

Huishoudelijke afvalwaterzuivering met de bacterie-algensymbiose

Arjan Dekker (Wittenveen+Bos), Nadine Boelee (Nijhuis Water Technology)

De symbiose tussen bacteriën en algen (afgekort: SYMBAAL) biedt theoretisch de mogelijkheid om een zuiveringsconcept te ontwikkelen waarbij energiebesparing, grondstofterugwinning en vergaande nutriëntenverwijdering in één proces worden gecombineerd. De technische en economische haalbaarheid van dit concept voor de behandeling van (communaal) afvalwater in Nederland is door de STOWA verkend. Uit de verkenning blijkt dat het kostenplaatje nog geen aanleiding geeft voor het op grotere schaal testen van dit concept, maar het milieuvoordeel van het SYMBAAL-concept blijft onverminderd aantrekkelijk. Daarom verdient het aanbeveling het onderzoek naar dit concept voort te zetten.

De symbiose tussen bacteriën en algen (SYMBAAL) berust op de uitwisseling van koolstofdioxide en zuurstof, waarbij tegelijk nutriënten uit afvalwater kunnen worden verwijderd door omzetting en ook vastlegging. De drijvende kracht achter dit proces is zonlicht, dat door algen wordt gebruikt voor de productie van zuurstof. Koolstofdioxide ontstaat bij de afbraak van organisch materiaal door bacteriën. Door de zuurstofproductie van algen is, bij de juiste belasting van het systeem, beluchting zoals bij conventionele waterzuivering theoretisch niet nodig. De hoofdprocessen in SYMBAAL-zuivering zijn:

- fotosynthese door algen, waarbij energie voor algengroen en zuurstof wordt geproduceerd;
- oxidatie van biologisch afbreekbaar organisch materiaal (bCZV), waarbij energie voor bacteriegroei en koolstofdioxide wordt geproduceerd;
- stikstofomzetting via nitrificatie en denitrificatie;
- stikstofverwijdering door vastlegging in biomassa;
- fosfaatverwijdering door vastlegging in biomassa.

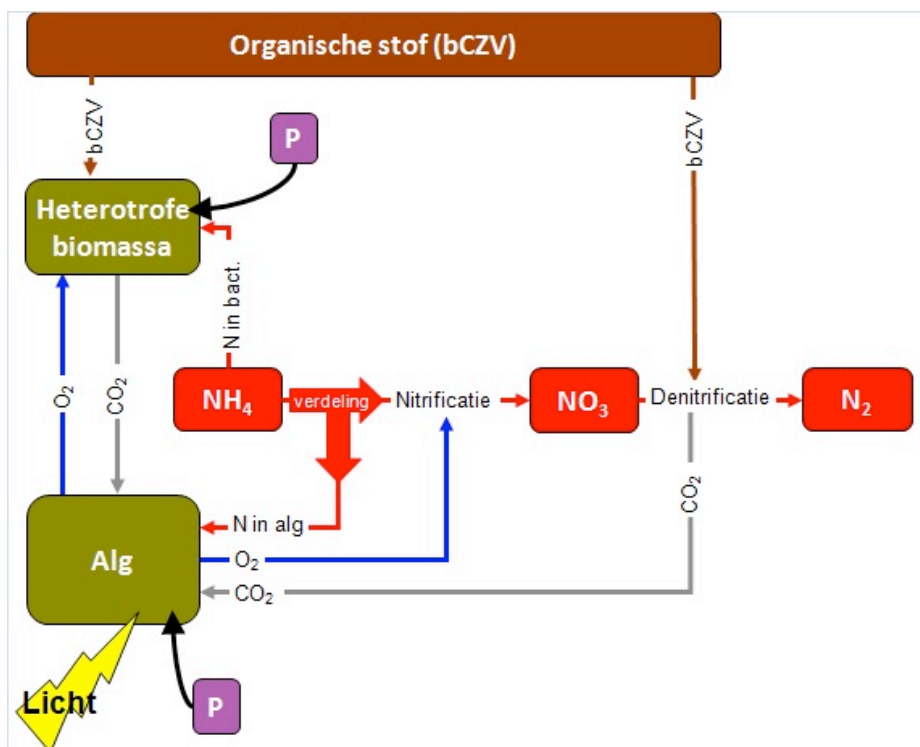
Voor fotosynthese is licht en een voldoende hoge temperatuur nodig. Licht is onmisbaar in deze symbiose omdat daarmee de algen direct en de bacteriën indirect (via zuurstof) van energie worden voorzien. Kunstmatige belichting van een algencultuur voor afvalwaterzuivering is economisch niet haalbaar [1].

De bacterie-alg-symbiose kan in verschillende systemen worden toegepast. Het bekendste systeem is de algenvijver, waar bacteriën en microalgen samen in vlokken groeien. Naar dat principe is zowel op lab- als op pilotschaal onderzoek gedaan [2, 3]. Een nadeel van het vijversysteem is dat de biomassa niet gemakkelijk van het water kan worden gescheiden. Daarom wordt ook onderzoek gedaan naar biofilmsystemen [4, 5]. Met een biofilm zijn biomassa en water op natuurlijke wijze vanzelf van elkaar gescheiden, waardoor het oogsten makkelijk is.

Model economische haalbaarheid

Om de economische haalbaarheid van een SYMBAAL-zuivering in Nederland te verkennen is een model ontworpen waarmee de belangrijkste operationele kosten en baten van de rwzi en de benodigde omvang van de SYMBAAL-zuivering konden worden berekend. De dimensionering van de SYMBAAL-zuivering is geheel gebaseerd op het werk van Boelee [5]. De invloed op operationele aspecten van de rwzi – zoals lagere slibproductie, lager energieverbruik voor beluchting, maar ook biogasopbrengst uit de slibgisting – is berekend met massabalansen en bijbehorende technologische uitgangspunten.

Boelee beschrijft de symbiose tussen bacteriën en algen in een massabalans waarin de verwijdering van stikstof via drie routes centraal staat. Deze routes zijn: vastlegging in bacteriën, vastlegging in algen, en de combinatie van nitrificatie en denitrificatie. Vervluchtiging van ammoniak werd daarbij verwaarloosd. Fosfaat wordt enkel vastgelegd in bacteriën en algen. De biologisch afbreekbare CZV (bCZV)-fractie uit het afvalwater wordt in de balans ook op drie manieren gebruikt, te weten: celsynthese, denitrificatie en energiebron voor bacteriën. Vrijwel alle CO_2 die daarbij vrijkomt wordt door algen gebruikt voor groei. De zuurstof die daarbij ontstaat wordt gebruikt voor nitrificatie en bCZV-afbraak. De samenhang van deze processen en de stofstromen wordt weergegeven in afbeelding 1.



Afbeelding 1. Schematische weergave van de symbiose van bacteriën en algen bij afvalwaterzuivering

Op de plek van de rode blokpijl in afbeelding 1 kan de verdeling tussen stikstofopname en stikstofverwijdering handmatig worden bijgesteld in het model. Zodoende kan de gasbalans van zuurstof of koolstofdioxide op 0 worden gesteld in het model. Wanneer zuurstofvraag en -

aanbod wordt geëffend treedt altijd een koolstofdioxide tekort op, wat in de praktijk opgevuld moet worden middels dosering. Koolstofdioxidedosering heeft de voorkeur boven zuurstofinbreng.

De fosfaat- en stikstofvastlegging in de bacteriebiomassa wordt berekend door de netto organischslibproductie te vermenigvuldigen met een percentage stikstof en fosfaat in deze biomassa. De organischslibproductie in zowel de symbiotische zuivering als de rwzi wordt berekend volgens [7].

De algengroei bij de zomergemiddelde zoninstraling en met ammonium als stikstofbron komt overeen met 3 mg DS/Wh PAR (fotosynthetisch actieve straling) bij een fotosynthetisch rendement van 1%. Een verdubbeling van het fotosynthetisch rendement geeft een verdubbeling van de specifieke opbrengst.

Zuurstofconsumptie in de communale rwzi is berekend volgens de Von der Emde-theorie [8]. Zuurstofproductie en koolstofdioxideconsumptie in het SYMBAAL-zuiveringsmodel zijn in het model direct en alleen afhankelijk van de algengroei.

Uitgangspunten

De dimensionering van het concept is doorgerekend voor een 100.000 i.e. rwzi met een aanvoer van 130 l/i.e.d. Regenwater en rioolvreemd water zijn buiten beschouwing gelaten. De gebruikte afvalwatersamenstelling was 350 mg bCZV/l, 50 mg NH₄-N/l en 10 mg PO₄-P/l. Het aangenomen beluchttingsrendement van de rwzi was 2,55 kg O₂/kWh, overeenkomend met fijnebellenbeluchting.

Voor het berekenen van de slibproductie zijn de volgende parameters gebruikt:

yield (Y) = 0,4 g ODS/g bCZV

slibafbraak-coëfficiënt (k_d) = 0,088 g ODS/g ODS.d

fractie celrest (f_d) = 0,15 g ODS/g ODS

slibleeftijd = 12,5 dag

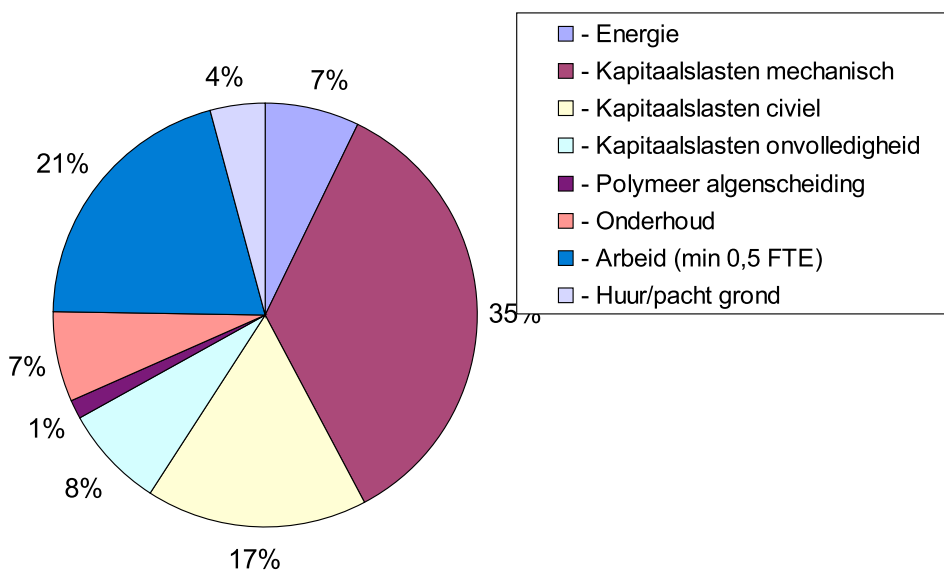
stikstof- en fosforopname = 7,8% N en 1,4% P in autotrofe biomassa en 12% N en 2% P in heterotrofe biomassa.

Bij de slibverwerking is een primaire organische-stofafbraak van 65% en een secundaire organische-stofafbraak van 40% gebruikt [9]. De aangenomen biogasproductie was 0,96 m³/ kg organische stof, met een energie-inhoud van 6,2 kWh/m³ [9]. De omzetting naar elektriciteit door een WKK werd berekend met een rendement van 40%. De gebruikte elektriciteitsprijs was 0,11 EUR/kWh, slibverwerkingskosten 300 EUR/ton DS en kosten voor ijzerchloride (40%) 210 EUR/ton product.

Het aangenomen verwijderingsrendement van de voorbezinktank was 50% voor zwevende stof en 30% voor CZV. Ammonium en fosfaat worden in de voorbezinktank niet verwijderd.

De dimensionering van het SYMBAAL-concept is gebaseerd op een zomergemiddelde (april tot en met september) zoninstraling van 4,17 kWh/m².d met een PAR-fractie van 42,3%. De kosten van een open vijversysteem zijn overgenomen van het Algenfarmingproject [10]. Operationele kosten van een open vijver zijn circa 22.500 EUR/ha.jaar en kapitaalslasten van een eenvoudig systeem circa 37.500 EUR/ha.jaar bij een rentevoet van 5% en afschrijving van 10 tot 15 jaar, afhankelijk van het onderdeel. Het product bij deze kosten is een gekoeld algenconcentraat van circa 6% drogestof. Voor de huur- of pacht prijs van grond is 3.000 EUR/ha.jaar aangenomen, een reële prijs voor agrarische grond in landelijk gebied. De kostenstructuur van de som van deze jaarlijkse kostenposten wordt weergegeven in afbeelding 2.

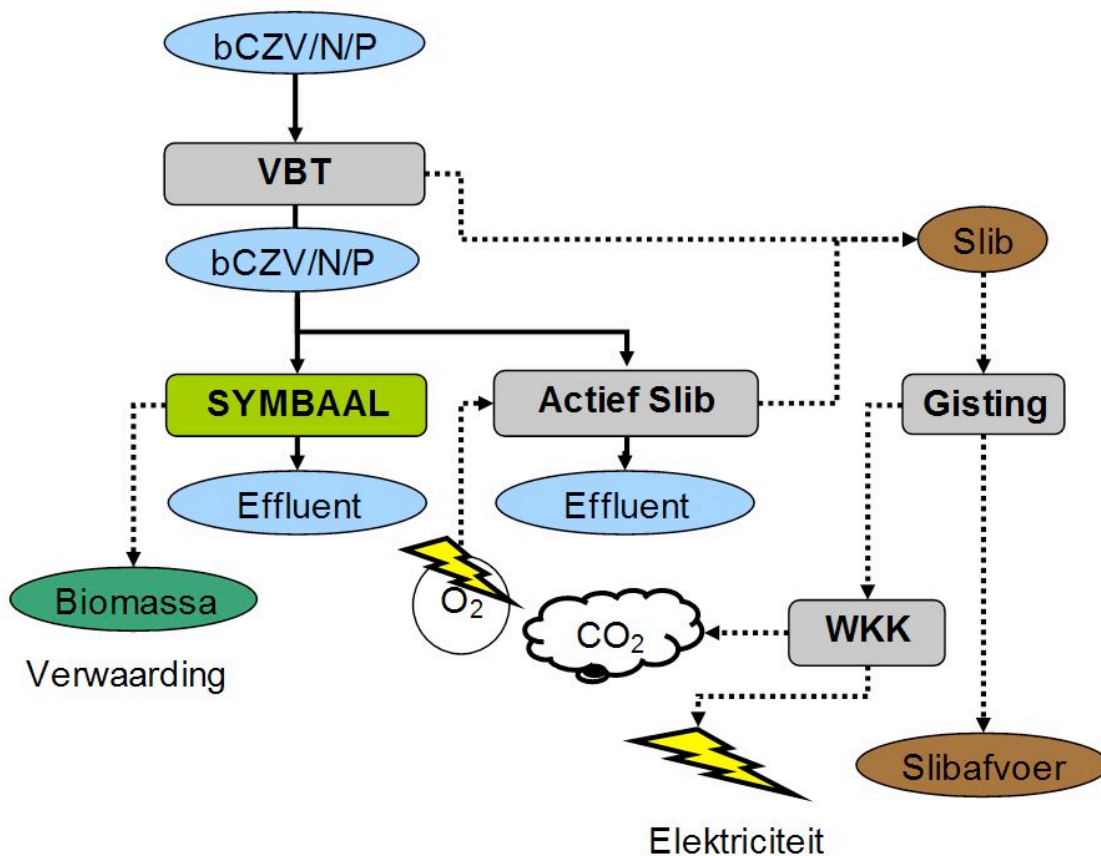
De potentiële waarde van de biomassa uit de SYMBAAL-zuivering komt voort uit toepassingen als energieproductie, meststof of bodemverbeteraar en diervoeder. Deze waarde loopt uiteen van 0,01 EUR/kg DS voor de minst waardevolle toepassing in de energieproductie, tot 0,50 EUR/kg DS als alternatief voor vismeel [1]. Toepassing van SYMBAAL-biomassa als diervoeder is echter nog niet direct mogelijk vanwege de productie van deze biomassa met humaan afvalwater.



Afbeelding 2. Kostenstructuur algenkweek

Concepten

Kunstmatige belichting van een algenkweek voor afvalwaterzuivering is economisch onhaalbaar gebleken. Het SYMBAAL-concept kan de rwzi niet vervangen omdat onder winterse omstandigheden de effluenteisen niet zullen worden gehaald. Verder is het SYMBAAL-concept niet geschikt als nazuivering na vergaande voorbehandeling, omdat CZV cruciaal is als bron van koolstof en koolstofdioxide in de bacterie-alg symbiose. Afbeelding 3 laat de schematische weergave van het meest kansrijke concept zien.



Afbeelding 3: SYMBAAL-zuivering parallel aan de rwzi

De verdeling van afvalwater tussen SYMBAAL en actief slib wordt bepaald door de combinatie zonlicht en afvalwateraanvoer. Voor de verkenning is aangenomen dat 80% van de afvalwateraanvoer in de zomer plaatsheeft in het daglicht en dus door de SYMBAAL-zuivering kan worden verwerkt. Het effect van temperatuur is in deze verkenning buiten beschouwing gelaten.

Economische haalbaarheid

Met de gegeven uitgangspunten is de economische haalbaarheid van het SYMBAAL-concept berekend. De kosten van biomassaproductie en voor waterzuivering samen met enkele technologische uitkomsten worden gepresenteerd in tabel 1. De gevoeligheid van de resultaten voor het fotosynthetisch rendement (QY) is berekend met 2% (realistisch voor open vijvers) en 4% (optimistisch). Ter evaluatie van kosten is uitgegaan van een gevoeligheid van plus en minus 30% op zowel operationele kosten als kapitaalslasten. Bij het berekenen van de kosten van waterzuivering is aan de SYMBAAL-biomassa geen waarde toegekend.

Tabel 1. Resultaten haalbaarheidsverkenning SYMBAAL-concept

QY*	operationele- en kapitaalslasten kweekstelsel	Biomassa prijs (EUR /kg DS)	Zuiveringskosten (EUR /m ³)	Oppervlakte (ha)	Alg/bacterieverhouding (g/g)	O ₂ balans (kg/dag)	CO ₂ balans (kg/dag)	N via nitrificatie (%)	N verwijdering (g N.m ⁻² .d ⁻¹)	P verwijdering (g P.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassa productie (g ODS.m ⁻² .d ⁻¹)
Variabelen		Resultaten									
2%	-30%	1,4	0,2	12,0	2,3	0	-1369	64%	3,8	0,2	15,4
2%	0%	2,1	0,3	12,0	2,3	0	-1369	64%	3,8	0,2	15,4
2%	+30%	2,7	0,5	12,0	2,3	0	-1369	64%	3,8	0,2	15,4
4%	-30%	0,6	0,1	6,0	2,3	0	-1369	64%	7,7	0,5	30,8
4%	0%	0,9	0,1	6,0	2,3	0	-1369	64%	7,7	0,5	30,8
4%	+30%	1,3	0,2	6,0	2,3	0	-1369	64%	7,7	0,5	30,8

* QY = fotosynthetisch rendement

Voor de effluenteis is de KRW-richtlijn aangehouden van 2,2 mg N/l en 0,15 mg P/l. Een andere richtlijn heeft geen significant effect op de economische haalbaarheid. De stikstofnorm van 2,2 mg N/l wordt theoretisch gehaald maar daarbij blijft een fosfaatconcentratie van circa 6,5 mg P/l over. Aanvullende fosfaatverwijdering is dus noodzakelijk. De zuurstofproductie is 2245 kg O₂/dag, wat overeen komt met een besparing van circa 880 kWh/dag op beluchtingsenergie bij fijnebellenbeluchting.

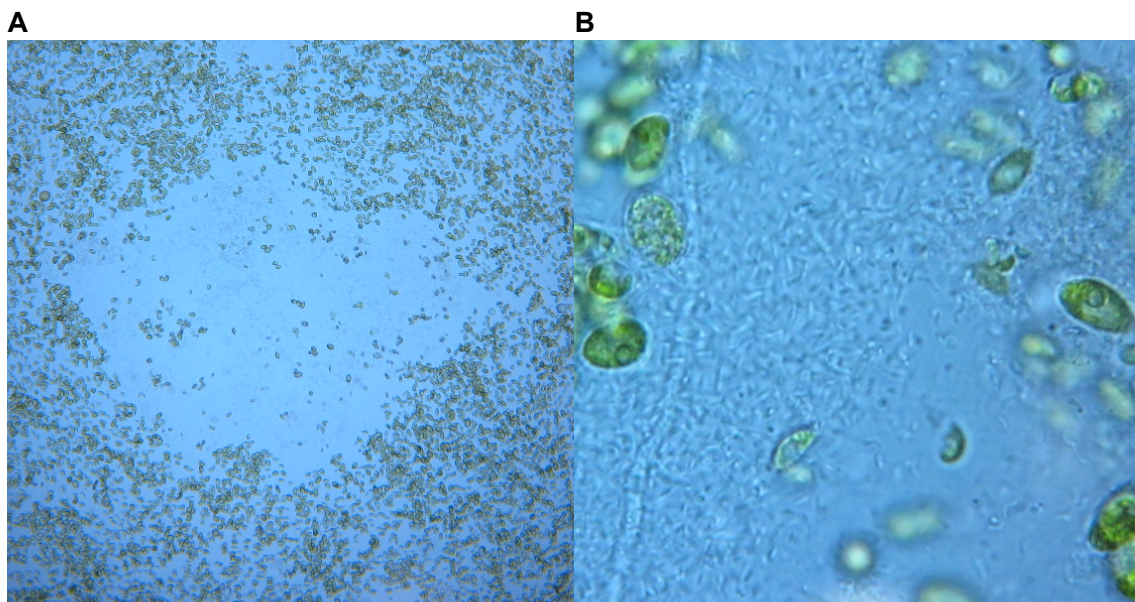
Resultaten laboratorium

Behalve theoretisch is de symbiose ook experimenteel in het laboratorium onderzocht. Hiertoe werden de bacteriën en algen in een biofilm gecultiveerd in horizontale doorstroomcellen onder een continue belichting van 340 μmol/m².s (PAR fotonen; 400-700 nm). Voorafgaand aan het experiment werden algen van de nabezinktank van de rwzi Leeuwarden samen met slib uit een membraanbioreactor in het laboratorium van Wetsus (Leeuwarden) geënt op een pvc drager. Vervolgens werd deze drager gemonteerd in de doorstroomcel die synthetisch afvalwater toegediend kreeg. Dit synthetische afvalwater bestond uit acetaat als organische verontreiniging, ammonium (NH₄⁺) en fosfaat (PO₄³⁻) in de volgende concentraties: 323 mg /l acetaat, 50 mg/l NH₄⁺-N en 10 mg/L PO₄³⁻-P. De toevoer van afvalwater en licht werd gebaseerd op een gesloten zuurstofbalans (zoals eerder beschreven), er werd dus geen zuurstof toegevoegd.



Afbeelding 4. De symbiotische bacteriën-algenbiofilm in het laboratorium

De symbiotische groene biofilm was los van structuur en bevatte duidelijk zichtbare bobbels, zoals zichtbaar is op afbeelding 4. Tijdens het oogsten bleek dat deze bobbels van binnen wit waren, bedekt met een groene laag. Microscopische analyse (afbeelding 5) toonde aan dat de witte bolletjes uit bacteriën bestonden en de groene laag uit algen.



Afbeelding 5. Foto van de symbiotische bacteriën-algen biofilm met de lichtmicroscop, ingezoomd op de bolletjes Vergroting: 100x (A) en 600x (B).

De biofilm verwijderde acetaat, ammonium en fosfaat nadat in het begin van het experiment wat bicarbonaat was toegevoegd om de symbiose op gang te helpen. Acetaat werd verwijderd tot een gemiddelde concentratie van 39 mg/l, ammonium tot 30 mg/l en fosfaat tot 5,7 mg/l. De ammoniumconcentratie in het effluent is hoger dan berekend met het model doordat er tijdens dit korte laboratoriumexperiment geen nitrificatie op gang kwam. De verwachting blijft, dat nitrificatie en denitrificatie in de biofilm wel degelijk mogelijk is [9].

Conclusie

Uit het model bleek dat afvalwaterzuivering door symbiose tussen bacteriën en algen de komende jaren niet kansrijk is in Nederland. De voetafdruk van de SYMBAAL-zuivering is circa 0,6 tot 1,2 m² per i.e., gebaseerd op 50 mg NH₄-N/l en 130 l/i.e..d. Met laboratorium-experimenten is het proof-of-principle van een SYMBAAL-zuivering geleverd, waarbij organisch koolstof werd omgezet door bacteriën en stikstof en fosfor voornamelijk werd vastgelegd in de biomassa, zonder toevoeging van zuurstof.

De realistische productiekosten van de SYMBAAL-biomassa zijn 1,4 tot 2,7 EUR/kg DS. Dat is aanzienlijk hoger dan de potentiële marktwaarde die in de range van 0,01 tot 0,5 EUR/kg DS ligt. De waterzuiveringskosten met SYMBAAL komen overeen met circa EUR 4,00 tot 10,00 extra per i.e.per jaar wanneer aan de SYMBAAL-biomassa geen waarde wordt toegekend. De gestandaardiseerde kosten voor het zuiveren van afvalwater waren in 2009 voor alle waterschappen gemiddeld EUR 35,13 per i.e.per jaar. Er is geen reden om aan te nemen dat op de korte tot middellange termijn de productiekosten sterk zullen dalen of de productiviteit van algen of de marktwaarde sterk zal toenemen. Daarom is het concept in Nederland voorlopig economisch niet interessant.

Discussie en aanbevelingen

Het potentiële milieuvoordeel van het SYMBAAL-concept blijft onverminderd interessant. Het verdient daarom aanbeveling om op kleine schaal het onderzoek naar optimalisatie en eventueel processturing van dit concept voort te zetten. Op het gebied van economische haalbaarheid zal het SYMBAAL-concept, net als elk ander algenkweekconcept, eerder interessant zijn bij een wat hogere en vooral jaarrond meer constante zoninstraling. Geavanceerde kweektechnieken bieden naar verwachting niet de oplossing voor de hoge kosten. Systemen zoals een gesloten bioreactor kosten vaak een veelvoud van een open vijversysteem, terwijl de productiviteit niet met eenzelfde veelvoud wordt vergroot.

Literatuur

1. Dekker, A., Menkveld, W., & Franken, P. (2013). SYMBAAL-zuivering; Theoretische Verkenning Van De Haalbaarheid. STOWA Rapport 2013-10.
2. Park, J.B.K., & Craggs, R.J. (2011). Nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science & Technology*, 63(8), 1758–1764.
3. Gutzeit, G., Lorch, D., Weber, A., Engels, M., Neis, U. (2005). Biofloculent algal-bacterial biomass improves low-cost wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 52(12), 9-18.

4. Hende, S. van den, Vervaeren, H., Saveyn, H., Maes, G., Boon, N. (2010). Microalgal bacterial floc properties are improved by a balanced inorganic/organic carbon ratio. *Biotechnology and Bioengineering*, 108(3), 549-557.
5. Boelee, N.C., Temmink, H., Janssen, M., Buisman, C.J.N., Wijffels, R.H. (2011). Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms. *Water Research*, 4, 460-473.
6. Boelee, N.C., Temmink, H., Janssen, M., Buisman, C.J.N., Wijffels, R.H. (2012). Scenario analysis of nutrient removal from municipal wastewater by microalgal biofilms. *Water*, 4(2), 460-473.
7. Metcalf, I., Eddy, H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* 4th ed. Columbus OH: McGraw-Hill.
8. STORA (1986). *Energiebesparing op carrousel en oxydatiesloten*, rapportnr. 86-8.
9. STOWA (2011). *Handboek slibgisting*, rapportnr. 2011-16.
10. Menkveld, W. & Dekker, A. (2011). *Algenfarming gunstig voor afvalwaterzuivering*. VMT, 21/22.
11. McLean, B.M., Baskaran, K., Connor, M.A. (2000). The use of algal-bacterial biofilms to enhance nitrification rates in lagoons: experience under laboratory and pilot-scale conditions. *Water Science and Technology*, 42(10-11), 187-194.