



# *Van zuiveren naar oogsten*

Rapportage fase 2: 2018 - 2022

Initiatiefnemers

Radboud Universiteit



Waterschap  
Rivierenland



VanWaarde

|                       |                                                                                                                                              |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Titel rapport:        | Van zuiveren naar oogsten. Rapportage fase 2 (2018 - 2022)                                                                                   |
| Auteurs:              | Floor van Schie, Lotte Dietz, Tom van der Meer, Lisanne Hendriks, Hugo Beekelaar, Judith van de Geest, Judith Hoogenboom, Eric van der Zandt |
| Opdrachtgevers:       | Waterschap Rivierenland, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier                                |
| Voor meer informatie: | <a href="#">Klik hier</a> voor meer informatie<br>Email: <a href="mailto:lotte.dietz@van-waarde.com">lotte.dietz@van-waarde.com</a>          |



# Inhoudsopgave

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Leeswijzer                                                          | 6  |
| Acroniemen                                                          | 7  |
| Samenvatting                                                        | 9  |
| 1. Wat is de visie van Aquafarm?                                    | 13 |
| Aquafarm: van zuiveren naar oogsten                                 | 13 |
| Onze visie                                                          | 13 |
| 2. Waarop geeft Aquafarm een antwoord?                              | 15 |
| De opgaven waar de waterschappen voor staan                         | 15 |
| Waar staan we nu met die opgaven?                                   | 15 |
| Aquafarm: een nieuw licht op zuiveren                               | 19 |
| 3. De theorie achter Aquafarm                                       | 21 |
| Het Aquafarm principe werkt                                         | 21 |
| Plek in de zuivering: eerst focus op nazuiveren                     | 22 |
| Uitvergroten van vier natuurlijke krachten                          | 24 |
| Kracht 1: Het zelf opruimend vermogen (slibreductie)                | 25 |
| Kracht 2: Het zelfreinigend vermogen (afvalwater tot KRW-kwaliteit) | 25 |
| Kracht 3: Het vastleggen van bouwstenen (broeikasgasreductie)       | 26 |
| Kracht 4: De natuur kent geen verspilling (circulariteit)           | 27 |
| 4. De potentie van Aquafarm als nazuivering                         | 29 |
| 5. Hoe we verder gaan: word Aquafarmer!                             | 41 |
| Van <i>proof of principle</i> naar demonstratie                     | 41 |
| Bronvermelding                                                      | 47 |
| Bijlagen index                                                      | 51 |
| Bijlage 1 - Uitgebreide samenvatting van experimenten fase 2        | 53 |
| Bijlage 2 - Rapport Aquafarm Praktijkproef 2.0                      | 63 |
| Bijlage 3 - Aquafarm in vergelijking met conventionele technieken   | 69 |
| Bijlage 4 - Lijst publicaties Aquafarm Tom en Lisanne               | 70 |

# Leeswijzer

Beste lezer,

Voor je ligt de waterschapsrapportage van Aquafarm. Deze rapportage is geschreven voor geïnteresseerden of betrokkenen bij het zuiveren van afvalwater in Nederland. Het idee van Aquafarm is in 2014 ontstaan en sinds die tijd hebben waterschappen en universiteiten de krachten gebundeld om onderzoek te doen naar dit natuurlijke en circulaire zuiveringsconcept. Dit rapport is de afsluiting van een intensieve onderzoeksfase. Alle opgedane kennis laat zien dat Aquafarm een belangrijke oplossingsrichting kan zijn voor de opgaven waar de waterschappen voor staan. Hiermee hopen we andere waterschappen te enthousiasmeren om deel te nemen aan Aquafarm en te investeren in de totstandkoming van een natuurlijke en circulaire zuivering.

## Wat ga je lezen?

We vertellen je graag wat Aquafarm is ([hoofdstuk 1](#)) en op welke vragen en uitdagingen Aquafarm een antwoord kan zijn ([hoofdstuk 2](#)). We nemen je kort mee in de theorie achter Aquafarm ([hoofdstuk 3](#)) en staan vervolgens uitgebreider stil bij de resultaten die we tot nu toe hebben behaald en we vertalen deze resultaten naar de potentie van Aquafarm voor de opgaven waar de waterschappen voor

staan ([hoofdstuk 4](#)). Tot slot beschrijven we hoe we het vervolgtraject van Aquafarm zien en wat hiervoor nodig is, en nodigen je uit om actief mee te doen in Aquafarm ([hoofdstuk 5](#)).

## Hoe kun je dit rapport het beste lezen?

Heb je weinig tijd en ben je op zoek naar de essentie? Lees dan de samenvatting en de hoofdstukken 1, 4 en 5.

Als je vooral geïnteresseerd bent in de (theoretische) achtergrond en de onderzoeksresultaten, lees dan hoofdstuk 3 en 4 en eventueel ook de bijlage met de uitgebreide onderzoeksresultaten. In de tekst zijn de referenties weergegeven als blauwe getallen. Deze verwijzen naar de referentielijst op pagina 47.

## Wie zijn wij?

Aquafarm is een initiatief waarbij verschillende organisaties en kennisinstituten betrokken zijn. Momenteel zijn dit drie waterschappen: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR), Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) en Waterschap Rivierenland (WSRL).

Deze partijen werken mee aan de ontwikkeling van het concept en financieren het initiatief. Er wordt onderzoek gedaan in samenwerking met Wageningen Environmental Research (WEnR) en binnen de Radboud Universiteit

(RU) het Radboud Institute for Biological and Environmental Sciences (RIBES) en B-Ware Research Centre (B-Ware).

De procesregie wordt gevoerd door bureau VanWaarde. Momenteel bestaat Aquafarm uit een strategie bepalende stuurgroep en een uitvoerend kernteam (zie namen op de volgende pagina). Veel leesplezier!

Team **Aquafarm**  
Februari 2023

# Acroniemen

## Stuurgroep

- Annelies Veraart (RU)
- Eric van der Zandt (HDSR, voorzitter)
- Elvin Martha (HHNK)
- Giovanni van Keulen (WSRL)
- Judith Hoogenboom (VanWaarde)
- Tom van der Meer (WEnR)

## Kernteam

- Floor van Schie (HHNK)
- Hugo Beekelaar (HDSR)
- Judith van de Geest (VanWaarde)
- Lisanne Hendriks (RU)
- Lotte Dietz (VanWaarde)
- Nikki Dijkstra (HDSR)
- Tom van der Meer (WEnR)
- Wobke Gerritse (WSRL)

Naast bovenstaande personen, hieronder de lijst van personen die in de afgelopen jaren ook aan Aquafarm hebben bijgedragen en die wij daarvoor zeer dankbaar zijn: Ed Steenbergen (WSRL), Wim Heijbroek (HDSR), Noor Ney (HHNK), André van Aken (WSRL), Leon Lamers (RU), Floris ter Beek (VanWaarde), Emma Smits (HDSR, HHNK), Tonny Oosterhoff (HDSR), Erik Rekswinkel, Fons Smulders (RU), Piet Verdonchot (WEnR), Teunis Roelofsen (HDSR), Lara Buijs (WEnR), Tamara van Bergen (RU), Sonja Volman (RU), Koos Janssen (RU) en Harry van Zuijlen (RU).

Deze lijst is niet uitputtend, er zijn meer mensen die in de afgelopen jaren bijdragen hebben geleverd aan de ontwikkeling van Aquafarm.

|                               |                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| CH <sub>4</sub>               | Methaan                                    |
| CO <sub>2</sub>               | Koolstofdioxide                            |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Waterstofperoxide                          |
| KRW                           | Kaderrichtlijn Water                       |
| N                             | Stikstof                                   |
| N <sub>2</sub> O              | Lachgas                                    |
| P                             | Fosfor                                     |
| PAK                           | Polycyclische aromatische koolwaterstoffen |
| PHA                           | Polyhydroxyalkanoaat                       |
| RWZI                          | Rioolwaterzuiveringsinstallatie            |
| TRL                           | Technology Readiness Level                 |
| ZZS                           | Zeer zorgwekkende stoffen                  |





# Samenvatting

Aquafarm is ontstaan vanuit het idee dat we als watersector anders moeten gaan nadenken over en kijken naar afvalwaterzuivering. De beweging die we voor ons zien, is die van zuiveren naar oogsten. Bij Aquafarm zien we afvalwater namelijk als een rijke stroom met waardevolle grondstoffen en een die we met 'nature-based' technologie kunnen oogsten, met schoon water als resultaat. Met dit idee zijn drie waterschappen en twee kennisinstellingen in 2014 op weg gegaan; deze rapportage presenteert de veelbelovende resultaten die tot nu toe zijn behaald.

De visie is dat Aquafarm de huidige zuivering gaat vervangen, waarbij alle waardevolle grondstoffen uit het water worden omgezet in planten en dieren die we weer kunnen gebruiken voor nuttige producten. De ontwikkeling van dit volledig nieuwe zuiveringsconcept duurt echter decennia. Daarom focussen we ons nu eerst op het ontwikkelen van Aquafarm als nazuiveringsstap.

## **Aquafarm als antwoord op de uitdagingen van deze tijd**

De waterschappen staan voor grote uitdagingen; verduurzamen, circulair en klimaatneutraal worden en waterkwaliteit op orde brengen. Zo moeten waterschappen in 2027 aantoonbare

Kaderrichtlijn Water (KRW)-maatregelen hebben genomen om de stikstof- en fosfaatbelasting in oppervlaktewateren sterk te verminderen. Deze nieuwe uitdagingen zijn enorm én vragen veel van de waterschappen: betere prestaties van de rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), innovatieve technieken en nieuwe partnerschappen. Conventionele zuiveringstechnieken lopen tegen hun grenzen: ze gebruiken te veel energie, maken het water niet schoon genoeg voor nieuwe of toekomstige waterkwaliteitsnormen en zijn niet circulair. Aquafarm wil een antwoord zijn op deze uitdagingen; een natuurlijk, duurzaam en circulair zuiveringsconcept.

## **Wat zegt de wetenschap?**

Bij Aquafarm geloven we erin dat we de kracht van de natuur kunnen vergroten. Aan de basis daarvan staat dat wat wij het 'Aquafarm principe' noemen: het feit dat organismen goed overleven op afvalwater en elkaar versterken in hun groei en nutriënten opname wanneer ze geschakeld zijn. Ons onderzoek heeft aangetoond dat dit principe werkt.

Vervolgens zijn we aan de slag gegaan om vier krachten verder uit te vergroten:

1) het zelfopruimend vermogen (slibreductie),

- 2) het zelfreinigend vermogen (nutriënten, broeikasgassen en microverontreinigingen),  
3) Het vastleggen van bouwstenen (emissiearm zuiveren)  
4) De natuur kent geen verspilling (circulariteit)

Bovendien versterken deze vier krachten elkaar in onderlinge samenwerking.

Planten en dieren leven (grotendeels) van water, nutriënten, koolstof en zuurstof. Zij onttrekken dit, samen met andere verontreinigingen, aan het water en zetten dit om in bouwstenen die nuttig kunnen worden toegepast en daarmee voor lange tijd worden vastgelegd. Door ze slim te schakelen en tijdig te oogsten, gebeurt dit efficiënter en sneller. De geoogste materialen kunnen worden teruggebracht als materialen in circulaire grondstofketens. Zo maken we schoon water en produceren we circulaire grondstoffen. Win - win!

## **Waar staan we nu?**

De afgelopen jaren hebben we veel onderzocht bij Aquafarm. Allereerst hebben we ons 'Aquafarm principe' onderzocht. Kloppen onze aannames over de zuiverende en zelfopruimende werking van natuurlijke systemen

voor afvalwater en slib? Nadat we het 'proof of principle' hebben geleverd, is aanvullend onderzoek gedaan naar onderdelen van ons duurzame concept.

Met deze onderzoeksresultaten is Aquafarm inmiddels voorbij de verkenningfase en is dus Technology Readiness Level (TRL) 3 [1] bereikt, hierbij is het concept bewezen. Onze praktijkproef op de RWZI in Rhenen heeft gediend om onderzoeken vanuit het lab te herhalen in een relevante omgeving. Daarmee hebben we serieuze stappen gezet in het implementeren en valideren van het prototype.

Al deze stappen hebben inzichten en resultaten opgeleverd met betrekking tot de volgende thema's.

**Waterkwaliteit:** met een Aquafarm heb je een zuivering tot ecologische KRW-kwaliteit én een slibverwerking (die de plantengroei stimuleert);

- Slib is geen afval maar voedsel voor Aquafarm. Doordat dieren slib eten, komen er meer nutriënten vrij in het water, waardoor de planten in de opvolgende schakel sneller groeien en dus meer nutriënten en bouwstenen in biomassa vastleggen. Het resultaat is meer grondstoffen en schoner water!
- Aquafarm kan vrijwel 100% van de

nutriënten stikstof (N) en fosfaat (P) uit effluent verwijderen;

- Literatuuronderzoek [2] laat zien dat er grote potentie is voor het verwijderen van micro-verontreinigingen door planten en dieren die in een Aquafarm kunnen worden ingezet.

**Duurzaam alternatief van zuiveren:** relatief kleine klimaatvoetafdruk.

- Aquafarm kan de uitstoot van koolstofdioxide en methaan- en lachgas van afvalwater beperken;
- Aquafarm verbruikt weinig energie voor een (na)zuiveringstechniek;
- Door het verminderen van de hoeveelheid nutriënten in het effluent kan ook de broeikasgasuitstoot van het oppervlaktewater bij lozingspunten verminderen.

**Circulariteit:** met Aquafarm verwachten we veel uit het water te kunnen halen dat van nut is voor de waterschappen zelf en de maatschappij.

- De biomassa groeit goed op afvalwater en neemt het teveel aan nutriënten, die we uit het watersysteem willen halen, op;
- De biomassa kan goed worden geoogst. Dit kan worden vergast of worden ingezet als grondstof in een

circulaire keten.

- Met het terugwinnen en circulair inzetten van grondstoffen verkleinen we de klimaatafdruk van de zuiveringsstap.

Met al deze gezette stappen bouwen we gestaag aan onze nieuwe blik op zuiveren. Stap voor stap ontwikkelen we duurzame alternatieven voor de huidige, conventionele manier van zuiveren op weg naar een duurzame, circulaire toekomst met Aquafarm. We hebben tot nu toe mooie resultaten behaald maar beseffen ons ook dat er nog belangrijke stappen te zetten zijn voordat Aquafarm conventionele zuiveringen volledig kan gaan vervangen.

**Waar werken we de komende periode naar toe?**

In 2022 hebben we de tweede fase van Aquafarm afgesloten met het bereiken van TRL 3 en zetten we stappen richting TRL 4-5, de ontwikkelfase. Onze onderzoeken wijzen uit dat we op het goede spoor zitten met het inzetten van natuurlijke systemen, in een gecontroleerde omgeving, voor het zuiveren van afvalwater. Hier gaan we dus mee door.

In de volgende fase gaan we inzetten op het testen van ons concept in

*// ‘We hebben tot nu toe mooie resultaten behaald maar beseffen ons ook dat er nog belangrijke stappen te zetten zijn voordat Aquafarm conventionele zuiveringen volledig kan gaan vervangen.’ //*

praktijkomstandigheden. Dit gaan we doen door ons concept naar TRL-7 te brengen. Dit betekent dat Aquafarm aan het einde van de volgende fase is getest en gedemonstreerd op een RWZI. Hiermee bewijzen we de werking in operationele omgeving en dit levert de laatste inzichten op voor definitieve toepassing.

Daarnaast doen we verder onderzoek naar vraagstukken die van belang zijn voor (de toepassing van) Aquafarm, zoals het verwijderingsrendement van medicijnresten.

Begin 2023 wordt er een onderzoeksprogramma geschreven dat richting geeft aan de invulling van de volgende fase. Deze is onder te verdelen in de volgende pijlers:

- **Van proof of principle naar demonstratie op pilotschaal**

Middels een pilot willen we laten zien dat Aquafarm als nazuivering werkt. Centrale onderzoeksvraag hierin is: *Hoe krijgen we een stabiele bedrijfsvoering waarbij de Aquafarm nazuivering gedurende minimaal 1 jaar water tot KRW-kwaliteit zuivert?*

- **Kennisontwikkeling**

Middels wetenschappelijk onderzoek willen we verdergaande kennis opdoen over het optimaliseren van de

zuiverende werking van natuurlijke systemen in verschillende configuraties. Daarnaast willen we stappen zetten in het onderzoeken van het zuiveringsrendement van Aquafarm op medicijnresten en het in kaart brengen (en minimaliseren) van de klimaatvoetafdruk van Aquafarm.

- **Meebouwen aan duurzaam concept en systeem**

Met het demonstreren van Aquafarm als nazuivering in de volgende fase komt er ook vraag naar afzetmogelijkheden voor de geoogste biomassa uit Aquafarm. In de volgende fase willen we daarom verder verkennen welke circulaire toepassingen van de biomassa uit Aquafarm er zijn.

### **Resultaat**

Met deze stappen hebben we in 2026 een geteste en gedemonstreerde Aquafarm nazuivering die kan worden klaargemaakt voor vermarkting (TRL-7). Daarnaast hebben we inzichten opgedaan in de klimaatvoetafdruk van Aquafarm, het (potentiële) zuiveringsrendement op medicijnresten en mogelijke afzet routes voor de geoogste biomassa uit Aquafarm. <<



# 1. Wat is de visie van Aquafarm?

## Aquafarm: van zuiveren naar oogsten

Wereldwijd staan we voor de enorme opgave om de manier waarop we leven toekomstbestendig te maken. Onze voedsel- en energievoorziening, maar ook de manier waarop ons watersysteem is ingericht, zijn niet volhoudbaar. We produceren grote hoeveelheden afval en verspillen daarmee kostbare grondstoffen. Nederland bungelt onderaan de Europese ranglijst als het gaat om de waterkwaliteit, geen enkel waterlichaam voldoet nog aan de eisen van de Kaderrichtlijn Water (KRW) [3]. Met Aquafarm willen we een bijdrage leveren aan deze opgaven.

Aquafarm ziet afvalwater als een rijke stroom water waarin veel organische en anorganische bouwstoffen zitten. Op deze stroom kunnen we direct flora en fauna laten groeien. De innovatie bevindt zich in het selecteren en groeperen van dieren- en plantensoorten, het slim aan elkaar schakelen van organismen en het creëren van optimale condities die zorgen voor schoon water én een effectieve en efficiënte biomassaproductie. Zo komen we van geproduceerde plant- en diermassa tot hoogwaardige toepassingen,

minder verspilling, en schoon water als eindproduct!

## Onze visie

Onze visie is dat Aquafarm de huidige afvalwaterzuivering (gedeeltelijk) gaat vervangen, waarbij alle waardevolle grondstoffen uit het water worden omgezet in planten en dieren die we weer kunnen gebruiken voor nuttige producten. Hiermee gaan we de uitdaging aan om (een deel van) de huidige afvalwaterzuiveringen op termijn te vervangen door systemen van geschakelde watercompartimenten. We volgen de natuur, want zij doet dit al. Zij brengt waardevolle producten voort, met schoon water als restproduct. In de natuur heeft elk organisme een specifieke functie en leeft het beste in bepaalde omstandigheden. Met Aquafarm bootsen we de natuur na, maar wel gestuurd: veel sneller, compacter en gericht.

De ontwikkeling van een volledig nieuw zuiveringsconcept is er een van de lange adem. Daarom focussen we nu eerst op het ontwikkelen van Aquafarm als nazuiveringsstap om effluent tot KRW-kwaliteit te zuiveren. [\[Informatiebox 1\]](#) <<

## Informatiebox 1: Visie gedreven innoveren

Aquafarm is geen eenmalige trucje of innovatie. Het vernieuwende karakter van Aquafarm legt de basis voor een breed spectrum aan nieuwe mogelijkheden. Het is een nieuwe ontwikkelrichting die vanuit de drijvende visie achter Aquafarm jarenlang nieuwe innovaties zal uitlokken. Het risicoprofiel van Aquafarm is laag vanwege de mogelijkheden om nieuwe organismen aan de productieketen toe te voegen en de mogelijkheden voor innovatieve doorontwikkeling (bijvoorbeeld op het gebied van groeicondities, sensortechniek, gedoseerd aanbieden van voedselstromen, filtering en oogsten). Daarmee is het zeer aantrekkelijk om verschillende marktpartijen, met de juiste timing, aan te laten haken.



## 2. Waarop geeft Aquafarm een antwoord?

### Opgaven waar de waterschappen voor staan

De waterschappen hebben de afgelopen 70 jaar laten zien adaptief om te gaan met uitdagingen. Door de klimaatverandering, de sterk toegenomen en ouder wordende wereldbevolking, beter inzicht in de effecten van synthetische stoffen en de verminderde biodiversiteit zijn de huidige uitdagingen misschien wel groter dan ze ooit waren. Denk aan de KRW-opgave, het stikstofprobleem en zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) zoals medicijnresten, PFAS en pesticiden. Daarnaast moeten waterschappen, net als de rest van Nederland, in 2050 klimaatneutraal én circulair zijn. Een flinke uitdaging waar veel innovaties voor nodig zijn.

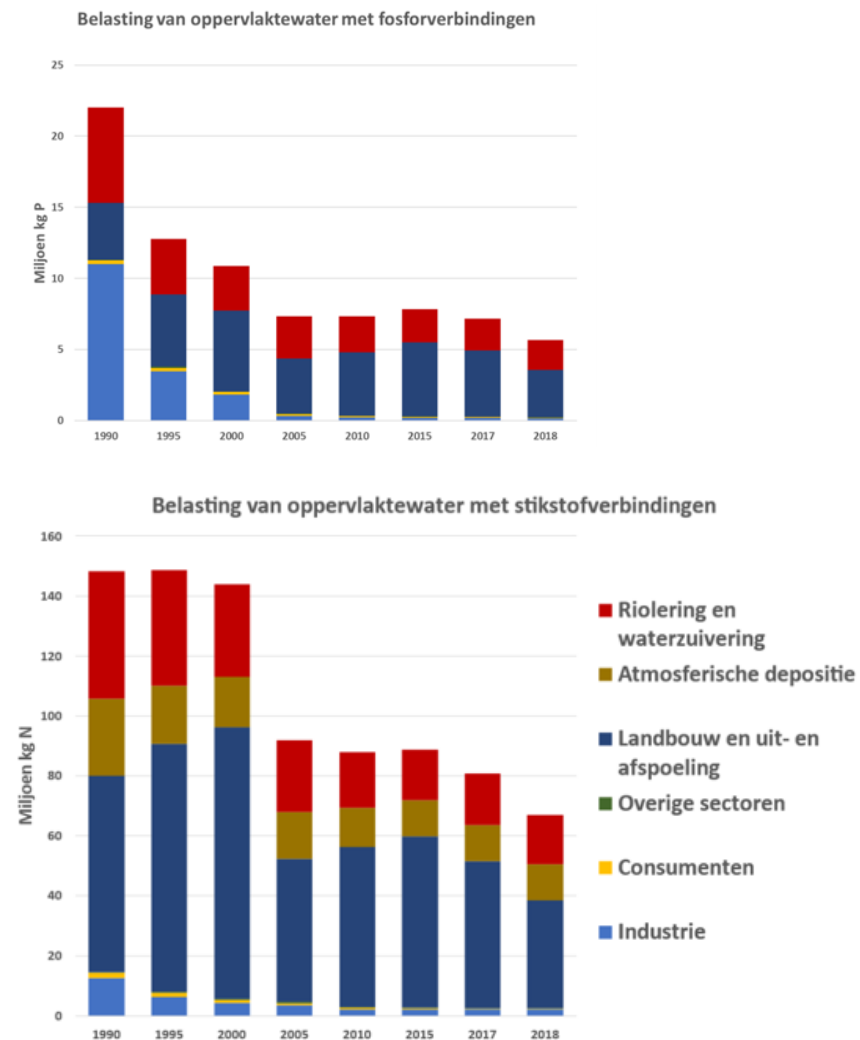
### Waar staan we nu met die opgaven?

#### Nutriënten

Hoewel de waterkwaliteit in Nederland de afgelopen decennia sterk is verbeterd, heeft Nederland nog steeds een forse opgave om aan de vereisten te voldoen die gesteld worden vanuit de KRW [4]. Volgens recent onderzoek blijkt dat het Nederlandse oppervlaktewater een dikke onvoldoende scoort: 99% van het oppervlaktewater voldoet niet aan de ecologische waterkwaliteits-normen van de KRW [3]. Riolering en waterzuivering zijn nog steeds een van de grootste belasters voor het oppervlaktewater (Figuur 1). Nog genoeg werk aan de winkel dus.

Figuur 1

Belasting van oppervlaktewater met fosfor en stikstof [5]



*Verwijdering zeer zorgwekkende stoffen (pesticiden, medicijnresten, PFAS)*

De lozing van medicijnresten van ongeveer een derde van alle rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), heeft een relatief grote invloed op de concentratie van medicijnresten bij het lozingspunt, de benedenstroomse waterkwaliteit of drinkwaterbronnen [6]. Om microverontreinigingen in water te verminderen werken de waterschappen hard aan het ontwikkelen van nieuwe technieken voor vergaande zuivering van afvalwater. Vooralsnog zijn adsorptie aan actief kool en ozonisatie de meest bekende technieken maar ook via membraanfiltratie, UV en waterstofperoxide lijken microverontreinigingen te kunnen worden verwijderd. Veel van deze technieken moeten nog verder worden onderzocht op effectiviteit, functioneren en voetafdruk. Bovendien brengen deze technieken soms ook ongewenste effecten met zich mee, zoals de vorming van bromaat.

*Circulair en klimaatneutraal water zuiveren*

In 2020 produceerden alle RWZI's in Nederland samen ruim 1,25 miljoen ton slib. Slib bestaat voornamelijk uit organisch materiaal. Slib is nog erg waterig (95% van het gewicht is water) en is daarom duur om te verwerken. De

biomassa en stoffen in slib hebben de potentie om te worden teruggewonnen uit de afvalwaterketen. Met het terugwinnen van stoffen kunnen ze weer – circulair – worden ingezet als grondstof. Echter, momenteel wordt het grootste deel van het slib verbrand [7], waarmee de circulaire potentie teniet wordt gedaan. Bovendien bemoeilijken we het hergebruik van eindige grondstoffen zoals fosfor (P).

De uitstoot van broeikasgassen (zowel kort- en langcyclisch CO<sub>2</sub>, lachgas en methaan) tijdens het zuiveringsproces is aanzienlijk [8]. Bovendien is met de huidige zuiveringstechnieken in Nederland het effluent nog niet zo schoon dat het zonder meer als zoetwaterbron kan worden ingezet voor industrie- of drinkwater of een neutrale of zelfs positieve impact heeft op het ontvangende water. Eutrofiëring (overschot nutriënten) is een belangrijke stuurfactor van broeikasgasemissie uit oppervlaktewater [9], [10]. Lozen van onvoldoende gezuiverd water heeft dus ook direct effect op broeikasgasemissie uit de ontvangende wateren.

Al met al zijn huidige zuiveringstechnieken nog niet in staat om het water of grondstoffen uit het influent circulair in te zetten. Daarvoor zijn ze ook nooit bedoeld. De nieuwe opgaven vragen dan ook om een wezenlijk andere



opzet van de afvalwaterzuivering.

Kortom, de uitdagingen waar de waterschappen voor staan zijn enorm en vragen om nóg betere prestaties van de RWZI's. Het is van belang om te gaan kijken naar technieken die minder energie verbruiken en zo min mogelijk broeikasgassen uitstoten om toe te werken naar een zuivering waarbij broeikasgasuitstoot terug wordt gebracht naar nul of minder. Bovenal vragen de uitdagingen om breed experimenteren met nieuwe technieken waarbij we op een radicaal andere manier naar zuiveren gaan kijken. Een manier van zuiveren met oog voor het vergaand verwijderen van nutriënten, het verwijderen van zorgwekkende stoffen en microverontreinigingen, circulariteit en klimaatneutraliteit. [\[Informatiebox 2\]](#)

#### Informatiebox 2:

##### Conventionele zuiveringstechnieken lopen tegen hun grenzen

Alle 315 RWZI's in Nederland benutten bacteriën om het rioolwater te ontdoen van organische stof. Hoewel de technologie door de jaren heen evolueert van oxidatiebedden via actiefslibsystemen naar korrelslibtechnologie, komt de grens van deze technieken in zicht. Al in 2007 is geconstateerd dat de KRW-concentraties voor nutriënten feitelijk de 'limits of technology' zijn, en daarmee bijzonder lastig te bereiken [\[11\]](#). Componenten als opgelost organisch stikstof (N) en opgelost organisch fosfor (P) worden maar ten dele verwijderd in de RWZI zoals wij die in Nederland voornamelijk zien; nageschakelde technieken hebben als nadeel dat ze verzadigen waardoor ze of regelmatig vervangen moeten worden of het fosfor en stikstof na verloop van tijd alsnog vrij komt.

Daarnaast start het zuiveringsproces vrijwel altijd met een processtap waarin organische (kool)stoffen worden geoxideerd tot koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) door middel van beluchting, een proces dat veel energie vraagt. Vanuit een 'duurzame toekomst bril' wringen daarin drie dingen: het kost energie, de potentiële grondstof (koolstofatomen) verdwijnt naar de atmosfeer en er ontstaat  $\text{CO}_2$ . Het koolstof (C) dat niet wordt geoxideerd eindigt in een reststroom van zuiveringsslib. Daaruit wordt gelukkig steeds meer biogas teruggewonnen en de terugwinning van andere grondstoffen wordt steeds realistischer. Echter, de afzet naar de slibeindverwerking, vooral verbranding en dus  $\text{CO}_2$  productie, is voorsnog enorm. Daarnaast komt uit de processtappen veel lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) vrij [\[12\]](#), een 298x sterker broeikasgas dan  $\text{CO}_2$ .

Deze karakteristieken van het huidige zuiveringsproces zijn niet zomaar te veranderen. Dat roept de vraag op in hoeverre het heersende zuiveringsconcept eigenlijk toekomstbestendig is, en of deze in staat is om de stap naar circulair en klimaatneutraal te maken.

*// ‘We staan voor genoeg, zeer  
complexe wateropgaven waarvoor  
de huidige technieken en ideeën  
simpelweg tekortschieten.  
Een aantal wetenschappers was  
in de veronderstelling dat het  
zuiveringsproces van afvalwater  
anders kan.’ //*

### Aquafarm: een nieuw licht op zuiveren

Deze vraagstukken en ontoereikende oplossingen vragen om radicaal anders te kijken naar het zuiveren van afvalwater om tot vernieuwende en toekomstbestendige oplossingen te komen. De natuur zuivert het water al miljoenen jaren en is daarbij in staat om meerdere vraagstukken in één keer aan te pakken. Dit is de kern van wat Aquafarm doet: de zelfreinigende, opruimende en circulaire principes van de natuur centraal zetten.

In de komende hoofdstukken nemen we jullie mee in een potentiële toekomstbestendige oplossing. Aquafarm heeft potentie laten zien in het zuiveren van effluent tot KRW-kwaliteit, het reduceren van broeikasgassen en het verminderen van slib met dieren en waterplanten. Bovendien levert Aquafarm waardevolle grondstoffen op, die kunnen worden benut in de circulaire economie. Daarnaast kunnen de organismen in theorie medicijnresten en andere microverontreinigingen verwijderen. Het verder onderzoeken van deze potenties is hard nodig. [\[Informatiebox 3\]](#) <<

### Informatiebox 3:

#### Aquafarm als sluitstuk van de circulaire RWZI?

Hoe ziet de circulaire RWZI eruit? (Nog) niemand die het weet. De waterschappen zetten (kleine) stappen in de goede richting. Bijvoorbeeld door terugwinning van grondstoffen zoals cellulose. Dat levert een grondstof op, bespaart CO<sub>2</sub>-uitstoot in de uiteindelijke toepassing (ten opzichte van primair of secundair cellulose), en scheelt ook in de energievraag van de RWZI en de slibproductie. Kortom, het niet vernietigen maar terugwinnen van grondstoffen lijkt een strategie die goed past bij de uitdagingen van deze én de toekomstige tijd.

Vrijuit filosoferend past Aquafarm naadloos in de circulaire RWZI. We beschouwen het rioolwater als een bron van koolstofatomen, nutriënten en uiteraard water. Het streven is zoveel mogelijk koolstof en nutriënten terugwinnen, met zo min mogelijk chemische en/of microbiologische bewerking. Denk aan het terugwinnen van cellulose, struviet/vivianiet, PHA/bioplastic, maar ook andere grondstoffen. Zeker het terugwinnen van fosfor en andere 'eindige grondstoffen' is in dit licht belangrijk [13]. Zo wordt voorspeld dat de toekomstige fosforschaarste de voedselproductie ernstig kan schaden en wordt daarmee ook wel 'the gravest natural resource shortage you've never heard of' [14] genoemd.

Alles wat niet in de huidige, traditionele zuivering kan worden verwijderd, stroomt door naar de Aquafarm nazuivering. Daar worden de resterende koolstofatomen en nutriënten omgezet door en tot biomassa, wat weer geoogst wordt. De biomassa van Aquafarm is geen afvalstof, maar ook weer een bron van grondstoffen, zoals eiwitten en calcium. Ondertussen wordt het rioolwater (na)gezuiverd tot KRW-kwaliteit. Aquafarm kan nutriënten tot zeer lage (KRW-)concentraties verwijderen. Er zijn aanwijzingen uit literatuuronderzoek [2] dat ook medicijnresten verwijderd kunnen worden. Kortom, what's not to like?

Het voorgaande is nog deels toekomstmuziek. Maar wel eentje die welluidend klinkt en we om die reden aan het verkennen/onderzoeken zijn.



# 3. De theorie achter Aquafarm

## Het Aquafarm principe werkt

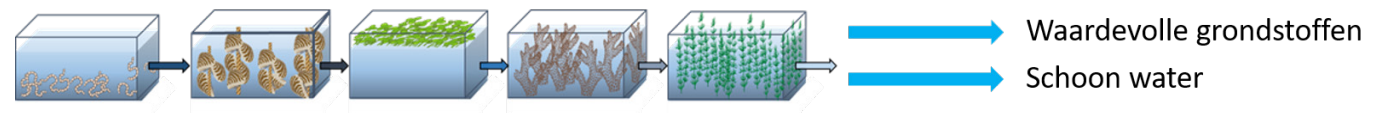
Aan de basis van Aquafarm staat het 'Aquafarm principe', welke wij in 2018 hebben onderzocht en bewezen [15]. Dit is het idee dat de natuurlijke processen van zowel de afbraak van restmateriaal door dieren als de opname van nutriënten door planten, kunnen worden toegepast in gecontroleerde omstandigheden. In natuurlijke systemen zijn er veel interacties tussen dieren en planten. Deze interacties kunnen de groei of de activiteit van de planten en dieren stimuleren en daarmee de zuiverende functie verbeteren. Daarom kunnen we door het combineren en het slim achter elkaar zetten van verschillende soorten planten en dieren in afzonderlijke bakken ('cascaderen') een zo efficiënt mogelijke zuivering creëren (Figuur 2). We bepalen zelf de eisen, en dus de kwaliteit van het water en reststromen in de Aquafarm.

Tijdens de eerste onderzoeksfase van Aquafarm hebben we aangetoond dat het principe achter Aquafarm werkt:

- We zijn in staat om monoculturen van aquatische dieren en planten op afvalwater te laten groeien;
- Slibdeeltjes en nutriënten worden efficiënt uit het water onttrokken;
- Biomassa kan gedurende het proces worden geoogst;
- Er is sprake van een 'faciliterende

werking': de soorten versterken elkaar wanneer ze geschakeld zijn: de kroosvarens die achter de wormen geschakeld stonden, groeiden harder dan in de controle bakken waarbij er voor de kroosvarens geen wormen waren geschakeld.

Figuur 2  
Geschakelde bakken met elk een andere soort.





**Plek in de zuivering: eerst focus op nazuiveren**

De eerste onderzoeken voor Aquafarm resulteerden in twee verschillende Aquafarm modules met ieder hun eigen plek en functie:

- **Module 1 'Aquafarm voor biomassaproductie':** Maximale biomassaproductie met een cascade van planten en dieren, waarbij deze groeien op een mengsel van gelijke hoeveelheden influent en effluent. Hiervan zijn de voordelen: maximale valorisatie van afvalwater, het experimenteren met vermarktbaarheid van biomassa, en mogelijkheden tot combineren met andere zuiveringstechnieken;
- **Module 2 'Aquafarm als zuiveringstechniek':** Maximale waterzuivering met een cascade van planten en dieren, startend aan het einde van het zuiveringsproces. Hiervan zijn de voordelen: het terugwinnen van fosfor, schoner water als eindproduct (KRW-kwaliteit), en gezondere natuurlijke watersystemen waarin lozing van effluent plaats vindt.

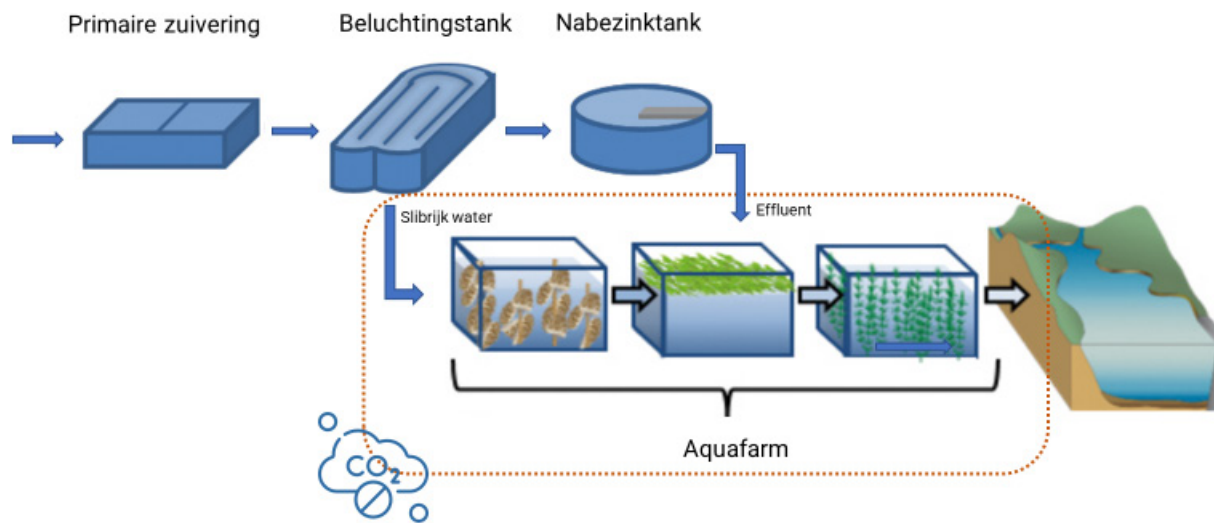
Deze uitkomsten bevestigen dat Aquafarm de potentie heeft om de huidige afvalwaterzuivering te vervangen.

We erkennen dat hiervoor nog veel kennis ontwikkeld moet worden. Om zo snel mogelijk tot resultaten te komen die daadwerkelijk bijdragen aan de vraagstukken van de waterschappen, is gekozen om te starten met de ontwikkeling van module 2; Aquafarm optimaliseren als zuiveringstechniek. Belangrijk uitgangspunt hierbij is dat deze module zo min mogelijk broeikasgassen uitstoot. Het toevoegen van een deel slib uit de beluchtingstank levert daarnaast nog extra voordelen op:

1. Het water wordt rijker aan nutriënten, dit bevordert de plantengroei zodanig dat zij hun werk beter doen;
2. Er hoeft minder slib vanuit het bestaande zuiveringsproces te worden afgevoerd naar de verbrandingsinstallatie. Dit scheelt geld voor het waterschap;
3. Indikking van slib door dieren zorgt voor reductie broeikasgasuitstoot.

Figuur 3 toont de plaats van de Aquafarm nazuiveringsmodule in de bestaande zuivering. Op basis hiervan zijn in fase 2 (2014-2018) diverse onderzoeken en experimenten gedaan waarvan de resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 4.

Figuur 3  
Locatie van de Aquafarm als nazuiveringsmodule in een conventionele RWZI.

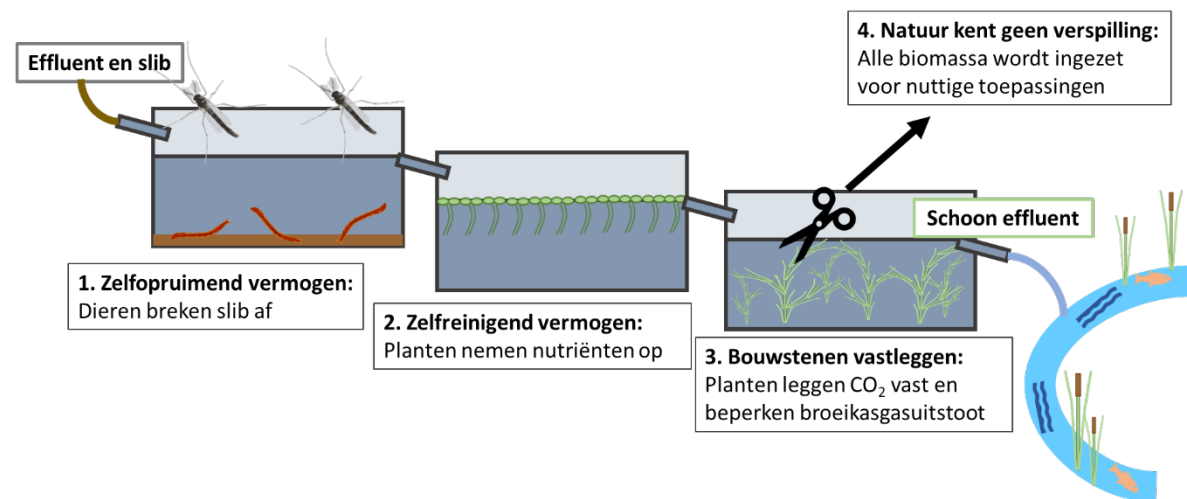


### **Uitvergroten van vier natuurlijke krachten**

Na het aantonen van het Aquafarm principe met planten en dieren hebben we onze pijlen gericht op het vergroten van de natuurlijke zuiveringsmechanismen zodat we deze natuurlijke 'krachten' van de organismen op volle kracht benutten. In dit hoofdstuk lichten we de theorie toe achter de vier natuurlijke 'krachten' die centraal staan binnen het Aquafarm concept.

1. Het zelf opruimend vermogen  
(slibreductie)
2. Het zelfreinigend vermogen  
(nutriënten tot KRW-kwaliteit)
3. Het vastleggen van bouwstenen  
(broeikasgasreductie)
4. De natuur kent geen verspilling  
(circulariteit)

Figuur 4  
De vier krachten van het Aquafarm principe verbeeld





### **Kracht 1:** **Het zelf opruimend vermogen** **(slibreductie)**

Veel dieren op de bodem van poeltjes en sloten voeden zich met allerlei dood organisch materiaal, zoals resten van algen, planten, dieren en slibdeeltjes. Waar de meeste diersoorten niet overleven op plekken met weinig zuurstof en de aanwezigheid van giftige stoffen zoals ammonium en nitriet, zijn er enkele aquatische dieren juist goed aangepast aan deze omstandigheden. Voorbeelden van zulke 'afvaleters' zijn wormen, dansmuglarven en waterpissebedden. Deze soorten doen het dan ook goed op plekken in de buurt van effluentlozingen. Omdat het slib van een RWZI voornamelijk organisch materiaal is, zien we vanuit Aquafarm de potentie dat bovenstaande 'afvaleters' ook goed groeien op slib. Hierbij zetten ze het slib om in hun eigen lichaamsgewicht (biomassa) en opgeloste voedingsstoffen (zoals fosfaat en nitraat). Net als in de natuur kunnen deze voedingsstoffen weer worden opgenomen door planten en algen in de Aquafarm cascade.

Omdat in de natuur meerdere soorten 'afvaleters' samen voorkomen, kunnen al deze soorten samen een grotere verscheidenheid aan organisch materiaal afbreken. Bovendien heeft elke soort een voorkeur voor een ander onderdeel

van het organisch materiaal; iedere soort is gespecialiseerd in het opeten en verteren van een bepaalde stof. Ook hier helpen de soorten elkaar: het organisch materiaal wordt beter te eten voor de ene soort nadat een andere soort deze eerst heeft verteerd en weer uitgepoept. Dit interactieve mechanisme kan de afbraak van organisch materiaal versnellen en/of stabiel maken.

### **Kracht 2:** **Het zelfreinigend vermogen** **(nutriënten tot KRW-kwaliteit)**

*Nutriëntverwijdering door planten*  
Om te kunnen groeien hebben planten nutriënten nodig. De belangrijkste zijn stikstof en fosfor. De planten kunnen deze nutriënten met hun wortels opnemen en uit het water verwijderen, waardoor ze het water dus 'schoonmaken'. Ook hier zijn weer verschillende kwaliteiten te onderscheiden: sommige planten zijn beter in het opnemen van hoge concentraties nutriënten, terwijl anderen goed zijn in het verwijderen van de laatste restjes. Ook kan de ene plantensoort beter stikstof opnemen, terwijl de ander beter fosfor kan onttrekken. Daarnaast kunnen planten hun omgeving ook beïnvloeden via hun wortels en bladeren waardoor sommige chemische processen sneller of juist langzamer gaan. Door de planten

op de juiste manier in te zetten kunnen ze daardoor het verwijderen van nutriënten extra stimuleren.

*Indirecte nutriëntverwijdering door dieren*  
Hoewel aquatische dieren niet zelf opgeloste nutriënten kunnen opnemen en uit het water verwijderen, kunnen ze wel de nutriënt dynamieken in ecosystemen sterk beïnvloeden. Elk dier heeft weer zijn eigen eigenschappen. Sommige aquatische dieren eten voedsel als planten- en dierenresten, waarbij ze een deel van de voedingsstoffen gebruiken om te groeien en zich voort te planten. De niet-opgenomen voedingsstoffen poepen en plassen ze vervolgens weer uit. Hierdoor zetten ze nutriënten in vaste vorm om in opgeloste nutriënten, zoals hierboven bij slibreductie is benoemd. De nutriënten zijn weer beschikbaar voor planten. Andere dieren, zoals mosselen, halen juist hun voedsel uit het water door het filteren van algen. Ze verwijderen de nutriënten in vaste vorm uit het water en hun uitwerpselen belanden weer op de bodem. Daarnaast kunnen verschillende aquatische dieren ook nutriënt dynamieken beïnvloeden doordat ze zuurstof vrijmaken bij het omwoelen van de bodem. Dit zorgt ervoor dat bijvoorbeeld fosfaat minder snel in het water terecht komt waardoor relatief giftig ammonium en nitriet sneller

*// ‘Het met planten en dieren natuurlijk zuiveren van afvalwater en gelijktijdig produceren van waardevolle stoffen is een kans om duurzaam en circulair waterbeheer te bereiken.’ //*

*Prof. dr. ir. Piet Verdonschot,  
Zoetwaterecosystemen en  
Bijzondere leerstoel Wetland  
Restoration Ecology,  
Wageningen Environmental  
Research (Alterra) en  
Universiteit van Amsterdam*

worden omgezet in het minder giftige nitraat. Dit is dan weer geschikt als voedingsstof voor planten.

*Verwijdering van microverontreinigingen door planten en dieren*

Literatuuronderzoek [2] laat zien dat veel microverontreinigingen, zoals medicijnresten en zware metalen, die in het natuurlijke systeem terecht komen daar ook worden opgenomen door planten en dieren. Door de aanwezigheid van biologische processen, zoals de activiteit van microben in het darmkanaal van dieren of bepaalde enzymen in de plant, kunnen dieren en planten een deel van deze stoffen afbreken. Sommige stoffen die niet kunnen worden afgebroken, worden door dieren en planten opgeslagen waar de stoffen minder schade kunnen toebrengen. Bij het oogsten van het dierlijke en plantaardige materiaal in het Aquafarm systeem worden deze stoffen dan ook verwijderd uit de waterketen.

**Kracht 3:  
Het vastleggen van bouwstenen  
(broeikasgasreductie)**

Waar CO<sub>2</sub> voor mensen tegenwoordig direct een negatieve associatie oproept als dé veroorzaker van de opwarming van de aarde, is koolstof voor planten nog altijd een vitaal onderdeel om te

groeien. Planten nemen koolstof op uit de lucht in de vorm van CO<sub>2</sub> en via een tussenstap ook uit water. Ze zetten deze moleculen vervolgens om in biomassa en zuurstof. Op deze manier wordt CO<sub>2</sub> uit het systeem verwijderd en is er minder CO<sub>2</sub> over in de lucht om als broeikasgas te fungeren. Naast CO<sub>2</sub> zijn er nog meer, veel sterkere broeikasgassen, zoals methaan (CH<sub>4</sub>, 25x sterker dan CO<sub>2</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O, 298x sterker dan CO<sub>2</sub>).

Methaan wordt geproduceerd onder zuurstofloze omstandigheden, terwijl lachgas geproduceerd wordt in beluchte, ammoniumrijke omstandigheden én in zuurstofarme stikstofrijke omstandigheden. Bij de planten compartimenten van Aquafarm zorgen we ervoor dat nauwelijks zuurstofloosheid optreedt. Daarnaast beïnvloeden planten met hun wortels en bladeren de omgeving waar deze broeikasgassen geproduceerd worden. Hierdoor reduceren ze de uitstoot van deze gassen verder. Hetzelfde geldt voor dieren die de bodem omwoelen. Dit omwoelen resulteert namelijk in een betere koppeling tussen zuurstofarme en zuurstofrijke habitats waardoor minder methaan gevormd wordt en beide gassen effectief worden afgebroken.

Door de opname van CO<sub>2</sub>, in combinatie met een zeer beperkte uitstoot van methaan en lachgas,

heeft een Aquafarm als nazuivering waarschijnlijk een zeer lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Naast deze directe broeikasgasreductie zou Aquafarm ook indirect een positief effect kunnen hebben op de broeikasgasuitstoot in de watersystemen waar effluent op geloosd wordt. Doordat er minder nutriënten in het oppervlaktewater terecht komen, kun je de bouwstenen voor het vormen van broeikasgassen in natuurlijke watersystemen beperken.

**Kracht 4:**  
**De natuur kent geen verspilling**  
**(circulariteit)**

Met een circulaire economie beogen we een economie waarin grondstoffen, zoals fosfor, stikstof en koolstof, efficiënter worden beheerd en (her)ingezet. De natuur runt al miljarden jaren een goedlopende circulaire economie, waarbij alle uitwerpselen en dood materiaal worden ingezet voor de volgende cyclus. Datzelfde beogen we als mensen te bereiken in 2050, of eerder.

Zoals bij de andere 'krachten' al duidelijk werd, is het oogsten en vervolgens nuttig wegzetten van biomassa een essentieel onderdeel van Aquafarm. Op deze manier worden de opgeslagen koolstofatomen en nutriënten niet opnieuw vrijgemaakt in het water, maar kunnen deze voor langere

tijd worden vastgelegd. Het liefste maken we er grondstoffen van waarmee we fossiele, kritische en niet-duurzaam geproduceerde grondstoffen kunnen vervangen!

*Natuurlijke mechanismen voor ons laten werken*

De natuur laat ons zien dat de vier genoemde 'krachten' het Aquafarm principe onderschrijven. Deze zijn te optimaliseren in de beoogde cascade opstelling van Aquafarm als zuiveringstechniek. Daarnaast laat onderzoek ons zien dat deze mechanismen elkaar ook versterken: ze werken beter in interactie met elkaar dan zonder elkaar. Win-win! <<



# 4. *De potentie van Aquafarm als nazuivering*

In de eerste fase hebben we aangetoond dat het concept van het Aquafarm principe werkt. Het concept was bewezen en Technology Readiness Level (TRL) 3 [1] bereikt.

In aanvullend onderzoek is gekeken naar de potentie van Aquafarm als duurzaam nazuiveringsconcept. Dit is onderzocht aan de hand van wetenschappelijk onderzoek (praktijk- en literatuuronderzoek) en met praktijkproeven (TRL 4-5). Dit hoofdstuk vat de potentie van Aquafarm samen middels geïllustreerde voorbeelden uit onderzoek en praktijk. Deze zijn geordend volgens de vier eerder genoemde en een vijfde potentiële kracht:

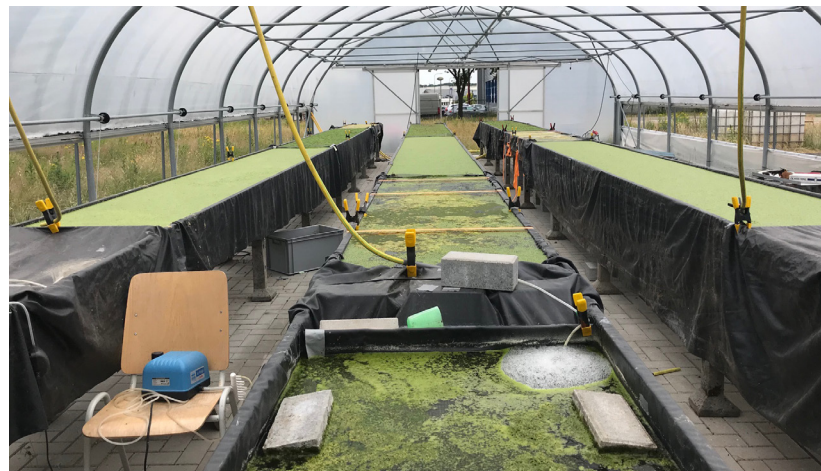
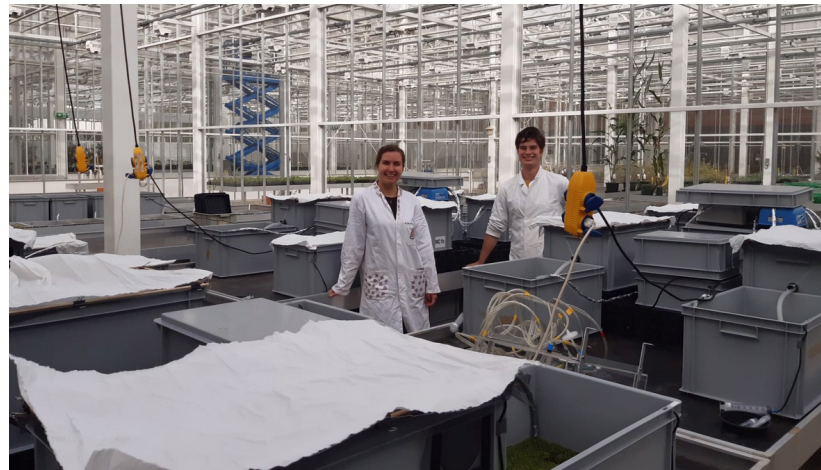
- 1) Aquafarm als slibverwerking,
- 2) zuiveren tot KRW-norm,
- 3) het terugdringen van broeikasgasuitstoot,
- 4) Aquafarm als onderdeel van de circulaire keten,
- 5) potentieel: het verwijderen van microverontreinigingen.

Dit hoofdstuk biedt een samenvatting van de onderzoeksresultaten van de afgelopen periode. De volledige onderzoeksresultaten en verwijzingen naar de achterliggende wetenschappelijke

Afbeelding 1

Boven: Promovendi Lisanne Hendriks en Tom van der Meer in de onderzoekskas in Nijmegen.

Onder: Plantenstraten in de praktijkproef in Rhenen.



publicaties vind je in [Bijlage A \(Uitgebreide samenvatting van experimenten fase 2\)](#) van deze rapportage.

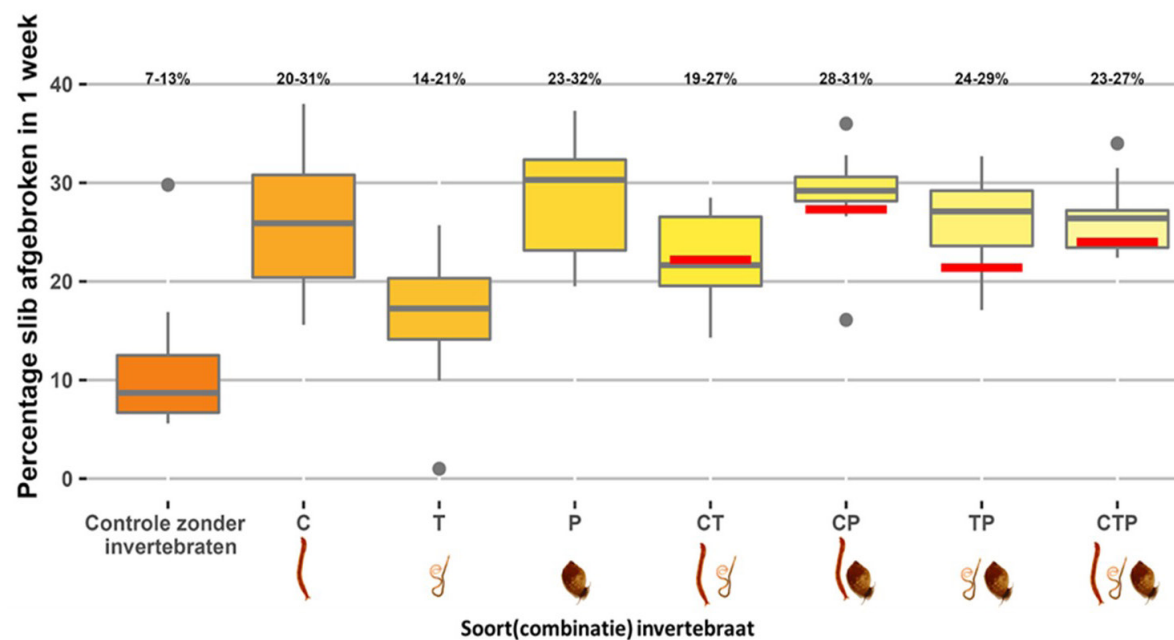
### Aquafarm als slibverwerking

Alle experimenten met dieren zijn uitgevoerd in bakken met bezonken slib uit de beluchtingstank van verschillende RWZI's, met een inhoud tussen de 25 mL en 4 L, en hadden een duur van één tot vier weken. Uit de onderzoeken zijn de volgende resultaten gebleken:

- De dieren in Aquafarm kunnen op een natuurlijke manier slib verwerken. We hebben gevonden dat dansmuglarven (*Chironomus riparius*) in staat zijn om de slibafbraak tot wel vijf keer te versnellen (zie Figuur 5). Dit levert een slibafbraak tot wel 32% van het slib in zeven dagen op. Dat betekent dat bij een verblijftijd van twee weken al het afbreekbare materiaal verdwenen is en dat de hoeveelheid slib die een RWZI produceert mogelijk met ongeveer 65% omlaag gaat (*Chironomus riparius*). [16].
- Bij de afbraak van slib komen extra nutriënten vrij in het water waarmee het de groei van planten verderop in de cascade zou kunnen bevorderen. We zien slib in Aquafarm daarom niet als afval, maar als voeding voor Aquafarm.
- Aquafarm stimuleert altijd de slibafbraak, ongeacht de hoeveelheid

Figuur 5

Dieren (in figuur = invertebraten) versnellen de slibafbraak tot wel 5x en verwijderen tot 32% in 1 week, getest met slib van drie verschillende RWZI's. Hieruit blijkt dat soorten samen soms meer kunnen afbreken dan alleen. Experiment waarbij de slibafbraak door drie soorten dieren (en alle mogelijke combinaties): dansmuglarven (C), slingerwormen (T), en blaashoornslakken (P), is gemeten bij drie verschillende RWZI's van verontreiniging gehalten. De afbraak is vergeleken met controleslib zonder dieren.



— = theoretisch verwachte afbraak o.b.v. dieren los

verontreiniging. De slibafbraak neemt wel iets af bij de meer verontreinigde RWZI's [17]. Het gebruik van meerdere soorten dieren in de cascade kan zorgen voor een systeem dat beter bestand is tegen hogere verontreinigingen: Samen kunnen ze, bij sterk verontreinigd water, meer dan alleen! (Informatiebox 4)

#### **Met Aquafarm kunnen we de nutriënten zuiveren tot KRW-norm**

Alle experimenten met planten zijn uitgevoerd in bakken met effluent met een inhoud tussen de 25 en 50 liter en hadden een duur van twee tot veertien dagen waarbij dagelijks metingen werden gedaan.

Uit deze onderzoeken zijn de volgende resultaten gekomen:

- De verschillende planten in Aquafarm zijn in staat om fosfor en stikstof in effluent tot zeer lage concentraties te verwijderen. Met de juiste planten kan Aquafarm de fosfor en stikstof tot wel 100% terugbrengen. Met een verblijftijd van soms maar twee dagen (dat is ongeveer in dezelfde schaalgrootte als verblijftijden in RWZI's, 8-24 uur) kunnen nutriëntenconcentraties bereikt worden die aan de KRW-normen voldoen. Daarmee

#### **Informatiebox 4:**

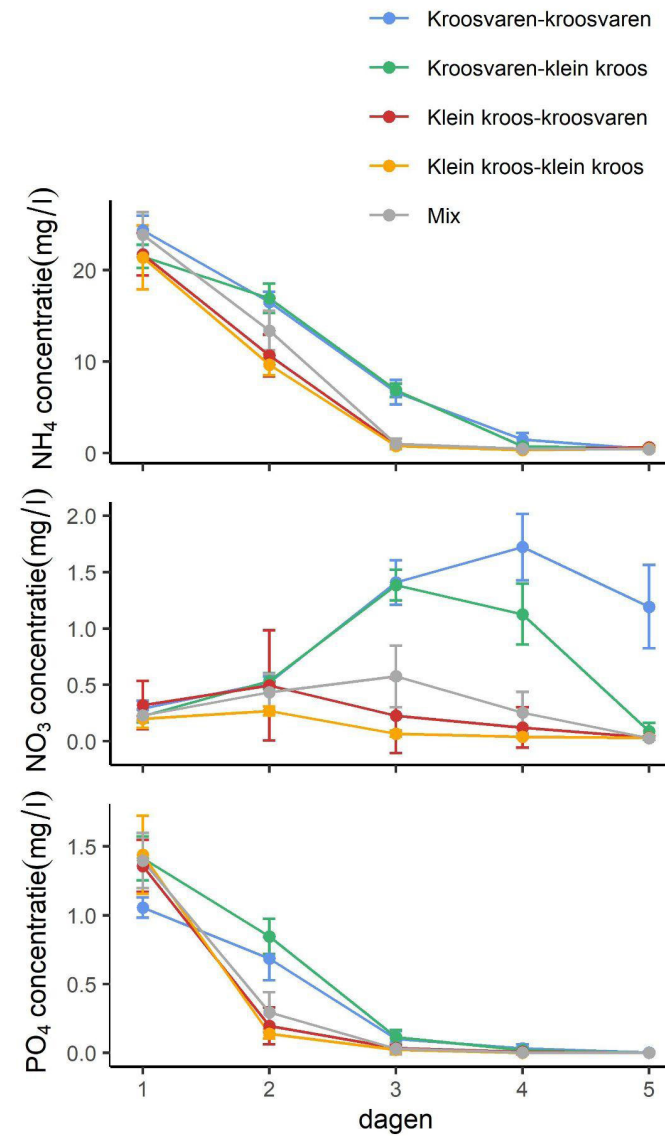
Reguliere slibverwerking is niet duurzaam

De indikking, ontwatering, transport en verbranding van het slib kosten veel energie. Daarnaast ontstaat veel CO<sub>2</sub> (944 kWh energie en 997 kg CO<sub>2</sub> per ton droge stof [18]). De slibverwerking kost tot wel 60% van de operationele kosten van een reguliere RWZI [19]. Momenteel lopen er een aantal onderzoeken (zoals superkritisch vergassen en Torwash) naar verduurzaming van de slibverwerking. Deze onderzoeken zijn met name gericht op een hogere slibafbraak waarbij energie wordt geproduceerd. Het verminderen van de hoeveelheid slib op de zuivering zelf met het Aquafarm systeem kan een flinke besparing opleveren aan energieconsumptie, CO<sub>2</sub> uitstoot en kosten. Aquafarm zet slib om in biomassa welke nuttig is in te zetten. Verwaarding van deze biomassa zal nog verdere besparingen opleveren.



Figuur 6

Afname van ammonium, nitraat en fosfaat over de tijd voor een combinatie van kroosvaren en klein kroos. Op dag 2 werden de planten gewisseld. In de behandeling met alleen kroosvaren (Kroosvaren-kroosvaren) werd nitraat niet goed verwijderd. De toevoeging van klein kroos daarna (Kroosvaren-klein kroos) of een mix van de twee soorten (Mix) zorgde wel voor een goede verwijdering.





- bren-gen we de vervuilinglast van nutriënten op het oppervlaktewater vanuit de RWZI vrijwel volledig terug.
- Het combineren van verschillende planten geeft betere zuiveringsrendementen (Figuur 6) dan een plant alleen. Dit bevestigt nogmaals het principe van Aquafarm.
  - Met het inzetten en oogsten van mosselen kunnen we nagenoeg alle nutriënten en algen uit de waterkolom verwijderen. Algen nemen veel nutriënten op uit het water. Met huidige zuiveringstechnieken is het lastig om algen uit het water te verwijderen. Gelukkig dienen deze algen ook als voedsel voor bijv. weekdieren, zoals de zoetwatermossel. In ons experiment hebben we laten zien dat mosselen, samen met het bezinken van de algen zelf, er voor kunnen zorgen dat binnen 24 uur nagenoeg alle algen uit de waterkolom verwijderd zijn (zie bijlage 1: Planten-experimenten). Hierdoor kunnen de nutriënten (in de vorm van mosselen en hun uitwerpselen) worden verwijderd. (Informatiebox 5)

### **Geen broeikasgasuitstoot uit een Aquafarm-nazuivering**

We streven naar een zo klein mogelijke, of zelfs een negatieve, CO<sub>2</sub> footprint

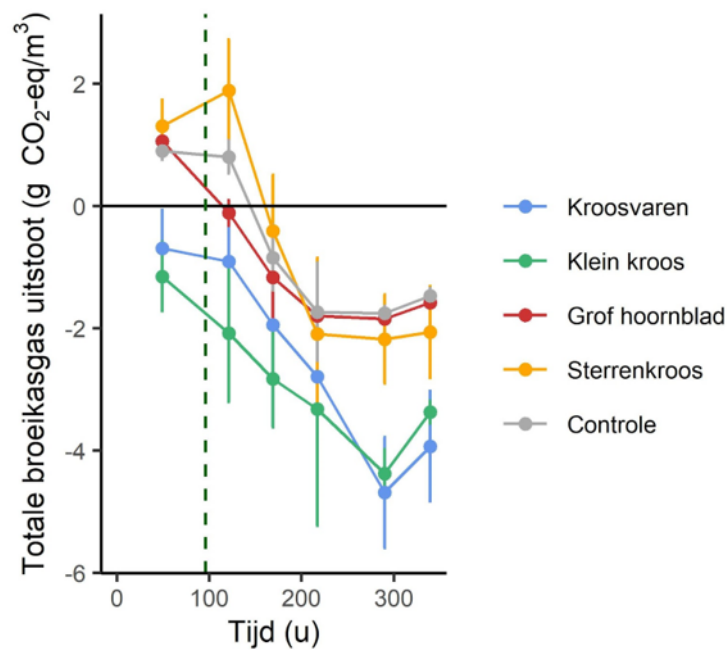
#### Informatiebox 5:

Aquafarm in relatie tot andere natuurlijke zuiveringstechnieken

Er zijn momenteel ook nog andere natuurlijke zuiveringstechnieken in ontwikkeling. In vergelijking met een geschakeld zuiveringsmoeras zoals bijvoorbeeld de Waterharmonica [20] zijn de zuiveringspercentages van fosfor en stikstof door Aquafarm erg hoog. Bij een hogere belasting is verwijdering door waterharmonica's namelijk heel wisselend, er wordt vaak niet meer dan 25-35% fosfor en stikstof verwijderd bij een verblijftijd tussen de 1,5 en 11,5 dagen, terwijl er bij sommige harmonica's zelfs extra fosfor vrij komt [20]. Daarnaast kunnen Waterharmonica's verzadigen met nutriënten, waardoor er na verloop van tijd weer stoffen vrijkomen uit dit systeem. Daarentegen wordt bij Aquafarm de biomassa, en daarmee de nutriënten, continue geoogst en dus verwijderd. Op deze manier wordt verzadiging tegengegaan.

In vergelijking met andere nazuiveringstechnieken presteert een Aquafarm ook veel beter met betrekking tot de uitstoot van broeikasgassen. Bijvoorbeeld een helofytenfilter (constructed wetland). Deze kan gemiddeld tot wel 15 gram broeikasgassen per m<sup>2</sup> per dag uitstoten [21], in vergelijking met Aquafarm waar we geen uitstoot hebben en zelfs CO<sub>2</sub> opname zien.

Figuur 7  
De drijvende planten zijn beter in het opnemen van broeikasgassen dan de ondergedoken planten



met de nazuiveringsmodule. Tot nu toe lag onze focus op de uitstoot van broeikasgassen tijdens het proces van nazuivering. Dit is onderzocht tijdens de lab-experimenten naar nutriëntenverwijdering.

Uit die onderzoeken zijn de volgende resultaten gekomen:

- We hebben aangetoond dat we met de meeste planten in Aquafarm de emissie van methaan en lachgas beperken en  $\text{CO}_2$  kunnen opslaan in biomassa (Figuur 7). We hebben naar acht drijvende planten onderzoek gedaan, waaruit bleek dat kroosvaren (Azolla) en klein kroos qua broeikasgas beperking het efficiëntst zijn. Deze planten kunnen ruim twee keer zo veel broeikasgassen opnemen als een opzet zonder planten (waar algen-groei ook zorgde voor wat opname) (Figuur 7). Zo stoot Aquafarm als nazuivering geen directe broeikasgassen uit en zet het zelfs  $\text{CO}_2$  om in biomassa.
- De dieren in Aquafarm hebben ook een positieve invloed op de broeikasgasuitstoot. De activiteit van dansmuglarven in het slib zorgt voor een beperking van methaanproductie en -uitstoot (zie bijlage 1). Daarnaast zorgen de dieren voor een lagere hoeveelheid slib, die minder  $\text{CO}_2$

en andere gassen vrijgeeft bij verwerking.

- Vanuit de literatuur is bekend dat het lozen van effluent kan zorgen voor een vier keer hogere CO<sub>2</sub>-concentratie in het ontvangende water [22], en een meer dan honderd keer zo hoge methaan- en lachgasconcentratie vergeleken met bovenstroomse wateren [23]. Aquafarm kan de broeikasgasuitstoot uit effluent-ontvangende wateren terugdringen door de nutriënten concentraties in het effluent te beperken. Hierdoor zorgen we dat ook uit het oppervlaktewater minder broeikasgassen worden uitgestoten.

#### **Aquafarm als onderdeel van de circulaire (zuiverings)keten**

Aquafarm biedt veel potentie in de zoektocht naar een nazuiveringsmethode die past binnen de klimaat- en circulaire uitdagingen van waterschappen. Circulariteit is een intrinsieke eigenschap van het Aquafarm principe en komt op de volgende manieren naar voren bij Aquafarm.

*De planten en dieren groeien op 'afvalstromen' zonder toevoegingen*  
De planten en dieren in Aquafarm groeien op een combinatie van

effluent en slib, iets wat momenteel wordt beschouwd als 'afvalstromen'. In een Aquafarm zijn dit echter voedselbronnen voor onze zuiveraars. Het benutten van een huidige afvalstroom om circulaire grondstoffen te produceren draagt bij aan circulariteit. Van veel soorten hebben we aangetoond dat ze zich kunnen voortplanten en groeien in Aquafarm (zoals de dansmuggen, wormen en waterplanten). Het feit dat er geen chemicaliën en grondstoffen hoeven worden toegevoegd om biomassa te produceren maakt de Aquafarm extra aantrekkelijk en circulair [24].

#### *De soorten kunnen goed worden geoogst als grondstof*

De soorten in Aquafarm kunnen pas circulair worden ingezet wanneer ze zijn geoogst. Uit onze onderzoeken is gebleken dat er verschillende oogstmethodes voorhanden zijn voor de soorten in Aquafarm. De ondergedoken planten zijn makkelijk te oogsten door middel van (af)scheppen [25]. Bovendien bestaan er diverse eco-vriendelijke manieren van drijvende waterplantenoogsten op grotere schaal. Het slib bezinkt als gevolg van een natuurlijk proces en is daarmee gemakkelijk van de bodem te verwijderen middels een gravitatiefilter/

#### Informatiebox 6:

##### Bouwen 100% circulaire wereld kost tijd

In de ontwikkeling naar een volledig circulaire economie en zuivering, moet er nog veel gebeuren. Het opzetten van duurzame grondstofketens kost tijd, vaak tientallen jaren. Voor enkele grondstofsoorten uit Aquafarm bestaan deze ketens al, voor andere zullen we aan de slag moeten om deze samen met andere partijen op te zetten. Gezien de investering die dat vraagt, is het belangrijk om bij het opzetten van circulaire ketens precies te weten welke en hoeveel grondstoffen je in handen hebt. Momenteel zijn we bij Aquafarm nog niet zo ver. Aquafarm houdt daarom de ontwikkelingen op de circulaire markt nauwlettend in de gaten en blijft onderzoek doen naar de samenstelling van geproduceerde grondstoffen zodat, wanneer de kans zich voordoet, wij makkelijk kunnen aanhaken bij het bouwen van of aanleveren van grondstoffen aan bestaande ketens.

bezinktank. De volwassen dansmuggen zijn makkelijk te lokken en daarmee te verzamelen en ook mosselen zijn eenvoudig te oogsten. Bovendien is het kweken van wormen op rekjes succesvol gebleken [2]. Deze zijn hiermee gemakkelijk te oogsten uit de Aquafarm.

##### *De grondstoffen uit Aquafarm zijn in te zetten in circulaire ketens*

De productie van grondstoffen in een Aquafarm is extra waardevol wanneer deze onderdeel worden van circulaire ketens. Eerdere verkenningen hebben laten zien dat de soorten in een Aquafarm meerdere circulaire toepassingsmogelijkheden hebben. In 2022 is er vanuit Aquafarm een onderzoek gedaan naar de value case van Aquafarm met betrekking tot het circulair inzetten van de te oogsten grondstoffen vanuit de nazuivering. Hieruit is gebleken dat er op termijn veel potentie is voor het circulair terugbrengen van grondstoffen in de economie. De potentie zit onder andere in het terugwinnen van fosfaat, nutriënten voor siervisvoedsel, biomassa voor isolatiemateriaal en bouwmaterialen, en kleurstoffen en eiwitten voor productieprocessen. Lees onze value case [26] voor meer informatie. (Informatiebox 6)

### **Aanvullend onderzoek nodig voor potentieel verwijderen microverontreinigingen.**

Vanuit literatuuronderzoek [2] is gebleken dat Aquafarm potentie heeft om microverontreinigingen te verwijderen. Daarnaast is er een experiment uitgevoerd waarbij naar het effect van muggenlarven op de opname en afbraak van microverontreinigingen is gekeken.

Vanuit deze onderzoeken zijn de volgende punten gebleken:

- Bij de slibafbraak door muggenlarven bleven de meeste zware metalen (Koper, Zink, Nikkel, Lood) achter in het slib en werd een klein deel (1%) van de metalen opgenomen door de muggen. Een ander deel van de metalen kwam weer terecht in het water. Het plaatsen van planten in de daaropvolgende cascades in de Aquafarm zouden deze metalen weer op kunnen nemen. Daarnaast hadden de larven nauwelijks effect op de verwijdering van twee PAKs (Polycyclische aromatische koolstofverbindingen) [27]. Aangezien verontreinigingen verschillend kunnen reageren op de activiteit van dieren in Aquafarm, kunnen we op basis van deze resultaten geen

conclusie trekken dat het inzetten van dieren geen positief effect zou hebben op het verwijderen van andere verontreinigingen. Meer onderzoek hiernaar is dus gewenst.

- De soorten in de Aquafarm hebben de potentie om microverontreinigingen te onttrekken aan het effluent en slib. In potentie kunnen ze medicijnresten verwijderen, microplastics filteren en zware metalen opnemen. Onderzoek in andere watersystemen heeft aangetoond dat verschillende planten, zoals kleine kroosvaren, riet en grote lisdodde, verschillende medicijnresten, waaronder enkele gidsstoffen [28], met een efficiëntie van 70-90% kunnen verwijderen [29]. Omdat we binnen Aquafarm met soortgelijke plantensoorten werken, verwachten we dezelfde resultaten te gaan krijgen bij vervolgonderzoek.
- Daarnaast hebben we hoge verwachtingen van de algenmosselen combinatie in de verwijdering van microverontreinigingen. We weten uit literatuuronderzoek [2] dat algen voor verschillende microverontreinigingen (o.a. gidsstoffen carbamazepine, diclofenac, metropolol, trimethoprim) een verwijderingspercentage van 60-95% kunnen behalen (Informatiebox 7)

Informatiebox 7:

### **Aquafarm in vergelijking met Ozon/UV/membraanfiltratie:**

Reguliere technieken voor de verwijdering van (micro-) verontreinigingen zijn oxidatieve technieken zoals ozon en UV/Waterstofperoxide ( $H_2O_2$ ) of absorptietechnieken zoals poederkool en granulair kool. Met deze reguliere technieken kan gemiddeld ruim 80% van de (micro-) verontreinigingen worden verwijderd (afhankelijk van de stof) [30]. Nadelen van oxidatieve processen zijn het hoge energie-verbruik en het feit dat er afbraakproducten achterblijven in het water. Tevens vindt bij toepassing van ozon de vorming van de carcinogene stof bromaat plaats. Bij absorptieve technieken wordt gebruik gemaakt van actief kool. Dit wordt gemaakt uit steenkool, en dus van een fossiele niet hernieuwbare grondstof. Er wordt wel veel onderzoek gedaan naar een duurzamere type actief kool.

### **Aquafarm in vergelijking met 1-STEP®filter:**

Met Aquafarm kan vergaande nutriëntverwijdering worden bereikt, terwijl er ook potentie is voor het verwijderen van microverontreinigingen in dezelfde zuiveringsstap. Alleen 1-STEP®filter [31] is qua verwijdering vergelijkbaar met Aquafarm. Voor een uitgebreide vergelijking van Aquafarm met zandfilter en 1-STEP®filter zie Bijlage C.

### De natuurlijke mechanismen versterken elkaar

De combinatie van deze vier krachten maken dat Aquafarm veel potentie heeft voor de waterschappen om op een andere manier (na) te zuiveren. Met Aquafarm worden de hoge nutriënten concentraties een uitkomst in plaats van een probleem en wordt Aquafarm een plek waar nutriënten en slib worden omgezet tot circulair toegepaste biomassa terwijl er ondertussen minder broeikasgassen worden uitgestoten dan bij de reguliere zuiveringen (of zelfs opgenomen!). Een volledig nieuwe manier om naar (afval)water te kijken.

Met het onderzoek in deze fase hebben we een belangrijk begin gemaakt met het identificeren van de verschillende eigenschappen van de verschillende soorten planten en dieren. Dit is nodig omdat geen effluent hetzelfde is. In de toekomst gaat dit het mogelijk maken om op basis van een effluentkwaliteit tot een specifieke samenstelling in de cascade van organismen te komen waarmee de gewenste kwaliteit wordt bereikt.

#### Dieren

Met de uitgevoerde experimenten in de afgelopen vier jaar hebben we gezien dat veel dieren goed in staat zijn om het slib af te breken

en om te zetten in nutriënten, ook wanneer het slib wat meer organische microverontreinigingen en metalen bevat. Net als in de natuur gaat die omzetting beter wanneer de dieren samen het slib afbreken, zeker als het slib wat meer verontreinigd is. Maar dieren eten niet alleen slib van de bodem, maar ook algen en restjes zwevende stof uit het effluent, en zorgen zo voor schoner effluent. (Figuur 8)



Figuur 8

De vijf onderzochte dieren voor de Aquafarm cascade, met hun sterke kanten en toepassingen



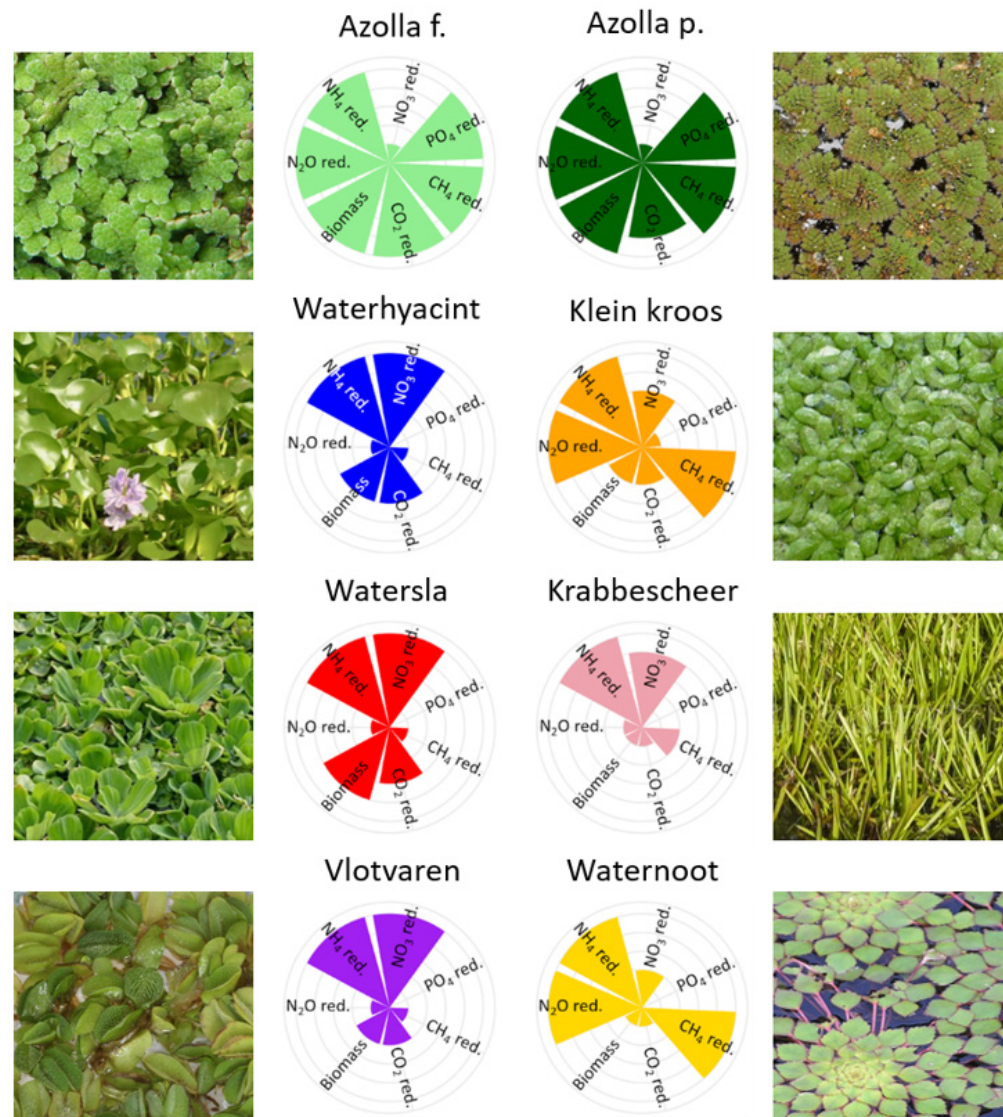
## Planten

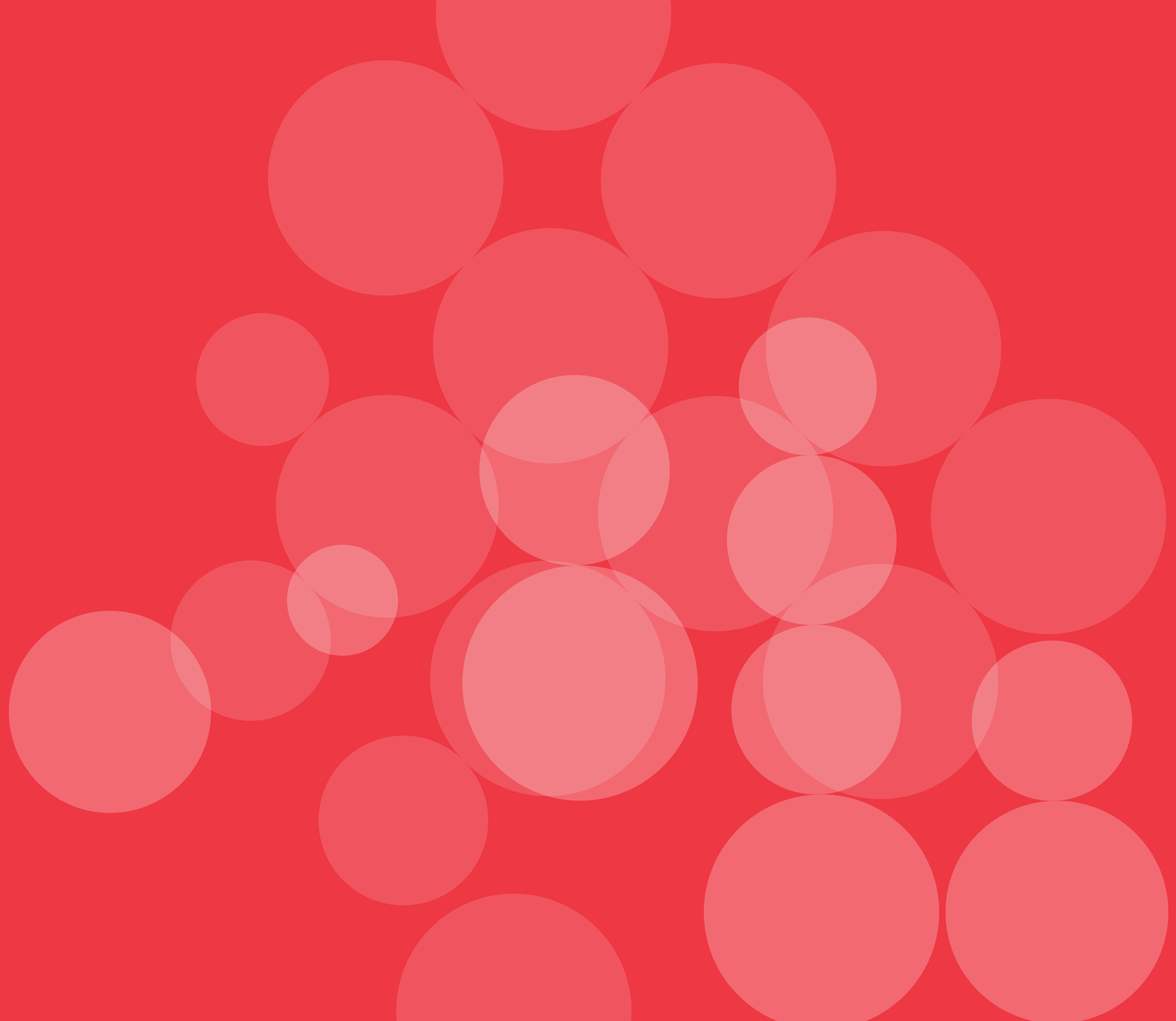
Aan de hand van metingen bij verschillende planten kunnen we per soort achterhalen waar hun 'krachten' geschikt voor zijn en waar minder. Met andere woorden; voor welke opgave bij een zuivering een plant ingezet kan worden. In Figuur 9 zijn acht planten weergegeven die allemaal bij experimenten betrokken zijn geweest. De ene plant is beter in het verwijderen van stikstof, de ander van fosfaat. Weer een andere plant heeft veel invloed op de reductie van broeikasgassen, terwijl een ander hier niets in betekent. Met deze onderzoeken maken we een begin aan een databank van verschillende planten en hun krachten.



Figuur 9

Acht verschillende drijvende planten zijn gekweekt op RWZI effluent. Er is onderzocht hoe goed elke plant presenteert op zeven verschillende onderdelen: verwijdering van fosfaat, nitraat en ammonium, beperking/opname van de broeikasgassen  $\text{CO}_2$ , lachgas en methaan, en biomassa toename. Met name klein kroos en kroosvaren scoorden overall hoog, behalve op de opname van  $\text{NO}_3$ . Andere planten zoals waterhyacint en watersla presteerden hier dan weer beter op.







# 5. Hoe we verder gaan: word Aquafarmer!

*Successen vieren:*

*Netwerkdag 10 oktober 2022*

In 2022 hebben we de tweede fase van Aquafarm afgesloten met het bereiken van TRL 3 en zetten we stappen richting TRL 4-5, de ontwikkelfase. Dit hebben we gevierd tijdens een netwerkbijeenkomst op 10 oktober 2022. Deze middag hebben we de voortgang van Aquafarm gedeeld met een volle zaal geïnteresseerden van waterschappen, universiteiten en het bedrijfsleven. Tijdens deze netwerkdag deelden we met onze gasten onze oproep: **word Aquafarmer!** De voorloper op deze rapportage gaf een mooi beeld van de onderzoeksresultaten en de identiteit van een echte Aquafarmer: duurzaam, circulair en een radicaal nieuwe manier van kijken naar water zuiveren [32].

## **Van proof of principle naar demonstratie**

De komende vier jaar gaan we de kennis die we reeds hebben opgedaan verder uitbouwen met een eerste demonstratie-installatie van de nazuiveringsmodule op een bestaande RWZI. Daarnaast gaan we door met het opbouwen van kennis door te verdiepen op nutriënten, microverontreinigingen, reductie van broeikasgassen en het vermarkten van biomassa. Dit alles zien we als een tussenstap naar een 'volledige'

Aquafarm waarmee afvalwater natuurlijk en circulair wordt gezuiverd tot de gewenste kwaliteit. Begin 2023 wordt er een onderzoeksprogramma geschreven dat richting geeft aan de invulling van de volgende fase. We verwachten deze in de zomer van 2023 af te ronden en daarmee een scherp plan van aanpak te hebben voor de komende jaren.

Ons plan is te verdelen in drie pijlers:

1. Demonstratie Aquafarm als nazuiveringstechniek
2. Kennisontwikkeling
3. Ontwikkelen Aquafarm als concept

## *Leidende principes*

Het onderzoek, de demonstratie en te behalen resultaten stoelen we in deze volgende fase op enkele 'leidende principes'. Deze zijn:

- We gaan implementerend leren. Dit betekent dat het wetenschappelijk onderzoek vanaf deze fase ondersteunend is aan de praktijk. Empirisch onderzoek staat centraal en we leren terwijl we onderweg zijn;
- Het water dat door de nazuiveringsmodule is gestroomd, moet minimaal de KRW-kwaliteit op nutriënten niveau halen;
- De teruggewonnen nutriënten mogen niet terug het watersysteem in (ook

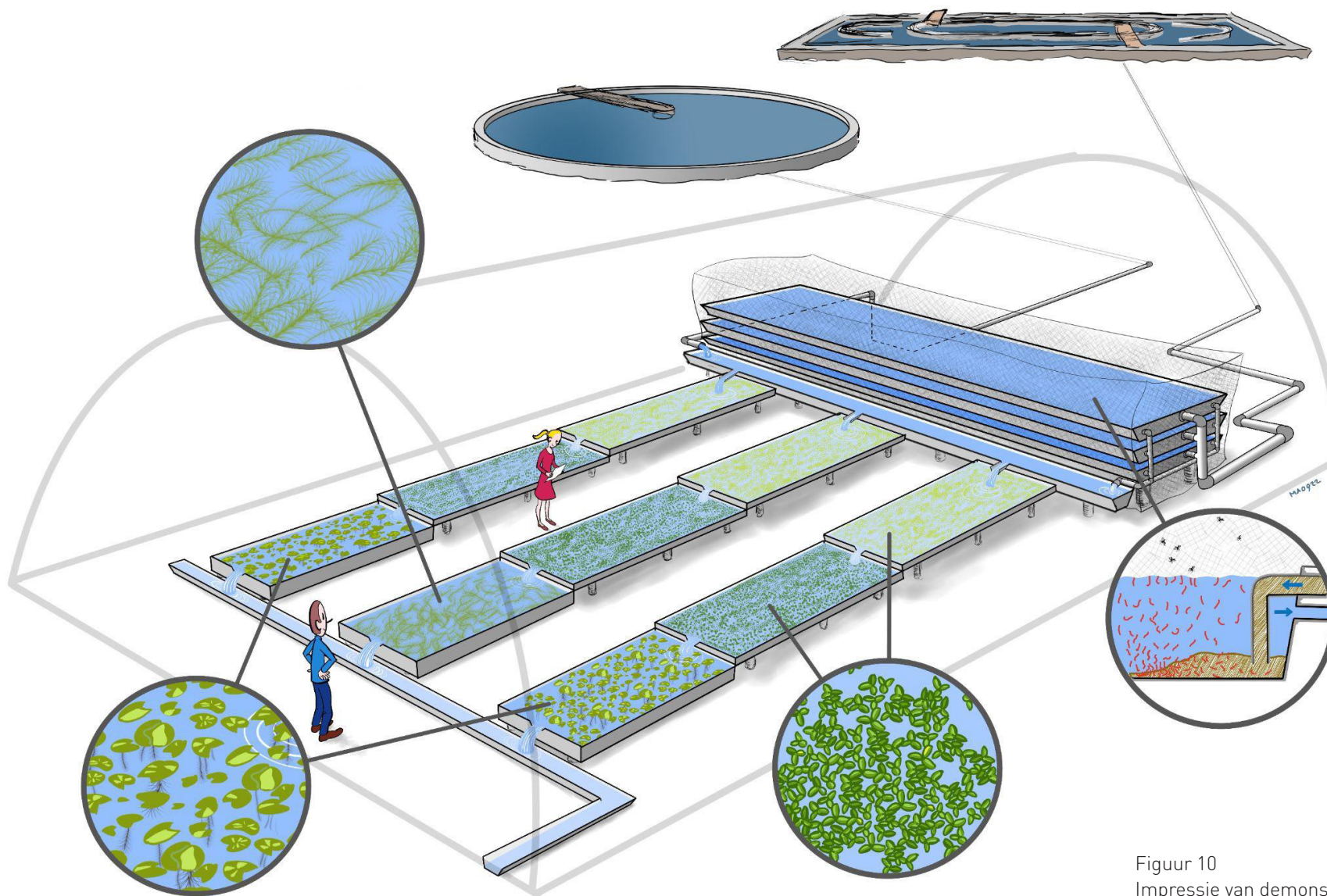
niet via de circulaire toepassing van het biomassa);

- De nazuivering is enkel compleet wanneer we ook inzicht hebben in de klimaatvoetafdruk en broeikasgasuitstoot van de zuiveringsstap. We werken daarbij toe naar een klimaatneutrale óf klimaatpositieve techniek.
- De demonstratie-installatie wordt ontworpen volgens de principes voor circulair bouwen [33]
- Aanvullende vragen [34] financieren en organiseren we apart om focus en voortgang te houden op het realiseren van de nazuiveringsmodule.

## **Pijler 1:**

### **Demonstratie Aquafarm als nazuiveringstechniek**

Bij RWZI Rhenen hebben we sinds 2019 middels een praktijkproef meer inzicht verkregen in de groeiomstandigheden en verwijderingsrendementen van Aquafarmsoorten. Met nog een fase onderzoek weten we dat het mogelijk moet zijn om met de Aquafarm nazuiveringsmodule effluent tot KRW-kwaliteit te zuiveren en tegelijkertijd slib te verwerken, met (nagenoeg) geen broeikasgasuitstoot. Dit biedt perspectief, zeker gezien de opgaven waar de waterschappen vandaag de dag voor staan.



Figuur 10  
Impressie van demonstratie installatie.

In de volgende fase zetten we daarom in op het testen en demonstreren van Aquafarm in relevante praktijkomstandigheden. Dat betekent dat Aquafarm als nazuivering aan het einde van de volgende fase is getest en gedemonstreerd op een RWZI. Daarmee brengen we Aquafarm naar TRL-7. De werking in operationele omgeving is dan bewezen en levert laatste inzichten op voor definitieve toepassing. Daarna kunnen we het product in de markt gaan zetten en als zuiveringsstap aanbieden aan waterschappen. Dit alles gaan we doen door een demonstratie-installatie (Figuur 10) te bouwen van een Aquafarm-nazuivering op een RWZI.

Hierbij staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

*Hoe krijgen we een stabiele bedrijfsvoering waarbij de Aquafarm nazuivering minimaal gedurende 1 jaar water tot KRW-kwaliteit zuivert?*

Dit doen we door een demonstratie installatie te bouwen van 100 - 500 inwoner equivalenten, ca. 15-75 m<sup>3</sup>/dag. Centraal in de demonstratie-installatie wordt het slib vanuit de beluchtingstank op de RWZI naar de slibverwerkingsstraat geleid waar we het afbreken met muggenlarven (maximaal 70%

van het totale slibgehalte wordt afgebroken). Het effluent gaat naar de waterzuiveringsstraat en komt terecht in de plantencascade. Het restslib (de slibfractie die niet afgebroken kan worden, ± 30%) wordt afgevoerd.

## **Pijler 2: Kennisontwikkeling**

*Onderzoek ondersteunend aan praktijk*  
De principes achter Aquafarm worden wetenschappelijk onderzocht voor toepassing op grotere schaal. Dit zorgt ervoor dat we ons systeem begrijpen en de risico's voor het opschalen beperkt blijven. Ook in de toekomst zullen de openstaande vragen en kennishiaten worden beantwoord met wetenschappelijk onderzoek.

In de volgende fase ontstaat er echter een kanteling van onderzoek naar praktijk. De belangrijkste doelstelling is om de nazuiveringsmodule op te schalen en in praktijk te laten werken. Alle andere activiteiten zijn in deze fase daaraan ondergeschikt. Wel zal soms ondersteunend, wetenschappelijk onderzoek nodig zijn om vragen die vanuit de praktijk komen, te beantwoorden. Hiervoor organiseren we een flexibel onderzoeksteam dat met deze vragen aan de slag kan.

*// ‘In de volgende fase ontstaat er een kanteling van onderzoek naar praktijk. De belangrijkste doelstelling is om de nazuiveringsmodule op te schalen en in praktijk te laten werken’ //*

Belangrijke vragen hierbij zijn:

Het verwijderen van microverontreinigingen (medicijnresten)

De focus van de afgelopen jaren lag op het verwijderen van nutriënten. Nu we de nutriëntverwijdering op kleine schaal hebben aangetoond, willen we graag ook gaan kijken naar de verwijderingsrendementen van verschillende soorten microverontreinigingen zoals medicijnresten. Het is van belang voor zowel de effluentkwaliteit als de mogelijkheden van de geproduceerde biomassa om te weten hoeveel van de stoffen worden afgebroken en waar de resterende stoffen eindigen. Om een zo breed mogelijk beeld te krijgen, zal hierbij gekeken naar verschillende typen verontreinigingen met verschillende eigenschappen, waaronder zware metalen, medicijnresten en PAKs. De 11 gidsstoffen [34] worden hierbij ook zoveel mogelijk meegenomen.

Kennis voor optimale ontwerprichtlijnen

Ondanks dat we in de afgelopen jaren al veel verschillende soorten planten en dieren hebben gebruikt, met veelbelovende resultaten, biedt de natuur nog een heel scala aan andere soorten dieren en planten, waardoor de mogelijke combinaties nagenoeg oneindig zijn. Het beter begrijpen van

de interacties tussen de soorten, hoe ze elkaar kunnen versterken en aanvullen, maakt het mogelijk om hier zo optimaal mogelijke keuze in dier en plant te maken. Het doel is dan om het perfecte ‘team’ van organismen samen te stellen, met de juiste kwaliteiten en in de juiste opstelling. Idealiter hebben we straks genoeg kennis om voor ieder specifiek watervraagstuk een ander team samen te stellen.

Toewerken naar volledige zuivering

Als Aquafarm als nazuivering op demonstratieschaal werkt, willen we ook kijken naar andere plekken van de zuivering die we kunnen vervangen. Zo zien wij mogelijkheden om veel biomassa te kunnen produceren door planten te groeien op influent, en om nog meer slib te verwijderen door dieren te kweken op ontwaterd slib. Op deze manier kunnen we stap voor stap naar een gehele Aquafarmzuivering toewerken.

**Pijler 3: Ontwikkelen Aquafarm als circulair concept**

Met het demonstreren van Aquafarm als nazuivering in de volgende fase komt er ook vraag naar afzetmogelijkheden voor de geoogste biomassa uit Aquafarm. In de volgende fase willen we daarom verkennen welke circulaire toepassingen van de biomassa uit Aquafarm er



zijn. Voor enkele grondstofsoorten uit Aquafarm bestaan deze ketens al, voor andere zullen we aan de slag moeten om deze samen met andere partijen op te zetten. Aquafarm houdt de ontwikkelingen op de circulaire markt nauwlettend in de gaten en blijft onderzoek doen naar de samenstelling van geproduceerde grondstoffen zodat, wanneer de kans zich voordoet, wij makkelijk kunnen aanhaken bij het bouwen van of aanleveren van grondstoffen aan bestaande ketens. Gewenste resultaten na fase 3. Met het zetten van stappen in deze drie genoemde pijlers zetten we een belangrijke stap van onderzoek naar het marktklaar maken van Aquafarm als nazuiveringstechniek.

Aan het einde van de volgende fase leveren wij daarom de volgende zaken op:

- Ontwerprichtlijnen voor Aquafarm als nazuiveringstechniek tot KRW-kwaliteit
- Value case voor Aquafarm als nazuivering voor de waterschappen
- Business case voor de afzet van de geoogste grondstoffen uit de Aquafarm
- Eindrapport demonstratie installatie

Voor meer informatie over fase 3 verwijzen we je graag naar het Plan van Aanpak dat in Q2 2023 gereed zal zijn.

### Word Aquafarmer!

Wij geloven in Aquafarm en zien grote potentie in het inzetten van natuurkrachten voor het zuiveren van afvalwater en verwerken van slib op een duurzame, circulaire manier. We hopen dat jij, na het lezen van deze rapportage, er ook zo over denkt. We zijn bij Aquafarm altijd op zoek naar nieuwe partijen die mee willen doen in het verder ontwikkelen van Aquafarm als zuiveringstechniek, het bouwen van circulaire grondstofketens en toekomstbestendige 'grondstof fabriek' voor de waterschappen. Ben je enthousiast geraakt na het lezen van deze rapportage en wil je financierend partner worden van Aquafarm? Of heb je zelfs een locatie waar de demonstratie-installatie gebouwd kan worden? Laat dan [hier](#) je gegevens achter, dan nemen we contact met je op.

Bedankt voor het lezen!





# Referenties en voetnoten

## Referenties bijlage

- [1] RVO.nl (2022). Technology Readiness Levels (TRL). RVO.nl, [www.rvo.nl/onderwerpen/trl](http://www.rvo.nl/onderwerpen/trl)
- [2] Schuijt L., Van Bergen T., Verdonschot P., Smolders F. en Lamers L. (2018), "Waterzuivering en biomassaproductie: complementaire waterzuivering met planten en dieren – Fase 1", Waterschap Rivierenland, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, WSRL-2018018322. Link naar eindrapport
- [3] H2O (2021). Nog geen enkel waterlichaam voldoet aan alle parameters uit de KRW. <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-actueel/noggeen-enkel-waterlichaam-voldoet-aanalle-parameters-uit-de-krw>
- [4] RIVM (2019). Kaderrichtlijn Water (KRW). <https://www.rivm.nl/kaderrichtlijn-water-krw>
- [5] CBS, PBL, RIVM, WUR (2020a). Belasting van het oppervlaktewater met vermestende stoffen, 1990-2018 (indicator 0192, versie 21, 8 oktober 2020 ). [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.
- [6] STOWA, (2017). Landelijke hotspotanalyse geneesmiddelen rwzi's. <https://www.stowa.nl/publicaties/landelijke-hotspotanalyse-geneesmiddelen-rwzis>
- [7] CBS, PBL, RIVM, WUR (2020). Afzet van zuiveringsslib naar bestemming, 1981- 2018 (indicator 0154, versie 20, 15 april 2020). [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.
- [8] Voorthuizen, E. van, Kampschreur, M., Loosdrecht, M. C. M. van, & Uijterlinde, C. A. (2010). Emissies van broeikasgassen van RWZI's. H Twee O : Tijdschrift Voor Watervoorziening En Afvalwaterbehandeling 43 (14/15): 30 - 33.
- [9] Davidson, T. A., Audet, J., Svenning, J. C., Lauridsen, T. L., Søndergaard, M., Landkildehus, F., ... & Jeppesen, E. (2015). Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming. *Global Change Biology*, 21(12), 4449-4463.
- [10] Nijman, T. P., Lemmens, M., Lurling, M., Kosten, S., Welte, C., & Veraart, A. J. (2022). Phosphorus control and dredging decrease methane emissions from shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 847, 157584.
- [11] STOWA (2007). Het actief slibproces. Rapport 2007-24
- [12] STOWA (2019). Risico inschatting emissie lachgas vanuit Nederlandse rioolwaterzuiveringen. Rapport 2019-5.
- [13] Van 't Hoog (2017). 'Straks is het op'- Fosfaatkringloop niet sluitend. *WageningenWorld*, 4, 10-15.
- [14] Donkers, H. & van Vijfeijken, B. (2016). Fosfaatschaarste bedreigt wereldvoedselvoorziening. [Geografie.nl](http://Geografie.nl)
- [15] Schuijt L., Van Bergen T., Verdonschot P., Smolders F. en Lamers L. (2018), "Waterzuivering en biomassaproductie: complementaire waterzuivering met planten en dieren – Fase 1", Waterschap Rivierenland,

- Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, WSRL-2018018322.
- [16] Per kuub (m<sup>3</sup>) slib is ongeveer 2 weken lang 7,7 m<sup>2</sup> nodig.
- [17] Van der Meer (b), Tom V., Piet F. M. Verdonschot, Lisa van Eck, et al. 2022. "Wastewater Treatment Plant Contaminant Profiles Affect Macroinvertebrate Sludge Degradation." *Water Research* 222(February): 118863. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118863>
- [18] Houillon, G., & Jolliet, O. (2005). Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.022>
- [19] Buys, B. R., Klapwijk, A., Elissen, H., & Rulkens, W. (2008). Development of a test method to assess the sludge reduction potential of aquatic organisms in activated sludge. *Bioresource Technology*, 99(17), 8360–8366. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.04>
- [20] STOWA (2013), Waterharmonica's in Nederland 1996-2012. Van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater. <https://www.stowa.nl/publicaties/waterharmonicas-nederland-1996-2012-van-effluent-tot-bruikbaar-oppervlaktewater>
- [21] Mander, L., Dotro, G., Ebie, Y., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Nogueira, S. F., Jamsranjav, B., Kasak, K., Truu, J., Tournebize, J., & Mitsch, W. J. (2014). Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 66, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.006>
- [22] Yoon, Tae Kyung et al. 2017. "CO<sub>2</sub> Outgassing from an Urbanized River System Fueled by Wastewater Treatment Plant Effluents." *Environmental Science and Technology* 51(18): 10459–67.
- [23] Jin, Hyojin et al. 2018. "Longitudinal Discontinuities in Riverine Greenhouse Gas Dynamics Generated by Dams and Urban Wastewater." *Biogeosciences* 15(20): 6349–69.
- [24] Het zo min mogelijk gebruiken van grondstoffen wordt als meest duurzame optie gezien (R-ladder).
- [25] Dijkstra N. (2019). "AquaFarm Praktijkproef Dodewaard". Hoogheemraadschap de Stichtse



- Rijnlanden, inzage op aanvraag.
- [26] Smits E. (2020). "Aquafarm als nazuiveringstechniek De value case". Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, inzage op aanvraag.
- [27] Van der Meer (a), Tom V., Piet F. M. Verdonschot, Lina Dokter, et al. 2022. "Organic Matter Degradation and Redistribution of Sediment Associated Contaminants by Benthic Invertebrate Activities." *Environmental Pollution* 306(March): 119455. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119455>
- [28] STOWA (2021), rapport gidsstoffen. Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten rwzi-afvalwater. Koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage plus deelrapportages. Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten rwzi-afvalwater. Koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage plus deelrapportages | STOWA
- [29] Couto, E., Assemany, P. P., Carneiro, G. C. A., Soares, D. C. F. (2022). The potential of algae and aquatic macrophytes in the pharmaceutical and personal care products (PPCPs) environmental removal: a review
- [30] STOWA (2020), Verwijdering van organische microverontreinigingen. Handvatten voor de keuze van behandelingstechniek in combinatie met de benodigde hydraulische capaciteit. Rapport 2020-6. Verwijdering van organische microverontreinigingen. Handvatten voor de keuze van behandelingstechniek in combinatie met de benodigde hydraulische capaciteit | STOWA
- [31] 1-Step Total Effluent Polishing is een nabehandelingstechniek voor het verdergaand verwijderen van nutriënten en microverontreinigingen.
- [32] Word Aquafarmer! Link naar voorloper op deze rapportage uit 2022
- [33] Wals M. (2020), Circulair Ontwerpen. Hanze Univeristy Groningen, DAAD Architecten. HBO Kennisbank ([hbo-kennisbank.nl](http://hbo-kennisbank.nl))
- [34] Onderzoek naar bijv. de verwijdering van microverontreinigingen, het verbreden van de scope, of het onderzoeken van een andere toepassing.





# *Bijlagen index*

|            |                                                            |
|------------|------------------------------------------------------------|
| Bijlage 1: | Samenvatting van alle onderzoeken/experimenten uit fase 2  |
| Bijlage 2: | Uitgebreide onderbouwing Praktijkproef 2.0 door Adrie Otte |
| Bijlage 3: | Vergelijking Aquafarm met andere zuiveringstechnieken      |
| Bijlage 4: | Lijst met gepubliceerde artikelen van Tom en Lianne        |

*// ‘De zuivering van de toekomst  
moet anders: biodivers,   
klimaatpositief en circulair.  
Gaaf Aquafarm dat brengen?’ //*

*Coert Petri, Senior beleidsadviseur,  
Waterschap Vallei en Veluwe*



## [Bijlage 1 - Uitgebreide samenvatting van experimenten fase 2](#)

### Experimenten met dieren (invertebraten)

#### Experiment 1:

*Afbraak van slib door wormen en waterpissebedden*

Interactie-experiment met wormen en waterpissebedden: kunnen we de afbraak van slib versnellen door meerdere soorten macro-invertebraten samen te voegen, en vergroot dit dan ook de biomassaproductie?

We hebben actief slib uit RWZI Rhenen een maand lang blootgesteld aan vier verschillende behandelingen:

- 1) toevoeging van wormen,
- 2) toevoeging van waterpissebedden,
- 3) toevoeging van wormen en waterpissebedden,
- 4) controle, geen toevoeging van macro-invertebraten.

Vervolgens hebben we gekeken hoe veel slib de invertebraten in een maand verwijderden ten opzichte van de controle. De combinatie van wormen en waterpissebedden versnelden de slibafbraak, en ze verwijderden samen ook meer slib dan je zou verwachten

op basis van wat de soorten los konden afbreken. Verder bleek uit het experiment dat de waterpissebedden zich beter voort kunnen planten als er ook wormen aanwezig zijn, maar dat de wormen minder hard groeien.

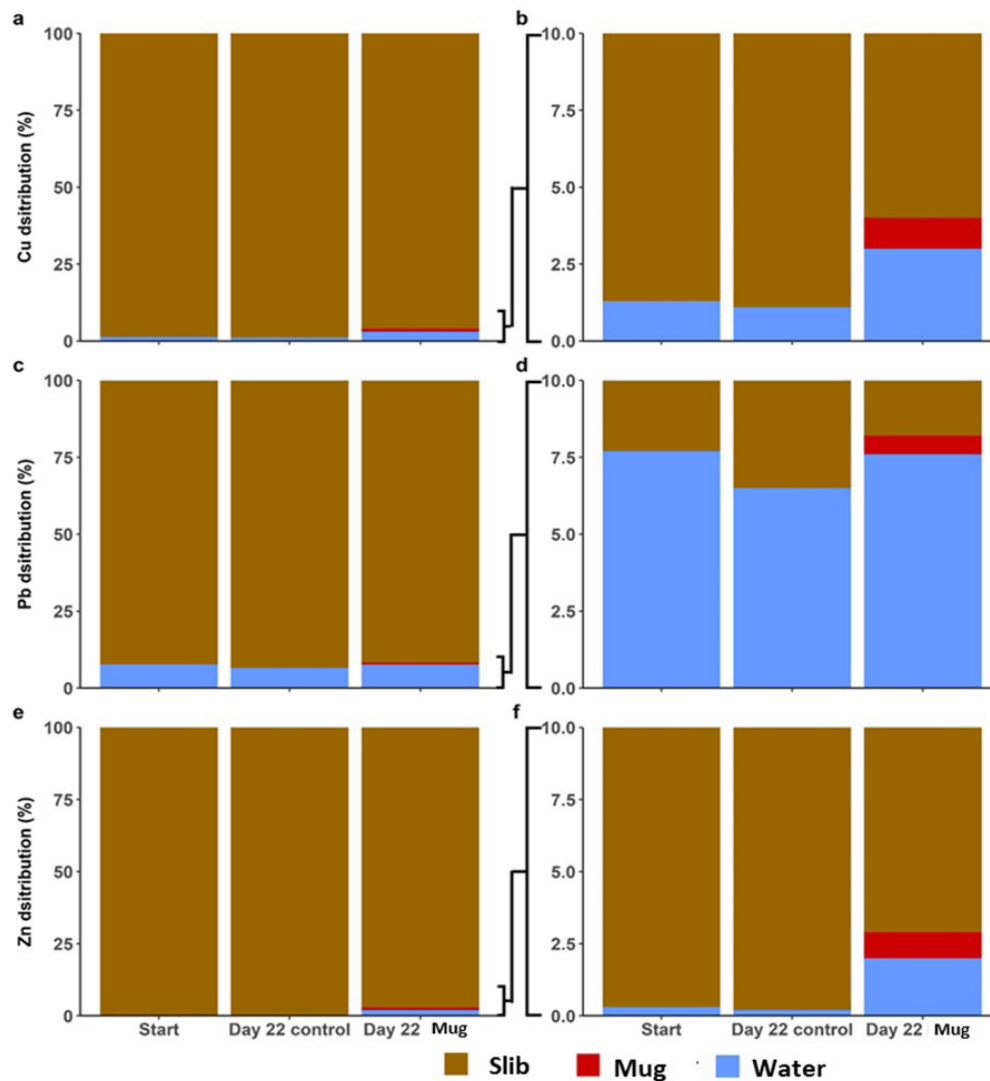
#### Experiment 2:

*Accumulatie en redistributie van zware metalen en PAKs bij slibafbraak door dansmuglarven*

Bioaccumulatie experiment met dansmuggen: In actief slib zitten natuurlijk ook verontreinigingen. In deze proef hebben we onderzocht wat er gebeurt met de zware metalen en PAKs in het slib als dat wordt afgebroken door larven van de dansmug, een nieuw geteste Aquafarm-kandidaat. In dit experiment hebben we hebben eipakketten van de dansmug toegevoegd in aquaria met actief slib uit RWZI Rhenen. Na 22 dagen hebben we gekeken hoeveel slib er was afgebroken, en waar zware metalen (Pb, Zn, Cu, Ni) en PAKs (pyrene, phenanthrene) waren beland; bleven ze in het slib, of zaten ze in het water, of in één of meerdere levensstadia van de dansmuggen? Uit het experiment bleek dat de muggen de afbraak van het slib ruim verdubbelden ten opzichte van de controle, en dat het meeste metaal in het slib bleef

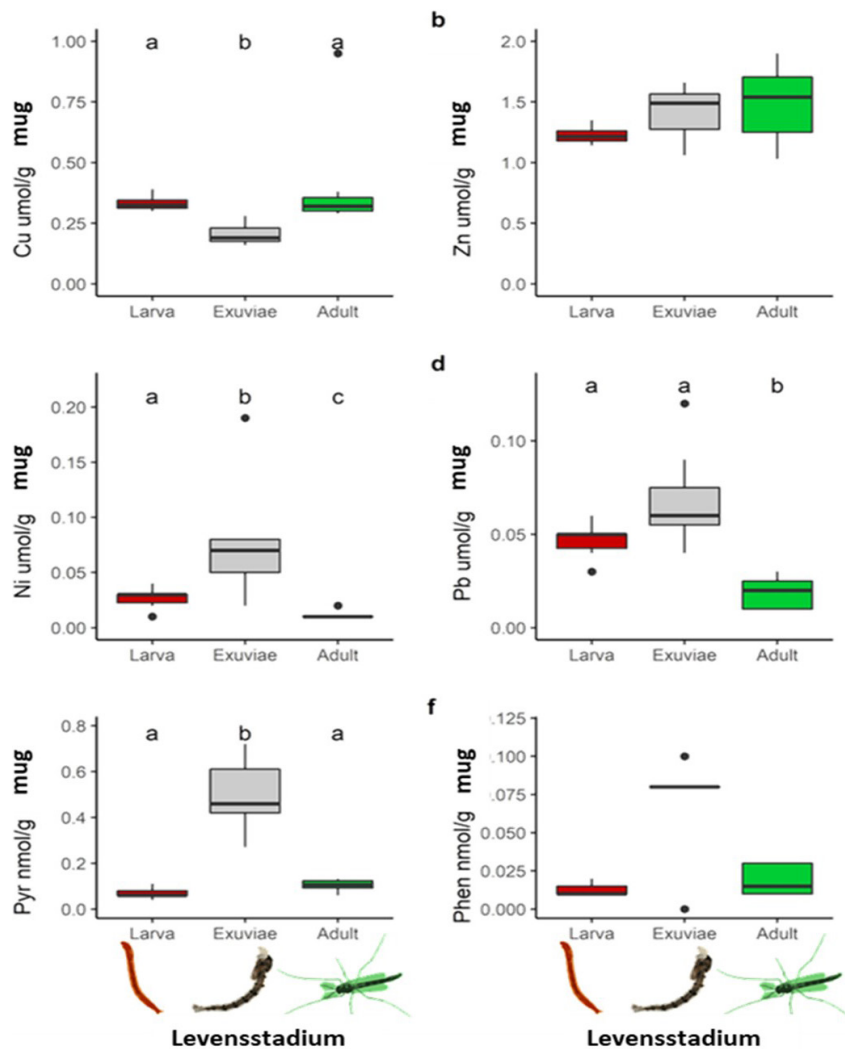
*// ‘Uit het experiment bleek dat de muggen de afbraak van het slib ruim verdubbelden ten opzichte van de controle’ //*

*Dansmuglarven effectieve slibeters*



zitten (90%>)(figuur 11a). Doordat er minder slib over was, zorgde dit voor een hogere concentratie van metalen in het slib. De afbraak van PAKs werd door de muggenlarven iets vertraagd ten opzichte van de controle. Een gering deel van de metalen uit het slib kwam in het water (+/- 2%) terecht, maar zorgde daardoor wel voor flink hogere concentraties in het water.

Figuur 11a  
Hier is de verdeling van de metalen (koper, lood en zink) in het experiment inzichtelijk gemaakt. Aan het begin van het experiment (linker balkje) zitten verreweg de meeste metalen in het slib (bruin), aan het eind van het experiment is dat zonder muggenlarven (middelste balkje) nog steeds zo. De muggenlarven (rechter balkje) zorgen er echter voor dat deel van deze metalen in het bovenliggende water (blauw) terecht komen. Een kleiner deel van de metalen wordt door de muggen (rood) zelf opgenomen. (plaatjes b,d en f zijn een zoom-in van plaatjes a,c, en e).



De verontreinigingen die in de muggen terecht kwamen (+/- 1%), hoopten zich over het algemeen op in de poppenhuidjes (exuviae), waardoor de concentratie in volwassen muggen relatief laag was (figuur 11b). Om de hoeveelheid verontreiniging die uitstroomt te beperken in de Aquafarm cascade, is het belangrijk om dus ook de poppenhuidjes te verzamelen.

Figuur 11b  
De concentratie verontreiniging in de muggen was ten opzicht van het slib over het algemeen een factor 10 lager. De concentraties van koper en zink (a,b) verschillen weinig tussen de drie stadia van de mug (larve = rood, poppenhuidje = grijs, volwassene = groen). De concentraties van nikkel, lood, en de PAKs (c-f) zijn het hoogst in de poppenhuidjes, en lager in de volwassen muggen.

### **Experiment 3:**

*Combinaties van drie invertebraten op slib uit drie zuiveringen*

In dit experiment hebben we onderzocht hoe goed meerdere macro-invertebraten apart en samen slib kunnen afbreken van zuiveringen met een verschillende mate van verontreiniging. We hebben actief slib verzameld van drie RWZI's: Alkmaar, die ook effluent van een ziekenhuis ontvangt, Mijdrecht die ook afvalwater van kleine industrie ontvangt, en Rhenen die voornamelijk huishoudelijk water ontvangt. Aan het slib van deze verschillende RWZI's hebben we wormen, muggenlarven, slakken en alle mogelijke combinaties toegevoegd. We vonden dat (bijna) alle invertebraten de slibafbraak versnellen van elk van de drie zuiveringen. Muggenlarven konden de slibafbraak op slib van Mijdrecht wel met een factor 5 versnellen! De zuivering met de hoogste mate van verontreiniging (Alkmaar) zorgde wel voor de minste versnelling in afbraak, alhoewel hier nog steeds 2.5-4 keer zo veel slib kan worden afgebroken als zonder invertebraten. Bij deze zuivering was wel het voordeel van de combinatie van invertebraten zichtbaar. De gezamenlijke afbraak lag namelijk hoger dan de afbraak die je zou verwachten op basis van de soorten los.

### **Planten-experimenten:**

#### **Experiment 4:**

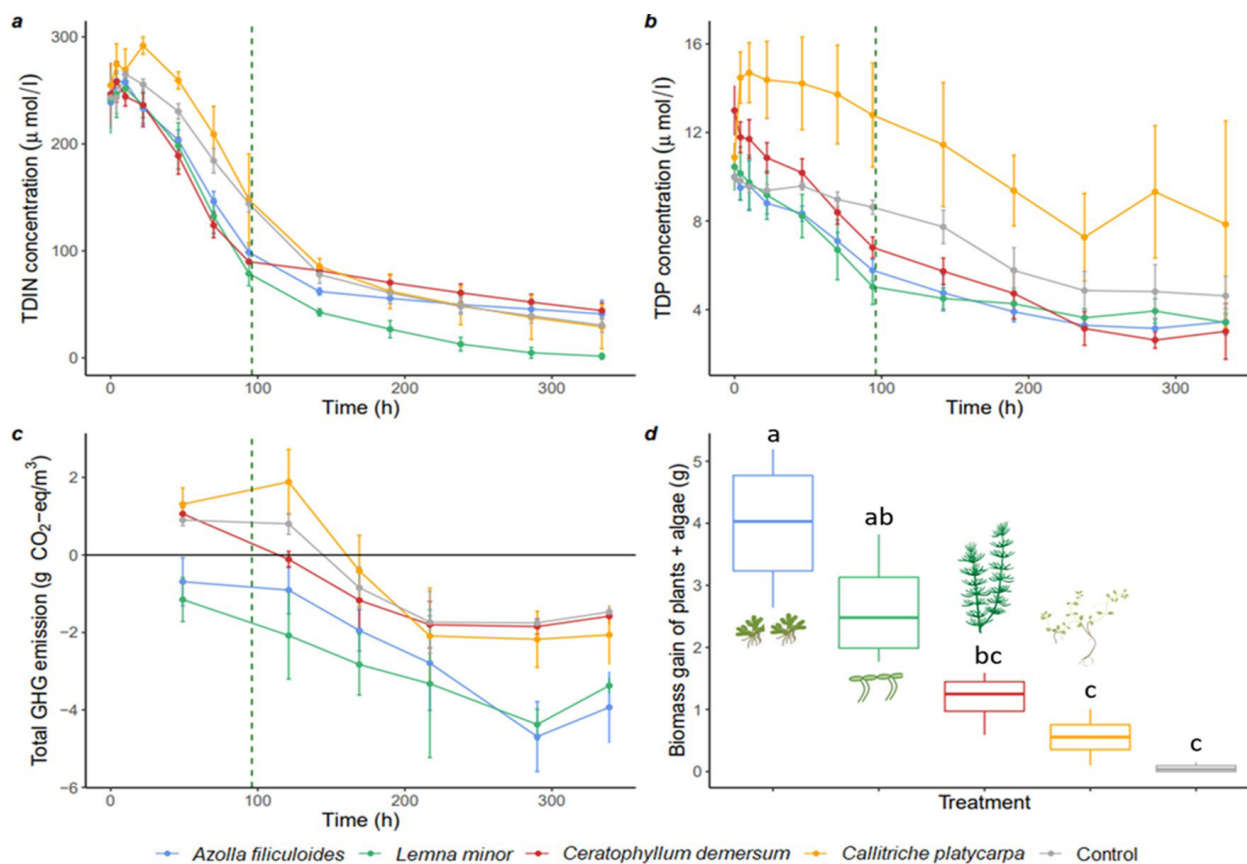
*Effectiviteit van drijvende en ondergedoken waterplanten voor zuivering*

In dit experiment hebben we gekeken naar de groei, stikstofopname, fosforopname en broeikasgasuitstoot ( $\text{CO}_2$ , methaan, lachgas) bij twee drijvende planten (klein kroos en kroosvaren) en twee ondergedoken planten (grof hoornblad en sterrenkroos) die gedurende 15 dagen zijn gegroeid op effluent. De twee drijvende planten hadden een hogere groeisnelheid, betere nutriëntenverwijdering en de hogere broeikasgasopname dan de ondergedoken planten gedurende het experiment (figuur 12). Drijvende planten lijken daarmee beter geschikt voor de meeste Aquafarm doelen.



Figuur 12

Nazuivering van effluent met vier verschillende soorten planten: twee drijvende planten (*Azolla filiculoides* en *Lemna minor*) en twee ondergedoken planten (*Ceratophyllum demersum* en *Callitriche platycarpa*). Metingen over tijd in een periode van 2 weken. Te zien zijn stikstof (TDIN) en fosfor (TDP) concentraties in het water, broeikasgas (GHG) uitstoot van het systeem en biomassa productie van de planten.



### Experiment 5a:

Vergelijking 8 drijvende planten op nutriëntenverwijdering, groei en broeikasgassen

Voortbordurend op het vorige experiment is nu met acht soorten drijvende waterplanten dezelfde test uitgevoerd, waarbij opnieuw naar de groei, stikstofopname, fosforopname en broeikasgasuitstoot is gekeken. Alhoewel alle soorten drijfplanten zijn, hebben ze wel verschillende eigenschappen, zoals wortellengte, groeisnelheid, symbioses met micro-organismen en plantgrootte. Door deze verschillende eigenschappen, presteerden de planten ook verschillend op de gemeten variabelen (figuur 13). Kroosvaren en klein kroos waren op bijna alle vlakken het efficiëntst, behalve op het verwijderen van nitraat (NO<sub>3</sub>).

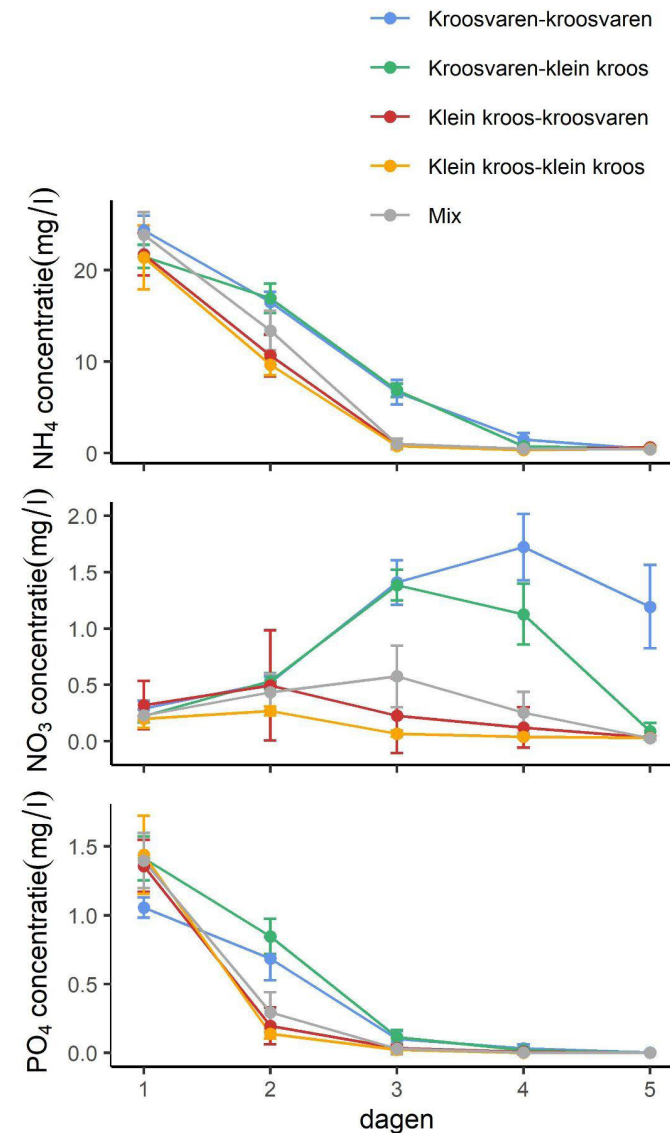
### Experiment 5b:

Combinatie van kroosvaren en klein kroos

In een vervollexperiment hebben we vervolgens gekeken of er een efficiëntere verwijdering van nutriënten bereikt kon worden als kroosvaren en klein kroos tezamen, of na elkaar werden gegroeid op effluent. Hieruit bleek dat kroosvaren alleen niet in staat is om stikstof uit het water te verwijderen, maar als klein kroos hierna komt, wel al het stikstof verwijderd wordt.

Figuur 13

Afname van ammonium, nitraat en fosfaat over de tijd. Op dag 2 werden de planten gewisseld (LA, AL). In de behandeling met alleen kroosvaren (AA) werd nitraat niet goed verwijderd. De toevoeging van klein kroos daarna (AL) of een mix van de twee soorten (MI) zorgde wel voor een goede verwijdering.



### Combinatie-experimenten:

#### Experiment 6:

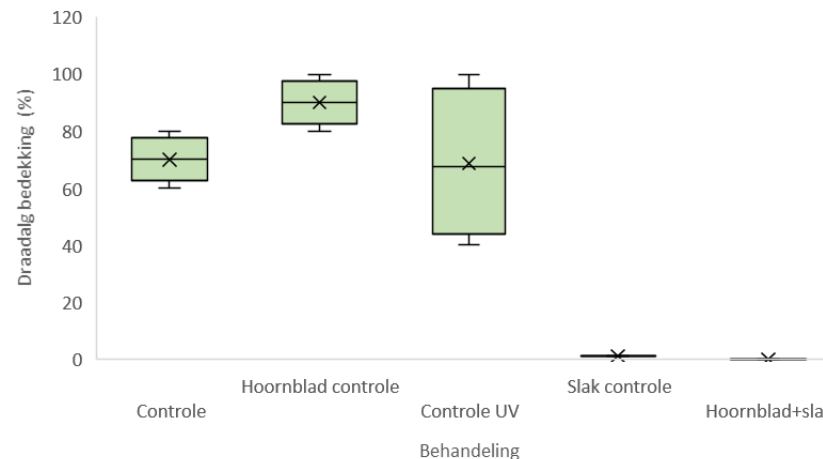
*Interactie-experiment tussen grof hoornblad en slakken.*

Bij de groei van ondergedoken waterplanten kunnen draadalg en phytoplankton een belemmering vormen, omdat deze zowel nutriënten als licht afvangen die belangrijk zijn voor de groei van de ondergedoken plant.

Daarom hebben we in dit experiment onderzocht wat het effect van grote poelslakken is op:

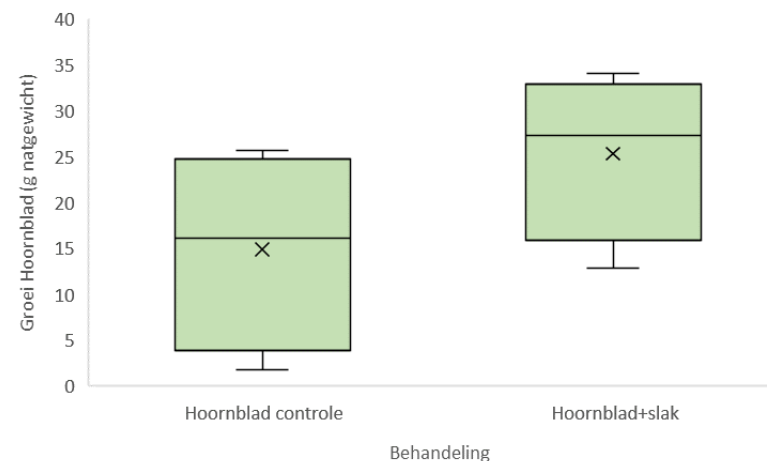
- 1) de groei van grof hoornblad in RWZI effluent
- 2) de ontwikkeling van draadalg en phytoplankton
- 3) de nutriënten in het water.

De slakken voeden zich namelijk met (draad)algen. De slakken verwijderden inderdaad alle draadalg (figuur 14a), en ze beperkten ook de groei van fytoplankton sterk. Daarnaast groeide het grof Hoornblad ook iets harder in aanwezigheid van de slak dan zonder slak en was er een verschil in gewicht na 19 dagen (Figuur 14b). Nutriënten werden echter niet beter verwijderd, waarschijnlijk omdat de algen ook veel nutriënten opnamen en uit de slakkenpoep zou na verloop van tijd ook weer nutriënten vrij kunnen komen.



Figuur 14a

De slakken waren in staat om alle draadalg weg te eten (1e en 2e van rechts). Zonder slakken bedekte draadalg aan het eind van het experiment een groot deel van het wateroppervlak.



Figuur 14b

Het grof hoornblad woog aan het eind van het experiment meer als er slakken aanwezig waren (rechts) dan als er geen slakken bij zaten (links).

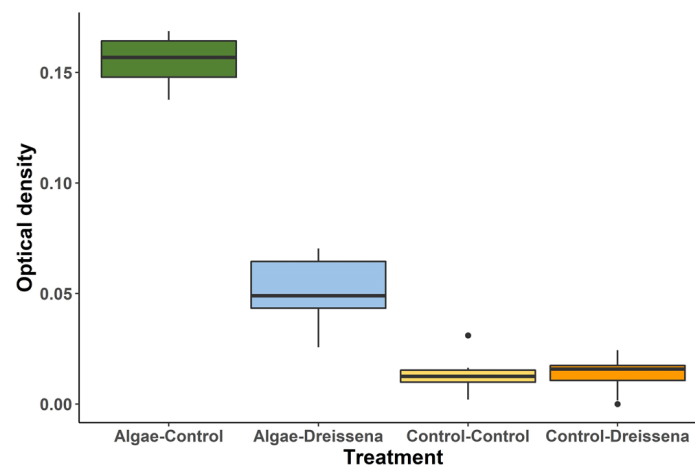
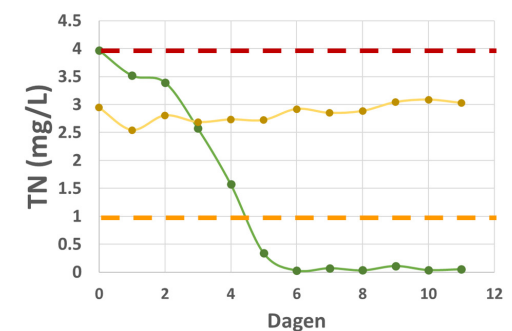
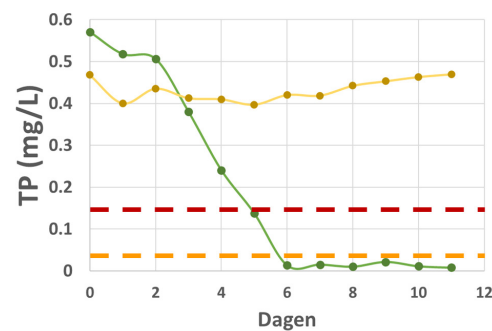
### Experiment 7:

#### Interactie experiment mossel - alg

Het is bekend dat zwevende algen (phytoplankton) erg efficiënt kunnen zijn in het verwijderen van nutriënten en verontreinigingen uit effluent. Het oogsten van deze algen is echter nog lastig, en kost vaak veel energie (drogen, centrifugeren, persen) en/of chemicaliën (coagulanten). In de natuur filteren mosselen ook algen uit het water. Daarom hebben we in dit experiment elf dagen lang algen gekweekt op effluent, en dit effluent algenmengsel drie dagen lang gevoerd aan driehoeksmosselen (figuur 17). De algen konden in die elf dagen 97% van de P en 99% van de N uit het effluent verwijderen, en daarmee de KRW doelen behalen (figuur 15). De mosselen konden vervolgens binnen 24 uur zo goed als alle algen uit de waterkolom verwijderen, en na vier dagen hadden de mosselen 2/3 van alle algen verwijderd (onder suboptimale omstandigheden) (figuur 16).

Figuur 15

De algen (groene lijn) verwijderen binnen zes dagen zowel alle fosfaat (linker grafiek) als alle stikstof (rechter grafiek) op, en behalen daarmee de KRW doelen voor een goede ecologische toestand voor stromend water (rode stippellijn) als meren (oranje stippellijn). In de behandeling zonder algen (gele lijn) worden de nutriënten niet verwijderd.

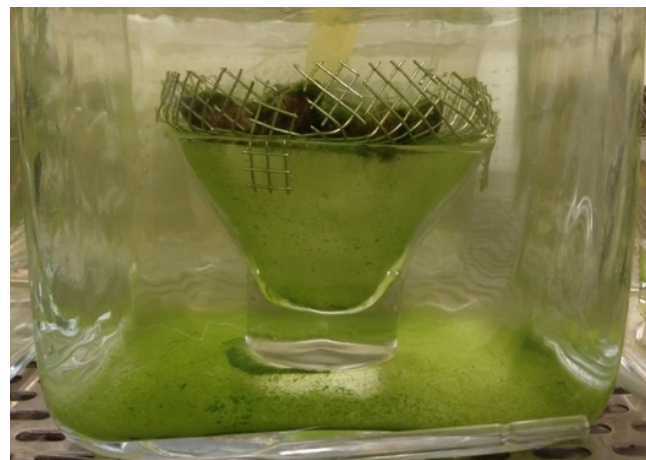
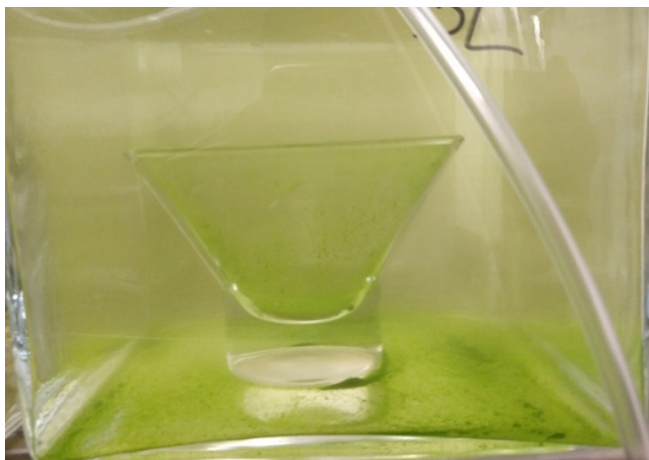
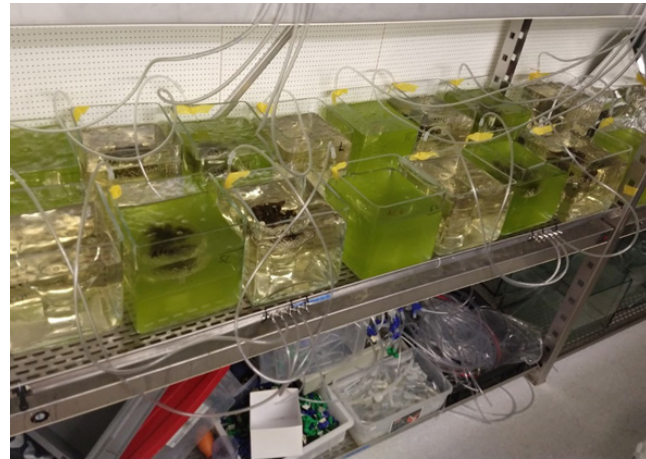
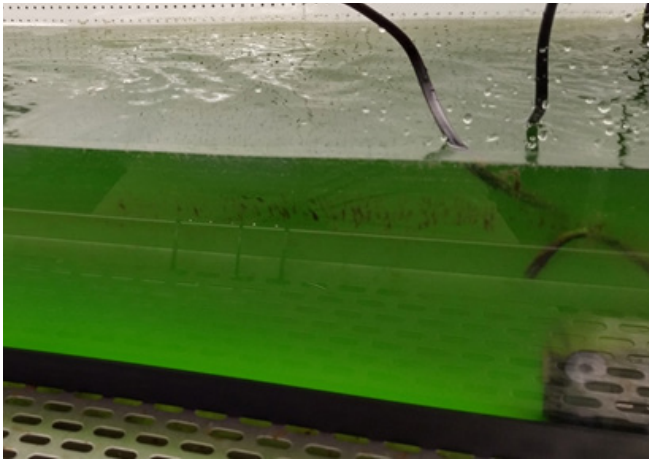


Figuur 16

De algendichtheid in de mosselbakjes (blauw) is na 3 dagen ongeveer 3 keer zo laag als zonder mosselen (groen). Als er geen algen in het water zitten, hebben de mosselen geen effect op het doorzicht van het water (geel en oranje balkje).

Figuur 17

Het algen-mossel experiment in volle gang (linksboven, de algenkweek op effluent; rechtsboven, bakjes met en zonder algen en mosselen). Onder het effect van de mosselen op het water, linksonder is troebel van de alg, rechtsonder is glashelder.



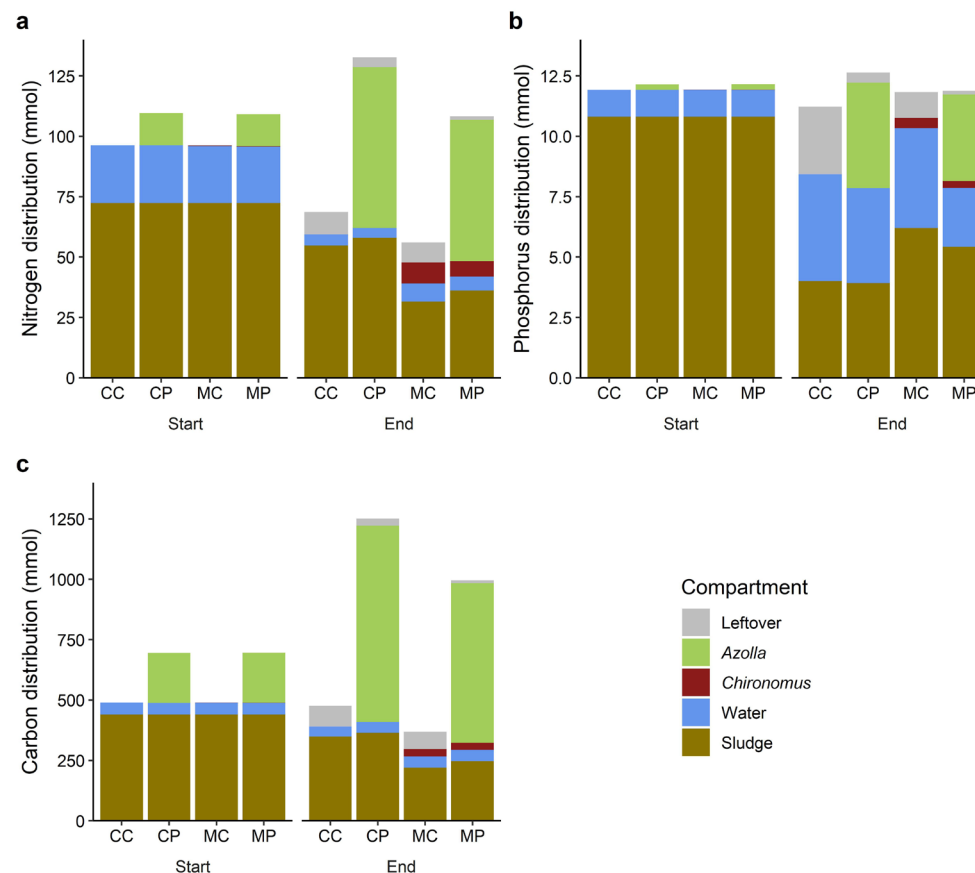
### Experiment 8:

#### *Interactie-experiment met dansmuggen en kroosvaren*

Bij dit experiment is onderzocht hoe een circulerende cascade van dansmuglarven op slib en kroosvaren op effluent, water zuivert en slib reduceert. Hierbij is gekeken naar de nutriënten in het water, slib en in de organismen zelf, en hoe deze organismen dit beïnvloeden. Daarnaast is onderzoek gedaan naar de productie en uitstoot van broeikasgassen. We vonden dat zowel muggen als planten voor een lagere fosfor- en stikstofconcentratie in het water zorgden, en het combineren van beide soorten dus nuttig is. Daarnaast zagen we dat de planten extra CO<sub>2</sub> uit de lucht opnamen, en de muggenlarven voorkwamen dat er methaan werd gevormd, ook daarom is een cascade van de twee soorten gewenst. Elke soort draagt dus op zijn eigen manier bij aan nutriëntbeperking en broeikasgasbeperking. (figuur 18)

Figuur 18

De verdeling van de hoeveelheid stikstof (N), fosfor (P) en koolstof (C) dat in de verschillende compartimenten is gemeten aan het begin en eind van het experiment. Op deze manier kunnen we traceren waar de stoffen terechtkomen: ofwel transport vanuit het slib naar het water of de organismen, ofwel het vasthouden van de stoffen in het slib. De lagere hoeveelheden aan het eind van het experiment bij stikstof suggereert een verwijdering van stikstof uit het systeem als gas. De verhoging van stikstof en koolstof aan het eind is de opname door Azolla uit de lucht.





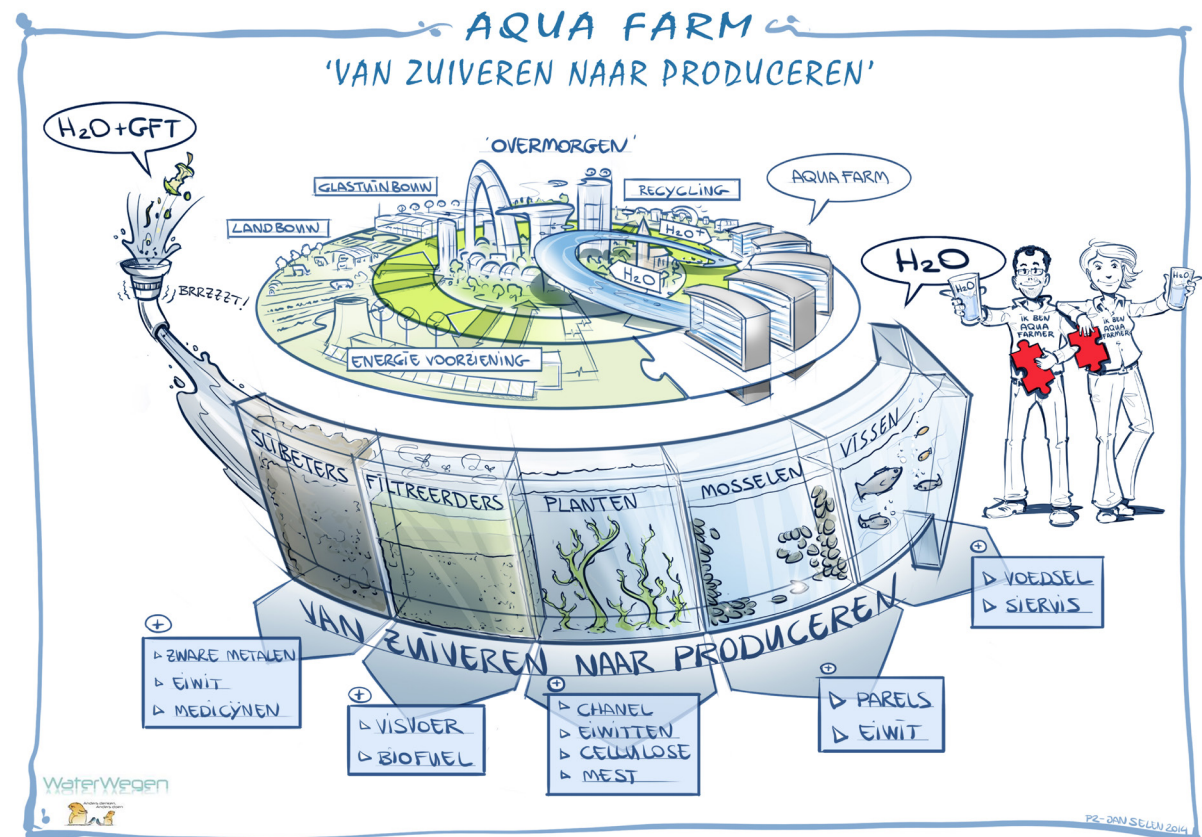
## [Bijlage 2 - Rapport Aquafarm](#) [Praktijkproef 2.0](#)

Auteur: Adrie Otte

### Inleiding

De ontwikkeling van Aquafarm gaat een nieuwe fase in. Na een aantal experimenten met enkele organismen, is de volgende stap het realiseren van een compleet, zij het kleinschalig, pilotproject. In de vorige fases zijn proeven gedaan met het afbreken van slib met verschillende organismen en met het verwijderen van nutriënten met drijvende waterplanten. Deze proeven hebben veel informatie opgeleverd over afbraak- en opnamesnelheden en de efficiëntie van de verschillende organismen.

In de pilot moet de vergaarde kennis samen worden gebracht, geïntegreerd en verder in een praktijksituatie worden getest. In dit document wordt een aanzet gegeven voor het ontwerp voor deze praktijkproef 2.0. Doel van de praktijkproef is om verschillende systemen naast elkaar te testen.



### Onderdelen praktijkproef 2.0

De opzet van de praktijkproef 2.0 is als volgt. In een straat wordt slibafbraak met muggenlarven getest. De waterzuivering wordt getest met drie parallelle straten waarin de zuiveringscapaciteiten van verschillende organismen wordt onderzocht.

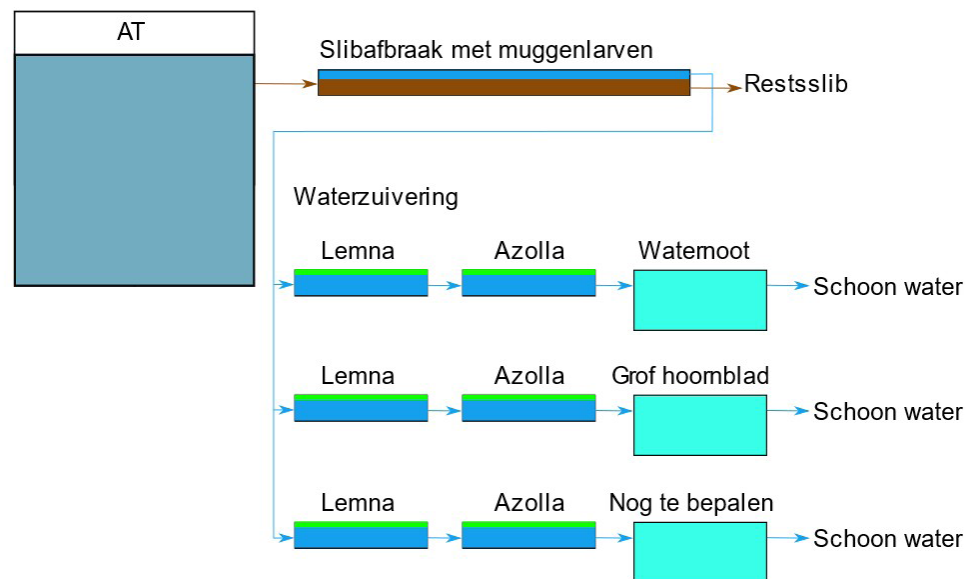
In de praktijkproef 2.0 worden twee onderdelen verder getest:

1. Slibafbraak met muggenlarven
2. Waterzuivering, drie parallelle straten met drie onderdelen elk:
  - a. Lemna, Azolla en waternoot
  - b. Lemna, Azolla en grof hoornblad
  - c. Lemna, Azolla en een nader te bepalen waterplant

In Figuur 19 is een schema weergegeven van de proef. Vanuit de AT op de rwzi gaan water en slib naar de slibverwerkingsstraat (afbraak met muggenlarven). Het water gaat naar de drie waterzuiveringsstraten. Het water dat aan het eind van de slibverwerkingsstraat op het slib staat, wordt teruggevoerd naar de waterzuiveringsstraat. Het restslib (de slibfractie die niet afgebroken kan worden,  $\pm 30\%$ ) wordt afgevoerd. De muggenlarven worden uit het slib geoogst en verkocht als vissenvoer.

Figuur 19

Schematische weergave van de opzet van de proef





### Beschrijving van de onderdelen

#### *Slibafbraak met muggenlarven*

Uit de proeven met slibafbraak met muggenlarven blijkt, dat in een week 36% van het slib door muggenlarven wordt afgebroken. Maximaal kan 70% van het slib worden afgebroken en dit betekent dat het slib in 1,9 weken tot zijn maximum wordt afgebroken door muggenlarven. Het slib dient dus 1,9 weken in de slibafbraak met muggenlarven te blijven. De temperatuur van het water moet tussen 12 en 25 graden liggen voor optimale afbraak. De experimenten zijn gedaan bij 20 graden. Omdat slibafbraak veel zuurstof vraagt, dienen de bakken belucht te worden.

Over de bakken met slib en muggenlarven wordt gaas gespannen, zodat uitgevlogen muggen niet ontsnappen. Zij leggen eitjes op de bakken. Deze komen weer uit en nieuwe muggenlarven komen in de bak. Uit het slib wordt 80% van de muggenlarven geoogst, de overige 20% wordt geënt in de volgende batch slib.

Bij een effluentdebiet van 50 m<sup>3</sup>/d komt er 17,5 kg ds/d slib uit de bezinktank. Voor de behandeling worden goten gebruikt zoals in Figuur 20, of vergelijkbare, bredere goten.



Figuur 20  
Slibbehandelingsgoot

Foto: Pieter Wilbrink  
(3F Frozen Fish Food)

## Waterzuivering

### *Waterzuivering met kroos*

Lemna-soorten en Azolla zijn goed in staat om nutriënten uit water te halen. Beide hebben een hoge groeisnelheid en daarmee een hoge nutriëntenopnamesnelheid. Azolla heeft als voordeel dat het een symbiose heeft met stikstoffixerende bacteriën, waardoor deze soort geschikt is bij een lage N/P-verhouding.

De groeisnelheid van kroossoorten is afhankelijk van licht en temperatuur. De groeisnelheid en daarmee de nutriëntopname is dus niet constant door het jaar heen, maar hoog in het groeiseizoen en laag in het winterseizoen.

### *Waterzuivering met dieper wortelende of ondergedoken waterplanten*

In het derde compartiment van elke waterzuiveringsstraat worden dieper wortelende of ondergedoken waterplanten getest. Het gaat hierbij om waternoot, grof hoornblad en een nader te bepalen soort. Beide genoemde soorten groeien goed op effluent, hebben een nuttige toepassing en kunnen geoogst worden.

## Dimensionering

Voor de dimensionering wordt een debiet aangehouden van 50 m<sup>3</sup>/d. Bij hogere debieten kunnen de aangegeven

oppervlaktes evenredig worden aangepast. Elke waterzuiveringsstraat krijgt 1/3 van dit debiet, dat is 16,7 m<sup>3</sup>/d. De slibverwijderingsstraat krijgt 17,5 kg ds/d te verwerken.

Voor de concentraties in het effluent van rwzi Rheden wordt uitgegaan van metingen die gedaan zijn in juni en juli 2022 (zie Tabel 1). Voor de dimensionering zijn de gemiddelde waarden genomen. De gewenste concentraties na de zuiveringsstap zijn 1,0 mg N/l en 0,10 mg P/l.

### *Slibverwijdering met muggenlarven*

Voor het dimensioneren van de slibverwerking is uitgegaan van de volgende gegevens:

- Slibhoeveelheid: 17,5 kg ds/d
- Slibdichtheid: 17,5 kg ds/m<sup>3</sup>
- Afbraaksnelheid door muggenlarven: 36%/week
- Benodigde verblijftijd is dan 2 weken
- Totaal volume slib gedurende 2 weken: 14 m<sup>3</sup>
- Elke dag wordt 1 slibgoot gevuld met de slibhoeveelheid van die dag.
- Diepte sliblaag in de slibgoot: 10 cm
- De slibgoten zijn aan de bovenkant 70 cm breed en lopen taps toe. De onderkant is 30 cm breed.
- Totale oppervlak slibgoten: 490 m<sup>2</sup>.
- Oppervlakte per slibgoot: 35 m<sup>2</sup>

De slibgoten kunnen boven elkaar worden geplaatst om ruimte te besparen.

### *Waterzuivering met Lemna en Azolla*

Voor de dimensionering van de krooszuivering is uitgegaan van in een eerder stadium van onderzoek voor Aquafarm verkregen gegevens over opname van N en P [zie Tabel 2].

Bij de dimensionering wordt Lemna voor Azolla geplaatst. Er is een relatieve overmaat aan fosfaat aanwezig in het effluent. Eerst neemt Lemna P en N op. Als N bijna is uitgeput en er nog veel P over is, neemt Azolla het over. Azolla kan N uit de lucht opnemen en daardoor P verder uit het effluent verwijderen tot een concentratie van 0,10 mg P/l. Vervolgens komt er een compartiment met grof hoornblad, waternoot of een andere ondergedoken of drijvende waterplant.

### **Waterzuivering met waternoot, grof hoornblad of een andere waterplant**

Van deze waterplanten is er alleen onderzoek gedaan naar de N en P opname door grof hoornblad. De N en P opnamesnelheden staan in Tabel 3.

Tabel 1. Gemiddelde, mediane en 90-percentiel concentraties in het effluent van rwzi Rhenen

| rwzi Rhenen   | NH <sub>4</sub><br>mg N/l | NO <sub>3</sub><br>mg N/l | PO <sub>4</sub><br>mg N/l |
|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Gemiddeld     | 1,31                      | 0,83                      | 0,64                      |
| 90-percentiel | 2,22                      | 1,03                      | 0,88                      |
| Mediaan       | 1,30                      | 0,78                      | 0,59                      |

Tabel 2. N en P opnamesnelheden door Lemna en Azolla

|        | P<br>mg P/m <sup>2</sup> .d | NH <sub>4</sub><br>mg P/m <sup>2</sup> .d | NO <sub>3</sub><br>mg P/m <sup>2</sup> .d |
|--------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Lemna  | 40                          | 200                                       | 240                                       |
| Azolla | 40                          | 200                                       | 240                                       |

Tabel 3. N en P opnamesnelheden door grof hoornblad

|                | P<br>mg P/m <sup>2</sup> .d | NH <sub>4</sub><br>mg P/m <sup>2</sup> .d | NO <sub>3</sub><br>mg P/m <sup>2</sup> .d |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Grof hoornblad | 60                          | 300                                       | 400                                       |

#### Grootte compartimenten

De oppervlakten, diepten van en concentraties aan het eind van elk compartiment in de 3 straten staan in Tabel 4. De compartimenten 1 en 2 in elke straat zijn 12 cm diep en respectievelijk 60 en 150 m<sup>2</sup> groot. De laatste compartimenten zijn 40 cm diep en 36 m<sup>2</sup> groot. Na compartiment 3 zouden de concentraties van P en N (ver) onder de KRW-norm moeten liggen.

#### Literatuur

STOWA (2011). *Effluentpolishing met algentechnologie*. STOWA rapport 2011-04.

Van Hoorn van Dulleman, M. (2012). *Effluentpolishing met kroos*. Deelrapport 4: Pilotstudie.

Tabel 4. Grootte compartimenten en concentraties aan het eind van elk compartiment

|            | Grootte compartimenten |             | Straat      |                           |                           |             |                           |                           |             |                           |                           |
|------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|
|            |                        |             | 1           |                           |                           | 2           |                           |                           | 3           |                           |                           |
|            | Opp.<br>M <sup>2</sup> | Diepte<br>M | P<br>mg P/L | NH <sub>4</sub><br>mg N/L | NO <sub>3</sub><br>mg N/L | P<br>mg P/L | NH <sub>4</sub><br>mg N/L | NO <sub>3</sub><br>mg N/L | P<br>mg P/L | NH <sub>4</sub><br>mg N/L | NO <sub>3</sub><br>mg N/L |
| In         |                        |             | 0,64        | 1,31                      | 0,83                      | 0,64        | 1,31                      | 0,83                      | 0,64        | 1,31                      | 0,83                      |
| Lemna      | 60                     | 0,12        | 0,50        | 0,59                      | 0,00                      | 0,50        | 0,59                      | 0,00                      | 0,50        | 0,59                      | 0,00                      |
| Azolla     | 165                    | 0,12        | 0,10        | 0,00                      | 0,00                      | 0,10        | 0,00                      | 0,00                      | 0,10        | 0,00                      | 0,00                      |
| Compart. 3 | 36                     | 0,40        | 0,10        | 0,00                      | 0,00                      |             |                           |                           |             |                           |                           |

### Bijlage 3 - Aquafarm in vergelijking met conventionele technieken

#### **Aquafarm als nazuiveringstechniek**

Als nabehandeling kan Aquafarm het best worden vergeleken met zandfiltratie voor nutriënten-verwijdering of met 1-STEP®filter voor zowel nutriëntenverwijdering als de verwijdering van microverontreinigingen.

*Voordelen van Aquafarm ten opzichte van deze technieken zijn:*

- Bij Aquafarm worden geen chemicaliën (zoals metaalzout en C-bron) gebruikt;
- Het energieverbruik ligt lager;
- Bij Aquafarm wordt CO<sub>2</sub> vastgelegd in biomassa;
- Aquafarm levert producten en draagt hiermee bij aan circulariteit.

*De inzet van Aquafarm als nabehandeling kent ook nadelen:*

- Aquafarm heeft een relatief groot oppervlak nodig. Daarom wordt ook nadacht over vertical-farming en het werken met meerdere verdiepingen;
- Aquafarm is een biologisch proces en daardoor ook moeilijker te sturen dan een fysisch/chemisch proces;
- Er zijn aanvullende maatregelen nodig om met Aquafarm in de winter voldoende rendement te halen.

#### **Aquafarm als volledige zuivering**

Uiteindelijk willen we Aquafarm als volledige zuivering inzetten. Hiermee kan het een conventionele zuivering vervangen.

*Dit geeft de volgende voordelen:*

- Bij Aquafarm is minder intensieve beluchting nodig waardoor het energieverbruik lager ligt;
- Bij de conventionele zuivering ontstaat veel broeikasgas, zoals (kortcyclische) CO<sub>2</sub>, lach-gas en methaan. Aquafarm legt CO<sub>2</sub> vast in biomassa;
- Aquafarm produceert geen zuiveringsslib, maar levert producten en draagt hiermee bij aan circulariteit;
- Aquafarm is een natuurlijk zuiveringsproces. Dit maakt ruimtelijke inpassing eenvoudiger.

*Bij volledige zuivering door Aquafarm zijn er de volgende nadelen:*

- Aquafarm heeft een relatief groot oppervlak nodig. Daarom wordt ook nadacht over vertical-farming en het werken met meerdere verdiepingen;
- Er zijn aanvullende maatregelen nodig om met Aquafarm in de winter voldoende rendement te halen.

*// ‘Voordelen van Aquafarm ten opzichte van andere nazuiveringstechnieken zijn o.a. dat er geen chemicaliën (zoals metaalzout en C-bron) worden gebruikt, het energieverbruik lager ligt en CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd in biomassa’ //*

[Bijlage 4 - Publicaties Tom van der Meer en Lisanne Hendriks](#)

Hendriks, L., van der Meer, T. V., Kraak, M.H.S., Verdonschot, P.F.M., Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M. & Veraart, A.J. (submitted) Sludge degradation, nutrient removal and reduction of greenhouse gas emission by a Chironomus-Azolla wastewater treatment cascade

Hendriks, L., Smolders, A.J.P., van den Brink, T., Lamers, L.P.M., Veraart, A.J. (in revision). Plant-based municipal effluent polishing: Floating plants perform better than submerged plants in both nutrient removal and reduction of greenhouse gases.

Hendriks, L., Weideveld, S., Fritz, C., Stepina, T., Aben, R.C.H., Fung, N.E., Kosten, S. (in revision). Drainage ditches are greenhouse gas hotlines in peat landscapes with strong seasonal and spatial variation in diffusive and ebullitive emissions.

Hendriks, L., Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M., Veraart, A.J. (in prep). Efficient wastewater effluent polishing and carbon-capture using floating plants: different species target different treatment goals.

van der Meer, T. V., Davey, C. J. E., Verdonschot, P. F. M., & Kraak, M. H. S. (2023). Removal of nutrients from WWTP effluent by an algae-mussel trophic cascade. Ecological Engineering, 190, 106930. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106930>

van der Meer, T. V., Verdonschot, P. F. M., van Eck, L., Narain-ford, D. M., & Kraak, M. H. S. (2022). Wastewater treatment plant contaminant profiles affect macroinvertebrate sludge degradation. Water Research, 222(February), 118863. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118863>

van der Meer, T. V., Verdonschot, P. F. M., Dokter, L., Absalah, S., & Kraak, M. H. S. (2022). Organic matter degradation and redistribution of sediment associated contaminants by benthic invertebrate activities. Environmental Pollution, 306(March), 119455. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119455>

van der Meer, T. V., van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C. M., & Verdonschot, P. F. M. (2021). Macroinvertebrate interactions stimulate decomposition in WWTP effluent-impacted aquatic ecosystems. Aquatic Sciences, 83(4), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00027-021-00821-8>

Voor meer informatie:

[Klik hier](#) voor meer informatie

Email: [lotte.dietz@van-waarde.com](mailto:lotte.dietz@van-waarde.com)





