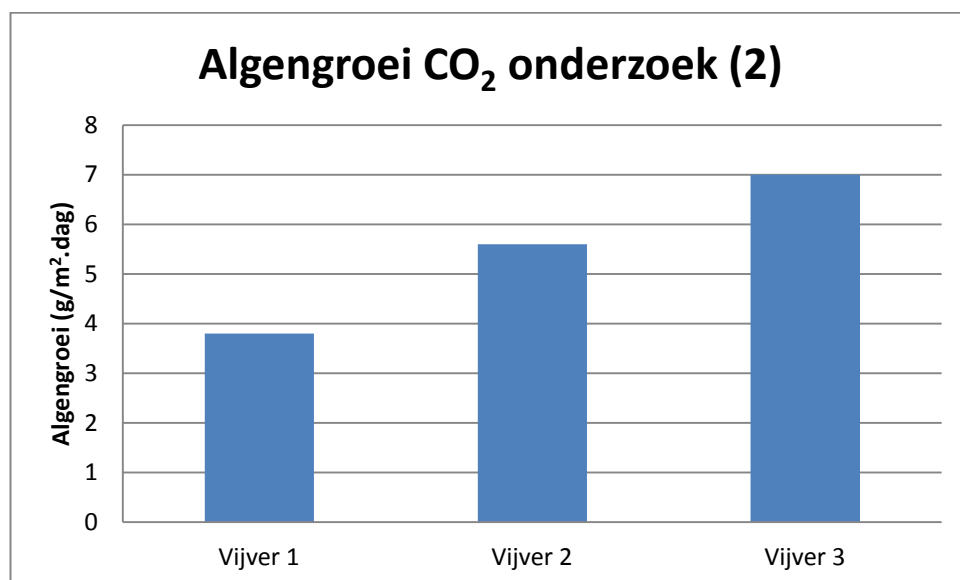


Grafiek 5: tijdens het CO₂ onderzoek is het pH setpoint voor CO₂ dosering in de vijvers gevarieerd. Vijver twee, zonder CO₂ dosering, lijkt iets beter te groeien

Dit onderzoek vond plaats eind februari begin maart 2011. Omdat er geen duidelijk verschil in groei te zien is, wat wel werd verwacht, is besloten het onderzoek te herhalen (eind mei, begin juni). Tijdens het tweede CO₂ onderzoek waren vijvers 1 & 3 overkapt. Hierdoor is gekozen voor de proefopzet in tabel 4. De resultaten zijn weergegeven in grafiek 6.

Vijver	SetpointCO ₂ sturing (pH)	Overkapping
1	geen CO ₂ dosering	ja
2	geen CO ₂ dosering	nee
3	8,5	ja

Tabel 4: sturingsparameters tijdens het 2^e CO₂ onderzoek

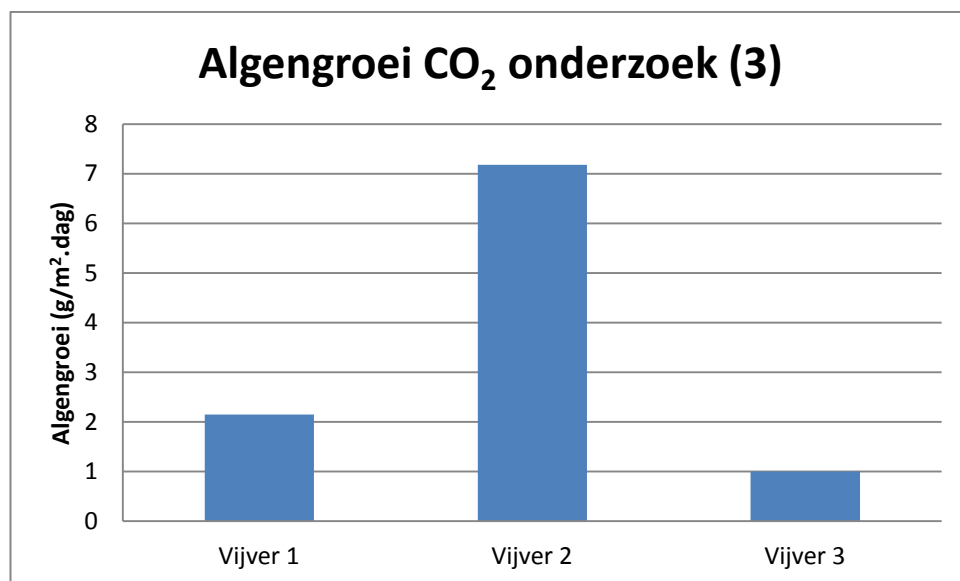


Grafiek 6: tijdens het tweede CO₂ onderzoek is er alleen CO₂ gedoseerd in vijver 3. Vijver 1 & 3 waren gedurende dit onderzoek overkapt

De overkapt vijver met CO₂ dosering geeft de hoogste groei. Het onderzoek is nog een keer herhaald in augustus 2011, nadat de overkapping verwijderd is.

Vijver	Setpoint CO ₂ sturing (pH)
1	7
2	8,5
3	geen CO ₂ dosering

Tabel 5: sturingsparameters tijdens het 3^e CO₂ onderzoek

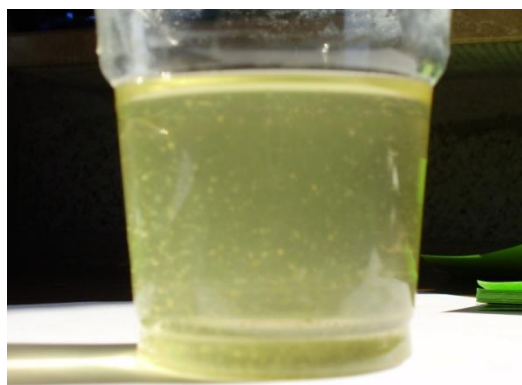


Grafiek 7: tijdens het derde CO₂ onderzoek komt duidelijk naar voren dat de groei het grootst is bij een CO₂ dosering met een pH van 8,5

CO₂ dosering lijkt een positief effect te hebben maar er bleken meer variabelen te zijn tussen de drie vijvers dan alleen de CO₂ dosering.

Het is duidelijk, dat bij een pH van 8,5 (vijver 2) de groei het hoogst uitvalt. Vijver 2 is in de maand augustus ook meerdere malen geoogst. Vijver 1 levert ook duidelijk meer groei op dan vijver 3. Uit microscopisch onderzoek komt echter naar voren dat er in microflora en microfauna verschillen bestaan tussen de verschillende vijvers.

Vijver 1 en 3 bevatten duidelijk meer predatoren (watervlooien) en meer verschillende soorten algen dan vijver 2 (zie figuur 9). Bovendien is er bij vijver 2 ook minder sprake van kolonievorming (samenklontering van de algen) dan bij vijver 1 en 3. Kolonievorming bij algen duidt op een stressreactie. Dit doet vermoeden dat er meer aan de hand is en dat er sprake kan zijn van een vijvereffect.



Figuur 9: algenwater met daarin watervlooien Figuur 10: rotifeer met eitjes (microscopie beeld)

Na de uitvoering van het onderzoek kwam naar voren dat het doekfilter van vijver 2 met een twee keer zo grote flow werd doorlopen dan de filters bij vijver 1 en 3. De doekfilters worden gebruikt om de predatoren te filteren.

Daardoor kon de generatietijd van de predatoren niet worden voorgebleven in vijver 1 en 3. Dit kan verklaren waarom er in vijver 1 en 3 veel meer predatoren voorkwamen dan in vijver 2. Meer predatoren levert meer stress voor de algen op en minder groei. Daardoor zijn de uitkomsten van het CO₂-onderzoek wat betreft effect op de geconstateerde groei niet valide en lijkt het er op dat hier sprake is van een vijvereffect, wat in feite een filtereffect is.

Maar is theoretisch gezien CO₂ dosering wel nodig?

De concentratie CO₂ in de lucht is heel laag (0,038 %) en uitwisseling van CO₂ uit de lucht met de vloeistoffase kan, met name in ondiepe systemen waar de productiviteit hoog is, leiden tot CO₂ beperking. Maar in het afvalwater afkomstig van Aviko zit waarschijnlijk voldoende bicarbonaat om de rol van CO₂ over te nemen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat CO₂ niet limiterend was.

Bijkomend effect is dat je met CO₂ dosering de pH omlaag brengt. Bij een lage pH leven er meer watervlooien en raderdiertjes in de vijver die de algen opeten.

Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat een goede filtering van het algenwater belangrijker is dan CO₂ dosering.

3.3.7 Invloed overkapping op algengroei

In de winter zijn de algenvijvers dichtgevroren waardoor de productie stil is komen te liggen. Als reactie hierop is onderzocht wat de invloed van overkapping is op de algengroei. Vijver 1 en 3 zijn overkapt (zie figuur 11) en er is gekeken hoe de algengroei hierdoor beïnvloed is.



Figuur 11: vijver 1 en 3 zijn geheel overkapt

Door de overkapping kunnen de algenvijvers zoals verwacht goed warmte vasthouden. De gemiddelde middagtemperaturen van het water in de overkapte vijvers liggen 5 a 6 °C hoger dan bij de niet overkapte vijver.

Tijdens warme dagen is echter gebleken dat de watertemperatuur in de vijver oploopt tot 35°C. Hierdoor komen de algen in een stresstoestand en sterven de algen. Dit is te zien aan de bruine kleur die in de vijver ontstaat. Daarmee is een overkapping in deze periode ongeschikt gebleken om algenfarming mee te bedrijven.

Verder is gebleken dat indien de overkapping zorgt voor een algengroei toename van 10 ton/ha/jaar het nog steeds niet rendabel is. Deze toename is te verwachten als de algengroei niet meer temperatuur gelimiteerd is in de winter. Hierbij is geen rekening gehouden met bijkomende negatieve effecten in de zomer. De belangrijkste reden dat de overkapping niet haalbaar is, is de hoge investering die gedaan moet worden om de overkapping te realiseren. Zie bijlage 3 voor een bijbehorende berekening, destijds is wel met een te optimistische algenproductie gerekend.

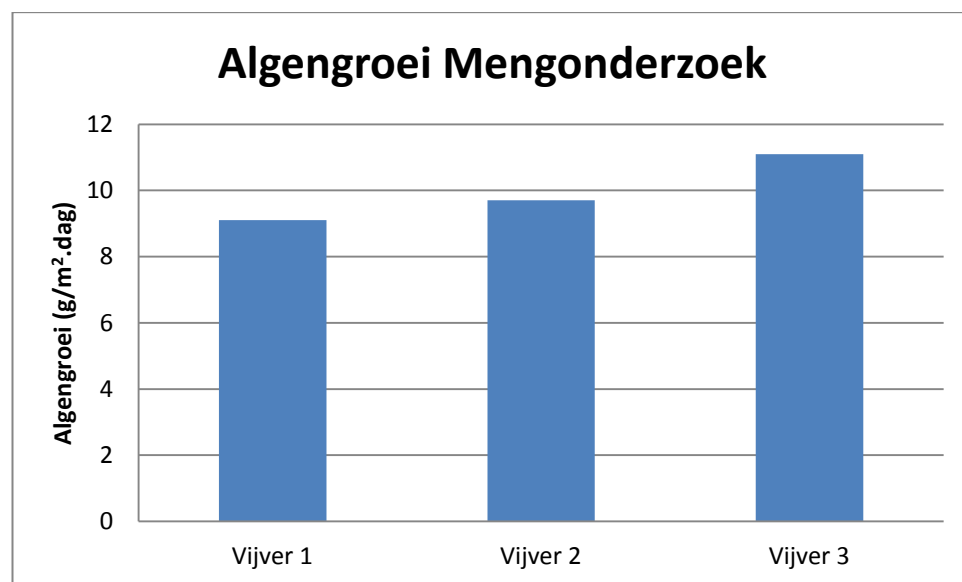
3.3.8 Invloed menging op algengroei

Het mengen van het systeem is van belang om alle algen evenveel licht, CO₂ en nutriënten te geven. Ook is het belangrijk om op deze manier bezinking tegen te gaan. Zo kan voorkomen worden dat er een laag dode alg op de bodem blijft liggen. Naar alle waarschijnlijkheid zal een hogere stroomsnelheid in een vijver zorgen voor een beter gemixt systeem. Hierbij moet ook gekeken worden naar de economische kant van het project. Een hogere stroomsnelheid in de vijvers vraagt om een hogere draaisnelheid (frequentie) van de schoepenraden en dat zorgt voor een hoger energieverbruik. Daarom is het van belang om ook het energieverbruik van de schoepenraden bij verschillende frequenties te onderzoeken.

Tijdens de test is de snelheid van de schoepenraden in de vijvers gevarieerd (zie tabel 6). Bij de verschillende snelheden is de algengroei bepaald.

Vijver	Setpoint schoepenrad (Hz)	Snelheid water (m/s)
1	21	0,30
2	26	0,40
3	31	0,50

Tabel 6: sturingsparameters tijdens het mengonderzoek



Grafiek 8: tijdens het mengonderzoek is het ammoniumgehalte in de vijvers gevarieerd. De trend is dat bij toenemende menging de algenproductie ook toeneemt

Een betere menging zal een hogere groei opleveren. De resultaten geven aan dat een menging bij een frequentie van 31 Hz de beste algengroei geeft ten opzichte van de andere instellingen.

Echter, een hogere frequentie-instelling van de voortstuwars zal leiden tot meer energieverbruik.

- 20 Hz = $0,5 \text{ W/m}^2 = 12 \text{ Wh/m}^2.\text{dag} = €0,57/\text{m}^2.\text{j}$ (bij €0,13/kWh)
- 30 Hz = $1 \text{ W/m}^2 = 24 \text{ Wh/m}^2.\text{dag} = €1,15/\text{m}^2.\text{j}$ (bij €0,13/kWh)

De verhoogde menging geeft een productieverhoging van 20 %. Het loont om de schoepenraden harder te zetten en hiermee de menging en de groei te verbeteren als de algenopbrengst boven de €2.000/ton ds is.

3.3.9 Algenkwaliteit en afzet

De algen zijn geoogst met twee verschillende methoden, namelijk met behulp van flotatie of een trommelfilter. Bij beide methoden is er eerst een polymeer aan het algenwater toegevoegd zodat de algen samenklonteren. Zie figuur 12 en 13 voor de opgestelde oogstmachines.



Figuur 12: flotatie unit zoals opgesteld in Olburgen. De algen gaan drijven onder toevoeging van lucht



Figuur 13: de samengeklonte algen kunnen niet door het doek van de trommelfilter en worden geoogst

Om de waarde van de algen te bepalen is de kwaliteit van de geoogste algen geanalyseerd bij CCL Nutricontrol. Dit is vergeleken met de beschikbare waarden voor de GMP+ norm, tabel 7 en 8.

Parameter	Waarde	Eenheid	Omgerekend naar ds	eenheid	GMP+ norm
Koper	< 5,00	mg/kg	N.D.	mg/kg	25
Kalium	0,46	g/kg	15	g/kg	60
Cadmium	<10	µg/kg	N.D.	µg/kg	1000
Lood	214	µg/kg	6859	µg/kg	10000
Arseen	50	µg/kg	1603	µg/kg	40000
Kwik	< 10	µg/kg	N.D.	µg/kg	100
Ruw as (550°C)	5,2	g/kg	167	g/kg	
Ruwe celstof (kort)	1,5	g/kg	48	g/kg	
Ruw eiwit	16	g/kg	513	g/kg	
Vet (na zure hydrolyse)	2,2	g/kg	71	g/kg	
Droge stof	3,12	%		%	

Tabel 7: algenoogst geanalyseerd in augustus 2011, N.D. staat voor non detectable

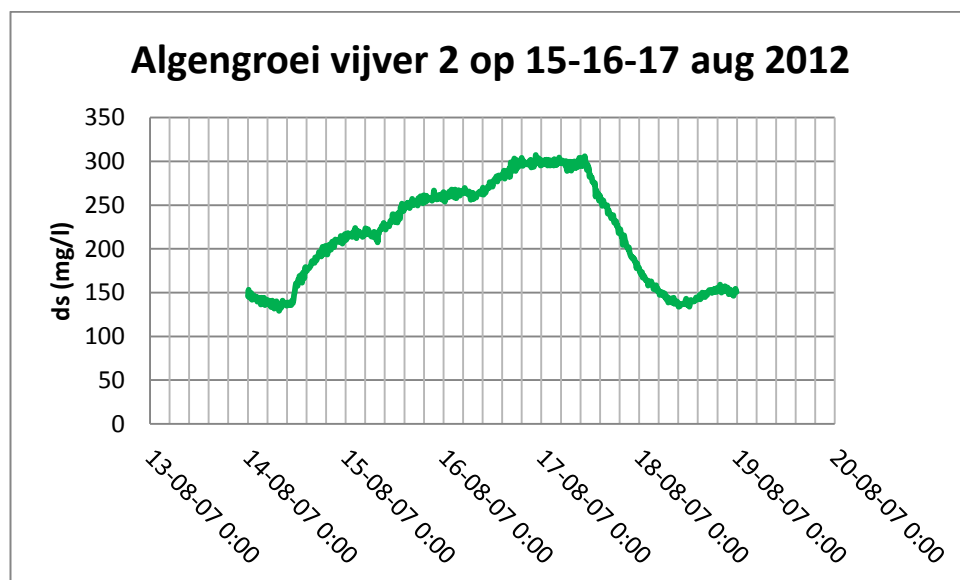
Parameter	Waarde	Eenheid	Omgerekend naar ds	eenheid	GMP+ norm
Fosfor	1,84	g/kg	18,4	g/kg	
Koper	< 5,00	mg/kg	N.D.	mg/kg	25
Zink	52,1	mg/kg	522,0	mg/kg	
Kalium	1,27	g/kg	12,7	g/kg	60
Cadmium	33	µg/kg	330,7	µg/kg	1000
Lood	455	µg/kg	4559,1	µg/kg	10000
Chroom	1197	µg/kg	11994,0	µg/kg	
Arseen	61	µg/kg	611,2	µg/kg	40000
Kwik	< 10	µg/kg	N.D.	µg/kg	100
Ruw as (550°C)	14	g/kg	140,3	g/kg	
Ruwe celstof (kort)	5,6	g/kg	56,1	g/kg	
Ruw eiwit	42	g/kg	420,8	g/kg	
Vet (na zure hydrolyse)	7,5	g/kg	75,2	g/kg	
N-Kjeldahl	6,71	g/kg	67,2	g/kg	
Droge stof	9,98	%		%	

Tabel 8: algenoogst geanalyseerd in september 2011

De algen lijken te voldoen aan de GMP+ norm. Alleen voor koper en kwik zijn de waarden niet te meten. Dit komt omdat de gemeten concentratie onder de detectie limiet ligt. Met een nauwkeurigere analysemethode zal blijken dat ook deze waarden onder de GMP+ norm liggen. Er is geen enkele reden om aan te nemen dat er veel koper of kwik in de algen zit. In het afvalwater zijn deze twee concentraties ook bepaald. De concentratie kwik in het afvalwater is $< 0,1 \mu\text{g/l}$ en de concentratie koper in het afvalwater ligt rond de $30 \mu\text{g/l}$. Wel is het zo dat bepaalde stoffen tot zeer hoge concentraties kunnen worden opgehoopt in cellen (biomagnificatie). Echter uit metingen is dit niet gebleken voor koper en zink. Als de algen voldoen aan de GMP+ norm is het mogelijk de algen af te zetten als diervoeder. Dit bepaalt de algenprijs. Gemiddelde voederprijzen zitten daar op €0,30 per kg droge stof. De verkoopprijs van algen uit Azië zit tussen de 3 en 400 euro per kg droge stof, afhankelijk van het type alg en kwaliteit. Huisdiervoeding zit hier een beetje tussenin (3-20 euro per kg droge stof). De door ons geproduceerde alg is te vergelijken met een Aziatische alg die zo'n € 4,50 per kilo gedroogde alg (droge stof) kost.

3.3.10 Maximaal behaalde algenproductie

Tijdens drie zonnige dagen in augustus 2011 waren de omstandigheden optimaal en is de hoogste groei tijdens de proefperiode behaald. Dit is gemeten met de droge stof sensor die in de vijver hing (zie grafiek 9). Tijdens deze dagen is een gemiddelde groei behaald van 50 mg/l/dag . Dit komt overeen met een groei van $22,5 \text{ g/m}^2/\text{dag}$. Stel dat deze waarde elke dag van het jaar behaald wordt (absoluut niet realistisch) dan heb je een groei van 82 ton ds/ha/jaar.



Grafiek 9: de algengroei is gemeten met een droge stof sensor. Je ziet een sterke groei op 15, 16 en 17 augustus. De afname op 18 augustus is te verklaren omdat de vijver op die dag geoogst is. Ook is duidelijk te zien dat algen overdag harder groeien dan 's nachts. 's Nachts is zelfs een afname te zien (respiratie).

Algen hebben een dagennachtritme. Overdag als de zon schijnt zetten ze CO_2 en de nutriënten N en P om in biomassa (alg) en zuurstof. Maar 's nachts vindt het omgekeerde proces plaats. Dan verbruiken de algen zuurstof en wordt biomassa omgezet in CO_2 . Dit proces wordt respiratie genoemd.

3.4 Deelconclusies

Uit het onderzoek is gebleken dat het lastig is om de algenkweek te optimaliseren. Voor een optimale lichtinbreng in de vijvers is het belangrijk de algenconcentratie in de vijvers niet te hoog op te laten lopen. Een ander belangrijk punt voor een optimale lichtinbreng is de vijver diepte. Initieel is gekozen voor een vijverdiepte van 30 cm maar door het opkomende grondwater is het onderzoek noodgedwongen uitgevoerd met een

vijverdiepte van 45 cm. Opkomend grondwater is dus een factor om rekening mee te houden bij de locatiekeuze voor een algenvijver.

Uit het nutriënten onderzoek is gebleken dat de concentratie ammonium in de vijver niet heel veel invloed heeft op de algengroei. Belangrijk is om ervoor te zorgen dat er altijd genoeg nutriënten in de vijver aanwezig zijn zodat dit niet de limiterende factor kan zijn voor algengroei. Hierbij moet rekening gehouden worden met de N:P ratio (molaire verhouding 16:1). Dit is de verhouding waarin de “gemiddelde” algen nutriënten opnemen. Hiervoor is een voedingsschema opgezet zodat de vijvers altijd voldoende nutriënten bevatten (zie bijlage 4).

Het CO₂ onderzoek heeft wisselende resultaten gegeven. Gezien de benodigde investering voor een CO₂ systeem en het gebruikte afvalwater waar waarschijnlijk voldoende bicarbonaat in zit om als C-bron te fungeren, is bij opschaling naar full-scale het niet haalbaar om extra CO₂ te doseren.

Overkapping lijkt niet rendabel bij algenfarming. Bij lichte vorst en overkapping van alleen de schoepenraden kunnen de vijvers nog ijsvrij gehouden worden, als de temperaturen onder de -5°C komen dan ligt de algenkweek helemaal stil.

Een goede filtering van de algenvijvers lijkt essentieel te zijn om goed te kunnen produceren. Deze factor is niet in het onderzoek opgenomen maar in de praktijk blijkt dit de belangrijkste parameter te zijn. Wordt er niet goed gefilterd dan leven er veel algenpredatoren (waaronder voornamelijk watervlooien) in de vijver. Dit zorgt ervoor dat alle algen afsterven en de vijver bruin kleurt.

Uit het mengonderzoek is naar voren gekomen dat een intensievere menging de algengroei bevordert. Uit onze resultaten is gebleken dat het loont om de schoepenraden harder te laten draaien.

De algenkwaliteit lijkt GMP+ waardig te zijn. Een constante algenafzet is echter niet te garanderen door wisselende marktprijzen. Dit is een aandachtspunt wanneer je op grote schaal algen gaat kweken.

3.5 Operationele aspecten algenfarming

Tijdens het onderzoek zijn er een aantal punten naar voren gekomen die in dit hoofdstuk nog eens extra toegelicht worden.

3.5.1 Winterperiode

Tijdens de winterperiode heeft het een aantal dagen stevig gevoren (zie grafiek 2). Dit heeft geresulteerd in het dichtvriezen van de vijvers. Tijdens deze periode is het natuurlijk niet mogelijk om algen te laten groeien. Met lichte vorst en overkapte schoepenraden is het wel mogelijk om de vijver operationeel te houden. Zie figuur 14 voor een impressie.



Figuur 14: ijsvorming in de onoverkapte vijver waardoor het onderzoek stil heeft gelegen

3.5.2 Overkapping

Overkapping van de gehele vijver vereist een te hoge investering om rendabel te zijn. Ook op het gebied van vergunningen kan overkapping problemen geven.

Met overkappen van alleen de schoepenraden kan voorkomen worden dat de vijvers bij lichte vorst dichtvriezen. Mocht de vijver toch overkapt worden dan hebben wij ondervonden dat dit in de zomer voor hoge temperaturen in de vijver zorgt waardoor de algen kunnen afsterven. Ook is het belangrijk om een degelijke constructie te bouwen die niet bij de eerste storm kapot waait (zie figuur 15). Dit brengt natuurlijk wel hogere kosten met zich mee.



Figuur 15: stormschade aan de overkapping, februari 2011

3.5.3 Filtratie van het algenwater

Zoals eerder vermeld is filtratie van de algenvijvers heel belangrijk gebleken. In eerste instantie is er per vijver een filter geïnstalleerd (zie figuur 16). De functie van deze filters was om het voedingswater te filteren en om de vijvers te filteren. Het debiet van het vijverwater over het filter bleek echter te laag om de predatoren van de alg uit de vijver te filteren (maximaal $2 \text{ m}^3/\text{uur}$). Als oplossing hiervoor is een eenvoudige trommelfilter gebruikt met een debiet van $\pm 20 \text{ m}^3/\text{uur}$ (zie figuur 17). Door dagelijks de trommelfilter op een andere vijver aan te sluiten is het mogelijk gebleken de vijvers gezond te houden. Het gebruikte filterdoek had een poriegrootte van $60 \mu\text{m}$. Bij deze grootte kunnen de algen er makkelijk doorheen stromen (algengrootte $\approx 10 \mu\text{m}$) en blijven de watervlooien en raderdiertjes achter op het filter.



Figuur 16: doekfilter in gebruik om het algenwater en de voeding te filteren



Figuur 17: trommelfilter waarmee het algenwater wordt gefiltreerd

4. Modelontwikkeling en haalbaarheid

Om de haalbaarheid van een full-scale algenfarm te onderzoeken is er een economisch model opgesteld (zie bijlage 5 voor details van dit model). In dit model zijn de praktijkgegevens van het onderzoek in Olburgen verwerkt. Voor full-scale installaties van 1, 5 en 10 hectare is de algenkostprijs berekend met behulp van dit model.

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij de investering, het aantal manuren en de algenproductie is gevarieerd. De geschatte opbrengstprijs voor een 6 % droge stof algensuspensie is €2,50/kg droge stof. Het project wordt haalbaar beschouwd als de kostprijs onder dit bedrag uitkomt.

investering

Uit het economisch model is bij elke vijvergrootte een te verwachte investering berekend. Zie onderstaande tabel. Met dit bedrag kan de gehele algenvijver inclusief oogstapparatuur gebouwd worden. Droging van de alg is niet inbegrepen.

Vijvergrootte	Investering	Investering per ha
1 ha	€373.000	€373.000
5 ha	€1.359.000	€271.800
10 ha	€2.507.000	€250.700

Tabel 9: geraamde investering bij variërende vijvergrootte

algenproductie

De algenproductie is theoretisch bepaald met een model, beschreven door Radmer et al. Deze waarde wordt vervolgens nog gecorrigeerd voor de temperatuur.

Uitgaande van dit rekenmodel, en de in de proefperiode behaalde algengroeisnelheden, hebben wij een algenproductiewaarde bepaald die wij realistisch achten voor de algengroei met afvalwater van een aardappelverwerkende industrie. Deze waarde voor de algenproductie is bepaald op 18,3 ton ds/ha/jaar.

manuren

- bij het aantal manuren is er vanuit gegaan dat één fte gelijk staat aan 1860 uur;
- bij 1 ha is gerekend met respectievelijk 0,5 - 1 en 1,5 fte;
- bij 5 en 10 ha is gerekend met 1 - 1,5 en 2 fte;
- een half fte is gelijk aan €41.850 loonkosten per jaar.

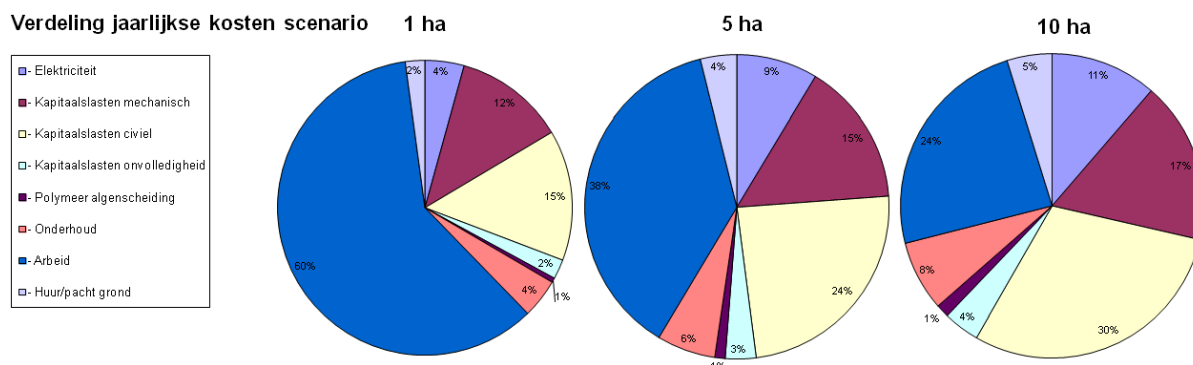
scenario's

De volgende scenario's zijn gebruikt in de gevoeligheidsanalyse voor 1, 5 en 10 ha. De 100 % waarde onder investering en algenproductie is de waarde zoals deze door ons bepaald is en toegelicht in bovenstaande tekst.

Investering	Algenproductie	Manuren (1 ha)	Manuren (5 & 10 ha)
1. 60 %	1. 60 %	1. 0,5 fte	1. 1 fte
2. 80 %	2. 80 %	2. 1 fte	2. 1,5 fte
3. 100 %	3. 100 %	3. 1,5 fte	3. 2 fte
4. 120 %	4. 120 %		
5. 140 %	5. 140 %		

Tabel 10: verschillende scenario's gebruikt in de gevoeligheidsanalyse

Om een beter beeld te krijgen van de verdeling van de jaarlijkse kosten bij verschillende vijvergroottes zijn de kosten van de meest waarschijnlijke situatie per vijvergrootte geplot in een taartdiagram (zie figuur 18). Wat opvalt, is dat het aandeel van de loonkosten erg hoog is bij een vijver van 1 hectare (60 %). Naarmate de vijver groter gedimensioneerd wordt neemt het aandeel arbeid af. Dit is ook logisch omdat een vijver van 10 hectare niet tien keer zoveel arbeid kost als een vijver van 1 hectare. Bij een vijver van 10 hectare wordt het juist heel belangrijk om de investeringskosten niet te hoog op te laten lopen. Deze post maakt bij een vijver van 10 hectare meer dan 50 % uit van de jaarlijkse kosten.



Figuur 18: vergelijking jaarlijkse kosten algenfarming bij verschillende oppervlaktes

Voor elk scenario is de algenkostprijs per kg drogestof berekend, uitgaande van een 6 % algenoplossing.

Investering	Algenkostprijs 1 ha (€/kg)	Algenkostprijs 5 ha (€/kg)	Algenkostprijs 10 ha (€/kg)
60 %	6,67	2,97	2,19
70 %	6,89	3,16	2,36
80 %	7,16	3,33	2,52
90 %	7,38	3,50	2,68
100 %	7,65	3,67	2,85
110 %	7,92	3,88	3,01
120 %	8,20	4,04	3,18
130 %	8,42	4,23	3,34
140 %	8,63	4,40	3,51

Tabel 11: gevoeligheid van de investering op de algenkostprijs bij gelijkblijvende algenproductie (18,3 ton/ha/jaar) en gelijkblijvende loonkosten (1 fte bij 1ha; 1,5 fte bij 5 & 10 ha)

Algenproductie	Algenkostprijs 1 ha (€/kg)	Algenkostprijs 5 ha (€/kg)	Algenkostprijs 10 ha (€/kg)
60 %	12,66	6,08	4,72
70 %	10,93	5,23	4,05
80 %	9,56	4,58	3,55
90 %	8,50	4,07	3,16
100 %	7,65	3,67	2,85
110 %	6,95	3,34	2,59
120 %	6,38	3,06	2,38
130 %	5,88	2,83	2,20
140 %	5,46	2,63	2,05

Tabel 12: gevoeligheid van de algenproductie (100 % = 18,3 ton ds/ha/jr) bij gelijk blijvende investeringskosten en gelijkblijvende loonkosten

fte	Algenkostprijs 1 ha (€/kg)	Algenkostprijs 5 ha (€/kg)	Algenkostprijs 10 ha (€/kg)
0,5 fte	5,36	2,75	2,39
1 fte	7,65	3,21	2,62
1,5 fte	9,95	3,67	2,85
2 fte	12,19	4,14	3,07

Tabel 13: gevoeligheid van de manuren bij gelijk blijvende algenproductie (18,3 ton/ha/jaar) en bij gelijk blijvende investeringskosten

Voor elke mogelijke combinatie van de variabelen is een algenkostprijs berekend, hierin zijn de uitersten niet meegenomen. Hierbij is voor 1 hectare geen enkel scenario dat onder de €2,50 /kg ds zit. Voor 5 hectare is er maar één scenario dat aan deze voorwaarde voldoet. Bij 10 hectare zijn er meerdere scenario's waarbij de algen geproduceerd worden met een kostprijs onder € 2,50/kg ds (zie tabel 14).

5 ha	10 ha
2.4.1 (80 % invest, 120 % prod, 1 fte)	2.3.1 (80 % invest, 100 % prod, 1 fte)
	2.4.1 (80 % invest, 120 % prod, 1 fte)
	2.4.2 (80 % invest, 120 % prod, 1,5 fte)
	2.4.3 (80 % invest, 120 % prod, 1 fte)
	3.4.1 (100 % invest, 120 % prod, 1 fte)
	3.4.2 (100 % invest, 120 % prod, 1,5 fte)
	4.4.1 (120 % invest, 120 % prod, 1 fte)

Tabel 14: haalbare scenario's

Om een financieel rendabele algenfarming te bedrijven lijkt het noodzakelijk om 10 hectare algenvijver te bouwen. Er moeten ook in bijna alle gevallen meer algen worden geproduceerd dan dat er mogelijk wordt geacht op basis van het proefonderzoek.

5. Conclusies

Tijdens de onderzoeksperiode is veel praktijkervaring opgedaan. Hierdoor is er een goed inzicht ontstaan in wat er allemaal bij algenfarming komt kijken. De praktijkervaring in combinatie met het onderzoeksprogramma hebben meerdere conclusies opgeleverd.

Zo is het mogelijk gebleken om op grote schaal algen te groeien met afvalwater als nutriëntenbron. Dit is geheel volgens het “cradle to cradle” principe waarbij afval weer opgewaardeerd wordt tot voedsel.

Uit het proefonderzoek is naar voren gekomen dat filtering van de vijvers het belangrijkste aspect is voor gezonde algenvijvers. Wordt het water niet goed gefilterd dan krijgen predatoren van de alg (watervlooien, raderdiertjes) een kans om zich in de vijver te nestelen. Dit heeft zeer negatieve effecten op de algengroei. Een continue filtering met een hoog debiet is dus erg belangrijk. Aan te bevelen is om minimaal de gehele vijverinhoud dagelijks te filteren. De poriegrootte van het gebruikte filterdoek was 60 μm . Bij deze poriegrootte kan de alg makkelijk door het filter heen en blijven de predatoren achter.

Om te voorkomen dat de algen bezinken in de vijver is er een minimale watersnelheid nodig. Om overal een constante watersnelheid te behalen moet er wel rekening worden gehouden met het ideale stromingsprofiel van een algenvijver (zie figuur 8). Het proefonderzoek heeft tevens aangetoond dat verhogen van de watersnelheid van 0,3 m/s naar 0,5 m/s zorgt voor 20 % meer algengroei. Deze extra algengroei weegt op tegen het verhoogde energieverbruik. Het is aan te raden de menging harder te zetten.

Het opkomende grondwater heeft het onderzoek beperkt omdat de vijverdiepte niet goed gevarieerd kon worden. Bij 30 cm vijverdiepte kwam het grondzijl regelmatig omhoog waarbij het gevaar ontstond dat het grondzeil in de schoepenraden terecht kwam. Hieruit is het inzicht ontstaan om bij een toekomstig ontwerp rekening te houden met de grondwaterstand. Een optie zou kunnen zijn om het grondzeil op het land te leggen bij percelen met een hoge grondwaterstand.

Het CO₂ onderzoek heeft geen eenduidig beeld laten zien. Wel is uit het onderzoek naar voren gekomen dat bij CO₂ dosering de pH omlaag gebracht wordt. Bij een lage pH hebben we ondervonden dat we meer watervlooien en raderdiertjes in de vijver aantreffen. Verder is gebleken dat er in het aardappelwater veel bicarbonaat aanwezig is. Dit kan ook fungeren als koolstofbron voor de alg. Dit heeft ons doen besluiten om geen extra proef te doen met rookgassen maar extra in te zetten op filtratie van de vijvers.

Overkapping van de algenvijvers resulteert gemiddeld in een watertemperatuur verhoging van 5 °C. In de winterperiode betekent dit dat je langer door kunt gaan met algenfarming als het vriest. In de zomer hebben we ondervonden dat wanneer de watertemperatuur onder de overkapping oploopt tot boven de 35 °C, er een klimaat ontstaat waarin de algen afsterven. Behalve dit negatieve effect is investeren in een overkapping op het moment nog te duur om rendabel te kunnen zijn.

Voor de algengroei is het belangrijk dat er altijd voldoende nutriënten in het vijverwater aanwezig zijn. Tijdens het onderzoek is gestuurd op 20 mg/l N (NO₃-N + NH₄-N) en 3 mg/l P (ortho-P). Hierdoor zijn deze nutriënten nooit de limiterende factor voor algengroei. Op deze manier is het niet mogelijk het afvalwater vergaand te zuiveren. De kwaliteit van het effluent is altijd gelijk aan de samenstelling van het vijverwater.

Uit het onderzoeken van de financiële haalbaarheid van algenfarming op grotere schaal is gebleken dat er een minimale schaalgrootte van 10 hectare nodig lijkt te zijn om het geheel economisch rendabel te maken. Ook moet de door ons ingeschatte jaarlijkse algenproductie van 18,3 ton ds/ha/jaar altijd gehaald worden.

Als de geoogste algen gebruikt worden als soja vervanger in diervoeders dan kan algenfarming niet concurreren met de teelt van bijvoorbeeld snijmaïs.

Maar stel dat de algenopbrengst door niche-marketing kan worden verhoogd naar €4,00/kg droge stof in een 6 % ds algenooft, dan is het project weer kansrijk.

Een gegarandeerde algenafzet tegen een goede prijs is nu de bottleneck in dit project.

Bijlage 1

KWEEK VAN ALGEN OP PROCESWATERS VAN WATERSTROMEN IN OLBURGEN (ALGENFARMING)

VOORLOPIGE RESULTATEN VAN DE GROEIPROEVEN



Cliënt	Projectnummer	Datum	Revisie	Status
Project Algenfarming	P002	24-1-2010	V101	Concept
Auteurs:	A.M. Verschoor			
Copyright © 2010, Ingrepro Renewables BV, Heure 6b, 7271 PA Borsculo, Nederland (KvK 09202157). Behoudens de in of krachtens de wet gestelde uitzonderingen mag niets uit dit werk verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt, op welke wijze dan ook en evenmin worden opgeslagen, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Ingrepro Renewables BV, Nederland.				

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	366
1.1.	Aanleiding.....	366
2.	Materiaal en methoden.....	366
2.1.	Eerste verkennende groeiproef	366
2.2.	Tweede en derde groeiproef (stagair)	366
2.3.	Vierde groeiproef (stagair).....	37
2.4.	Vijfde groeiproef	37
3.	Resultaten	37
3.1.	Eerste verkennende groeiproef	37
3.2.	Tweede en derde groeiproef	38
3.3.	Vierde groeiproef	41
3.4.	Vijfde groeiproef	44
4.	Discussie.....	46
4.1.	Samenstelling gebruikte wateren	46
4.2.	Beschikbaarheid nutriënten en licht	47
5.	Conclusies en aanbevelingen	49
6.	Literatuur	49

Inleiding

Aanleiding

Dit rapport beschrijft de ervaringen met de algengroeioproeven die zijn uitgevoerd op wateren afkomstig uit 4 opeenvolgende processtappen in de verwerking van afvalwater uit de aardappelindustrie bij Waterstromen in Olburgen. Om de algengroei op deze wateren te bestuderen zijn in 2010 door verschillende personen verschillende groeiproeven uitgevoerd. De algemene indruk is dat deze proeven niet altijd een even duidelijk beeld geven over welk proceswater de beste algengroei oplevert. Daarom worden de resultaten van deze groeiproeven hier gezamenlijk gepresenteerd en geanalyseerd.

Materiaal en methoden

Voor alle groeiproeven is gebruik gemaakt van de 'huisalg' van Ingrepo, *Chlorella fusca*. De gebruikte wateren zijn:

- ruw aardappelinfluent (RAW);
- effluent van anaeroob gezuiverd aardappelwater (ANA);
- (2) behandeld met een fosfaatverwijderingsstap (struvietvorming in Phospaq proces: FOS);
- (3) behandeld in een Anammox-reactor (AMX).

Eerste verkennende groeiproef

In januari is bij Ingrepo een eerste verkennende test gedaan met 2 soorten water uit Olburgen: 1. Anammox en 2. Anaeroob effluent. Hierbij is gekeken naar de groei op:

- Puur Anammox-water (AMX)
- Puur Anaeroob effluent (ANA)
- Een mengsel van beide (M).

De groeiproeven zijn uitgevoerd op het volledige water (B, met bezinksel) en op supernatant van water dat 4 dagen bezonken is in een Imhoff-bezinkvat (S, supernatant); dit levert 6 behandelingen op, welke elk in duplo zijn uitgevoerd. Vanwege gewinning aan de lichtintensiteit (de algen waren afkomstig uit een donkere melkkoeltank) is de lichtintensiteit gedurende de eerste dagen langzaam opgevoerd. De proef duurde in totaal 8 dagen.

Tweede en derde groeiproef (stagiair)

Tijdens de stage van de eerste stagiair zijn tenminste 3 groeiproeven met algen uitgevoerd. De omstandigheden van deze groeiproeven zijn lastiger te interpreteren omdat hierin niet alles even goed is gedocumenteerd. Er is een vijverproef uitgevoerd, helaas zijn de data hiervan niet terug te vinden. Daarnaast zijn er twee kleinschaliger groeiproeven uitgevoerd:

1. Een 10-daagse groeiproef met 6 verschillende soorten testwater. Op basis van de grafieken in het verslag zijn enkele berekeningen gedaan;
2. Een 4-daagse laboratoriumgroeiproef met AMX en RAW-AMX, uitgevoerd in triplo en ruwe data nog aanwezig.

Getracht is om deze data zo goed mogelijk te reconstrueren aan de hand van verslagen, presentaties en eigen herinnering.

Vierde groeiproef (stagiair)

Tijdens de stage van de tweede stagiair is een vierde algengroeioproef uitgevoerd op alle wateren (RAW, ANA, FOS, AMX, zowel puur als in 50-50 mengsels (10 mogelijke combinaties), waarbij supernatant werd gebruikt van materiaal dat 1 uur was voorbezonden (Imhoff). De 10 mogelijke combinaties zijn terugverdund naar 4 verschillende stikstofconcentraties: 1,2,10 en 80 mg N/L, en leidingwater is meegenomen als controle. De proef had een looptijd van 7 dagen.

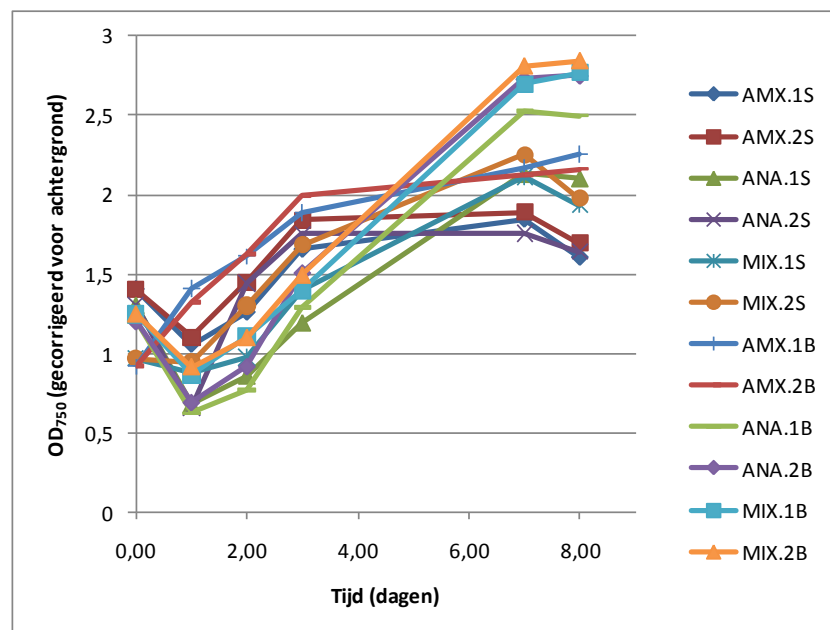
Vijfde groeiproef

De vijfde groeiproef had als doel om de ideeën die tijdens de eerdere proeven waren ontstaan, te bevestigen. Daarom is hier uitgegaan van één stikstofconcentratie (25 mg N/L) en zijn de waters met ruw aardappelinfluent (RAW) weggelaten. Hierdoor blijven 6 verschillende combinaties over (ANA, FOS, AMX, ANA/FOS, ANA/AMX, FOS/AMX), welke in triplo zijn onderzocht. De proef liep 9 dagen.

Resultaten

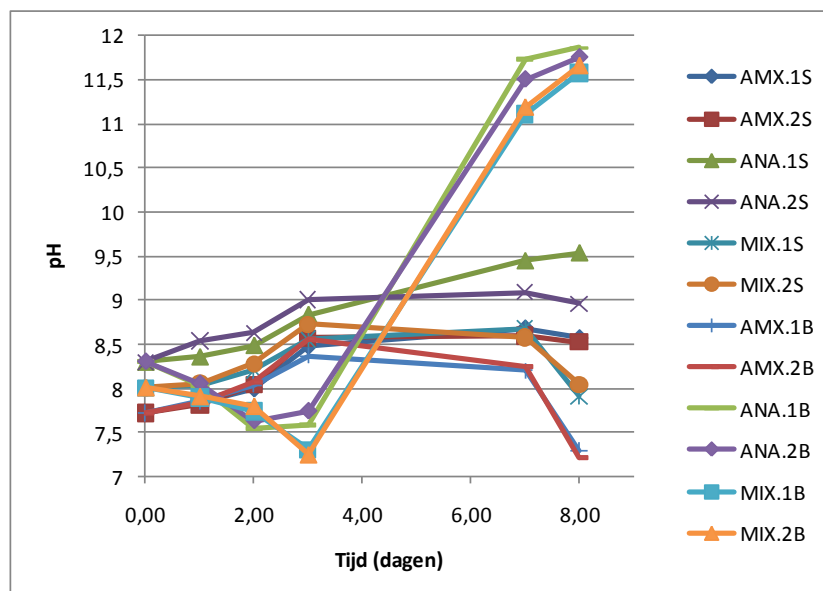
Eerste verkennende groeiproef

Aan het verloop van de OD (optische dichtheid) tijdens de eerste groeiproef is te zien dat deze voor de meeste behandelingen daalt tijdens de eerste dag, behalve voor supernatant van anammox water (Afbeelding 1). Waarschijnlijk is dit het gevolg van het feit dat hier nauwelijks meer slib aanwezig is (alhoewel wel is gecorrigeerd voor achtergrondextinctie). Ondanks het dalen van de optische dichtheid tijdens de eerste dag neemt deze daarna snel toe. AMX laat na zo'n 3 dagen geen verdere groei meer zien, terwijl ANA en MIX nog een week blijven doorgroeien. De hoogste OD wordt uiteindelijk gehaald in ANA en MIX waarin nog slib aanwezig is (B).



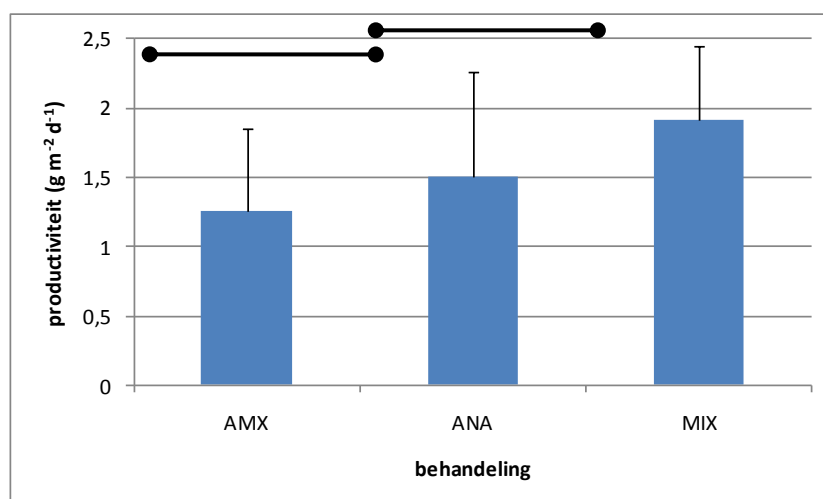
Afbeelding 1. Verloop van de optische dichtheid (OD) in de tijd bij de eerste groeiproef.

De pH (afbeelding 2) laat een vergelijkbaar patroon zien, maar de initiële daling in ANA en MIX met bezinksel duurt hier nog langer, 2-3 dagen. Hierna treedt een sterke stijging op van de pH, wat wijst op koolstoflimitatie; door carbonaat opname neemt de bufferende werking van het medium af.



Afbeelding 2. Verloop van de pH in de tijd bij de eerste groeiproef.

Voor de gemiddelde productiviteit over 8 dagen wordt een significant medium effect gevonden (2-weg ANOVA, $F_{2,6}=12,03$, $p=0,0080$) en een significant bezinkseleffect ($F_{1,6}=94,51$, $p<0,0001$). In afbeelding 3 staan de homogene groepen weergegeven voor de effluenttypes. Verder is de productiviteit in alle groepen met bezinksel 2x zo hoog als in de groepen zonder bezinksel ($p<0,05$; $S=1,02 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $B=2,09 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

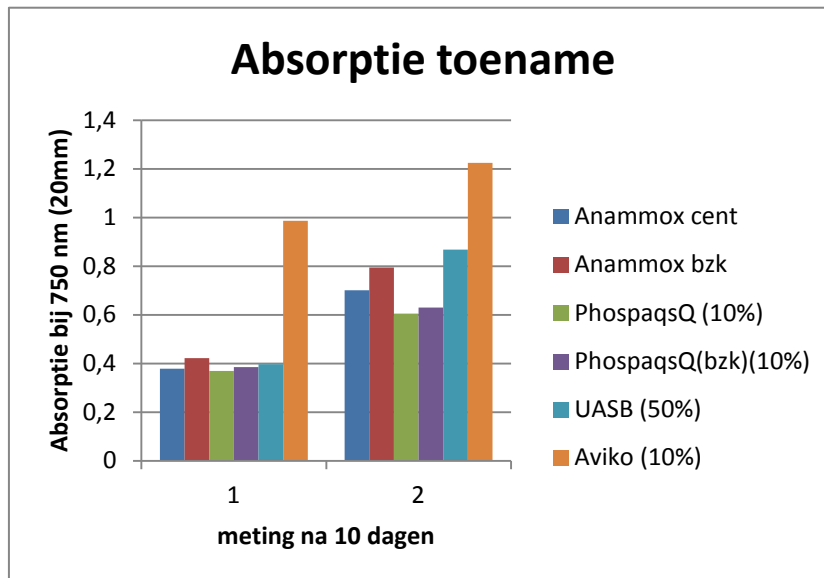


Afbeelding 3. Gemiddelde productiviteit in de eerste groeitest. Foutbalken geven standaarddeviatie weer. Horizontale lijnen geven homogene groepen weer (=niet significant verschillend bij $p<0,05$).

Uit deze proef komt het volgende patroon naar voren: ANA/AMX>ANA>AMX.

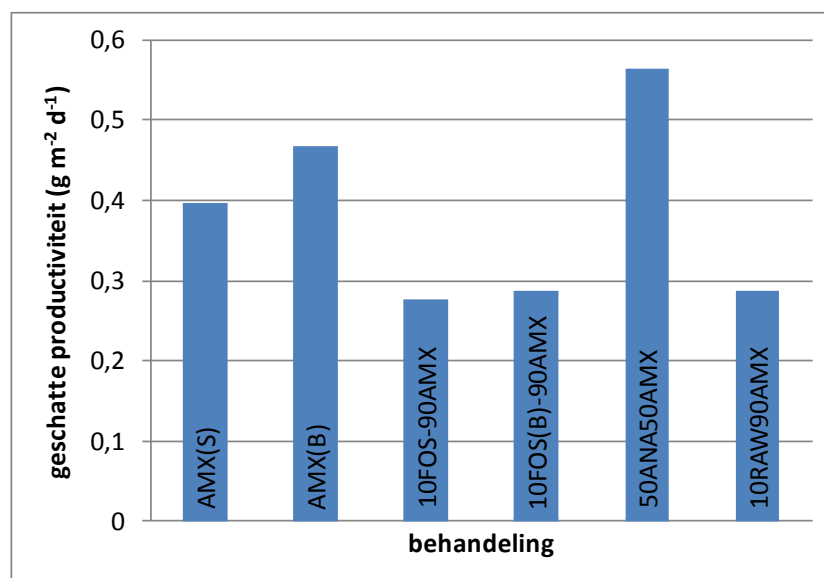
Tweede en derde groeiproef

In afbeelding 4 staat een van de belangrijkste resultaten m.b.t. algengroei op effluentwater uit het verslag van de stagiair vermeld.



Afbeelding 4. Resultaten eerste groeiproef.

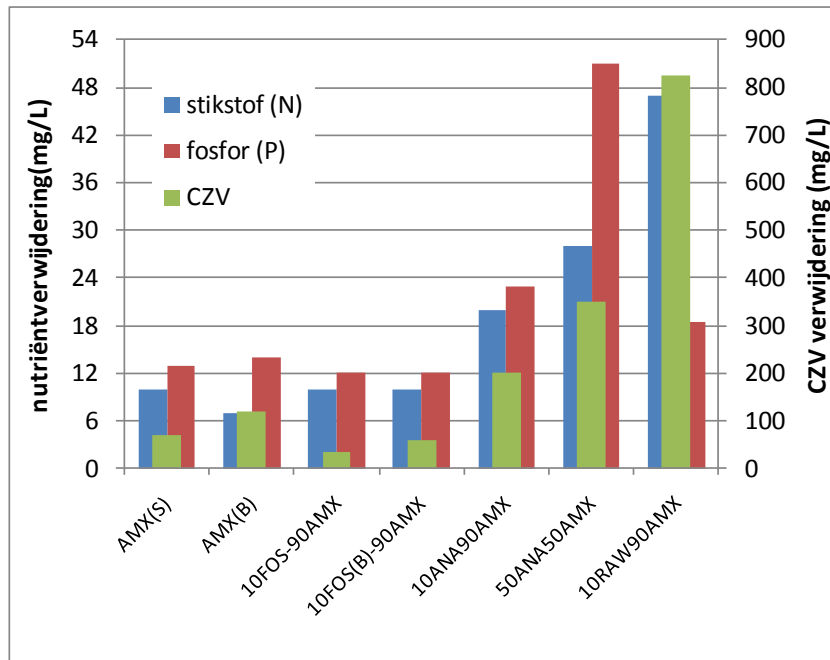
Hiermee kan een indicatie van de gemiddelde productiviteit per behandeling worden gekregen (afbeelding 5, aangenomen dat “1” de data van dag 0 zijn, en “2” de data van dag 10).



Afbeelding 5. Geschatte productiviteit in de eerste groeiproef.

De resultaten hiervan dienen (uiteraard) vooral kwalitatief gezien te worden, maar geven desalniettemin een duidelijk patroon weer in de effecten op de groeisnelheid: ANA+AMX>AMX>overig.

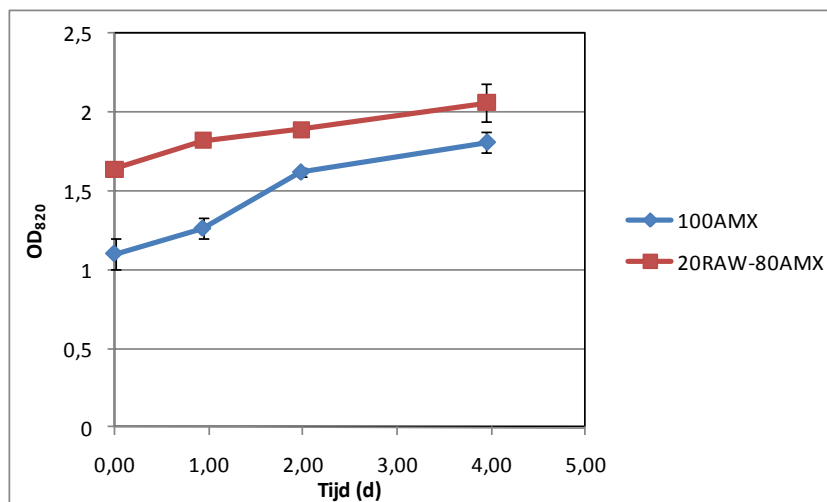
In deze groeiproef zijn ook de nutriënten bij aanvang en na afloop gemeten, zodat ook de verwijdering van stikstof, fosfor en CZV (afbeelding 6) geschat kon worden. In deze data staat nog een zevende behandeling, welke niet voorkomt bij de OD-metingen: 10ANA-90AMX (vijfde van links).



Afbeelding 6. Geschatte nutriëntverwijdering in de eerste groeiproef.

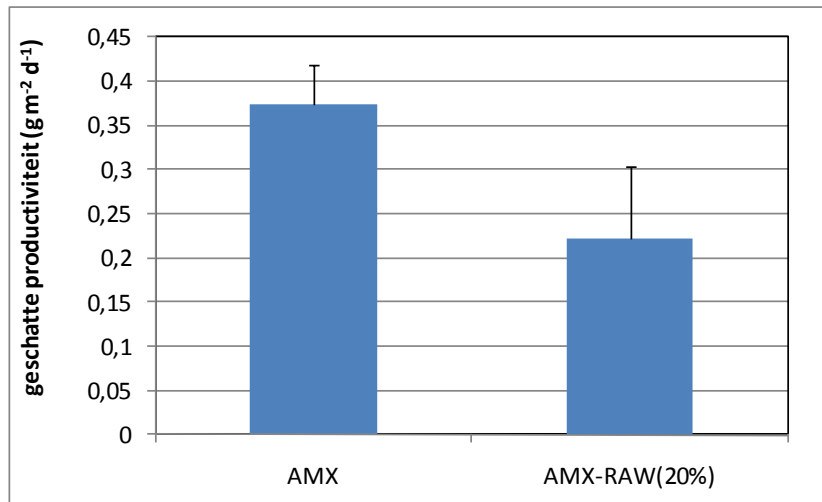
Wat verder opvalt in deze proef is dat de nutriëntverwijdering veel hoger is dan wat puur op basis van algengroei zou mogen worden verwacht: een OD-toename tussen 0,2 en 0,5 betekent een drooggewichtstijging van 40-100 mg/L droge stof. Bij een N-gehalte van 8,8% en een P-gehalte van 1,2% kan dus een N-verwijdering van 3,5-9 mg N/L verwacht worden, en een P-verwijdering van 0,5-1,25 mg P. Er lijken dus ook andere processen op te treden die zorgen voor extra N- en P-verwijdering (zie discussie).

In de derde groeiproef zijn AMX en RAW/AMX (20/80) met elkaar vergeleken. De belangrijkste gegevens van deze proef staan weergegeven in afbeelding 7.



Afbeelding 7. Verloop van OD in de tijd in de 3e groeiproef. Foutbalken geven standaarddeviatie weer.

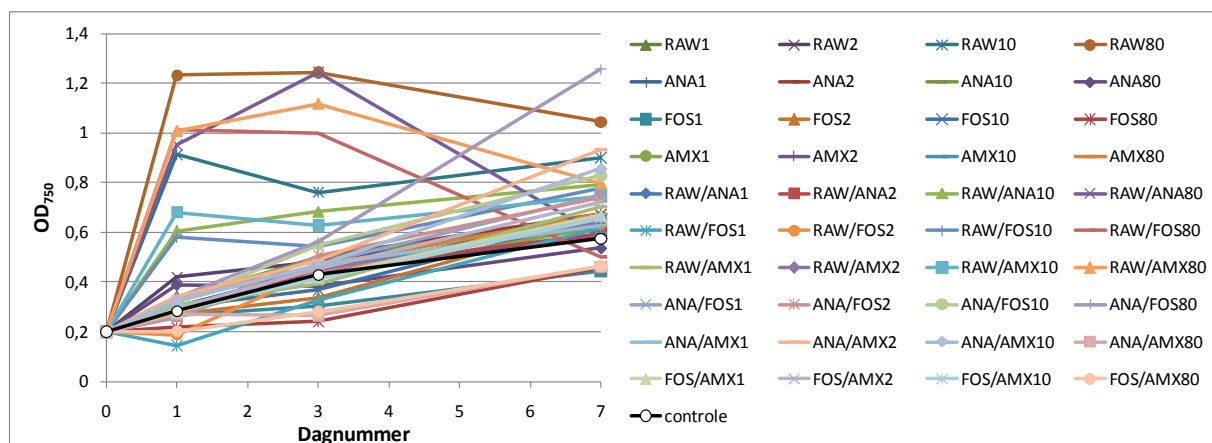
De geschatte productiviteit laat een iets andere trend zien voor beide behandelingen (Afbeelding 8; $p=0,067$, $T=2,82$, $df=3,3$); deze productiviteiten komen redelijk overeen met de waarden uit de eerste groeiproef (Afbeelding 5).



Afbeelding 8. Geschatte productiviteiten in de derde groeiproef. Foutbalken geven standaarddeviatie weer.

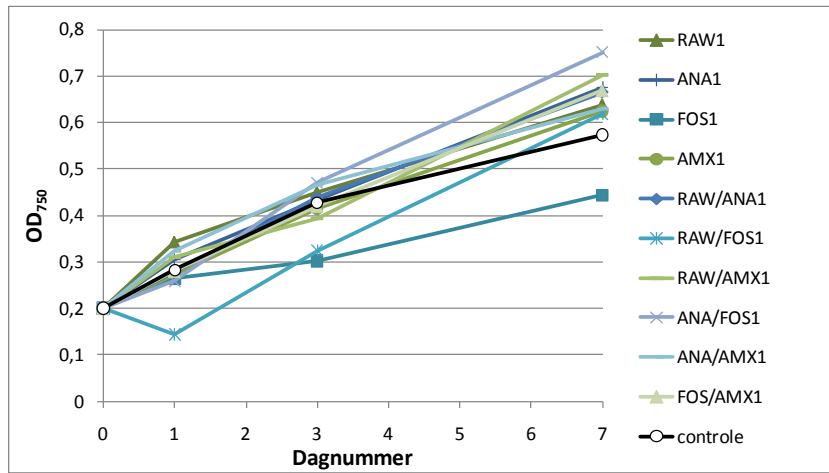
Vierde groeiproef

De vierde groeiproef laat niet direct een eenduidig beeld zien (afbeelding 9). Sommige onverdunde waters, met name die van ruw aardappelinfluent (RAW) zijn dermate troebel dat deze voor een 3- tot 6-voudige OD-toename zorgen tijdens de eerste dag, terwijl de OD later weer afneemt.



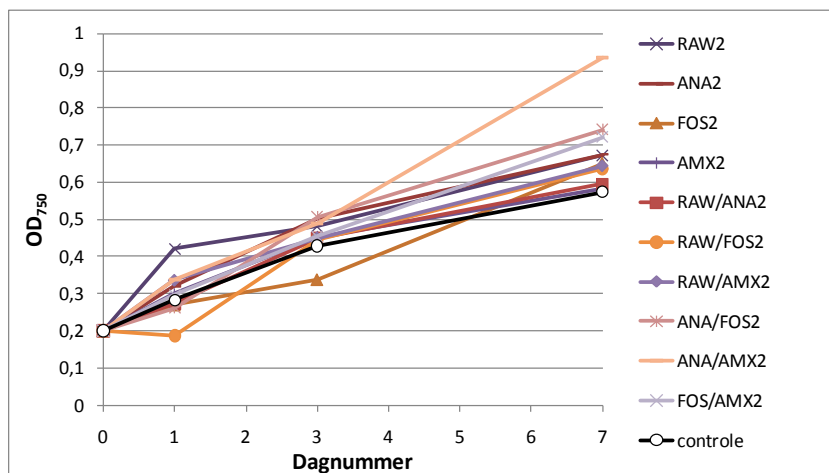
Afbeelding 9. Optische dichtheid (OD) tijdens de vierde groeiproef.

Per nutriëntconcentratie is al een duidelijker patroon te zien. Bij 1 mg stikstof per liter (Afbelding 10) is de hoogste einddichtheid rond 0,75 (ANA/FOS1) op: deze is zo'n 30% hoger dan de OD van de controle (leidingwater). De minste groei treedt op bij puur FOS.



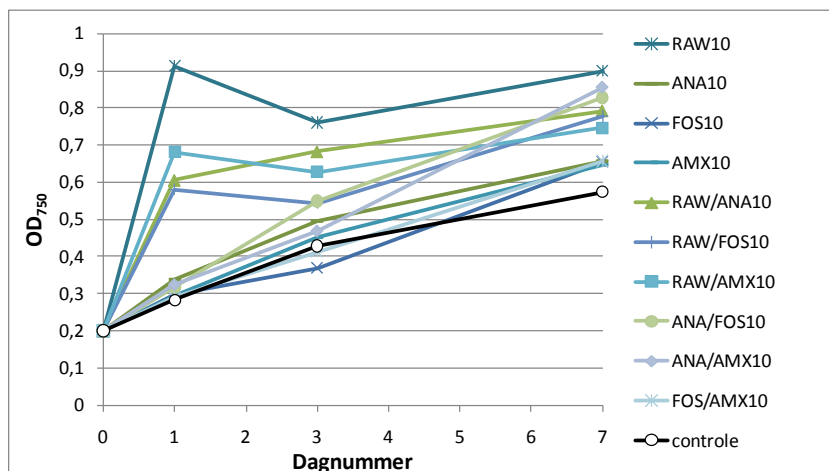
Afbeelding 10. Alle behandelingen met 1 mg N/L.

Bij 2 mg/L heeft de behandeling ANA/FOS2 een vergelijkbare einddichtheid als bij 1 mg/L, alleen komt de behandeling ANA/AMX hier veel hoger uit (Afbeelding 11). De einddichtheid van deze behandeling is meer dan 60% hoger dan de controle. Ook hier vindt nauwelijks groei plaats in puur FOS.



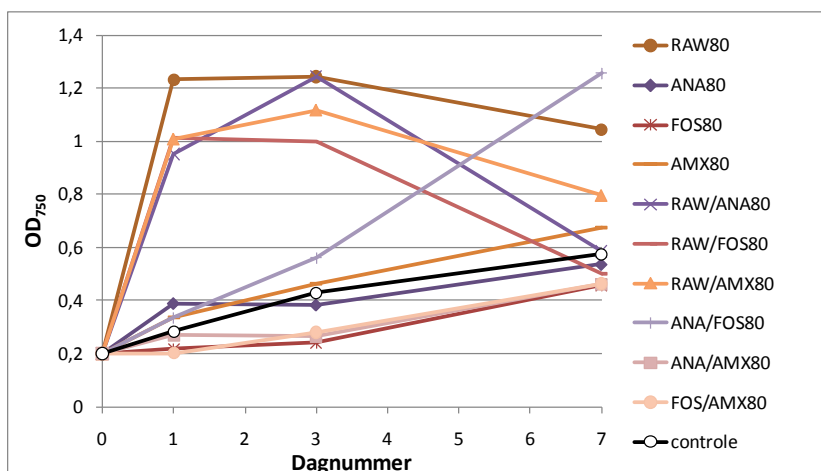
Afbeelding 11. Alle behandelingen met 2 mg N/L.

Bij 10 mg/L wordt het effect van troebele proceswaters goed merkbaar. Dit is goed te zien bij ruw aardappelinfluent (RAW) en mengsels daarvan met andere wateren, maar kennelijk ook bij puur anaerob effluent (ANA) (Afbeelding 12). Net als bij 2 mg/L wordt de hoogste einddichtheid behaald bij ANA/AMX (bijna 50% hoger dan de controle), met ANA/FOS als goede tweede. Puur FOS laat weer de minste groei zien.



Afbeelding 12. Alle behandelingen met 10 mg N/L.

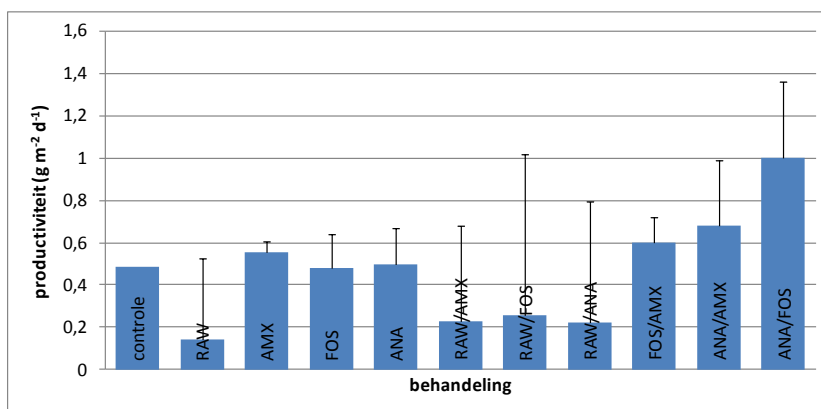
Bij 80 mg stikstof per liter is heel duidelijk het effect te zien van troebel proceswater, zowel voor RAW als voor ANA. Wanneer deze buiten beschouwing worden gelaten is veruit de snelste groei te zien in ANA/FOS, waarvan de einddichtheid ruim dubbel zo hoog uitkomt als de controle. Ook hier laat FOS nauwelijks groei zien, evenals ANA/AMX en FOS/AMX.



Afbeelding 13. Alle behandelingen met 80 mg N/L.

Tenslotte staan in afbeelding 14 de geschatte productiviteiten weergegeven voor iedere behandeling, gemiddeld over de verschillende nutriëntconcentraties (1,2,10,80). In deze figuur valt vooral ANA/FOS op als behandeling met de hoogste productiviteit, gevolgd door ANA/AMX en FOS/AMX.

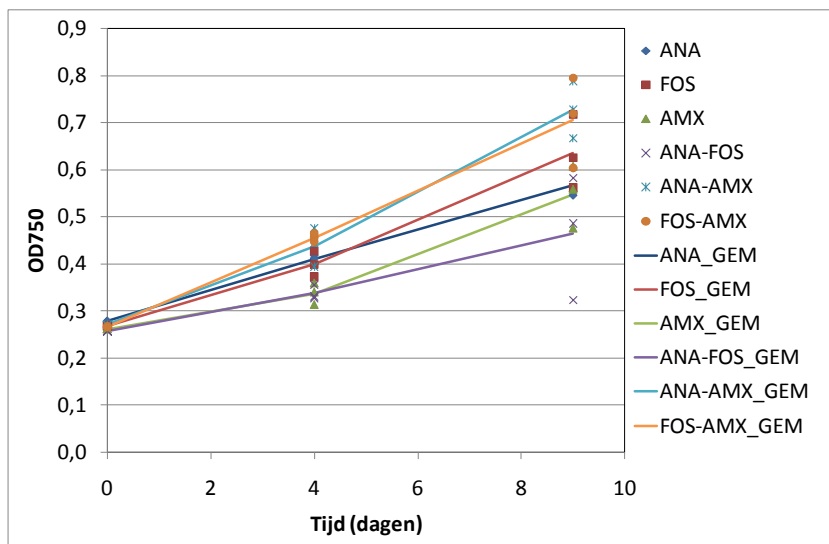
en alle mengsels met RAW als behandelingen met de laagste productiviteit, ook lager dan de controle (leidingwater). ANA/AMX haalde soms de hoogste productiviteiten, maar ook eenmaal een van de laagste (ANA/AMX80), maar gemiddeld behoort deze behandeling toch nog tot een van de hogere.



Afbeelding 14. Gemiddelde productiviteit over dag 1-7 van de vierde groeiproef. Foutbalken geven standaarddeviatie weer.

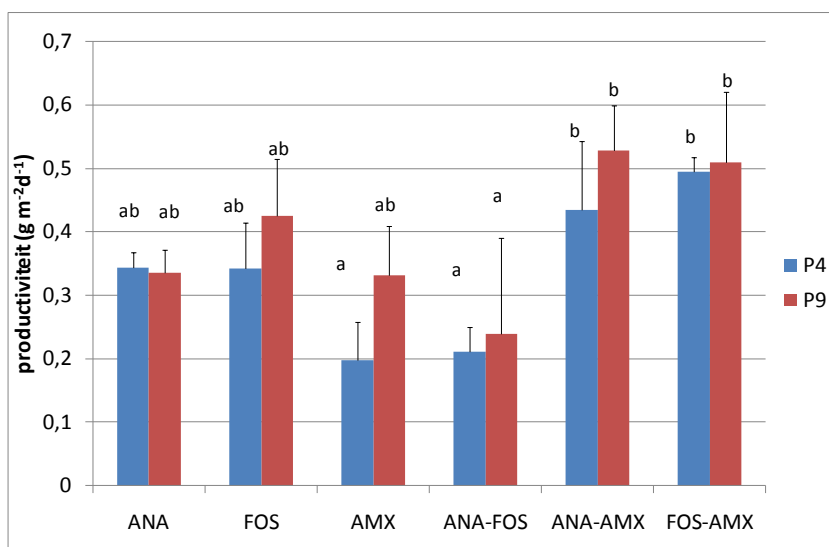
Vijfde groeiproef

In afbeelding 15 staan de resultaten vermeld van de vijfde groeiproef. Hier komen ANA/AMX en FOS/AMX als snelste groeiers naar voren.



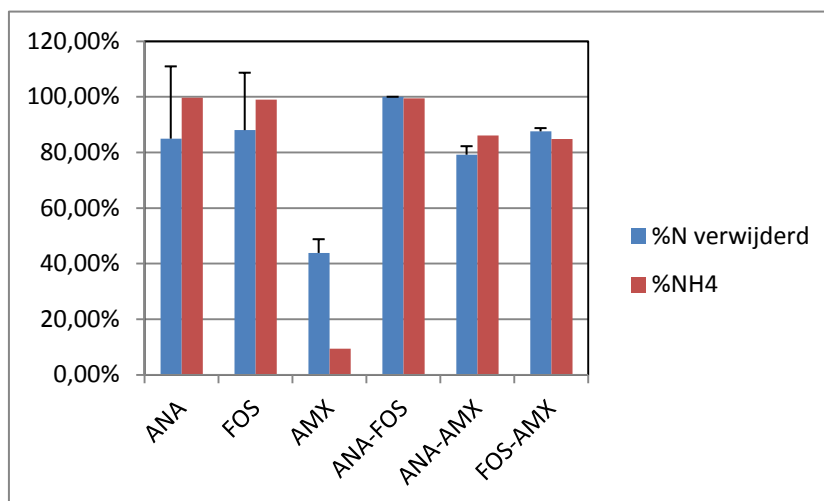
Afbeelding 15. Verloop van de optische dichtheid in de tijd tijdens de vijfde groeiproef. Losse symbolen geven data van individuele metingen weer, lijnen de gemiddelden (GEM).

Dit patroon is ook terug te zien in de berekende productiviteit na 4 en na 9 dagen (afbeelding 16).



Afbeelding 16. Productiviteit van de verschillende behandelingen in de vijfde groeiproef, berekend over 4 dagen (P4) of 9 dagen (P9). Identieke letters geven homogene groepen weer (niet significant van elkaar verschillend bij $p < 0,05$).

Maximale groeisnelheid is niet altijd direct gekoppeld aan maximale nutriëntverwijdering, wat te zien is wanneer we afbeelding 16 vergelijken met afbeelding 17: in de behandelingen met de hoogste productiviteit, ANA-AMX en FOS-AMX, wordt slechts 80% van de aanwezige stikstof verwijderd. Het percentage N verwijderd ligt het hoogst bij ANA-FOS, terwijl dit een van de minst productieve behandelingen is. Om dit beter te begrijpen dienen we daarom niet alleen te kijken naar de absolute stikstofwaarden, maar ook naar de fracties waaruit deze bestaat. Afbeelding 17 laat zien dat hoe hoger het aandeel ammoniumstikstof is, des te hoger het verwijderde percentage stikstof is. Een volledige stikstofverwijdering blijkt mogelijk in wateren die bijna volledig uit ammoniumstikstof bestaan, terwijl NH_4 -arme wateren zoals AMX leiden tot een laag stikstofverwijderingsrendement.



Afbeelding 17. Stikstofverwijderingsrendement en aandeel ammoniumstikstof ($\text{NH}_4\text{-N}$) in de verschillende behandelingen.

Discussie

De uitgevoerde proeven lieten niet altijd dezelfde resultaten zien. Het uiteindelijke doel van de uitgevoerde proeven was om tot een weloverwogen beslissing te kunnen komen voor de watersamenstelling welke de hoogste algengroei oplevert. Hoewel de gevonden groeisnelheden om diverse redenen niet direct kunnen worden doorvertaald naar een open-vijversituatie (ander licht, andere lichtcyclus, ander weer, andere hydrodynamica, etc. etc.) zijn de verschillen wel indicatief voor de verschillen in algengroeisnelheid. Om deze verschillen, en de verschillen tussen verschillende proeven, beter te begrijpen zal hier nader worden ingegaan op: 1. De (wisselingen in) samenstelling van de verschillende wateren, en 2. De beschikbaarheid van de nutriënten en licht in de verschillende wateren. Op basis van deze zaken wordt gekeken of er algemene patronen in de proeven te ontdekken zijn, en welke kennis nog nodig is om tot een goed onderbouwde keuze van het te gebruiken water(mengsel) te komen.

Samenstelling gebruikte wateren

Omdat het ingaande water afkomstig is uit de verwerking van één type gewas (aardappel) en van maar één fabriek (Aviko te Steenderen), zou men kunnen denken dat dit een zeer constant effluent op zou leveren, en dat processtromen ook redelijk constant van samenstelling zijn. In tabel 1 staan de gemiddelde historische waarden voor de belangrijkste nutriënten weergegeven (gem), evenals de standaarddeviaties (SD) en de variatiecoëfficiënt (VC, standaarddeviatie gedeeld door gemiddelde).

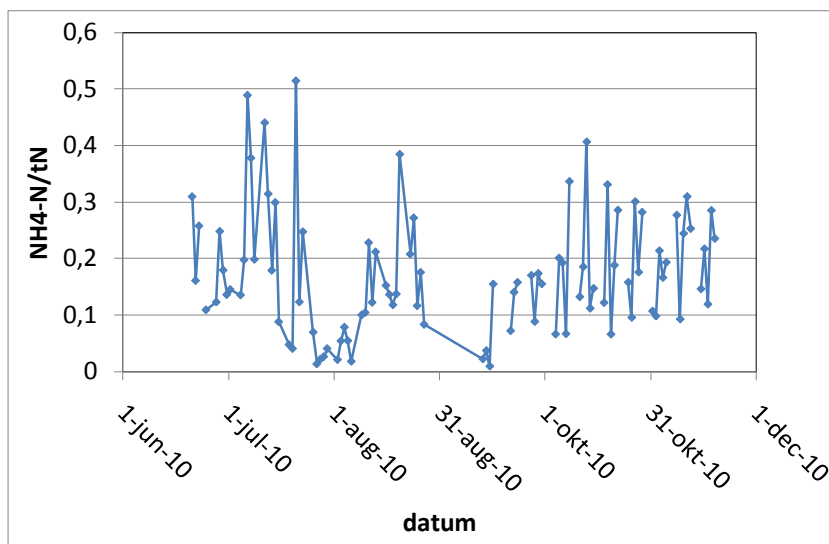
	Totaal stikstof (tN, mg L^{-1})			Kjeldahlstikstof (N_{Kj} , mg L^{-1})			Totaal fosfor (tP, mg L^{-1})			tN:tP		
	gem	SD	VC	gem	SD	VC	gem	SD	VC	gem	SD	VC
RAW	86,8	43,3	50%	49,9	35,9	72%	18,4	6,79	37%	5,27	2,76	52%
ANA	351,3	43,4	12%	350,3	41,3	12%	93,2	9,75	10%	3,86	0,68	17%
FOS	315,2	37,1	12%	312,2	38,9	12%	14,9	5,74	38%	24,6	5,97	24%
AMX	66,1	13,5	20%	11,5	8,2	71%	15,5	3,49	22%	4,50	1,40	31%

Tabel 1. Nutriëntgegevens voor ruw aardappelinfluent (RAW) over de periode 2007-2009, en samenstelling van UASB- (ANA), Phospaq- (FOS) en Anammox- (ANA) effluenten over de periode juni-november 2010. Gem=gemiddelde, SD=standaarddeviatie, VC=variatiecoëfficiënt.

Vooral in RAW komen er toch nog redelijke schommelingen voor in de nutriëntconcentraties, zowel bij stikstof als fosfor, maar met name in Kjeldahl-stikstof varieert behoorlijk. Voor bijvoorbeeld algengroei is de verwachte optimale atomaire verhouding 16:1 (Redfield ratio), dus op basis van massaverhouding rond 7:1. In het influent ligt deze verhouding gemiddeld rond de 5:1 (afbeelding) met een VC van 52%. De laatste 2 maanden van 2009 lag de N:P verhouding bijvoorbeeld continu rond 4:1, wat wijst op een relatief stikstoftekort voor algengroei.

ANA en FOS zijn redelijk constant van samenstelling voor wat betreft stikstof: deze bestaat vrijwel volledig uit ammonium (Kjeldahl) stikstof. ANA heeft echter een relatief hoog tP gehalte, terwijl FOS een laag gehalte heeft. Hierdoor heeft ANA een lage N:P verhouding (rond 4:1, d.w.z. N-limitatie), terwijl FOS een hoge N:P-verhouding heeft (25:1, P-limitatie).

AMX wordt getypeerd door relatief lage gehalten van alle nutriënten. Vooral ammonium (Kjeldahl-stikstof) is fors lager dan in alle andere wateren, en laat een vrij hoge VC zien. De N:P-verhouding (4,5:1) wijst weer op N-limitatie. In afbeelding 18 staat ammonium als aandeel van totaal stikstof in het anammox-water weergegeven, en laat zien dat er op bepaalde momenten behoorlijke schommelingen in de proportie ammonium kunnen voorkomen.



Afbeelding 18. Proportie ammoniumstikstof als aandeel van totaal stikstof in het Anammox-water (AMX).

Omdat AMX, zowel puur als in mengsels, vaak in de behandelingen met de snelste groei zat, is met name dit sterk wisselende ammonium-gehalte een punt dat bij de beoordeling van de resultaten meegenomen dient te worden: AMX is tenslotte al stikstofgelimiteerd, en hoewel het merendeel van de stikstof nitraat is blijft ammonium wel de voorkeursvorm van stikstof (zie bijv. afbeelding 17). Daarom kunnen schommelingen zoals in juli 2010 grote gevolgen hebben voor de groeisnelheid van de algen.

Beschikbaarheid nutriënten en licht

In het ideale geval zouden algen direct op aardappelinfluent gekweekt moeten kunnen worden: dit scheelt immers een hoop kostbare bewerkingsstappen. Het hoge gehalte aan organische bestanddelen in dit water levert echter drie belangrijke nadelen op:

1. Er kan geen biogas meer uit gemaakt worden.
2. Deze bestanddelen hebben een sterk effect op het lichtklimaat. De achtergrondabsorptie van het voor algen benodigde licht is in dit water vele malen hoger dan de eigen absorptie van de algen in een gemiddelde vijverdichtheid.
3. De nutriënten zijn voor het grootste gedeelte nog in organische vorm aanwezig, zodat deze niet beschikbaar zijn voor algengroei.

Dit maakt dat ruw aardappelinfluent minder geschikt is voor algenkweek. In de vierde groeiproef is dit ook goed terug te zien in de resultaten, met name bij de hogere concentraties.

Zoals hiervoor besproken bevatten de meeste wateren voldoende fosfor, maar is het gehalte stikstof *naar verhouding* aan de lage kant. Alleen Phospa-efluent is hierop een uitzondering: hierin is juist naar verhouding te

weinig fosfor aanwezig. Hieronder zijn de gemiddelde samenstelling van enkele wateren en 1:1 mengsels in een tabel gezet.

	<i>tN (mg/l)</i>	<i>NH₄-N (mg/l)</i>	<i>tP (mg/l)</i>	<i>NH₄/tN</i>	<i>N:P</i>
ANA	351	350	93	99,7%	3,77
FOS	315	312	15	99,1%	21,41
AMX	66	12	16	17,5%	4,25
ANA-FOS	333	331	54	99,4%	6,18
ANA-AMX	209	181	54	86,7%	3,84
FOS-AMX	191	162	15	84,9%	12,59

Tabel 2. Gemiddelde samenstelling van UASB- (ANA), Phospaq- (FOS) en Anammox- (ANA) effluenten en 1:1 mengsels hiervan.

In de tabel is te zien dat de onverdunde wateren allemaal voldoende stikstof en fosfor bevatten om algengroei te kunnen ondersteunen. Naast de absolute hoeveelheid nutriënten kan ook de relatieve verhouding belangrijk zijn. Op basis van de eerder genoemde Redfield ratio ligt de ideale N:P verhouding rond 7:1. Van de mengsels zit ANA-FOS hier het dichtst bij in de buurt. ANA-FOS blijkt inderdaad de beste groei op te leveren in het vierde experiment. In het vijfde experiment blijkt dit echter niet het geval te zijn.

Opvallend genoeg wordt in deze behandeling in geen van replica's nog ammonium teruggemeten, terwijl dit niet geresulteerd heeft in de hoogste groei (afbeelding 17). Dit wijst erop dat er hier, bijvoorbeeld door een door algengroei verhoogde pH, sprake is geweest van ammoniakvorming, d.w.z. omzetting van ammonium naar (het voor algen giftige) ammoniakgas. Hierbij kunnen zowel verlies van ammonium (ammoniakvervluchtiging) als directe toxiciteit van ammoniak gezorgd hebben voor remming van de algengroei. Het lijkt erop dat in alle proeven in meer of mindere mate ammoniakvorming heeft plaatsgevonden. Zoals al eerder besproken was de stikstofverwijdering in de tweede groeiproef veel hoger dan op basis van de algengroei verwacht zou mogen worden (afbeelding 6). Ook in proef 5 kan een stikstofopname tussen 3 en 7,5 mg l⁻¹ over het hele experiment verwacht worden. Dit betekent dus dat ook hier in bijna iedere behandeling (behalve AMX) het grootste deel van de stikstof naar de lucht is verdwenen.

Omzetting van ammonium (NH₄⁺) in ammoniak (NH₃), dit doet zich met name voor bij hogere temperatuur en/of hogere pH. Waarschijnlijk is dit de reden dat er in de eerste 3 proeven vooral met (mengsels met) AMX is gewerkt: door het lage ammoniumgehalte (en hoge nitraatgehalte) kan in puur AMX zelden groeiremming optreden, en mengsels van AMX met ANA of FOS bevatten daarmee minder ammoniumstikstof en meer nitraat dan pure ANA en FOS.

Ammoniaktoxiciteit kan een mogelijke bedreiging vormen voor de algengroei, maar verschillende omstandigheden maken dat dit niet direct een 'showstopper' hoeft te zijn:

1. De temperatuur van buitenwater is doorgaans lager dan die in het laboratorium, waardoor er minder snel ammoniakvorming optreedt;
2. Algen kunnen wennen aan hogere concentraties ammonium/ammoniak;
3. Wanneer de pH beheerst kan worden, bijvoorbeeld met CO₂-dosering, dan hoeft ammoniakvorming helemaal geen probleem te zijn.

Uit de tweede groeiproef komt verder een ander aspect naar voren: de fosforverwijdering is 1-2 grootte-orde hoger dan op grond van de algengroei mag worden verwacht. Dit fenomeen is vaker beschreven bij algengroei (STOWA) en is waarschijnlijk vooral het gevolg van de hoge pH. Bij een hoge pH precipiteert fosfaat vrij gemakkelijk met tweewaardige kationen zoals calcium of ijzer, of (zoals in de Phospaq) magnesium (struvietvorming). Ook hier lijkt, net als bij ammoniakvorming, beheersing van de pH een redelijk eenvoudige maatregel om ongewenst fosfaatverlies tegen te gaan.

Een ander aspect waar nog onvoldoende over bekend is, is de achtergrondkleur van de verschillende effluenten. Hiervoor geven de proeven zoals uitgevoerd in erlenmeyers, met slechts enkele centimeters waterdiepte, onvoldoende uitsluitsel over mogelijke effecten van het lichtklimaat.

Conclusies en aanbevelingen

De groeiproeven hebben nog een onvoldoende eenduidig beeld gegeven van het water(mengsel) dat het best geschikt is voor algenkweek. Naast wisselingen in de samenstelling van de verschillende wateren, die in meer of mindere mate kunnen voorkomen, laten de groeiproeven drie zaken zien die nog onvoldoende begrepen worden:

1. Met name de hoge pH kan zorgen voor verminderde beschikbaarheid van stikstof en fosfor, en dat hierbij ook ammoniaktoxiciteit kan optreden. Daarom wordt aanbevolen om in vervolgstudies dit effect beter (gecontroleerd) mee te nemen, en zowel stikstof als fosfor bij start en eind van de experimenten te meten.
2. De effecten van de troebelheid van verschillende wateren op het lichtklimaat zijn, afgezien van aardappelinfluent (RAW), minder duidelijk. Om hier beter zicht op te krijgen wordt aanbevolen om met grotere waterdiepte en/of –volumes te werken.
3. De voeding van het pilotonderzoek kan worden omgezet naar een ANA/AMX mengsel om het aandeel ammonium stikstof te verhogen. Ook in het pilotonderzoek geldt dat rekening moet worden gehouden met ammoniak inhibitie.

Literatuur

STOWA, 2010. Effluentpolishing met algentechnologie. Rapport 2009-w08. Stowa, Utrecht. <http://www.stowa.nl>.

Bijlage 2

Foto's opening algenfarming (23-09-2010) + presentatie



Proefonderzoek Algenfarming Olburgen



ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

1

Algen

- basis van het leven op aarde
 - oudste fossiele levensvorm
 - basis van het aquatisch ecosysteem
 - 'longen' van planeet Aarde
- basis van onze economie
 - visserij
 - aardolie, aardgas



ingrepro

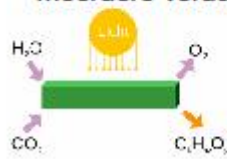
Waterstromen

Willeveen Box

2

Wat zijn algen

- Voeding: CO_2 , N, P en sporen elementen;
- energiebron zonlicht (fotosynthese);
- alle functies gecombineerd in 1 cel
- geen wortels, stengels, bladeren, bloemen
- dit stelt algen in staat snel te groeien (tot meerdere verdubbelingen per dag)



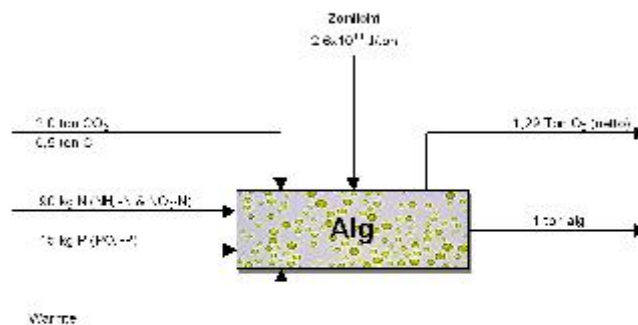
ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

3

Wat hebben algen nodig?



Warmte

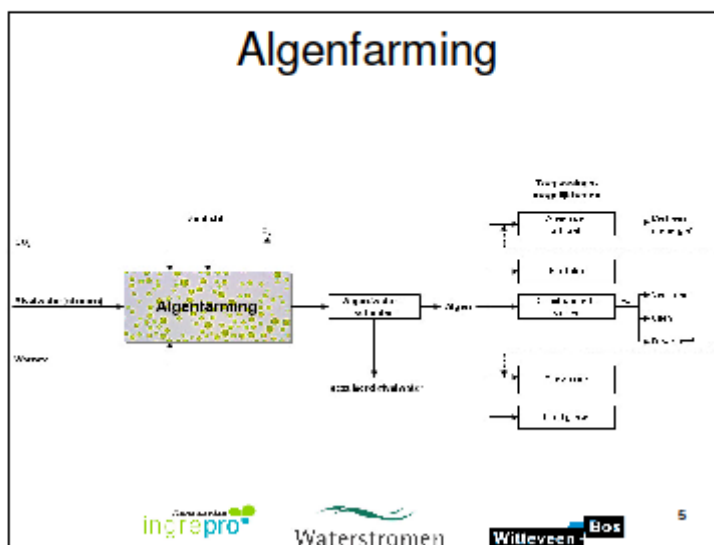
ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

4

Algenfarming



Gemiddelde opbrengst per ha

	Opbrengst ton droge stof/ha	verkoopprijs EUR/ton droge stof	Netto opbrengst per ha* EUR/ha/jaar**
Suikerbieten	60-64 (10 ton suiker)	42	1.500
Snijmais	12-17	80	800
Wintertarwe	11-13	180	1.800
Koolzaad	3-5	260	1.000
		100-500 nichemarkt	
algen	20-50	>1.000	2.000-5.000
soja	-	250-350	-

* netto opbrengst = Kosten – opbrengst per ha.

** netto opbrengst is gemiddelde over de laatste 5 jaar.



ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

7

Hoe kun je algenfarming toepassen:

(1) water zuiveren (2) productie

- Waterzuivering (N+P)
- Invangen CO₂
- Nuttige bijproducten
- Productie grondstoffen
- Terugwinnen van nutriënten
- Invangen van CO₂
- N+P verwijdering "bijproduct"



water zuiveren



productie grondstoffen

ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

8

Oogsten van algen

Algenfarming op Olburgen

```

    graph LR
      In[Influx & Aankomst] --> G[Graspijp  
cultivering]
      G --> S[Stroomd]
      S --> R[Randmees]
      R --> A[Algenkweeking]
      A --> P[Algen  
productie]
      P --> Out[Productie]
      CO2[CO2] --> G
      Warmte[Warmte] --> G
      Lichte[Lichte] --> A
      P --> Rigen[Rigen  
productie]
  
```

The flowchart illustrates the algae farming process at Olburgen. It begins with 'Influx & Aankomst' (Influx & Arrival) leading into 'Graspijp cultivering' (Grasspea cultivation). This stage is supported by 'CO₂' and 'Warmte' (Heat). The process then moves through 'Stroomd' (Flow), 'Randmees' (Edge), and 'Algenkweeking' (Algae cultivation), which is supported by 'Lichte' (Light). The final stage is 'Algen productie' (Algae production), which leads to 'Productie' (Production) and also has a branch for 'Rigen productie' (Local production).

Logo: **ingrepro** innovative green production

Logo: **Waterstromen**

Logo: **Witteveen** **Box**

Page number: 10



Onderzoeksdoelstelling Algenfarming

- ontwikkelen van een commercieel haalbaar concept op de AWZI Olburgen;
- aantonen dat duurzame verwijdering van nutriënten uit afvalwaterstromen en het produceren van een nuttig toepasbaar product mogelijk is;
- het opbouwen van praktijkervaring om algen kosteneffectief en duurzaam te produceren;

ingrepro

Waterstromen

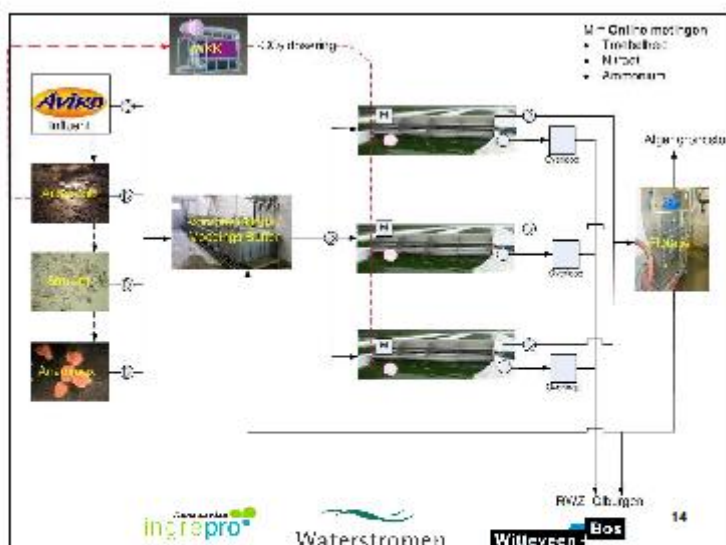
Witteveen Bos

12

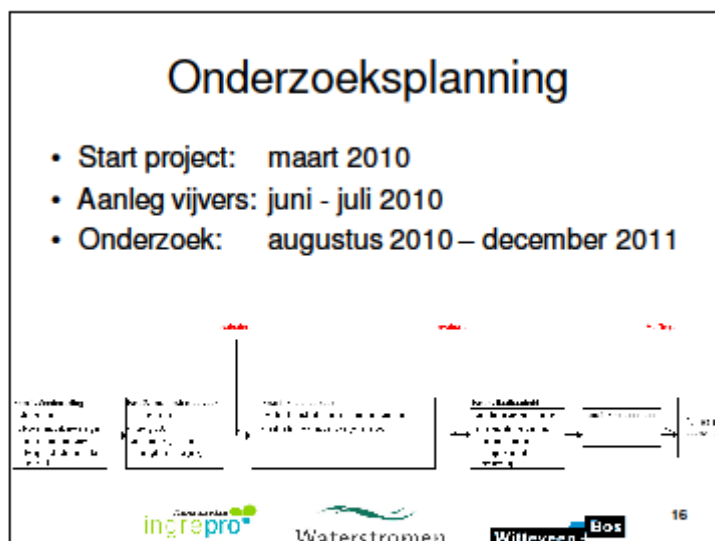
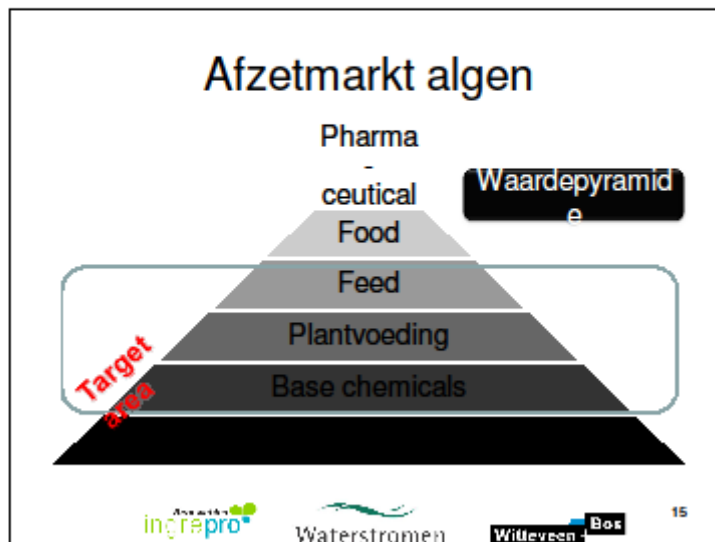
Onderzoeksvragen

- Verkrijgen van maximale algenproductie:
 - welke afvalwaterstroom is optimaal op Olburgen?
 - Hebben reststoffen in afvalwater effect op groei, kwaliteit en afzet van de algen?
 - Hoe kan het gehele jaar worden geproduceerd (zomer, winter)?
 - bepalen optimale hydraulische- en nutriëntenbelasting (verblijftijd)?
 - Geeft doseren rookgas (CO_2) van WKK hogere algenproductie?
 - Geeft overkappen een hogere algenproductie in de winter?
- Kwaliteit algen:
 - Bepalen samenstelling geproduceerde algen (vet, eiwit gehalte, verontreinigingen)?
 - Is er effect van zwevende stof en CZV op algenproductie en kwaliteit?
- Haalbare concentraties N en P na algenfarming?
- Oogs  n:  ogstechniek voor het oog 
 - W:  ogstechniek voor het oog 

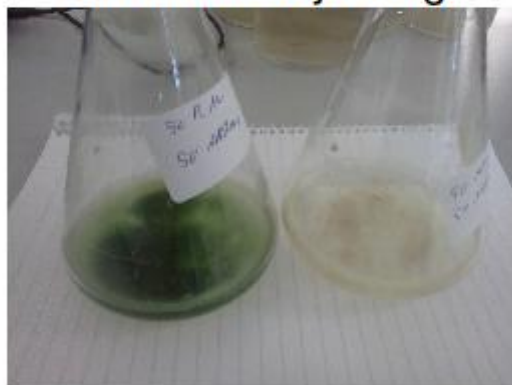
13



14



fosfaatverwijdering



ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

17

Andere toepassingsgebieden

- Veevoer (vervanging Soja)
- Biobrandstof (kerosine, biodiesel)
- Biomassacentrales (N+P verwijdering)
- Mestvergisting (dunne fractie)
- Rookgasreiniging (NO_x en CO_2)
- Vervangen van visolie
- Productie grondstoffen (bioplastics, harsen verf)

ingrepro

Waterstromen

Willeveen Box

18

Nieuwe denken!

- Keten benadering (koolstof, stikstof, fosfaat)
- **Afvalwater = afval in water = grondstof**
- Creëer 'een energie en grondstof fabriek'



Onderzoeksteam

Naam	Functie	Bedrijf
Marcel Oogink	Projectleider	Ingrepro Renewables
Richard Haarhuis	Projectleider	Waterstromen
Bernadet Otten	Analist / uitvoeren onderzoek	Waterstromen
Anthony Verschoor	Algen technoloog	Ingrepro Renewables
Wilbert Menkveld	Onderzoekscoördinator	Witteveen+Bos
Arjan Dekker	Technoloog / uitvoering onderzoek	Witteveen+Bos
Bjorn Siemann	uitvoering onderzoek	Ingrepro
Paul Weenink	Bedrijfsvoerder Olburgen/Lomm	Waterstromen



Bijlage 3

Witteveen+Bos
 Van Twickelostraat 2
 Postbus 233
 7400 AE Deventer
 telefoon 0570 69 79 11
 telefax 0570 69 73 44
 www.witteveenbos.nl

onderwerp Haalbaarheid overkapping algenfarming
 project Algenfarming
 opdrachtgever Ingrepro
 projectcode LC63-3
 referentie -
 opgemaakt door Arjan Dekker
 goedgekeurd door Wilbert Menkveld paraaf
 status concept
 datum opmaak 5 april 2011
 bijlagen -

aan Ingrepro Renewables M. Oogink, A. Verschoor
 Waterstromen R. Haarhuis
 kopie

Introductie

Het doel van het algenfarming project in Olburgen is het aantonen van de economische haalbaarheid van algenkweek op de industriële afvalwaterstromen van Aviko welke worden verwerkt door Waterstromen. Hierbij worden verschillende technieken en groeimethoden getoetst op extra productiviteit waarbij in een economisch model de haalbaarheid van een techniek wordt getoetst door de kosten te vergelijken met de baten van de aanvullende algengroei. Tot op heden volgen de resultaten van de algengroei in het project de verwachtingen welke voortkomen uit het STOWA model voor licht en temperatuurgecorrigeerde maximale productiviteit van Algen. Procesparameters zijn vergelijkbaar ingesteld met het project Olburgen en er is een fotosynthetische efficiency gehanteerd van 4%.

Het doel van deze notitie is om alle betrokken partijen volledig en objectief te informeren en daarmee een realistisch beeld te geven van de te behalen winst in de algenproductie door het plaatsen van een overkapping. De bevindingen komen voort uit het werk aan het kosten model voor de economische haalbaarheid van algenfarming.

De bevinding zijn gebaseerd op een algengroei model wat tot dusver overeenkomt met de door ons behaalde resultaten. Het daadwerkelijke effect van een overkapping kan pas worden vastgesteld door het echt toe te passen.

STOWA model

De resultaten van deze modelstudie zijn weergegeven in tabel 1. Uit deze modelstudie blijkt een maximale opbrengst van 37 ton DS/ha/jaar bij een gemiddelde algengehalte van 0,4 g DS/l wanneer alleen licht en temperatuur limiterend zijn. Wanneer de temperatuurlimitatie wordt weggenomen blijkt een productie van 46 ton DS/ha/jaar mogelijk. Een maximale, alleen licht gelimiteerde, productie door het volledig wegnemen van de temperatuurlimitatie kan dus circa 10 ton DS/ha/jaar extra opleveren.

Tabel 1.

			Maximale opbrengst		T gecorrigeerd
Maand	°C	w/m ²	g/m ² *d	T-correctie	g/m ² *d
Januari	2,8	23,9	0,99	0,48	0,47
Februari	3,0	57,0	5,36	0,48	2,57

			Maximale opbrengst		T gecorrigeerd
Maart	5,8	92,8	10,09	0,55	5,55
April	8,3	161,3	19,14	0,62	11,89
Mei	12,7	206,4	25,09	0,77	19,33
Juni	15,2	207,0	25,16	0,87	21,90
Juli	17,4	202,8	24,61	0,97	23,85
augustus	17,2	173,4	20,73	0,96	19,89
September	14,2	115,0	13,03	0,83	10,80
Oktober	10,3	66,2	6,58	0,69	4,51
November	6,2	31,4	1,98	0,56	1,11
December	4,0	16,9	0,07	0,50	0,04
Jaargemiddelde	9,8	112,8	12,7	0,7	10,2
Jaaropbrengst (ton/ha/jaar)			46		37

Kosten overkapping

In tabel 1 zijn een aantal scenario's voorgerekend waarin de kosten van de overkapping zijn vastgesteld op €8,- en €12,- per m² waarbij €8,- de ondergrens is voor de kosten van een overkapping zonder montage. De hogere prijs van €12,- is de ondergrens voor de kosten van een overkapping inclusief montage. Opgave van Atomica voor het project in Olburgen was €14,50 per vierkante meter waarvan €10,- uit materiaalkosten bestond en €4,50 euro uit montagekosten. Verder liggen de gehanteerde kosten onder in de range van de kosten welke zijn opgenomen in de studie "Haalbaarheid foliekassen voor energie extensieve gewassen" van Wageningen Universiteit. Dit rapport is los bijgevoegd. De maximale afschrijvingstermijn van de meest moderne foliekassen is 15 jaar.

Kosten - baten analyse overkapping

Uit tabel 2 blijkt dat uitgaande van het gunstigste scenario (1) (€8,- per m² overkapping en €500,- per ton DS alg) een overkapping minimaal 15,3 ton DS/ha/jaar extra algenproductie moet opleveren om terugverdiend te worden. Hierbij wordt dus nog geen rekening gehouden met een marge. Zoals eerder vermeld levert het volledig wegnemen van de temperatuurlimitatie naar verwachting maximaal 10 ton DS/ha/jaar extra alg op. Uitgaande van een extra productie van 10 ton/ha/jaar en de kosten voor een volledige overkapping van respectievelijk 8 en 12 euro. Moet de ruwe alg respectievelijk €770,- en €1.160,- opbrengen (scenario 5 en 6).

Tabel 2.

parameter	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3	Scen. 4	Scen. 5	Scen. 6	eenheid
Prijs overkapping	€ 8	€ 12	€ 8	€ 12	€ 8	€ 12	per m ²
rente	5%	5%	5%	5%	5%	5%	
afschrijving	15	15	15	15	15	15	jaar
Annuïteit	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	-
Opbrengst	€ 500	€ 500	€ 400	€ 400	€ 770	€ 1.160	per ton DS alg
Aanvullende productiviteit	15,3	23,2	19,2	29	10	10	ton DS/ha/jaar
Opbrengst alg	0,77	1,16	0,77	1,16	0,77	1,16	euro/m ² /jaar
Kosten overkapping	0,77	1,16	0,77	1,16	0,77	1,16	euro/m ² /jaar

Conclusie

Op basis van dit voortschrijdende inzicht met betrekking tot de algenproductie, de kosten van een volledige overkapping en het huidige aangenomen prijsniveau van algen kan worden verwacht dat de economisch haalbaarheid van algenfarming niet vergroot door het plaatsen van een overkapping. Toch blijft het interessant om het effect van een overkapping in de praktijk te toetsen want wanneer de kosten (de uitgangspunten) veranderen is kennis over het daadwerkelijke effect van een overkapping waardevol. Met deze kennis kan dan eenvoudig opnieuw de haalbaarheid worden doorgerekend.

Bijlage 4

Voedingsschema voor Algenvijvers bij Waterstromen Olburgen
 Let op, doorloop dit schema iedere meetdag voor elk van de drie vijvers apart!

