



Effluentpolishing met kroos

Deelrapport 1: Literatuurstudie



Tauw



Waterschap NOORDERZIJLVEST



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN UR

Radboud Universiteit Nijmegen



Effluentpolishing met krooszuivering

Deelrapport 1. Literatuuronderzoek

Verantwoording

Titel	Effluentpolishing met krooszuivering
Auteur	Otte, A. (2010) Effluentpolishing met kroos. Deelrapport 1: Literatuuronderzoek. Tauw bv.
Projectnummer	4716656
Aantal pagina's	34 (exclusief bijlagen)
Datum	1 juli 2012

Inhoud

Verantwoording	3
1 Inleiding	7
1.1 Probleemstelling.....	8
1.2 Projectdoel	8
1.3 Projectonderdelen	8
2 Eigenschappen van kroos	11
2.1 Soorten	11
2.2 Eigenschappen.....	12
2.2.1 Morfologie.....	12
2.2.2 Samenstelling	12
2.2.3 Groei.....	13
2.3 Effecten van concentraties van stoffen in en fysische eigenschappen van het water op kroosgroei.....	14
2.3.1 Fosfaat	14
2.3.2 Stikstof.....	14
2.3.3 Luxeopname nutriënten.....	14
2.3.4 Chloride	14
2.3.5 Sporenelementen	14
2.3.6 Zuurgraad	15
2.3.7 Temperatuur.....	15
2.3.8 Licht.....	16
2.4 Effecten van plantdichtheid op groeisnelheid.....	16
3 Zuivering met kroos	19
3.1 Soortkeuze	19
3.2 Verhouding N/P	19
3.3 Zuiveringsrendementen.....	19
3.3.1 Zware metalen.....	21
3.3.2 Pathogenen	21
3.3.3 Overige stoffen	21
3.4 Accumulatie van stoffen	21
3.5 Toxiciteit	22
3.6 Ontwerp zuiveringssysteem	22
3.7 Economische aspecten	23

3.7.1	Hergebruik nutriënten	23
3.7.2	Productie organische stoffen	23
3.7.3	Hergebruik water	24
3.7.4	Energieproductie	24
3.7.5	Kosten en baten	24
4	Toepassingen van kroos	27
4.1	Eiwitgehalte en waarde als veevoer	27
4.2	Toepassing als diervoer	28
4.3	Toepassing als energiegewas	28
5	Vragen voor de experimenten	29
6	Literatuur	31

1 Inleiding

Als achtergrond voor dit onderzoek zijn de doelstellingen vanuit de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) leidend. De KRW 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.

In het bereiken van de KRW-doelstellingen voor de ecologische en chemische toestand van oppervlaktewater spelen rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) als puntbron een belangrijke rol. Waterschap Noorderzijlvest heeft als belangrijke maatregel nageschakelde technieken van rwzi's gepland, in verband met het verbeteren van zuiveringsrendementen.

In het algemeen produceren de huidige generatie rwzi's in veel gevallen een effluentkwaliteit die ontoereikend is om in de nabije toekomst de gewenste KRW-kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater te bereiken. Om uiteindelijk toch de vereiste emissiereductie te kunnen bereiken is het noodzakelijk om nieuwe geïntegreerde of aanvullende, nageschakelde zuiveringstechnieken toe te passen of om geheel nieuwe zuiveringsconcepten te ontwikkelen.

Realisatie van de benodigde emissiereductie op rwzi's leidt met conventionele technieken tot hoge investerings- en (jaarlijkse) operationele kosten. De totale jaarlijkse extra kosten zijn gekwantificeerd in het interval van EUR 850 miljoen tot EUR 3,2 miljard ([43])! Er is daarom behoefte aan een technologie die:

- De effluentkwaliteit van rwzi's verbetert
- Op korte termijn (\pm 2015) geïntroduceerd kan worden
- Goedkoper is dan beschikbare technologieën

Een zuiveringstechnologie op basis van het kweken van kroos kan aan deze voorwaarden voldoen. Zuiveringstechnologie op basis van krooskweek is een potentiële technologie die snel geïmplementeerd kan worden:

- Voor vergaande verwijdering van stikstof en fosfaat
- Tegen een zeer lage energieconsumptie (A-label)
- Met een positieve CO₂ balans door de CO₂-opname voor groei

Indicatieve berekeningen tonen aan dat kroostechnologie voor verwijdering van N en P minimaal 50 % goedkoper is dan gangbare technologieën (zandfiltratie). Vooral nog wordt gesteld dat de mogelijke toekomstige KRW-doelstellingen voor nutriënten haalbaar zijn met inzet van kroos. Bijkomend voordeel van kroos ten opzichte van bijvoorbeeld algentechnologie is dat kroos veel gemakkelijker te oogsten is. Kroos is daarnaast een uitstekend veevoer en kan daardoor bijdragen aan het sluiten van nutriëntenkringlopen in Nederland.

1.1 Probleemstelling

Het kweken van kroos op afvalwater is veelbelovend voor vergaande verwijdering van N en P uit afvalwater en levert potentieel een grote kostenbesparing op. N en P uit rwzi's leveren op veel plaatsen ecologische problemen op, die het behalen van de KRW-doelstellingen in de weg staan. Er is echter geen binnenlandse ervaring met deze methode specifiek voor de zuivering van rwzi-effluent. De vraag die beantwoord moet worden is: "Hoe kan het kweken van kroos in de Nederlandse zuiveringssituatie, als energiezuinige en kostenefficiënte, nageschakelde maatregel voor N en P verwijdering worden ingezet om daarmee een bijdrage te leveren aan een goede ecologische en chemische toestand van het oppervlaktewater in het jaar 2015?" Bijkomende secundaire vraag daarbij is: "Hoe kan kroos als product worden afgezet en welke afzetmogelijkheid levert de meeste baten op?"

Het is bekend dat kroos in de Nederlandse omstandigheden goed groeit mits er voldoende nutriënten aanwezig zijn. Op veel plekken is kroos in oppervlaktewater een probleem omdat het te uitbundig groeit en het ecosysteem negatief beïnvloedt. Het is echter de vraag hoe kroos zich gedraagt op rwzi-effluent en onder welke omstandigheden dit plantje optimaal kan worden ingezet. Omdat er verschillende soorten kroos zijn, is de vraag tevens welke soort het best gebruikt kan worden. Ook is de vraag hoe kroos zich gedraagt bij wisselende effluentsamenstellingen (droogweeraanvoer en regenwateraanvoer) en onder verschillende klimatologische omstandigheden. Het onderzoek zal moeten uitmonden in het ontwerp van een goed functionerend systeem om met kroos effluent na te behandelen. Hierbij zijn het minimaliseren van benodigde ruimte en kosten met als randvoorwaarde het behalen van de KRW-doelstellingen leidend.

1.2 Projectdoel

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een systeem voor vergaande verwijdering van N en P uit afvalwater met behulp van kroos. Subdoel van dit project is om onderzoek te doen naar de neveneffecten van effluentbehandeling met kroos. Bijvoorbeeld in weke mate andere stoffen uit het afvalwater worden verwijderd (zware metalen en organische microverontreinigingen) waardoor de nazuiveringsstap efficiënter gedimensioneerd kan worden. Ook wordt onderzocht of het geoogste kroos inzetbaar is als veevoer en of het kroos vergist kan worden tot biogas.

1.3 Projectonderdelen

Het project is opgedeeld in de verschillende werkpakketten. Van de werkpakketten 1 t/m 6 wordt of is een deelrapport geschreven.

Werkpakket	Doel	Resultaat	Planning
1. Inventarisatie	Vergaren van beschikbare informatie over kroos voor het ontwerp van een kweekstelsel voor waterzuivering.	Een rapport met samengevat de huidige beschikbare kennis over kroos, de groei van kroos, opnamecapaciteiten en – snelheden van nutriënten en andere stoffen, toegespitst op een zuiveringssysteem	Januari 2010 – februari 2010, daarna literatuuronderzoek waar nodig
2. Labtesten kroosgroei	Het vullen van leemten in kennis uit de literatuurstudie. Eerste testen van groei van kroos op effluent. Onderzoeken meest geschikte kroossoort.	Analyses; Nieuwe kennis m.b.t. gedrag van kroos en opname stoffen; Keuze meest geschikte kroossoort. Rapportage.	Maart 2010-september 2011
3. Analyses kroos	Het analyseren van de kroosamenstelling voor het bepalen van de geschiktheid als veevoer of andere toepassingen.	Analyses. Nieuwe kennis m.b.t. geschiktheid van kroos voor diverse afzetmogelijkheden. Rapportage	Maart 2010-oktober 2011
4. Modelberekeningen	Opstellen mathematisch model voor het berekenen van het meest optimale kweekstelsel voor zuivering.	Gekalibreerd en gevalideerd simulatiemodel.	Maart 2010 – oktober 2011
5. Pilotonderzoek	Ontwikkelen van kennis over het kweken van kroos onder Nederlandse omstandigheden op rwzi-effluent.	Pilotinstallatie; Inzicht in de werking van een krooskweekstelsel voor het zuiveren van rwzi-effluent onder Nederlandse omstandigheden. Rapportage.	Mei 2010-oktober 2011.

Werkpakket	Doel	Resultaat	Planning
6. Ontwerp demonstratiesysteem	Het ontwerpen van een haalbaar en betaalbaar krooskweekstelsel op basis van de opgedane kennis in de eerdere onderzoeksfasen.	Ontwerp voor een realistisch kweekstelsel van kroos op afvalwater.	September 2011-november 2011
7. Projectmanagement	Uitvoering van het project binnen de gestelde tijd en begroting.	Afgerond project. Financiële en inhoudelijke rapportages. Communicatie over de resultaten.	Januari 2010-december 2011

Dit rapport bevat de resultaten van werkpakket 1.

2 Eigenschappen van kroos

In dit hoofdstuk wordt de ecologie van kroos beschreven. De volgende vragen komen aan de orde. Welke soorten komen in Nederland voor? Wat zijn de specifieke eigenschappen van elke soort? In welke omgeving en milieuomstandigheden voelen de verschillende soorten zich het meest thuis?

2.1 Soorten

Kroos is een verzamelnaam voor twee families van drijvende waterplanten, de Lemnaceae (Eendekroos) en de Azollaceae (Kroosvaren). Algemeen in Nederland voorkomende soorten van deze twee families zijn onder meer Klein kroos (*Lemna minor*), Bultkroos (*Lemna gibba*), Veelwortelig kroos (*Spirodela polyrhiza*) en Grote kroosvaren (*Azolla filiculoides*).

In Tabel 2.1 staan alle in Nederland voorkomende kroossoorten vermeld.

Tabel 2.1 Kroossoorten in Nederland

Nederlandse naam	Latijnse naam	Opmerking
Grote kroosvaren	<i>Azolla filiculoides</i>	
Kleine kroosvaren	<i>Azolla cristata</i>	Rode lijst: verdwenen
Wortelloos kroos	<i>Wolffia arrhiza</i>	
Puntkroos	<i>Lemna trisulca</i>	
Bultkroos	<i>Lemna gibba</i>	
Dwergkroos	<i>Lemna minuta</i>	
Knopkroos	<i>Lemna turionifera</i>	
Klein kroos	<i>Lemna minor</i>	
Veelwortelig kroos	<i>Spirodela polyrhiza</i>	

Kroos komt vaak voor in de vorm dekken, die met name in mei-oktober worden aangetroffen op ondiep, rustig water met een hoge nutriëntenaanvoer (sloten, vaarten en vijvers). *Lemna minor* en *Lemna gibba*, die overigens veel op elkaar lijken, zijn vaak de dominante soorten in deze krooslagen.

2.2 Eigenschappen

2.2.1 Morfologie

Lemnaceae behoren morfologisch gezien tot de lemniden, vrij in het water drijvende waterplanten (pleustofyten) van kleine afmeting met een gereduceerd cormus waarvan de bovenzijde is aangepast aan de atmosferische lucht en de onderzijde aan het leven in het water. De cormus die normaal bestaat uit stengel, blad en wortel is bij Lemnaceae gereduceerd tot een complex van weefsels met slechts weinig differentiatie en heeft één (*Lemna*) of meerdere (*Spirodela*) wortels of is een bolletje zonder wortels (*Wolffia*). Dit individuele, bladvormige lichaam van Lemnaceae wordt een *frond* genoemd. Via het onderste epidermis van de frond worden water en nutriënten opgenomen. Ook de bovenkant van de frond kan, mits in contact met water, nutriënten en water absorberen. Het is niet helemaal duidelijk of de wortels van *Spirodela* en *Lemna* essentieel zijn voor de opname van water en opgeloste stoffen of niet ([38]) De belangrijkste functie van de wortels van Lemnaceae is waarschijnlijk hun stabiliserend effect. De wortels voorkomen dat de fronds gemakkelijk omkeren waardoor onder andere de CO₂-opname belemmerd wordt.

2.2.2 Samenstelling

Lemnaceae bevatten tussen 86 % en 97 % water, afhankelijk van de groeiomstandigheden. Optimale groei-omstandigheden (hoge groeisnelheden) resulteren in een relatief hoog watergehalte. Er is echter geen directe relatie tussen het drooggewicht en de grootte van een frond. Vooral omstandigheden die leiden tot zetmeelvorming (zoals een hoge lichtintensiteit en hoge CO₂-concentraties) leiden tot een sterke verhoging van het drooggewicht. Het drooggewicht van Lemnaceae is niet alleen afhankelijk van de omstandigheden, het is ook specifiek voor soorten en klonen. Het hoogste drooggewicht per frond dat in de literatuur vermeld wordt, is 0,6 mg voor *S. polyrhiza*. Het gemiddelde drooggewicht van de kleinste Lemnaceae-fronds (*Wolffia*) is circa 0,01 mg ([38]).

De gehalten aan nutriënten en metalen in kroos is afhankelijk van de soort en van de concentraties in het water waarop de plantjes groeien. Tabel 2.2 geeft een overzicht van concentraties van enkele stoffen.

Tabel 2.2. Gehalten van enkele stoffen in drie kroossoorten in % van drooggewicht

	N	P	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Zn
<i>Spirodela polyrhiza</i>	3,99	0,97	0,74	0,27	0,12	0,31	2,17	0,54	0,05
<i>Lemna minor</i>	8,74	0,83	0,06	1,53	0,02	0,18	1,92	0,03	0,05
<i>Lemna trisulca</i>	4,79	1,81	0,44	0,26	0,05	0,34	2,90	0,55	0,04

De concentratie van mineralen in het voedingsmedium heeft directe invloed op de concentraties in de fronds. Het maximale stikstof- en fosfaatgehalte in de frond werd in een onderzoek bereikt bij een stikstof- en fosfaatgehalte in het medium van respectievelijk 8 mg N/l en 4 mg P/l. De concentraties in het kroos waren toen respectievelijk 5,5 % en 1,5 % van het drooggewicht ([38]). Bij concentraties van fosfaat in het kweekmedium hoger dan 3,1 mg P/l neemt de concentratie van P in de fronds nauwelijks meer toe.

De gehalten van diverse organische stoffen zijn weergegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Gehalte van enkele organische componenten in Lemnaceae en Azolla als % van het drooggewicht

Component	Gehalte	Gehalte
	Lemnaceae	Azolla
Eiwitten	6,8 – 45,0	13,0 – 23,4
Koolhydraten	14,1 – 43,6	6,4 – 61
Vetten	1,8 – 9,2	4,4 – 6,3
Vezels	5,7 – 16,2	9,5 – 24,5
As	8,0 – 27,6	9,7 – 23,8

2.2.3 Groei

De groeisnelheid wordt meestal uitgedrukt op basis van de verandering van het aantal fronds, soms op basis van de toename van het drooggewicht. De hoogste groeisnelheden liggen voor Lemnaceae in de buurt van $0,70 \text{ d}^{-1}$ en dat komt overeen met een verdubbeling in 24 uur. In Tabel 2.4 is een overzicht gegeven van de maximale groeisnelheden van enkele in Nederland voorkomende Lemnaceae bij optimale temperatuur (25 °C tot 28°C). Verschillen binnen een soort zijn te verklaren uit verschillen in bijvoorbeeld voorgeschiedenis van de gebruikte planten ([38]).

Tabel 2.4 Maximale groeisnelheid van verschillende soorten kroos (d^{-1}) ([38])

Soort	Gemeten groeisnelheid
	(min. – max/)
<i>Lemna minor</i>	0,16 – 0,36
<i>Lemna gibba</i>	0,12 – 0,33
<i>Spirodela polyrhiza</i>	0,21 – 0,39
<i>Lemna trisulca</i>	0,024
Niet nader omschreven, veldonderzoek	0,10 – 0,35

2.3 Effecten van concentraties van stoffen in en fysische eigenschappen van het water op kroosgroei

2.3.1 Fosfaat

Fosfaatconcentraties in het water bij de maximale groeisnelheid van kroos liggen tussen enkele tienden (0,2 – 0,4) en enkele tientallen (10 – 50) mg P/l. De groeisnelheden bij deze concentraties liggen rond 0,20 tot 0,34 d⁻¹. Bij concentraties van 0,005 tot 0,087 mg P/l is de groeisnelheid gehalveerd. Dit betekent dat kroos in staat is bijna optimaal te groeien bij concentraties van fosfaat die lager zijn dan de KRW-doelen.

2.3.2 Stikstof

De maximale groeisnelheid van Lemnaceae wordt bereikt bij stikstofconcentraties in het water van 0,3 – 630 mg N/l. De helft van de groeisnelheid wordt bereikt bij concentraties van 0,04 tot 1,2 mg N/l. Dit betekent dat kroos in staat is optimaal te groeien bij concentraties van stikstof die (veel) lager zijn dan de KRW-doelen.

2.3.3 Luxeopname nutriënten

Kroos is in staat om nutriënten intern op te slaan voor mindere tijden ([8]), een verschijnsel dat ook wel luxeopname wordt genoemd. De groeisnelheid van kroos is dan ook niet primair afhankelijk van de nutriëntenconcentratie in het water, maar van de interne nutriëntenconcentratie. Is de interne nutriëntenconcentratie uitgeput en de externe nutriëntenconcentratie laag, pas dan neemt de groeisnelheid af.

2.3.4 Chloride

In het veld wordt kroos aangetroffen bij zeer uiteenlopende chlorideconcentraties. Remming van de groeisnelheid treedt op bij concentraties van 350 tot 2.120 mg Cl/l, met uitzondering van *L. minor*.

2.3.5 Sporenelementen

Tabel 2.5 geeft een overzicht van de effecten van concentraties van verschillende stoffen op de groei van *L. minor*. De weergegeven concentraties geven geen aanleiding te veronderstellen dat effluent van rwzi's geen geschikt groeimedium voor kroos zou kunnen zijn.

Tabel 2.5 Tolerantie van *L. minor* voor verschillende micronutriënten. Concentraties aangegeven in mg/l

Effect	Fe	Mn	B	Cu	Zn	Mo
Geen groeiremming	1 – 28	0,05 – 55	0,05 – 17	3,2	0,04 – 6,5	54,4
Volledige groeiremming	100	275	87	6,3	65 - 300	272

2.3.6 Zuurgraad

Kroos is in staat bij een breed interval van pH-waarden te groeien. Tabel 2.6 geeft een overzicht van pH waarden waarbij kroos in het veld wordt aangetroffen.

Tabel 2.6 pH waarden waarbij kroos in het veld wordt aangetroffen

Soort	Minimum	Maximum	Optimum
<i>Lemna</i>	4,0	10,0	5,0
<i>Spirodela</i>	3,0	10,0	7,0
<i>Wolffia</i>	4,0	10,0	5,0

De pH van rwzi-effluent zal geen belemmering zijn voor het groeien van kroos.

2.3.7 Temperatuur

De verschillende soorten kroos hebben elk hun specifieke maximum temperatuur waarbij nog groei kan plaatsvinden. Dit maximum bevindt zich tussen 26 en 37°C en dat is een temperatuur die niet snel in effluent zal voorkomen. De optimale temperatuur voor groei ligt bij alle soorten tussen 25 en 30°C ([38], [47]). Interessanter voor het kweken van kroos op effluent in Nederland is de minimumtemperatuur waarbij nog groei plaatsvindt. Deze is soortspecifiek en ligt tussen 4°C en 18°C. De minimumtemperatuur is niet alleen soortspecifiek, maar varieert ook tussen verschillende klonen van dezelfde soort. In Tabel 2.7 worden de minimale temperaturen opgesomd.

Tabel 2.7 Minimale groeitemperatuur (°C) van verschillende kroossoorten

Soort	Aantal geteste klonen	Minimumtemperatuur voor groei
<i>Lemna gibba</i>	6	4
<i>Lemna minor</i>	8	4 – 9
<i>Lemna trisulca</i>	4	4 – 9
<i>Spirodela polyrhiza</i>	4	9 – 20
<i>Wolffia arrhiza</i>	1	13,5 – 16,5

Lemna gibba en *Lemna minor* zijn in staat om in streken met koele winters door te groeien, terwijl *S. polyrhiza* en *W. arrhiza* deze periode op de waterbodem doorbrengen in de vorm van turionen. Omdat *L. minor* bij temperaturen kleiner dan 20°C veel sneller groeit dan *S. polyrhiza*, wordt *L. minor* in het voorjaar in het algemeen veel eerder aangetroffen dan de turion-vormende *S. polyrhiza*. Temperaturen van -10°C zijn dodelijk voor alle fronds die niet in ruststadium zijn. *Lemna* fronds hebben een karakteristieke levensduur. Deze hangt vooral af van de temperatuur. Een temperatuurverhoging van 20°C naar 30°C vermindert de levensduur van een frond met de helft.

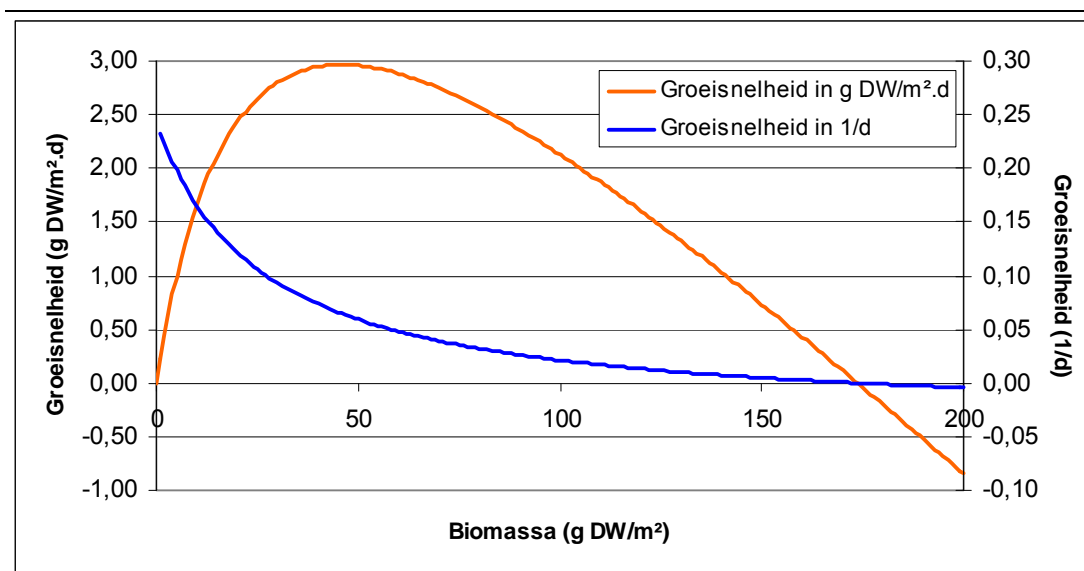
2.3.8 Licht

De groeisnelheid van kroos is afhankelijk van de lichtintensiteit. De groeisnelheid neemt toe tot een bepaald maximum bij toename van de lichtintensiteit. Dit maximum is afhankelijk van de soort, de kloon en de temperatuur. Bij lagere temperaturen is de lichtintensiteit voor de maximale groei lager dan bij hogere temperaturen. Met de toename van de lichtintensiteit nemen het drooggewicht en het oppervlak per frond en per frond toe. De maximale groeisnelheid wordt bij *Lemna minor* bij de meeste temperaturen bereikt bij ongeveer 40 W/m² PAR. Hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de groeisnelheid dan is (tot een bepaalde maximumtemperatuur). De verzadigingsinstraling voor *Lemna* ligt tussen 68 en 135 W/m² en voor *Spirodela* bij 135 tot 270 W/m². De groei van beide soorten werd belemmerd bij instralingen boven 270 W/m² ([47]).

2.4 Effecten van plantdichtheid op groeisnelheid

Bij hogere plantdichtheden treedt groei-limitatie op door onder andere zelfbeschaduwning ([11], [38]). Experimenten met *L. minor* wezen uit dat de groei negatief werd bij dichtheden van ongeveer 180 g DW/m². Bij een dichtheid van 10 g DW/m² werd de maximale groeisnelheid gemeten. Bij hoge dichtheden (180 g DW/m² en meer) werd de groei negatief, dat wil zeggen dat de sterfte groter was dan de groei. De dichtheid waarbij de groei en de sterfte elkaar opheffen hangt echter mede af van de hoeveelheid licht, de temperatuur en de concentratie van nutriënten in het water.

Omdat de groei gelimiteerd kan worden door de plantdichtheid, is er een optimum in de groei onder verder gelijke omstandigheden. Dit optimum wordt echter ook beïnvloed door licht en temperatuur, waardoor deze verschuift door het jaar heen. Bij dit optimum is niet alleen de groei optimaal, maar ook de opname van stikstof en fosfor uit het water. Figuur 2.1 laat een voorbeeld zien van de afhankelijkheid van de groeisnelheid van de biomassadichtheid. De optimale groeisnelheid is in het voorbeeld 50 g DW/m² en bij deze dichtheid vindt ook maximale opname van stoffen uit het water plaats. De ligging van het maximum hangt af van de temperatuur, de hoeveelheid licht, de nutriëntenconcentraties en de kroossoort.



Figuur 2.1 Voorbeeld van het effect van biomassadichtheid (in g DW/m²) op de groeisnelheid (uitgedrukt in g DW/m².d en in 1/d)

3 Zuivering met kroos

In dit hoofdstuk worden aspecten beschreven die te maken hebben met het inzetten van kroos als zuiveringsmachine. Wat zijn de zuiveringsrendementen die in de praktijk worden gehaald op (ruw) afvalwater? Welke soorten kunnen we gebruiken? Wat voor type zuiveringssysteem werkt het best? Hoe zit het met economische aspecten?

3.1 Soortkeuze

Bij proeven waarbij verschillende soorten werden gekweekt op kunstmatig gemaakt huishoudelijk afvalwater, bleek dat *Lemna gibba* en *Spirodela polyrhiza* het best groeiden ([25]). De overige geteste soorten (*Lemna minor*, *Lemna trisulca* en *Wolffia arrhiza*) groeiden aanzienlijk minder snel of helemaal niet. Het is niet duidelijk in hoeverre dit ook geldt voor effluent van rwzi's.

3.2 Verhouding N/P

De verhouding tussen N en P in het weefsel van kroos varieert per soort en is ook afhankelijk van de concentraties in het water waarop het kroos groeit. Enkele metingen wijzen uit dat de verhoudingen variëren tussen 4:1 en 10:1 (N:P). Dit betekent dat het zuiveringsrendement voor N of P bij een *relatieve* overmaat ten opzichte van het andere nutriënt, daalt. Bij een relatieve overmaat aan fosfaat, kan *Azolla* worden gebruikt. Deze plant leeft in symbiose met *Anabaena*, een cyanobacterie die stikstof uit de lucht fixeert. De groeisnelheid van *Azolla* is daardoor onafhankelijk van de concentratie van stikstofverbindingen in het water ([10]).

3.3 Zuiveringsrendementen

Kroos is in staat om stoffen verregaand uit het water op te nemen. Uit een studie naar de opname van stoffen uit voorbehandeld afvalwater bleek dat *Lemna gibba* in staat was om stoffen tot 100 % op te nemen (zie Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Opname en verwijderingspercentages na een verblijftijd van 8 dagen ([14])

Parameter	Oorspronkelijk	Na 8 dagen	Verwijdering (%)
Zuurstof (mg/l)	0,46	0,58	-26 %
Biologisch Zuurstofverbruik (mg O ₂ /l)	320	30	91 %
Chemisch Zuurstofverbruik (mg O ₂ /l)	800	88	89 %
Ortho-fosfaat (mg P/l)	1,5	0,53	65 %
Totaal-fosfor (mg P/l)	11,0	6,20	44 %
Ammonium (mg N/l)	10,0	2,0	80 %
Nitraat (mg N/l)	8,32	0,0	100 %
Koper (µg/l)			100 %
Lood (µg/l)			100 %
Zink (µg/l)			93,6 %
Cadmium (µg/l)			66,7 %
Fecale coliforme bacteriën			99,8 %

De relatief lage opname van fosfor in dit voorbeeld is te verklaren uit de relatief hoge concentratie ten opzichte van de ammonium- en nitraatconcentratie (zie paragraaf 3.2). De verhouding tussen N en P is in dit afvalwater 1,7:1.

In andere experimenten zijn weer andere verwijderingspercentages gevonden: 77 % voor P en 94 % voor N-Kjeldahl (*Lemna gibba*, [46]) en 97 % voor P (*Spirodela polyrhiza*, [44]). De verwijderingspercentages hangen vanzelfsprekend sterk af van de samenstelling van het afvalwater, de verblijftijd, de dichtheid van de planten, de instraling en de temperatuur.

Verwijdering van N en P gebeurt in een kweekstelsel niet alleen door opname door kroos. Ook opname door bacteriën in de biofilm op de fronds en de wortels van het kroos en de wanden en de bodem van het kweekstelsel speelt een rol, evenals sedimentatie van aan deeltjes gebonden N en P ([25], [46]). In het geval van stikstof speelt nitrificatie gevolgd door denitrificatie een rol. De bijdrage van de biofilm en eventueel nitrificatie-denitrificatie is 35-50 % voor N en 18-71 % voor P ([25], [46]). Denitrificatiesnelheden variëren tussen 10 en 50 mg N/m².d en dat is laag ten opzichte van denitrificatie in natuurlijke sedimenten.

Opnamesnelheden variëren voor stikstof van 45 tot 1.670 mg N/m².d en voor fosfor van 8 tot 220 mg P/m².d ([9], [25], [49]). Typische nutriëntenconcentraties in kroos gekweekt op ruw rioolwater liggen in de orde van 22 tot 63 g N/kg DW en 3 tot 14 g P/kg DW. In experimenten met *S. polyrhiza* is gevonden dat de fosforconcentratie in de planten direct gerelateerd is aan de concentratie van ortho-fosfaat in het water tot een concentratie van 2,0 mg P/l ([44]).

Dit betekent dat *S. polyrhiza* dat groeit op water met meer dan 2,0 mg P/l geen extra fosfaat opneemt (luxeopname).

3.3.1 Zware metalen

Lemna gibba is in staat goed metalen te verwijderen (ijzer, zink, nikkel, chroom, mangaan en kobalt, [21]). *Azolla caroliniana* neemt kwik en chroom III en VI gemakkelijk op uit afvalwater, hoewel kwik een duidelijk groeiremmend effect heeft. 75 % Tot 93 % van het kwik werd verwijderd na 12 dagen. Voor chroom III en VI was dat respectievelijk 74 tot 90 % en 84 tot 100 % ([5]). In een vergelijkende studie met 5 waterplanten, waaronder *L. minor*, *A. pinnata* en *S. polyrhiza* bleek dat metalen opgenomen worden in de volgende volgorde van affiniteit: Fe > Cr > Cu > Cd > Zn > Ni. *L. minor* en *A. pinnata* waren iets beter in staat om metalen op te nemen dan *S. polyrhiza*. Optimale opname werd bereikt bij een verblijftijd van 20 dagen ([45]).

3.3.2 Pathogenen

Verwijdering van pathogenen is minder dan bij vergelijkbare algenkweeksystemen, omdat UV-licht, een belangrijke factor in desinfectie, niet kan doordringen onder het kroosdek ([25], [49]). Metingen in het effluent van de kweekvijver zijn nodig om te monitoren of de gewenste niveaus gehaald worden of niet. In de praktijk zijn verwijderingsconstantes van coli bacteriën gevonden van 0,7 tot 7,3 d⁻¹, afhankelijk van onder andere de temperatuur ([37]).

3.3.3 Overige stoffen

Een studie ([19]) is uitgevoerd met *Azolla* groeiend op een medium met verschillende concentraties van sulphadimethoxine (een antibioticum). Deze studie laat zien dat het antibioticum de groei van *Azolla* belemmert, maar niet verhindert. In een periode van vijf weken werd 56 % tot 89 % van het antibioticum uit het water verwijderd door opname door *Azolla*, afbraak door micro-organismen en abiotische afbraak. Hoe hoger de concentratie van het antibioticum, hoe hoger de verwijdering. Slechts een deel van het antibioticum wordt in het plantenmateriaal opgeslagen (10 % tot 40 %).

3.4 Accumulatie van stoffen

Kroos is tolerant voor hoge concentraties van nutriënten en zware metalen. De plantjes kunnen deze stoffen accumuleren. Vooral de fysiologische actieve micronutriënten als ijzer, mangaan, zink, koper en kobalt worden in hoge mate geaccumuleerd. De accumulatiefactor, dat wil zeggen de verhouding van het gehalte van het betreffende element in de plant versus het gehalte in de voedingsoplossing, is voor de genoemde elementen 10.000 tot 500.000 ([38]). Voor aluminium, titaan, tin, antimoon en fosfor is de accumulatiefactor ongeveer 10.000 en voor lood, praseodymium, cerium, calcium, cesium, molybdeen, niobium, zirkoon, yttrium, nikkel, chroom en vanadium is deze 100 tot 1.000 ([23], [38]).

Uit een proef waarin *Azolla caroliniana* is gekweekt op media met verschillende concentraties van kwik, chroom(III) en chroom(VI) bleek dat de concentratie van deze metalen in het kroos recht evenredig is met die in het medium ([5]). Dit is ook het geval met fluoride ([4]).

Kroos is ook in staat om bepaalde organische microverbindingen te accumuleren, zoals PCB's DDT en endrin ([38]).

3.5 Toxiciteit

Bij het kweken van kroos op een afvalwaterstroom moet gekeken worden naar mogelijk toxische stoffen voor kroos. Ammonium en ammoniak zijn toxisch voor kroos onder bepaalde omstandigheden. De toxiciteit hangt sterk samen met de zuurgraad van het medium. Bij een pH van 7,8 of lager zijn er in de meeste typen afvalwater geen problemen te verwachten ([6], [26]).

Lemna kan dan goed groeien bij ammoniumconcentraties tot 100 à 150 mg N/l ([25]).

Bij *S. polyrhiza* neemt de groeisnelheid af bij concentraties boven 20 mg N/l ([6]). Bij hogere pH waarden neemt de tolerantie voor ammonium snel af. Nitriet is toxisch voor *Azolla filiculoides*, evenals vluchtige organische zuren ([25]). De groei nam merkbaar af bij ammoniumconcentraties hoger dan 14 mg NH₄-N/l, maar concentraties tot vijf keer zo hoog zijn acceptabel.

Uit proeven met media met hoge concentraties kwik en chroom blijkt dat groei van *Azolla* geremd wordt door hoge concentraties van deze metalen ([5]). Deze concentraties liggen echter ver boven concentraties die gevonden worden in rwzi-effluent.

3.6 Ontwerp zuiveringssysteem

Om het contact tussen water en kroos (en de daaraan gehechte biofilms) te maximaliseren en daarmee het zuiveringsrendement te vergroten, is een kleine waterdiepte aan te bevelen.

Een verblijftijd van een dag of 3 is dan meestal voldoende ([25]) in systemen met een nutriëntengehalte van ongeveer twee keer die van wat gebruikelijk is in effluenten van rwzi's in Nederland. Dit betekent dat voor nazuivering van effluent waarschijnlijk volstaan kan worden met een lagere verblijftijd van 1,5 tot 2 dagen, al is dat sterk afhankelijk van temperatuur, lichtintensiteit en plantdichtheid.

De beste zuivering wordt gevonden in propstroomsystemen ten opzichte van volledig gemengde systemen ([25]).

Een oogstschema dat de groei maximaliseert is noodzakelijk en het oogstschema moet aangepast worden aan de groeisnelheid. De verdubbelingsnelheid zou moeten liggen tussen 2 en 3,5 dagen ([25]). In de praktijk is eens per drie dagen verwijderen van de helft van de biomassa een praktische optie. Hiermee blijft het water voor 100 % bedekt, omdat kroos zich zal uitspreiden. Hierdoor wordt voorkomen dat in de "open" plekken algen gaan groeien.

Wel moeten mogelijk maatregelen genomen worden om opstuwning door wind te voorkomen. De oogstfrequentie zal afhangen van het seizoen.

Als kroos geschikt blijkt te zijn voor het zuiveren van (voorgezuiverd) afvalwater, dan kan een geheel nieuw zuiveringsconcept met kroos worden ontwikkeld. Kroosvijvers kunnen daarbij het best worden gecombineerd met een anaërobe voorzuivering. Een dergelijk systeem is effectiever dan een systeem waarbij kroos wordt gevoed met alleen voorbezonden ruw afvalwater.

Voordelen van een combinatie met een anaërobe voorzuivering zijn ([19]):

- Het ontwerp van de kroosvijvers kan volledig worden afgestemd op het verwijderen van nutriënten en pathogenen en niet op het verwijderen van organisch materiaal en het inbrengen van voldoende zuurstof. Dit zal leiden tot een aanzienlijke reductie van de verblijftijd en daarmee op het benodigde oppervlak
- Versnelde opname van nutriënten kan worden bewerkstelligd als de hoeveelheid organisch materiaal in het water sterk is gereduceerd
- Anaërobe voorzuivering zorgt voor het vloeibaar maken van organisch materiaal. Hierbij wordt organisch gebonden stikstof en fosfor gemineraliseerd en komt vrij voor kroosgroei
- Anaërobe technologie gecombineerd met krooskweek kan naar believen worden geschaald, waardoor de techniek geschikt is voor zowel grote als kleine afvalwaterstromen. Decentraal zuiveren heeft als voordeel dat er minder dure riolering nodig is

3.7 Economische aspecten

3.7.1 Hergebruik nutriënten

Op dit moment is er nog genoeg winbaar fosfaat om aan de vraag vanuit bijvoorbeeld de landbouw te voldoen. De verwachting is echter dat goedkoop winbaar fosfaat de komende 50 jaar steeds zeldzamer wordt ([13]) en uiteindelijk verdwijnt. We doen er goed aan dit essentiële element nu al zoveel mogelijk te winnen uit afval(water) en te hergebruiken om over 50 jaar over voldoende uitontwikkelde technieken te beschikken om over genoeg fosfaat te kunnen blijven beschikken.

3.7.2 Productie organische stoffen

Kroos produceert per oppervlakte-eenheid tien keer zoveel eiwitten dan soja ([19]) en is daarom zeer interessant voor de productie van veevoer of als supplement voor humane voeding, bijvoorbeeld voor ruimtereizen of ruimtekolonies ([24]).

3.7.3 Hergebruik water

Nu al komt het voor dat er in warme zomers een watertekort ontstaat in Nederland. Hoewel steeds meer wordt ingezet op het langer vasthouden van water in de haarvaten van de watersystemen, lukt dat niet overal en voldoende. Onvoldoende water in vaarroutes kan grote economische schade betekenen. Rwzi's zijn een bron van continue wateraanvoer door het jaar heen. De kwaliteit van dit water is voor veel toepassingen echter niet voldoende. Een goedkope manier van opwaardering van dit water is daarom noodzakelijk. Ecologische waterzuiverings-systemen, zoals zuiveringsmoerassen, kunnen hiervoor uitermate geschikt zijn ([42]), maar als men hergebruik van water wil combineren met hergebruik van nutriënten en het opwekken van energie met biomassa, dan is de ontwikkeling van andere systemen noodzakelijk. Nabehandelen met behulp van algen of kroos is dan een uitstekende optie.

3.7.4 Energieproductie

Lemna levert een biomassaproductie van 10 tot 40 ton DW/ha.j op ([15]) en heeft een (door vergisting tot biogas) winbare energie-inhoud van $13,5 \pm 0,7$ kJ/g DW ([15]). Dit betekent dat *Lemna* tussen 128 tot 568 GJ/ha.j aan energie als biogas kan opleveren.

De huidige generatie rwzi's gebruiken veel energie (ongeveer 20 kWh/i.e. volgens gegevens van het CBS). We moeten er rekening mee houden dat fossiele energie in de nabije toekomst snel fors duurder gaat worden ([18]) en dat we moeten overschakelen naar niet-fossiele brandstoffen en energieconsumptie drastisch moeten verminderen. Groene waterzuiveringstechnieken, zoals zuivering met kroos, passen binnen een doelstelling van verminderde energieconsumptie en opwekking van duurzame energie.

3.7.5 Kosten en baten

Volgens de Wereldbank kan een land maximaal 3 % van zijn Bruto Nationaal Product (BNP) uitgeven aan milieumaatregelen, waaronder afvalwaterbehandeling ([19]). Ontwikkelingslanden, maar ook armere landen in de eerste en tweede wereld kunnen realistisch gezien zich geen riolerings- en afvalwaterbehandelingsstelsel veroorloven die wij thans in Nederland kennen. Ook in Nederland zou, gezien de economische situatie anno 2010 en de benodigde bezuinigingen voor de komende jaren, verlaging van de kosten voor afvalwaterverzameling en -behandeling, een welkome optie zijn.

De combinatie van krooskweek op (voorbehandeld) afvalwater en viskweek wordt al op verschillende plekken in de praktijk gebracht, zoals in Bangladesh ([19]). Een systeem in Bangladesh ontvangt ruw afvalwater van 3.500 mensen en het water heeft een verblijftijd van 21 dagen. Het systeem produceert 12 ton vis per jaar, zodat het systeem per jaar \$ 2.000 per hectare winst oplevert. Een haalbaarheidsstudie van de Wereldbank voor Pondicheri, een stad met 35.000 inwoners in India, wees uit dat een krooskweekstelsel gecombineerd met viskweek 80 ton kroos, 30 tot 40 ton vis en 150.000 m³ methaangas oplevert.

Afvalwaterbehandeling in combinatie met kweek van biomassa en energieproductie is dus een economisch aantrekkelijke optie, maar dit zal alleen zo zijn in gebieden met voldoende ruimte.

Als kroos tot veevoerbrokken wordt geperst, levert dit EUR 347,50 per ton op (prijspeil oktober 2009, ([22])).

4 Toepassingen van kroos

Als kroos gekweekt wordt op afvalwater of effluent, moet deze wel op een nuttige manier kunnen worden toegepast voor een optimaal economisch rendement. De mogelijkheden lijken groot. *Azolla* wordt zelfs genoemd als waardevol voedsel supplement tijdens ruimtereizen of voor kolonies op Mars ([24]). In dit hoofdstuk worden de verschillende mogelijkheden verkend.

4.1 Eiwitgehalte en waarde als veevoer

Kroos dat gekweekt is op afvalwater kan tot drie keer zoveel eiwitten bevatten dan kroos dat groeit op oppervlaktewater ([9], [14], [21]). De samenstelling van de eiwitten is veel gunstiger voor gebruik als veevoer dan die van andere planten, omdat kroos relatief meer lysine en methionine bevat. Het eiwitgehalte neemt toe bij toenemende nutriëntenrijkdom in het water ([14]). In een proef met *Lemna obscura* (een soort uit Amerika), is een lineair verband gevonden tussen het stikstofgehalte (tussen 0 en 55 mg N/l) in het afvalwater en het eiwitgehalte in het gekweekte kroos (tussen 9 % en 16 %) ([29]).

Kroos produceert per hectare tien keer zoveel eiwit als soja en is daarom een uitstekend organisme voor de productie van bijvoorbeeld veevoer. Er zijn wel drie punten die aandacht behoeven ([19]):

1. Kroos absorbeert zeer goed zware metalen en sommige andere toxische stoffen. Als kroos gebruikt gaat worden als veevoer, zal deze gekweekt moeten worden op water waarin de concentraties van deze stoffen niet heel hoog zijn. In effluent van Nederlandse rwzi's zal dit waarschijnlijk geen probleem opleveren, maar het zal in de praktijk moeten worden getest
2. Kroos heeft een hoog vochtgehalte (95 %) en moet na oogsten snel worden gedroogd of anderszins behandeld om de kwaliteit als voer te behouden (zie ook [22]). Snelle droog- of inkuilsystemen zullen moeten worden geïmplementeerd of krooskweken op effluent moet worden geïncorporeerd in een agrarisch systeem waarbij nat kroos direct wordt gebruikt als bijvoorbeeld visvoer
3. De genera *Lemna* en *Spirodela* kunnen hoge concentraties calcium oxalaat bevatten. De concentraties kunnen te hoog zijn voor menselijke en dierlijke consumptie. Gemengd met ander voer zijn geen negatieve effecten te verwachten

Geogst kroos uit oppervlaktewater heeft ongeveer dezelfde voedingswaarde als bierbostel en raapzaadschroot ([22]), maar dit kan per locatie sterk verschillen. Verondersteld wordt dat dit te maken heeft met de oogstmethode. Kroos bevat relatief veel onverzadigde vetzuren en meer omega 3-vetzuren dan soja.

Ziektekiemen werden in tot brokken geperst kroos niet aangetroffen. Mogelijk worden ziektekiemen gedood tijdens het droog- en persproces, maar dit is onzeker ([22]). Gehaltes van zware metalen in kroos gekweekt op oppervlaktewater blijven ver onder de normen van de warenwet en de veiligheidsnorm ([22]).

Ook *Azolla* heeft een hoog eiwitgehalte. *Azolla pinnata* heeft een ruw eiwitgehalte van ruim 21 % (op drooggewicht basis) en een energie-inhoud van 2.039 kcal/kg.

4.2 Toepassing als diervoer

De combinatie van krooskweek op afvalwater en viskweek wordt al op verschillende plekken in de praktijk gebracht, zoals in Bangladesh ([19]). *Lemna minor* kan gebruikt worden tot 20 % in het dieet van karpers (*Cyprinus carpio*) zonder significante, negatieve effecten op de groei in vergelijking met het standaard voer (dat 32 % proteïnen bevat) ([48]).

Azolla is een waardevolle toevoeging aan het dieet van varkens tot een aandeel van 10 % tot 15 %. Een hoger aandeel beïnvloedt de verteerbaarheid van voedsel negatief ([30]). De samenstelling van de aminozuren in *Azolla* komt sterk overeen met die van de dieetbehoefte van varkens.

Kippen die 5 % tot 25 % van hun standaard voer (sojabonen en vismeel) vervangen kregen door kroos (*Lemna*) legden net zoveel eieren van dezelfde kwaliteit als kippen die geen *Lemna* kregen. Bij sommige kippen nam het eiwitgehalte in de eieren toe met toenemende *Lemna*-gehalten in het voer. Vleeskippen deden het tot 15 % *Lemna* in hun voer net zo goed als vleeskippen zonder *Lemna* in het voer ([34]). Ook *Azolla* is een goed voer voor kippen. Toevoeging van 10 % *Azollameel* aan voer voor kippen die gehouden worden voor de eierproductie, zorgde voor een betere voedselconversie ([3]).

De berekende voederwaarde van uit oppervlaktewater geogst kroos ligt rond 800 Voeder Eenheden Melkvee. De darmverteerbaarheid rond 100 g/kg DS en de Onbestendig Eiwit Balans tussen 55 en 85 g/kg DS ([22]). Tot brokken geperst kroos wordt graag en gemakkelijk door koeien gegeten. De voederwaardeprijs (prijspeil oktober 2009) is EUR 347,50 per ton ([22]).

Ondanks de eigenschap van kroos om zware metalen te accumuleren, worden geen toxische effecten verwacht wanneer kroos tot veevoer wordt verwerkt ([32]).

4.3 Toepassing als energiegewas

Lemna levert een biomassaproductie van 10 tot 40 ton DS/ha.j op ([15]) en heeft een (door vergisting tot biogas) winbare energie-inhoud van $13,5 \pm 0,7$ kJ/g DS ([15]). Dit betekent dat *Lemna* tussen 128 tot 568 GJ/ha.j aan energie als biogas kan opleveren. Door de snelle groei en de eenvoudige oogstbaarheid is kroos een aantrekkelijker energiegewas dan bijvoorbeeld algen.

5 Vragen voor de experimenten

In de literatuur zijn geen voorbeelden gevonden van experimenten met kroos dat groeit op rwzi-effluent en ook niet van kroos dat groeit op afvalwater in Nederland. Dit betekent dat de literatuurstudie geen antwoord kan geven op alle vragen die in het projectplan zijn gedefinieerd.

Vragen uit het projectplan die in deze literatuurstudie worden beantwoord zijn:

- Hoe hangt de groeisnelheid af van de nutriëntenconcentraties, temperatuur en lichtinstraling?
- Welke groei mogen we verwachten in de verschillende jaargetijden en is er dan nog sprake van waterzuivering?

Daarnaast is in deze literatuurstudie veel achtergrondinformatie opgenomen die van waarde is voor het opzetten van de experimenten.

Vragen die nog open staan hebben vooral betrekking op groei van kroos specifiek op Nederlands rwzi-effluent. Deze vragen zijn:

- Laboratoriumexperimenten:
 - Welke kroossoort groeit het best op effluent?
 - Wat is de effectiviteit van verwijdering van nutriënten uit effluent?
 - Wat is de effectiviteit van verwijdering van andere verontreinigende stoffen uit effluent?
 - Wat is de maximale groeisnelheid op effluent?
 - Treden er groeilimitaties op bij kweken op effluent veroorzaakt door gebrek aan stoffen (anders dan nutriënten, zonlicht en temperatuur)?
- Pilot:
 - Dag-nachtritmië. Welke invloed heeft dit op de groei en opname van nutriënten?
 - Zomer-winter. Welke invloed heeft het jaargetijde op de groei en de opname van nutriënten in de praktijk? Is de groei voornamelijk licht- of temperatuurgelimiteerd?
 - Robuustheid van het systeem. Hoe reageert het systeem op wisselende effluentsamenstelling (bijvoorbeeld na hevige regenbuien)?
 - Gevoeligheid voor predatie en concurrentie. Is het systeem gevoelig voor predatie door planteneterende organismen of parasieten of voor concurrentie van andere waterplanten of algen? En zo ja, welke maatregelen zijn effectief?
 - Welke kinderziektes komen we tegen en wat is daaraan te doen?

- Kroosgeschiktheidsanalyses:

Technisch

- Wat is de voederwaarde van kroos gekweekt op effluent en varieert deze per kroossoort? Tot nu toe kon alleen de voederwaarde worden afgeleid op basis van in vitro-voederwaarde en verteringsanalyses (nat chemisch) en niet op basis van in vitro-analyses (voederproef met dieren).
- Kan met het persen van kroos het percentage drogestof worden vergroot van 4 % à 5 % tot 25 % à 30 %?
- Leidt persen van vers kroos tot voederwaarde- en of milieuverliezen?
- In welk stadium kan kroos het beste geoogst worden?
- Hoe kan kroos het beste geoogst worden?
- Is vers kroos te conserveren en welke toevoegmiddelen zijn daarbij het meest effectief?
- In hoeverre beïnvloedt het conserveren de voederwaarde en de vertering van kroos?
- Is kroos interessant als co-vergistingsproduct?

Daarnaast zal in een aparte deelstudie antwoord worden gegeven op de volgende vragen:

- Wet en regelgeving
 - Aan welke product- en toeleveringseisen moet kroos voldoen bij industriële verwerking, zowel voor veevoer als voor (co-)vergisting?
 - Aan welke product- en toeleveringseisen moet kroos voldoen bij rechtstreekse verwerking in de primaire landbouw, zowel voor veevoer als voor co-vergisting?
- Transitie
 - Welke perspectieven zijn er voor kroosverwerking als veevoer in samenwerking met landbouw, MKB en Industrie?
 - Welke perspectieven zijn er voor kroosverwerking als vergistingsmateriaal in samenwerking met landbouw, MKB en Industrie?
 - Hoe kunnen deze perspectieven worden opgeschaald tot een volwaardige afzet van kroos als veevoer?

6 Literatuur

- [1]. Al Khateeb, N. (ongedateerd). Duckweed use for sewage treatment and fodder production in Palestine.
- [2]. Al-Nozaily, F.A. & G. Alaerts (2002). Performance of duckweed-covered sewage lagoons in Sana'a, Yemen, depending on sewage strength. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 51.3: 173-182.
- [3]. Alalade, O.A. & E.A. Iyayi (2006). Chemical composition and the feeding value of *Azolla pinnata* meal for egg-type chickens. *Int. J. of Poultry Science* 5(2): 137-141.
- [4]. Allinson, G., F. Stagnitti, S. Colville, J. Hill & M. Coates (2000). Growth of floating aquatic macrophytes in alkaline industrial wastewaters. *Journal of Environmental Engineering*. 126(12): 1103-1107.
- [5]. Bennicelli, R., Z. Stepniewska, A. Banach, K. Szajnocha & J. Ostrowski (2004). The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals (Hg(II), Cr(III), Cr(VI)) from municipal waste water. *Chemosphere* 55(2004): 141-146.
- [6]. Caicedo, J.R., N.P. van der Steen, O. Arce & H.J. Gijzen (2000). Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrhiza*). *Water Research* 34(15): 3829-3835.
- [7]. Chaiprapat, S. (2002). Modeling nutrient uptake process and growth kinetics of duckweed *Spirodela punctata* 7776 for nutrient recovery from swine wastewater. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University.
- [8]. Chaiprapat, S., J.J. Cheng, J.J. Classen & S.K. Liehr (2005). Role of internal nutrient storage in duckweed growth for swine wastewater treatment. *Transactions of the ASAE* vol. 48(6): 2247-2258.
- [9]. Costa, M.L., M.C. Santos & F. Carrapiço (1999). Biomass characterization of *Azolla filiculoides* Brown in natural ecosystems and wastewater. *Hydrobiologia* 415: 323-327.
- [10]. Costa, M.L., M.C.R. Santos, F. Carrapiço & A.L. Pereira (2009). *Azolla-Anabaena's* behaviour in urban wastewater and artificial media – Influence of combined nitrogen. *Water Research* 43(2009): 3743-3750.
- [11]. Driever, S.M., E.H. van Nes & R.M.M. Roijackers (2005). Growth limitation of *Lemna minor* due to high plant density. *Aquatic Botany* 81: 245-251.
- [12]. Dwivedi, A.K. (2001). Wastewater disposal through duckweed farming. 27th WEDC Conference, Lusaka, Zambia, 2001.
- [13]. EcoSanRes (2008). Closing the loop on phosphorus.
- [14]. El-Kheir, W.A., G. Ismael, F.A. El-Nour, T.Fawfik & D.Hammad (2007). Assessment of the efficiency of duckweed (*Lemna gibba*) in wastewater treatment. *International Journal of Agriculture & Biology* 9(5): 681-687.

- [15]. Fedler, C.B., R.D Hammond, P. Chennupati & R. Ranjan (2007). Biomass energy potential from recycled wastewater. Texas Tech University.
- [16]. Fedler, C.B., J.L.Hanson, M. Beruvides, J. Simonton & C. Lyford (2008). Utilizing Agricultural Biomass in Energy Production and Economic Development. Texas Tech University.
- [17]. Ferdoushi, Z., F. Haque, S. Khan & M. Haque (2008). The effects of two aquatic floating macrophytes (*Lemna* and *Azolla*) as biofilters of nitrogen and phosphate in fish ponds. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 8: 253-258.
- [18]. Froggatt, A. & G. Lahn (2010). Sustainable Energy Security. Strategic risks and opportunities for business. Lloyd's 360° risk insight. Lloyd's, Chatham House.
- [19]. Forni, C., A. Cascone, M. Fiori & L. Migliore (2002). Sulphadimethoxine and *Azolla filiculoides* Lam.: a model for drug remediation. Water Research 36(2002): 3398-3403.
- [20]. Gijzen, H.J. (2001) Low cost wastewater treatment and potentials for re-use. A cleaner production approach to wastewater management. IHE, Delft.
- [21]. Hammouda, O., A. Gaber & M.S. Abdel-Hameed (1995). Assessment of the effectiveness of treatment of wastewater-contaminated aquatic Systems with *Lemna gibba*. Enzyme and Microbial Technology 17: 317-323.
- [22]. Holshof, G., I.E. Hoving & E.T.H.M. Peeters (2009). Eendenkroos: van afval tot veevoer. Rapport 306. Livestock Research Wageningen UR. Lelystad, december 2009.
- [23]. Kara, Y., D. Başaran, I. Kara, A. Zeytunluoğlu & H. Genç (2003). Bioaccumulation of nickel by aquatic macrophyta *Lemna minor* (Duckweed). International Journal of Agriculture & Biology 5(3): 281-283.
- [24]. Katayama, N., M. Yamashita, Y. Kishida, C. Liu, I. Watanabe & H. Wada (2008). *Azolla* as a component of the space diet during habitation on Mars. Acta Astronautica 63(2008): 1093-1099.
- [25]. Kitoh, S., N. Shiomi & E. Uheda (1993). The growth and nitrogen fixation of *Azolla filiculoides* Lam. In polluted water. Aquatic botany 46(1993): 129-139.
- [26]. Körner, S., S.K. Das, S. Veenstra & J.E. Vermaat (2001). The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. Aquatic Botany 71(2001): 71-78.
- [27]. Körner, S., J.E. Vermaat & S. Veenstra. The capacity of duckweed to treat wastewater: ecological considerations for a sound design. J. Environ. Qual. 32:1583–1590 (2003).
- [28]. Landesman, L. (2000). Effects of herbivory and competition on growth of Lemnaceae in systems for wastewater treatment and livestock feed production. A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Louisiana at Lafayette In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy
- [29]. Landesman, L., N.C. Parker, C.B. Fedler & M. Konikoff (2005). Modeling duckweed growth in wastewater treatment systems. Livestock Research for Rural Development 17(6).

- [30]. Leterme, P., A.M. Londoño, J.E. Muñoz, J. Suárez, C.A. Bedoya, W.B. Souffrant & A. Buldgen (2009). Nutritional value of aquatic ferns (*Azolla filiculoides* Lam. and *Salvinia molesta* Mitchell) in pigs. *Animal Feed Science and Technology* 149(2009): 135-148.
- [31]. Maloszewski, P., P. Wachniew & P. Czupryński (2006). Hydraulic characteristics of a wastewater treatment pond evaluated through tracer test and multi-flow mathematical approach. *Polish journal of environmental studies* 15(1):105-110.
- [32]. Mibagu, I.G. & M.A. Adeniji. The nutritional content of duckweed (*Lemna paucicostana* hegelm) in the Kainji lake area, Nigeria. *Aquatic Botany* 27: 357-366.
- [33]. Miranda, G., A. Quiroz & M. Salazar (2000). Cadmium and lead removal from water by the duckweed *Lemna gibba* L. (Lemnaceae). *Hidrobiologica* 10(1): 7-12.
- [34]. PRISM (1987). Safety and efficacy of sewage grown Lemna as protein source for chickens.
- [35]. Roovers, S. (2005). Kroos en andere (ongewenste) waterplanten. Van beschrijving tot beheersstrategie. Hogeschool Zeeland.
- [36]. Scheffer, M., S. Szabo, A. Gragnani, E.H. van Nes, S. Rinaldi, N. Kautsky, J. Norberg, R.M.M. Roijackers & R.J.M. Franken (2003). Floating plant dominance as a stable state. *PNAS*, april 1, 2003, vol. 100 no. 7 4040-4045.
- [37]. Steen, P. van der, A. Brenner, J. van Buuren & G. Oron (1999). Post-treatment of UASB reactor effluent in an integrated duckweed and stabilization pond system. *Wat. Res.* 33(3): 615-620.
- [38]. STOWA (1992). Ontstaan en bestrijden van deklagen van kroos. 1. Literatuur. STOWA rapport 92-09.
- [39]. STOWA (1992). Ontstaan en bestrijden van deklagen van kroos. 2. Modelmatige benadering van de kroosontwikkeling en beoordeling van beheersbaarheid. STOWA rapport 92-10.
- [40]. STOWA (1997). Ontstaan en bestrijden van deklagen van kroos. 3. Inventarisatie en beoordeling van verwerkingsmogelijkheden voor kroos. STOWA rapport 97-17.
- [41]. STOWA (1997). Ontstaan en bestrijden van deklagen van kroos. 4. Praktijkonderzoek naar maatregelen tegen kroosdekken. STOWA rapport 97-18.
- [42]. STOWA (2005). Waterharmonica. De natuurlijke schakel tussen waterketen en watersysteem. STOWA rapport 2005-18.
- [43]. STOWA (2006). Quick Scan kostenscenario's vergaande zuivering RWZI en KRW. STOWA rapport 2006-08.
- [44]. Sutton, D.L. & H. Ornes (1977). Growth of *Spirodela polyrhiza* in static sewage effluent. *Aquatic Botany* 3 (1977): 231-237.
- [45]. Upadhyay, A.R., V.K. Mishra, S.K. Pandey & B.D. Tripathi (2007). Biofiltration of secondary treated municipal wastewater in a tropical city. *Ecological Engineering* 30(2007): 9-15.
- [46]. Vermaat, J.E. & M. Khalid Hanif (1998). Performance of common duckweed species (Lemnaceae) and waterfern *Azolla filiculoides* on different types of waste water. *Wat. Res.* 32(9): 2569-2576.

- [47]. Wedge, R.M. & J.E. Burris (1982). Effects of light and temperature on duckweed photosynthesis. *Aquatic Botany* 12(1985): 133-140.
- [48]. Yilmaz, E., I. Akyurt & G. Günel (2004). Use of Duckweed, *Lemna minor*, as a protein feedstuff in practical diets for common carp, *Cyprinus carpio*, Fry. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 4: 105-109.
- [49]. Zimmo, O. (2003). Nitrogen transformations and removal mechanisms in algal and duckweed waste stabilisation ponds. Dissertation submitted in fulfilment of the requirements of the Academic Board of Wageningen University and the Academic Board of the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering for the Degree of doctor to be defended in public on Tuesday, 25 March 2003 at 15:00 h in Delft, The Netherlands.