

Kroos zuivert effluent effectief

Adrie Otte (Bioniers) en Melissa van Hoorn (Waterschap Noorderzijlvest)

Bij rwzi Eelde is drie jaar geëxperimenteerd met het nabehandelen van het effluent met kroos. Bij een hydraulische verblijftijd van 2,5 dag werd meer dan de helft van het stikstof verwijderd en iets minder dan de helft van het fosfaat. Hierbij werd kroos gekweekt met een hoog eiwitgehalte, dat geëxtraheerd kan worden voor industriële toepassingen. De brutokosten van nabehandelen van effluent in kroosvijvers zijn lager dan van een waterharmonica of zandfilters.

Hoewel de waterkwaliteit in Nederland de afgelopen decennia sterk is verbeterd, heeft Nederland nog een forse opgave om aan de vereisten te voldoen die gesteld worden vanuit de Kaderrichtlijn water (KRW). Hiervoor zijn meerdere maatregelen mogelijk, variërend van het aanleggen van natuurvriendelijke oevers tot het verbeteren van het zuiveringsrendement van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Om de zoektocht naar innovatieve en kostenefficiënte maatregelen te stimuleren, heeft het ministerie van I&M subsidie beschikbaar gesteld vanuit het KRW-Innovatieprogramma.

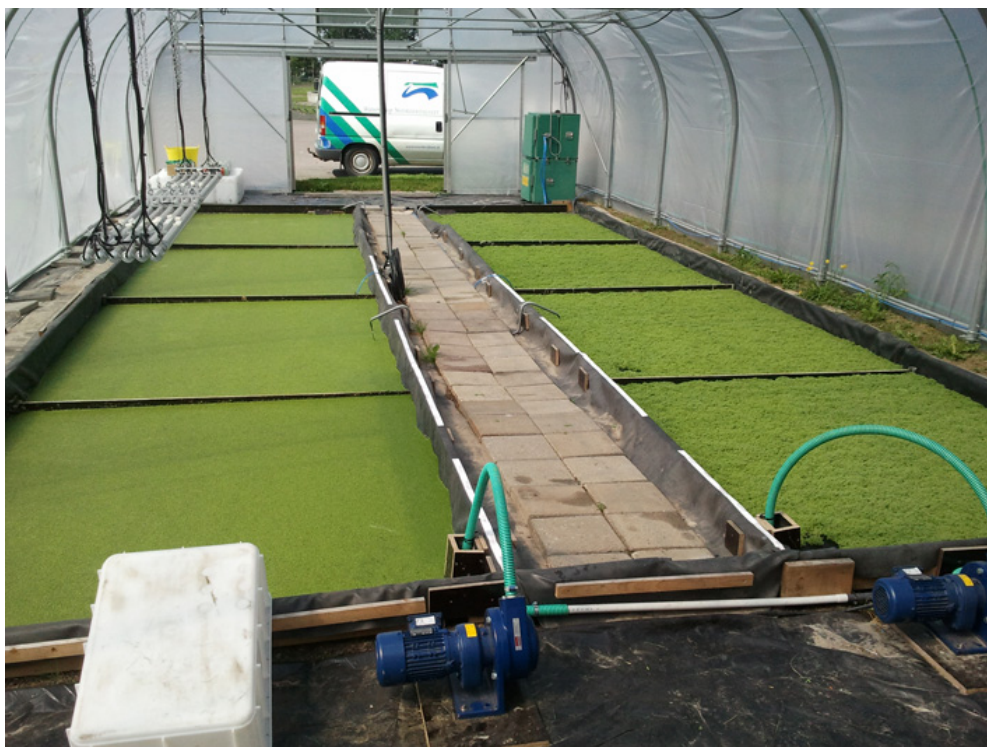
Eén van de innovatiemaatregelen waar onderzoek naar werd gedaan is het nazuiveren van effluent met kroos. Van 2010 tot 2013 heeft Waterschap Noorderzijlvest een proef gedaan met de zuivering van effluent van rwzi Eelde met kroos. De verwachting was dat de drijvende waterplanten effectief stikstof en fosfaat uit het water kunnen opnemen, wat eiwitrijk kroos oplevert. De eiwitten kunnen worden opgewerkt voor nuttig gebruik in allerlei producten, zoals veevoer, lijmen en coatings.

In twee proefsloten is gedurende drie jaar effluent nabehandeld met twee typen kroos: eendenkroos (*Lemna*) en kroosvaren (*Azolla*). Beide typen kroos komen in Nederland voor. Er is voor gekozen om beide te testen om het meest geschikte kroostype te kunnen bepalen. In dit artikel worden kort de resultaten besproken en wordt een doorkijkje gegeven naar een full-scale krooszuivering. Het doel van het onderzoek in de proefsloten was het ontwikkelen van een systeem voor vergaande verwijdering van stikstof en fosfaat uit effluent met behulp van kroos.

Proefopzet

In 2010 zijn twee parallele sloten gegraven van 10 m lang, 2 m breed en 26 cm diep. Met een pomp werd rwzi-effluent in de sloten gepompt met een regelbaar debiet, zodat de verblijftijd van het water geregeld kon worden. Drie schotten in elke sloot met een opening afwisselend aan de linker- en rechterkant zorgden voor een zo gelijkmatige stroming in de sloten. Aan het einde van elke sloot werd het water uitgelaten. Zo was er sprake van continue doorstroming. Eén sloot werd geënt met een mix van *Lemna*-soorten, de andere met *Azolla filiculoides*. Gedurende de proefperiode is gevarieerd met de kroosdichtheid om te bepalen wanneer de

kroosgroei optimaal was. Een tot twee keer per week werd er geoogst en werd van het geoogste materiaal het natte en het droge gewicht bepaald. In het influent en effluent van de sloten en halverwege de sloten zijn concentraties van stikstof- en fosfaatcomponenten gemeten.



Afbeelding 1. De proefsloten met eendenkroos en kroosvaren

2010 stond in het teken van het uittesten van de sloten en het oplossen van kinderziektes. In de winter van 2010-2011 is een tunnelkas over de proefsloten geplaatst. De kas werd geplaatst om het groeiseizoen zoveel mogelijk te verlengen. Bovendien voorkomt de kas bladinvall en verdunning van het water met neerslag.

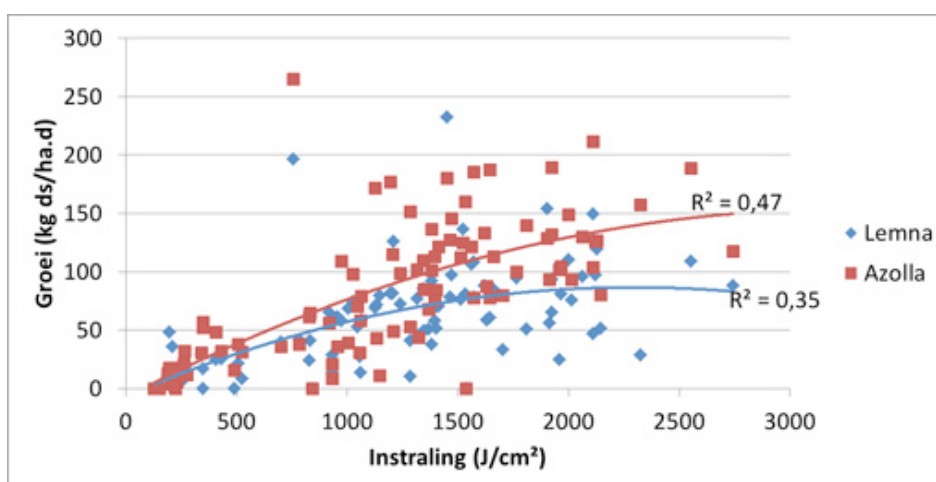
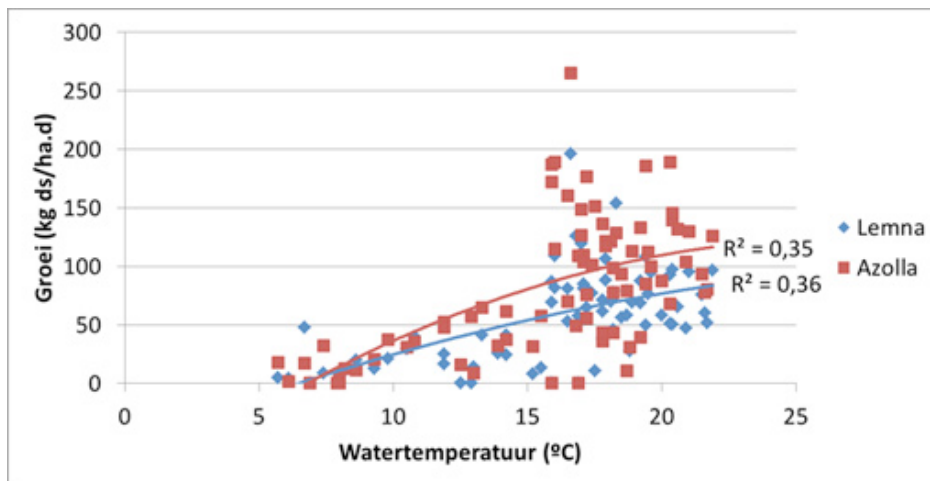
Kroosdichtheid

Bij een lage kroosdichtheid groeit het kroos snel, maar omdat de beginbiomassa laag is, is de absolute groei ook laag. Bovendien treedt bij gaten in het kroosdek algengroei op in het water. In de sloten is waargenomen dat onder dergelijke omstandigheden draadalg de groei van het kroos belemmeren. Het is dan ook belangrijk om het kroosdek altijd gesloten te houden. Is de kroosdichtheid hoog, dan overschaduwden de plantjes elkaar en daalt de relatieve en daarmee ook de absolute groei. Ergens daar tussenin ligt een punt waarbij de absolute groei optimaal is. Bij het oogsten moet zoveel kroos weggehaald worden dat deze optimale dichtheid overblijft. De kroosdichtheid na oogsten noemen we de terugooogstdichtheid. De proeven in de sloot laten zien dat de optimale groei voor zowel *Lemna* als *Azolla* ligt bij een terugooogstdichtheid tussen 1 en 1,5 kg/m². Het kroos moet worden geoogst als de dichtheid ongeveer twee keer zo hoog is als de terugooogstdichtheid. In voor- en najaar betekent dit eens per week oogsten, in de maanden mei t/m augustus betekent dit twee keer per week oogsten.

Temperatuur en lichtinstraling

De kroosgroei is sterk gerelateerd aan de (water)temperatuur en de hoeveelheid lichtinstraling. Beide parameters zijn ongeveer even bepalend. Het plaatsen van de kas heeft een positief effect gehad op de groei van het kroos in voor- en najaar. Het groeiseizoen is effectief verlengd, en hoewel de groei gedurende de winter minimaal was, heeft *Azolla* de winter van 2012-2013 overleefd. Met deze kroossoort kan de zuivering daardoor in het voorjaar sneller weer opstarten dan met *Lemna*.

Het kroos groeide optimaal als de watertemperatuur boven de 16°C lag (75 kg ds/ha.d voor *Lemna* en 110 kg ds/ha.d voor *Azolla*). Een duidelijk lagere groei werd geconstateerd bij watertemperaturen lager dan 10°C (12 kg ds/ha.d voor beide). De af en toe zeer hoge temperaturen in de kas (40°C of hoger) hadden geen negatief effect op de kroosgroei. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het dempende effect van de watertemperatuur. Omdat het kroos op het water drijft, heeft de watertemperatuur een groter effect dan de luchttemperatuur.



Afbeelding 2. Groei als functie van watertemperatuur (boven) en lichtinstraling (onder)

De lichtinstraling bepaalt direct de hoeveelheid biomassaopbouw. Hoe hoger de instraling (hoeveelheid lichtinstraling gesommeerd over de dag), hoe hoger de groei. Er zijn geen negatieve effecten gezien van zeer hoge lichtinstraling (> 2.500 J/cm²).

Om in de winter de groei te bevorderen is geëxperimenteerd met bijbelichten met blauw led-licht. Dit had geen positief effect op de kroosgroei, maar wel op de groei van draadalgen. De draadalgen hinderden vervolgens de kroosgroei. Blauw licht dringt namelijk de waterkolom in. Beter is het om rood licht te gebruiken, omdat rood licht niet in de waterkolom doordringt en daardoor niet de algengroei bevordert en wel de kroosgroei.

Geen limitatie door nutriëntengebrek

Gedurende het grootste deel van de proefperiode is een hydraulische verblijftijd van het water van 2,5 dagen gehanteerd. De concentraties van nutriënten in het influent varieerden soms behoorlijk. De stikstofconcentratie varieerde in de range van 0,40-16,4 mg N/l, de fosfaatconcentratie lag tussen 0,06 en 5,60 mg P/l. In het effluent van de sloten was de minimum stikstofconcentratie 0,14 mg N/l en de minimum fosfaatconcentratie 0,05 mg P/l. Ook bij de laagste concentraties is geen groeibeperking door nutriëntengebrek geconstateerd.

Opbrengst

In 2011 is, omgerekend naar hectares, in totaal 12,1 ton ds/ha *Lemna* en 18,1 ton ds/ha *Azolla* geoogst. In 2012 was dat respectievelijk 11,1 en 17,0 ton ds/ha.

De gehalten stikstof en fosfor in *Lemna* en *Azolla* variëren afhankelijk van de omstandigheden. Dit is bekend uit de literatuur [1] en ook al eerder geconstateerd bij de bepalingen in het laboratorium [2].

Onder omstandigheden met een overmaat aan nutriënten in het water nemen de planten meer op dan strikt nodig en onder nutriëntarme omstandigheden teren zij in op hun voorraad totdat een bepaald minimum is bereikt. Als dat minimum is bereikt, vertraagt of stopt de groei (tabel 1).

Tabel 1. N- en P-gehalten (in % van droge stof) in Lemna en Azolla [1, 2]

N- en P- gehalten (% van ds)	N			P		
	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
<i>Azolla filiculoides</i>	2,65	3,46	4,62	0,28	0,38	0,52
<i>Lemna gibba</i>	1,74	2,78	3,65	0,20	0,41	0,78
<i>Lemna minor</i>	1,43	3,10	8,74	0,17	0,41	0,83
<i>Spirodela polyrhiza</i>	2,25	2,77	3,99	0,23	0,40	0,97

De minimale waarden (tabel 1) zijn gemeten toen de planten de nutriënten uit het medium grotendeels hadden opgebruikt en zijn daarom niet representatief voor de omstandigheden in de proefsloten.

Zuiveringsefficiëntie

De nutriëntenverwijdering in de proefsloten is op twee manieren bepaald:

- 1) op basis van de biomassa-oogst
- 2) op basis van analyse van het water in de sloten.

1. Biomassa-oogst

De mate van zuivering (nutriëntenverwijdering) kan worden berekend uit de kroesgroei (oogst), het gemiddelde percentage nutriënten in de kroesbiomassa (tabel 1) en de nutriëntenconcentratie in het influent. Tabel 2 laat de relatieve nutriëntenverwijdering zien in de proefsloten bij verschillende verblijftijden en op verschillende momenten in het jaar.

Azolla laat een hogere stikstof- en fosfaatverwijdering zien dan *Lemna*. Voor stikstof moet hierbij een kanttekening gemaakt worden. *Azolla* leeft in symbiose met een stikstoffixerende bacterie, waardoor de plant stikstof uit de lucht kan gebruiken. Als dit verschijnsel ook in de proefsloten plaatsvindt, is de hier berekende verwijdering van stikstof door *Azolla* een overschatting.

Het effect van een langere verblijftijd is duidelijk zichtbaar. Een 2,5 keer hogere verblijftijd geeft een ongeveer 2,5 keer hoger verwijderingspercentage. Dit is volgens verwachting. De volledige verwijdering berekend uit de biomassaopbrengst van stikstof door *Azolla* laat zien dat *Azolla* stikstof onttrekt van de symbiont.

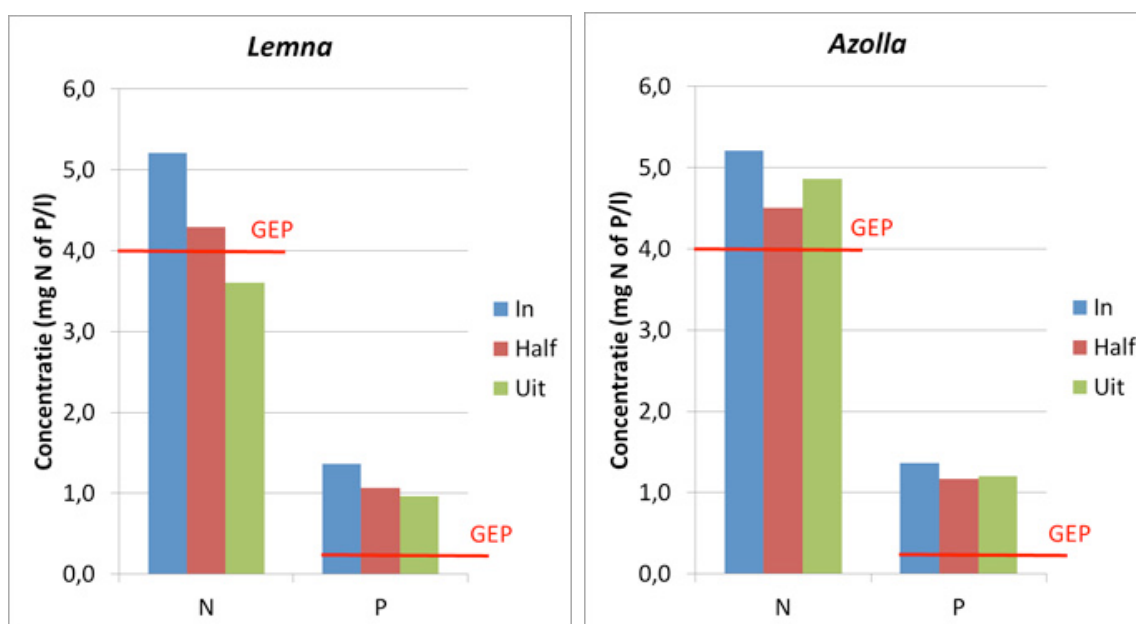
Tabel 2. Nutriëntenverwijdering op verschillende momenten in het jaar, berekend uit de gemeten kroesgroei bij hydraulische verblijftijden van 1,0 resp. 2,5 dag en de concentraties in het influent

Verblijftijd (dagen)	Maand	Aantal metingen	N verwijdering (%)		P verwijdering (%)		
			Lemna	Azolla	Lemna	Azolla	
1,0	TOTAAL	30	21%	39%	11%	16%	
	5	4	10%	23%	6%	10%	
	6	8	14%	22%	9%	9%	
	7	9	32%	58%	14%	20%	
	8	9	18%	33%	24%	32%	
2,5	TOTAAL	53	43%	70%	28%	33%	
	1	2	0%	0%	0%	0%	
	5	4	55%	102%	25%	37%	
	6	5	59%	88%	29%	35%	
	7	5	55%	98%	37%	52%	
	8	9	81%	130%	44%	56%	
	9	13	22%	41%	15%	26%	
	10	8	16%	27%	13%	19%	
	11	4	3%	16%	9%	35%	
	12	3	16%	5%	74%	22%	
	zomer			54%	92%	30%	41%
	winter			9%	12%	24%	19%

Hoewel de kroesgroei het hoogst was in juni, is het verwijderingspercentage het hoogst in augustus. Dit heeft te maken met een lagere inkomende vracht aan nutriënten in deze maand. In de zomer (april-september) is bij een verblijftijd van 2,5 dag de gemiddelde verwijdering van stikstof 54% voor *Lemna* en 92% voor *Azolla* en van fosfaat 30% voor *Lemna* en 41% voor *Azolla*.

2. Slootwateranalyse

Nutriëntgehalten zijn niet alleen gemeten in het influent van de sloten, maar ook in het water halverwege de sloten en in het water dat de sloten verlaat.



Afbeelding 3. Ingaande en uitgaande concentraties van totaal-stikstof en totaal-fosfor

Ook hieruit is de verwijdering van stikstof en fosfaat berekend: gemiddeld over de twee jaren wordt in het zomerhalfjaar in de *Lemna*-sloot 31% van de totaal-stikstof en 29% van de totaal-fosfor verwijderd, in de *Azollasloot* zijn deze percentages respectievelijk 4% en 6% (zie afbeelding 3).

In beide sloten is een sterke afname van de ammoniumconcentratie te zien en een toename of zeer lage afname van nitriet+nitraat. De totale hoeveelheid opgelost stikstof (ammonium+nitriet+nitraat) neemt wel af. Dit geeft aan dat er, naast opname door de kroesplanten ook nitrificatie plaatsvindt. Dit verklaart ook gedeeltelijk de daling van de zuurstofconcentraties in de sloten. De kroesloten zijn derhalve effectieve verwijderaars van ammonium. Dit is ook in ander onderzoek geconstateerd [2].

Tabel 3 zet de volgens beide methoden bepaalde zuiveringsefficiëntie naast elkaar.

Tabel 3. Nutriëntenverwijdering, bepaald op basis van kroos oogst en op basis van wateranalyses bij de twee gehanteerde verblijftijden De berekeningen zijn uitgevoerd over identieke perioden (begin mei-begin september). De verblijftijd van 1 dag is gehanteerd in 2011, die van 2,5 dag in 2012.

Nutriëntenverwijdering (%)		N		P	
	Verbl. tijd	oogst	water	oogst	water
Lemnasloot	1,0 d	21%	41%	11%	44%
	2,5 d	64%	34%	38%	23%
Azollasloot	1,0 d	39%	7%	16%	10%
	2,5 d	105%	14%	49%	8%

Vergelijking biomassa- en wateranalysegegevens

Te zien is dat de resultaten van beide bepalingsmethoden nogal afwijken van elkaar. In de *Azollasloot* wordt in 2012 geen verwijdering gemeten in het water, terwijl de geoogste *Azolla* ongeveer 35% van het fosfaat opgenomen zou moeten hebben. Ook laten de wateranalyses een vermindering van de verwijdering zien bij een langere verblijftijd. Dit strookt niet met de theorie en ook niet met de uit de biomassa oogst berekende verwijdering. Dit suggereert dat de wateranalyses niet representatief zijn. Is er sprake van een meetfout? Vooralsnog lijkt de bepaling op basis van de geoogste biomassa het meest betrouwbaar.

Enmalig is steekproefsgewijs bemonsterd op verschillende locaties in de kroosloten. Dit liet een verwijdering van stikstof van 77% en van fosfaat van 78% zien bij *Lemna* en 59% van stikstof en 74% van fosfaat bij *Azolla*. Deze resultaten komen beter dan de eerdere wateranalyses overeen met de uit de biomassa toename berekende verwijdering.

Doorkijk naar full scale krooszuivering

De proef laat zien dat het in principe goed mogelijk is om met kroos nutriënten te verwijderen uit effluent van rwzi's. Voor de opschaling naar een *full scale* krooszuivering moeten echter nog praktische hobbels worden genomen.

Zowel in 2011 als in 2012 is relatief laat begonnen met het opstarten van de kroosloten. Gezien de groeicurves moet het mogelijk zijn om in april te beginnen met kweken en oogsten. Bij een opgeschaald kweekstelsel hoort een winteropslag. *Azolla* kan doorgekweekt worden zonder bijverwarmen, maar *Lemna* niet.

Met een goede overwintering kunnen de sloten eerder worden geënt, zodat de kweek eerder op gang komt. De krooszuivering kan dan het gehele zomerhalfjaar (april-september) en een deel van het winterhalfjaar (oktober - half december) werken.

In de winter van 2012/2013 is het gelukt om *Azolla* de winter door groen te houden door het kroosdek gesloten, maar niet te dik te houden en schimmelplekken te verwijderen. *Lemna* zakte naar de bodem tijdens de donkere en koude periode. Het is wellicht mogelijk om een deel van de *Lemna* planten de winter door te helpen in een verwarmde en bijbelichte kas. Als de kas goed is geïsoleerd hoeft maar minimaal te worden bijverwarmd om te zorgen dat de temperatuur niet onder de 5°C komt. Vanuit de winteropslag kunnen dan in maart de sloten worden geënt.

Het oogsten is in de proefsloten met de hand gebeurd. Bij een grootschalige kweek is een automatisch oogststelsel uiteraard wel noodzakelijk. Diverse oogstsystemen zijn in gebruik, zoals skimmers, oogstboten en zuiginstallaties, maar deze hebben alle hun nadelen die inzet in kweeksystemen lastig maken. Voor de ontwikkeling van een geschikt(er) systeem kan een technische opleiding worden benaderd en vervolgens een marktpartij die de machines op de markt brengt.

Bij een grootschalig systeem dient in voor- en najaar eens per week en in de zomer twee keer per week te worden geoogst. Het geoogste materiaal moet direct worden afgevoerd voor verwerking om rotting en daarmee waardeverlies te voorkomen. De eiwitten kunnen uit het natte kroos geëxtraheerd worden. Eventueel kan het kroos eerst tijdelijk worden opgeslagen in een koelcel. Er dienen duidelijke afspraken gemaakt te worden met de afnemer om het kroos zo snel mogelijk verwerkt te hebben.

Kosten en baten

Aan de hand van het onderzoek is een ontwerpmodel gemaakt, waarin ook kosten en baten worden berekend [3]. De kosten voor de nabehandeling met kroos komen ongeveer op €0,05/m³ ofwel rond €13,-/kg verwijderd N en € 100,-/kg verwijderd P. Dit is inclusief de opbrengsten door verkoop van kroos. De kosten per m³ liggen hiermee op hetzelfde niveau als de kosten voor een waterharmonica systeem [6]. Een krooszuivering verwijdert echter meer stikstof en fosfaat en levert een nuttig product op. Een zandfiltratie kost ongeveer €0,10/m³.

Verkoop van kroos voor eiwitextractie levert €200 per ton droge stof op. Een proeffabriek voor grootschaliger eiwitextractie is in planning. Bij succes en opschaling is een verzekerde aanvoer van kroos nodig en daarmee is er ook een verzekerde afname van geteelt kroos.

Conclusie

Nabehandeling van rwzi-effluent met kroos is een effectieve en rendabele manier om de nutriëntenconcentraties in het effluent aanzienlijk te verlagen. Het systeem kan concentraties van stikstof verlagen tot onder de KRW-norm voor het ontvangende oppervlaktewater [4, 5]. Omdat de KRW-nutriëntenormen gelden voor het zomerhalfjaar, hoeft het geen probleem te zijn dat krooszuivering in de winter niet of minder werkt.

Azolla is gemakkelijker de winter door te telen en verwijdert nutriënten beter dan *Lemna*, maar verwijdert minder stikstof door de symbiose van deze soort met een stikstoffixerende bacterie. Is verregaande verwijdering van stikstof noodzakelijk, dan is *Lemna* een betere keus.

Succesfactoren zijn het een tot twee keer per week oogsten tot een dichtheid van 1 tot 1,5 kg natgewicht/m² en het verlengen van het groeiseizoen middels een eenvoudige kas. Verbeteringen zijn mogelijk door een deel van het kroos de winter door te helpen, zodat al vroeg in het voorjaar de kroosgroei opgestart kan worden.

Literatuur

- 1.Otte, A. (2010). Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 1: literatuurstudie.
- 2.Kempen, M.M.L. van, M.J.J.M. Verhofstad & A.J.P. Smolders (2012). Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 2: Laboratoriumexperimenten.
- 3.Otte, A. (2012). Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 6: ontwerpmodel.
- 4.Otte, A. (2013). Experimenten krooszuivering. Resultaten van drie jaar kroosexperimenten bij rwzi Eelde. Bioniers rapport R002-2012080601-V01.
- 5.Hoorn, M. Van (2012). Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 4: pilotstudie.
- 6.Boomen, R. Van den & R. Kampf (2013). Waterharmonica's in Nederland (1996-2012). STOWA rapport 2013/07.