

stowa

THEORETISCHE VERKENNING VAN DE HAALBAARHEID

SYMBAAL ZUIVERING



RAPPORT

2013
10

SYMBAALZUIVERING

THEORETISCHE VERKENNING VAN DE HAALBAARHEID

RAPPORT

2013

10

ISBN 978.90.5773.607.0



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

PROJECTUITVOERING

Arjan Dekker, Witteveen+Bos
Wilbert Menkveld, Witteveen+Bos
Peter Franken, Witteveen+Bos

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Stefan Weijers, Waterschap de Dommel
Erik Rekswinkel, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Cora Uijterlinde, STOWA
Hardy Temmink, WUR en Wetsus
Anthony Verschoor, Wetsus en Duplaco
George Zoutberg, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Mathijs Oosterhuis, Waterschap Regge en Dinkel

FOTO OMSLAG Algenfarmingproject bij Waterstromen te Olburgen

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2013-10

ISBN 978.90.5773.607.0

COPYRIGHT De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

DISCLAIMER Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

SAMENVATTING

Symbaalzuivering is een zuiveringsconcept waarbij de symbiose tussen bacteriën en algen wordt gebruikt voor afvalwaterzuivering. Met dit zuiveringsconcept is het in potentie mogelijk om energiebesparing, grondstoffen terugwinning en vergaande nutriëntenverwijdering in één proces te combineren. Het doel van deze theoretische studie was het verkennen of en in welke vorm het symbaalzuiveringsconcept, op termijn, technisch en economisch haalbaar kan zijn voor de behandeling van (communaal) afvalwater in Nederland.

THEORIE

De symbiotische samenwerking is op hoofdlijnen een uitwisseling van koolstofdioxide (CO_2) en zuurstof (O_2) tussen bacteriën en algen waarbij gelijktijdig nutriënten worden omgezet en vastgelegd. De energie voor deze samenwerking wordt geleverd door zonlicht, CO_2 uit afbraak van organisch materiaal en O_2 uit fotosynthese van algen. Door deze samenwerking worden nutriënten uit afvalwater verwijderd door omzetting en vastlegging zonder de inzet van beluchting zoals bij conventionele waterzuivering.

In de symbiotische samenwerking zijn de volgende processen belangrijk:

- fotosynthese voor energie voor algengroei en productie van O_2 ;
- oxidatie van organisch materiaal voor energie voor bacteriegroei en productie van CO_2 ;
- stikstofverwijdering door vastlegging in biomassa en omzetting via nitrificatie en denitrificatie;
- fosfaatverwijdering door vastlegging in biomassa.

De snelheid waarmee deze processen verlopen en dus het oppervlak dat nodig is voor de symbaalzuivering wordt met name bepaald door de lichtenergie die geleverd wordt door de zon. Zonlicht is de beperkende factor omdat de inzet van kunstmatige belichting voor algengroei, met als doel nutriëntenverwijdering uit communaal afvalwater, economisch niet haalbaar is. Andere factoren die het verloop van de processen bepalen zijn temperatuur en pH.

CONCEPTEN EN RESULTATEN

De haalbaarheid van twee symbaalzuiveringsconcepten is verkend ten opzichte van een referentie rwzi. De twee symbaalzuiveringsconcepten zijn:

- symbaalzuivering na de voorbezinktank (VBT) parallel aan rwzi;
- symbaalzuivering na DAF (Dissolved Air Flotation) parallel aan de rwzi.

De symbaalzuivering wordt parallel aan de rwzi geplaatst omdat deze de rwzi niet kan vervangen. In de nacht en in de donkere wintermaanden is daarvoor geen of te weinig zonlicht beschikbaar en kunstmatige belichting is voor dit concept economisch onhaalbaar. Tijdens deze donkere perioden zal de conventionele rwzi het water dus moeten zuiveren. De potentiële meerwaarde van DAF ten opzichte van een voorbezinktank is dat hogere afscheidingsrendementen voor zwevende stof en fosfaat kunnen worden gehaald en de samenstelling van het afvalwater tot op zekere hoogte gestuurd kan worden.

Op basis van een massabalans en technologische kentallen is de symbaalzuivering gedimensioneerd en zijn de operationele aspecten zoals energie en slibproductie van de conventionele rwzi berekend. Met behulp van eenheidsprijzen is een kosten- en batenganalyse uitgevoerd,

waarmee de productiekosten van symbaalbiomassa zijn berekend. Dat is de prijs waarvoor de symbaalbiomassa verkocht zou moeten worden om het concept kostenneutraal te maken. Op de resultaten is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De technologische achtergrond van de symbaal massabalans is geheel gebaseerd op werk van Boelee et. al. [4] uit het werk getiteld: "Scenario Analysis of Nutrient Removal from Municipal Wastewater by Microalgal Biofilms".

Uit de resultaten blijkt dat het toepassen van DAF voor een symbaalzuivering ongunstig is omdat de kosten van deze variant altijd hoger zijn dan zonder DAF door hogere investerings- en operationele kosten. Wanneer de kapitaallasten buiten beschouwing worden gelaten blijft het concept met DAF nog steeds duurder dan het VBT concept. Wel resulteert het DAF-concept altijd in een kleinere voetafdruk van de symbaalzuivering.

Bij beide concepten is er een CO₂ tekort door de te lage CZV/N ratio van het influent. Dat tekort kan alleen worden opgevuld door externe CO₂ dosering. Een interne recirculatie van koolstof via bijvoorbeeld biomassavergisting, WKK en terugvoer van rookgassen kan het koolstof tekort inherent aan de influentsamenstelling niet wegnemen. Dit zou alleen lukken wanneer via deelstroombehandeling alle in de gisting vrijgekomen stikstof wordt verwijderd en de symbaalzuivering alleen de CO₂ maar niet de bijbehorende nutriënten krijgt. Dit geldt ook voor dosering van CO₂ vrijkomend uit de verwerking van primair slib.

De waterzuiveringskosten bovenop de kosten van de conventionele zuivering door het toepassen van symbaalzuivering bedragen tussen de 0,3 en 0,5 EUR/m³ bij een realistische Quantum Yield van 0,02 mol O₂/mol fotonen. Daarbij wordt aan algenbiomassa geen waarde toegekend. Conventionele waterzuivering kost circa 0,75 EUR/m³ bij een i.e. tarief van EUR 35,13 per i.e. en 130 liter afvalwater per i.e. per dag¹. Om kostenneutraal te kunnen zijn zou ruwe symbaalbiomassa in het VBT concept tussen de 1,4 en 2,7 EUR/kg DS (70% alg) moeten opbrengen².

Het ruimtegebruik voor een 100.000 i.e. symbaalzuivering ligt tussen de 6 en 12 hectare (0,6 tot 1,2 m² per i.e.) afhankelijk van de efficiëntie waarmee algen het zonlicht gebruiken voor fotosynthese. De zomergemiddelde verwijdering van stikstof en fosfaat zit op 3,8 tot 7,7 gN.m⁻².d⁻¹, 0,24 tot 0,48 gP.m⁻².d⁻¹ en zomergemiddelde biomassaproductie op 15,4 tot 30,8 gODS.m⁻².d⁻¹. Deze resultaten komen overeen met de bevindingen van enkele labschaal experimenten [12, 25, 26].

Uit de STOWA-studie "effluentpolishing met algen" blijkt dat met algentechnologie als nabehandeling de extra kosten tussen de EUR 0,12 tot 0,14 per m³ behandeld water liggen. Daarbij moet worden opgemerkt dat bij effluentpolishing circa 10 mg N/l wordt verwijderd en bij de symbaalzuivering circa 50 mg N/l. Daarom zijn de kosten per kilo verwijderd stikstof bij de symbaalzuivering tot een factor 5 lager. De voetafdruk van symbaalzuivering is hierbij met 0,6 tot 1,2 m² per i.e. mogelijk lager dan bij een algenvijver als effluentpolishing waar met behulp van pilotonderzoek circa 3,8 m² per i.e. werd vastgesteld [2].

- 1 De gestandaardiseerde kosten voor het zuiveren van afvalwater waren in 2009 voor alle waterschappen gemiddeld EUR 35,13 per i.e. Dit bedrag is opgebouwd uit kapitaallasten, operationele beheerkosten, operationele onderhoudskosten en eventuele opbrengsten.
- 2 In de praktijk kunnen de gepresenteerde kosten en ruimtebeslag hoger liggen omdat het geheel is gedimensioneerd op een aanvoer van 130 liter afvalwater per i.e. per dag met een ammoniumgehalte van 50 mg N/l. Daarbij is regenweer, rioolvreemd water en organische stikstof dus buiten beschouwing gelaten.

AFZETMARKT SYMBAALBIOMASSA

De potentiële marktwaarde van symbaalslib voor toepassingen als energiebron, meststof en diervoeder ligt in de range van 0,01 tot 0,75 EUR/kg DS. Bij een netto waardevermeerdering van het product van 3% per jaar ligt de potentiële marktwaarde over 10 jaar op hoogstens 1,0 EUR/kg DS. De werkelijke waarde ligt waarschijnlijk nog lager door de oorsprong van de nutriënten en de mogelijke aanwezigheid van verontreinigingen zoals zware metalen. Uit deze doorrekening blijkt dat voor deze toepassing het toekomstperspectief over 10 jaar beperkt is aangezien de productiekosten tussen de 1,4 en 2,7 EUR/kg DS liggen en dus fors zouden moeten dalen.

Specifieke algensoorten die worden gebruikt voor vis- en schelpdierteelt of bepaalde stoffen die in kleine concentraties in de algenbiomassa aanwezig zijn kunnen een veelvoudig hogere waarde vertegenwoordigen. Dit kan oplopen tot enkele euro's per kilogram. Gezien de aard van symbaalzuivering (gemengde culturen en kweek op huishoudelijk afvalwater) en de grote mate aan raffinage die nodig is om waardevolle stoffen uit symbaalbiomassa te extraheren zijn deze toepassingen voor symbaalbiomassa nu nog niet interessant.

POTENTIE VOOR HET SYMBAALCONCEPT IN NEDERLAND

Uit de verkenning blijkt dat een symbaalzuivering voor rioolwater in Nederland de komende jaren niet kansrijk is. Het is zeker geen alternatief voor de conventionele hoofdzuivering omdat in de winter en 's nachts de effluenteisen niet kunnen worden gehaald door een gebrek aan licht. Het kunstmatig belichten in perioden met te weinig licht is economisch gezien niet haalbaar. De symbaalzuivering lijkt in de toekomst het eerst kansrijk parallel aan de conventionele zuivering indien een rwzi uitgebreid moet worden omdat door een hogere belasting in de zomermaanden (april-september) de effluenteisen niet meer worden gehaald, denk daarbij aan tourisme. In dat geval is de symbaalzuivering geen aanvulling meer op de bestaande rwzi maar een noodzakelijke uitbreiding.

Er zijn geen redenen om aan te nemen dat de kosten voor toepassing van een symbaalconcept voor zowel waterzuivering als grondstofproductie zullen dalen. Of een dergelijk concept in de toekomst economisch haalbaar wordt hangt daarom af van een toenemende afzetmarkt en economische waarde van algen. Het winnen van hoogwaardigere grondstoffen uit algen via onder andere raffinage staat nog in de kinderschoenen en gaat nog minimaal 5 jaar duren voordat hier marktrijpe resultaten van verwacht mogen worden. Er is daarom de komende jaren geen markt voor het symbaalconcept als concept voor de productie van grondstoffen.

AANBEVELINGEN

De uitkomsten van de verkenning naar de economische haalbaarheid van symbaalzuivering geven geen basis voor een nadere verkenning of om op korte termijn een pilotonderzoek te starten. Hoewel het symbaalconcept nu en op middellange termijn in de onderzochte configuratie economisch niet haalbaar is blijft het concept wegens het duurzaamheidspotentieel interessant om te verkennen op labschaal. Een onderzoek naar hoe en of de symbiose tussen bacterien en algen optimaal kan worden benut kan in de toekomst nieuwe concepten voor waterzuivering en of waardevolle biomassaproductie opleveren.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

SUMMARY

Symbaal treatment is a concept in which symbiosis between bacteria and algae is used for wastewater treatment. This treatment concept has the potential to combine resource recovery, energy saving and advanced nutrient removal in one process. The purpose of this study was to explore whether the symbaal treatment concept could be technologically and economically feasible for treatment of domestic wastewater in the Netherlands.

THEORY

De symbiotic co-operation is basically an exchange of carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) between bacteria and algae in which nutrients are simultaneously converted and fixed in biomass. The energy for co-operation is delivered by sunlight, CO₂ comes from the oxidation of organic material and O₂ is delivered by algal photosynthesis. Because of this co-operation nutrients are removed from wastewater by conversion and fixation in biomass without active aeration which is required for conventional wastewater treatment.

The following processes are important for symbiotic co-operation:

- photosynthesis which delivers energy for algal growth and produces O₂;
- oxidation of organic material which delivers energy for bacterial growth and produces CO₂;
- nitrogen removal through fixation in biomass and conversion to nitrogen gas via nitrification and denitrification;
- phosphate removal through accumulation in biomass.

The rate at which these processes occur, which determines the surface area required for symbaal treatment, is predominantly influenced by the light energy that is delivered by the sun. Sunlight is the limiting factor since artificial lighting is not feasible for algae growth with the purpose of removing nutrients from wastewater. Other factors that influence the process rates are temperature and pH.

CONCEPTS AND RESULTS

The feasibility of two symbaal concepts are studied relative to a reference conventional wastewater treatment plant (WWTP). The two symbaal concepts are:

- symbaal treatment after the primary sedimentation tank (PST) parallel to the WWTP;
- symbaal treatment after DAF (Dissolved Air Flotation) parallel to the WWTP.

The symbaal concept is applied parallel to the WWTP because it can't replace the WWTP since artificial lighting, which is required at night and during dark winter months, is economically unfeasible in this concept. Therefore during these periods the conventional domestic WWTP will have to treat the wastewater. The potential advantages of DAF treatment are higher pre-treatment efficiencies for suspended solids and phosphates and the opportunity to influence the water composition after treatment to a certain extend.

The dimensions of symbaal treatment and operational aspects such as energy use and sludge production of the conventional WWTP are estimated based on mass balances and technological design values. Costs of symbaal wastewater treatment and biomass production are estimated based on a cost benefit analysis using unit prices. The biomass production cost is the price at which the symbaal biomass should be sold to break even. The results are evaluated with a sensitivity analysis. The technological background of the symbaal mass balance is

completely based on the work of Boelee et. al. [4] from the paper titled “Scenario Analysis of Nutrient Removal from Municipal Wastewater by Microalgal Biofilms”

The results show that the application of DAF pre-treatment is unfavourable for the symbaal concept since costs of this concept are always higher because of investments in - and operation of the DAF installation. The costs of the DAF concept are still higher than the costs of the PST concept when the capital costs are not included. However, the DAF concept always has a smaller footprint than the PST concept.

Both concepts have a CO₂ shortage with the given COD/N ratio of the influent wastewater. That shortage can only be filled by external CO₂ dosing. An internal recirculation of carbon via digestion, CHP and return of flue gasses cannot reduce the carbon shortage inherent to the influent compositions. This would only be possible when a separate treatment is applied to remove all nitrogen that is released during digestion en de symbaal treatment only receives the CO₂ and not the nutrients. The same holds for dosing of CO₂ released during digestion of primary solids.

The costs of symbaal treatment additional to the costs of conventional treatment are between 0.3 and 0.5 EUR/m³ at a realistic Quantum Yield of 0.02 mol O₂/mol photons and when there is no value assigned to the biomass. Conventional wastewater treatment costs about 0.75 EUR/m³ at a p.e. tarif of EUR 35.13 per p.e. per year and a wastewater production of 130 liter per p.e. per day¹. The break even production costs of symbaal biomass in the PST concept ar between 1.4 and 2.7 EUR/kg DS (70% algae)².

The footprint of a 100.000 p.e. symbaal treatment plant is between 6 and 12 hectares (0.6 to 1.2 m² per p.e.) depending on the efficiency in which algae use sunlight for photosynthesis. The summer average removal of nitrogen and phosphate are 3.8 to 7.7 gN.m⁻².d⁻¹, 0.24 to 0.48 gP.m⁻².d⁻¹, the summer average biomass production is 15.4 to 30.8 gVSS.m⁻².d⁻¹. These results are in line with the conclusions from some lab scale experiments [12, 25, 26].

The STOWA study “effluentpolishing with Algae” states that the costs of algae treatment as effluent polishing technique are 0.12 to 0.14 EUR.m⁻³. It should be noted that with effluent polishing about 10 mg N/l is removed while symbaal treatment removes about 50 m N/l. Therefore the costs per kilogram nitrogen removed are potentially up to a factor 5 lower compared to effluentpolishing. The footprint of the symbaal concept is with 0.6 to 1.2 m² per pe potentially lower than the footprint of effluentpolishing which was about 3.8 m² per pe. However the footprint of effluentpolishing was determined with an actual pilot study.

MARKET FOR SYMBAAL BIOMASS

The potential market value of symbaal biomass for the applications as energy source, fertilizer and animal feed is in the range of 0.01 to 0.75 EUR/kg DS. Taking into account a net value increase of 3% per year the potential market value is maximally 1.0 EUR/kg DS in 10 years from now. The actual value of symbaal biomass may be even lower because the origin of the nutrients used and the potential presence of micro pollutants such as heavy metals. This brief evaluation shows that the potential value now and over the coming years is much lower than the production costs. Therefore the future prospect of the symbaal concept is minimal.

- 1 The average costs of wastewater treatment in the Netherlands were EUR 35,13 per p.e. for all waterboards combined. This is the sum of all capital and operational costs minus eventual revenues.
- 2 In practice the presented costs and footprint may be even larger because the system is designed on a wastewater flow of 130 liter per p.e. per day with an ammonium concentration of 50 mg N/l. So rainfall and organic nitrogen are excluded.

Specific algal species which are used for fish and shellfish farming or which certain substances which are available in small amounts in algal biomass can represent a much higher market value. This can reach up to several euro's per kilogram. These applications of symbaal biomass are not yet relevant given the nature of the symbaal concept (mixed cultures grown on domestic wastewater) and the high amount of bio-refinery that is required to extract the valuable substances from the biomass

SYMBAAL CONCEPT POTENTIAL IN THE NETHERLANDS

The evaluation clearly shows that the symbaal concept has no potential over the coming years for treatment of domestic wastewater in the Netherlands. It is certainly not an alternative for the activated sludge system since at night and during the dark winter months the effluent requirements cannot be obtained. Artificial lighting in these periods with limited sunlight is economically unfeasible. Nor is the symbaal concept suitable as a post-treatment technology because the concentration of organic material in effluent is too low as a source of CO₂ in the algal-bacterial symbiosis. The symbaal concept may in the future initially be feasible when applied parallel to the conventional WWTP which should be expanded because of to high summer loads (april-september). For example because of tourism. In that case the symbaal concept may avoid investments in additional activated sludge volume.

There are no reasons to assume that the costs of application of the symbaal concept for both wastewater treatment and biomass production will decrease. Whether such a concept will be economically feasible in the future therefore depends on an increasing market and economic value of algal biomass. Extraction of high value raw materials from algal biomass by bio-refinery is still in its infancy and will take at least another 5 years before market ready results can be expected. Therefore there is no market for the symbaal concept as wastewater treatment technology nor as biomass production technology.

RECOMMENDATIONS

The results of this evaluation on the economical feasibility of the symbaal concept to not provide an incentive for further exploration of the concept or a pilot study. Although the concept is not economically feasible, the technical potential because of sustainability remains an interesting topic of further applied research on lab-scale. Further research to how the symbiosis between algae and bacteria can be optimized may result in new concepts for sustainable wastewater treatment and biomass production in the future.

DE STOWA IN BRIEF

The Foundation for Applied Water Research (in short, STOWA) is a research platform for Dutch water controllers. STOWA participants are all ground and surface water managers in rural and urban areas, managers of domestic wastewater treatment installations and dam inspectors.

The water controllers avail themselves of STOWA's facilities for the realisation of all kinds of applied technological, scientific, administrative legal and social scientific research activities that may be of communal importance. Research programmes are developed based on requirement reports generated by the institute's participants. Research suggestions proposed by third parties such as knowledge institutes and consultants, are more than welcome. After having received such suggestions STOWA then consults its participants in order to verify the need for such proposed research.

STOWA does not conduct any research itself, instead it commissions specialised bodies to do the required research. All the studies are supervised by supervisory boards composed of staff from the various participating organisations and, where necessary, experts are brought in.

The money required for research, development, information and other services is raised by the various participating parties. At the moment, this amounts to an annual budget of some 6,5 million euro.

For telephone contact number is: +31 (0)33 - 460 32 00.

The postal address is: STOWA, P.O. Box 2180, 3800 CD Amersfoort.

E-mail: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl.

SYMBAALZUIVERING

INHOUD

	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
1	INLEIDING	1
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doel	1
	1.3 Leeswijzer	1
2	THEORIE	2
	2.1 Symbiose	2
	2.2 Groeivorm	3
	2.2.1 Gesuspendeerde groei	4
	2.2.2 Gefixeerde groei	4
	2.3 Biomassa samenstelling	4
	2.3.1 Gesuspendeerde groei	5
	2.3.2 Gefixeerde groei	5
	2.4 Belangrijkste symbaalprocessen	6
	2.4.1 Fotosynthese	6
	2.4.2 CZV-oxidatie	6
	2.4.3 Stikstofverwijdering	6
	2.4.4 Fosfaatopname en -vastlegging	7
	2.4.5 Microverontreinigingen	7
	2.5 Kinetiek	8
	2.5.1 Temperatuur	8
	2.5.2 pH	8
	2.6 Labschaal experimenten	10
	2.6.1 Gesuspendeerde groei	10
	2.6.2 Gefixeerde groei	10

2.7	Algenkweekpilots in Nederland	11
2.8	Symbaalbiomassa als grondstof	11
2.8.1	Inleiding	11
2.8.2	Meststof, basischemicaliën en brandstof	11
2.8.3	Diervoeder, voeding en additieven	12
2.8.4	Waarde van algen bij verschillende toepassingen	12
3	HAALBAARHEID SYMBAALZUIVERING	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Symbaalzuiveringsconcepten	15
3.2.1	Conventionele rwzi	15
3.2.2	Symbaalzuivering parallel aan het actief-slibstelsysteem met voorbezinktank	16
3.2.3	Symbaalzuivering parallel aan het actief-slibstelsysteem met DAF	17
3.3	Uitgangspunten massabalansen	18
3.3.1	Afvalwatersamenstelling	18
3.3.2	Beluchting en biomassagroei	18
3.3.3	Slibverwerking	19
3.3.4	Verwijderingsrendementen DAF en VBT	19
3.3.5	Zoninstraling	20
3.3.6	Kosten	20
3.4	Toelichting symbaalbalans	22
3.4.1	Achtergrond	22
3.4.2	Berekeningen	22
3.5	Resultaten	24
3.5.1	Symbaalzuivering parallel aan het actief-slibstelsysteem met voorbezinktank	24
3.5.2	Symbaalzuivering met DAF parallel aan het actief-slibstelsysteem	26
3.5.3	Vergelijking resultaten	28
4	DISCUSSIE	30
4.1	Haalbaarheid symbaalzuivering	30
4.1.1	Technisch	30
4.1.2	Economisch	31
4.2	Afzetmarkt algen	31
4.3	Potentie voor Nederland	32
4.4	Risico's en onzekerheden	32
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	34
5.1	Conclusies	34
5.2	Aanbevelingen	34
6	REFERENTIES	35
	BIJLAGEN	
1	BEREKENING THEORETISCH MAXIMALE ALGENPRODUCTIE	39
2	HAALBAARHEID KUNSTMATIGE BELICHTING	41
3	PRIORITAIRE STOFFEN	47
4	VBT SYMBAALZUIVERING MASSABALANS	51

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Energiebesparing, grondstoffenterugwinning en vergaande nutriëntenverwijdering zijn belangrijke trends in de Nederlandse afvalwaterzuiveringsmarkt en daarbuiten. De symbiose tussen bacteriën en algen heeft de potentie om daar een bijdrage aan te leveren. In Nederland is de toepassing van deze symbiose nog slechts theoretisch. In verschillende landen in de wereld wordt geëxperimenteerd met de toepassing deze symbiose tot op een schaalgrootte van 30m².

Bij deze symbiose wordt energie bespaard doordat beluchting niet nodig is, omdat algen de benodigde zuurstof leveren. Nutriënten worden verwijderd door een combinatie van omzettingen en vastlegging en de geproduceerde biomassa kan worden ingezet als grondstof. Door deze combinatie van mogelijkheden is het concept symbaalzuivering ontstaan: de SYMbio-tische BActerie ALgenzuivering. De vorm waarin dit type zuivering mogelijkheden biedt voor de behandeling van (communaal) afvalwater in Nederland en een verkenning van de haalbaarheid zijn in dit rapport uitgewerkt.

1.2 DOEL

Het verkennen of en in welke vorm het symbaalzuiveringsconcept, op termijn, technisch en economisch haalbaar kan zijn voor de behandeling van (communaal) afvalwater in Nederland.

1.3 LEESWIJZER

Dit rapport is verdeeld in 5 hoofdstukken waarvan het eerste hoofdstuk de inleiding is. In hoofdstuk 2 wordt de theorie achter symbaalzuivering beschreven, worden de onderzoeksresultaten van een aantal publicaties toegelicht en wordt een potentiële marktwaarde van symbaalbiomassa geschetst. De verkenning van de haalbaarheid met alle uitgangspunten, berekeningen en resultaten wordt toegelicht in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 is de discussie uitgewerkt en de conclusies en aanbevelingen zijn weergegeven in hoofdstuk 5.

2

THEORIE

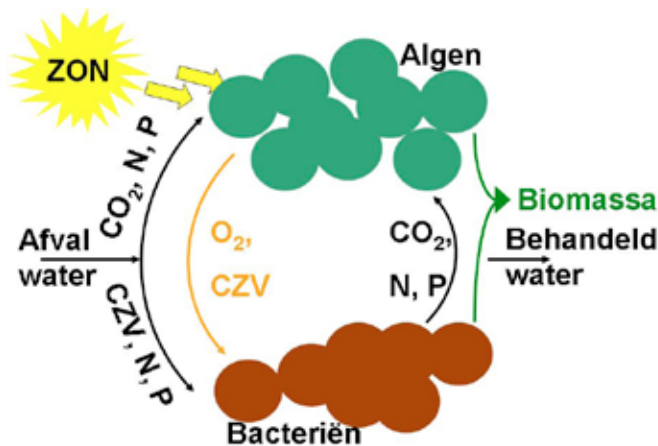
2.1 SYMBIOSE

De symbiotische samenwerking is op hoofdlijnen een uitwisseling van koolstofdioxide (CO_2) en zuurstof (O_2) tussen bacteriën en algen, waarbij gelijktijdig nutriënten worden omgezet en vastgelegd. De energie voor deze samenwerking wordt geleverd door (zon)licht, CO_2 uit afbraak van bCZV (biologisch afbreekbare fractie van het chemisch zuurstofverbruik) en O_2 uit fotosynthese door algen. Door deze samenwerking kunnen nutriënten vergaand uit afvalwater worden verwijderd met als enige toevoeging CO_2 . Extra CO_2 moet worden toegevoegd, omdat de afbraak van bCZV onvoldoende CO_2 oplevert om het systeem in gang te houden.

De inzet van fotosynthese en de symbiose tussen algen en bacteriën voor de behandeling van afvalwater is voor het eerst beschreven in een reeks artikelen tussen 1951 en 1953 getiteld “Algae symbiosis in oxidation ponds” [8, 9,10]. Daarin wordt de interactie beschreven tussen algen en bacteriën voor de zuurstofvoorziening in oxidatievijvers voor afvalwaterbehandeling. Ontwerpparameters en dimensionering van een dergelijk systeem worden beschreven in een later artikel van dezelfde auteurs in 1957 [11]. Zowel de potentie van zuurstofvoorziening voor aerobe oxidatie als de potentie van het vastleggen van waardevolle nutriënten voor hergebruik worden daarin al beschreven.

De SYMbiotische samenwerking tussen BACTERIËN en ALGEN (SYMBAAL) wordt weergegeven in afbeelding 2.1. Ter illustratie zijn de bacterie- en algenbiomassa gescheiden van elkaar weergegeven, maar in de praktijk zitten de bacteriën dichtbij of bovenop de alg. Ook is het aantal bacteriën typisch een factor 10 tot 100 groter dan het aantal algen [3]. De algen:bacteriën massaverhouding ligt op circa 3:1 en fluctueert tussen 1:1 en 5:1, afhankelijk van de omstandigheden.

AFBEELDING 2.1 SYMBIOSE TUSSEN ALGEN EN BACTERIËN¹



¹ Afbeelding opgesteld naar voorbeeld van [46]

De symbaalbiomassa groeit in een biofilm of in suspensie. In beide gevallen verloopt het proces in hoofdlijnen als volgt. Het afvalwater met daarin nutriënten (N en P), CZV en opgelost CO₂ dient als nutriënten-, energie- en koolstofbron voor de symbaalbiomassa. Onder invloed van licht verrichten autotrofe algen fotosynthese. Daarbij worden CO₂ en water opgenomen en worden zuurstof en organische stof geproduceerd. Nutriënten worden tijdens de groei in de algencel ingebouwd en daardoor verwijderd uit het afvalwater. Een deel van de organische stof wordt intern gebruikt, een ander deel wordt door algen uitgescheiden. Deze EPS (extracellular polysaccharides and polypeptides) kan dienen als hechtmateriaal voor biofilms en is een bron van CZV voor bacteriën. CZV uit het influent aangevuld met EPS wordt met zuurstof door heterotrofe bacteriën omgezet naar CO₂ en water. Daarbij worden nutriënten omgezet en opgenomen en wordt organisch materiaal omgezet in anorganisch materiaal en nutriënten (CO₂, NO₃, NH₄ en PO₄). Nutriënten en CO₂ kunnen vervolgens weer worden gebruikt door de algen.

Bij symbaalzuivering op huishoudelijk afvalwater ontstaat theoretisch een CO₂-tekort bij een gesloten zuurstofbalans [4]. Om de symbiose in stand te houden is aanvullend CO₂ nodig.

De producten van symbaalzuivering zijn gezuiverd afvalwater en biomassa.

2.2 GROEVORM

Symbaalbiomassa kan worden ingezet voor waterzuivering in verschillende groeivormen. In deze studie is onderscheid gemaakt tussen twee hoofdvormen. Dat zijn:

- gesuspendeerde groei in de vorm van vlokken of als eencellige;
- gefixeerde groei in een biofilm of op een andere manier ingevangen.

In de STOWA-studie “Effluentpolishing met algen” is de gesuspendeerde groeivorm gebruikt voor het nazuiveren van rwzi-effluent [1, 2]. Bij andere studies is gesuspendeerde groei ook gebruikt om ruw afvalwater te behandelen met behulp van de symbaal [3, 12, 13, 14]. Gefixeerde groei is toegepast in de vorm van een biofilm voor de behandeling van rwzi-effluent [5,6] en voor de behandeling van een grotere variëteit aan afvalwaterstromen zoals olie- of sulfidenhoudend afvalwater en afvalwater van viskwekerijen [7]. Symbaalbiomassa kan met behulp van EPS een biofilm zelfstandig in stand houden. Een andere mogelijkheid is om symbaalbiomassa te enten in een poreus substraat van bijvoorbeeld alginaat [15]. De belangrijkste verschillen tussen gesuspendeerde en gefixeerde groei zijn:

- Gesuspendeerde groei betekent dat het afvalwater met symbaalbiomassa in beweging moet worden gehouden om ervoor te zorgen dat de biomassa gesuspendeerd blijft. De scheiding van symbaalbiomassa en water is noodzakelijk om uitspoeling van slib tegen te gaan en om een slibleeftijd te creëren waarbij ook nitrificatie kan optreden zodat ook de gewenste stikstofomzettingen in de symbaalzuivering kunnen plaatsvinden.
- Gefixeerde groei in een biofilm, of ingevangen in een poreus substraat van alginaat, betekent dat de biomassa op dezelfde plek blijft en het afvalwater daarlangs wordt geleid. Menging en scheiden van symbaalbiomassa en afvalwater is dan niet meer nodig. In plaats daarvan vereist deze groeivorm een juiste verdeling van afvalwater over de gefixeerde biomassa.

De voor- en nadelen van gesuspendeerde en gefixeerde groei zijn samengevat in tabel 2.1.

TABEL 2.1 VOOR- EN NADELEN VAN SYMBAALTECHNIEKEN VOOR AFVALWATERZUIVERING

	Gesuspendeerd	Gefixeerd
Voordelen	- Menging zorgt voor goede uitwisseling van stoffen en intermitterend licht.	- Scheiding van water en biomassa al aparte processtap is niet nodig. - Een hoge biomassaconcentratie is mogelijk.
Nadelen	- De scheiding van water en biomassa is kosten- en/of energie-intensief. - De biomassaconcentratie is laag om suspensie mengbaar te houden en om voldoende lichtinbreng mogelijk te maken.	- Uitwisseling van stoffen is afhankelijk van diffusie door een biofilm en daardoor trager.

2.2.1 GESUSPENDEERDE GROEI

De meeste conventionele algenbioreactoren waarin algen in suspensie worden gekweekt zijn de zogenoemde "High Rate Algae Ponds" HRAP's. Dit zijn ondiepe (ca. 30 cm) vijvers die worden gemengd met een schoepenrad. Andere bekende systemen waarin algen in suspensie groeien zijn bijvoorbeeld de plaat- of buisbioreactoren. De bedoeling van deze systemen is dat het groeimedium en de biomassa goed worden gemengd. De mengintensiteit bepaalt in hoeverre er sprake is van zuurstof, CO₂-, temperatuur- en nutriëntgradiënten. Voor licht geldt onafhankelijk van de mengintensiteit een gradiënt welke afhankelijk is van de biomassaconcentratie en de lichtdoorlaatbaarheid van het groeimedium (afvalwater).

2.2.2 GEFIXEERDE GROEI

Gefixeerde groei kan ontstaan in natuurlijke biofilms die in stand worden gehouden door de uitscheiding van EPS of door de biomassa ingekapseld te laten groeien in een poreus dragermateriaal. EPS werkt als een kleefstof die de vorming van een biofilmmatrix mogelijk maakt door het invangen en vasthouden van losse cellen, dit kan ook optreden bij vlokvorming in gesuspendeerde groei. In deze systemen wordt het afvalwater langs de biomassa geleid in plaats van dat afvalwater en biomassa worden gemengd. Door het gebrek aan menging van biomassa en water ontstaat een sterke gradiënt door de biofilm voor alle omgevingsfactoren behalve temperatuur.

2.3 BIOMASSA SAMENSTELLING

Symbaalbiomassa bestaat uit verschillende functionele groepen micro-organismen. De naamgeving van deze groepen wordt toegelicht in tabel 2.2. De eerste naam staat voor de energiebron die het organisme gebruikt, de tweede naam voor de elektrondonor en de derde naam voor de koolstofbron die het organisme gebruikt voor celsynthese. Als voorbeeld kan de groep nitrificeerders worden gebruikt. Nitrificeerders gebruiken chemische energie als energievoorziening en geen zonlicht, de eerste naam is dus chemo. De elektrondonor is ammonium (NH₄⁺), een anorganische stof, dus de tweede naam is litho. En de koolstofbron, CO₂, die nitrificeerders gebruiken is ook anorganisch dus de derde naam is auto. Nitrificeerders behoren dus tot de groep chemo-litho-autotrofen. In de praktijk wordt de tweede naam (de elektrondonor) vaak overgeslagen.

TABEL 2.2

NAAMGEVING ORGANISME GROEPEN

Bron	Keuze	1 ^e naam	2 ^e naam	3 ^e naam	
Energiebron	Licht	foto-	x	x	troof
	Chemisch	chemo-	x	x	troof
Elektrondonor	Organische verbinding	x	organo-	x	troof
	Anorganische verbinding	x	litho-	x	troof
Koolstofbron	Organische verbinding	x	x	hetero-	troof
	Anorganische verbinding	x	x	auto-	troof

2.3.1 GESUSPENDEERDE GROEI

De werkelijke biomassasamenstelling in elk type bacterie-algenreactor hangt af van verschillende omgevingsfactoren. Daarom valt de samenstelling alleen in algemene bewoordingen te beschrijven. In goed gemengde systemen zullen anaerobe omstandigheden in de reactor doorgaans niet ontstaan. Alleen bij de langdurige afwezigheid van licht en de afwezigheid van nitraat (bijvoorbeeld in niet gemengde zones op de bodem van een HRAP) kan anaerobe biomassa de overhand krijgen. Verder is het waarschijnlijk dat in de kern van een symbaalvlok anoxische omstandigheden ontstaan waardoor denitrificatie kan optreden.

De meerderheid van de biomassa zal bestaan uit foto-autotrofen (zoals microalgen en cyanobacteriën), chemo-autotrofen (zoals nitrificeerders) en heterotrofen [3, 10, 14]. Bij lage zuurstofconcentraties of een volledig gebrek aan zuurstof en wanneer nitraat beschikbaar is, kan ook denitrificatie optreden, bijvoorbeeld binnenin vlokken of wanneer de zuurstof in de reactor is opgebruikt door het uitblijven van belichting.

2.3.2 GEFIXEERDE GROEI

Als gevolg van de gradiënt in biofilms ontstaan er niches waarin verschillende groepen micro-organismen kunnen overleven in één biofilm. De belangrijkste groepen organismen in gemengde biofilms zijn foto-autotrofen, chemo-autotrofen en heterotrofen met zowel aerobe, anoxische als anaerobe stofwisseling. De interacties in de biofilm zijn zowel symbiotisch als competitief van aard. De symbiotische groei is eerder omschreven in paragraaf 2.1. Een voorbeeld van gecombineerde symbiotische en competitieve groei is die van chemo-autotrofen zoals nitrificeerders met foto-autotrofe algen. De nitrificeerders maken gebruik van de zuurstof uit de foto-autotrofe omzetting (symbiose) maar zijn in competitie voor het anorganisch koolstof (CO₂) met dezelfde foto-autotrofen [6].

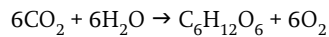
Aan de belichte zijde van de biofilm groeien met name foto-autotrofe organismen zoals micro-algen en cyanobacteriën waardoor er aerobe omstandigheden heersen. Tijdens de foto-autotrofe omzetting worden CO₂, water, nutriënten en zonlicht opgenomen en worden zuurstof en organische stof (CZV) uitgescheiden [7]. Deze stoffen kunnen vervolgens weer worden gebruikt door chemo-autotrofen en heterotrofen. Dieper in de biofilm zullen door de zuurstof- en lichtgradiënt anoxische tot anaerobe omstandigheden heersen.

2.4 BELANGRIJKSTE SYMBAALPROCESSEN

2.4.1 FOTOSYNTHESE

Naast het CZV in het influent en zuurstof uit de lucht worden de chemische energie en de zuurstof voor dergelijke symbiotische groei grotendeels geleverd door fotosynthese. Bij fotosynthese wordt water als elektronen-donor gebruikt waardoor de reactieproducten organische stof en zuurstof zijn zoals weergegeven in vergelijking 2.1.

VERGELIJKING 2.1. FOTOSYNTHESE



Het aantal mol zuurstof dat vrijkomt per hoeveelheid licht (in mol PAR [Photosynthetically Active Radiation] fotonen) wordt Quantum Yield genoemd. Het maximale rendement voor een monocultuur algen ligt rond de 10% [16], oftewel, de productie van 1 mol zuurstof kost 10 mol PAR fotonen. In de praktijk ligt de Quantum Yield op circa 3% (0,03 mol zuurstof per mol PAR fotonen), voor zowel pilot scale HRAP's [2] als gefixeerde groei op labschaal [5].

De hoogste Quantum Yield wordt behaald bij een lage lichtintensiteit en intermitterende belichting. Het verband tussen fotonopname en lichtintensiteit is ongeveer lineair tot circa $400 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of 87 W PAR m^{-2} . Daarna neemt het rendement door foto-inhibitie af. Dit is een van de redenen dat verticale plaat- of buisreactoren zijn ontwikkeld. De zoninstraling kan in Nederland op een zomermiddag $2000 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bedragen, waardoor veel van de zonne-energie nauwelijks wordt benut voor algengroei. Door reactoren verticaal te plaatsen neemt het specifiek oppervlak toe en wordt de hoge lichtintensiteit van de middagzon gespreid over meer oppervlak voor algengroei.

De Quantum Yield wordt onder andere beperkt door schaduw effecten door zwevende stof of de achtergrondkleur van het water. Het is aannemelijk dat bij een toenemende bacterie:alg-verhouding schaduw effecten toenemen en de Quantum Yield dus afneemt.

In de nachtperiode komt de fototrofe activiteit tot stilstand waardoor zuurstofconcentraties dalen door nitrificatie en aerobe respiratie. Wanneer de zuurstofconcentraties laag genoeg zijn zorgt denitrificatie in algenreactoren voor stikstofverwijdering, paragraaf 2.4.3.

2.4.2 CZV-OXIDATIE

De chemische energie (CZV) voor de groei van chemotrofe organismen in symbiotische systemen komt uit het afvalwater zelf maar wordt ook uitgescheiden door de fototrofe organismen. De CO_2 die vrijkomt bij de afbraak van CZV kan worden gebruikt voor fotosynthese.

2.4.3 STIKSTOFVERWIJDERING

In een waterzuivering wordt het merendeel van de stikstof verwijderd via nitrificatie en denitrificatie en een kleiner deel via vastlegging in biomassa. Wanneer algen worden ingezet is vastlegging in biomassa de belangrijkste component voor stikstofverwijdering. Bij symbaalzuivering is vastlegging niet de enige manier waarop stikstof wordt verwijderd. Theoretisch levert de nitrificatie- en denitrificatieroute bij symbaalzuivering zelfs een grotere bijdrage dan vastlegging [4].

2.4.4 FOSFAATOPNAME EN -VASTLEGGING

Fosfaat kan chemisch en biologisch worden vastgelegd om dit uit afvalwater te verwijderen. Biologische vastlegging vindt plaats door opname in de symbaalbiomassa, chemische vastlegging door binding met bijvoorbeeld ijzer of aluminium.

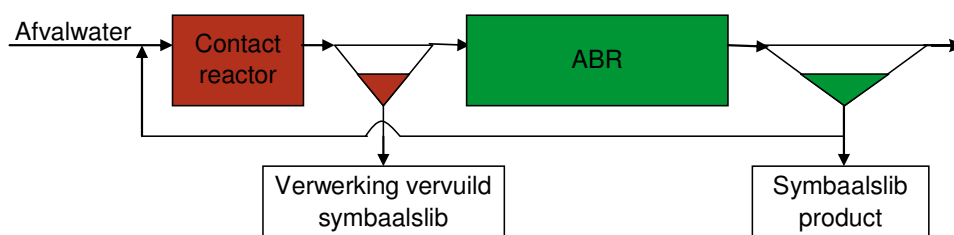
Resultaten uit lab- en pilotonderzoek voor zowel stikstof- als fosfaatverwijdering zijn samengevat in paragraaf 2.6.

2.4.5 MICROVERONTREINIGINGEN

Algen kunnen net als bacteriën zware metalen opnemen (biosorptie) en sommige organische vervuilingen omzetten, zoals bijvoorbeeld fluorantheen [19]. Biosorptie wordt veroorzaakt door ionenwisseling, chelatie, adsorptie en diffusie door het celmembraan [7, 20]. Daarmee kan afvalwater worden ontdaan van dergelijke microverontreinigingen. Concentraties van microverontreinigingen in rwzi effluent zijn opgenomen in bijlage III. Het probleem wordt daarbij voornamelijk geconcentreerd en verplaatst van de opgeloste naar de vaste fractie. Het voordeel van de verwijdering van microverontreinigingen verandert in een nadeel wanneer de biomassa een nieuwe toepassing krijgt. Een methode om de metalen eenvoudig van de biomassa te scheiden is nog niet op praktisch schaal beschikbaar [7].

Om biomassa te kunnen hergebruiken en gelijktijdig microverontreinigingen te verwijderen kan bijvoorbeeld tussenbezinking (of een andere vorm van biomassa- en waterscheiding) worden toegepast, afbeelding 2.2. Een deel van biomassa uit de bezinktank van de algen bioreactor (ABR) kan worden teruggepompt naar een kleine vijver, een contactreactor, waar microverontreinigingen worden verwijderd middels biosorptie. Deze vervuilde biomassa en primair slib worden vervolgens afgevangen in de navolgende tussenbezinking. Het overige afvalwater kan worden gebruikt om symbaalbiomassa van goede kwaliteit te produceren.

AFBEELDING 2.2 SCHETSVOORBEELD SYSTEEMCONFIGURATIE MET CONTACTREACTOR



De hardheid van water speelt een belangrijke rol in de capaciteit van algen om metalen te binden. Andere kationen zoals Ca^{2+} en Mg^{2+} concurreren namelijk met de zware metalen voor bindingsplaatsen aan de EPS. Daarbij beïnvloeden ook lichtintensiteit, pH, biofilmdichtheid, chelatoreiwitten, organische zuren en de tolerantie voor deze stoffen de opnamecapaciteit [7]. De verwijdering van microverontreinigingen door deze systeemconfiguratie kan een goede toevoeging zijn op de symbaalzuivering wanneer de geproduceerde biomassa door verontreinigingen niet bruikbaar blijkt. Het inzetten van symbaalzuivering voor de verwijdering van microverontreinigingen is geen doel op zich.

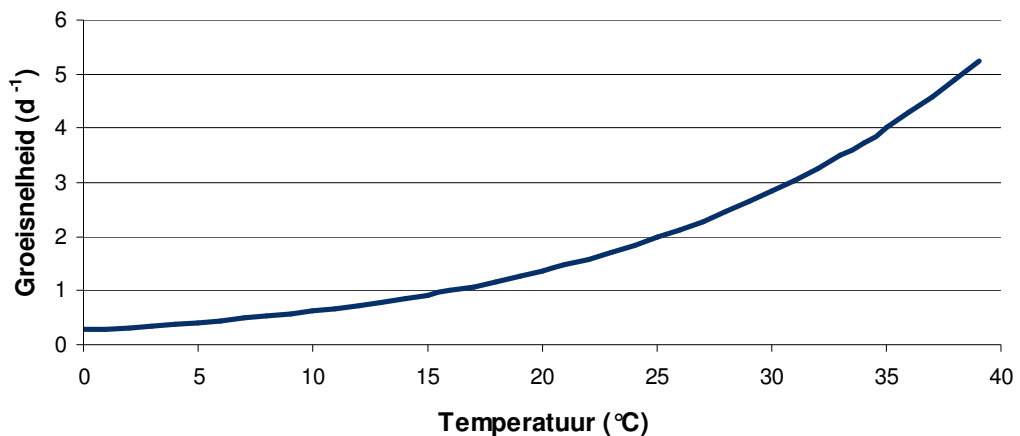
2.5 KINETIEK

De belangrijkste kinetische parameter in de symbaalzuivering is licht. Licht maakt fotosynthese mogelijk en daarmee algengroei en de productie van zuurstof voor de heterotrofe biomassa. De aan licht gerelateerde algengroei en symbaalbiomassagroei worden verder beschreven in hoofdstuk 2.4.1 en in bijlage I. Andere belangrijke parameters zijn temperatuur en pH. De nutriëntconcentratie is voor afvalwaterzuivering geen stuurparameter en moet voor afvalwaterbehandeling juist zo laag mogelijk zijn omdat aan een bepaalde lozingsnorm moet worden voldaan.

2.5.1 TEMPERATUUR

De snelheid van biologische processen is in grote mate afhankelijk van de temperatuur. Dit verband is voor een grote groep algen samengevat en weergegeven in afbeelding 2.3 [21]. Daarin komt de vuistregel naar voren dat een toename van 10 graden een verdubbeling van de groeisnelheid geeft. De maximale afvalwatertemperatuur van 20-25 °C in Nederland ligt nog onder het gebied van de optimale temperatuur voor mesofiele organismen. De minimumtemperatuur van afvalwater is ongeveer 8°C. Algengroei wordt in de wintermaanden met name beperkt door lichtinstraling. Daarbij kan door de lage temperatuur het aanwezige licht minder goed worden benut. Zowel de beperkte zoninstraling als de lage temperatuur zorgen ervoor dat een symbaalzuivering zonder kunstmatige belichting en verwarming maar een zeer beperkte rol zal spelen in afvalwaterzuivering in de wintermaanden. Daardoor blijft de toepassing van symbaalzuivering beperkt tot de zomermaanden (april-september).

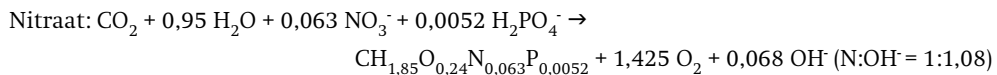
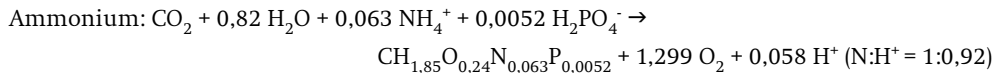
AFBEELDING 2.3 ALGENGROEISNELHEID ALS FUNCTIE VAN TEMPERATUUR



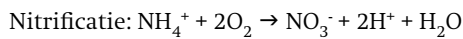
2.5.2 PH

De pH in een symbaalzuivering wordt beïnvloed door de stikstofbron die gebruikt wordt voor algengroei, de mate van nitrificatie en denitrificatie en de opname van het in het influent aanwezige bicarbonaat (HCO_3^-) via CO_2 . De opname van CO_2 uit de oplossing die door heterotrofen in de symbaalzuivering zelf is gevormd heeft netto geen effect op de pH.

Algengroei op ammonium werkt pH verlagend en algengroei op nitraat werkt pH verhogend volgens onderstaande vergelijkingen [4]. Omdat symbaalzuivering ruw afvalwater zal behandelen wordt stikstof aangeboden in de vorm van ammonium. Algen geven de voorkeur aan ammonium omdat deze stikstofbron minder energie vraagt voor celsynthese (lagere zuurstofproductie).

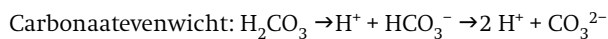


Nitrificatie werkt pH verlagend en denitrificatie pH verhogend volgens onderstaande versimpelde vergelijkingen:



Denitrificatie: $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 5\text{e}^- + 5 \text{[H]} \rightarrow 0,5 \text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ (waarbij [H] reductie equivalenten zijn die vrijkomen uit organische stof)

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt dat als gevolg van algengroei op ammonium en nitrificatie en denitrificatie de pH theoretisch zal dalen. In de beperkte selectie van lab- en pilot-studies uit paragraaf 2.6 is een constante of licht stijgende pH waargenomen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het onttrekken van carbonaat uit het aangeboden afvalwater. Ook het bufferend vermogen van het afvalwater speelt hierbij een rol.



PH VERANDERING IN DE PRAKTIJK

Uit de inventarisatie van lab- en pilotresultaten komen geen projecten met een pH-daling naar voren. Projecten met een vrij constante pH tot matige stijging (niet boven de pH 8,5) en projecten met een forse pH stijging van 8,5 tot meer dan 10 zijn wel beschreven. Wanneer mechanisch voorbehandeld afvalwater wordt gebruikt met ammonium als stikstofbron blijft de pH-stijging in de meeste gevallen beperkt tot 8,5, paragraaf 2.6.

Een pH van 8,5 of hoger remt de groei van algen en bacteriën in steeds grotere mate. Dit komt onder andere doordat bij een pH van 8,5 of hoger, ammonium in steeds grotere mate als "vrij ammonium" oftewel ammoniak [22] aanwezig is.

Nitrificerende en denitrificerende bacteriën werken binnen een pH-range van 6,5 tot 8,5 met het optimum rond een neutrale pH [24]. Controle van de pH rond de 8 resulteert in een hogere productiviteit [25] van symbaalsystemen en meer stikstofverwijdering vergeleken met systemen zonder pH-controle en ook het aandeel bacteriën in het symbaalbiomassa is dan groter [26].

In volgroeide biofilms loopt de pH terug van ongeveer >9,5 aan de buitenkant naar <8 aan de binnenkant van de biofilm. Deze gradiënt geeft meerdere pH gerelateerde niches en daardoor meer ruimte voor een grote variëteit aan bacteriën en algensoorten [6, 18].

2.6 LABSCHAAL EXPERIMENTEN

2.6.1 GESUSPENDEERDE GROEI

De prestaties van symbaalsystemen zijn op redelijke schaal, 8m³ op 32m², onderzocht door Park et. al. en gepubliceerd in een aantal artikelen [25, 26]. Park heeft gebruik gemaakt van rejectiewater dat een relatief laag aandeel opgelost CZV heeft ten opzichte van het ammoniumgehalte (CZV/N <1). De symbaalbiomassa groeide in een HRAP en werd van de waterfase gescheiden middels bezinking. De gebruikte lichtbron was zonlicht met een daggemiddelde zoninstraling van 6,1 kWh.m⁻².d⁻¹. Bij een verblijftijd van 4 tot 8 dagen werd een stikstofverwijdering behaald van 1,2-3,1 g N.m⁻².d⁻¹, een fosfaatverwijdering van circa 0,3 g P.m⁻².d⁻¹ en een biomassaproductie van 10-15 g DS.m⁻².d⁻¹. De pH liep uiteen van 6 tot 9.

Op een schaal van 30 en 600 liter (0,11 en 1,2 m²) heeft Gutzeit [12] de prestaties van symbaalsystemen onderzocht. In de kleine reactor werd met synthetisch afvalwater en een lichtsterkte van 10,2-12,3 kWh.m⁻².d⁻¹ in zonlichtequivalenten (12 uur licht en 12 uur donker) een biomassaproductie van circa 20 g DS.m⁻².d⁻¹ behaald, een stikstofverwijdering van circa 10 g N.m⁻².d⁻¹ en een fosfaatverwijdering van 1,1 g P.m⁻².d⁻¹. De stikstofverwijdering was met 50% van de geproduceerde biomassa aanzienlijk hoger dan alleen door vastlegging kan worden verklaard, terwijl ammoniakvervluchtiging als verwaarloosbaar werd beschouwd. Het is dus waarschijnlijk dat hier nitrificatie en denitrificatie hebben plaatsgevonden. De grotere reactor werd belicht met een lichtsterkte van ongeveer 3,1 kWh.m⁻².d⁻¹ in zonlichtequivalenten, PAR-fractie van 42,3%, (12 uur licht en 12 uur donker). Dat is ongeveer een vierde van de lichtsterkte die werd gehanteerd voor de kleine reactor. De verwijderingsrendementen van stikstof en fosfaat waren met ongeveer 5 g N.m⁻².d⁻¹ en 0,5 g P.m⁻².d⁻¹ ongeveer de helft lager en de biomassaproductie met 15 g DS.m⁻².d⁻¹ ongeveer een kwart lager.

2.6.2 GEFIXEERDE GROEI

Een publicatie van Boelee [5] bevat de meeste informatie van in een biofilm gefixeerde biomassagroei op afvalwater, in dit geval rwzi-effluent. Met een biofilm van 180 cm² werd bij een stikstof- en fosfaatbelasting van respectievelijk 1,0 g N.m⁻².d⁻¹ en 0,13 g P.m⁻².d⁻¹ een effluentconcentratie van <2,2 mg N/l en <0,15 mg P/l behaald. De 24 urenbelichting gaf een belichting van 2,84 kWh.m⁻².d⁻¹ in zonlichtequivalenten (PAR fractie van 42,3%). Andere publicaties van gefixeerde algenbiomassagroei van Wolf [6] en Guzzon [33] bevatten niet dergelijke nuttige informatie.

In een review artikel van Roeselers [7] wordt de potentie van biofilm systemen voor verschillende toepassingen geschetst. Daarin wordt ook een samenvatting gegeven van de verwijderingssnelheden van verschillende biofilmsystemen. Deze informatie is overgenomen in tabel 2.3. Deze verwijderingssnelheden benaderen de gerapporteerde prestaties van de biofilm van Boelee [5] zeer goed.

TABEL 2.3 BEHAALDE VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MET BIOFILM SYSTEMEN

Systeem	N-verwijdering (mg N m ⁻² d ⁻¹)	P-verwijdering (mg P m ⁻² d ⁻¹)
Algae Turf Scrubber (ATS)	1.110	730
Perifyton-vis mesocosmos	108	27
Effluentnazuivering	1.900	160
ATS gevoed met 1% koemest	720	330
Fototrofe biofilms in natuurlijke systemen	648	117

2.7 ALGENKWEKPILOTS IN NEDERLAND

In tabel 2.4 is een overzicht van lopende en afgeronde algenpilots in Nederland opgenomen. Informatie over prestaties van deze pilots is schaars wegens commerciële belangen en afspraken over kennisverspreiding. De mening van de geïnterviewde algenkwekers met betrekking tot de haalbaarheid van algenkweek in Nederland is dat wij technisch al heel ver zijn, maar dat de grootste uitdaging zit in het laag houden van de kosten. Ook is de markt voor algen nog zeer klein.

TABEL 2.4 OVERZICHT VAN ALGENKWEK PILOTONDERZOEK

Naam	Nutriënten	Reactor	Oppervlak (m ²)	Opbrengst (ton DS.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	CO ₂ dosering	Algensoort
Algenkwekerij Barchem BV	Dunne mestfractie	HRAP	-	30	nee	-
Algenkweek op drainwater Ecoferm	Kassen drainwater	HRAP	4 x 1.000	25	nee	Micractinium, Phaeodactylum
	Mestgisting digestaat	hybride (open & gesloten)	3 x 4	62 (ZG)	ja	Chlorella fusca
Zuivering antivries vliegtuigen	Glycol van de-icing (CZV)	raceway	1000	25	Glycol	-
Percolaatwater	Percolaatwater van de VAR	raceway	-	-	ja	Chlorella fusca
Algicoat	Rookgas en kunstmest	raceway	2 x 1500	-	-	-
AF&F Hallum	Gisting digestaat	4x fotobioreactor en 3x raceway	4 x 25 & 3 x 400	-	ja	-
Algenpolishing Alkmaar	rwzi effluent	raceway	2 x 112	15-25	nee	-
Algenpolishing Den Bosch	rwzi effluent + rookgas	raceway	7.500	-	nee	-
Algenpolishing Leeuwarden	rwzi effluent + rookgas	biofilm	-	-	-	-
Algenfarming	Aardappel restwater	raceway	3 x 234	18-20	ja	Chlorella fusca
Algobioloop	Zwart water	-	-	-	-	-
EnergieRijk	Co-vergisting digestaat	raceway	2 x 250	-	ja	Chlorella, Scenedesmus, Phaeodactylum

2.8 SYMBAALBIOMASSA ALS GRONDSTOF

2.8.1 INLEIDING

Vanuit het biobased economy perspectief kan symbaalbiomassa idealiter worden ingezet als grondstof voor allerlei hoogwaardige en laagwaardige toepassingen. Maar omdat symbaalbiomassa wordt gekweekt op communaal afvalwater (en bestaat uit een mengsel van algen en bacteriën) kan deze op dit moment niet ingezet gebruikt worden voor hoogwaardige toepassingen zoals veevoer, voeding en voedingsadditieven. Zelfs als het technisch mogelijk is om de wettelijk vereiste kwaliteit te verkrijgen, zal de maatschappelijke acceptatie lastig zijn. Daarom liggen op de korte termijn laagwaardige toepassingen zoals meststof, grondstof voor basischemicaliën en brandstof meer voor de hand.

2.8.2 MESTSTOF, BASISCHEMICALIËN EN BRANDSTOF

Symbaalbiomassa zal net als conventioneel surplusslib van communale rwzi's niet als meststof kunnen worden gebruikt tenzij aangetoond kan worden dat het gehalte microverontreinigingen binnen de gestelde normen blijft. Wanneer symbaalbiomassa wel toegepast kan

worden als meststof en bodemverbeteraar functioneert ze als een meststof die nutriënten langzaam loslaat en daarbij ook (complexe) koolstofverbindingen aan de bodem toevoegt. De toepassing van symbaalbiomassa als meststof vereist geen (complexe) raffinage zoals bij basischemicaliën en vloeibare brandstof. Daarom biedt de toepassing als meststof de potentie om op korte termijn en tegen lage investeringskosten de symbaalbiomassa af te zetten.

Een andere toepassing is anaerobe co-vergisting van symbaalbiomassa. Door het relatief hoge proteïnegehalte van algenbiomassa is de C/N-verhouding te laag voor optimale vergisting zonder bijmenging van materialen met een hoge C/N-verhouding [28, 29].

Wanneer gekozen wordt voor raffinageprocessen is vergassing een robuuste en relatief eenvoudige techniek. Hierbij kan ook de integratie worden gezocht met de vergassing van andere biomassastromen. Het drogestofgehalte zal daarvoor wel op circa 60% moeten liggen, terwijl ontwatering van biomassa duur is.

Complexere technieken zijn het winnen van de oliën en deze via transesterificatie omzetten naar biodiesel of verdergaande raffinage van algen naar deelproducten zoals voedingsadditieven. Transesterificatie is het splitsen van plantaardige oliën in glycerol en vetzuren en het toevoegen van alcohol aan het vetzuur om biodiesel te produceren.

2.8.3 DIERVOEDER, VOEDING EN ADDITIEVEN

Hoogwaardige toepassingen van symbaalbiomassa zijn bijvoorbeeld gebruik als diervoeding en als allerlei additieven na extractie. In potentie is de algenfractie van symbaalbiomassa door het hoge eiwitgehalte een goede bron van krachtvoer in de veehouderij. Om toepassing mogelijk te maken moet de kwaliteit voldoen aan GMP+. Good Manufacturing Practice (GMP) is een internationaal kwaliteitsborgingssysteem voor het borgen van onder andere de diervoederveiligheid in alle schakels in de diervoederketen, waaronder de aanleverende bedrijven van grondstoffen.

Directe humane consumptie zoals bij macro-algen is binnen de context van deze studie niet beschouwd. Het extraheren van diverse additieven uit de algenfractie van de symbaalbiomassa wordt beschouwd als het scenario van maximale verwaardiging.

Additieven en bijbehorende toepassing zijn:

- Kleurstoffen (voeding)
- Anti-oxidanten (voeding/medicijnen)
- Omega 3 en 6 vetzuren (voeding/medicijnen)
- Polysachariden (verf)
- Eiwitten, vitaminen en vetzuren (voeding)

2.8.4 WAARDE VAN ALGEN BIJ VERSCHILLENDE TOEPASSINGEN

Een korte inventarisatie naar de mogelijke marktwaarde van symbaalbiomassa biedt meer inzicht in de potentie van dit concept. De marktwaarde is door afleidingen bepaald voor verschillende toepassingen. Deze afleidingen zijn opgenomen in de paragrafen die volgen na tabel 2.5. De kosten om biomassa op te werken tot deze potentiële marktwaarde zijn buiten beschouwing gelaten. Daardoor verschaffen de genoemde prijzen in deze paragraaf geen inzicht in haalbaarheid van de toepassing. De resultaten staan in tabel 2.5.

TABEL 2.5 SAMENVATTING INDICATIEVE MARKTWAARDE VAN ALGEN EN SYMBAALBIOMASSA

Toepassing	algen (EUR/ kg alg DS)	symbaalbiomassa (EUR/ kg DS)	Informatiebron
Meststof en bodemverbeteraar	0,09 - 0,13	0,09 - 0,13	zichtopenergie.nl
Biogas	0,14 - 0,17	0,14 - 0,17	zichtopenergie.nl
Elektriciteit via biogas	0,13 - 0,15	0,13 - 0,15	zichtopenergie.nl
Biodiesel	0,02 - 0,10	0,01 - 0,07	lei.nl
Krachtvoer	0,22 - 0,33	0,22 - 0,33	lei.nl
Biologisch krachtvoer	0,39 - 0,60	0,39 - 0,60	lei.nl
Alternatief voor vismeel	0,50 - 0,75	0,50 - 0,75	opgave Provimi

Bij toepassing als biodiesel is alleen waarde aan de algenfractie toegekend omdat alleen de algen deze extraheerbare olie produceren. Bij de toepassing in vergisting, als meststof of als veevoer is de marktwaarde aan de gehele symbaalbiomassa toegekend omdat de gehele biomassa zal worden vervoederd. Het aandeel bacteriën heeft in de biomassa een gelijke, zo niet grotere, voeder (eiwit) waarde als de algen.

BIOGAS EN ELEKTRICITEIT

Biogas kan worden verkregen door co-vergisting van symbaalbiomassa. De waarde van biogas is vergeleken met de marktwaarde van het alternatief aardgas. Biogas en aardgas kunnen niet 1 op 1 uitgewisseld worden, biogas dient daarvoor eerst opgewerkt te worden. De waarde is berekend uitgaande van 50% omzetting van organische stof, een biogasproductie van $0,95 \text{ m}^3/\text{kg OS}_{\text{omgezet}}$ en een aardgasprijs van 0,30-0,36 EUR/m³ (zichtopenergie.nl). Van biogas kan elektriciteit worden gemaakt via een WKK, daarvoor hoeft het biogas maar beperkt opgewerkt te worden. De waarde van elektriciteit via biogas is berekend met een energie-inhoud 6,2 kWh/m³, een WKK rendement van 40% en een energieprij van 0,11-0,13 EUR/kWh. De nutriënten van het afgebroken organische droge stof komen na vergisting in het water terecht. Deze nutriëntrijke stroom zal weer met de SYMBAAL of een andere technologie verwerkt moeten worden.

BIODIESEL

Algen kunnen extraheerbare oliën bevatten die geschikt zijn voor de productie van biodiesel. In open kweeksystemen kan dit aandeel oplopen van circa 5 tot 20%. De huidige prijs van gasolie ligt op circa EUR 0,95 per kg (lei.nl). De productieprijs van gasolie (af-raffinaderij) ligt op circa EUR 0,50 - 0,60 per liter of EUR 0,43 - 0,51 per kg. Met een alg-bacterie-biomassaverhouding van 2:1 geldt een potentiële marktwaarde van EUR 0,015 - 0,07 per kg symbaalbiomassa.

MESTSTOF

Bij de toepassing als meststof is aangenomen dat de symbaalbiomassa direct kan worden toegepast op het land als meststof en bodemverbeteraar. Een alternatief voor nutriëntentoe-rugwinning uit afvalwater is struvietproductie. De N:P verhouding van symbaalbiomassa is echter gunstiger dan die van struviet. Struviet bestaat uit circa 6% N en 13% P (N/P = 0,45) en symbaalbiomassa uit circa 9% N en 1,5% P (N/P = 6), uitgaande van 2:1 alg:bacterie-verhouding [4]. Een ander potentieel gunstig verschil ten opzichte van struviet is dat symbaalbiomassa ook organisch koolstof toevoegt aan de bodem. De huidige prijs voor kunstmest die qua N:P verhouding het meest in de buurt komt van symbaalbiomassa is circa EUR 0,35 - 0,40 per kg. Dat is kunstmesttype NP 26+7. Om dezelfde hoeveelheid stikstof en fosfaat met symbaalbiomassa op te brengen ligt het verbruik een factor 3 tot 4 hoger dan bij kunstmest. Dat geeft een potentiële marktwaarde van EUR 0,09 - 0,13 EUR per kg symbaalbiomassa.

DIERVOEDER

Door het hoge eiwitgehalte kan algenbiomassa worden toegepast in krachtvoer. De marktwaarde van biologisch krachtvoer ligt op EUR 0,35 - 0,54 per kg voor standaard krachtvoer tot eiwitrijk krachtvoer [31]. Niet-biologisch krachtvoer kost EUR 0,20 - 0,30 per kg. Uitgaande van een drogestofgehalte van 90% komt dit overeen met prijsranges van EUR 0,39 - 0,60 per kg DS symbaalbiomassa voor biologisch krachtvoer en EUR 0,22 - 0,33 per kg DS symbaalbiomassa voor niet biologisch krachtvoer.

Een kostbare grondstof voor veevoederproductie is vismeel. Gegeven de samenstelling van algen is het mogelijk om circa 2 kg algen als alternatief voor 1 kg vismeel te gebruiken (opgave Provimi). De huidige prijzen van vismeel liggen tussen de EUR 1,00 en 1,50 per kg DS (lei.nl). Dat geeft de symbaalbiomassa een potentiële marktwaarde EUR 0,50 tot 0,75 per kg DS, aangenomen dat algen en bacteriën in vergelijkbaar van waarde zijn als alternatief voor vismeel.

MAXIMALE VERWAARDING

Specifieke algensoorten die worden gebruikt voor vis- en schelpdierteelt of bepaalde stoffen die in kleine concentraties in de algenbiomassa aanwezig zijn kunnen een veelvoudig hogere waarde vertegenwoordigen dan de potentiële marktwaarde opgenomen in tabel 2.5. Dit kan oplopen tot enkele euro's per kilogram. Gezien de aard van symbaalzuivering (gemengde culturen en kweek op huishoudelijk afvalwater) en de grote mate aan raffinage die nodig is om waardevolle stoffen uit symbaalbiomassa te extraheren zijn deze toepassingen voor symbaalbiomassa nu nog niet interessant.

3

HAALBAARHEID SYMBAALZUIVERING

3.1 INLEIDING

Een symbaalzuivering kan de conventionele hoofdzuivering niet vervangen omdat onder winterse omstandigheden de effluenteisen niet zullen worden gehaald door een gebrek aan licht. Kunstmatige belichting van een symbaalzuivering ten behoeve van afvalwaterzuivering is economisch niet haalbaar vanwege de lage Quantum Yield van algen. Een uitgebreide toelichting is opgenomen in bijlage II. Verder is het symbaalconcept niet geschikt als nazuivering omdat CZV cruciaal is als bron van koolstof en CO_2 in de bacterie-alg symbiose, zie paragraaf 3.5. De mogelijke inzet van de symbaalzuivering blijft beperkt tot de zomermaanden (april-september) parallel aan de conventionele rwzi in bijvoorbeeld toeristische gebieden waar tijdens deze maanden de belasting op de rwzi toeneemt.

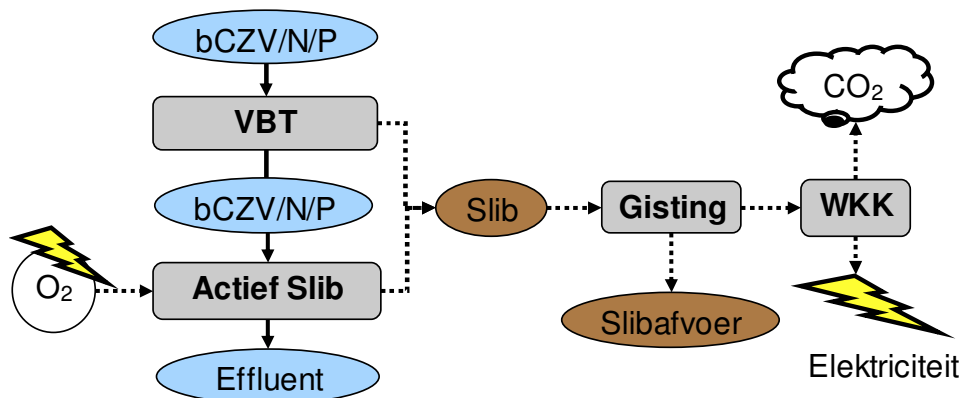
3.2 SYMBAALZUIVERINGSCONCEPTEN

Om de potentie van de symbaalzuivering inzichtelijk te maken zijn twee concepten waarin de symbaalzuivering parallel aan het actief-slibstelsysteem wordt bedreven met behulp van masabalansen doorgerekend en vergeleken met een conventionele rwzi.

3.2.1 CONVENTIONELE RWZI

De referentie-rwzi waaraan de haalbaarheid van de symbaalzuivering is getoetst is een conventionele zuivering met biologische fosfaatverwijdering zoals hieronder beschreven. De belangrijkste processtappen in de conventionele rwzi zijn de voorbezinktank, aeratietank en nabezinktank. De voorbezinktank ontvangt en verwijdert primair slib, de nabezinktank het secundair slib. Het slib wordt gezamenlijk vergist, hetgeen biogas oplevert. Dat wordt middels een WKK omgezet in elektriciteit. De afvoer en verwerking van vergist slib is een kostenpost. Voor de verwijdering van nutriënten wordt de aeratietank belucht.

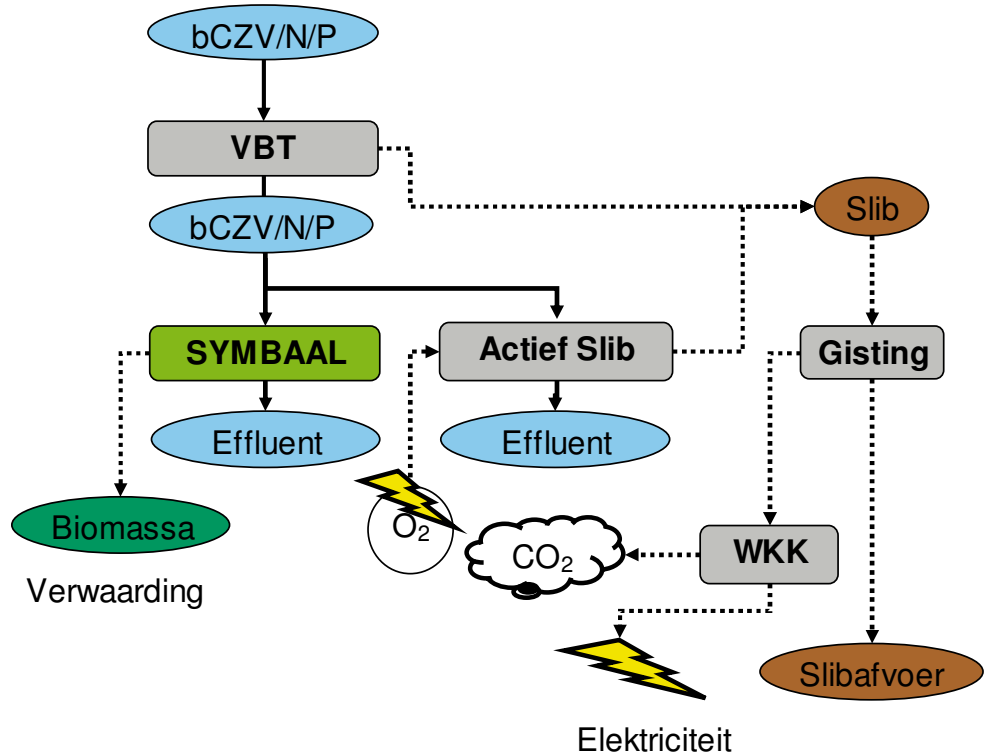
AFBEELDING 3.1 CONVENTIONELE ZUIVERING



3.2.2 SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN HET ACTIEF-SLIBSYSTEEM MET VOORBEZINKTANK

Het concept is schematisch weergegeven in afbeelding 3.2. In dit concept wordt het afvalwater na de voorbezinktank verdeeld over de symbaalzuivering en het actief-slibstelsysteem. De vracht naar het actief-slibstelsysteem en de symbaalzuivering wordt verdeeld op basis van de belasting die de symbaalzuivering kan ontvangen wat weer afhankelijk is van zonninstraling en temperatuur. Door het toepassen van de symbaalzuivering zal de vuilvracht naar het conventionele actief-slibstelsysteem kleiner worden. Dat vertaalt zich in besparingen op zuurstofinbreng, slibproductie en -afvoer en eventuele aanvullende chemische fosfaatverwijdering. De opbrengsten worden ook lager door een lagere biogasproductie.

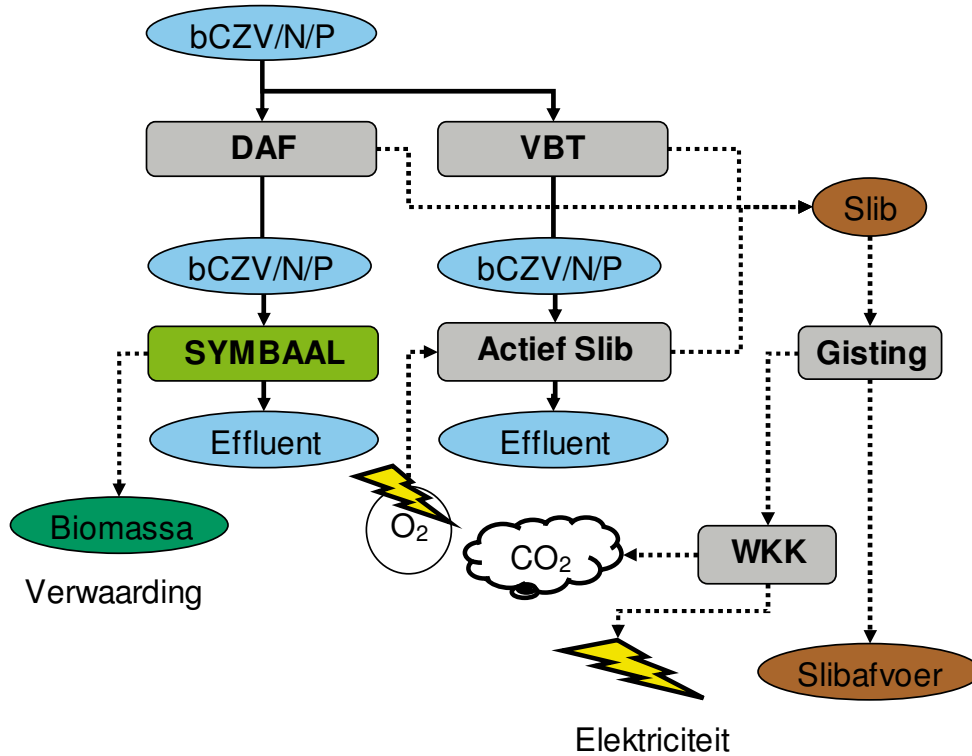
AFBEELDING 3.2 CONCEPT 1 DE SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN DE RWZI MET VOORBEZINKTANK



3.2.3 SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN HET ACTIEF-SLIBSYSTEEM MET DAF

Bij het tweede concept wordt DAF (Dissolved Air Flotation) als alternatief voor de voorbezinktank gebruikt. Deze techniek maakt gebruik van zeer fijne luchtbelletjes om zwevende stof af te scheiden middels flotatie in plaats van bezinking. De winst van DAF ten opzichte van een gewone voorbezinktank is dat de effluentsamenstelling in zekere mate gestuurd kan worden door het doseren van polymeer en coagulant en dat de verwijderingsrendementen aanzienlijk hoger zijn dan een voorbezinktank. Een schematisch overzicht van dit concept is weergegeven in afbeelding 3.3.

AFBEELDING 3.3 CONCEPT 2 SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN HET ACTIEF-SLIBSYSTEEM MET DAF



3.3 UITGANGSPUNTEN MASSABALANSEN

Om het concept symbaalzuivering op haalbaarheid te toetsen, zijn twee systeemconfiguraties gedimensioneerd en zijn investeringskosten geraamd op basis van eenheidsprijzen. Daarvoor zijn uitgangspunten gedefinieerd en is een massabalans als technologische basis gebruikt. Bij het berekenen van de kosten van symbaalzuivering zijn besparingen op de operationele kosten van de conventionele rwzi meegenomen als baten.

De symbaalzuiveringsconcepten zijn doorgerekend binnen de volgende algemene kaders:

- toegepast op een referentie-rwzi van 100.000 i.e. met DWA-debiet van 13.000 m³/dag;
- RWA-debiet is buiten beschouwing gelaten;
- de dagelijkse vuilvracht is verdeeld over 80% bij daglicht 20% in het donker, het effect van een 70%:30% aanvoer verdeling is ook berekend. De aanvoer in het donker wordt verwerkt in het conventionele actief-slibstelsysteem;
- de symbaalzuivering is gedimensioneerd op basis van KRW-effluenteisen (N_{totaal} 2,2 mg/l en P_{totaal} 0,15 mg/l);
- kunstmatige belichting is niet haalbaar (zie bijlage II). Daarom richt de haalbaarheidsanalyse zich alleen op de zomerperiode (april - september).

3.3.1 AFVALWATERSAMENSTELLING

Voor de samenstelling van het onbehandelde huishoudelijke afvalwater is de modelwaarde voor bCZV overgenomen uit [4], overige waarden uit [34] en [35].

TABEL 3.1

AFVALWATERSAMENSTELLING

parameter	eenheid	modelwaarde
Totaal CZV	mg/l	500
bCZV	mg/l	350
BZV	mg/l	215
Ammonium (NH ₄ - N)	mg/l	50
Ortho fosfaat (PO ₄ - P)	mg/l	10
Organisch zwevende stof	mg/l	190
Anorganisch zwevende stof	mg/l	80

Het bCZV is de biologisch afbreekbare fractie van CZV. Aangenomen is dat 70% van het CZV uit bCZV bestaat. Omrekenen van bCZV naar BZV kan door de bCZV fractie te delen door 1,64 [36]. De BZV-concentratie is dus niet gelijk aan de bCZV concentratie. CZV gaat uit van de zuurstofvraag benodigd voor de volledige omzetting van organische stof naar CO₂. bCZV is het gedeelte van het CZV waarbij deze omzetting biologisch zou kunnen plaatsvinden. BZV betekent de zuurstofvraag voor omzetting van organische stof naar CO₂ en opname in biomassa.

3.3.2 BELUCHTING EN BIOMASSAGROEI

De benodigde beluchtingsenergie is berekend met het empirische Von den Emde-model. De relevante parameters en modelwaarden voor dit model en voor het berekenen van slibproductie zijn opgenomen in tabel 3.2. Bij het berekenen van het energiegebruik voor beluchting van de conventionele rwzi is fijne bellenbeluchting onder praktijkomstandigheden gehanteerd wat overeenkomt met 2,55 kg O₂/kWh (W+B-ontwerpgrondslagen).

TABEL 3.2

BELUCHTING

parameter	eenheid	waarde
Nitrificatie	g O ₂ / g N	4,57
Denitrificatie	g BZV/ g N	2,86
BZV verademing coëfficiënt	g O ₂ / g BZV verwijderd	0,5

De groei van autotrofe en heterotrofe biomassa is berekend op basis van de onderstaande kengetallen. De Quantum Yield is toegelicht in paragraaf 2.4.1, de zuurstofproductie per C mol geproduceerde algenbiomassa is een stoichiometrische waarde overgenomen uit [4].

TABEL 3.3

BIOMASSA

open	eenheid	modelwaarde
Quantum yield autotrofe biomassa	mol O ₂ /mol fotonen	0,02 en 0,04
mol O ₂ per C mol algenbiomassa nitraat	-	1,42
mol O ₂ per C mol algenbiomassa ammonium	-	1,18
N gehalte autotrofe biomassa	%	7,8
P gehalte autotrofe biomassa	%	1,4
Heterotrofe biomassa productie (Y)	g ODS/g bCZV omgezet	0,4
N gehalte heterotrofe biomassa	%	12
P gehalte heterotrofe biomassa	%	2
Cel afbraak coëfficiënt (kd)	g ODS/g ODS.d	0,088
Fractie cel rest (fd)	g ODS/g ODS	0,15
bCZV gehalte van ODS	g bCZV/g ODS	1,42
Slibleeftijd (SRT)	d	12,5

3.3.3 SLIBVERWERKING

Parameters met betrekking tot slibgisting en slibverwerkingskosten zijn opgenomen in onderstaande tabel. Het afbraakrendement is overgenomen uit [37], de biogasproductie en energie-inhoud uit [36].

TABEL 3.4

SLIBVERWERKING

parameter	eenheid	waarde
Primair OS anaeroob afbraak rendement	%	65
Secundair OS anaeroob afbraak rendement	%	40
Biogas productie	m ³ /kg ODS omgezet	0,95
Biogas energie-inhoud	kWh/m ³	6,2
WKK rendement	%	40
Energieprijs	EUR/kWh	0,11
Slibverwerkingskosten	EUR/ton DS	300

3.3.4 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN DAF EN VBT

De minimale en maximale kosten en verwijderingsrendementen van DAF met en zonder chemicaliëndosering zijn opgenomen in tabel 3.5. In dezelfde tabel is ook het gemiddelde verwijderingsrendement van de voorbezinktank opgenomen. Opgelost ammonium en fosfaat worden niet verwijderd in de voorbezinktank.

TABEL 3.5 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN EN KOSTENRANGE DAF EN VBT

parameter	eenheid	DAF incl. coagulatie en flocculatie	DAF excl. coagulatie en flocculatie	voorbezinktank
Operationele kosten	EUR.m ⁻³ .jaar ⁻¹	0,05	0,01	-
Totale kosten	EUR.m ⁻³ .jaar ⁻¹	0,07	0,03	-
ZS	%	85	60	50
BZV	%	75	20	25
CZV	%	70	35	30
P-totaal	%	80	12	7
N-Kjeldahl	%	25	10	7

3.3.5 ZONINSTRALING

In de symbaalzuivering is de zuurstofproductie door de foto-autotrofe biomassa de drijvende kracht. De zuurstofproductie hangt samen met de zoninstraling. Voor de massabalansberekeningen zal voor iedere maand de maandgemiddelde zoninstraling uit tabel 3.6 worden gebruikt. De daggemiddelde instraling van PAR-fotonen is berekend op basis van gemiddeld 16 uur zonlicht per dag. De achterliggende berekening voor algenproductie is opgenomen in bijlage I [38].

TABEL 3.6 MAANDGEMIDDELTE ZONINSTRALING ZOMERMAANDEN

maand	kWh/m ² .d	umol PAR/m ² /s (gemiddeld over 16 uur per dag)
April	3,72	452
Mei	4,83	587
Juni	4,76	579
Juli	4,85	590
Augustus	4,08	496
September	2,75	334
zomergemiddeld	4,17	506

3.3.6 KOSTEN

De productiekosten van symbaalbiomassa zijn geraamd op basis van een open vijver (HRAP) zoals ook toegepast bij het effluentpolishingproject bij rwzi Alkmaar en het Algenfarming project bij de AWZI van Waterstromen in Olburgen. De kosten uit tabel 3.7 en de kostenstructuur zijn uit deze projecten afgeleid. Het bijbehorende product is een gekoeld algenconcentraat van 6% drogestof.

De kapitaalslasten omvatten:

- grondbewerking;
- algenvijver met randapparatuur zoals voortstuwer, trommelfilter, pompen, leidingwerk, oogstapparatuur, beperkte online analyseapparatuur en procesautomatisering;
- koeling voor het algenproduct;
- CO₂-doseerapparatuur.

De operationele kosten worden in grote mate bepaald door de biomassa productie en arbeid. Het feit dat de symbaalzuivering alleen in de maanden van april tot september operationeel kan zijn, is in de operationele kosten van tabel 3.7 meegenomen. De operationele kosten bestaan uit:

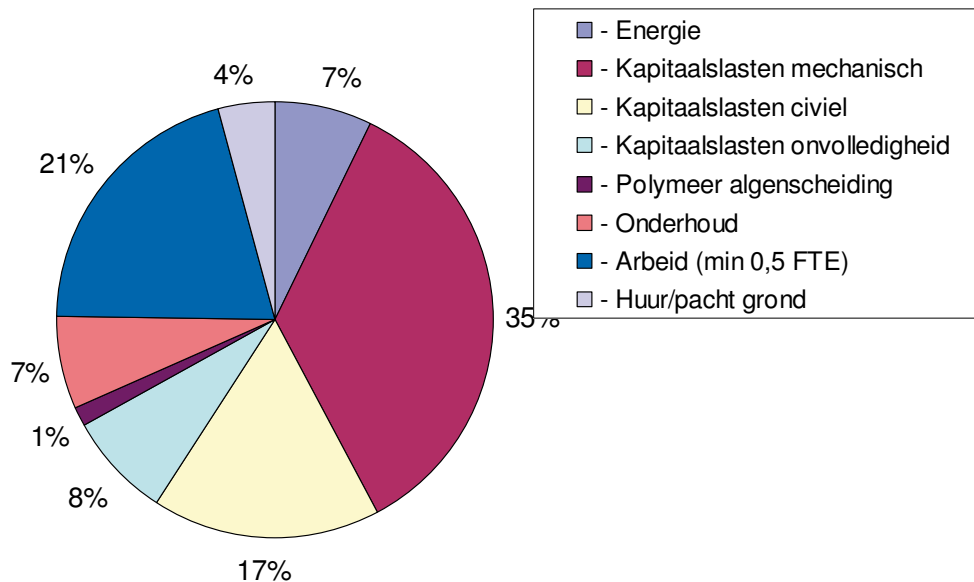
- energie, polymeer;
- arbeid (hoge mate van automatisering noodzakelijk);
- onderhoud.

TABEL 3.7 KOSTEN OPEN VIJVERSYSTEEM, OP BASIS VAN ALGENFARMING

Kostensoort	Eenheid	Modelwaarde
Operationele kosten (incl. arbeid)	EUR.ha ⁻¹ .jaar ⁻¹	22.500
Kapitaalslasten	EUR.ha ⁻¹ .jaar ⁻¹	37.500
Grond pacht	EUR.ha ⁻¹ .jaar ⁻¹	3.000

De kostenopbouw van de totale jaarlijkse kosten voor open algenvijvers van 5 tot 15 hectare wordt weergegeven in afbeelding 3.4.

AFBEELDING 3.4 KOSTENSTRUCTUUR OPEN ALGENVIJVER



De voornaamste energieverbruiker in een open vijversysteem is de voortstuwing.

Een overzicht van de operationele kosten die zijn gebruikt voor het berekenen van de haalbaarheid van de symbaalzuivering is opgenomen in tabel 3.8.

TABEL 3.8 OPERATIONELE KOSTEN

parameter	eenheid	waarde
FeCl ₃ (40%)	EUR/ton product	210
elektriciteit	EUR/kWh	0,11
slibverwerkingskosten	EUR/ton DS	300
DAF max. operationele kosten	EUR/m ³	0,05
DAF min. operationele kosten	EUR/m ³	0,01
DAF kapitaalslasten	EUR/m ³	0,02

3.4 TOELICHTING SYMBAALBALANS

3.4.1 ACHTERGROND

De technologische achtergrond van de symbaalmassabalans is geheel gebaseerd op werk van Boelee et. al. [4] uit het werk getiteld: "Scenario Analysis of Nutrient Removal from Municipal Wastewater by Microalgal Biofilms". Dat werk is voor deze STOWA-studie geïntegreerd in een uitgebreidere massabalans. In de uitgebreidere versie zijn operationele en kostenaspecten van de DAF, voorbezinktank en de conventionele rwzi meegenomen. Het geheel leidt tot een rekensheet waarmee de haalbaarheid van symbaalzuivering kan worden verkend. De rekensheet van het concept met voorbezinktank is opgenomen in bijlage IV.

3.4.2 BEREKENINGEN

In afbeelding 3.5 is het stroomschema van de symbaalmassabalans opgenomen. In de massabalans staat de stikstofstroom centraal. Stikstof wordt uit de waterfase verwijderd via 3 routes:

1. via vastlegging in heterotrofe biomassa;
2. via vastlegging in algen;
3. via nitrificatie en denitrificatie.

De stikstofvastlegging in heterotrofe biomassa wordt bepaald door de netto biomassaproductie te berekenen op basis van de uitgangspunten en onderstaande vergelijking. De vastlegging is gelijk aan de biomassaproductie vermenigvuldigd met de stikstofconcentratie in de biomassa. Voor de berekening van de totale slibproductie wordt bij onderstaande vergelijking nog de fractie anorganisch zwevende stof opgeteld die vanuit het influent met het slib afgevoerd wordt.

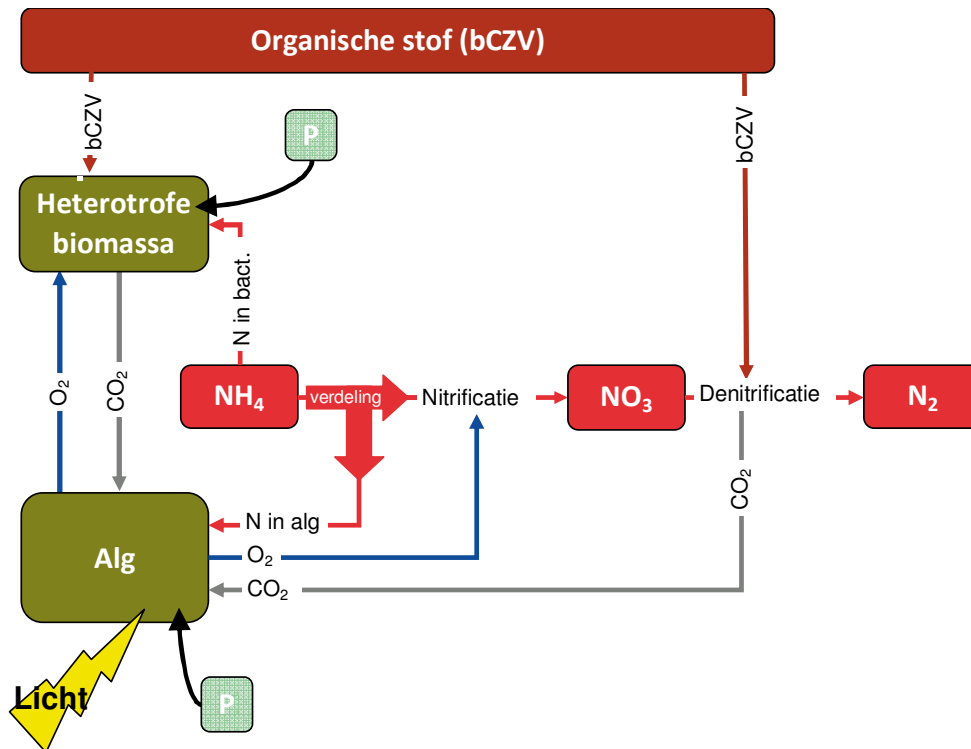
$$\text{Organisch Slibproductie} \left(\frac{\text{g ODS}}{\text{dag}} \right) = Q \times Y \times \frac{b\text{CZV}_{\text{verwijderd}}}{1 + k_d \times \text{SRT}} \times (1 + f_d \times k_d \times \text{SRT})$$

In deze vergelijking is

Q	debiet (m ³ d ⁻¹)
bCZV _{verwijderd}	vermindering van de concentratie bCZV (g m ⁻³)
Y	biomassaproductie (g biomassa/g bCZV)
k _d	afbraakconstante (d ⁻¹)
SRT	slibleeftijd (d)
f _d	fractie celresten (-)

De totale biomassaproductie van de symbaalzuivering is de som van de algen- en bacteriebiomassa en wordt uitgedrukt in kilogrammen organisch droge stof. De fractie anorganische stof is daarbij buiten beschouwing gelaten omdat deze fractie geen waarde vertegenwoordigt maar ook geen slibverwerkingskosten heeft wanneer het als bijproduct in de symbaalbiomassa wordt afgevoerd.

AFBEELDING 3.5 STROOMSCHEMA SYMBAAL MASSABALANS



Het bCZV wordt op 3 manieren gebruikt:

1. opname voor celsynthese;
2. voor denitrificatie;
3. als energiebron voor overige processen (verademing).

Via de routes 2 en 3 komt CO₂ in de symbaalzuivering vrij. Alle CO₂ wordt gebruikt voor algengroei, ongeacht de omzetting waaruit het geproduceerd wordt.

De algen gebruiken CO₂ als koolstofbron en licht als energiebron. Daarbij wordt zuurstof geproduceerd, dat wordt gebruikt voor:

1. nitrificatie;
2. bCZV verademing.

Zowel stikstof als fosfaat wordt opgenomen in de heterotrofe en autotrofe biomassa (zoals algen). Stikstof kan aanvullend worden verwijderd door nitrificatie en denitrificatie.

De verdeling van de stikstofverwijdering in het model, aangegeven door de rode blokpijlen in afbeelding 3.5, zit in de fractie van de stikstof die wordt verwijderd via de nitrificatie- en denitrificatieroute en de fractie die wordt verwijderd door vastlegging in de algenbiomassa. Door dit percentage handmatig te verdelen kan de gasbalans (zuurstof of koolstofdioxide) op 0 worden gesteld. Oftewel; de gasproductie is gelijk aan de gasopname. Wanneer de zuurstof

balans op 0 gezet wordt (productie door algen en consumptie door bacteriën), treedt altijd een CO₂-tekort op. Dit tekort kan worden opgevuld door CO₂-dosering.

Zuurstofproductie en koolstofdioxideconsumptie zijn direct en alleen gekoppeld aan de algengroei.

Zuurstofconsumptie is berekend zoals onder weergegeven:

$$O_2 \text{ consumptie} = bCZV_{\text{influent}} - bCZV_{\text{effluent}} - bCZV_{\text{biomassa}} + O_{2, \text{nitrificatie}} - BZV_{\text{denitrificatie}}$$

Koolstofdioxideproductie is berekend door:

$$CO_2 \text{ productie} = (O_{2, \text{consumptie}} - O_{2, \text{nitrificatie}}) \times 44/32$$

Bij de conventionele rwzi wordt de zuurstofvraag van beluchting uitgerekend middels de stochiometrische Von den Emde-balans. Daarbij geldt:

$$\text{Zuurstofvraag} = \text{endogene ademhaling} + \text{verademing substraat} + \text{nitrificatie} - \text{denitrificatie}.$$

3.5 RESULTATEN

Van de concepten symbaalzuivering na voorbezinktank en na DAF-installatie zijn waterzuiveringskosten en biomassaproductiekosten (kostprijs) berekend. Verder is de gevoeligheid van factoren die naar verwachting de grootste impact hebben bepaald.

3.5.1 SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN HET ACTIEF-SLIBSYSTEEM MET VOORBEZINKTANK

De haalbaarheid van de symbaalzuivering in het concept met voorbezinktank is verkend op basis van de zomergemiddelde (april tot en met september) zoninstraling. In de maanden april en september ligt de zoninstraling onder dat gemiddelde, dus is de symbaalzuivering voor die maanden iets onder gedimensioneerd. De gehanteerde gevoeligheden zijn:

- Quantum Yield (QY) van 0,02 mol O₂/mol fotonen (realistisch) en 0,04 mol O₂/mol fotonen;
- operationele kosten en kapitaalslasten -30%, 0% +30%.

TABEL 3.9 RESULTATEN SYMBAALZUIVERING PARALLEL AAN DE RWZI MET VOORBEZINKTANK¹

#	Variabelen			Resultaten									
	QY (mol O ₂ /mol fotonen)	Kosten	Productprijs (EUR/kg DS)	Zuiveringskosten (EUR/m ³)	Oppervlakte (ha)	Alg/bact verhouding (g/g)	O ₂ balans (kg/dag)	CO ₂ balans (kg/dag)	N via n/deni route (%)	N verwijdering (g N.m ⁻² .d ⁻¹)	P verwijdering (g P.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassaproductie (g ODS.m ⁻² .d ⁻¹)	
1	0,02	-30%	1,4	0,3	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3	
2	0,02	0%	2,1	0,4	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3	
3	0,02	+30%	2,7	0,5	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3	
4	0,04	-30%	0,6	0,1	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6	
5	0,04	0%	0,9	0,2	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6	
6	0,04	+30%	1,3	0,2	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6	

1 In de praktijk kunnen de gepresenteerde kosten en ruimtebeslag hoger liggen omdat het geheel is gedimensioneerd op een aanvoer van 130 liter afvalwater per i.e. per dag met een ammoniumgehalte van 50 mg N/l. Daarbij is regenweer, rioolvreemd water en organische stikstof dus buiten beschouwing gelaten.

De effluentnorm voor stikstof kan worden gehaald door vastlegging en omzettingen. De effluentconcentratie fosfaat uit de symbaalzuivering komt echter niet lager dan 6,5 mg P/l. Om de fosfaatnorm te halen is aanvullende fosfaatverwijdering noodzakelijk.

De resultaten uit tabel 3.9 laten zien dat bij dit concept:

- de zuurstofproductie gelijk aan de zuurstofconsumptie is wanneer circa 36% van de stikstof wordt vastgelegd in de biomassa en 64% wordt verwijderd via de nitrificatie/denitrificatie route;
- daarbij altijd een koolstofdioxidetekort van 1.570 kg per dag geldt. Dat tekort kan alleen worden opgevuld door externe CO₂ dosering. Een interne recirculatie van koolstof via bijvoorbeeld biomassavergisting, WKK en terugvoer van rookgassen kan het koolstoftekort inherent aan de influentsamenstelling niet wegnemen. Dit zou alleen lukken wanneer via deelstroombehandeling alle in de gisting vrijgekomen stikstof wordt verwijderd en de symbaalzuivering alleen de CO₂ maar niet de bijbehorende nutriënten krijgt. Dit geldt ook voor dosering van CO₂ vrijkomend uit de verwerking van primair slib.
- het benodigde oppervlak 6 of 12 hectare is bij een QY van 0,02 of 0,04, wat overeen komt met 0,6 tot 1,2 m² per i.e.;
- bij een QY van 0,02 mol O₂/mol fotonen verwijderingssnelheden en biomassaproductie van 4,0 gN.m⁻².d⁻¹, 0,24 g P.m⁻².d⁻¹ en 15,3 gODS.m⁻².d⁻¹ gelden;
- bij een QY van 0,04 mol O₂/mol fotonen verwijderingssnelheden en biomassaproductie van 8,1 gN.m⁻².d⁻¹, 0,48 gP.m⁻².d⁻¹ en 30,6 g ODS.m⁻².d⁻¹ gelden;
- de alg:bacterie massaverhouding in symbaalslib gemiddeld 2,3:1 is.

Verder is de zuurstofproductie in dit symbaalzuiveringsconcept 2.304 kg O₂/dag, wat overeen komt met een besparing van circa 900 kWh/dag op beluchtingsenergie bij fijne bellenbeluchting.

Bevindingen op het gebied van kosten zijn:

- de extra waterzuiveringskosten liggen tussen de 0,1 en 0,5 EUR/m³ gezuiverd afvalwater;
- om een symbaalzuivering kostenneutraal te maken moet de ruwe symbaalbiomassa in dit concept tussen de 0,6 en 2,7 EUR/kg DS opbrengen;
- een verhoging van de Quantum Yield van 0,02 mol O₂/mol fotonen naar 0,04 mol O₂/mol fotonen geeft een ruime halvering van de productiekosten;
- het procentueel verhogen of verlagen van de operationele kosten en kapitaalslasten geeft vergelijkbare procentueel hogere of lagere waterzuiverings- en productiekosten.

De gevoeligheid van de sibleeftijd is berekend voor een sibleeftijd van 7,5 en 17,5 dag. Het kosteneffect van het verlagen van de sibleeftijd van 12,5 naar 7,5 dagen is gunstig maar kleiner dan 10% op zowel de jaarlijkse kosten per m³ gezuiverd afvalwater als voor de kostprijs van symbaalbiomassa. De lagere heterotrofe sibleeftijd geeft een grotere netto heterotrofe slibproductie. Het aandeel bacteriën ten opzichte van de algen neemt toe. Theoretisch nemen de prestaties van de symbaalzuivering met een lagere sibleeftijd toe, met een kleiner systeem en lagere kosten tot gevolg. De sibleeftijd kan niet te laag worden gemaakt om nitrificeerders in het systeem te houden. Een hogere sibleeftijd heeft een omgekeerd effect. Een overzicht van het effect van het veranderen van de sibleeftijd is opgenomen in tabel 3.10.

TABEL 3.10 EFFECT VAN VERLAGEN OF VERHOGEN VAN DE SLIBLEEF TIJD

Stibleeftijd (d)	QY (mol O ₂ /mol fotonen)	Kosten	Productprijs (EUR/kg DS)	Zuiveringskosten(EUR/m ³)	Oppervlak(ha)	Alg/bact verhouding (g/g)	O ₂ balans (kg/dag)	CO ₂ balans(kg/dag)	N via ni/deni route (%)	N verwijdering (g N.m ⁻² .d ⁻¹)	P verwijdering (g P.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassaproductie (g ODS.m ⁻² .d ⁻¹)
Variabelen			Resultaten									
7,5	0,02	0%	1,9	0,35	11,5	1,8	0	-1568	65%	4,3	0,27	16,6
12,5	0,02	0%	2,1	0,38	12,3	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3
17,5	0,02	0%	2,2	0,39	12,9	2,8	0	-1571	66%	3,8	0,23	14,5

De gevoeligheid van hogere effluentcriteria is eveneens bepaald. Het effect van het ophogen van de effluentcriteria voor N en P van 2,2 mg/l en 0,15 mg/l naar 10 mg/l en 1 mg/l is beperkt, zowel het systeem als de productieprijzen of de zuiveringskosten worden circa 5% lager.

Verder is de gevoeligheid van de verdeling van dag- en nachtaanvoer doorgerekend. Daaruit blijkt dat het rekenen met een verhouding van 70/30 in plaats van een verhouding van 80/20 een navenant effect heeft op de schaalgrootte van het systeem maar geen effect op de kostprijs van de biomassa en dus ook geen effect op de haalbaarheid.

3.5.2 SYMBAALZUIVERING MET DAF PARALLEL AAN HET ACTIEF-SLIBSYSTEEM

De haalbaarheid van de symbaalzuivering in het concept met DAF is verkend op basis van de zomergemiddelde (april tot en met september) zoninstraling. In de maanden april en september ligt de zoninstraling onder dat gemiddelde, dus zal de symbaalzuivering voor die maanden iets onder gedimensioneerd zijn. De gehanteerde gevoeligheden zijn:

- Quantum Yield van 0,02 mol O₂/mol fotonen (realistisch) en 0,04 mol O₂/mol fotonen;
- DAF-verwijderingsrendementen voor scenario's 1 en 3. Resultaten van DAF-scenario 2 worden niet gepresenteerd omdat dit net als scenario 1 en 3 minder gunstig is dan het VBT-scenario en daarom weinig informatiewaarde heeft;
- operationele kosten en kapitaalslasten bioreactor -30%, 0% +30%.

TABEL 3.11 DAF-VERWIJDERINGSRENDEMENT SCENARIO'S

Component	eenheid	DAF scenario 1	DAF scenario 2	DAF scenario 3
ZS	%	65	75	85
CZV	%	50	60	70
BZV	%	50	60	70
N totaal	%	15	20	25
P totaal	%	20	50	80
Operationele kosten	EUR.m ⁻³ .jaar ⁻¹	0,02	0,035	0,05

TABEL 3.12 RESULTATEN SYMBAALZUIVERING MET DAF PARALLEL AAN DE RWZI MET DAF²

#	Variabelen			Resultaten									
	QY (mol O ₂ /mol fotonen)	Kosten	DAF scenario	Productprijz (EUR/kg DS)	Zuiveringskosten (EUR/m ³)	Oppervlakt (ha)	Alg/bact verhouding (g/g)	O ₂ balans (kg/dag)	CO ₂ balans (kg/dag)	N via ni/demi route (%)	N verwijdering (g N.m ⁻² .d ⁻¹)	P verwijdering (g P.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassaproductie (g ODS.m ⁻² .d ⁻¹)
1	0,02	-30%	1	1,8	0,3	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
2	0,02	0%	1	2,5	0,4	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
3	0,02	30%	1	3,2	0,5	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
4	0,02	-30%	3	2,3	0,2	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
5	0,02	0%	3	3,0	0,3	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
6	0,02	30%	3	3,7	0,4	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
7	0,04	-30%	1	1,0	0,1	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
8	0,04	0%	1	1,3	0,2	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
9	0,04	30%	1	1,7	0,2	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
10	0,04	-30%	3	1,4	0,1	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0
11	0,04	0%	3	1,7	0,2	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0
12	0,04	30%	3	2,1	0,2	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0

Om de fosfaatnorm te halen is het noodzakelijk om aan de voorkant met behulp van de DAF circa 78% van het fosfaat uit het influent te verwijderen.

De resultaten in tabel 3.12 laten zien dat bij dit concept:

- de balans waarbij zuurstofproductie gelijk is aan consumptie afhankelijk is van de mate van voorbehandeling door de DAF-installatie. Een sterkere voorbehandeling geeft een lagere bCZV-concentratie naar de symbaalzuivering waardoor minder zuurstof nodig is voor de verademing van dat substraat en meer zuurstof kan worden gebruikt voor nitrificatie. Daarom wordt na DAF-voorbehandeling 23 tot 30% van de stikstof vastgelegd in de biomassa en 70 tot 77% verwijderd via de nitrificatie/denitrificatie route;
- daarbij een koolstofdioxidetekort van 1.474 tot 1.521 kg per dag geldt. Dat tekort kan alleen worden opgevuld door externe CO₂ dosering. Een interne recirculatie van koolstof via bijvoorbeeld biomassavergisting, WKK en terugvoer van rookgassen kan het koolstof tekort inherent aan de influentsamenstelling niet wegnemen. Dit zou alleen lukken wanneer via deelstroom behandeling alle in de gisting vrijgekomen stikstof wordt verwijderd en de symbaalzuivering alleen de CO₂ maar niet de bijbehorende nutriënten krijgt. Dit geldt ook voor dosering van CO₂ vrijkomend uit de verwerking van primair slib.
- de benodigde oppervlakte 3,7 tot 5,2 hectare is bij een QY van 0,04 mol O₂/mol fotonen en 7,4 tot 10,5 hectare bij een QY van 0,02 mol O₂/mol fotonen, of 0,37 tot 1,1 m² per ie.;
- DAF-voorbehandeling in alle gevallen het benodigde oppervlak voor symbaalzuivering verlaagt;
- bij een QY van 0,02 mol O₂/mol fotonen verwijderingssnelheden en biomassaproductie van 4 tot 5 gN.m⁻².d⁻¹, 0,20 gP.m⁻².d⁻¹ en 14,0 tot 14,6 gODS.m⁻².d⁻¹ gelden;

² In de praktijk kunnen de gepresenteerde kosten en ruimtebeslag hoger liggen omdat het geheel is gedimensioneerd op een aanvoer van 130 liter afvalwater per i.e. per dag met een ammoniumgehalte van 50 mg N/l. Daarbij is regenweer, rioolvreemd water en organische stikstof dus buiten beschouwing gelaten.

- bij een QY van 0,04 mol O₂/mol fotonen verwijderingssnelheden en biomassa productie van 8 tot 10 gN.m⁻².d⁻¹ 0,41 gP.m⁻².d⁻¹ en 28 tot 29 g ODS.m⁻².d⁻¹ gelden;
- door DAF-voorbehandeling de bCZV-concentratie naar de symbaalzuivering afneemt en het bacterieaandeel in de symbaalbiomassa kleiner wordt. Afhankelijk van de mate van voorbehandeling ligt de alg:bacterie massaverhouding tussen de 2,8:1 en 3,3:1.

Verder is de zuurstofproductie in dit symbaalzuiveringsconcept 1232 (DAF scenario 3) of 1748 (DAF scenario 1) kg O₂/dag, dit komt overeen met een besparing van circa 483 tot 685 kWh/dag op beluchtingsenergie bij fijne bellen beluchting.

Bevindingen op het gebied van kosten zijn:

- de extra kosten voor waterzuivering liggen tussen de 0,1 en 0,5 EUR.m⁻³ gezuiverd afvalwater;
- de productiekosten van symbaalbiomassa liggen in dit DAF-concept tussen de 1,0 en 3,7 EUR.kg DS⁻¹;
- een verhoging van de Quantum Yield van 0,02 mol O₂/mol fotonen naar 0,04 mol O₂/mol fotonen geeft bijna een halvering van de productiekosten;
- het verhogen of verlagen van de operationele kosten en kapitaalslasten met 30% geeft een 20 tot 25% hogere of lagere kostprijs van symbaalbiomassa.

De gevoeligheid van slibleeftijd, effluentcriteria en de verdeling van dag/nachtaanvoer is voor dit concept niet nogmaals doorgerekend ten eerste omdat dit DAF concept minder gunstig is en ten tweede omdat de gevoeligheid vergelijkbaar zal zijn.

3.5.3 VERGELIJKING RESULTATEN

De varianten met DAF en voorbezinktank zijn in tabel 3.13 met elkaar vergeleken. Daaruit blijkt dat toepassing van de DAF altijd resulteert in een kleinere voetafdruk van de symbaalzuivering, maar in alle gevallen ook in hogere biomassa productie kosten. De afvalwaterzuiveringskosten liggen bij het DAF-concept hoger dan bij het VBT-concept maar de kosten nemen wat af bij een hoger DAF-verwijderingsrendement. Dit komt doordat bij een hoger DAF-verwijderingsrendement de biomassa productie relatief meer afneemt dan de jaarlijkse kosten terwijl het volume behandeld afvalwater gelijk blijft.

Wanneer de kapitaalslasten voor DAF buiten beschouwing worden gelaten vallen de productiekosten van symbaalbiomassa 10 tot 12% lager uit en de waterzuiveringskosten per m³ afvalwater gezuiverd circa 4% lager, daarmee blijft het DAF-concept duurder dan het VBT-concept.

In alle gevallen is er een CO₂-tekort en bij de DAF-scenario's is dat groter door de verdergaande voorbehandeling. Met uitzondering van DAF-scenario 3 kan het CO₂-tekort worden opgevuld via vergisting van de biomassa, verbranding van het biogas en terugvoer van de rookgassen.

TABEL 3.13 VERGELIJKING DAF- EN VOORBEZINKTANKVARIANT

voorbehandeling	Variabelen			Resultaten									
	QY (mol O2/mol fotonen)	Kosten	DAF scenario	Productprijs (EUR/kg DS)	Zuiveringskosten(EUR/m3)	Oppervlakt(ha)	Alg/bact verhouding (g/g)	O2 balans (kg/dag)	CO2 balans(kg/dag)	N via ni/deni route(%)	N verwijdering (g N.m--2.d-1)	P verwijdering(g P.m-2.d-1)	Biomassaproductie (g ODS.m-2.d-1)
VBT	0,02	-30%		1,4	0,3	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3
DAF	0,02	-30%	1	1,8	0,3	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
DAF	0,02	-30%	3	2,3	0,2	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
VBT	0,02	0%		2,1	0,4	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3
DAF	0,02	0%	1	2,5	0,4	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
DAF	0,02	0%	3	3,0	0,3	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
VBT	0,02	30%		2,7	0,5	12	2,3	0	-1570	66%	4,0	0,24	15,3
DAF	0,02	30%	1	3,2	0,5	10,5	2,8	0	-1474	70%	4,0	0,21	14,6
DAF	0,02	30%	3	3,7	0,4	7,4	3,3	0	-1521	77%	5,0	0,20	14,0
VBT	0,04	-30%		0,6	0,1	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6
DAF	0,04	-30%	1	1,0	0,1	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
DAF	0,04	-30%	3	1,4	0,1	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0
VBT	0,04	0%		0,9	0,2	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6
DAF	0,04	0%	1	1,3	0,2	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
DAF	0,04	0%	3	1,7	0,2	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0
VBT	0,04	30%		1,3	0,2	6	2,3	0	-1570	66%	8,1	0,48	30,6
DAF	0,04	30%	1	1,7	0,2	5,2	2,8	0	-1474	70%	8,0	0,42	29,1
DAF	0,04	30%	3	2,1	0,2	3,7	3,3	0	-1521	77%	9,9	0,40	28,0

4

DISCUSSIE

4.1 HAALBAARHEID SYMBAALZUIVERING

4.1.1 TECHNISCH

Op lab- en pilotschaal is het proof-of-principle van een symbaalzuivering aangetoond waarbij de symbiose tussen bacterien en algen kan worden gebruikt bij afvalwaterzuivering. Hierbij kan meer stikstof worden verwijderd dan bij vastlegging in algenbiomassa alleen. De energie voor deze samenwerking wordt geleverd door zonlicht, CO₂ uit afbraak van organisch materiaal en O₂ uit fotosynthese van algen. Door deze samenwerking worden nutriënten uit afvalwater verwijderd en vastgelegd zonder de inzet van beluchting zoals bij conventionele waterzuivering.

De opgestelde massabalans voor symbaalzuivering geeft bij een quantum yield van 0,02 mol O₂/mol fotonen een vergelijkbare verwijdering voor stikstof en fosfaat en biomassaproductie als de resultaten uit verschillende labschaal experimenten zoals beschreven in paragraaf 2.6. Dit geeft voldoende onderbouwing om op basis van de verschillende massabalans berekeningen inzicht te krijgen in de potentie van een symbaalzuivering voor behandeling van rioolwater in Nederland.

Het kunstmatig belichten van een symbaalzuivering is economisch gezien niet haalbaar. Hierdoor kan algentechnologie voor een rioolwaterzuivering alleen in de zomermaanden (april-september) worden toegepast. De voornaamste oorzaak dat belichting niet haalbaar is, is de lage Quantum Yield (de mate waarin licht effectief wordt gebruikt voor fotosynthese). Allerlei factoren zorgen ervoor dat dit rendement bij algengroei zeer laag is. Bij symbaalzuivering zouden schaduweffecten, welke bij elke algenkweek de QY beïnvloeden, een extra negatieve rol kunnen spelen omdat het aandeel van niet foto-autotrofe biomassa theoretisch relatief groot is.

Uit de massabalansen blijkt dat de aanwezigheid van voldoende CZV als koolstofbron belangrijk is voor de symbiose tussen algen en bacterien. Hierdoor is het niet gunstig om het symbaalconcept toe te passen na vergaande voorbehandeling van het afvalwater of als effluentpolishingstechniek. Anderzijds kan door vergaande voorbehandeling via een DAF installatie, de footprint van het symbaalconcept worden verkleind. Uit de haalbaarheidsverkenning blijkt dat bij voorzuivering door een DAF de waterzuiveringskosten en biomassaproductiekosten naar verwachting hoger zijn dan wanneer een voorbezinktank als voorbehandeling wordt toegepast.

De symbaalzuivering is door de gegeven C:N:P-verhouding van huishoudelijk afvalwater en de relatief grote specifieke stikstofverwijdering door nitrificatie en denitrificatie niet in staat om een lage effluentfosfaat waarde van 0,15 mg/l te halen. Aanvullende fosfaatverwijdering is

altijd noodzakelijk. Verder blijkt dat een symbaalzuivering de conventionele hoofdzuivering niet kan vervangen omdat onder winterse omstandigheden de effluenteisen niet zullen worden gehaald door een tekort aan licht.

4.1.2 ECONOMISCH

De extra waterzuiveringskosten door het toepassen van symbaalzuivering parallel aan het actief-slibstelsysteem met voorbezinktank liggen tussen de EUR 0,3 en 0,5 per m³ behandeld afvalwater bij een realistische QY van 0,02 mol O₂/mol fotonen. Of circa EUR 10,0 per i.e. per jaar bij 130 liter afvalwater per i.e. per dag. Daarbij wordt aan de symbaalbiomassa geen waarde wordt toegekend. Conventionele waterzuivering kost circa 0,75 EUR/m³ bij een i.e. tarief van EUR 35,13 per i.e. en 130 liter afvalwater per i.e. per dag¹. De kosten van symbaalzuivering komen voort uit de extra kosten door het toepassen van het symbaalconcept minus de besparingen op de operationele kosten van de conventionele zuivering. Met uitzondering van deze besparingen lopen de overige kosten horend bij de exploitatie van de conventionele zuivering bij toepassing van de symbaalzuivering gewoon door. Om de symbaalzuivering kosten-neutraal te maken zou symbaalbiomassa bij een realistische QY van 0,02 mol O₂/mol fotonen tussen de 1,4 en 2,7 EUR/kg DS ruw product (70% alg) moet opbrengen².

Uit de STOWA-studie "effluentpolishing met algen" blijkt dat met algentechnologie als nabehandeling de extra kosten tussen de EUR 0,12 tot 0,14 per m³ behandeld water liggen. Echter per kilogram verwijderde stikstof liggen de kosten van symbaalzuivering mogelijk lager. Ook de voetafdruk van symbaalzuivering is hierbij met 0,6 tot 1,2 m² per i.e. mogelijk lager dan bij effluentpolishing waar met behulp van pilotonderzoek circa 3,8 m² per i.e. is vastgesteld [2].

4.2 AFZETMARKT ALGEN

De potentiële marktwaarde van symbaalslib voor toepassingen als energiebron, meststof en diervoeder ligt in de range van 0,01 tot 0,75 EUR/kg DS. Bij een netto waardevermeerdering van het product van 3% per jaar ligt de potentiële marktwaarde over 10 jaar op hoogstens 1,0 EUR/kg DS. De werkelijke waarde ligt mogelijk nog lager door de oorsprong van de nutriënten en de mogelijke aanwezigheid van verontreinigingen zoals zware metalen. Uit deze doorrekening blijkt dat voor deze toepassing het toekomstperspectief over 10 jaar beperkt is aangezien de productiekosten tussen de 1,4 en 2,7 EUR/kg DS liggen en dus fors zouden moeten dalen.

Specifieke algensoorten die worden gebruikt voor vis- en schelpdierteelt of bepaalde stoffen die in kleine concentraties in de algenbiomassa aanwezig zijn kunnen een veelvoudig hogere waarde vertegenwoordigen. Dit kan oplopen tot enkele euro's per kilogram. Gezien de aard van symbaalzuivering (gemengde culturen en kweek op huishoudelijk afvalwater) en de grote mate aan raffinage die nodig is om waardevolle stoffen uit symbaalbiomassa te extraheren zijn deze toepassingen voor symbaalbiomassa nu nog niet interessant.

- 1 De gestandaardiseerde kosten voor het zuiveren van afvalwater waren in 2009 voor alle waterschappen gemiddeld EUR 35,13 per i.e. Dit bedrag is opgebouwd uit kapitaallasten, operationele beheerkosten, operationele onderhoudskosten en eventuele opbrengsten.
- 2 In de praktijk kunnen de gepresenteerde kosten en ruimtebeslag hoger liggen omdat het geheel is gedimensioneerd op een aanvoer van 130 liter afvalwater per i.e. per dag met een ammoniumgehalte van 50 mg N/l. Daarbij is regenweer, rioolvreemd water en organische stikstof dus buiten beschouwing gelaten.

4.3 POTENTIE VOOR NEDERLAND

Uit de verkenning blijkt dat een symbaalzuivering voor rioolwater in Nederland de komende jaren niet kansrijk is. Het is zeker geen alternatief voor de conventionele hoofdzuivering omdat in de winter de effluenteisen niet kunnen worden gehaald door een gebrek aan licht. Het kunstmatig belichten in perioden met te weinig licht is economisch gezien niet haalbaar. Ook als nazuivering is het symbaalconcept niet geschikt omdat het gehalte van organisch materiaal te laag is als bron voor CO₂ in de symbiose tussen bacteriën en algen. De symbaalzuivering lijkt in de toekomst het eerst kansrijk parallel aan de conventionele zuivering indien een rwzi uitgebreid moet worden omdat door een hogere belasting in de zomermaanden (april-september) de effluenteisen niet meer worden gehaald. In dat geval is de symbaalzuivering geen aanvulling meer op de bestaande rwzi maar een noodzakelijke uitbreiding en hoeven kapitaalslasten niet toegerekend te worden aan de productiekosten van symbaalbiomassa.

Er zijn geen redenen om aan te nemen dat de kosten voor toepassing van een symbaalconcept voor zowel waterzuivering als grondstofproductie zullen dalen. Of een dergelijk concept in de toekomst economisch haalbaar wordt hangt daarom af van een toenemende afzetmarkt en economische waarde van algen. Het winnen van hoogwaardiger grondstoffen uit algen via onder andere raffinage staat nog in de kinderschoenen en gaat nog minimaal 5 jaar duren voordat hier resultaten van verwacht mogen worden. Er is daarom de komende jaren geen markt voor het symbaalconcept en algenbiomassa gekweekt op rioolwater.

Een symbaalconcept voor de productie van grondstoffen zal in landen met veel zon het eerst haalbaar zijn omdat de jaarlijkse productiviteit per hectare hoger ligt. Feit is echter dat ondanks dat algen in potentie een duurzame manier van waterzuiveren is en/of manier van grondstofproductie kan zijn, er nog zeer veel risico's en onzekerheden die weggenomen moeten worden voordat het symbaalconcept eventueel op grote schaal kan worden toegepast.

4.4 RISICO'S EN ONZEKERHEDEN

Bij het verkennen van de haalbaarheid van symbaalzuivering zijn in een aantal gevallen best-case uitgangspunten gehanteerd, zoals de perfecte uitwisseling van gassen en dat het mogelijk is om nitrificatie en denitrificatie zondanig te sturen dat de zuurstofbalans geheel gesloten wordt. Voor het doel van deze haalbaarheidsverkenning volstaan deze aannames, voor een eventuele toepassing in de toekomst moeten dergelijke punten eerst beter onderzocht worden. Deze en andere aanbevelingen worden hieronder toegelicht:

- Wanneer de symbaalzuivering wordt gebruikt om de rwzi in de zomer te ontlasten neemt de vuilvracht naar de rwzi en dus de slibbelasting van de rwzi flink af. Dit vraagt aanpassingen in de bedrijfsvoering van de rwzi zoals bijvoorbeeld het verlagen van de slibleeftijd. Dit kan tot op zekere hoogte, maar de gevolgen van de integratie van symbaalzuivering met de bestaande rwzi zijn niet onderzocht. Deze onzekerheid geldt niet wanneer alleen extra vuilvracht in de zomer, bijvoorbeeld door extra toerisme behandeld wordt in de symbaalzuivering.
- Een succesvolle symbiose is afhankelijk van de juiste influentsamenstelling en een goede uitwisseling van allerlei stoffen. Het is onbekend hoe een symbaalzuivering bedreven kan worden en in welke mate processturing nodig en mogelijk is bij de wisselende influentsamenstelling en lichtinstraling in de praktijk.

- Het is onbekend in welke mate de symbiose de theoretische maxima kan benaderen, wat daarvoor de belangrijkste knelpunten zijn en hoe deze weggenomen kunnen worden. Voorbeelden van processen die in werkelijkheid anders kunnen zijn:
 - het rendement van gasoverdracht. In de massabalans wordt uitgegaan van een 100% efficiënte gasoverdracht van zuurstof en koolstofdioxide;
 - beschikbaarheid en afgifte van exo-polymeren door algen als bCZV bron in de alg-bacteriesymbiose. Nu wordt aangenomen dat dit geen rol speelt en wordt alleen het influent bCZV gebruikt;
 - de mate waarin omzettingen daadwerkelijk verlopen. Het is aangenomen en ook in verschillende laboratorium onderzoeken aangetoond dat denitrificatie kan plaatsvinden in een symbaalzuivering. Echter, lage zuurstofconcentraties komen alleen tijdelijk voor in het dagelijkse ritme van dag en nacht en mogelijk ook in de kern van symbaalvlokken of dieper in een biofilm. Of denitrificatie in de mate kan voorkomen die is verondersteld in deze haalbaarheidsstudie is niet onderbouwd.

5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 CONCLUSIES

Uit de verkenning naar het symbaalzuiveringsconcept blijkt dat het concept economisch niet haalbaar is voor zuivering van rioolwater in Nederland. Een symbaalzuivering kan de conventionele hoofdzuivering niet vervangen omdat in de winter de effluenteisen niet haalbaar zijn door een gebrek aan zonlicht. Het kunstmatig belichten in perioden met te weinig licht is economisch gezien niet haalbaar.

Het symbaalconcept als systeem voor de productie van grondstoffen via algen is de komende jaren niet kansrijk. De productiekosten voor algenbiomassa via een symbaalconcept liggen tussen de 1,4 en 2,7 EUR/kg DS. Dit is de prijs voor ruw product, kosten voor opwerking naar een product met potentieel meer marktwaarde zijn niet inbegrepen. De potentiële marktwaarde van symbaalslib voor toepassingen als energiebron, meststof en diervoeder ligt in de range van 0,10 tot 0,75 EUR/kg DS. Bij een netto waardevermeerdering van het product van 3% per jaar ligt de potentiële marktwaarde over 10 jaar op hoogstens 1,0 EUR/kg DS.

5.2 AANBEVELINGEN

De uitkomsten van de verkenning naar de economische haalbaarheid van symbaalzuivering geven geen basis voor een nadere verkenning of om op korte termijn een pilotonderzoek te starten. Hoewel het symbaalconcept nu en op middellange termijn in de onderzochte configuratie economisch niet haalbaar is blijft het concept wegens het duurzaamheidspotentieel interessant om te verkennen op labschaal. Een onderzoek naar hoe en of de symbiose tussen bacterien en algen optimaal kan worden benut kan in de toekomst nieuwe concepten voor waterzuivering en of waardevolle biomassa productie opleveren.

6

REFERENTIES

1. STOWA, Effluentpolishing met algen. Deelstudierapporten, 2011-05
2. STOWA, Effluentpolishing met algen. Hoofdrapport, 2011-04
3. Gideon Oron, Gedaliah Shelef, Anna Levi, Arie Meydan and Yossef Azov; Algae/Bacteria Ratio in High-Rate Ponds Used for Waste Treatment; *Applied and Environmental Microbiology*; Vol. 38, No. 4, p. 570-576 (1979).
4. Nadine C. Boelee, Hardy Temmink, Marcel Janssen, Cees J. N. Buisman and René H. Wijffels. Scenario Analysis of Nutrient Removal from Municipal Wastewater by Microalgal Biofilms, *Water* 2012, 4(2), 460-473
5. N.C. Boelee, H. Temmink, M. Janssen, C.J.N. Buisman, R.H. Wijffels; Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms; *Water Research*; Vol. 45, p. 5925-5933 (2011).
6. Wolf G., Picioreanu C., Loosdrecht M.C.M.; Kinetic modeling of phototrophic biofilms: the phobia model; *Biotechnology and bioengineering*; Vol. 97; No. 5 (2007).
7. G. Roeselers, M. C. M. van Loosdrecht, G. Muyzer; Phototrophic biofilms and their potential applications; *J Appl Phycol*; Vol. 20: p. 227 – 235 (2008).
8. W.J. Oswald, H.F. Ludwig, H.B. Gotaas and V. Lynch; Algae Symbiosis in Oxidation Ponds. I. Growth Characteristics of *Euglena gracilis* Cultured in Sewage; *Sewage and Industrial Wastes* 23:11 (1951)
9. W.J. Oswald, H.B. Gotaas, H.F. Ludwig and V. Lynch; Algae Symbiosis in Oxidation Ponds. II. Growth Characteristics of *Chlorella pyrenoidosa* Cultured in Sewage; Reprinted in *Sewage and Industrial Wastes* 25:1 (1953)
10. W.J. Oswald, H.B. Gotaas, H.F. Ludwig and V. Lynch; Algae Symbiosis in Oxidation Ponds. III. Photosynthetic Oxygenation; *Sewage and Industrial Wastes* 25:6 (1953)
11. W.J. Oswald, H.B. Gotaas, A.M. Asce and M. Asce; Photosynthesis in Sewage Treatment; Paper presented before the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., (1954). Reprinted in *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Volume 122, (1957).
12. Gutzeit G, Lorch D, Weber A, Engels M, Neis U, Biofloculent algal-bacterial biomass improves low-cost wastewater treatment, *Water Science & Technology* 52.12, pp 9-18 (2005)
13. Medina M. and Neis U., Symbiotic algal bacterial wastewater treatment: effect of food to microorganism ratio and hydraulic retention time on the process performance, *Water Science & Technology* 55.11, pp 165-171 (2007)

14. Su Y., Mennerich A., Urban B., Municipal wastewater treatment and biomass accumulation with a wastewater-born and settleable algal-bacterial culture, *Water research* vol 45, pp 3351-3358 (2011)
15. Ingrepro; http://www.ingrepro.nl/renewables_algenbioreactor/?lang=NL; geraadpleegd op woensdag 4 januari 2012.
16. Ley A.C., Mauzerall C.C.; Absolute absorption cross-sections for photosystem II and the minimum quantum requirement for photosynthesis in *Chlorella Vulgaris*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*; vol. 680 nr. 1 (1982).
17. Vona V., Rigano V.D.M., Esposito S., Carillo P., Cafagna S., Rigano C.; Growth, photosynthesis and respiration of *Chlorella sorokinian* after N starvation. Interactions between light, CO₂ and NH₄⁺ supply. *Physiologia Plantarum* 106 (2), 288-293 (1999).
18. Cardinale B.J., Biodiversity improves water quality through niche partitioning, *Nature*, Vol 472, 2011
19. O. González-Barreiro, C. Rioboo, C. Herrero, A. Cid. Removal of triazine herbicides from freshwater systems using photosynthetic microorganisms. *Environmental Pollution* 144, 266 - 271, 2006
20. Wiegant W.M., Mulder J.W., Veer van der B.; Toepassing van algen voor nazuivering van afvalwater en behandeling van seizoensgebonden bronnen, H₂O nr. 25 (27) (1994).
21. J.C. Goldman and E.J. Carpenter. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. *Limnology and oceanography* 19(5), pp 756-766, 1974
22. Azov Y., Shelef G., Morain R.; Carbon limitation of biomass production in high-rate oxidation ponds; *Biotechnology and bioengineering*; Vol. 24; pp 579-694 (1982)
23. Schumacher G., Blume T., Sekoulov I.; Bacteria reduction and nutrient removal in small wastewater treatment plants by an algal biofilm
24. Water Environment Federation, Nutrient removal; WEF manual of practice NO.34, WEF Press, Alexandria, Virginia, ISBN 978-0-07-172709-8
25. Park J. B. K., Craggs R. J.; Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use; *Water Science & Technology*; Vol 63; No 10; pp 2403-2410 (2011)
26. Park J.B.K. and. Craggs R.J; Nutriënt removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition; *Water Science & Technology* Vol 63 No 8 pp 1758-1764 (2011)
27. STOWA; Energieverbruik nageschakelde behandelingstechnieken; rapport 2011 W-09.
28. C.G. Golueke, W.J. Oswald and H.B. Gotaas; Anaerobic Digestion of Algae; *Applied and Environmental Microbiology*; 5(1):47 (1957)
29. Bruno Sialvea, Nicolas Berneta, Olivier Bernard; Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make micro-algal biodiesel sustainable; *Biotechnology Advances*; Volume 27, Issue 4, PP409-416 (2009)
30. M.E. Baird, J.H. Middleton; On relating physical limits to the carbon: nitrogen ratio of unicellular algae and benthic plants; *Journal of Marine Systems*; 49 pp 169- 175 (2004)
31. WUR; praktische kostprijs biologische melk, Rapport 419 (2010)
32. Buhr H.O., Miller S.B.; A dynamic model of the high-rate algal-bacterial wastewater treatment pond; *Water Research*; Vol. 17; pp 29-37 (1983).

33. Guzzon A., Bohn A., Diociaciuti M., Albertano P.; Cultured phototrophic biofilms for phosphorus removal in wastewater treatment; *Water Research*; Vol. 42; p 4357-4367; (2008).
34. Marcos von Sperling, *Biological wastewater treatment series - volume 1- wastewater characteristics, treatment and disposal*, DESA UFMG, IWA publishing 2007.
35. STOWA, Synergie rwzi en mestverwerking, rapportnummer 2011-10.
36. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering treatment and reuse*, Fourth edition.
37. STOWA, *Handboek slibgisting*, rapportnummer 2011-16.
38. Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81, 1295-1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
39. STOWA, KRW en E-PRTR-stoffen in influent en effluent van rwzi's, rapportnummer 2009-30.
40. S.C. Wilkinson, K.H. Goulding and P.K. Robinson. Mercury removal by immobilized algae in batch culture systems. *Journal of Applied Phycology* 2: 223-230, 1990.
41. S. Klimmek, H.J. Stan, A. Wilke, G. Bunke and R Buchholz. Comparative Analysis of the Biosorption of Cadmium, Lead, Nickel, and Zinc by Algae. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 4283 - 4288, 2001.
42. An-Ping Lei, Zhang-Li Hu, Yuk-Shan Wong, Nora Fung-Yee Tam. Removal of Fluoranthene and Pyrene by different microalgal species. *Bioresource Technology* 98, 273-280, 2007.
43. Sidney Man Ngai Chan, Tiangang Luan, Ming Hung Wong and Nora Fung Yee Tam. Removal and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *selenastrum capricornutum*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 25, No. 7, pp. 1772-1779, 2006.
44. European Commission. Proposal for a directive of the European parliament and of the council, amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Brussels 31-01-2012.
45. STOWA. Verg(h)ulde pillen. 2009

Afbeeldingen

46. Research algae: <http://www.researchalgae.com/cultivation/environmental-application-of-microalgae.html>, bezocht op donderdag 5 januari 2012

BIJLAGE 1

BEREKENING THEORETISCH MAXIMALE ALGENPRODUCTIE

De PAR-fractie van zonlicht (400-700 nm) op grondniveau is 42,3%. Deze fractie heeft een gemiddelde energie van 218 kJ per mol fotonen. Dit kan worden berekend volgens de onderstaande vergelijking en de daarop volgende twee kentallen.

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)}$$

- 1 eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J
- 1 mol fotonen = $6,022 \times 10^{23}$ fotonen (Getal van Avogadro)

Aan de hand van de PAR-energie van zonlicht of een andere lichtbron, een aantal kentallen uit massabalansen en de Quantum Yield (mol zuurstofproductie per mol PAR fotonen) kan de algengroei worden berekend.

De kentallen zijn:

- gewicht van 1 Cmol biomassa is 21,25 gram ($CH_{1,78}O_{0,36}N_{0,12}$);
- zuurstofproductie is 1,42 mol zuurstof per Cmol biomassa (Y_{O_2}) bij groei op nitraat;
- zuurstofproductie is 1,18 mol zuurstof per Cmol biomassa (Y_{O_2}) bij groei op ammonium;
- maximale quantum yield (QY) is 0,1 mol O_2 /mol fotonen , gangbare quantum yield voor open kweeksystemen is 0,02 mol O_2 /mol fotonen tot 0,03 mol O_2 /mol fotonen..
- De biomassaopbrengst op basis van fotonen kan worden berekend door:

$$Y_f = \frac{QY}{Y_{O_2}} \times 21,25$$

In tabel 1 is de gemiddelde Nederlandse zoninstraling omgerekend naar fotonen (PAR) en theoretisch maximale (QY = 0,1 mol O_2 /mol fotonen) en voor open kweeksystemen meer realistische (QY = 0,03 mol O_2 /mol fotonen) opbrengst. De QY van 0,03 komt overeen met de algelopbrengst van 7,5 mg DS.Wh PAR⁻¹ uit het STOWA onderzoek [2]. De Y_{O_2} van nitraat is gehanteerd gezien de aard van de algenkweek in dat onderzoek, effluentbehandeling.

TABEL 1 NEDERLANDSE ZONINSTRALING [38] EN BEREKENDE ALGENOPBRENGST

Mnd	Zonlicht (kWh m ⁻² d ⁻¹)	Zonlicht (W m ⁻² d ⁻¹)	Zonlicht (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Fotonen (PAR) (mol m ⁻² d ⁻¹)	Fotonen (PAR) (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Alg QY=0,01 (g DS m ⁻² d ⁻¹)	Alg QY=0,03 (g DS m ⁻² d ⁻¹)
Jan	0,60	25	2,2	4,2	49	6,3	1,9
Feb	1,37	57	4,9	9,6	111	14,4	4,3
Mar	2,16	90	7,8	15,1	175	22,6	6,8
Apr	3,72	155	13,4	26,0	301	39,0	11,7
May	4,83	201	17,4	33,8	391	50,6	15,2
Jun	4,76	198	17,1	33,3	386	49,9	15,0
Jul	4,85	202	17,5	34,0	393	50,8	15,2
Aug	4,08	170	14,7	28,6	331	42,7	12,8
Sep	2,75	115	9,9	19,3	223	28,8	8,6
Oct	1,61	67	5,8	11,3	130	16,9	5,1
Nov	0,81	34	2,9	5,7	66	8,5	2,6
Dec	0,45	19	1,6	3,2	37	4,7	1,4
Gem	2,67	111	9,6	18,7	216	27,9	8,4

BIJLAGE 2

HAALBAARHEID KUNSTMATIGE BELICHTING

INLEIDING

De inzet van kunstmatige belichting voor algengroei met als doel nutriëntenverwijdering uit communaal afvalwater is economisch niet haalbaar. In deze bijlage zijn de elektriciteitskosten voor belichting uitgerekend voor twee afvalwaterzuiveringsconcepten waarbij algen worden toegepast:

- effluentpolishing met algen;
- symbaalzuivering.

De resultaten worden gepresenteerd in twee paragrafen omdat deze twee concepten heel verschillende uitgangspunten kennen (behandeling van effluent of ruw influent).

BELICHTING EFFLUENTPOLISHING MET ALGEN

In deze paragraaf is het theoretisch elektriciteitsverbruik voor belichting van een 100.000 i.e. nazuivering met algen berekend bij een realistisch en maximaal (best case) Quantum Yield van respectievelijk 0,03 mol O₂/mol fotonen en 0,1 mol O₂/mol fotonen. De berekening van algengroei op basis van de Nederlandse gemiddelde maandelijks zonnestraling en een massabalans is weergegeven in bijlage I. Dit is een eenvoudige en inzichtelijke manier om de maximale biomassa-productiviteit te berekenen bij een gegeven belichting en Quantum Yield. Bij effluentpolishing met algen wordt stikstof net als fosfaat alleen verwijderd door vastlegging. Alle uitgangspunten staan in onderstaande tabel, het stikstof en fosfaat biomassapercentage zijn gebaseerd op [4].

TABEL

UITGANGSPUNTEN BEREKENINGEN ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Parameter	Eenheid	Waarde
Stikstof in biomassa	massa %	7,8%
Fosfaat in biomassa	massa %	1,4%
Effluent stikstof	mg N/l	10
Effluent fosfaat	mg P/l	1
Zuivering grootte	i.e.	100.000
Richtwaarde effluent stikstof	mg N/l	2,2
Richtwaarde effluent fosfaat	mg P/l	0,15
Gemiddeld effluentdebiet	m ³ /d	13.000
Benodigde N-verwijdering	kg/dag	101
Benodigde P-verwijdering	kg/dag	11
Dimensioneringsmaand	--	September
Temperatuur	Buiten beschouwing gelaten ¹	
Energieprijs	EUR/kWh	0,11

¹ De invloed van de lage temperatuur in de winter wordt buiten beschouwing gelaten. Wanneer die factor wel zou worden meegenomen valt de economische haalbaarheid enkel nog ongunstiger uit.

De dimensioneringsmaand staat voor de maatgevende zoninstraling op basis waarvan het oppervlak van de symbaalzuivering is berekend. In dit voorbeeld wordt de daggemiddelde (24 uur) zoninstraling van de maand september gebruikt. In de maanden met minder zoninstraling (winter) is de capaciteit dus te klein wat resulteert in een slechtere effluentkwaliteit. In de maanden met meer zoninstraling (zomer) is de capaciteit te groot wat theoretisch resulteert in een nog betere effluentkwaliteit en meer biomassa productie.

Om de effluentkwaliteit in de wintermaanden op gelijk niveau te houden kan technisch gezien aanvullend kunstlicht worden gebruikt. In onderstaande tabellen zijn de elektriciteitskosten van belichting berekend. De resultaten zijn samengevat in de tabel op de volgende pagina.

Bij de berekening zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- het tekort aan zonlicht in de wintermaanden wordt gecompenseerd met kunstlicht;
- kunstlicht levert 100% PAR licht (400-700 nm);
- kunstlicht levert een 100% efficiënte omzetting van elektriciteit naar licht.

In de algennazuivering worden stikstof en fosfaat verwijderd in een verhouding van circa 5,5:1 (N:P). De stikstof- en fosfaatvracht die uit het afvalwater verwijderd dient te worden heeft een verhouding heeft van circa 10:1 (N:P). Daardoor ontstaat een fosfaattekort wanneer men alle stikstof middels effluentpolishing wil verwijderen. Als beide verhoudingen in evenwicht wordt gebracht (5,5:1), zodat geen tekort optreedt, wordt theoretisch een stikstof effluentconcentratie van 5,3 mg N/l behaald. Onderstaande berekeningen zijn uitgevoerd zonder tekorten dus met een effluentconcentratie van 5,3 mg N/l en 0,15 mg P/l.

TABEL BEST CASE ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Mnd	Zonlicht (kWh.m ⁻² .d ⁻¹)	Alg (gDS.m ⁻² .d ⁻¹)	Stikstof (gN.m ⁻² .d ⁻¹)	Fosfaat (gP.m ⁻² .d ⁻¹)	Oppervlak N-verw (ha)	Oppervlak P-verw (ha)	Zonlicht tekort (kWh/dag)	Kunstlicht (kWh/dag)
Jan	0,60	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	58.896	24.913
Feb	1,37	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	37.803	15.991
Mrt	2,16	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	16.162	6.837
Apr	3,72	39,0	3,04	0,55	2,0	2,0	-	-
Mei	4,83	50,6	3,95	0,71	1,5	1,6	-	-
Jun	4,76	49,9	3,89	0,70	1,6	1,6	-	-
Jul	4,85	50,8	3,96	0,71	1,5	1,6	-	-
Aug	4,08	42,7	3,33	0,60	1,8	1,8	-	-
Sep	2,75	28,8	2,25	0,40	2,7	2,7	-	-
Okt	1,61	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	31.229	13.210
Nov	0,81	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	53.034	22.433
Dec	0,45	28,8*	2,25*	0,40*	2,7	2,7	62.951	26.628

* Gevolg van toepassing aanvullende belichting.

TABEL REALISTISCH ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Mnd	Zonlicht (kWh.m ⁻² .d ⁻¹)	Alg (gDS.m ⁻² .d ⁻¹)	Stikstof (gN.m ⁻² .d ⁻¹)	Fosfaat (gP.m ⁻² .d ⁻¹)	Oppervlak N-verw (ha)	Oppervlak P-verw (ha)	Zonlicht tekort (kWh/dag)	Kunstlicht (kWh/dag)
Jan	0,60	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	196.321	83.044
Feb	1,37	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	126.011	53.303
Mrt	2,16	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	53.874	22.789
Apr	3,72	11,7	0,91	0,16	6,7	6,8	-	-
Mei	4,83	15,2	1,18	0,21	5,2	5,2	-	-
Jun	4,76	15,0	1,17	0,21	5,2	5,3	-	-
Jul	4,85	15,2	1,19	0,21	5,1	5,2	-	-
Aug	4,08	12,8	1,00	0,18	6,1	6,2	-	-
Sep	2,75	8,6	0,67	0,12	9,1	9,1	-	-
Okt	1,61	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	104.096	44.033
Nov	0,81	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	176.781	74.778
Dec	0,45	8,6*	0,67*	0,12*	9,1	9,1	209.836	88.760

* Gevolg van toepassing aanvullende belichting.

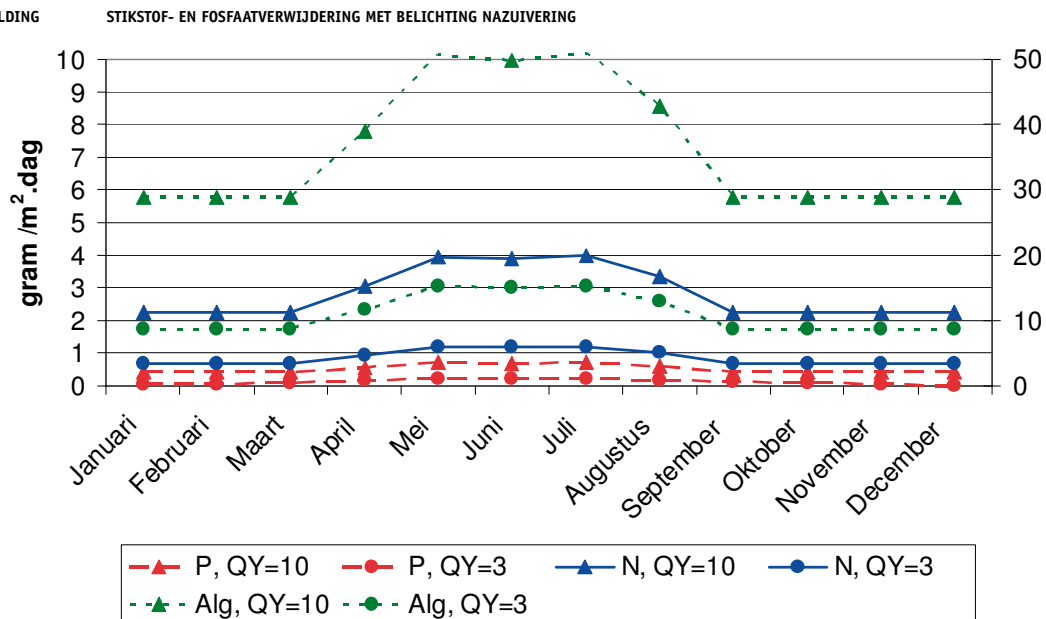
Het aanvullende kunstlicht verbruik in deze tabellen is lager dan het zonlichttekort vanwege het verschil in PAR-fractie. Zonlicht heeft een PAR-fractie van 42,3% en kunstlicht heeft een veronderstelde PAR-fractie van 100%. Als dimensioneringsmaand is september gekozen. Daarom zijn de algenproductie, nutriëntenverwijdering en het benodigde oppervlak in de maanden januari, februari, maart, oktober, november en december gelijk aan de maand september wanneer belichting wordt toegepast. Dit wordt grafisch weergegeven in de afbeelding op de volgende pagina.

TABEL RESULTATEN ELEKTRICITEITSVERBRUIK VOOR BELICHTING VAN EFFLUENTPOLISHING

Parameter	Eenheid	Best case resultaat	Realistisch resultaat
Oppervlak	ha	2,7	9,1
Gemiddelde algenproductie	ton DS.ha ⁻¹ .jaar ⁻¹	132	40
Totale algenproductie	ton DS/jaar	362	362
Jaarlijks elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	3.346.000	11.154.000
Specifiek elektriciteitsverbruik	Wh/m ³	705	2.351
Jaarlijkse elektriciteitskosten	EUR/jaar	368.000	1.227.000
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/m ³	0,08	0,26
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/kg DS	1,02	3,39
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/kg N	13,03	43,43

De totale algenproductie is in beide scenario's gelijk, het energieverbruik en het benodigde oppervlak om die productie te halen ligt bij het "realistisch rendement" scenario echter een factor 3,3 hoger. Het berekende specifieke elektriciteitsverbruik voor verlichting ligt zeer hoog. Ter vergelijking; het Nederlands gemiddelde elektriciteitsverbruik voor continue en discontinue zandfiltratie voor nutriëntenverwijdering ligt op respectievelijk 100 en 55 Wh/m³ [27], een factor 10 (voor het maximale scenario) tot 70 lager dan het elektriciteitsverbruik voor de belichting van een symbaalzuivering alleen. Investeringskosten in een aantal hectare lampen die in staat zijn alleen de PAR-golflengte licht uit te stralen en compensatie van de temperatuur zijn daarbij buiten beschouwing gelaten. Belichting van een algen nazuivering past niet binnen de trend om het energieverbruik van rwzi's terug te dringen en is gezien de kosten van belichting ten opzichte van de potentiële waarde van de biomassa economisch ook niet haalbaar.

AFBEELDING



BELICHTING SYMBAALZUIVERING

Bij de symbaalzuivering wordt voorbehandeld afvalwater direct door algen en bacteriën gezuiverd, daardoor is de vuilvracht naar en dus de zuurstofvraag van de symbaalzuivering flink groter dan die van effluentpolishing. In hoofdstuk 3 “Haalbaarheid Symbaalzuivering” wordt uitgebreid ingegaan op de massabalans voor het berekenen van nutriëntenverwijdering en biomassaproductie van de symbaalzuivering. In deze paragraaf zijn de resultaten van die berekeningen gebruikt om de haalbaarheid van de belichting van symbaalzuivering in te schatten. Van de concepten uit hoofdstuk 3 is het concept symbaalzuivering met voorbezinktank voor onderstaande berekeningen gebruikt.

TABEL.

UITGANGSPUNTEN BEREKENINGEN ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Parameter	Eenheid	Waarde
Stikstof afloop VBT	mg N/l	46,5
Fosfaat afloop VBT	mg P/l	9,3
Zuivering grootte	i.e.	100.000
Richtwaarde effluent stikstof	mg N/l	2,2
Richtwaarde effluent fosfaat	mg P/l	0,15
Gemiddeld effluentdebiet	m ³ /d	13.000 * 0,8 (dagaanvoer)
Benodigde N-verwijdering	kg/dag	460,7
Benodigde P-verwijdering	kg/dag	95,2
Dimensioneringsmaand	--	September
Temperatuur	Buiten beschouwing gelaten ¹	
Energieprijs	EUR/kWh	0,11

¹ De invloed van de lage temperatuur in de winter wordt buiten beschouwing gelaten. Wanneer die factor wel zou worden meegenomen valt de economische haalbaarheid enkel nog ongunstiger uit.

Door stikstofverwijdering via de nitrificatie- en denitrificatieroute en vastlegging in heterotrofe biomassa is de verhouding waarmee nutriënten in de symbaalzuivering worden verwijderd circa 15,7:1 (N:P). De influent N:P-verhouding is echter circa 4,8:1. In dit geval ontstaat een stikstoftekort wanneer alle fosfaat met de symbaalzuivering verwijderd wordt. Wanneer de zuurstofbalans in evenwicht worden gebracht wordt theoretisch een fosfaat effluentconcentratie van 6,5 mg P/l behaald bij een stikstof effluentconcentratie van 2,2 mg N/l. Daardoor wordt maar 29,3 kg P/dag verwijderd in plaats van de benodigde 95,2 kg P/dag.

TABEL. BEREKENING ELEKTRICITEITSVERBRUIK BIJ MAXIMAAL QY (BEST CASE)

Mnd	Zonlicht (kWh.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassa (gDS.m ⁻² .d ⁻¹)	Stikstof (gN.m ⁻² .d ⁻¹)	Fosfaat (gP.m ⁻² .d ⁻¹)	Oppervlak N-verw (ha)	Zonlicht tekort (kWh/dag)	Kunstlicht (kWh/dag)
Jan	0,60	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	78.371	47.023
Feb	1,37	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	50.303	30.182
Mrt	2,16	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	21.507	12.904
Apr	3,72	74,5	17,10	1,09	2,7	-	-
Mei	4,83	80,8	22,20	1,41	2,1	-	-
Jun	4,76	80,4	21,88	1,39	2,1	-	-
Jul	4,85	80,9	22,29	1,42	2,1	-	-
Aug	4,08	76,5	18,75	1,19	2,5	-	-
Sep	2,75	69,0	12,64	0,80	3,6	-	-
Okt	1,61	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	41.555	24.933
Nov	0,81	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	70.571	42.342
Dec	0,45	69,0*	12,64*	0,80*	3,6	83.766	50.260

* Gevolg van toepassing aanvullende belichting.

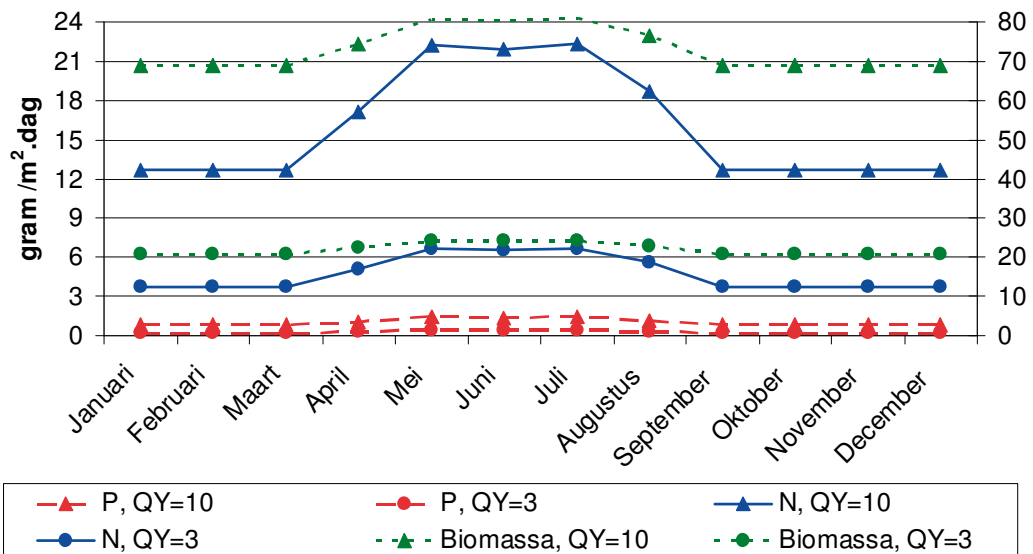
TABEL. BEREKENING ELEKTRICITEITSVERBRUIK BIJ REALISTISCH QY

Mnd	Zonlicht (kWh.m ⁻² .d ⁻¹)	Biomassa (gDS.m ⁻² .d ⁻¹)	Stikstof (gN.m ⁻² .d ⁻¹)	Fosfaat (gP.m ⁻² .d ⁻¹)	Oppervlak N-verw (ha)	Zonlicht tekort (kWh/dag)	Kunstlicht (kWh/dag)
Jan	0,60	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	261.238	156.743
Feb	1,37	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	167.678	100.607
Mrt	2,16	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	71.688	43.013
Apr	3,72	22,3	5,13	0,33	9,0	-	-
Mei	4,83	24,2	6,66	0,42	6,9	-	-
Jun	4,76	24,1	6,56	0,42	7,0	-	-
Jul	4,85	24,3	6,69	0,42	6,9	-	-
Aug	4,08	23,0	5,63	0,36	8,2	-	-
Sep	2,75	20,7	3,79	0,24	12,2	-	-
Okt	1,61	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	138.517	83.110
Nov	0,81	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	235.235	141.141
Dec	0,45	20,7*	3,79*	0,24*	12,2	279.221	167.532

* Gevolg van toepassing aanvullende belichting.

Het verloop van stikstof- en fosfaatverwijdering en algenproductie bij een belichte symbaalzuivering is weergegeven in onderstaande afbeelding.

AFBEELDING STIKSTOF- EN FOSFAATVERWIJDERING MET BELICHTING SYMBAALZUIVERING



Het energieverbruik voor belichting van een symbaalzuivering onder realistische omstandigheden is circa 5.546 Wh/m³, tabel hieronder. Een conventionele rwzi gebruikt aanzienlijk minder energie. Uitgaande van een gemiddeld energieverbruik van 30 kWh.i.e.⁻¹.j⁻¹ en een afvalwaterproductie van 130 L.i.e.⁻¹.d⁻¹ verbruikt een conventionele rwzi circa 630 Wh/m³. Evenals bij het concept waarbij algen als effluentpolishing-techniek worden gebruikt zijn de investeringskosten in een aantal hectare lampen die in staat zijn alleen de PAR-golflengte licht uit te stralen en compensatie van de temperatuur buiten beschouwing gelaten. Belichting van de symbaalzuivering past niet binnen de trend om het energieverbruik van rwzi's terug de dringen en is gezien de kosten van belichting ten opzichte van de potentiële waarde van de biomassa economisch ook niet haalbaar.

TABEL ELEKTRICITEITSVERBRUIK SYMBAALZUIVERING

Parameter	Eenheid	Best case resultaat	Realistisch resultaat
Oppervlak	ha	3,6	12,2
Gemiddelde algenproductie	ton DS.ha ⁻¹ .jaar ⁻¹	267	80
Totale algenproductie	ton DS/jaar	971	971
Jaarlijks elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	6.315.865	21.052.811
Specifiek elektriciteitsverbruik	Wh/m ³	1.664	5.546
Jaarlijkse elektriciteitskosten	EUR/jaar	694.745	2.315.809
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/m ³	0,18	0,61
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/kg DS	0,72	2,38
Specifieke elektriciteitskosten	EUR/kg N	3,29	10,95

Kunstmatige belichting van een waterzuivering met algen met als doel nutriëntenverwijdering uit afvalwater is economisch niet haalbaar. Daarom kan een symbaalzuivering de conventionele hoofdzuivering niet vervangen omdat onder winterse omstandigheden de effluenteisen niet zullen worden gehaald door een gebrek aan licht

BIJLAGE 3

PRIORITAIRE STOFFEN

De verwijdering van microverontreinigingen zoals metalen, pesticiden, medicijnresten, e.d. uit communaal afvalwater om te kunnen voldoen aan KRW richtlijnen voor prioritaire stoffen is een grote uitdaging voor waterbeheerders. Om te bepalen of de symbaalzuivering potentie biedt voor de verwijdering van deze stoffen is geïnventariseerd welke prioritaire stoffen die een probleem vormen in gemiddeld rwzi-effluent efficiënt verwijderd zouden kunnen worden middels de symbaalzuivering. Dit zou een alternatief bieden voor technieken met zand- en aktiefkoolfiltratie, UV, ozon en membraanfiltratie. Veel algensoorten hebben net zoals actief slib de potentie om deze stoffen te absorberen, adsorberen en deels om te zetten [19, 40,41,42,43].

De KRW prioritaire en prioritair gevaarlijke stoffenlijst is een eenduidige richtlijn voor waterkwaliteit die geldt voor alle landen binnen de Europese Unie. Door voor alle Europese landen gelijke regels op te stellen worden grensoverschrijdende watervervuilingsproblemen tegen gegaan. Waterbeheerders moeten voorkomen dat prioritaire stoffen in het oppervlaktewater terecht komen en deze waar nodig verwijderen.

RELEVANTE KRW PRIORITAIRE STOFFEN IN RWZI EFFLUENT

In onderstaande tabel zijn de KRW prioritaire stoffen opgenomen welke in 10% van de metingen of meer werden vastgesteld in het effluent van een groot aantal rwzi's in Nederland tijdens een uitgebreide STOWA-inventarisatie [39].

TABEL

GEMETEN PRIORITAIRE STOFFEN CONCENTRATIE IN RWZI EFFLUENT

parameter	CAS nummer	eenheid	gemiddeld	minimaal	maximaal
atrazine	1912-24-9	µg/l	0,03	0,00	2,10
simazine	122-34-9	µg/l	0,03	0,00	0,42
y-hch (lindaan)	58-89-9	µg/l	0,00	0,00	0,06
hexachlorocyclohexaan	608-73-1	µg/l	0,01	0,00	0,06
pentachloorfenol	87-86-5	µg/l	0,02	0,00	0,25
isoproturon	34123-59-6	µg/l	0,03	0,00	2,00
diuron	330-54-1	µg/l	0,24	0,00	6,00
bis(2ethylhexyl)ftalaat	117-81-7	µg/l	1,28	0,00	13,00
lood	7439-92-1	µg/l	3,95	0,00	54,12
kwik	7439-97-6	µg/l	0,06	0,00	9,72
nikkel	7440-02-0	µg/l	3,94	0,00	69,38
cadmium	7440-43-9	µg/l	0,17	0,00	3,40
4-nonylfenol (vertakt)	90481-04-2	µg/l	0,08	0,00	1,20
fluorantheen	206-44-0	µg/l	0,01	0,00	0,20

De focus van deze inventarisatie ligt op de KRW prioritaire en prioritair gevaarlijke stoffen inclusief de op 31 januari 2012 door de EU voorgestelde aanvulling. Medicijnresten worden hierna behandeld op basis een STOWA-studie. Metingen van de voorgestelde aanvullende stoffen zijn op twee na nog niet beschikbaar. De twee stoffen waarover wel data beschikbaar

waren (dichloorvos en heptachloor) voldeden niet aan de 10%-voorwaarde. Metingen en richtlijnen voor andere stoffen zijn buiten beschouwing gelaten. Andere stoffen die ook vaker dan 10% voorkwamen maar niet tot de prioritaire stoffenlijst behoren zijn ook niet meegenomen.

SELECTIE PROBLEMATISCHE MICROVERONTREINIGINGEN

De gemiddelde, minimale en maximale effluentconcentraties zijn afgezet tegen een streefconcentratie om te bepalen welke microverontreinigingen in het rwzi-effluent de norm het meest overschijden. Voor deze stoffen is het vinden van een verwijderingstechniek in eerste instantie het meest lonend. Als streefconcentratie (norm) zijn de strengste jaargemiddelde oppervlaktewaterconcentraties gehanteerd zoals op te vragen via de database van het RIVM. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel, waaruit blijkt dat een gemiddelde rwzi problematische concentraties diuron en cadmium in het effluent heeft¹. Verder kan kwik ook grote overschrijdingen geven.

TABEL NORMOVERSCHRIJDINGSFACTOREN VAN RELEVANTE PRIORITAIRE STOFFEN IN RWZI EFFLUENT

stof	norm	gemiddelde overschrijdingsfactor	minimale overschrijdingsfactor	maximale overschrijdingsfactor
atrazine	0,6	-	-	4
simazine	1	-	-	-
y-hch (lindaan)	NB	NB	NB	NB
hexachlorocyclohexaan	0,02	-	-	3
pentachloorfenol	0,4	-	-	-
isoproturon	0,3	-	-	7
diuron	0,2	1	-	30
bis(2ethylhexyl)ftalaat	1,3	-	-	10
lood	7,2	-	-	8
kwik	0,3	-	-	32
nikkel	20	-	-	3
cadmium	0,08	2	-	43
4-nonylfenol (vertakt)	0,3	-	-	4
fluorantheen	0,1	-	-	2

SELECTIE PROBLEMATISCHE MEDICIJNEN

Een groot STOWA-onderzoek naar medicijnresten in rwzi-effluent [45] heeft aangetoond dat een aantal medicijnresten in rwzi-effluent een probleem vormt. De effluentconcentraties in onderstaande tabel zijn afgeleid uit diverse STOWA-onderzoeken bij rwzi's Nieuwegein, Katwijk en Stadskanaal.

1 De werkelijke invloed op het oppervlaktewater is afhankelijk van de achtergrondconcentratie en de verdunning ter plaatse. Deze factoren zijn hier buiten beschouwing gebleven.

TABEL INDICATIEVE CONCENTRATIES VAN MEDICIJNRESTEN IN RWZI-EFFLUENT

parameter	Eenheid	gemiddeld	minimaal	maximaal
Metoprolol	µg/l	1,1	0,8	1,4
Atenolol	µg/l	0,8	0,5	1,0
Sotalol	µg/l	1,2	0,8	1,7
Erythromycine	µg/l	1,5	0,2	2,7
Diclofenac	µg/l	0,5	0,2	0,8
Naproxen	µg/l	0,5	0,1	0,9
Azithromycine	µg/l	0,3	0,2	0,4
Gemfibrozil	µg/l	0,7	0,5	0,9
Propranolol	µg/l	0,1	0,1	0,1
Trimethoprim	µg/l	0,2	0,2	0,3
Clarithromycine	µg/l			0,3
Carbamazepine	µg/l	0,7	0,4	0,9
Ibuprofen	µg/l			0,5
Ciprofloxacin	µg/l			0,29
Sulfamethoxazol	µg/l	0,26	0,24	0,29
Sulfapyridine	µg/l			0,13
Propyphenazon	µg/l			0,15
Venlafaxine	µg/l			0,26

Voor medicijnresten zijn nog geen Europese of Nederlandse normen beschikbaar. Daarom zijn normen gehanteerd zoals voorgesteld door de Zwitserse autoriteit (www.oekotoxzentrum.ch). De meest problematische medicijnresten zijn volgens deze vergelijking:

- Erythromycine (antibioticum);
- Diclofenac (pijnstillert);
- Azithromycine (antibioticum);
- Clarithromycine (antibioticum);
- Carbamazepine (anti-epilepticum);
- Ibuprofen (pijnstillert).

TABEL **NORMOVERSCHRIJDINGSFACTOREN VAN MEDICIJNRESTEN IN RWZI EFFLUENT**

parameter	Norm*	gemiddelde overschrijdingsfactor	minimale overschrijdingsfactor	maximale overschrijdingsfactor
Metoprolol	64	-	-	-
Atenolol	150	-	-	-
Sotalol	NB	NB	NB	NB
Erythromycine	0,04	36	6	67
Diclofenac	0,05	11	5	16
Naproxen	1,7	-	-	-
Azithromycine	0,09	3	2	5
Gemfibrozil	NB	NB	NB	NB
Propranolol	NB	NB	NB	NB
Trimethoprim	60	-	-	-
Clarithromycine	0,06	-	-	4
Carbamazepine	0,5	1	-	2
Ibuprofen	0,3	-	-	2
Ciprofloxacine	NB	NB	NB	NB
Sulfamethoxazol	0,6	-	-	-
Sulfapyridine	NB	NB	NB	NB
Propyphenazon	NB	NB	NB	NB
Venlafaxine	NB	NB	NB	NB

* Dit zijn geen Nederlandse normen maar JG-MKN zoals voorgesteld door de Zwitserse autoriteit (www.oekotoxzentrum.ch).

BIJLAGE 4

VBT SYMBAALZUIVERING MASSABALANS

INVOER PARAMETERS

Parameter	Eenheid	Waarde
Influent		
Vervuilingseenheden	ve	100000
Debiet	m ³ /d	13000
Dagaanvoer	%	80%
Nachtaanvoer	%	20%
Organisch zwevende stof	mg DS/l	190
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	60
CZV	mg O ₂ /l	500
bCZV	mg O ₂ /l	350
BZV	mg O ₂ /l	213
NH ₄	mg N/l	50
PO ₄	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	2470
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	780
CZV	kg O ₂ /dag	6500
bCZV	kg O ₂ /dag	4550
BZV	kg O ₂ /dag	2774
NH ₄	kg N/dag	650
PO ₄	kg P/dag	130
Verwijderingsrendement voorbezinktank		
Zwevende stof	%	50%
CZV	%	30%
BZV	%	25%
NH ₄	%	0%
PO ₄	%	0%
Verwijderingsrendement rwzi		
Zwevende stof	%	90%
CZV	%	90%
bCZV	%	98%
BZV	%	98%
NH ₄	%	95%
PO ₄	%	
N	mg/l	2,2
P	mg/l	0,15
Nutrienten vastlegging		
stikstofvastlegging alg	%	7,8%
stikstofvastlegging het. Slib	%	12%
fosfaatvastlegging alg	%	1,4%

fosfaatvastlegging het. Slib	%	2%
fosfaatvastlegging rwzi slib	%	4%
Slibproductie		
Slibleeftijd in Symbaal	d	12,5
Slibleeftijd in RWZI	d	12,5
Yield heterotrofen	g ODS/g bCZV	0,4
Fractie cell resten	g ODS/g ODS	0,15
Cel afbraak coefficient	d-1	0,088
bCZV gehalte slib	g bCZV/g ODS	1,42
von den Emde Parameters (beluchting)		
Zuurstofvraag nitrificatie	g O ₂ /g N	4,57
bCZV denitrificatie	g bCZV/g N	2,86
Endogene ademhaling	g O ₂ /g ODS.d	0,12
BZV verademings coefficient	g O ₂ / g BZV verwijderd	0,5
Zuurstof verbruik omrekening		
bCZV/CZV	-	0,7
bCZV/BZV	-	1,64
Kosten en verwanten		
Omzettingsrendement primair ODS	%	65%
Omzettingsrendement secundair ODS	%	40%
Biogas productie	m ³ /kg ODS omgezet	0,95
Biogas energie-inhoud	kWh/m ³	6,2
WKK-rendement	%	40%
Beluchtingsenergie	kg O ₂ ingebracht/kWh	2,55
Beluchting & rwzi		
Energieprijs	EUR/kWh	0,11
Slibverwerkingskosten	EUR/ ton ds	300
HRAP		
Operationele kosten	EUR/ha.jaar	22500
Kapitaals lasten	EUR/ha.jaar	37500
Totale kosten	EUR/ha.jaar	60.000
Huur/pacht grond	EUR/ha.jaar	3.000
Ijzerchloride voor fosfaatverwijdering		
Doseerverhouding Fe/P	mol/mol	1,0
Molmassa FeCl ₃	g/mol	162,2
Molmassa Fe	g/mol	55,8
Molmassa P	g/mol	31,0
Concentratie FeCl ₃	massa	40%
Dichtheid FeCl ₃ (40% opl)	kg/l	1,43
Prijs FeCl ₃ (40% opl.)	/ ton product	210
Slibverwerkingskosten	/ ton DS	300

VOORBEZINKTANK**Ingaand VBT**

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	190
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	60
CZV	mg O ₂ /l	500
bCZV	mg O ₂ /l	350
BZV	mg O ₂ /l	213
N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	2470
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	780
CZV	kg O ₂ /dag	6500
bCZV	kg O ₂ /dag	4550
BZV	kg O ₂ /dag	2774
N totaal	kg N/dag	650
P totaal	kg P/dag	130

Uitgaand VBT

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	95
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	30
CZV	mg O ₂ /l	350
bCZV	mg O ₂ /l	245
BZV	mg O ₂ /l	160
N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	1235
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	390
CZV	kg O ₂ /dag	4550
bCZV	kg O ₂ /dag	3185
BZV	kg O ₂ /dag	2081
N totaal	kg N/dag	650
P totaal	kg P/dag	130

Primair Slibproductie

Organisch	kg ODS/dag	1235
Anorganisch	kg DS/dag	390

RWZI

Ingaand RWZI	m ³ /d	2600
Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	95
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	30
CZV	mg O ₂ /l	350
bCZV	mg O ₂ /l	245
BZV	mg O ₂ /l	160
N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	247
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	78
CZV	kg O ₂ /dag	910
bCZV	kg O ₂ /dag	637
BZV	kg O ₂ /dag	416
N totaal	kg N/dag	130
P totaal	kg P/dag	26
Uitgaand RWZI		
Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	10
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	3
CZV	mg O ₂ /l	35
bCZV	mg O ₂ /l	5
BZV	mg O ₂ /l	3
N totaal	mg N/l	3
P totaal	mg P/l	8
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	25
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	8
CZV	kg O ₂ /dag	91
bCZV	kg O ₂ /dag	13
BZV	kg O ₂ /dag	8
N totaal	kg N/dag	7
P totaal	kg P/dag	20
Heterotroof slibproductie		
Totaal bCZV verbruik	kg O ₂ /d	624
Totaal slibproductie	kg ODS/d	139
Stikstof vastlegging in bact	kg N/d	17
Fosfor vastlegging in bact	kg P/d	6

Zuurstofvraag

BZV verbruik	kg O ₂ /d	381
Slibbelasting	kg BZV/kg ODS.d	0,22
endogene ademhaling	kg O ₂ /d	216
substraat verademing	kg O ₂ /d	204
nitrificatie	kg O ₂ /d	488
denitrificatie	kg O ₂ /d	306
totale zuurstofvraag	kg O ₂ /d	603

Chemische P verwijdering

Benodigde P verwijdering	kg P/dag	20,1
--------------------------	----------	------

SYMBAAL

Influent

	m ³ /d		10400
bCZV	mg O ₂ /l		245
N	mg N/l	50,0	
P	mg P/l	10,0	
bCZV	kg O ₂ /dag		2548
N	kg N/dag		520
P	kg P/dag		104

QUANTUM YIELD MELDING	QY=		2%
Stuurpercentage nitrificatie/denitrificatie	%		76,1%
Dimensionerings maand			Zomergemiddeld
Zuurstofproductie	mol O ₂ /m ² /d		0,58
Kosten symbaalbiomassa	EUR/kg DS		2,07

Effluent

		Model - NO ₃	Model - NH ₄
bCZV	mg O ₂ /l	0,0	0,0
N	mg N/l	2,2	2,20
P	mg P/l	7,1	7,1
bCZV	kg O ₂ /dag	0	0
N	kg N/dag	23	23
P	kg P/dag	74	74

Gasbalans

Zuurstof consumptie	kg O ₂ /d	2718	2304
Zuurstof productie	kg O ₂ /d	2771	2303
Zuurstof tekort/overschot	kg O ₂ /d	53	-1,1
Kooldioxide consumptie	kg CO ₂ /d	2683	2683
Kooldioxide productie	kg CO ₂ /d	1685	1115
Kooldioxide tekort/overschot	kg CO ₂ /d	-999	-1569

Heterotroof slibproductie

Totaal bCZV verbruik	kg O ₂ /d	2548	2548
Totaal slibproductie	kg ODS/d	565	565
Stikstof vastlegging in slib	kg N/d	68	68
Fosfor vastlegging in slib	kg P/d	11	11
Nog te verwijderen stikstof	kg N/d	429	429

Algen groei

Algen biomassa productie	g OS/m ² /d	8,85	10,66
Zuurstof productie	g O ₂ /m ² /d	18,66	18,66
Kooldioxide consumptie	g CO ₂ /m ² /d	18,07	21,75
Stikstof vastlegging	g NO ₃ -N/m ² /d	0,69	

Stikstof vastlegging	g NH ₄ -N/m ² /d		0,83
Fosfor vastlegging	g PO ₄ -P/m ² /d	0,12	0,15
Stikstof vastlegging in alg	kg N/d	102,6	102,6
Benodigd oppervlak	ha	14,8	12,3
Algen biomassa productie	kg OS/d	1315	1315
Zuurstof productie	kg O ₂ /d	2771	2303
Kooldioxide consumptie	kg CO ₂ /d	2683	2683
Fosfor vastlegging in alg	kg P/d	18	18
Nitrificatie/denitrificatie			
Te verwijderen N vracht	kg N/d	326,7	326,7
Nitrificatie			
Zuurstof verbruik	kg O ₂ /d	1493	1493
Denitrificatie			
bCZV verbruik	kg bCZV/d	934	934
Specifiek tekort/overschot			
Zuurstofverschil	g/pe/d	1	0
Kooldioxide verschil	g/pe/d	-10	-16
Alg productie	g/pe/d	13,1	13,1
Slib productie	g/pe/d	5,7	5,7
Chemische P verwijdering			
Benodigde P verwijdering	kg P/dag	72,7	72,7
N verwijdering			
N in biomassa	kg N/dag	170,4	170,4
N via ni/deni rout	kg N/dag	326,7	326,7
Percentage via ni/deni route		66%	66%

REFERENTIE RWZI

Ingaand VBT

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	190
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	60
CZV	mg O ₂ /l	500
bCZV	mg O ₂ /l	350
BZV	mg O ₂ /l	213
N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	2470
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	780
CZV	kg O ₂ /dag	6500
bCZV	kg O ₂ /dag	4550
BZV	kg O ₂ /dag	2774
N totaal	kg N/dag	650
P totaal	kg P/dag	130

Uitgaand VBT

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	95
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	30
CZV	mg O ₂ /l	350
bCZV	mg O ₂ /l	245
BZV	mg O ₂ /l	160
N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	1235
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	390
CZV	kg O ₂ /dag	4550
bCZV	kg O ₂ /dag	3185
BZV	kg O ₂ /dag	2081
N totaal	kg N/dag	650
P totaal	kg P/dag	130

Primair Slibproductie

Organisch	kg ODS/dag	1235
Anorganisch	kg DS/dag	390

Ingaand RWZI

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	95
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	30
CZV	mg O ₂ /l	350
bCZV	mg O ₂ /l	245
BZV	mg O ₂ /l	160

N totaal	mg N/l	50
P totaal	mg P/l	10
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	1235
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	390
CZV	kg O ₂ /dag	4550
bCZV	kg O ₂ /dag	3185
BZV	kg O ₂ /dag	2081
N totaal	kg N/dag	650
P totaal	kg P/dag	130

Uitgaand RWZI

Parameter	Eenheid	Waarde
Organisch zwevende stof	mg DS/l	10
Anorganisch zwevende stof	mg DS/l	3
CZV	mg O ₂ /l	35
bCZV	mg O ₂ /l	5
BZV	mg O ₂ /l	3
N totaal	mg N/l	3
P totaal	mg P/l	8
Organisch zwevende stof	kg DS/dag	124
Anorganisch zwevende stof	kg DS/dag	39
CZV	kg O ₂ /dag	455
bCZV	kg O ₂ /dag	64
BZV	kg O ₂ /dag	42
N totaal	kg N/dag	33
P totaal	kg P/dag	102

Heterotroof slibproductie

Totaal bCZV verbruik	kg O ₂ /d	3121
Totaal slibproductie	kg ODS/d	693
Stikstof vastlegging in bact	kg N/d	83
Fosfor vastlegging in bact	kg P/d	28

Zuurstofvraag

BZV vracht	kg O ₂ /d	1903
Slibbelasting	kg BZV/kg ODS.d	0,22
endogene ademhaling	kg O ₂ /d	1082
substraat verademing	kg O ₂ /d	1020
nitrificatie	kg O ₂ /d	2442
denitrificatie	kg O ₂ /d	1528
totale zuurstofvraag	kg O ₂ /d	3015

Beluchting

Beluchting	kg O ₂ /d	3.015
Beluchting	kWh/dag	1182
Beluchting	EUR/dag	130

Biogas productie

Biogas productie	m ³ /dag	1026
------------------	---------------------	------

Energie productie

Elektriciteit uit biogas

Kwh/dag

2544

Waarde elektriciteit

EUR/dag

280

Chemische P verwijdering

Benodigde P verwijdering

kg P/dag

100,3

SLIB, LUCHT EN IJZER**Besparing op beluchting door SYMBAAL**

Besparing beluchting	kg O ₂ /d	2412
Besparing beluchting	kWh/dag	946
Besparing beluchting	EUR/dag	104

Slibproductie**0-referentie**

Voorbezinktank	kg ODS/d	1235
RWZI	kg ODS/d	693
Totaal	kg ODS/d	1928

Symbaal variant

Voorbezinktank	kg ODS/d	1235
RWZI	kg ODS/d	139
Totaal	kg ODS/d	1374

Uitgegist slibproductie**0-referentie**

Voorbezinktank	kg ODS/d	432
RWZI	kg ODS/d	416
Totaal	kg ODS/d	848
Slibverwerkingskosten	EUR/dag	254

Symbaal variant

Voorbezinktank	kg ODS/d	432
RWZI	kg ODS/d	83
Totaal	kg ODS/d	515
Slibverwerkingskosten	EUR/dag	155

Winst symbaalvariant

EUR/dag	100
---------	-----

Biogas productie**0-referentie**

Biogas productie	m ³ /dag	1026
Elektriciteit uit biogas	Kwh/dag	2544
Waarde elektriciteit	EUR/dag	280

Symbaal variant

Biogas productie	m ³ /dag	815
Elektriciteit uit biogas	Kwh/dag	2022
Waarde elektriciteit	EUR/dag	222

Winst symbaalvariant

EUR/dag	57-
---------	-----

IJZER verbruik voor P binding**0-referentie**

Benodigde chemische P binding	kg P/dag	100,3
-------------------------------	----------	-------

Benodigde chemische P binding	kmol P/dag	3,2
Benodigd ijzer	kmol Fe/dag	3,2
Benodigd ijzerchloride	kg FeCl ₃ /dag	525
Benodigd ijzerchloride product	ton product/dag	1,3
Kosten	EUR dag	276
Chemisch slibproductie	ton slib/dag	0,3
Kosten	EUR/dag	84
Totale kosten chemicaliengebruik	EUR dag	360
Symbaal variant		
Benodigde chemische P binding	kg P/dag	92,8
Benodigde chemische P binding	kmol P/dag	3,0
Benodigd ijzer	kmol Fe/dag	3,0
Benodigd ijzerchloride	kg FeCl ₃ /dag	486
Benodigd ijzerchloride product	ton product/dag	1,2
Kosten	EUR dag	255
Chemisch slibproductie	ton slib/dag	0,3
Kosten	EUR/dag	78
Totale kosten chemicaliengebruik	EUR/dag	333
Winst symbaalvariant	EUR/dag	27
Totale opengsten operationeel door DAF+SYMBAAL	EUR/dag	173
Totale opengsten operationeel door DAF+SYMBAAL	EUR/jaar	63.305

KOSTEN EN BATEN**OPERATIONEEL****Kosten**

SYMBAAL HRAP	EUR/jaar	277.616,50
--------------	----------	-------------------

Baten

Opbrengsten SYMBAAL scenario	EUR/jaar	63.305
------------------------------	----------	---------------

Subtotaal (kosten-baten)	EUR/jaar	214.311,07
---------------------------------	----------	-------------------

KAPITAAL

Grondkosten	EUR/jaar	37.015,53
-------------	----------	------------------

Kosten

SYMBAAL HRAP	EUR/jaar	462.694,16
--------------	----------	-------------------

Subtotaal	EUR/jaar	499.709,69
------------------	----------	-------------------

TOTAAL

Jaarlijkse kosten	EUR/jaar	714.020,76
-------------------	----------	-------------------

Symbaal biomassaproductie	kg DS/jaar	344.192	(april-september)
---------------------------	------------	----------------	-------------------

Kosten symbaalbiomassa	EUR/kg DS	2,07
------------------------	-----------	-------------

Kosten waterzuivering	EUR/m3	0,38
-----------------------	--------	-------------

Biomassaproductie

		Algen	Heterotroof	alg/bact
April	kg DS	35.229	17.198	2,05
Mei	kg DS	47.266	17.198	2,75
Juni	kg DS	45.078	17.198	2,62
Juli	kg DS	47.461	17.198	2,76
Augustus	kg DS	39.926	17.198	2,32
September	kg DS	26.043	17.198	1,51
Totaal	kg DS	241.004	103.188	2,34

LICHTMODEL

groei op nitraat	21,56	gram biomassa ($\text{CH}_{1,78}\text{O}_{0,36}\text{N}_{0,12}$)
groei op ammonium	1,42	mol O_2 per Cmol biomassa
quantum yield	1,18	mol O_2 per Cmol biomassa
wh	2%	(1,2-4,3% Boelee)
Fractie PAR	3600	J
golflengte	42,3%	van zonlicht
Lichtsnelheid	5,5E-07	
Planck	2,998E+08	m/s
Avogadro	6,6261E-34	
	6,0221E+23	
Energie per foton	3,612E-19	J
Energie per mol fotonen	2,175E-01	MJ

Month	wh/m ² /day	Zonlicht (kWh/m ² /d)	W/m ² /d	MJ PAR/m ² /d	mol PAR/m ² /d	umol PAR/m ² /s	theoretische algenproductie (g DS/m ² /d)	Zuurstof	Zuurstof
								productie mol/m ² /d	productie gram O_2 /m ² /d
Januari	0,60	0,60	25	0,9	4,2	49	1,5	0,08	2,7
Februari	1,37	1,37	57	2,1	9,6	111	3,5	0,19	6,1
Maart	2,16	2,16	90	3,3	15,1	175	5,5	0,30	9,7
April	3,72	3,72	155	5,7	26,0	301	9,5	0,52	16,7
Mei	4,83	4,83	201	7,4	33,8	391	12,4	0,68	21,6
Juni	4,76	4,76	198	7,2	33,3	386	12,2	0,67	21,3
Juli	4,85	4,85	202	7,4	34,0	393	12,4	0,68	21,7
Augustus	4,08	4,08	170	6,2	28,6	331	10,4	0,57	18,3
September	2,75	2,75	115	4,2	19,3	223	7,0	0,39	12,3
Oktober	1,61	1,61	67	2,5	11,3	130	4,1	0,23	7,2
November	0,81	0,81	34	1,2	5,7	66	2,1	0,11	3,6
December	0,45	0,45	19	0,7	3,2	37	1,2	0,06	2,0
Zomergemiddeld	4,17	4,17	173,54	6,34	29,16	337,50	10,66	0,58	18,66