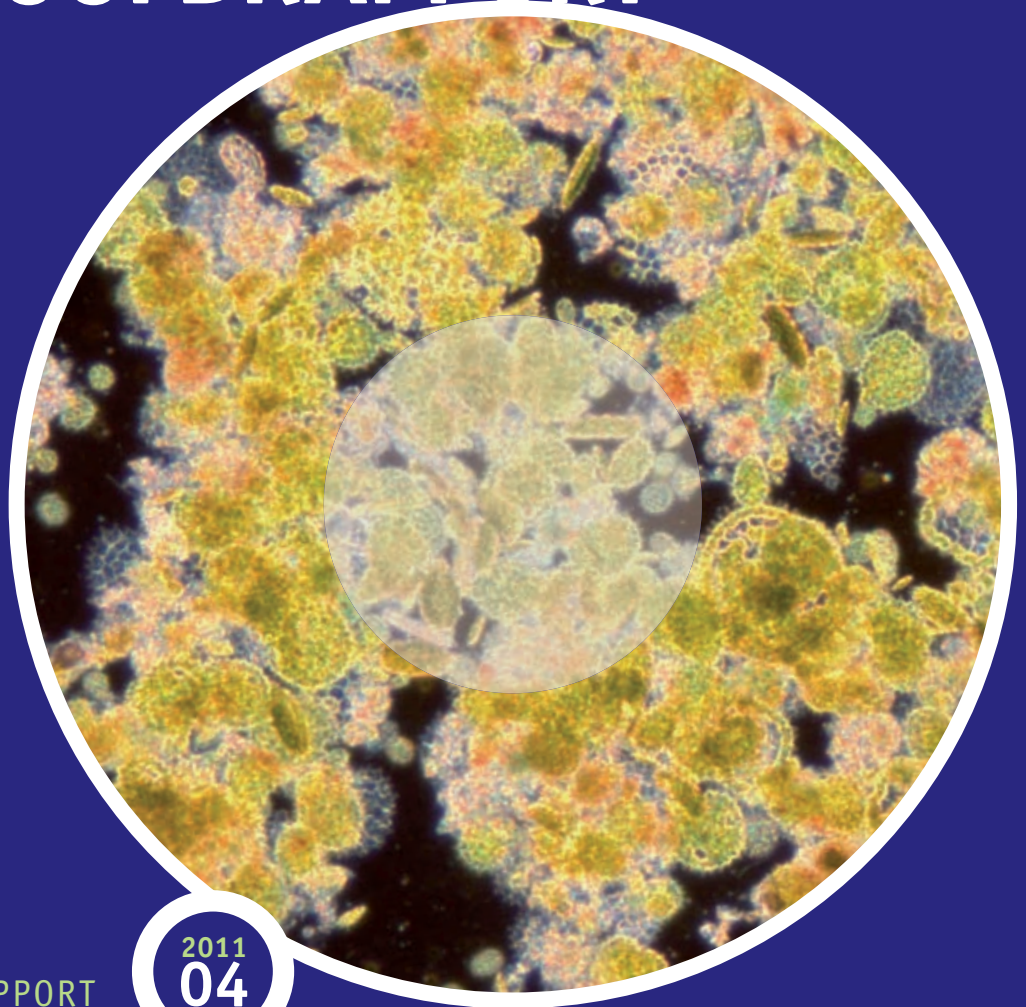


stowa

EFFLUENTPOLISHING MET ALGEN HOOFDRAPPORT



RAPPORT

2011
04

EFFLUENTPOLISHING MET ALGENTECHNOLOGIE
HOOFDRAPPORT

STOWA

2011

04

ISBN 978.90.5773.513.4



COLOFON

Amersfoort, 2011

UITGAVE STOWA, Amersfoort

COÖRDINATIE

ir. C.A. Uijterlinde, STOWA
ir. N.W. Heijkoop, DHV B.V.
ir. J.W. van Sluis, DHV B.V.

DEELSTUDIE INVENTARISATIE

ir. G. IJpelaar, Royal Haskoning B.V.
dr. ir. W.M. Wiegant, Royal Haskoning B.V.
dr. C. Bruning, Grontmij B.V.
dr. G.R. Zoutberg, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier

DEELSTUDIE MODELSTUDIE

ir. A. Otte, Tauw B.V.
ir. J.T.A. van Veldhoven, Waterschap De Dommel

DEELSTUDIE LABORATORIUMEXPERIMENTEN

drs. R.R. Jonker, Grontmij B.V.
dr. C. Bruning, Grontmij B.V.
ing. B. Hommel, Waterschap Aa en Maas

DEELSTUDIE PILOTONDERZOEK OP RWZI ALKMAAR

drs. F. Horjus, DHV B.V.
ing. M. Kerstholt, DHV B.V.
dr. G.R. Zoutberg, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
drs. D. Koot, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
ing. J. Goverde, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier

DEELSTUDIE ONTWERPMODEL

ing. T.A.E. Wijffels, Witteveen+Bos B.V.
ir. J.T.A. van Veldhoven, Waterschap De Dommel

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2011-04
ISBN 978.90.5773.513.4

MANAGEMENTSAMENVATTING

In 2009 en 2010 is door een consortium van 3 waterbeheerders en 5 ingenieursbureaus onderzoek verricht naar de mogelijkheid om met algen nutriënten uit de overloop van de nabezink-tank van een rioolwaterzuiveringsinrichting (RWZI) te verwijderen. Dit onderzoek is totstand gekomen met financiële steun van de Provincie Noord-Holland en Agentschap NL in het kader van het KRW innovatieprogramma.

Aanleiding tot dit onderzoek waren:

- Het hoge chemicaliën verbruik en de relatief hoge kosten van de gangbare nabehandelingstechnologieën (filtratietechnieken).
- De positieve verwachtingen ten aanzien van algentechnologie die op theoretische gronden en op grond van praktijkervaringen bij andere toepassingen zijn gewekt.

Een en ander is vertaald in de onderzoeksvraag: *“Hoe kan algentechnologie in de Nederlandse zuiveringssituatie, als energiezuinige en kostenefficiënte, nageschakelde maatregel voor verwijdering van stikstofverbindingen en fosfaten worden ingezet om daarmee een bijdrage te leveren aan een goede ecologische en chemische toestand van het oppervlaktewater in het jaar 2015?”*.

Het onderzoek omvatte een literatuurinventarisatie, de bouw van een mathematisch simulatiemodel, laboratoriumonderzoek naar de invloed van specifieke stoffen en omstandigheden, behandeling van het effluent van de RWZI Alkmaar in een pilotreactor, formulering van ontwerpgrondslagen en globale kostenramingen. Het onderzoek leidde tot een sterk verbeterd inzicht in de mogelijkheden van effluentpolishing met algen voor RWZI's. Het heeft de volgende concrete resultaten opgeleverd:

- Onder de Nederlandse klimatologische omstandigheden is een stabiele populatie van vlokvormende algen mogelijk, die in RWZI-effluent aanwezige stikstof- en fosfaatverbindingen effectief vastlegt in particulier materiaal.
- Met een trommelfilter kunnen de algen effectief worden afgescheiden. Daarmee beschikt men over een secundaire grondstof, met een mogelijk positieve economische waarde.
- Uit het laboratorium-onderzoek bleek dat toxische stoffen, niet-biobeschikbare fracties of limiterende niveau's van macro- of micronutriënten een effectieve verwijdering van stikstof en fosfaat niet in de weg staan.
- Het is technisch mogelijk om met een algenreactor voor effluentpolishing, bij juistgekozen dimensionering en procescondities, in het zomerhalfjaar gemiddelde restconcentraties te realiseren in de grootteorde van 2,2 mg/l totaal stikstof en 0,15 mg/l totaal fosfor.
- Door de vergaande opname van kooldioxide stijgt de pH van het behandelde effluent tot alkalische waarden (pH=11) en kan niet overal zonder meer op oppervlaktewater worden geloosd.

Ten aanzien van de financiële en planologische haalbaarheid is geconcludeerd:

- De netto behandelingskosten bedragen 0,06 à 0,21 €/m³, afhankelijk van de schaalgrootte. In deze raming zit een onzekerheidsmarge van ± 50%.
- In dit bedrag is een opbrengst voor de algen van € 350 per ton droge stof, resulterend in reductie van de netto behandelingskosten van 0,02 à € 0,03 €/m³, reeds verrekend.
- De ontvangen vergoeding voor de algen en de specifieke algenproductie per ha zijn van grote invloed op de behandelingskosten.

- De genoemde netto kosten voor effluentpolishing komen voor een vergelijkbare situatie en resultaat globaal overeen met de kosten voor een zandfilter met dosering van ijzer- of aluminiumzouten. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze vergelijking is gemaakt voor het zomerhalfjaar. In het winterhalfjaar presteert de algenvijver minder goed dan het zandfilter.
- De gemeten percentages stikstof in de algenbiomassa zijn aanzienlijk lager dan de in de literatuur gerapporteerde waarden. Gehalten van 4% N en 1% P zijn reële uitgangspunten voor een reactor voor effluentpolishing. Dit betekent dat een effectieve algenreactor meer ruimte vraagt dan waarvan aanvankelijk is uitgegaan.
- Het ruimtebeslag van een algenreactor voor polishing van huishoudelijk RWZI-effluent bedraagt circa 3,8 m² per i.e._{1,36}. Echter de spreiding in de resultaten is groot. Deze ruimte is in de nabijheid van meeste Nederlandse RWZI's waarschijnlijk niet voorhanden.

Ook is onderzocht in hoeverre verdere optimalisatie mogelijk is:

- Op theoretische gronden is maximaal een verdubbeling van de specifieke algenproductie te bereiken, onder andere door vijverdiepte en verblijftijd nog beter op elkaar af te stemmen. Dien tengevolge is een halvering van het bovengenoemde ruimtebeslag mogelijk. Door niet beheersbare omgevingsfactoren als licht, temperatuur en instabiliteiten in het proces zal deze halvering in de praktijk waarschijnlijk maar ten dele realiseerbaar zijn.
- De algen binden kooldioxide, waardoor de pH van de reactorinhoud oploopt. Onder die omstandigheden wordt fosfaat niet alleen biologisch, maar ook chemisch vastgelegd. Door kooldioxide met lucht uit de afloop van de nabezinktank te strippen, kan deze natuurlijke chemische precipitatie worden bevorderd en daarmee meer fosfaat worden verwijderd.
- De pH van het behandelde effluent bedraagt dan circa 11. Lozing hiervan hoeft niet op voorhand een bezwaar te zijn. Wanneer de licht alkalische lozing binnen de geldende voorwaarden niet mogelijk is, kan mogelijk met het eerder uitgeblazen kooldioxide in een extra wastoren na de algenvijver de pH weer worden verlaagd.

Het bovenstaande leidt tot de volgende eindconclusies:

- Effluentpolishing met algen is technisch haalbaar en effectief, maar voor Nederland geen techniek die onder alle omstandigheden toepasbaar is.
- De kosten zijn vergelijkbaar met die van zandfiltratie, maar het ruimtebeslag is voor geürbaniseerde gebieden erg groot en de nutriënten worden alleen in de zomermaanden voldoende verwijderd.
- In specifieke gevallen, met name in het landelijk gebied, kan algentechnologie niettemin een relevante optie zijn.
- De verhoogde pH van het behandelde effluent is een aandachtspunt.

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

HOOFDRAPPORT EFFLUENTPOLISHING MET ALGENTECHNOLOGIE

INHOUD

	MANAGEMENTSAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Aanpak op hoofdlijnen	2
1.5	Verantwoording	3
1.6	Leeswijzer	3
2	RESULTATEN VAN DE DEELSTUDIES	3
2.1	Inventarisatie	4
2.2	Modellering	7
2.3	Laboratoriumonderzoek	10
2.4	Pilotonderzoek Alkmaar	11
2.5	Ontwerp	15
3	DISCUSSIE	19
3.1	Opgeloste stoffen en deeltjes in het vijvereffluent	19
3.2	pH van het op oppervlaktewater te lozen effluent	19
4	CONCLUSIES	20

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

In het bereiken van de KRW-doelstellingen¹ voor een goede ecologische en chemische toestand van oppervlaktewater kunnen rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) als puntbron een belangrijke rol spelen. De RWZI's van de huidige generatie produceren in veel gevallen een effluentkwaliteit die ontoereikend is om in de nabije toekomst de gewenste kwaliteit van het oppervlaktewater te realiseren. Vooral de lozing van stikstofverbindingen en fosfaten is in vele gevallen te groot. Voor een extra emissiereductie zijn nieuwe geïntegreerde of aanvullende, nageschakelde zuiveringstechnieken noodzakelijk. Realisatie van de benodigde emissiereductie op RWZI's leidt met conventionele technieken tot hoge investeringen en (jaarlijkse) operationele kosten. De totale jaarlijkse extra kosten zijn gekwantificeerd in de range van € 850 miljoen tot € 3,2 miljard².

Zandfiltratie is de meest toegepaste techniek, die door de efficiënte verwijdering van zwevende stof de emissie van onopgeloste vormen van restvervuiling sterk reduceert. In combinatie met chemische precipitatie/flocculatie worden ook opgeloste fracties van bijvoorbeeld fosfaat vergaand verwijderd. De kosten van zandfiltratie zijn aanzienlijk, terwijl de flocculanten het effluent met extra zout en zuur belasten.

Er is daarom behoefte aan een technologie die:

- De effluentkwaliteit van RWZI's verbetert (met name verlaging van nutriëntconcentraties).
- Op korte termijn (circa 2015) geïntroduceerd kan worden.
- Goedkoper is dan beschikbare technologieën.

1.2 PROBLEEMSTELLING

Een zuiveringstechnologie op basis van algenkweek kan aan deze voorwaarden voldoen. Mogelijk is een dergelijke technologie veelbelovend voor vergaande verwijdering van N en P uit afvalwater en levert potentieel een grote kostenbesparing op. Er is echter geen ervaring met deze technologie voor de nabehandeling van afvalwater. De vraag die moet worden beantwoord is:

“Hoe kan algentechnologie in de Nederlandse zuiveringssituatie, als energiezuinige en kostenefficiënte, nageschakelde maatregel voor verwijdering van stikstofverbindingen en fosfaten worden ingezet om daarmee een bijdrage te leveren aan een goede ecologische en chemische toestand van het oppervlaktewater in het jaar 2015?”

1 KRW staat voor Kaderrichtlijn Water. Deze is in 2000 door de EU vastgesteld en moet in 2015 leiden tot het bereiken van de goede ecologische en chemische toestand van het oppervlakte- en grondwater.
2 RIZA / STOWA 2006. Quick scan kostenscenario's vergaande zuivering - KRW en RWZI. RWS RIZA / STOWA Lelystad / Utrecht 2006. STOWA rapport 2006-08.

De effecten van de Nederlandse afvalwatercondities en de klimatologische omstandigheden op de groei van algen zijn onvoldoende bekend. Onderzocht is of de gematigde groeiomstandigheden (licht, temperatuur) voldoende zijn om een algensysteem voor effluentpolishing effectief te exploiteren. Daarnaast is het van belang of er voldoende kooldioxide vanuit de lucht kan worden opgenomen of dat extra kooldioxide moet worden gedoseerd. Ook de rol van zuiveringstechnische randvoorwaarden is niet bekend. Te denken valt aan:

- De samenstelling en de verhouding van de aanwezige nutriënten en sporenelementen voor groei van algen in het te behandelen water, c.q. de aanwezigheid van eventuele groeiremmende stoffen.
- Debietfluctuaties door het verschil tussen droogweeraanvoer en regenweeraanvoer.
- De dimensioneringsgrondslagen om te komen tot een goed ontwerp, en daarmee een kostenraming, van dit zuiveringsconcept.

Een mogelijk knelpunt voor de Nederlandse situatie is dat bij vele grotere RWZI's het beschikbare terreinoppervlak voor algensystemen beperkend zal zijn. Vertaling van ontwerpgrondslagen naar een zo compact mogelijk algensysteem is daarom een belangrijk bijkomend onderzoeksthema.

1.3 DOELSTELLING

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een reactor voor vergaande verwijdering van stikstofverbindingen en fosfaten uit afvalwater door middel van algen en het onderzoeken van mogelijkheden voor een compacte configuratie.

Bij vergaande verwijdering moet worden gedacht aan bereikte restconcentraties in de grootteorde van: 2,2 mg/l totaal stikstof en 0,15 mg/l totaal fosfor. Deze waarden zijn in dit onderzoek gehanteerd als richtwaarden voor het ontwerp (zomerhalfjaar).

1.4 AANPAK OP HOOFDLIJNEN

Het onderzoek is onderverdeeld in een vijftal logische delen (deelstudies) met ieder duidelijk gedefinieerde deelresultaten. In Tabel 1 staan de deelstudies beschreven:

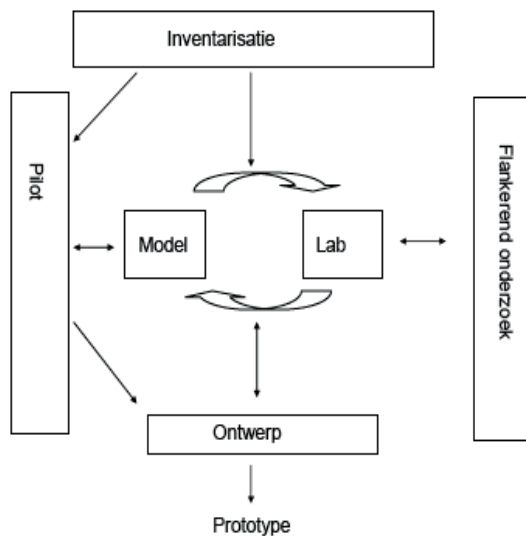
TABEL 1 OVERZICHT DEELSTUDIES, DOELEN EN RESULTATEN

Deelstudie	Doel
Inventarisatie	Vergaren van beschikbare kennis voor een efficiënte uitvoering van lab- en pilotonderzoek.
Modelstudie	Het ontwikkelen van een model voor effluentpolishing met algen en het valideren van procescondities voor algenkweek als nabehandelingstechniek
Laboratoriumexperimenten	Ontwikkelen en valideren van kennis over de procescondities voor algenkweek.
Pilotonderzoek op RWZI Alkmaar	Ontwikkelen van kennis over de prestaties van algen in een open reactor onder Nederlandse omstandigheden.
Ontwerpmodel	Vertalen van de onderzoeksresultaten naar een ontwerp van een algenreactor en opstellen ruwe kostenraming.

De deelstudies zijn aan elkaar gerelateerd zoals in Figuur 1 staat weergegeven.

FIGUUR 1

RELATIES TUSSEN DE DEELSTUDIES



Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is kennis van bijvoorbeeld de optimale groeicondities voor de algen, de gehalten stikstof en fosfaat in de biomassa en de afscheiding van de algen belangrijk. Deze onderwerpen lopen als een rode draad door de deelonderzoeken heen.

Het project “Effluentpolishing met algentechnologie” is in maart 2009 van start gegaan en kende twee fasen. De eerste fase heeft plaatsgevonden van maart 2009 tot en met september 2009. De tweede fase heeft plaatsgevonden van maart 2010 tot en met september 2010.

1.5 VERANTWOORDING

Dit onderzoek is totstand gekomen met financiële steun van de Provincie Noord-Holland en Agentschap NL in het kader van het KRW innovatieprogramma.

1.6 LEESWIJZER

De resultaten van het onderzoek zijn in de volgende twee STOWA-rapporten opgenomen:

- Hoofdrapport (STOWA 2011-04,)
- Deelstudierapporten, met de verschillende thematische rapporten (STOWA 2011-05)

Daarnaast heeft dit onderzoek geresulteerd in een ontwerpmodel voor algensystemen dat te downloaden is WWWwww.stowa.nl.

Het hoofdrapport richt zich vooral op technisch managers en bestuurders. Voor technisch specialisten en onderzoekers zijn ook de deelstudierapporten van belang. Daarin zijn uitgangspunten, werkwijze, meetdata, evaluatie en bronnen uitgebreid beschreven.

Opgemerkt wordt dat met het uitkomen van deze eindrapportages de tussenrapportage Effluentpolishing (STOWA, 2009w08) komt te vervallen.

2

RESULTATEN VAN DE DEELSTUDIES

2.1 INVENTARISATIE

ALGEMENE EIGENSCHAPPEN VAN ALGEN

Algen zijn de meest eenvoudige planten. Algen groeien op licht en CO₂ en hebben daarbij nutriënten (onder andere stikstof en fosfor) nodig. Omdat de nutriënten absoluut noodzakelijk zijn, kunnen algen gebruikt worden voor de verwijdering van nutriënten uit effluent, mits de productie van algen daarvoor voldoende is. De productie van algen, en daarmee de verwijdering van nutriënten, wordt primair bepaald door de hoeveelheid licht.

De literatuur over algen(kweek) is zeer omvangrijk. Het gaat daarbij echter vaak om onderwerpen als algenbloei in oppervlaktewater, plaats van algen in de voedselketen, morfologie van algen, algen als biobrandstof en algenproductie voor fijnchemicaliën. Over de toepassing van algen als nageschakelde zuiveringstechniek is niet veel bekend.

Het effluent van een goed functionerende rioolwaterzuiveringsinrichting (RWZI) bevat gewoonlijk rond 10 mg N_{totaal}/l en 1 mg P_{totaal}/l. Bij zulke concentraties kunnen veel algen snel groeien en worden daarbij aanzienlijke hoeveelheden stikstof en fosfaat opgenomen. Pas als de nutriëntconcentraties zijn gedaald tot zeer lage waarden (rond 0,01 mg/l) gaat afname van de groeisnelheid³ door nutriëntlimitatie een grote rol spelen. Wanneer de afloop van de nabezinktank van een RWZI door een algenreactor wordt geleid, kan dus in principe een zeer aanzienlijke verlaging van de stikstof- en fosfaatconcentraties worden bereikt. Daarvoor is wel vereist dat ook andere groeicondities – licht, temperatuur en overige nutriënten - gunstig zijn voor het bereiken van hoge groeisnelheden en dat geen toxische of groeiremmende stoffen aanwezig zijn.

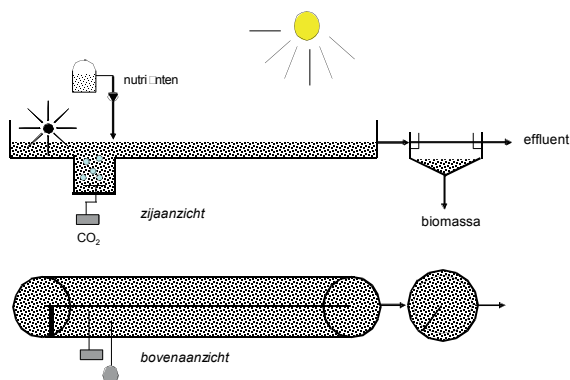
KWEEKSYSTEMEN

Om algen te kweken zijn er verschillende systemen beschikbaar. In tegenstelling tot een open systeem heeft een gesloten systeem als groot voordeel dat de condities voor het groeien van algen instelbaar en beheersbaar zijn. Daartegenover staat dat een open systeem goedkoop in aanleg en onderhoud is. In dit onderzoek is gekozen voor een open systeem (algenvijver) voor de verwijdering van stikstof en fosfaat uit RWZI-effluent.

³ Relatieve toenamesnelheid van biomassa

FIGUUR 2

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN ALGENVIJVER/OPEN KWEEKSYSTEEM MET BEZINKINGSEENHEID
(N.B. BIJ EFFLUENTNABEHANDELING WORDEN GEEN NUTRIËNTEN GEDOSEERD EN IS TOEVOEGING VAN KOOLDIOXIDE OPTIONEEL)



Algen en het gezuiverde effluent stromen na een verblijftijd van enige dagen de vijver uit. De algen in het vijvereffluent, met daarin de verwijderde nutriënten, zullen vervolgens verwijderd, c.q. geogost worden. Deze biomassa kan voor diverse doeleinden worden toegepast, bijvoorbeeld als grondstof voor vergisting of – na opwerking – als meststof.

In een open systeem is het niet voorspelbaar welke soort alg dominant is of gaat worden. De kans is groot dat een geënte algensoort weggeconcentreerd wordt door een andere, meer aan de omstandigheden aangepaste algensoorten⁴. Dit wordt nog versterkt doordat de condities voor algen om te groeien niet constant zijn. Het resultaat is een gemengde, zich voortdurend aanpassende populatie van algen, bacteriën, protozoën en – in beperkte mate – macrofauna.

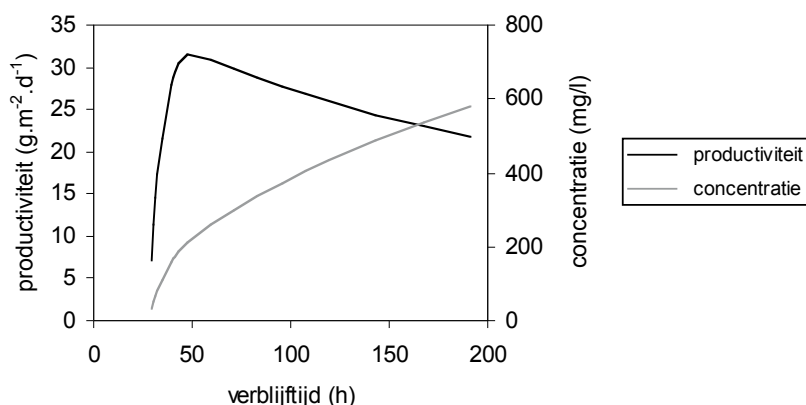
ALGENGROEI

De biomassaopbrengst aan algen is te beschrijven met een eenvoudig groeimodel. In dit groeimodel is zowel licht- als nutriëntlimitatie opgenomen. Uit modelsimulaties volgt dat de opbrengst aan algen in Nederland sterk afhankelijk is van het seizoen. De te verwachten concentraties aan algen worden bepaald door de lichthoeveelheid, de waterdiepte en de verblijftijd. Zie Figuur 3. Aan de hand hiervan zijn algemene richtlijnen geformuleerd voor het ontwerpen van een algenvijver.

Opbrengsten van meer dan 30 tot zelfs 60 g ds.m².d¹ worden soms gerapporteerd voor de zomerperiode, maar waarden van 15 tot 25 g ds.m².d¹ zijn normaal als jaargemiddelde onder Nederlandse condities. Bij een energie-efficiëntie van de fotosynthese van circa 20% zou theoretisch de maximale opbrengst circa 50 tot 70 g ds.m².d¹ bedragen. Met sommige soorten algen zou deze waarde bijna gerealiseerd zijn.

⁴ Het Aquatic Species Program van het US Department of Energy concludeert: “An important lesson from the outdoor testing of algae production systems is the inability to maintain laboratory organisms in the field. Algal species that looked very promising when tested in the laboratory were not robust under conditions encountered in the field. In fact, the best approach for successful cultivation of a consistent species of algae was to allow a contaminant native to the area to take over the ponds.”

FIGUUR 3 BEREKENDE PRODUCTIVITEIT EN BIOMASSACONCENTRATIE VOOR EEN 30 CM DIEPE, LICHTGELIMITEERDE ALGENVIJVER IN DE MAAND MEI ALS FUNCTIE VAN DE VERBLIJFTIJD IN DE ALGENVIJVER. DE DALING VAN DE PRODUCTIVITEIT BIJ HRT > 50 H IS HET GEVOLG VAN DE GROTE INVLOED VAN DE RESPIRATIE⁵



VERKENNING ALGENDICHTHEID, NUTRIËNTVERWIJDERING EN VEREIST VIJVEROPPERVLAK

In dit onderzoek zijn tevens de grenzen van algendichtheid, nutriëntverwijdering en vereist vijveroppervlak verkend, zoals die zijn af te leiden uit fysiologische karakteristieken van algen. Er is een aanzet gegeven voor optimalisatie van de werking van algenvijvers, alsmede suggesties die kunnen leiden tot een verminderd ruimtebeslag.

Onder de Nederlandse lichtcondities is de productie van algen sterk afhankelijk van het seizoen. In de zomer wordt de maximale productie bereikt, en die bedraagt circa 12 g ds.m².d⁻¹. In de winter daalt deze productie tot maximaal circa 1 tot 2 g ds.m².d⁻¹. In de praktijk zal de groeisnelheid van de algen zo ver dalen, dat er bij een verblijftijd van enkele dagen praktisch geen productie meer kan worden gerealiseerd. Nutriëntverwijdering met algen is dus alleen een het zomerhalfjaar te realiseren. Daarbuiten is de verwijdering te laag.

TABEL 2

STIKSTOF- EN FOSFAATGEHALTEN VAN ALGEN, UITGEDRUKT IN % DROOGGEWICHT (LITERATUURGEGEVENS)

Groeiconditie	Interne P	Interne N
P-limitatie	0,2 - 0,4%	10 - 12%
Optimaal	1,0 - 1,2%	7 - 8,5%
N-limitatie	2 - 3%	3%

Bij 7-8,5% stikstof in de algen kan maximaal circa 1 g.m².d⁻¹ stikstof in de biomassa worden vastgelegd. Een gehalte van circa 1% P betekent dat circa 0,15 g.m².d⁻¹ fosfor kan worden verwijderd in een algenvijver. Onder sommige condities kunnen algen meer P bevatten, en zal de verwijdering hoger kunnen zijn. Belangrijk voor het bedrijven van een algenvijver is dat wordt gestreefd naar lichtlimitatie in plaats van nutriëntlimitatie, omdat dan de algenproductie en daarmee de verwijdering per vierkante meter het hoogst is. Op deze wijze kunnen in beginsel zeer lage gehalten stikstof en fosfaat worden gerealiseerd.

Methodieken voor afscheiden van de algen uit het water zijn in de literatuurinventarisatie alleen verkennend onderzocht. Het oogsten kan op vele manieren plaatsvinden, zoals chemische flocculatie of autoflocculatie, bezinking, filtratie, flotatie, centrifugeren en ultrasone aggregatie. Al deze oogsttechnieken hebben specifieke voor- en nadelen. Centrifugeren wordt in de literatuur beschouwd als de meest betrouwbare, maar ook de meest energieverbruikende techniek.

⁵ mate waarin de biomassa zichzelf verteert om in leven te blijven

PRAKTISCHE CONSEQUENTIES VOOR HET ONTWERP

De genoemde theoretische verkenning heeft praktische consequenties voor het ontwerp van een compacte, optimaal functionerende algenreactor voor effluentpolishing:

- De verblijftijd van de vijvers kent een optimale waarde, waarbij de maximale verwijderingscapaciteit wordt bereikt. Zowel bij te lange als te korte verblijftijd daalt de nutriëntverwijdering per ha. De afmetingen van de vijver dienen daarom zodanig gekozen te worden, dat ook bij geringe effluentaanvoer de verblijftijd optimaal gehouden kan worden.
- De keuze van het vijveroppervlak wordt gebaseerd op de droogweeraanvoer (DWA) van de zuiveringsinstallatie. Bij aanvoer van méér effluent kan dit beter buiten de vijver om worden geloosd, of naar een alternatieve nazuivering worden geleid. Daarvoor is een bypass nodig.
- Een andere reden voor een bypass is het voorkómen dat bij hoge aanvoer van RWZI-effluent de algenpopulatie grotendeels uitspoelt en de vijver na een aanvoerpiek enige tijd slecht zou functioneren.
- Belangrijk voor het bedrijf van een algenvijver is, dat wordt gestreefd naar lichtlimitatie (in plaats van nutriëntlimitatie) omdat dan de verwijdering per vierkante meter het hoogst is.
- Deeltjes en gekleurde stoffen in het effluent nemen licht op en verminderen daardoor algengroei en zuiveringscapaciteit. Dit effect is te beperken door de vijver zo ondiep mogelijk uit te voeren.
- In te ondiepe vijvers kan echter de nutriëntaanvoer bij de optimale verblijftijd lager worden dan de nutriëntverwijderingscapaciteit. De vijver gaat dan minder presteren als gevolg van nutriëntlimitatie.
- Vijvers met steile oevers kunnen ondieper uitgevoerd worden, en daardoor effectiever nutriënten verwijderen dan vijvers met flauwe taluds.
- Aan het in bedrijf nemen van een algenvijver gaat dus een optimalisatiefase vooraf waarin optimale verblijftijd en minimaal mogelijke vijverdiepte worden vastgesteld.

2.2 MODELLERING

MODELBSCHRIJVING

Op grond van uit de literatuur bekende kwantitatieve procesbeschrijvingen en parameterwaarden is een mathematisch model gemaakt waarmee de algengroei gesimuleerd kan worden. Met dit model zijn scenario's doorgerekend om te bepalen onder welke omstandigheden de algen de meeste nutriënten uit het water verwijderen.

Het model is gebouwd in Duflow. Het berekent de algenconcentraties dynamisch, in korte tijdstappen, op basis van de temperatuur, de hoeveelheid licht onder water en de nutriëntenconcentraties. Het lichtklimaat onder water wordt beïnvloed door de achtergronduitdoving van licht van het water en de concentratie algen in het water en de gemeten lichtinstraling. Door de maatgevende kenmerken van het kweekstelsel, diepte en verblijftijd, te variëren zijn de meest geschikte waarden voor de operationele parameters van het kweekstelsel bepaald.

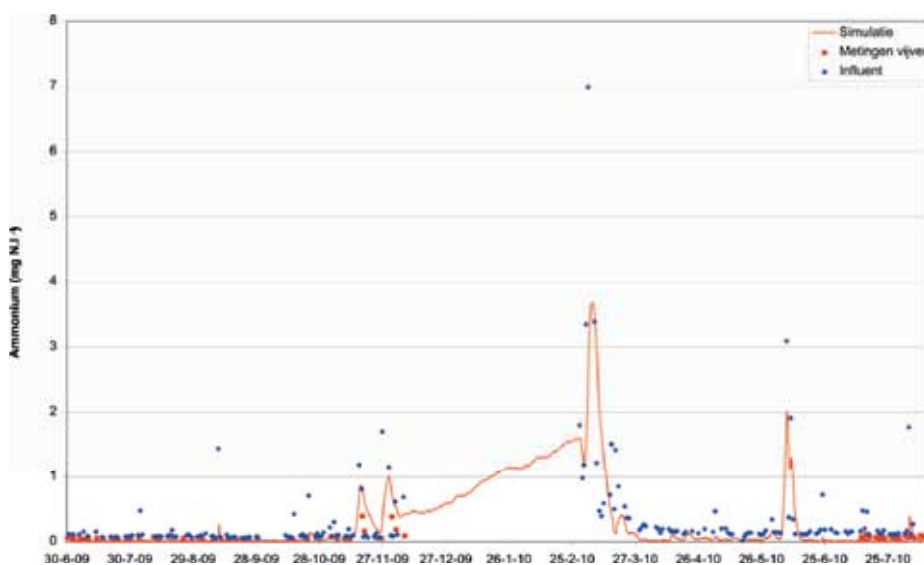
De dimensies van de proefvijvers die zijn aangelegd bij RWZI Alkmaar zijn in het Duflow-model ingevoerd. Het model is gecalibreerd aan de hand van de waarnemingen uit het pilotonderzoek in augustus 2009. In 2010 is de calibratie herhaald. Dit heeft niet geleid tot bijstelling van de parameters. De resultaten van het model komen overeen met de bevindingen van de pilotexperimenten. De effecten van verandering van de verblijftijd op algengroei

en nutriëntenconcentraties komen bij de gebruikelijke samenstelling van RWZI-effluent (stikstofgehalten tot maximaal 10 mg/l) goed overeen met de pilotresultaten.

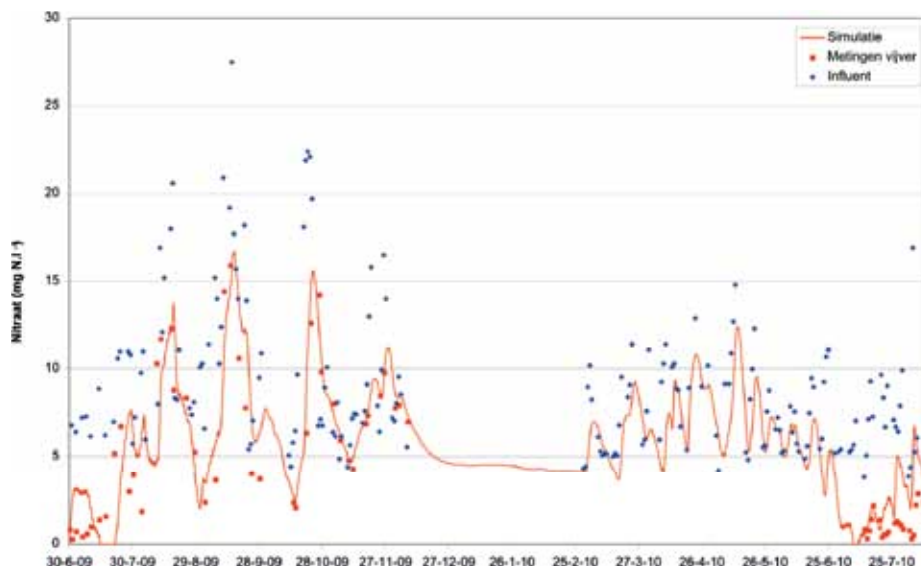
Uiteindelijk is de meetperiode van juli 2009 tot en met juli 2010 integraal met het model doorgerekend. In Figuur 4 tot en met Figuur 7 zijn in de afloop van deze vijvers gemeten en de gesimuleerde concentraties van ammonium- en nitraatstikstof, van orthofosfaat en van algenbiomassa weergegeven.

In de figuren is terug te zien wanneer het inkomende debiet in de algenvijver sterk toenam (vanaf 29-08-2009). Deze toename had een afname van de algenconcentratie tot gevolg, omdat de groei van de algen de uitspoeling niet kon compenseren. Hierdoor namen ook de concentraties van nutriënten toe.

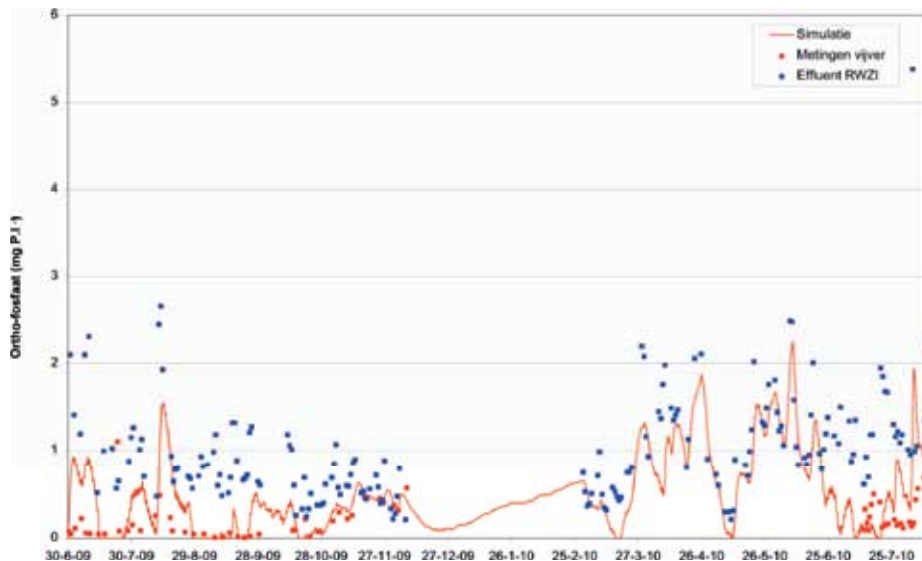
FIGUUR 4 GEMETEN EN GESIMULEERDE CONCENTRATIES VAN AMMONIUM



FIGUUR 5 GEMETEN EN GESIMULEERDE CONCENTRATIES VAN NITRAAT



FIGUUR 6 GESIMULEERDE EN GEMETEN CONCENTRATIES VAN ORTHOFOSFAAT



FIGUUR 7 GESIMULEERDE EN GEMETEN CONCENTRATIES VAN ALGEN



RESULTATEN VAN HET SCENARIO-ONDERZOEK

Voor de onderzoeksvijvers is in 2009 een aantal scenario's met variërende waterdiepten en verblijftijden doorgerekend. Het effect op de zomergemiddelde concentraties van opgeloste stikstof en fosfaat in het water dat de vijver verlaat is bepaald. Op grond van deze resultaten zijn de optimale diepte en verblijftijd voor het behalen van de gewenste concentraties gekozen.

In 2010 zijn opnieuw scenario's doorgerekend om de effecten van diepte, verblijftijd en nutriëntenbelasting te bepalen. Tevens is de groeisnelheid van algen als resultante van variaties in deze parameters bepaald. Deze gegevens zijn gebruikt voor de ontwikkeling van de rekenmodule voor het ontwerp van een pilotinstallatie op praktijkschaal (zie deelstudie ontwerp).

Voor de inhoudelijke beschrijving van het model wordt verwezen naar het betreffende deelstudierapport.

CONCLUSIES

De belangrijkste stuurvariabele voor de verwijdering van nutriënten is de verblijftijd in de vijver. Omdat een zo hoog mogelijke verwijdering op een zo klein mogelijk oppervlak bereikt moet worden, moet gezocht worden naar een zo optimaal mogelijke verwijdering c.q. algenproductie bij een zo hoog mogelijke oppervlaktebelasting (uitgedrukt in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ oftewel $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$). De optimale algenproductie ligt (uiteraard binnen de grenzen van de doorgerkende scenario's) tussen 0,10 en 0,20 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ en een verblijftijd van 2,5 dagen of meer. Bij deze oppervlaktebelasting en verblijftijden worden fosfaatverwijderingspercentages van tussen 80 % en 100 % bereikt. Het is de vraag of een dergelijke hoge nutriëntverwijdering in de praktijk nodig is, omdat het gewenste verwijderingspercentage afhangt van de influentconcentraties en de effluenteisen.

Bij een oppervlaktebelasting tussen 0,10 en 0,20 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ is de algenproductie optimaal bij een vijverdiepte van tussen 40 en 60 cm. De verblijftijd bedraagt dan 3 à 4 dagen. De netto algenproductie in juli ligt tussen 12 en 18 $\text{g ds} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. De specifieke productie ligt hierbij tussen 7 en 11 $\text{mg ds} \cdot \text{Wh}^{-1}$.

2.3 LABORATORIUMONDERZOEK

Het in 2009 verrichte laboratoriumonderzoek was gericht op het identificeren van eventuele beperkingen en het bepalen van optimale condities en voor nabehandeling van RWZI-effluent in algenvijvers. Beperkingen van de mogelijkheden van nutriëntverwijdering met algen zouden kunnen zijn: groeiremmende stoffen, niet biologisch beschikbare stikstof- en fosfaatverbindingen of te lage concentraties van voor algengroei noodzakelijke voedingsstoffen in het effluent van de RWZI Alkmaar. Uit het uitgevoerde onderzoek is gebleken dat het functioneren van de algenvijvers niet in belangrijke mate door bovengenoemde hindernissen wordt beperkt.

Voor het optimaliseren van de nutriëntverwijdering kan kennis van de voor de algen groei-limiterende factor van belang zijn. Reden daarvoor is dat de groei-limiterende factor het nutriëntgehalte van algen en de algenproductie, en daarmee de nutriëntverwijderingscapaciteit van een algenvijver, beïnvloedt (vergelijk Tabel 2). De uitgevoerde groei-limitatietests hebben laten zien dat stikstof, fosfaat en de overige nutriënten in de afloop van de nabezink-tank niet groei-limiterend waren voor de algen.

Om een selectie op grote, goed oogstbare algen op gang te brengen werd in 2009 in een van de proefvijvers een deel van de algenoogst teruggevoerd. Uit de nutriëntlimitatietests komen aanwijzingen dat hiermee ook geselecteerd wordt op langzaam groeiende algen. Dat zou mogelijk de nutriëntverwijderingscapaciteit van de vijver kunnen verlagen.

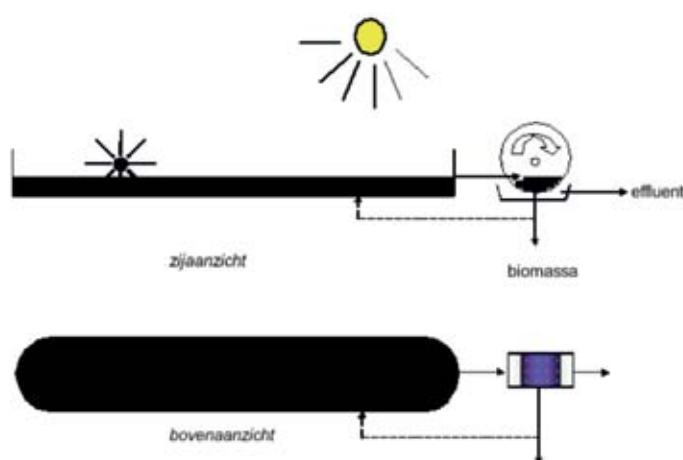
2.4 PILOTONDERZOEK ALKMAAR

INLEIDING

Op de RWZI Alkmaar vonden in 2009 en 2010 twee achtereenvolgende pilotonderzoeken plaats. De diepte van de bassins is gevarieerd tussen de 20 en 50 cm. Het oppervlakte bedroeg 112,5 m² per bassin. In 2009 werden de modelparameters geverifieerd en is het effect van retentie van algen onderzocht. Dit laatste is daarbij geen aantrekkelijke optie gebleken (het is niet strikt nodig, maar brengt wel het risico met zich mee dat verkeerde, langzaam groeiende algensoorten worden bevoordeeld). Op basis van de uitkomsten uit het pilotonderzoek 2009, de literatuur, lab- en modelstudie zijn de doelstellingen voor 2010 geformuleerd. Belangrijkste aandachtspunten waren de diepte en de verblijftijd in de algenbassins en de praktische uitvoering van de algenverwijdering.

FIGUUR 8

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE PILOTREACTOR



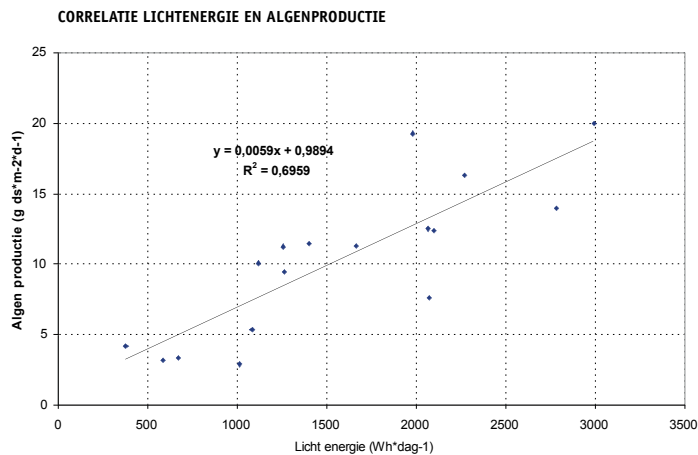
In 2010 is aandacht besteed aan het dag-/nachtritme van de algengroei, optimalisatie van de opname van stikstof en fosfaat door de algen, verbetering van de afscheiding van algen op het trommelfilter en onderzoek naar de mogelijkheden van een nabezinktank voor de verwijdering van algen uit het effluent. Daarnaast is chemische fosfaatverwijdering in relatie met de door de algengroei veroorzaakte pH-stijging nader onderzocht.

De uitkomsten van het pilotonderzoek zijn gebruikt als input voor de theoretische beschouwing en de procesmodellering en voor het ontwerpmodel voor het bepalen van de financiële haalbaarheid van een praktijkschaal algenzuivering.

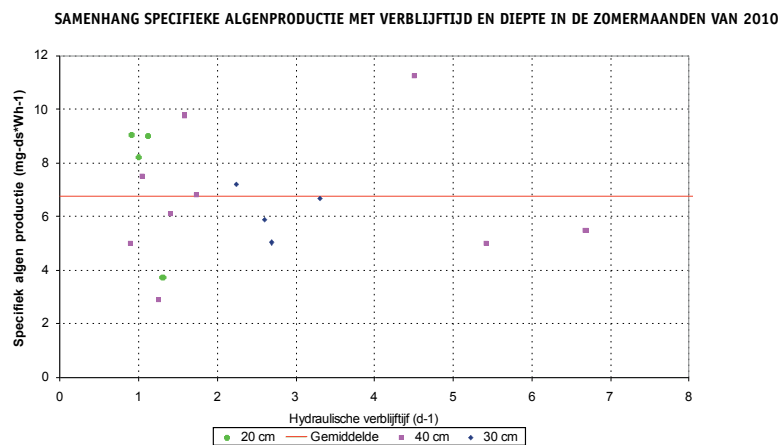
ALGENPRODUCTIE

De algenproductie is onder Nederlandse condities lichtgelimiteerd. Dit is duidelijk te zien in de correlatie tussen lichtinstraling en algenproductie (zie Figuur 9). Er is weliswaar enige invloed waargenomen van diepte op de algenproductie, maar het in de literatuur aangegeven optimum van verblijftijd en diepte (zie deelstudie inventarisatie) is onder de geteste condities niet terug te vinden in de resultaten (zie Figuur 10). Deze specifieke verbanden worden door het pilotonderzoek niet weerlegd, maar ze zijn door het beperkte aantal meetpunten en de spreiding van de meetwaarden in de uitkomsten niet als zodanig herkenbaar. Andere parameters lijken geen bepalende invloed uit te oefenen op de algenproductie.

FIGUUR 9



FIGUUR 10



Omdat licht als enige factor een significante invloed heeft op de algenproductie, is de specifieke gemiddelde algenproductie gebruikt om de algenproductie over de gehele pilotperiode voor beide bassins te bepalen. Op grond van de pilotresultaten in de maanden juli tot en met oktober 2010 is voorgesteld om voor de dimensionering van effluentpolishing met algen op praktijkschaal voor de specifieke algenproductie een waarde van 7,5 mg droge stof per wattuur te hanteren (zie Figuur 10). Een gemiddelde specifieke algenproductie van 7,5 mg ds.Wh⁻¹ PAR⁶ komt onder Nederlandse omstandigheden (met een beschikbare zonne-energie van 490 kWh PAR⁶*m⁻²*jaar⁻¹) overeen met een totale jaarlijkse algenproductie van 36,5 ton ds per hectare. Deze waarde ligt circa 20% boven het veelal gehanteerde productie van 30 ton ds per hectare per jaar (zie deelstudierapport Inventarisatie) en geeft aan dat de groeiomstandigheden voor de algen tijdens de looptijd van het pilotexperiment nagenoeg optimaal zijn geweest.

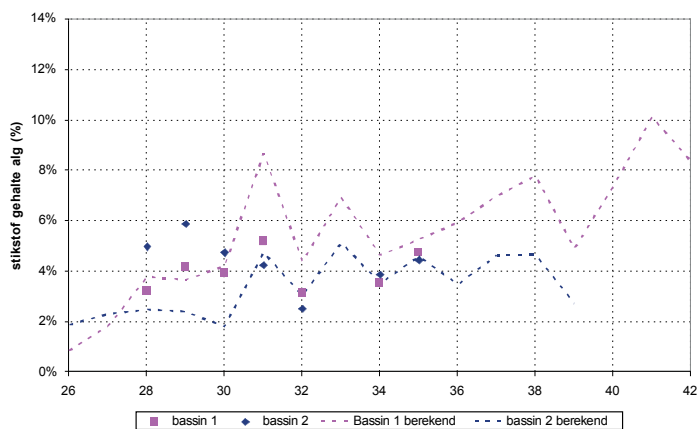
STIKSTOFVERWIJDERING

Stikstofverbindingen, inclusief opgeloste organisch gebonden stikstof, worden vergaand door de algen opgenomen. Ammonium wordt volledig geoxideerd of opgenomen; de concentratie nitraatstikstof in het vijvereffluent varieert tussen 0 en 2 mg/l (zie ook figuren uit rapportage Pilotonderzoek Alkmaar).

6 Photosynthetically Active Radiation (PAR) is de frequentie van 400 tot 700 nanometer binnen het lichtspectrum, welke organismen kunnen benutten voor fotosynthese.

Gebleken is dat wanneer condities worden bereikt waarbij de stikstofconcentratie in het vijvereffluent rond de richtwaarde van 2,2 mg N/l ligt, gerekend moet worden met een stikstofgehalte in de algenbiomassa van circa 4%. Zie Figuur 11.

FIGUUR 11 GEMETEN EN BEREKENDE STIKSTOFGEHALTES ALGEN IN 2010 (WEEK 26-42)



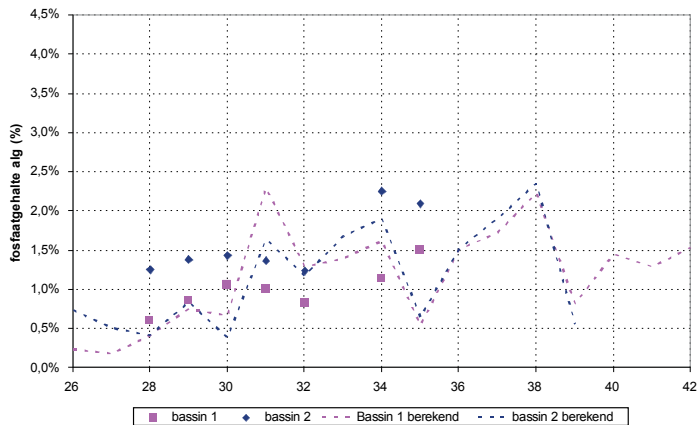
Deze waarde ligt veel lager dan de 8 – 12% die wordt genoemd in de literatuur (zie ook Tabel 2). Dit betekent dat de stikstofverwijderingscapaciteit per hectare bij effluentpolishing met algen sterk afneemt wanneer moet worden voldaan aan de gekozen richtwaarde voor de effluentkwaliteit. Daarom is voorgesteld om een stikstofgehalte van 4% op te nemen in het ontwerpmodel voor effluentpolishing met algen op praktijkschaal.

FOSFAATVERWIJDERING

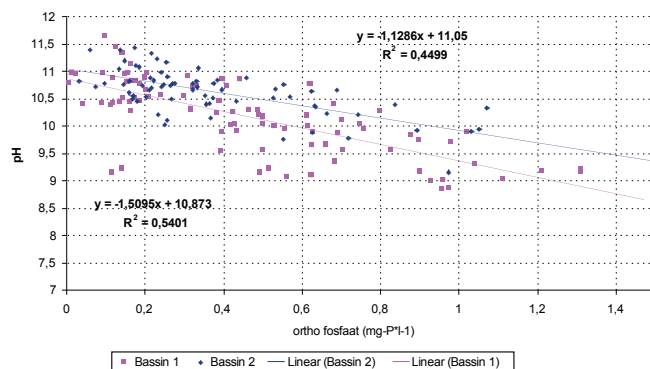
Het gemiddelde fosfaatgehalte van de algenbiomassa lag over de gehele periode rond 1%. Zie Figuur 12. Deze waarde komt overeen met de uitkomst van de literatuurstudie (zie Tabel 2). Het fosfaatgehalte in de algen bleek sterk gecorreleerd aan de influentvracht fosfaat, maar niet aan de effluentconcentratie fosfaat. Dit betekent dat de algen onder de aangehouden testcondities nagenoeg alle aangeboden fosfaat konden verwijderen. Het fosfaatgehalte in de algen bleek onafhankelijk van de lichtomstandigheden. Dit duidt erop dat niet een lichtgeïnduceerd biologisch proces verantwoordelijk is voor de extra fosfaatverwijderingscapaciteit. Geconcludeerd is dat de extra fosfaatverwijdering het gevolg is van chemische precipitatie wat optreedt bij een hoge pH. In algenvijvers is de pH relatief hoog omdat algen CO₂ opnemen.

In Figuur 13 is de effluentconcentratie orthofosfaat van beide bassins uitgezet tegen de daggemiddelde pH. Er blijkt een goede correlatie te zijn tussen de effluentconcentratie orthofosfaat en pH. Omdat de fosfaatconcentratie in het vijvereffluent voornamelijk bepaald wordt door de pH, is voorgesteld om, wanneer P-verwijdering doorslaggevend is, effluentpolishing met algen op praktijkschaal te ontwerpen op een daggemiddelde pH van 11.

FIGUUR 12 GEMETEN EN BEREKENDE FOSFAATGEHALTES ALGEN IN 2010 (WEEK 26-42)



FIGUUR 13 CORRELATIE GEMIDDELTE DAG-PH EN EFFLUENTCONCENTRATIE ORTHOFOSFAAT



Uit Figuur 13 kan verder worden opgemaakt dat een effluentconcentratie orthofosfaat van 0,15 mg/l P gehaald kan worden wanneer de daggemiddelde pH rond 11 ligt. Bij deze pH wordt fosfaat chemisch gebonden tot een onoplosbare neerslag. Deze pH kan door de activiteit van de algen zelf worden gegenereerd, wanneer er het aanwezige kooldioxide vergaand door de algen wordt opgenomen.

Door middel van een stripper kan een eventuele overmaat kooldioxide uit het RWZI-effluent worden verwijderd. Dit is niet altijd noodzakelijk. Bij veel licht wordt pH 11 spontaan bereikt en heeft een stripper geen invloed, maar bij minder zonlicht is een duidelijk effect van de stripper waargenomen. Ook bij overbelasting van het algenbassin door een verhoogd debiet kan van een stripper een positief effect worden verwacht.

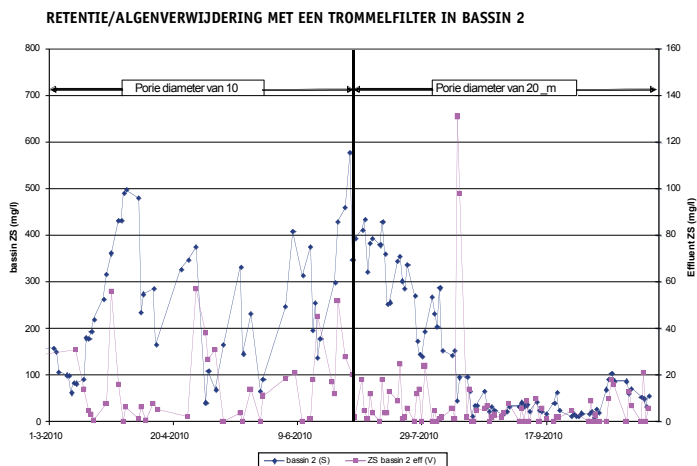
Voorgesteld wordt om algenvijvers waarbij fosfaatverwijdering doorslaggevend is uit te voeren met een striptoren in de aanvoer. In paragraaf 3.2 is ingegaan op de eventuele gevolgen van het lozen van nabehandeld effluent met een pH van 11 op het oppervlaktewater.

ALGENVERWIJDERING

Voor de afscheiding van de algen uit de afloop van de vijver komen in beginsel nabezinktanks of trommelfilters in aanmerking. Toepassing van een nabezinktank bleek voor verwijderen van algen uit de waterfase niet te werken door het opdrijven van algen bij dagen met meer zonlicht. Optimalisatie zou kunnen worden bereikt door voor de nabezinktank een cascade of intensieve mengunit te plaatsen, waardoor de geproduceerde zuurstofbellen uit de algenvlok worden verwijderd, maar dit is weinig aantrekkelijk.

Aansluitend aan de onderzoeksperiode in 2009 is wel het toepassen van de trommelfilter doorgezet. De poriegrootte van het gebruikte filterdoek was in 2009 40 μm . Bij dit filterdoek werden te hoge concentraties zwevende stof in het effluent gemeten, waardoor niet aan de norm van 20 mg/l zwevende stof (ZS) wordt voldaan. Daarom is er in 2010 gekozen voor filterdoeken met een kleinere poriegrootte. Er is gewerkt met twee verschillende filterdoeken met poriegroottes van respectievelijk 10 μm en 20 μm . In Figuur 14 zijn de metingen zwevende stof van bassin 2 en van het effluent van bassin 2 weergegeven.

FIGUUR 14



Tijdens de eerste periode, waarbij het filterdoek van 10 μm is gebruikt, traden veel pieken in het gehalte zwevende stof op. Dit is veroorzaakt door technische mankementen in het trommelfilter, die uiteindelijk zijn opgelost. Vanaf begin augustus 2010 heeft het trommelfilter goed gefunctioneerd. Bij ingaande algenconcentratie van > 100 mg/l variëren de concentraties zwevende stof in de afloop van het trommelfilter tussen de 0 en 20 mg/l droge stof (ds). Bij lagere algenconcentratie ligt de effluentconcentratie tussen 0 en 10 mg/l ds, met een gemiddelde van 3,3 mg/l ds (zwevende stof).

Bij goed functioneren van het trommelfilter lijken beide poriediameters 10 en 20 μm voldoende om de richtwaarde van maximaal 20 mg/l ds te halen. Het trommelfilter is daarmee een goede techniek om bij effluentpolishing de algen uit de waterfase af te scheiden. Voorgesteld is om een trommelfilter met een filterdoek van 20 μm op te nemen in het ontwerp voor effluentpolishing met algen op praktijkschaal. Zie paragraaf 3.1 voor een evaluatie van de te bereiken stikstof- en fosfaatgehaltenes.

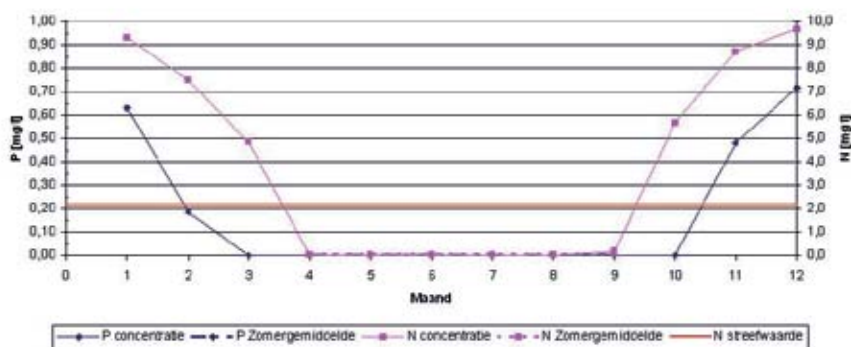
2.5 ONTWERP

Op basis van uitgangspunten die gebaseerd zijn op beschikbare theorie, een dynamisch model, pilot- en labonderzoek, is een ontwerpmodel opgesteld (te downloaden op www.stowa.nl). Met dit model is het mogelijk om het benodigde oppervlakte en de investerings- en exploitatiekosten te berekenen van een praktijkinstallatie voor effluentpolishing met behulp van algen. Tevens is dit model in staat om een prognose te maken van de jaargemiddelde effluentkwaliteit (zie Figuur 15). De jaargemiddelde effluentkwaliteit is overigens afhankelijk van een groot aantal specifieke omgevingsfactoren, die niet allemaal in dit ontwerpinstrument voor algemeen gebruik verwerkt zijn.

De belangrijkste uitgangspunten voor de kostenramingen zijn:

- evaluatie van een volledig kalenderjaar met maandgemiddelde waarden voor lichtintensiteit en temperatuur;
- ingangconcentratie van de algenvijver $10 \text{ mg.l}^{-1} \text{ N}_{\text{totaal}}$ en $1 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}_{\text{totaal}}$;
- maximale wateraanvoer $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{i.e.}_{136}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$;
- twee scenario's: een RWZI met een biologische verwerkingscapaciteit van $20.000 \text{ i.e.}_{136}$ en een RWZI met $100.000 \text{ i.e.}_{136}$;
- de afloop van de nabezinktanks wordt direct in de algenvijvers geleid;
- geen dosering, noch actieve verwijdering van CO_2 of pH-correctie;
- de vijvers zijn uitgevoerd als een omloopreactor met een diepte van 40 cm en voorzien van menging om te voorkomen dat algen bezinken;
- de algen worden van het gezuiverde water gescheiden door middel van een trommelfilter zonder dosering van polyelectrolyt. Afgescheiden algen worden opgeslagen in een gekoelde buffer;
- grondkosten op basis van huur of pacht.

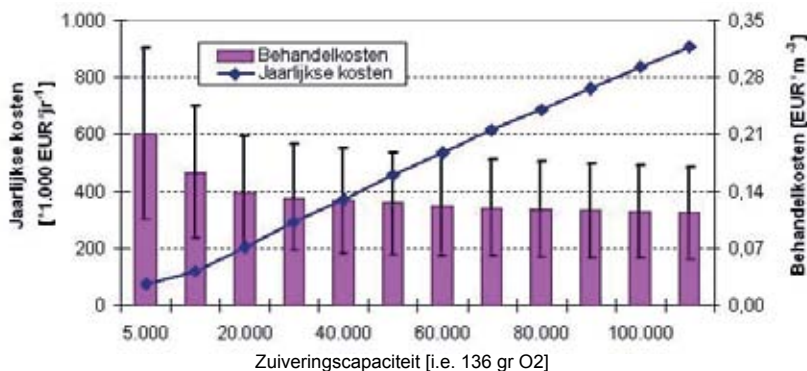
FIGUUR 15 JAARVERLOOP EFFLUENTCONCENTRATIES VOLGENS HET ONTWERPMODEL. VAN APRIL TOT OKTOBER WORDT AAN DE RICHTWAARDEN VOOR DE EFFLUENTKWALITEIT VOLDAAN



Uit de modelresultaten blijkt dat het bij de aangehouden uitgangspunten mogelijk is om in de zomer effluent na te behandelen tot de richtwaarden voor specifieke behandelingskosten in de range van $0,07$ à $0,21 \text{ € per m}^3$ bij een installatie voor $20.000 \text{ i.e.}_{136}$ en $0,06$ à $0,17 \text{ € per m}^3$ voor $100.000 \text{ i.e.}_{136}$. Voor alle kosten is een onzekerheidsmarge van $\pm 50\%$ aangehouden. Bij deze uitgangspunten leidt schaalvergroting tot een lichte daling van de behandelingskosten van gemiddeld $0,14$ naar $0,12 \text{ € per m}^3$.

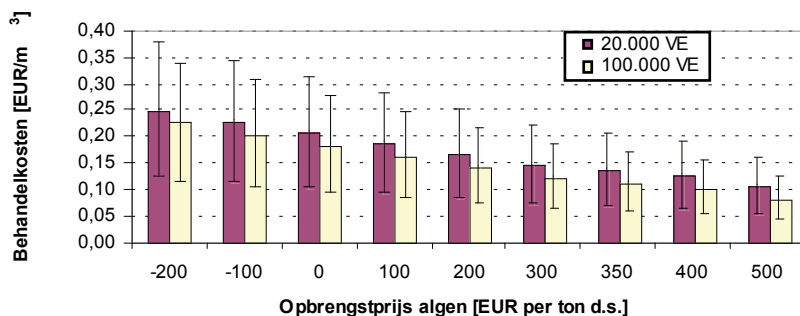
Het benodigde oppervlakte voor respectievelijk $20.000 \text{ i.e.}_{136}$ en $100.000 \text{ i.e.}_{136}$ bedraagt met de gekozen uitgangspunten $7,7 \text{ ha}$ en $38,3 \text{ ha}$. ($3,8 \text{ m}^2 \text{ per i.e.}_{136}$). Hierbij is stikstof de maatgevende en oppervlaktebepalende parameter. De bijbehorende totale investeringskosten bedragen voor $20.000 \text{ i.e.}_{136}$ en $100.000 \text{ i.e.}_{136}$ $\text{€ } 1.900.000$ en $\text{€ } 8.300.000$. De specifieke investeringskosten bedragen daarmee 249.000 en $216.000 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$. De totale jaarlijkse kosten voor installaties van deze grootte bedragen bij de gehanteerde uitgangspunten $\text{€ } 202.000$ en $\text{€ } 836.000$.

FIGUUR 16 INVLOED VAN DE SCHAALGROOOTE OP EXPLOITATIE- EN BEHANDELKOSTEN



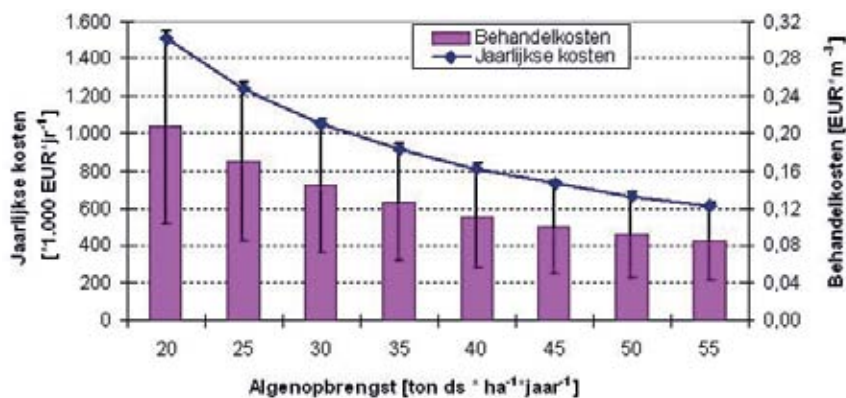
De exploitatiekosten worden wel in sterke mate bepaald door de opbrengstprijs van algen. De opbrengstprijs van algen is op zijn beurt weer afhankelijk van de kwaliteit en daarmee afzetmarkt van de algen. Een toename van de opbrengstprijs van algen van -200 € per ton ds (=kosten) naar 500 € per ton ds leidt tot meer dan een halvering van de behandelkosten per m³ effluent (zie Figuur 17).

FIGUUR 17 AFHANKELIJKHEID KOSTPRIJS VAN OPBRENGSTPRIJS



Verhoging van de algenopbrengst van 20 ton ds ha⁻¹.jaar⁻¹ naar 55 ton ds ha⁻¹.jaar⁻¹ leidt tot een afname van de specifieke behandelingskosten van 0,21 naar € 0,08 € per m³ effluent (zie Figuur 18).

FIGUUR 18 INVLOED VAN DE ALGENOPBRENGST OP DE BEHANDELINGSKOSTEN



Tevens is een vergelijking gemaakt met één- en tweetrapszandfiltratie, zoals beschreven in de STOWA- rapporten 2005-28 en 2006-21. Op basis van dezelfde ingangconcentraties en debieten van het biologisch behandelde afvalwater blijken de kosten voor één- en tweetrapszandfiltratie binnen de gehanteerde onzekerheidsmarges overeen te komen met de kosten van behandeling met algen. Voor kleinere toepassingen is een algenreactor relatief wat goedkoper, voor grote capaciteiten een zandfilter. De specifieke kosten van een zandfilter bedragen bij 20.000 i.e.¹³⁶ 0,15 € per m³ voor een ééntrapszandfiltratie en 0,22 € per m³ voor een tweetrapszandfiltratie (vgl. algen 0,14 € per m³). Voor 100.000 i.e.¹³⁶ zijn de kosten 0,08 € per m³ voor een ééntrapszandfiltratie en 0,10 € per m³ voor een tweetrapszandfiltratie (vgl. algen 0,12 € per m³). Zandfiltratie is het jaar rond in staat de richtwaarden voor stikstof en fosfaat te behalen. Bij effluentnabehandeling met algen lukt dit alleen in de zomermaanden.

3

DISCUSSIE

3.1 OPGELOSTE STOFFEN EN DEELTJES IN HET VIJVEREFFLUENT

Het merendeel van de verrichte waterkwaliteitsonderzoek betrof – vanwege de logistiek en uit kostenoverwegingen – metingen van orthofosfaat, ammonium- en nitraatstikstof. In de voorgaande hoofdstukken zijn de waarden van deze opgeloste fracties gebruikt voor de simulaties en ook om te beoordelen of aan de richtwaarden kan worden voldaan. Het aandeel stikstof en fosfaat in de zwevende stof en de opgeloste organische fracties dient echter eveneens in de beoordeling van de finale effluentkwaliteit worden meegenomen.

Met het volgende rekenvoorbeeld kan dit worden toegelicht. Bij een gehalte van 10 mg.l⁻¹ droge stof in het effluent met een stikstofgehalte van 4% en een fosforgehalte van 1%, zal alleen al door uitspoeling van zwevende stof respectievelijk 0,4 mg.l⁻¹ N en 0,1 mg.l⁻¹ P uitspoelen. Wat betreft stikstof is dit circa 20% van de richtwaarde. Dat lijkt geen probleem. Voor fosfaat is het aandeel zwevende stof veel substantiëler, te weten 66% van de richtwaarde; dit laat slechts ruimte voor 0,05 mg/l P als opgelost fosfaat over.

In de periode waarbij het trommelfilter met 20 µm filterdoek werd getest was er aanvankelijk sprake van slibretentie. Onder die omstandigheden werd een gemiddeld gehalte zwevende stof van 6,4 mg.l⁻¹ ds gehaald. Naderhand, zonder retentie, was dit 3,3 mg.l⁻¹ ds. Voor fosfaat zou deze laatste waarde overeen komen met 0,033 mg.l⁻¹ P aanwezig als onopgelost fosfaat. Dit laat ruimte over voor ongeveer 0,1 mg.l⁻¹ P als opgelost fosfaat.

Conclusie:

Het pilotonderzoek in Alkmaar heeft laten zien dat met het trommelfilter een algen/waterscheiding mogelijk is die het gehalte zwevende stof in het effluent tot lagere waarden dan 5 mg.l⁻¹ ds kan reduceren. Met deze wijze van slib/waterscheiding is het mogelijk om aan de richtwaarden voor totaal-stikstof en totaal-fosfaat te voldoen.

3.2 PH VAN HET OP OPPERVLAKTEWATER TE LOZEN EFFLUENT

Door de opname van kooldioxide door de groeiende algen wordt het effluent mogelijk alkalisch tot een pH van 11. Dit is met name het geval wanneer wordt ingezet op extra – chemische - verwijdering van fosfaat. De pH van het behandelde effluent zal oplopen tot waarden boven het voor oppervlaktewater wenselijke maximum van pH = 9 (Zie Figuur 13). In hoeverre dit toelaatbaar is hangt af van de geldende lozingsvoorwaarden. Afhankelijk van de lokale omstandigheden zullen verdunning met oppervlaktewater en opname van kooldioxide uit de atmosfeer de overmaat alkaliniteit ter plekke neutraliseren.

Wanneer een tijdelijk plaatselijk verhoogde pH niet acceptabel is, kan kooldioxide in het effluent worden geïnjecteerd. Hiervoor is een extra absorptietoren nodig, waardoor de behandelkosten zullen toenemen. Mogelijk kan een combinatie gemaakt worden met de in de vijveraansvoer te plaatsen striptoren.

4

CONCLUSIES

- Dit onderzoek heeft het inzicht in de concrete mogelijkheden van effluentpolishing met algen onder Nederlandse omstandigheden sterk vergroot.
- Effluentpolishing met algen is technisch haalbaar en effectief. Het is mogelijk om in de zomer restconcentraties van gemiddeld minder dan 2,2 mg.l⁻¹ totaalstikstof en 0,15 mg.l⁻¹ totaal fosfor te bereiken.
- Een trommelfilter is een effectief middel om de geproduceerde algen uit het effluent af te scheiden.
- Door de vergaande opname van kooldioxide uit het water kan het behandelde effluent een pH van 11 bereiken waardoor het alkalisch wordt en niet zonder meer op oppervlaktewater kan worden geloosd.
- Wanneer de effluentlozing om deze reden niet acceptabel is, kan met een extra striptoren de pH worden gecorrigeerd.
- Het ruimtebeslag bedraagt circa 3,8 m² per i.e.₁₃₆. De behandelingskosten bedragen 0,12 à 0,14 € per m³, afhankelijk van de schaalgrootte. In deze raming zit een onzekerheidsmarge van ± 50%.
- Voor Nederland is effluentpolishing met algen geen techniek die onder alle omstandigheden toepasbaar is.
- De kosten zijn vergelijkbaar met die van zandfiltratie, maar het ruimtebeslag is voor geurbaniseerde gebieden te groot en de nutriënten worden alleen in de zomermaanden voldoende verwijderd. De hoge pH van het effluent van de algenvijver is een aandachtspunt.
- In specifieke gevallen, met name in het landelijk gebied, kan algentechnologie niettemin een relevante optie zijn voor nabehandeling van RWZI-effluent.
- Om het ontwerp beter toe te snijden op de locale omstandigheden kan verder optimalisatieonderzoek zinvol zijn.

