

Aquafarm als nazuiveringstechniek

De value case



09-04-2020

Stageverslag Emma Smits



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Aquafarm 

Aquafarm als Nazuiveringstechniek – De value case.

Disclaimer: Dit rapport is geschreven als onderdeel van de opleiding MSc Environmental Sciences van door een student van Wageningen University. Dit is geen officiële publicatie van Wageningen University and Research en de inhoud van het rapport is geen representatie van de formele positie van Wageningen University and Research.

Aquafarm is een initiatief van:



Samenvatting

Aquafarm is een innovatie in de waterzuiveringswereld waarbij natuurlijk processen worden ingezet om water te zuiveren. Planten en ongewervelde dieren zuiveren het water waarbij biomassa wordt geproduceerd. Rioolwater wordt hierbij niet gezien als afval maar als bron van grondstoffen waarmee hoogwaardige producten geproduceerd kunnen worden. Sinds 2014 wordt onderzoek gedaan naar de processen rondom Aquafarm en zijn veelbelovende praktijkproeven opgezet. Om Aquafarm te blijven ontwikkelen, is meer onderzoek nodig waarvoor de potentie en het belang van de ontwikkeling van Aquafarm duidelijk moet zijn.

Om de innovatie van Aquafarm verder te helpen, geeft dit rapport een overzicht van de potentie van Aquafarm als nazuiveringstechniek door middel van een value case. Aquafarm heeft verschillende potentiële toepassingen. Dit rapport richt zich echter op Aquafarm als nazuivering, omdat rond deze toepassing het meeste onderzoek heeft plaatsgevonden. Een value case belicht meerdere aspecten van een project. Dit gaat om aspecten als zuiveringsefficiëntie en kosten, maar ook om zachte waarden die niet direct gekwantificeerd kunnen worden zoals innovatie.

De value case geeft aan dat de potentie van Aquafarm te vinden is op het gebied van waterkwaliteitsverbetering, terugwinning van grondstoffen, positieve bijdrage aan bredere opgaven voor waterschappen en zachte waarden. Aquafarm is een nazuiveringstechniek die bijdraagt aan de verwijdering van de nutriënten stikstof en fosfor en een educatief en innovatief karakter heeft. De productie van hoogwaardige materialen uit teruggewonnen grondstoffen maakt Aquafarm uniek in vergelijking met andere nazuiveringstechnieken.

Acroniemen

BZV	Biologische zuurstofvraag
CZV	Chemische zuurstofvraag
HDSR	Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
N	Stikstof
P	Fosfor
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie

Inhoud

Samenvatting	iii
Acroniemen	iii
1. Inleiding.....	1
1.1 Introductie Aquafarm.....	1
1.2 Huidige ontwikkelingsfase Aquafarm	1
1.3 Belang van een value case	2
1.4 Doel van dit rapport.....	2
2. Onderzoeksvragen.....	3
3. Methoden en achtergrond.....	4
3.1 Value case	4
3.2 Business case.....	4
3.3 Vergelijkbare nazuiveringstechnieken	4
4. Potentiële opbrengst	5
4.1 Overzicht afgelopen onderzoeken	5
4.2 Overzicht resultaten onderzoek	6
Slibreductie.....	6
Broeikasgasreductie	6
Nutriëntenopname	6
Hoogwaardige producten.....	6
Zware metalen	7
Microverontreinigingen	7
5. Opzet van de value case	8
5.1 Grondstoffen terugwinning	8
5.2 Waterzuivering	8
5.3 Bredere opgaven waterschappen	9
5.4 Zachte waarden.....	10
6 Value case.....	12
6.1 Het scenario: Aquafarm als nazuivering	12
6.2 Terugwinnen van de top 5 grondstoffen	12
Fosfor hergebruik	12
Biomassa hergebruik.....	12
Bioplastics, algiinaat en cellulose hergebruik.....	13
6.3 Waterkwaliteitsverbetering	13
Stikstof en fosforverwijdering.....	13
Chemisch zuurstofverbruik	13
Microplastics	13

Medicijnresten	14
Zware metalen	14
6.4 Waterschapsbrede opgaven	14
Broeikasgasreductie	14
Energie neutraal	15
Innovatief	15
Circulariteit	15
Biodiversiteit	15
6.5 Zachte waarden	16
Duurzaamheidswinst	16
Tegengaan hittestress	17
Landschappelijke waarde	17
Educatieve waarde	17
Maatschappelijke waarde	17
6.6 Business case	18
Ontwerp Aquafarm voor de business case	18
Kosten Aquafarm	21
Opbrengsten Aquafarm	22
7 Discussie	24
7.1 Value case	24
7.2 Vergelijking nazuiveringstechnieken	24
Zuivering	24
Biomassa productie	24
Hergebruik biomassa en opbrengsten	25
Energieverbruik	25
7.3 Aanbevelingen toekomstig onderzoek Aquafarm	25
8 Conclusie	26
Literatuurlijst	28

1. Inleiding

Er vindt een paradigmaverschuiving plaats van een lineaire economie naar een circulaire economie. De circulaire economie vermindert de druk op het milieu door het verminderen van afvalstromen en het hergebruik van grondstoffen (EASAC, 2016). De watersector speelt een rol in het (her)gebruik van belangrijke grondstoffen zoals water, fosfor en stikstof en kan daarmee een bijdrage leveren aan de circulaire economie (Masi et al., 2018). Het belang van een circulaire economie wordt onder andere onderschreven in de Sustainable Development Goals (United Nations General Assembly, 2015). Aquafarm is een initiatief dat hierop aansluit.

1.1 Introductie Aquafarm

Aquafarm is een nieuwe manier van kijken naar rioolwaterzuivering. Aquafarm pleit voor een systeemwijziging. Aquafarm is een concept dat rioolwater als bron van grondstoffen ziet. Deze grondstoffen kunnen ingezet worden voor de productie van biomassa en (hoogwaardige) producten. Met behulp van biologische processen wordt het rioolwater gezuiverd. Dit is een toekomstbestendige kijk op waterzuivering die nutriënten en microverontreinigingen verwijdert met tegelijkertijd de potentie om minder broeikasgassen uit te stoten en minder energie te verbruiken ten opzichte van traditionele zuiveringen.

1.2 Huidige ontwikkelingsfase Aquafarm

De ontwikkeling van Aquafarm bevindt zich op dit moment tussen Technology Readiness Level (TRL) 3 en 5, afhankelijk van de specifieke toepassing van Aquafarm. Deze TRL geeft aan dat het concept in de ontwikkelende fase zit. De negen TRLs geven aan in welke fase van ontwikkeling een technologie zit en worden door verschillende instanties gebruikt, waaronder binnen de EU (Héder, 2017). Een hoger level geeft aan dat de technologie verder ontwikkeld is, zoals ook te zien is in tabel 1. Level vijf op de TRL-schaal geeft aan dat Aquafarm momenteel een kleine pilot is waarbij losse onderdelen goed functioneren: het principe van Aquafarm is bewezen door middel van laboratoriumonderzoek en kleine praktijkproeven. De resultaten van de uitgevoerde onderzoeken zijn veelbelovend, maar onderzoeken de werkende principes vaak los van elkaar. Om een hoger niveau op de TRL te bereiken moeten prototypes getest worden die alle onderdelen samenvoegt tot één werkend systeem.

Tabel 1: Overzicht van de 9 TRLs binnen drie fases, aangepast naar voorbeeld van Blanc et al. (2017).

Fase	TRL	Beschrijving van de ontwikkeling van de technologie
Onderzoek	1	Basisprincipes aangetoond
	2	Concept en inzetbaarheid geformuleerd
	3	'Proof of concept': het concept gevalideerd
Ontwikkeling	4	Experimentele pilot in gecontroleerde omgeving
	5	Pilot gedeeltelijk gevalideerd
	6	Pilot volledig gedemonstreerd
Implementatie	7	Eerste implementatie volledig prototype
	8	Systeem compleet en gevalideerd
	9	Systeem bewezen in relevante omgeving

Aquafarm streeft ernaar om een volledige rioolwaterzuivering (RWZI) te vervangen. Aquafarm kan op verschillende manieren worden ingezet als waterzuivering c.q. grondstoffenfabriek. Als aanloop naar de ontwikkeling van Aquafarm als volledige zuivering, kan Aquafarm worden ingezet als voor- of nazuivering, decentrale zuivering of als slibverwerking. De ontwikkeling van al deze toepassingen draagt bij aan de onderbouwing van Aquafarm als concept, waarbij rioolwater

wordt benut als bron van waardevolle grondstoffen. Een groot deel van de afgelopen onderzoeken richt zich op het functioneren van Aquafarm als nazuivering en heeft positieve resultaten laten zien. Dit rapport focust daarom op Aquafarm als nazuivering, waardoor voor deze toepassing versneld een hoger TRL bereikt kan worden.

1.3 Belang van een value case

Voor de verdere ontwikkeling van Aquafarm is het wenselijk dat waterschappen, adviesbureaus en onderzoeksinstituten samen verder werken aan de ontwikkeling van Aquafarm. Hoewel er meer onderzoek nodig is om het volledige potentieel van Aquafarm te bewijzen, kan al wel een eerste overzicht gemaakt worden van de potentie van Aquafarm aan de hand van eerder onderzoek. Veel besluitvormers maken hun keuzes door zuiveringsmogelijkheden met elkaar te vergelijken aan de hand van bijvoorbeeld zuiveringspotentie en kosten. Aquafarm biedt echter ook op andere vlakken toegevoegde waarde, zoals een verminderde broeikasgasuitstoot en een bijdrage aan de circulaire economie. Al deze voordelen kunnen worden samengevat in een value case die de potentie van Aquafarm onderschrijft.

1.4 Doel van dit rapport

Het doel van dit rapport is om de potentie van Aquafarm kenbaar te maken met behulp van een value case die het belang van de ontwikkeling van Aquafarm onderschrijft. De value case geeft inzicht in de potentiële bijdrage van Aquafarm aan bredere opgaven ten opzichte van de kosten van Aquafarm. De verschillende toepassingen van Aquafarm dragen op andere manieren bij aan de opgaven van waterschappen. Door te focussen op Aquafarm als nazuivering kan gericht worden gekeken naar de kracht van dit scenario en waar Aquafarm op de korte termijn aan kan bijdragen. Deze analyse van Aquafarm maakt het mogelijk om verschillende nazuiveringstechnieken met Aquafarm te kunnen vergelijken en eventuele investeringen in Aquafarm te onderbouwen voor besluitnemers.

2. Onderzoeksvragen

Aquafarm biedt de mogelijkheid om bij te dragen aan de circulaire economie door rioolwater te zuiveren en gelijktijdig in te zetten als grondstoffenfabriek om hoogwaardige producten te produceren met een minimale druk op het milieu. Om het innovatieve concept verder te ontwikkelen tot een bewezen functionerend systeem, is vervolgonderzoek nodig. Door de ontwikkelingen te richten op Aquafarm als nazuivering, kan op korte termijn het functioneren van Aquafarm als nazuivering bewezen worden. De ontwikkeling van Aquafarm als nazuiveringstechniek draagt ook bij aan de gehele ontwikkeling van Aquafarm als nieuwe kijk op rioolwaterzuivering. Om het belang van Aquafarm aantoonbaar te maken, is het noodzakelijk dat de potentie en de kosten van Aquafarm inzichtelijk gemaakt worden. Dit rapport doet dat middels het beantwoorden van de volgende hoofdonderzoeksvraag, die is onderverdeeld in drie deelvragen:

Wat zijn de potentiële kosten, opbrengsten, *unique selling points*¹ en *unique buying reasons*² van Aquafarm als nazuivering?

1. Welke potentiële voordelen levert Aquafarm?
 - a. Welke onderzoeken en praktijkproeven hebben er plaatsgevonden?
 - b. Wat zijn de potentiële voordelen die uit deze onderzoeken naar voren zijn gekomen?
2. Aan welke opgaven van waterschappen levert Aquafarm de grootste bijdrage?
 - a. Aan welke visies, doelen en opgaven van waterschappen kan Aquafarm bijdragen?
 - b. Hoe vertaal je deze bijdragen in indicatoren waar Aquafarm aan getoetst kan worden?
 - c. Hoe presteert Aquafarm als nazuivering per indicator ten opzichte van conventionele zuiveringen?
 - d. Wat zijn de *unique selling points* en *unique buying reasons* voor aquafarm?
3. Wat zijn de kosten en baten van Aquafarm als nazuivering?
 - a. Hoe ziet het ontwerp van Aquafarm als nazuivering eruit?
 - b. Wat zijn de kosten van Aquafarm als nazuivering?
 - i. Investeringskosten
 - ii. Jaarlijkse kosten
 - c. Wat zijn de baten van Aquafarm als nazuivering?
 - i. Wat zijn de opbrengsten van Aquafarm als nazuivering?
 - ii. Hoe kunnen de opbrengsten van aquafarm omgezet worden in producten?

¹ *Unique selling points* zijn de kenmerken van Aquafarm die het in positieve zin uniek en opvallend maken ten opzichte van andere producten.

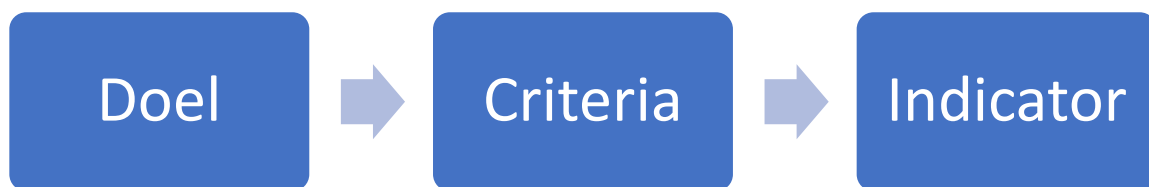
² *Unique buying reasons* zijn de redenen waarom een consument, klant of in dit geval bijvoorbeeld waterschap geïnteresseerd zou zijn in dit specifieke product.

3. Methoden en achtergrond

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden zijn verschillende bronnen geraadpleegd en is een value case opgesteld. De value case, waar de business case een onderdeel van is, wordt geïntroduceerd in paragraaf 3.1. Door gebruik te maken van verschillende bronnen ontstaat een genuanceerd beeld van Aquafarm. De value case is opgesteld door te putten uit onderzoek van Aquafarm, wetenschappelijke en sector gerelateerde literatuur en de input van verschillende experts.

3.1 Value case

Een value case schetst de toegevoegde waarde van een project aan de hand van verschillende doeleinden. De doelen die worden gebruikt in een value case, bestaan niet alleen uit economische doelen, maar kunnen ook bestaan uit ‘zachte waarden’ die moeilijk in geld uit te drukken zijn. Om de bijdrage van Aquafarm aan verschillende zachte doelen te kunnen beschrijven, wordt er gebruik gemaakt van criteria (wanneer is een doel wel of niet bereikt) en indicatoren (waaraan kan gezien worden dat een doel wel of niet is bereikt), zie figuur 1.



Figuur 1: Een value case is opgebouwd uit verschillende doelen, die beschreven worden aan de hand van criteria en indicatoren.

3.2 Business case

Business cases worden gebruikt om het potentieel van duurzame ontwikkelingen te onderbouwen. Een business case, of haalbaarheidsanalyse, beschrijft de verantwoording en onderbouwing voor projecten. Deze beschrijving bevat de mogelijke kosten en opbrengsten, waarna een weloverwogen keuze voor de uitvoering van het project gemaakt kan worden (van der Molen, 2013). In de afgelopen jaren worden business cases in toenemende mate gebruikt om duurzame ontwikkelingen te analyseren en verantwoorden (Salzmann et al., 2005). In dit rapport wordt een business case gebruikt om de kosten en potentiële opbrengsten van Aquafarm als nazuivering inzichtelijk te maken en te vergelijken met andere nazuiveringstechnieken.

3.3 Vergelijkbare nazuiveringstechnieken

In de discussie wordt Aquafarm als nazuivering vergeleken met andere nazuiveringstechnieken om de resultaten van de value case in een breder perspectief te plaatsen. De drie meest relevante nazuiveringstechnieken hiervoor zijn het zandfilter, de waterharmonica en het helofytenfilter. Een zandfilter kan stikstof, fosfaat en vaste deeltjes verwijderen. Fosfaat wordt verwijderd door de toevoeging van metaalzout waarna het fosfaat wordt gebonden en uit het water wordt gefilterd. Voor stikstof wordt een koolstofbron toegevoegd waarna stikstof biologisch wordt omgezet door bacteriën die zich hechten aan de zandkorrels (den Elzen et al., 2008). De waterharmonica wordt ingezet als buffer tussen een RWZI en het oppervlaktewater om de ecologische kwaliteit van het effluent te verbeteren met gebruik van planten (van Steenwijk et al., 2021). De helofytenfilter zet specifieke plantensoorten in om water te zuiveren en presteert voornamelijk op het aanvullende verwijderen van nutriënten stikstof en fosfaat (de Haan et al., 2012).

4. Potentiële opbrengst

Dit hoofdstuk biedt inzicht in de afgelopen praktijkproeven en onderzoeken en behaalde resultaten binnen project Aquafarm. Wetenschappelijk onderzoek is altijd leidend geweest voor de ontwikkeling van Aquafarm. De resultaten en conclusies uit de onderzoeken worden gerelateerd aan de hand van belangrijke thema's voor Aquafarm en kort toegelicht in paragraaf 4.2.

4.1 Overzicht afgelopen onderzoeken

De activiteiten rondom Aquafarm kunnen worden opgesplitst in verschillende fases met elk een ander focuspunt. De fases kunnen als volgt worden onderscheiden:

2014-2015: Perspectief ontwikkeling
2016-2017: Proof of principle
2017-2018: Marktverkenning
2019-2022: Onderzoek- en pilotfase (Aquafarm, 2019)

Deze fases geven aan waar in de ontwikkeling Aquafarm zich bevond in relatie tot de TRLs. De eerste twee fases dragen bij aan de onderzoeksfases binnen de TRLs en hebben ervoor gezorgd dat TRL 3 (proof of principle of het valideren van de technologie) is bereikt. In de onderzoeks- in pilotfase, de huidige fase, worden onderbouwend onderzoek en experimentele praktijkonderzoeken met elkaar gecombineerd. De praktijkonderzoeken vinden plaats in gecontroleerde laboratoriumomgevingen en in relevante omgevingen direct verbonden aan RWZIs. Hierdoor is TRL 5 bereikt voor Aquafarm als nazuivering. De volgende onderzoeken en praktijkproeven hebben plaatsgevonden vanuit Aquafarm:

Literatuuronderzoek:

- Kennismontage: literatuuronderzoek naar interessante flora en fauna die geschikt lijken voor Aquafarm

Laboratoriumonderzoek:

- Laboratoriumonderzoek nutriëntenopname: waarbij grote kroosvaren, grof hoornblad en aarvederkruid groeien op influent uit voorbezinktank gemengd met gedemineraliseerd water (en bezonken effluent bij grote kroosvaren)
- Laboratoriumonderzoek slibreductie: waarbij drie verschillende macro-invertebraten op slib leven: zoetwaterpissebedden, vlokreeften, muggen(larven), slakken en wormen
- Cascaderingsproef in laboratorium: wormen en vervolgens grote kroosvaren groeien in het effluent van RWZI Nijmegen (Proof of principle)
- Broeikasgassenuitstoot en/of reductie door planten in effluent
- Verschillende cascade onderzoeken: effect van verschillende planten en macro-invertebraten op elkaar en de zuiveringsefficiëntie

Praktijkproeven:

- Dodewaard: onderzoek naar kroosgroei op een mix van influent en effluent van de RWZI Dodewaard, met focus op:
 - Waterkwaliteitsverbetering
 - Biomassaproductie
 - Hergebruik en verwaarding van Eendenkroos
- Rhenen: verschillende proeven op effluent van de RWZI Rhenen. Onder andere een proef met wormen en Azolla. Daarnaast een proef met cascades van drie verschillende waterplanten (grof hoornblad, eendenkroos, grote kroosvaren), die leven in RWZI-effluent, met focus op:
 - Het vinden van de juiste cascadevolgorde voor de planten
 - Waterkwaliteitsverbetering

- Biomassaproductie
- Tijdelijke toevoeging muggenlarven
- Broeikasgas uitstoot en/of reductie

4.2 Overzicht resultaten onderzoek

In de onderstaande paragrafen worden de belangrijkste resultaten van de afgelopen Aquafarm onderzoeken kort samengevat.

Slibreductie

Macro-invertebraten zijn in staat om slib te verwerken van verschillende RWZIs. De macro-invertebraten die zijn onderzocht komen van nature in groten getale in Nederland voor in omstandigheden met weinig zuurstof en hoge verontreinigingen, eigenschappen die we ook in afvalwater terugzien. De onderzochte soorten zijn: wormen, vlo-kreeften, slakken, muggen(larven) en pissebedden. De onderzochte organismen zijn allemaal in staat om de hoeveelheid slib significant te verminderen. Om het slib optimaal op te kunnen nemen moeten verschillende macro-invertebraten gecombineerd worden, passend bij het Aquafarmprincipe. De combinatie van wormen en pissebedden verhoogt namelijk de slibafbraak. De wormen groeien daarbij wel minder hard. Om het slib helemaal te kunnen verwerken, moet onderzoek gedaan worden naar andere organismen die wellicht beter geschikt zijn voor de nabewerking van het slib.

Broeikasgasreductie

Aquafarm kan de broeikasgasuitstoot van RWZIs verlagen door de opname lachgas (N₂O), methaan (CH₄) en koolstofdioxide (CO₂) uit de lucht en het voorkomen van stikstof uitstoot uit het effluent. In het laboratoriumonderzoek, waar verschillende planten op het effluent van een RWZI groeien, werd ook de N₂O, CH₄ en CO₂ uitstoot gemeten. Omgerekend in een CO₂-equivalent was er een netto opname van broeikasgassen te zien. Deze opname verschilde echter wel per soort; vooral Azolla presteerde goed zoals in de value case uiteen wordt gezet. Het is nog niet mogelijk om hier harde conclusies aan te koppelen maar het geeft wel aan dat er potentie is tot het verminderen van broeikasgasuitstoot.

Nutriëntenopname

Aquafarm haalt nutriënten uit rioolwater door middel van de zuiverende werking van specifieke planten. In de praktijkproeven met verschillende planten kwamen verschillende opname- en groeisnelheden naar boven. Het grootste deel van de onderzochte planten neemt stikstof (N) op uit het water. Echter, Azolla doet dit in mindere mate, die kan (namelijk ook) N uit de atmosfeer halen en hoeft dus niet alle N uit het water op te nemen. De uitkomsten voor fosfor (P) waren wisselend; de metingen kende periodes van meer en minder P-opname. Dit heeft mogelijk te maken met de afbraak van organisch materiaal (plantenresten). Bij de afbraak van plantenresten komen nutriënten namelijk weer vrij. De combinatie van verschillende planten heeft de potentie om grotere hoeveelheden nutriënten uit het water te halen dan één plantensoort alleen. Het is nog niet duidelijk wat daarin de optimale cascade van planten is.

Wanneer goed afgestemd, heeft Aquafarm de potentie om zeer lage P-concentraties te bereiken, tot KRW-normen, met het gebruik van geschakelde planten en macro-invertebraten. Volgens het STOWA rapport over effluentpolishing d.m.v. algen (Uijterlinde et al., 2011), kunnen algen N en P opnemen en daarmee de waterkwaliteit verbeteren. Wanneer slib door macro-invertebraten wordt afgebroken komen nutriënten vrij in het effluent, die vervolgens weer opgenomen kunnen worden door de waterplanten. Het laboratoriumonderzoek heeft laten zien dat de combinatie van macro-invertebraten en planten zorgt voor een hogere productie van planten door de extra vrijgekomen nutriënten.

Hoogwaardige producten

Het labonderzoek heeft aangetoond dat de verschillende macro-invertebraten (pissebedden, slakjes, wormen en muggen(-larven)) kunnen overleven en voortplanten op slib uit RWZIs. Wormen kunnen gebruikt worden als basis voor visvoer of specifieke componenten van de

biomassa, zoals de aminozuren, vetzuren en wellicht enzymen kunnen hergebruikt worden als grondstoffen voor hoogwaardige producten. De toepassingen worden echter beperkt door gezondheidsoverwegingen en wetten die hergebruik uit afvalwater moeilijker maken. Voor het oogsten en verwaarden van de macro-invertebraten zijn echter nog wat technische bezwaren te noemen. Pissebedden en wormen zijn bijvoorbeeld moeilijk uit het slib te filteren. Bij slakjes is dat al makkelijker te doen door de harde schelpen. Muggen daarentegen zijn het makkelijkst te oogsten; het feit dat volwassen muggen vliegen en de poppenhuidjes op de overgang van water naar lucht hangen maken dat deze kunnen worden opgezogen als methode van oogsten. De cascadeproef laat zien dat het succesvol is om wormen in rekjes op substraat te laten groeien, zodat de wormen gemakkelijk geoogst kunnen worden, maar dan kunnen ze dus niet ín het slib leven.

De planten hebben verschillende hergebruiktoepassingen. Azolla levert relatief veel biomassa op, wat bijvoorbeeld als veenvervanger gebruikt worden in potgrond. Deze substitutie levert dan direct het bijkomend voordeel dat de CO₂-emissie bij het afgraven van veen niet plaatsvindt. Kroossoorten hebben veel toepassingen. Kroosvaren kan ingezet worden als industrieel eiwit voor bijvoorbeeld de lijm- en coatingsindustrie, zoals onderzocht in de praktijkproef in Dodewaard (Schuijt et al., 2018). De eiwitten kunnen mogelijk worden gebruikt als voedingssupplement voor vee. Kroosvaren kan worden ingezet als groene meststof. De planten hebben de potentie om ingezet te worden voor biodiesel, bio-ethanol of andere oleochemicaliën. Oleochemicaliën zijn grondstoffen gemaakt hernieuwbare grondstoffen zoals dierlijke vetten of plantenolieën (Pfleger et al., 2015). Algen, maar ook cyanobacteriën, vermoedelijk het oogsten van de planten en hinderen de groei van de planten dus moeten geweerd worden uit de cascades. Algen groei kan voorkomen worden door de inzet van mosselen die algen filteren en door de juiste oogstsystematiek te gebruiken.

Zware metalen

Onderzoek in het lab heeft aangetoond dat de onderzochte macro-invertebraten konden leven in slib dat zware metalen bevat. De zware metalen zijn terug te vinden in de macro-invertebraten die op het slib leven (pissebedden, muggen, slakjes en wormen) en in het slib zelf. De inzet van macro-invertebraten is een manier om zware metalen uit het slib te halen, maar voor de toepassing van deze invertebraten kan dit een probleem zijn. Bij muggen daarentegen zijn de verontreinigingen voornamelijk geconcentreerd in de poppenhuidjes en blijft de concentratie verontreinigingen in de larven en de volwassen muggen laag. Hierdoor kunnen de zware metalen (in de poppenhuidjes) makkelijker worden gescheiden van het afvalwater en de volwassen muggen.

Microverontreinigingen

Aquafarm heeft de potentie om microverontreinigingen zoals medicijnresten, hormonen maar ook biociden, microplastics, PFAS en PAH te verwijderen. Literatuuronderzoek en voorstudies tonen de potentie van planten om microplastics uit het rioolwater te filteren aan (Masiá et al., 2020). Bij Aquafarm is er tot op heden nog geen (vervolg) onderzoek gedaan naar de daadwerkelijke verwijdering van microverontreinigingen.

5. Opzet van de value case

Dit hoofdstuk introduceert de indicatoren die gebruikt zijn om Aquafarm te analyseren in de value case. De indicatoren maken het mogelijk om de bijdrage van Aquafarm aan de opgaven van waterschappen in te schatten en te waarderen. De indicatoren worden in hoofdstuk 6 gebruikt om Aquafarm te analyseren in een value case. De indicatoren zijn verdeeld in vier thema's en zo opgebouwd dat ze de waarde van Aquafarm voor waterschappen gemakkelijk inzichtelijk maken.

De eerste twee thema's zijn het hergebruik van grondstoffen en waterzuivering; thema's waar Aquafarm gericht aan bijdraagt. Vervolgens zijn bredere thema's die leven bij waterschappen beschreven, zoals de bredere opgaven voor waterschappen en zachte waarden waar Aquafarm aan kan bijdragen. Op deze manier kan een brede analyse van Aquafarm worden gedaan. De volgende thema's worden behandeld:

1. Grondstoffen terugwinning
2. Waterzuivering: waterkwaliteitsverbetering
3. Bredere opgaven van waterschappen
4. Zachte waarden

De thema's bestaan allen uit vijf indicatoren die de toegevoegde waarde van Aquafarm aan een RWZI aangeven in de value case. De indicatoren zijn onder andere opgebouwd aan de hand van beleidsdocumenten van waterschappen. Voornamelijk het waterbeheerprogramma (HDSR, 2022) en het waterbeheerplan van het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR, 2016) zijn hierin leidend geweest. Hoewel niet alle waterschappen dezelfde thema's behandelen of daarin dezelfde uitvoering hanteren, geven deze beleidsdocumenten een eerste inzicht in de uitdagingen waar waterschappen voor staan. De waterschappen zijn vanuit de Unie van Waterschappen, het ministerie van Infrastructuur en Milieu maar ook internationaal verplicht om zich aan dezelfde afspraken te houden, zoals bijvoorbeeld het grondstoffen akkoord of het klimaat-akkoord van Parijs. Omdat deze afspraken terugkomen in de beleidsstukken van HDSR, worden deze als leidend gezien.

5.1 Grondstoffen terugwinning

De terugwinning van verschillende grondstoffen is een belangrijk thema bij waterschappen waar Aquafarm aan kan bijdragen. Aquafarm richt zich op het circulair hergebruik van grondstoffen door grondstoffen terug te winnen uit rioolwater die ingezet kunnen worden voor hoogwaardige producten. In het waterbeheerprogramma van HDSR wordt de top vijf grondstoffen aangehaald; fosfor, cellulose, biomassa, alginaat en microplastics (HDSR, 2022). HDSR heeft als doel om één waardeketen volledig gerealiseerd en twee in ontwikkeling te hebben in 2027 (HDSR, 2022). Daarbij stelt HDSR zich ten doel om in 2040 50% van de grondstoffen terug te winnen uit hun processen. Tenslotte wordt in het waterbeheerplan ten doel gesteld om alle waardevolle grondstoffen optimaal te benutten (HDSR, 2016). De top vijf grondstoffen is vastgesteld omdat de potentie voor het opzetten van een waardeketen op korte termijn het grootst wordt geacht. Deze potentie is geschat aan de hand van het actuele kennisniveau en de activiteiten rondom de waardeketen van de grondstoffen (Notenboom *et al.*, 2017). De indicatoren in de analyse bestaan uit de vijf verschillende grondstoffen om aan te sluiten bij de doelen van de waterschappen.

5.2 Waterzuivering

Aquafarm zuivert rioolwater door het verwijderen van verontreinigingen en draagt zo bij aan het halen van effluentnormen en zuiveringsdoelen en het mogelijk hergebruik van water. Landelijke effluentnormen stellen een maximale concentratie fosfor, stikstof en de hoeveelheid organisch materiaal dat aanwezig mag zijn in het effluent van een RWZI. Het organisch materiaal wordt gemeten door middel van het chemische zuurstofverbruik (CZV) en/of het biologische zuurstofverbruik (BZV). In dit rapport wordt alleen CZV gebruikt om dit mee aan te duiden. Verder zijn zuiveringen in toenemende mate gericht op het verwijderen van stoffen zoals medicijnresten en

microverontreinigingen (HDSR, 2022). Microverontreinigingen zoals microplastics, medicijnresten en zware metalen zijn ook meegenomen in de value case. De verbetering van de waterkwaliteit schept mogelijkheden voor het (directe) hergebruik van water, maar dit wordt niet expliciet meegenomen als indicator.

Naast het halen van de effluentnormen voor stikstof en fosfor, heeft HDSR zich ten doel gesteld om het verder zuiveren van stikstof en fosfor te bevorderen en in te zetten op een verbetering van het oppervlaktewater (HDSR, 2022). Niet alleen de concentratie, maar ook de disbalans tussen stikstof en fosfor, in het effluent heeft een negatieve invloed op de kwaliteit van het oppervlaktewater (Tong *et al.*, 2020). De lozingsnormen volgens het Activiteitenbesluit (§ 3.1.4a, artikel 3.5e t/m 3.5g) zijn doorgaans minder streng dan de Kaderrichtlijn Water (KRW) normen voor rivieren en beken waarop de lozing doorgaans plaatsvindt (Schuijt *et al.*, 2018). Om aan de KRW-doelen te voldoen en de kwaliteit van het oppervlaktewater te verbeteren moeten de concentraties van stikstof en fosfor in het effluent lager zijn dan de huidige effluentnormen. In de value case is daarom gekeken naar de bijdrage van Aquafarm aan de normen voor stikstof en fosfor in KRW-waterlichamen.

5.3 Bredere opgaven waterschappen

Er zijn verschillende ‘bredere’ opgaven waar waterschappen voor staan en waar Aquafarm aan kan bijdragen. De kerntaken van waterschappen worden beïnvloed door ontwikkelingen als klimaatverandering. Het gevolg van deze ontwikkelingen zijn bredere opgaven die niet direct invloed hebben op het zuiveringsproces maar toch van waarde kunnen zijn voor waterschappen. Aquafarm kan mogelijk ook een bijdrage aan deze bredere opgaven leveren. Binnen dit thema gaat het over de volgende indicatoren: broeikasgasreductie, energieneutraal, circulariteit, innovatief en biodiversiteit. Deze indicatoren zijn hieronder verder toegelicht.

Broeikasgasreductie

Aquafarm kan bijdragen aan het terugbrengen van de uitstoot van broeikasgassen, wat een doel van verschillende waterschappen is. HDSR heeft als doel gesteld om de uitstoot van broeikasgassen terug te brengen met 49% in 2040. Afspraken over broeikasgasreductie zijn ook Europees opgenomen in het Parijs-akkoord. Deze indicator neemt de drie meest relevante broeikasgassen samen, namelijk lachgas, methaan en koolstofdioxide. Andere broeikasgassen, zoals Cfk's zijn nog niet meegenomen in de analyse.

Energieneutraal

Energieneutraal worden is een veelvoorkomend thema bij waterschappen en is daarom één van de indicatoren in de analyse van Aquafarm. Energieneutraliteit houdt in dat de gebruikte energie en de opgewekte energie met elkaar in evenwicht zijn. HDSR stelt zich als doel om in 2030 energieneutraal te functioneren door de vermindering van het verbruik van energie en het opwekken van herwinbare energie (HDSR, 2022), zoals ook vanuit de Nederlandse klimaatwet verwacht wordt. Energie en elektriciteit winnen op rioolwaterzuiveringen en bij het zuiveren van rioolwater is specifiek genoemd (HDSR, 2016). Tenslotte sluit dit aan bij het doel om de CO₂-voetafdruk van het waterschap te verkleinen (HDSR, 2016; HDSR, 2022). Deze indicator geeft aan of Aquafarm, aangesloten aan een RWZI als nazuivering, de beweging richting energieneutraliteit bevordert. Daarbij wordt de vergelijking met andere nazuiveringstechnieken, die mogelijk veel meer energie gebruiken, nog niet gemaakt. Dit gebeurt wel in de business case.

Innovatief

De vele opgaven waar waterschappen voor staan, vragen om innovatie. Dit wordt benadrukt in het waterbeheersprogramma van HDSR, waarin het doel om projecten niet volledig vooraf vast te stellen en ruimte te houden voor innovaties is genoemd (HDSR, 2022). Ruimte voor experimenteren met nieuwe technieken, zoals Aquafarm, wordt genoemd als belangrijk aspect van de circulaire transitie. Partijen zoals het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Unie van Waterschappen en STOWA onderschrijven dit. Juist deze ruimte biedt ontwikkelmogelijkheden

en perspectief voor nieuwe innovaties. Deze indicator analyseert of Aquafarm het innovatieve karakter van waterschappen versterkt.

Circulariteit

De circulaire economie is zowel voor de wetenschap als de waterschappen een belangrijk thema waaraan Aquafarm kan bijdragen. HDSR stelt zich als doel om in 2030 aanbestedingen volledig circulair uit te voeren (HDSR, 2022). Dit pas bij de nationale ambitie dat Nederland in 2050 100% circulair is. Circulariteit kan gezien worden als een breed concept dat meerdere specifieke doelen omhelst. Afhankelijk van hoe circulariteit wordt gedefinieerd, kan een Aquafarm bijdragen aan de circulariteitseisen van een waterschap. In dit rapport wordt circulariteit gedefinieerd zoals in wetenschappelijke literatuur te vinden is. In de literatuur wordt circulariteit of de circulaire economie verdeeld in drie principes, die in de analyse van Aquafarm ook worden aangehaald:

1. *'Keeping resources in use'*: Grondstoffen hergebruiken en verspilling voorkomen om minder ruwe grondstoffen te hoeven mijnen (closing the loop);
2. *'Regerate natural capital'*: De natuur en haar diensten in stand houden en heropbouwen;
3. *'Design out waste streams'*: Afvalstromen voorkomen door slim ontwerp (Tahir et al., 2018, p. 5)

Biodiversiteit

Aquafarm kan mogelijk bijdragen aan de biodiversiteit van een gebied. De biodiversiteit heeft invloed op de stabiliteit van een ecosysteem (Pennekamp et al., 2018). Een verbetering van de biodiversiteit staat op de agenda van waterschappen (HDSR, 2022). Deze indicator geeft aan in welke mate Aquafarm als nazuivering een bijdrage levert aan de biodiversiteit in en rondom een traditionele RWZI.

5.4 Zachte waarden

Aquafarm heeft de potentie om naast de bovengenoemde indicatoren ook bij te dragen aan 'zachte waarden' die van belang kunnen zijn voor de maatschappij. Zachte waarden hebben invloed op de openbare ruimte maar zijn moeilijk 'hard' te maken of om te zetten in geld (Schrijver & van der Heide, 2018). Daarbij hebben waterschappen naast hun kerntaken ook een bredere maatschappelijke verantwoordelijkheid. De indicatoren die onder het thema 'zachte waarden' vallen, kunnen niet direct aan een speerpunt van HDSR gelinkt worden. Ze zijn daarom tot nu toe niet toegevoegd aan de value case, maar worden hier wel meegenomen. De volgende zachte waarden zijn geïdentificeerd: Duurzaamheidswinst, tegengaan hittestress, landschappelijke waarde, educatieve waarde en maatschappelijke waarde. Deze indicatoren worden hieronder kort toegelicht.

Duurzaamheidswinst

Duurzame projecten dragen bij aan de behoeften van de huidige generaties, zonder toekomstige generaties te benadelen. Deze indicator onderzoekt de mogelijke positieve en negatieve gevolgen van Aquafarm op het milieu op dit moment en in de toekomst.

Tegengaan hittestress

Hittestress kan voorkomen bij hoge temperaturen en kan nadelige effecten hebben op mens en milieu (Spijker et al., 2019). Deze indicator onderzoekt op welke manieren Aquafarm de nadelige effecten van hoge temperaturen kan verminderen of kan bijdragen aan een koeler klimaat.

Landschappelijke waarde

De landschappelijke waarde geeft aan in hoeverre Aquafarm een positieve bijdrage levert aan het landschap. Deze bijdrage kan zowel esthetisch als functioneel zijn.

Educatieve waarde

De educatieve waarde van Aquafarm wordt bepaald door te kijken naar de verschillende manieren waarop educatieve activiteiten rondom Aquafarm opgezet kunnen worden. Ook wordt hier

nagegaan welke doelgroepen bereikt worden. Hierbij geldt dat meer educatieve activiteiten en meer doelgroepen een grotere educatieve waarde geven.

Maatschappelijke waarde

Maatschappelijke waarde bestaat uit de combinatie van de economische, sociale en ecologische waarde van een project (Relou et al., 2019). In deze indicator wordt voor deze drie onderdelen kort beschreven wat de toegevoegde waarde van Aquafarm is, waaruit wordt opgemaakt wat de totale maatschappelijke waarde is.

6 Value case

Dit hoofdstuk laat zien hoe Aquafarm als nazuivering scoort op de verschillende indicatoren zoals geïntroduceerd in hoofdstuk 5. Allereerst wordt Aquafarm als nazuivering verder toegelicht. Vervolgens worden de verschillende indicatoren per overkoepelend thema gepresenteerd. Het nazuiveringstechniek van Aquafarm scoort op de indicatoren van 0 (geen toegevoegde waarde t.o.v. de traditionele zuivering) t/m 3 (maximale toegevoegde waarde bereikt), aan de hand van de maximale realistische potentie van het scenario. Ten slotte wordt het scenario van Aquafarm als nazuiveringstechniek geanalyseerd aan de hand van een business case. De verdeling van de indicator waarden is als volgt:

- 0 = geen toegevoegde waarde
- 1 = kleine toegevoegde waarde
- 2 = middelgrote toegevoegde waarde
- 3 = grote toegevoegde waarde

6.1 Het scenario: Aquafarm als nazuivering

De value case richt zich op Aquafarm als nazuiveringstechniek geschakeld aan een 'traditionele' zuivering, zoals is geïntroduceerd in de inleiding van dit rapport. In dit scenario kent Aquafarm een toevoer van RWZI-effluent. Dit scenario is een extra zuiveringsstap voor effluent met laag energieverbruik en zonder het toevoegen van chemicaliën. Hierbij kan biomassa worden geoogst en worden mogelijk ook microverontreinigingen verwijderd. Dit scenario leidt tot het recyclen van nutriënten als fosfor en stikstof, schoner water als effluent (tot KRW-kwaliteit) en gezondere watersystemen waarop wordt geloosd. Het effluent wordt gezuiverd door macro-invertebraten (zoals mosselen) en waterplanten die nutriënten en microverontreinigingen uit het water halen. Daarbij wordt biomassa geproduceerd. Het ontwerp van Aquafarm als nazuivering is verder uitgewerkt in de business case.

6.2 Terugwinnen van de top 5 grondstoffen

Fosfor hergebruik

Aquafarm neemt fosfor (P) op uit rioolwater en maakt het mogelijk om P in de vorm van biomassa te hergebruiken. Onderzoek van Aquafarm heeft aangetoond dat tijdens het verwerken van slib door macro-invertebraten P vrijkomt. Dit kan vervolgens door planten weer opgenomen worden. Dit scenario gaat ervan uit in dat alle geproduceerde biomassa wordt hergebruikt en daarmee bijdraagt tot het hergebruik van P. Aquafarm is verantwoordelijk voor het terugwinnen van grondstoffen, wat hergebruik van deze grondstoffen voor de circulaire economie mogelijk maakt. Hoe hoger de concentratie P in het rioolwater, hoe hoger de opname van P door de organismen en productie van biomassa, maar hoe meer P ook in het water achterblijft. Onderzoek naar de groei van planten op rioolwater heeft aangetoond dat de planten P opnemen tot zeer lage concentraties ten opzichte van het effluent zonder nazuivering. Deze resultaten geven aan dat Aquafarm in staat is om het P uit het effluent efficiënt kan opnemen, waardoor de bijdrage aan het hergebruik van P middelhoog is.

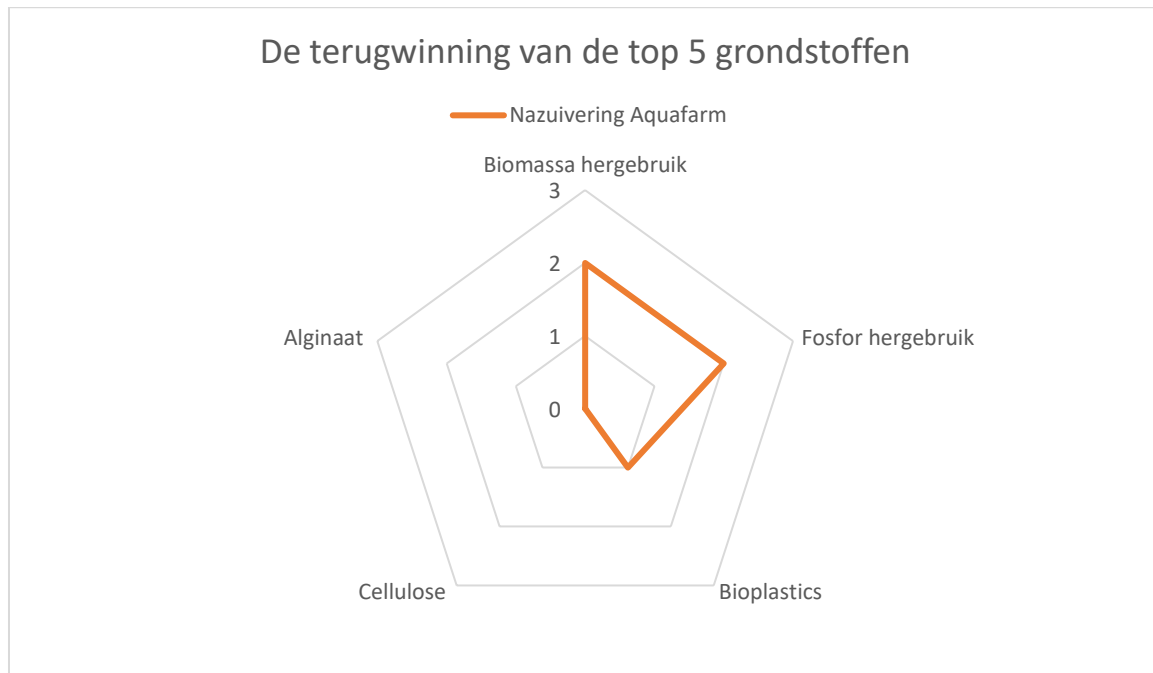
Biomassa hergebruik

Bij Aquafarm wordt een grote hoeveelheid biomassa geproduceerd. De biomassa bestaat uit planten en macro-invertebraten. Aquafarm zal altijd méér bijdragen aan het hergebruik van biomassa dan een traditionele zuivering. De hoeveelheid biomassa die maximaal uit het rioolwater kan worden gehaald fluctueert aangezien dit afhankelijk is van de samenstelling van het influent, zoals de concentraties N en P, en omgevingsfactoren zoals temperatuur en licht. Vergelijkbaar met P is de opbrengst van biomassa hoger wanneer een hogere concentratie nutriënten beschikbaar is.

Bioplastics, alginaat en cellulose hergebruik

Er zijn op dit moment geen aanwijzingen dat Aquafarm bijdraagt aan het hergebruik van alginaat en cellulose. Echter, door het hergebruik van biomassa heeft Aquafarm de potentie om bij te dragen aan de productie van bioplastics. Het is niet onderzocht of biomassa uit Aquafarm omgezet kan worden tot bioplastics. De potentie van Aquafarm om bij te dragen aan de productie van bioplastics wordt in deze value case ingeschat als laag.

Aquafarm draagt bij aan grondstoffenterugwinning voor de circulaire economie, zoals te zien is in figuur 2. De grootste potentie van terugwinning van grondstoffen is te zien bij biomassa en fosfor; daar is de potentie middelgroot. Aquafarm draaft in kleine mate bij aan de terugwinning van grondstoffen voor de productie van bioplastics.



Figuur 2: Bijdrage van het Aquafarm als nazuivering aan het hergebruik van de top 5 grondstoffen.

6.3 Waterkwaliteitsverbetering

Stikstof en fosforverwijdering

Aquafarm is in staat om de waterkwaliteit te verbeteren door het verwijderen van de nutriënten stikstof en fosfor (N en P). Onderzoek van Aquafarm heeft laten zien dat planten in staat zijn om nutriënten op te nemen en ze zo te verwijderen uit het water. Aquafarm is in staat om N te verwijderen uit het rioolwater en P zelfs met een efficiëntie van 97%. De potentie van Aquafarm om N en P te verwijderen is zeer hoog.

Chemisch zuurstofverbruik

Aquafarm heeft de potentie om het chemisch zuurstofverbruik van rioolwater te verminderen en daarmee bij te dragen aan de waterkwaliteit. Het chemisch zuurstofverbruik (CZV) geeft aan hoeveel organisch materiaal in het water zit (... literatuur). Onder andere de macro-invertebraten uit Aquafarm hebben de potentie om organisch materiaal uit het effluent filteren. Direct onderzoek naar het verminderen van het CZV is echter nog niet gedaan. Er wordt vanuit gegaan dat de potentie van Aquafarm als nazuivering om het CZV te verminderen middelhoog is.

Microplastics

Aquafarm heeft de potentie om in kleine mate bij te dragen aan het filteren van microplastics. Vooronderzoek van Aquafarm geeft aan dat planten in staat zijn om microplastics aan zich te binden en op te nemen. Er is nog geen gericht onderzoek gedaan naar de potentie van Aquafarm

om microplastics te verwijderen. Het gedrag van microplastics in zuiveringen en in het Aquatisch milieu is nog grotendeels onzeker (Delfland, 2020). Het is onduidelijk of de aanwezigheid van microplastics in of aan de planten het hergebruik van deze biomassa beperkt of verhindert. We gaan er momenteel vanuit dat Aquafarm de potentie heeft om kleine hoeveelheden microplastics te verwijderen.

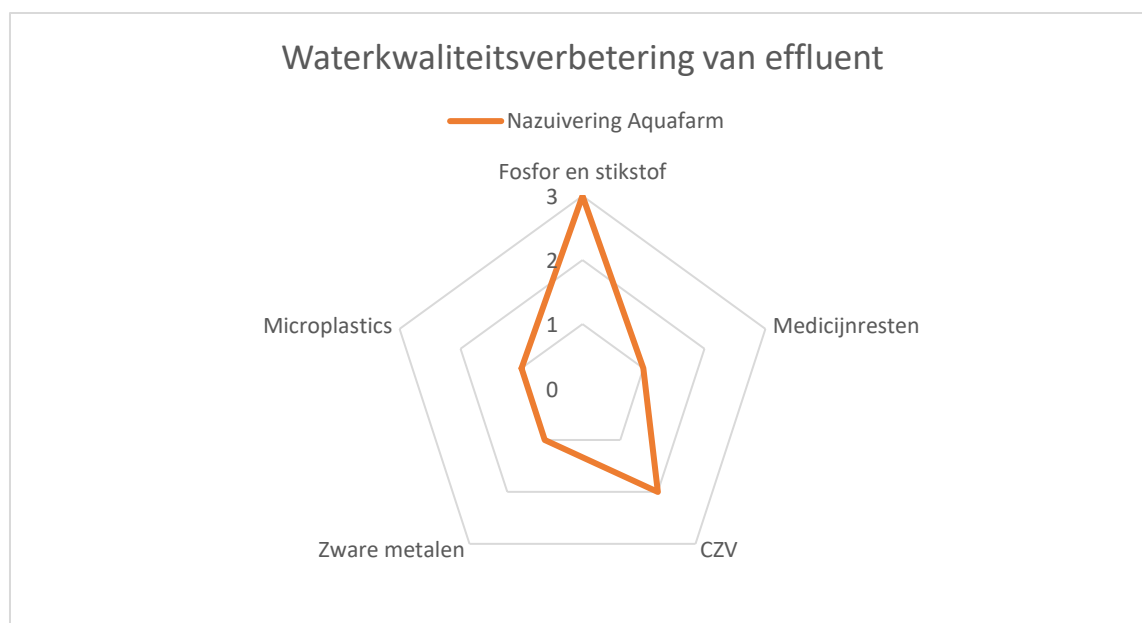
Medicijnresten

Aquafarm heeft de potentie om verontreinigingen zoals medicijnresten maar ook hormonen, biociden, microplastics, PFAS en PAH te verwijderen. Door de grote verscheidenheid in stoffen en de kosten die verbonden zijn aan de metingen van microverontreinigingen is het onduidelijk welke stoffen efficiënt door Aquafarm verwijderd kunnen worden. Verschillende onderzoeken geven al wel een potentie aan voor de verwijdering van medicijnresten door planten. Waterharmonica's zijn bijvoorbeeld in staat om antibiotica af te breken (Sabri et al., 2021) en maken grotendeel gebruik van dezelfde principes als Aquafarm. Er wordt in deze value case vanuit gegaan dat Aquafarm een kleine potentie heeft om medicijnresten te verwijderen.

Zware metalen

Aquafarm heeft de potentie om bij te dragen aan het verwijderen van een deel van de zware metalen uit rioolwater. Macro-invertebraten zijn in staat om te overleven in omstandigheden met hoge concentraties metalen. De invertebraten nemen een deel van de zware metalen op, wat accumuleert in de biomassa, en een deel blijft achter in het slib. De aanwezigheid van zware metalen in de invertebraten kan hergebruik van de biomassa verhinderen. Er is geen onderzoek gedaan naar de verwijdering van zware metalen uit het effluent door Aquafarm. We gaan ervan uit dat er een kleine potentie is van Aquafarm als nazuivering om zware metalen te verwijderen met behulp van dezelfde processen als bij slibverwerking.

Aquafarm heeft een positieve invloed op de waterkwaliteit van het effluent van RWZIs, zie figuur 3. Hoewel alle indicatoren een positieve potentie van Aquafarm laten zien, is vooral de bijdrage voor de zuivering van P en N hoog.



Figuur 3: Bijdrage van het Aquafarm als nazuivering aan de waterkwaliteitsverbetering van effluent.

6.4 Waterschapsbrede opgaven

Broeikasgasreductie

Aquafarm heeft de potentie om de broeikasgassen lachgas (N_2O), methaan (CH_4) en koolstofdioxide (CO_2) in middelhoge mate te verminderen ten opzichte van een traditionele zuivering. Een

deel van de door Aquafarm onderzochte planten geeft een netto opname van broeikasgassen, omgerekend in CO₂-equivalenten. Een netto opname van broeikasgassen betekent een bijdrage aan de broeikasgasreductie (ze nemen meer op dan ze uitstoten). Daarbij komt dat Aquafarm niet alleen broeikasgassen opneemt maar ook de broeikasgassenuitstoot vermindert wanneer het effluent geloosd is op het oppervlaktewater. De broeikasgasuitstoot van het zuiveringsproces in de RWZI wordt logischerwijze niet verminderd. De potentiële bijdrage aan broeikasgasreductie is in deze value case daarom middelhoog.

Energieneutraal

Aquafarm als nazuivering draagt in kleine mate bij aan het energieneutraal worden van een bestaande RWZI. De toevoeging van Aquafarm aan een 'traditionele' RWZI zorgt niet voor een vermindering van energiegebruik maar kan wel een kleine opbrengst van duurzame energie opleveren. Door het relatief lage energieverbruik van Aquafarm kan deze wél bijdragen aan de energieneutraliteit van een nazuivering ten opzichte van vergelijkbare nazuiveringstechnieken. De vergelijking met andere nazuiveringstechnieken wordt gemaakt in de discussie. Het principe van Aquafarm berust op natuurlijke processen, die in de basis geen extra energietoevoer nodig hebben. Echter, de optimale temperatuur voor de processen, zowel voor planten als voor de dieren, ligt in de winter hoger dan de temperatuur van het water, de buitenlucht en het effluent van RWZIs. Tot nu toe is er nog geen Aquafarm onderzoek geweest in de wintermaanden. De productie van biomassa van Aquafarm is beïnvloedbaar is door de temperatuur, waardoor de aanname wordt gedaan dat Aquafarm in de winter een verwarmingselement nodig zal hebben. Daarbij komt de energie die nodig is voor het rondpompen van water, licht en eventueel een oogststelsysteem.

Innovatief

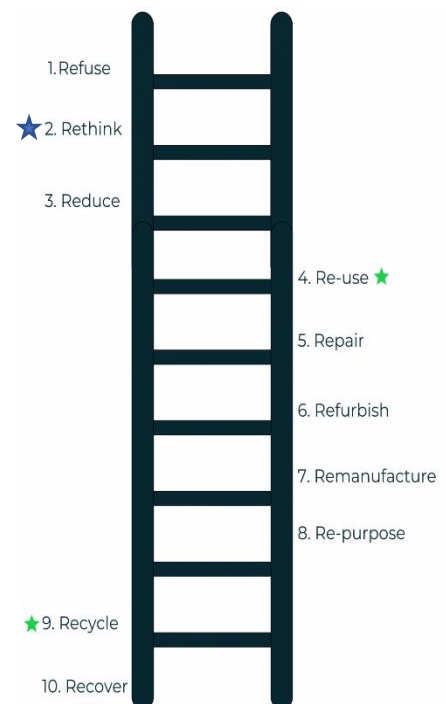
Aquafarm heeft een hoog innovatief karakter. Aquafarm staat nog aan het begin van haar ontwikkeling. Grote stappen moeten nog doorgemaakt worden, wat betekent dat een investering in Aquafarm ook een investering in onderzoek, kennis en ontwikkeling is. Op de circulariteits- of R-ladder (Kishna et al., 2019) (figuur 2) is te zien dat Aquafarm valt onder het kopje 'Rethink', wat inhoudt dat Aquafarm niet alleen een nieuwe techniek is maar dat het hele zuiveringssysteem radicaal wordt herdacht. Het innovatieve karakter van Aquafarm kan bijdragen aan het imago van waterschappen. Door innovaties te omarmen wordt een signaal afgegeven dat toekomstige problemen worden aangepakt en waterschappen in ontwikkeling blijven.

Circulariteit

Aquafarm heeft de potentie om een middelhoge bijdrage te leveren aan de circulaire economie. Alle drie principes binnen de circulariteit (hergebruik van grondstoffen, herwaardering van natuurlijke waarden en voorkomen van afvalstromen) kan Aquafarm positief aan bijdragen. Aan de andere kant heeft het verticaal farming systeem een kleine energievraag en het is nog onduidelijk of nieuwe afvalstromen ontstaan uit het verzamelen en verwerken van de biomassa. Op de R-ladder scoort Aquafarm niet alleen op *re-use* en *recycle*, maar ook op *rethink*. Dit geeft aan dat Aquafarm op drie verschillende manieren bijdraagt aan circulariteit. De bijdrage aan circulariteit in deze value case is middelhoog.

Biodiversiteit

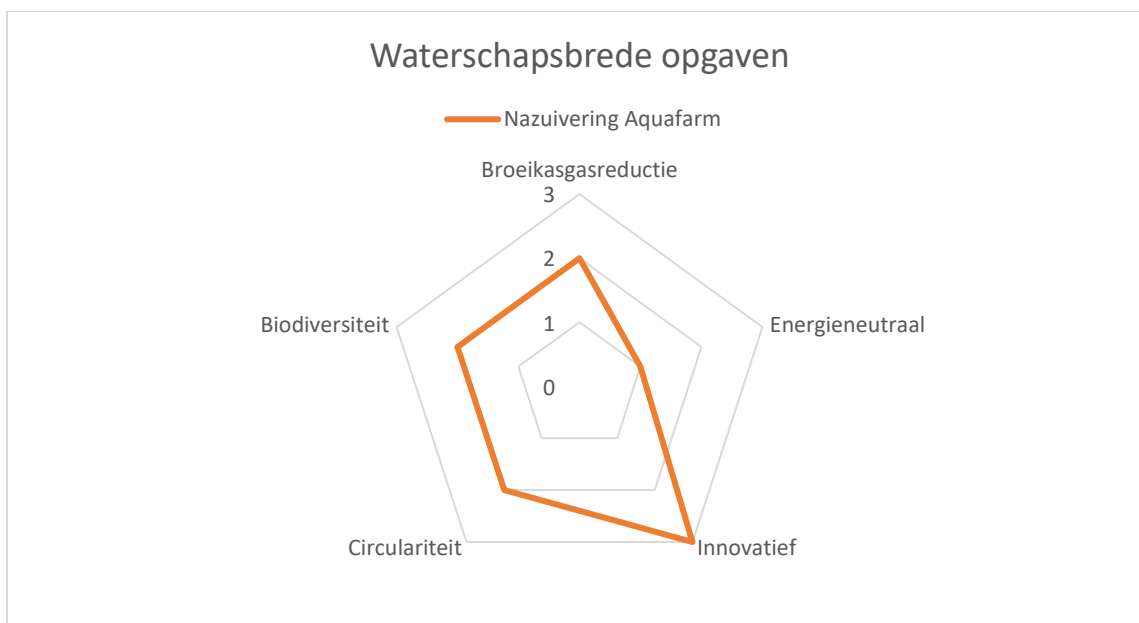
Aquafarm kan op twee verschillende manieren de biodiversiteit positief beïnvloeden. Ten eerste dragen de verschillende soorten planten en macro-invertebraten bij aan de hoeveelheid soorten



Figuur 2: Een overzicht van de R-ladder (Bron: <https://www.irent.nl/circulaire-it/>)

die op een RWZI-terrein aanwezig zijn. Deze bijdrage komt neer op de maximale hoeveelheid soorten binnen Aquafarm, wat waarschijnlijk niet meer is dan 10 soorten. Dit is een kleine bijdrage aan de biodiversiteit. De macro-invertebraten in Aquafarm zijn inheems en komen van nature voor in de buurt van RWZIs. Sommige van de onderzocht planten daarentegen worden actief geweerd uit de Nederlandse natuur. Inzet van deze planten zou dus betekenen dat de interactie tussen Aquafarm en de omgeving gereguleerd moet worden en de bijdrage aan de biodiversiteit mogelijk negatief zou zijn. Ten tweede trekt Aquafarm in de buitenlucht andere organismen aan die goed kunnen leven in de Aquafarm omstandigheden of worden aangetrokken door de planten. Dit moet nog nader onderzocht worden. Een hogere biodiversiteit maakt Aquafarm robuuster maar kan het oogsten vermoeilijken. We gaan ervan uit dat deze bijdrage aan de biodiversiteit middelhoog is. Wanneer Aquafarm overdekt wordt opgebouwd, zijn de beide bijdragen te verwaarlozen. Wanneer de Aquafarm (deels) buiten staat, kan de bijdrage aan de biodiversiteit redelijk zijn. Aquafarm zelf trekt mogelijk meer insecten aan dan andere zuiveringstechnieken. Daarbij draagt Aquafarm bij aan de biodiversiteit van het water waarop geloosd wordt, aangezien de waterkwaliteit van het effluent door het gebruik van Aquafarm verbeterd wordt. De bijdrage van Aquafarm aan de biodiversiteit kan dus in het gunstigste geval middel-hoog zijn.

Aquafarm geeft aan alle waterschapsbrede opgaven een minstens middelgrote positieve bijdrage, behalve bij energieneutraliteit waar Aquafarm volgens deze value case een kleine bijdrage aan levert. Op innovatie scoort Aquafarm zelfs een hoge positieve bijdrage, zoals te zien is in figuur 4.



Figuur 4: Bijdrage van het Aquafarm als nazuivering aan waterschapsbrede opgaven.

6.5 Zachte waarden

Duurzaamheidswinst

De duurzaamheidswinst van Aquafarm als nazuivering ligt in de verbeterde waterkwaliteit, biomassa-productie en lage energievraag. Aquafarm wordt hier alleen gezien als toevoeging van de traditionele RWZI en wordt hier niet direct vergeleken met andere nazuiveringstechnieken. Door de bouwmaterialen en (kleine) energiebehoefte geeft Aquafarm niet een optimale duurzaamheidswinst. Aquafarm heeft in deze value case dus de potentie om een middelhoge bijdrage te leveren aan duurzaamheid binnen de waterschappen.

Tegengaan hittestress

Aquafarm als nazuivering heeft de potentie om hittestress in urbane gebieden in lage mate te verminderen. Door de aanwezigheid van wateroppervlakte en planten, kan hittestress verminderd worden (Spijker et al., 2018). In stedelijke gebieden, waar versteend oppervlak de boventoon voert, kan Aquafarm een bijdrage leveren aan het stedelijk klimaat. Door Aquafarm en het effluent van Aquafarm in te zetten als (bewatering van) groene of waterrijke gebieden, kan het een middelhoge bijdrage leveren aan het voorkomen van hittestress.

Gezondheidsoverwegingen en praktische bezwaren kunnen er echter toe leiden dat een nazuiveringsinstallatie niet toegelaten wordt tot de openbare ruimte. Er wordt vanuit gegaan dat wanneer deze overwegingen in acht worden genomen en Aquafarm op een veilige manier opengesteld kan worden, de mogelijke bijdrage aan het verminderen van hittestress laag is, maar niet nul. Omdat er wordt uitgegaan van de hoogste potentie, worden deze bezwaren voor nu aan de kant gelegd en wordt de bijdrage van Aquafarm aan hittestress gezien als laag.

Landschappelijke waarde

De landschappelijke waarde van Aquafarm als nazuivering bij een traditionele RWZI kan redelijk groot zijn. Aquafarm levert met het gebruik van verschillende planten aan de esthetische waarde van RWZIs. De mogelijkheid ontstaat om de RWZIs meer in het landschap te laten opgaan door middel van natuurlijke materialen in Aquafarm. Aquafarm kan daarmee de schakel zijn tussen een afgesloten zuivering en de publieke buitenruimte en kan ruimte bieden voor recreatie.

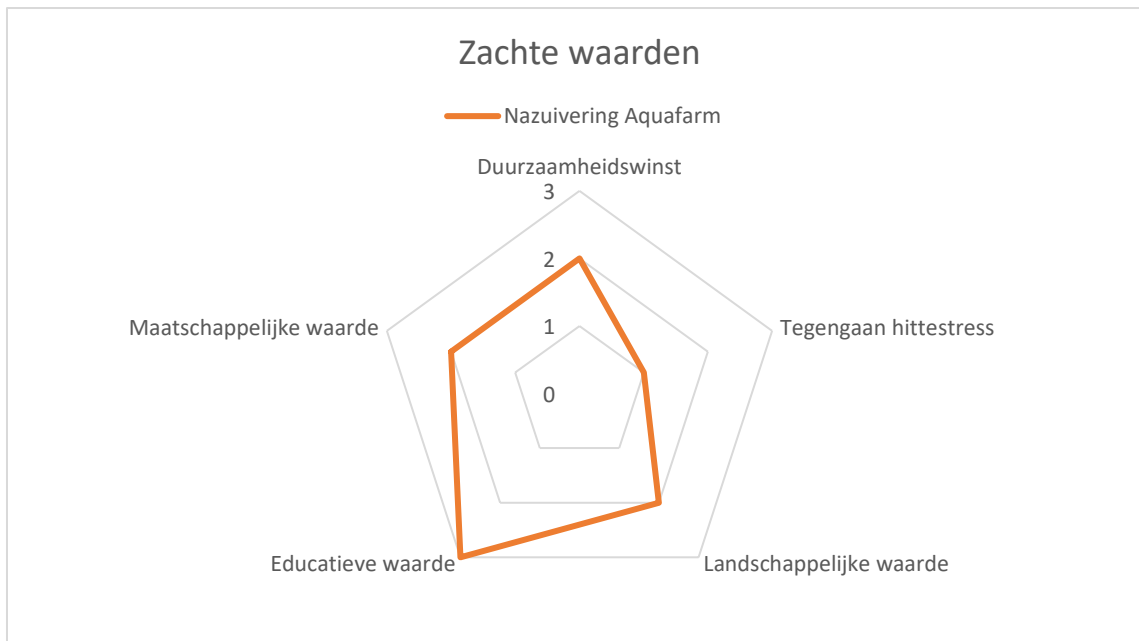
Educatieve waarde

De educatieve waarde van Aquafarm kan hoog zijn. Aquafarm maakt belangrijke thema's als circulariteit, waterzuivering, watergebruik en duurzaamheid in de waterketen bespreekbaar. Door een esthetisch interessante Aquafarm in te richten kan Aquafarm een plezierige locatie zijn om bewoners bij de RWZI te betrekken. Aquafarm stelt waterschappen in staat om kennis over waterzuiveringen op een andere manier over te brengen door Aquafarm open te stellen voor publiek.

Maatschappelijke waarde

Aquafarm kan op verschillende manieren in redelijke mate bijdragen aan de maatschappelijke waarde van een traditionele RWZI. De economische waarde bestaat ten eerste uit de opbouw en onderhoud van een extra zuiveringsstap. Ten tweede ontstaat een economisch businessmodel waarbij de zuivering producten (biomassa) oplevert. De ecologische waarde van Aquafarm wordt beschreven in de verbetering van de waterkwaliteit en de bijdrage aan de biodiversiteit, hittestress en de landschappelijke waarde. De sociale waarde van Aquafarm wordt beschreven in de educatieve waarde. Daarnaast vormt Aquafarm extra werkverschaffing. Concluderend wordt de bijdrage van Aquafarm aan de maatschappelijke waarde als middelgroot gezien in deze value case.

Aquafarm heeft een positieve invloed op alle 'zachte waarden' die gebruikt zijn in deze value case. De bijdrage aan educatie is hier zelfs hoog, zoals te zien is in figuur 5.



Figuur 5: Bijdrage van het Aquafarm als nazuivering aan zachte waarden.

6.6 Business case

De business case beschrijft een uitwerking van Aquafarm als nazuivering. Allereerst wordt een gedetailleerde beschrijving van het scenario gegeven, zodat de juiste aannames gedaan kunnen worden voor de verdere berekening van de business case. Vervolgens worden de verwachte kosten en opbrengsten van dit scenario uitgewerkt, aan de hand van resultaten van afgelopen onderzoeken, literatuur en verwachte resultaten. Daarmee kan Aquafarm als nazuivering vergeleken worden met andere nazuiveringstechnieken. Samen geven de kosten, baten en vergelijkingen met andere zuiveringsopties de haalbaarheid van het Aquafarm scenario op dit moment aan.

Ontwerp Aquafarm voor de business case

Om een heldere business case op te stellen, is het ontwerp van Aquafarm als nazuivering verder uitgewerkt op basis van eerder uitgevoerde praktijkonderzoeken. Dit ontwerp wordt hier geïntroduceerd. Voor de business case zijn vier verschillende organisme groepen bekeken. Om de berekeningen te kunnen maken, zijn specifieke soorten als voorbeeld gebruikt die tot op bepaalde hoogte als vertegenwoordigers van hun soortengroep gelden. Voor de drijvende planten zijn twee soorten gebruikt om het verschil in beide aan te geven. Per organisme groep is hieronder aangegeven wat de functie is binnen Aquafarm, wat de mogelijke opbrengst kan zijn en hoe de organismen kunnen worden hergebruikt. De cascade volgorde van de business case is als volgt:

- Algen (Nannochloris)
- Schelpdieren (Kragge mosselen)
- Drijvende planten (Eendenkroos (Lemma) en Grote Kroosvaren (Azolla))
- Helofyten (Lisdodde (Typha))

Algen in Aquafarm

In Aquafarm zijn algen in staat om bij te dragen aan de waterzuivering en te functioneren als voedingsstoffen voor de latere cascades. Algen zijn interessant voor Aquafarm omdat ze vaak van nature voorkomen in de omgeving van een RWZI en zijn ook bij verschillende proeven van Aquafarm zijn opgedoken (Schuijt et al., 2018). Algen zijn in staat om rioolwater te zuiveren door nutriënten op te nemen (Singh et al., 2015). In Aquafarm worden de algen opgenomen door de mosselen in de volgende cascade. Zo vormen de algen het voedsel van de mosselen en worden ze op een natuurlijke wijze opgenomen, zonder dat daar een extra zuiveringsstap voor nodig is.

Daardoor dragen algen niet bij aan het hergebruik van grondstoffen, omdat ze niet uit het systeem worden geoogst.

Schaaldieren in Aquafarm

Schaaldieren, zoals mosselen, zijn in staat om water te filteren en algen te verwijderen uit het water en produceren daarbij biomassa. Mosselen filteren rioolwater en nemen verontreinigingen en vaste deeltjes op. Algen worden ook opgenomen door de mosselen, waardoor de algen niet of in mindere mate in de volgende cascades terecht komen. De algen kunnen een negatieve invloed hebben op de groei van waterplanten en het oogsten van de planten verderop in het proces vermoeilijken.

De opbrengst van mosselen bestaat uit de schelpen, de mossel zelf en de uitwerpselen, waarbij de schelpen de hoogste opbrengst in drooggewicht bereiken. Onderzoek van Aquafarm laat zien dat mosselen overleven op rioolwater, dus zijn ze geschikt om in Aquafarm te gebruiken. Er wordt geschat dat er per kubieke meter rioolwater ruim 300 kg drooggewicht schelpen per jaar kan worden geproduceerd. De kalkrijke schelpen bestaan voor 96% uit calciumcarbonaat (Society for Experimental Biology, 2017).

Drijvende planten in Aquafarm

De drijvende planten, zoals eendenkroos en kroosvaren, dragen bij aan Aquafarm door verontreinigingen uit het water op te nemen en biomassa te produceren wat op veel verschillende manieren hergebruikt kan worden. Waterplanten nemen voedingsstoffen zoals fosfor en stikstof op uit het water, maar kunnen ook bijdragen aan de verwijdering van microplastics en mogelijk ook andere microverontreinigingen. Door de opname van CO₂, en in het geval van azolla ook van stikstof, dragen drijvende planten bij aan de vermindering van broeikasgassen in de atmosfeer.

De biomassaopbrengst van de drijvende planten is afhankelijk van de kwaliteit van het rioolwater en de plantensoort. In de praktijkproef in Rhenen is gebruik gemaakt van het effluent van de RWZI, zoals de bedoeling is bij de business case. De praktijkproef heeft aangetoond dat Azolla gemiddeld 4 gram drogestof/m²/dag biomassa produceert. In de praktijkproef in Dodewaard was er een opbrengst van ruim 8 gram natgewicht/m²/dag eendenkroos. Echter was dit de groeisnelheid op een mix van influent en effluent. Aangezien nu wordt uitgegaan van alleen effluent, wat minder voedingsstoffen bevat dan influent, zal de biomassaopbrengst lager zijn. Aangezien de groeisnelheid van Eendenkroos vergelijkbaar is met die van Azolla, wordt de groeisnelheid van Azolla in Rhenen ook voor Eendenkroos gebruikt.

Helofyten in Aquafarm

De helofyten hebben een zuiverende werking op het gebied van stikstof en fosfor en produceren een biomassa dat hergebruikt kan worden. Helofyten zijn planten die geworteld zijn en tenminste een deel van de tijd deels onder water staan. Riet en Lisdodde zijn voorbeelden van helofyten planten. Deze planten hebben een zuiverende werking op nutriënten en worden ingezet om microverontreinigingen uit de bodem of het water te halen. In de Aquafarm business case is de lisdodde ingezet om de concentratie nutriënten uit het rioolwater te verwijderen tot lage concentraties.

Vergeleken met ondergedoken of drijvende planten groeien helofyten sneller en produceren ze meer biomassa (Aquafarm, 2018). De Lisdodde heeft een biomassaproductie van ruim 4,1 gram drooggewicht/m²/dag (Kuijer & Dickhoff, 2017).

Ruimtegebruik en opschaling Aquafarm

Voor het bepalen van de grootte van het scenario in de business case is gekeken naar de afgelopen onderzoeken en plannen voor toekomstige praktijkproeven. Als referentie voor de schaalvergroting wordt de praktijkproef in Rhenen genomen, waar effluent wordt gezuiverd. In de praktijkproef in Dodewaard is gebruik gemaakt van zowel influent als effluent uit de RWZI, waardoor het minder geschikt is als startpunt voor de business case dan de praktijkproef in Rhenen.

Voor de cascades van planten en algen (dus niet van de mosselen) is gekozen voor een diepte van 15 centimeter. In Rhenen is de proefopstelling 15 cm tot 30 cm diep. Dit heeft te maken met de bakken die voorhanden waren, maar heeft ook invloed op het functioneren van de proef en het gebruiksoppervlak. Hoe groter het oppervlakte is, hoe meer planten er kunnen groeien. Daarom wordt in de business case uitgegaan van 15 cm diepte.

Om het benodigde oppervlakte te berekenen, wordt gekeken naar een representatieve RWZI en afgelopen onderzoeken. RWZIs in Nederland hebben een gemiddelde capaciteit van 10.000 – 100.000 inwonersequivalenten (1 inwonersequivalent (i.e.) is 150 L/dag). In de business case wordt er gerekend met een representatieve 50.000 i.e. Zoals tabel 2 laat zien, komt dit neer op een oppervlakte van 5,6 ha. Eventuele extra capaciteit tijdens piekneerslag wordt niet meegenomen. In deze berekening is ervan uitgegaan dat de gehele Aquafarm een waterdiepte van 15 centimeter heeft.

Tabel 2: Overzicht van het volume en de grootte van Aquafarm praktijkproeven en de businesscase.

LOCATIE	OPPERVLAKTE (M2)	DIEPTE (M)	VOLUME (M3)	VERBLIJFTIJD (DAGEN)	DEBIET (L/UUR)	I.E.
DODEWAARD	106	0,4	42,4	1	800	128
RHENEN	11,2	0,15-0,3	1,68-3,36	2	60	10
RHENEN 2.0	2,4	0,3 max.	0,72	2	?	?
TOEKOMSTIGE PRAKTIJK-PROEF	100-500	0,4	40-200	1	600-3000	100-500
BUSINESS CASE	56.000	0,15	8400	2	300.000	50.000

Door vertical farming, waarbij meerdere bakken boven elkaar worden geplaatst, kan het ruimtegebruik worden verkleind. Berekeningen van het ruimtegebruik inclusief vertical farming zijn per cascade gedaan, aangezien de macro-invertebraten een andere opstelling nodig hebben dan de planten. De planten en algen worden in 10 bakken boven elkaar geplaatst, wat een gebruikelijke hoeveelheid lagen is voor een vertical farm. Daarnaast is de loopruimte 20% van het totale wateroppervlakte, om genoeg ruimte over te laten voor het oogsten en onderhoud. De schelpdieren staan in bakken van 1 kubieke meter. Deze bakken zijn niet gelaagd. Door een grotere diepte en dus groter volume is er minder oppervlakte nodig voor de bakken en als loopruimte. Door het gebruik van vertical farms gaat het benodigde grondoppervlak van bijna 5 hectare naar minder dan één hectare, zoals te zien is in tabel 3.

Tabel 3: Overzicht van de oppervlakte berekeningen voor Aquafarm als nazuivering in de business case.

OPPERVLAKTE (M2)	WATEROPPERVLAK	GRONDOPPERVLAK VERTICAL FARMS	LOOPRUIMTE	TOTALE GRONDOPPERVLAK
ALGEN	11200	1120	224	1344
MOSSELEN	1500	1500	300	1800
AZOLLA	11200	1120	224	1344
EENDENKROOS	11200	1120	224	1344
LISDODDE	11200	1120	224	1344
TOTAAL RUIMTE-GEBRUIK	46300	5980	1196	7176

Kosten Aquafarm

De kosten voor de investering en de exploitatie van Aquafarm zijn in deze paragraaf uiteengezet.

De bouwkosten bestaan uit de kosten voor een vertical farm van 10 lagen in kassen en grote bakken voor de mosselen. Voor de opbouw van de mosselbakken wordt dezelfde prijs gehanteerd als voor de opbouw van een vertical farm (1000 euro per m²). In deze prijs is inbegrepen de bouw van 10 lagen aan vertical farms en een geautomatiseerd bewateringsproces. De kosten van de pompen die het afvalwater rondpompen zijn daarom niet los berekend. In contrast tot een traditionele vertical farm maakt alleen de helofyten cascade gebruik van een substraatlaag om de planten op te laten groeien. De afwezigheid van de substraatlaag in de andere cascades kan tot lagere investeringskosten leiden, wat eventuele onvoorziene kosten kan compenseren. De aankoopkosten van planten en macro-invertebraten is niet meegenomen, omdat deze tot nu toe vaak uit de natuur gehaald zijn en het onduidelijk is of dat haalbaar is op grotere schaal. Naast de bouwkosten zijn er ook kosten voor de grondaankoop. Voor de grondaankoop is 100 euro per m² gerekend. In totaal zijn de investeringskosten een kleine 7 miljoen euro. Zie voor een overzicht tabel 4.

Tabel 4: Overzicht van de investeringskosten en relevante oppervlakten van Aquafarm als nazuivering in de business case.

	Waarde	Eenheid
Wateroppervlakte	56000	m ²
Ruimtegebruik vertical farm	7200	m ²
Ruimtegebruik (zonder loopruimte)	6000	m ²
Investeringskosten		
Opbouwkosten vertical farm	€ 1000,-	Euro/m ²
Investeringskosten	€ 6.000.000,-	Euro
Grondaankoop	€ 100,-	Euro/m ²
Kosten grondaankoop	€ 720.000,-	Euro
Totale investeringskosten		
Kosten bouw en grondaankoop	€ 6.720.000,-	Euro

De overige jaarlijkse kosten bestaan uit personeels- en energiekosten. De personeelskosten zijn lastig in te schatten en zijn gebaseerd op ervaringen van afgelopen praktijkproeven. Naar aanleiding van de praktijkproef in Rhenen wordt geschat dat 40 uur per hectare per week nodig is, met gemiddeld 70 euro per uur. De uren zijn nodig voor het onderhoud en voornamelijk voor het oogsten van de biomassa. Door het automatiseren van het oogsten zouden de kosten voor het personeel met 50% kunnen verminderen. Op termijn kan automatisering de inzet van personeel nog verder terugbrengen. Er is een grote investering nodig om het oogsten geautomatiseerd te kunnen laten verlopen. Aangezien hier rond 400.000 euro per jaar aan personeelskosten bespaard zou kunnen worden, geeft elke investering lager dan 8 miljoen euro over 20 jaar een kostenbesparing. Deze investering zou dus vrijwel zeker deel zijn van een zuivering van deze schaal, aangezien de kosten van 7,3 Fte erg hoog zijn, zoals te zien is in tabel 5.

Het energieverbruik voor Aquafarm komt uit het gebruik van pompen om het afvalwater rond te leiden, eventueel beluchting en belichting. Om dit te berekenen wordt de energievraag van een hydroponics systeem gebruikt³. Het energieverbruik is dan 16 kWh/m² (Xydis et al., 2017). Er wordt gerekend met 0,10 euro/kWh.

³ Hydroponics, of hydrocultuur in het Nederlands, is een systeem waarbij planten niet in de bodem maar direct in het water groeien, waarbij het water met opgeloste nutriënten wordt rondgepompt.

Tabel 5: Een overzicht van de exploitatie kosten van Aquafarm als nazuivering. * 1 Fte is 1600 uur/jaar.

	Waarde	Eenheid
Personeelskosten		
Personeelsuren per week	40	Uur/ha
Personeelsuren per jaar	7,3	Fte*
Kosten per uur	70	Euro/uur
Totale kosten	€ 815.000,00	Euro/jaar
Energie		
Energieverbruik	16	kWh
Energieprijs	0,1	Euro/kWh
Energiekosten	€ 10.000,00	Euro/jaar
Totale exploitatiekosten		
Energie en personeelskosten	€ 825.000,00	Euro/jaar

Jaarlijkse kosten

Energie	€	10.000,-
Personeel	€	815.000,-
Afschrijvingstermijn		20 Jaar
Afschrijving investeringskosten	€	300.000,-
Rente		2,0%
Rentekosten	€	120.000,-
Totaal	€	1.245.000,-

Tabel 6: Overzicht van de jaarlijkse kosten van Aquafarm als nazuivering in de business case.

Opbrengsten Aquafarm

De opbrengsten van Aquafarm hangt af van de soorten organismen, hoeveelheid geproduceerde biomassa en toepassingsmogelijkheden.

Hergebruik schaaldieren

Er zijn veel verschillende toepassingen voor het hergebruik van de schalen van weekdieren, waarbij vooral het aanwezige calciumcarbonaat van waarde is. Calciumcarbonaat is een belangrijke grondstof voor in de landbouw en voor bouwmaterialen. Op dit moment wordt het grootste deel van het calciumcarbonaat uit gemijnd kalksteen gehaald. De verkoopprijs van calciumcarbonaat gaat vanaf 5 euro per kilogram (Calciumcarbonaat 99+%, n.d.). Deze prijs is voor calciumcarbonaat in pure vorm, waarbij de schelpen eerst verwerkt moeten worden. De verwerkingskosten van schelpen tot calciumcarbonaat zijn niet bekend. De opbrengst van calciumcarbonaat uit Aquafarm als nazuivering is zonder productie en logistieke kosten een ruime 2 miljoen euro.

Hergebruik planten

De drijvende planten hebben veel verschillende toepassingen. De opbrengst van de drijvende planten heeft te maken met de hoeveelheid geproduceerde biomassa en de precieze samenstelling van eiwitten, lipiden en cellulose. Om de opbrengst te berekenen is gebruik gemaakt van vergelijkbare bronnen van ruwe eiwitten (sojameel), lipiden (sojaolie) en cellulose (cellulose uit gras). Azolla heeft de potentie om gebruikt te worden voor bioethanol (door de hoeveelheid cellulose) en biodiesel of oleochemicaliën (door de hoeveelheid lipiden). Eendenkroos is vergelijkbaar met Azolla en heeft ook veel mogelijke toepassingen. Eendenkroos heeft een hoger eiwitgehalte dan Azolla, wat toegepast kan worden in de lijm- en coatingsindustrie. Andere toepassingen zijn ook mogelijk. Azolla kan bijvoorbeeld als veenvervanger gebruikt worden in potgrond of als groene meststof.

Een belangrijke manier om plantenbiomassa te hergebruiken, is om het te verwerken tot biocomposiet. De opbrengst van biocomposiet is 300,- euro per ton 80% droogstof (Deeke et al.,

2019). Daarbij komen logistieke kosten die geschat worden op 115,38 per ton droogstof. Dit brengt 184,62 euro per ton droogstof biomassa op.

Totale opbrengsten

De potentiële opbrengst voornamelijk van calciumcarbonaat en eiwit is veelbelovend. De potentiële opbrengst van het hergebruik van het calciumcarbonaat uit mosselen is ruim 2 miljoen euro per jaar. Zonder de verwerkingskosten, zijn de opbrengsten van het hergebruiken van het calciumcarbonaat voor bijvoorbeeld cement of bouw materiaal erg hoog.

Van de eiwit-, lipide- en cellulose-opbrengsten is de eiwitopbrengst het meest belovend, zie tabel 7. Voornamelijk algen en in mindere mate eendenkroos bevatten hoge hoeveelheden eiwitten, die op veel verschillende manieren hergebruikt kunnen worden.

Er is meer onderzoek nodig om de productie en het hergebruik van de opbrengst te kunnen realiseren. Wanneer voor de eindproducten een productieprijs van 70% wordt gerekend, zal de totaal maximale opbrengst uit eiwitten en calciumcarbonaat onder de 700.000 euro per jaar liggen. Hiermee zijn de kosten van Aquafarm gedekt tot ruim 50% van de jaarlijkse kosten. Waar de opbrengsten van een zandfilter, waterharmonica en helofytenfilter nul zijn, geven de opbrengsten van Aquafarm aan dat dit een volledig nieuwe manier van zuiveren is waarbij ook economische opbrengsten kunnen ontstaan.

Tabel 7: Overzicht van de opbrengsten per soort en per product voor de Aquafarm business case per jaar.

	<i>Algen</i>	<i>Eendenkroos</i>	<i>Azolla</i>	<i>Lisdodde</i>	<i>Quagga mosselen</i>	<i>Totaal (per jaar)</i>
<i>Eiwit</i>	€ 115.000,-	€ 15.000,-	€ 10.000,-	€ 5.000,-	€ -	€ 145.000,-
<i>Lipide</i>	€ 11.000,-	€ -	€ 900,-	€ 400,-	€ -	€ 13.000,-
<i>Cellulose</i>	€ 3.000,-	€ -	€ 700,-	€ 800,-	€ -	€ 5.000,-
<i>Calciumcarbonaat</i>	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 2.300.000,-	€ 2.300.000,-
<i>Totaal</i>	€ 129.000,-	€ 15.000,-	€ 12.000,-	€ 6.500,-	€ 2.300.000,-	€ 2.463.000,-

7 Discussie

Dit hoofdstuk zet de resultaten van de value case in een breder perspectief. Allereerst wordt er gereflecteerd op de methoden en het gebruik van een value case in dit rapport. Ten tweede wordt de potentie van Aquafarm als nazuivering vergeleken met andere nazuiveringstechnieken. Tenslotte wordt er aangegeven waar nog grote onzekerheden in de analyse en in de ontwikkeling van Aquafarm zitten. Hier is nog ruimte voor toekomstig onderzoek.

7.1 Value case

De indicatoren van de value case zijn gekozen aan de hand van literatuur, gesprekken met experts en vanuit mijn eigen goeddunnen. Er zijn wellicht indicatoren wel of niet meegenomen in de analyse die een ander wel had meegenomen. Bijvoorbeeld, de analyse van het hergebruik van grondstoffen is gebaseerd op de top-5 grondstoffen, zoals aangegeven in literatuur. Wanneer de andere grondstoffen waren meegenomen in de analyse, of componenten van de grondstoffen zoals eiwitten in de business case, was de uitkomst wellicht anders geweest. Ander indicatoren hadden dus een ander beeld van Aquafarm als nazuivering kunnen geven. Deze analyse kan verbeterd worden door de analyse te herhalen en gerichte vragenlijsten op te stellen om het belang van deze indicatoren en de uitkomsten van de analyse te ondersteunen. Daarbij kan de analyse van elke indicator gezien worden als een opzichzelfstaand onderzoek. Dit rapport geeft daarom een vooranalyse van de indicatoren weer die mogelijk verder onderzocht kunnen worden.

De value case bekijkt de potentie van Aquafarm als nazuivering, maar er zijn verschillende scenario's mogelijk voor Aquafarm. De focus van dit rapport ligt op nazuivering van effluent. Op korte termijn lijkt het haalbaar om Aquafarm als nazuivering in te zetten. Bij nazuivering zit de kracht van Aquafarm voornamelijk in verwijdering van P en N en in mindere mate in het produceren van biomassa, zoals het geval is bij Aquafarm als voorzuivering. Daarnaast geeft het gekozen Aquafarm scenario ook een bijdrage aan andere bredere waterschapsopgaven zoals te zien is in de value case. Aquafarm kan in de toekomst worden ingezet als volledige zuivering, waarbij ook een slibverwerkingslijn ingepast kan worden. Hiervoor is nog veel onderzoek nodig, zoals ook te lezen is in paragraaf 7.3.

De value case analyseert de toevoeging van Aquafarm aan een traditionele RWZI. Dit geeft een overzicht van de toegevoegde waarde van Aquafarm aan een bestaande zuivering. Wanneer het startpunt van analyse anders was geweest, zouden de resultaten ook anders kunnen zijn. Bijvoorbeeld, wanneer nazuiveringstechnieken direct met elkaar worden vergeleken, kan de nadruk op andere indicatoren hebben gelegen. Daarom vindt de vergelijking van Aquafarm met andere nazuiveringstechnieken plaats in paragraaf 7.2.

7.2 Vergelijking nazuiveringstechnieken

Zuivering

Aquafarm heeft een hoge potentie voor verwijderen van stikstof én fosfor. Afgelopen onderzoeken hebben de potentie van de zuiverende werking aangetoond. Vergeleken met een helofytenfilter en een waterharmonica is de zuiverende werking van Aquafarm beter, omdat Aquafarm gericht ontworpen kan worden voor het verwijderen van nutriënten. Aquafarm en een zandfilter hebben bij benadering dezelfde investeringskosten. Een zandfilter zuivert alleen fosfor en tot hogere concentraties dan Aquafarm. Aquafarm verwijdert ook stikstof zonder dat daar extra chemicaliën toegevoegd worden, in tegenstelling tot de zandfilter.

Biomassa productie

De biomassa opbrengst bij Aquafarm is een voordeel ten opzichte van andere nazuiveringstechnieken zoals een zandfilter. Vergeleken met andere zuiveringen is Aquafarm op de korte termijn vergelijkbaar met een helofytenfilter en waterharmonica. Afhankelijk van de gekozen organismen in Aquafarm verandert de hoeveelheid geproduceerde biomassa. De biomassa opbrengst van helofyten ten opzichte van drijvende planten is bijvoorbeeld iets hoger.

Hergebruik biomassa en opbrengsten

Afhankelijk van de gekozen organismen in Aquafarm kan de geproduceerde biomassa op een bepaalde manier hergebruikt worden. Op de korte termijn zijn bestaande biomassaverwerkingen (composteren, biogas productie of composiet) realistisch, waarbij de monetaire opbrengst niet in verhouding staat tot de productiekosten van Aquafarm. Op langere termijn zijn veel verschillende ontwikkelrichtingen mogelijk, die mogelijk voor een hogere opbrengst kunnen zorgen. Daarvoor is het belangrijk dat de biomassa de juiste samenstelling hebben. Voor plantenresten geldt dat voornamelijk eiwitten gevolgd door lipiden momenteel het meeste lijken op te brengen met bij benadering 145.000 euro per jaar voor de totale hoeveelheid eiwitten. De verkoop van calciumcarbonaat uit schelpdieren zoals mosselen heeft daarentegen een opbrengst van ruim 2 miljoen, exclusief productiekosten. Vergeleken met andere zuiveringstechnieken als een helofytenfilter en waterharmonica is de opbrengst van Aquafarm beter inzetbaar als grondstof voor hoogwaardige producten. Bij Aquafarm wordt de biomassa gericht en per organisme geproduceerd en is dus geschikt voor specifiek hergebruik met hogere kwaliteitseisen.

Energieverbruik

Het energieverbruik van Aquafarm is hoger dan van een helofytenfilter en waterharmonica, maar lager dan een zandfilter. Het energiegebruik is te wijden aan de opstelling als vertical farm, waarbij kunstmatig licht en waterpompen nodig zijn. Daarbij kan Aquafarm grondstoffen voor energieproductie leveren. Gezien de hoge zuiveringspotentie en de opgaven om energieverbruik te verminderen, kan Aquafarm bijdragen aan een energie neutrale zuivering, wanneer dit direct vergeleken wordt met een zandfilter.

7.3 Aanbevelingen toekomstig onderzoek Aquafarm

Voor de verbetering van de value case en voor de toepassing van Aquafarm moet meer onderzoek gedaan worden. Ten eerste moet de juiste cascade volgorde gevonden worden om de benodigde zuiveringsefficiëntie te behalen. De zuiveringsefficiëntie van verontreinigingen, zoals medicijnresten en microplastics, kan nog verder onderzocht worden. Vervolgens moet het hergebruik van biomassa tot hoogwaardige producten nog verder onderzocht worden, met een nadruk op de toepasbaarheid biomassa uit rioolwater en de productie(kosten). Onderzoek is nodig om inzicht te krijgen op de praktijk rondom het oogsten van de planten en voornamelijk van de macro-invertebraten. Daarbij is het onduidelijk wat er met mogelijk reststromen (uitwerpselen van mosselen bijvoorbeeld) gedaan kan worden. Tenslotte is meer onderzoek nodig om hergebruikopties beter uit te werken. Het is nog onduidelijk hoe de markt reageert op biomassa uit rioolwater in verband met gezondheids- en veiligheidseisen. Daarnaast is door het innovatieve karakter van Aquafarm onduidelijk wat de productiekosten van biomassa tot hoogwaardigere producten zijn en of dit haalbaar is op de schaalgrootte die voor ogen is.

8 Conclusie

Dit rapport schetst Aquafarm als een nazuiveringstechniek die bijdraagt aan veel verschillende opgaven die leven bij waterschappen.

De value case geeft aan dat Aquafarm op uiteenlopende thema's goed scoort. In deze analyse scoort Aquafarm als nazuivering de gemiddeld hoogste score voor de thema's waterkwaliteitsverbetering en zachte waarden. Dit zijn moeilijk te vergelijken thema's, maar het is interessant om te zien dat Aquafarm op totaal verschillende thema's goed scoort. De grootste potentie van Aquafarm ligt niet alleen bij de nazuivering van stikstof en fosfor, maar ook op de toegevoegde waarde van Aquafarm in innovatieve en educatieve doelen van waterschappen. De indicatoren geven aan dat Aquafarm op veel verschillende gebieden een bijdrage kan leveren aan een bestaande RWZI, die niet gevat kunnen worden in een business case alleen, zoals te zien is in tabel 8.

Tabel 8: De bijdrage van Aquafarm als nazuivering aan verschillende opgaven op een schaal van 1 (kleine bijdrage) tot 3 (hoge bijdrage).

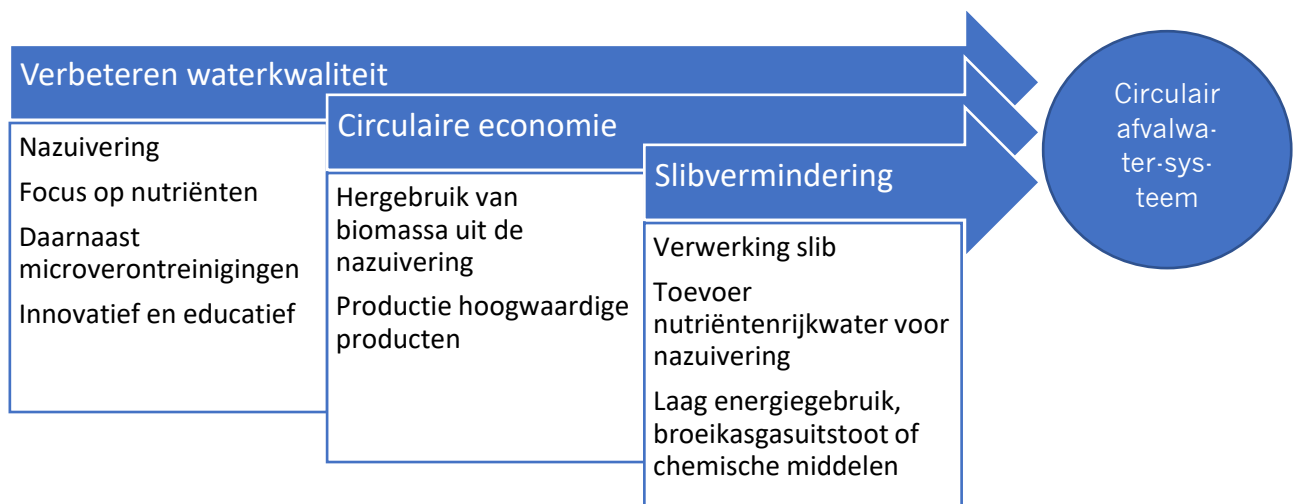
Toegevoegde waarde:	1 (laag)	2 (redelijk)	3 (hoog)
Terugwinning grondstoffen			
Fosfor hergebruik			
Biomassa hergebruik			
Bioplasticsproductie			
Waterkwaliteit			
Stikstof en fosforverwijdering			
CZV-verlaging			
Microplastics verwijdering			
Medicijnresten verwijdering			
Zware metalen verwijdering			
Bredere opgaven			
Innovatief			
Biodiversiteit			
Circulaire economie			
Broeikasgasreductie			
Energieneutraal			
Zachte waarde			
Educatief			
Duurzaamheid			
Maatschappelijke waarde			
Landschappelijke waarde			
Hittestress			

De business case biedt een inzicht in de unieke mogelijkheden die Aquafarm als nazuivering biedt in het terugwinnen van grondstoffen voor de productie van hoogwaardige materialen.

Aquafarm is een ontwikkelrichting die niet alleen als nazuiveringstechniek maar op termijn ook als volledige zuivering ingezet kan worden. De TRL van Aquafarm als nazuivering is op dit moment het hoogste ten opzichte van andere toepassingen van Aquafarm. Dit rapport geeft een overzicht van de potentie van Aquafarm die op verschillende termijnen realistisch zijn. De toepassingsmogelijkheden van Aquafarm zijn in drie richtingen te vatten:

1. Verbeteren van waterkwaliteit met nazuivering: Op de korte termijn is het mogelijk om zuiverende Aquafarm te bewerkstelligen voor het verwijderen van nutriënten;
2. Bijdrage aan de circulaire economie: Op de middellange termijn kan de opbrengst van Aquafarm;
3. Slibvermindering: op de lange termijn kan Aquafarm ingezet worden als slibverwerker.

Op dit moment is de bijdrage van Aquafarm aan de waterkwaliteit van effluent het meeste onderzocht en Aquafarm heeft de potentie om effluent tot nutriënten tot 97% te verwijderen en potentie om andere verontreinigingen zoals medicijnresten te verwijderen. De productie van biomassa kan op termijn de basis vormen voor de productie van hoogwaardige producten. Tenslotte kan de toevoeging van slibverwerking door Aquafarm een economisch interessante keuze zijn. Hierbij ontstaat een systeem dat niet alleen innovatief en educatief is, maar ook door een laag energieverbruik, het reduceren van broeikasgassen en zonder gebruik van chemische middelen een duurzaam alternatief vormt voor andere zuiveringstechnieken. Het succesvol doorlopen van deze drie onderzoeksrichtingen zal bijdragen aan de ontwikkeling van een circulair rioolwaterzuiveringstelsel, zoals te zien is in figuur 6.



Figuur 6: Overzicht potentie Aquafarm over tijd.

Literatuurlijst

- Aquafarm (2019). Blueprint: Onderzoeks- en pilotfase 2019-2022. 09-09-2019.
- Blanc, P., Ducastel, B., Cazin, J., Blooshi, M., Dhaheri, S., Marzooqi, M., Maneux, E., Ciret, P., Sow, M.,
- Calciumcarbonaat 99+%, foodgrade, E170 -. (n.d.). Laatst gezien April 3, 2022, op <https://www.laboratoriumdiscounter.nl/nl/calciumcarbonaat-99-foodgrade-e170.html>
- Deeke, A., van Hedel, F., Groot, R., Bottger, W., Swiste, M., Zoutberg, G., Fermont, A., Nijman, M., (2019). Circulair Biocomposiet van Natuurvezels van Waterschappen en Natuurorganisaties. *STOWA Rapport 2019-41*.
- Delfland (Hoogheemraadschap Delfland), (2020). Strategie microverontreinigingen. 20-09-2020.
- EASAC. (2016). *Indicators for circular economy* (Oplage November). https://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Circular_Economy/EASAC_Indicators_web_complete.pdf
- den Elzen, J., van Nieuwenhuijzen, A., Menkveld, W., Uijterlinde, C. (2008). Onderzoek zandfiltratie Rijnland leidt tot forse kostenbesparing. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer*, 41(10), 45-49.
- de Haan, J. J., van der Schoot, J. R., de Buck, A. J., & Sival, F. P. (2012). Zuivering van sloot-en drainwater in helofytenfilters is kosteneffectief. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*, 45(5), 23-25.
- Héder, M. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *The Innovation Journal*, 22(2), 1-23.
- HDSR (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden), (2016). Waterbeheerplan Waterkoers 2016-2021. <https://www.hdsr.nl/@37197/waterkoers-2016-2021/>
- HDSR (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden), (2022). Waterbeheerprogramma 2022-2027 Stroomopwaarts. <https://hdsr.foleon.com/waterbeheerprogramma/stroomopwaarts/welkom/>
- Kishna, M., Rood, T., & Prins, A. (2019). Achtergrond rapport bij circulaire economie in kaart - Achtergrondstudie- Planbureau voor de Leefomgeving.
- Masi, F., Rizzo, A., & Regelsberger, M. (2018). The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of Environmental Management*, 216, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.086>
- Masiá, P., Sol, D., Ardura, A., Laca, A., Borrell, Y. J., Dopico, E., ... & Garcia-Vazquez, E. (2020). Bioremediation as a promising strategy for microplastics removal in wastewater treatment plants. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111252.
- Massabuau, J. (2017). First-Time Implementation of Innovative In situ Biotechnology on an Offshore Platform in Arabian Gulf for Continuous Water Quality Monitoring and Early Leak Detection. 10.2118/188821-MS.
- van der Molen, M. (2013). Waarom doen we dit eigenlijk. *De business case als succesfactor voor projecten*. Research and practice. *International journal of management reviews*, 12(1), 85-105.

- Pennekamp, F., Pontarp, M., Tabi, A., Altermatt, F., Alther, R., Choffat, Y., ... & Petchey, O. L. (2018). Biodiversity increases and decreases ecosystem stability. *Nature*, 563 (7729), 109-112.
- Pfleger, B. F., Gossing, M., & Nielsen, J. (2015). Metabolic engineering strategies for microbial synthesis of oleochemicals. *Metabolic engineering*, 29, 1-11.
- Relou, C., Maas, K., & Scheidsbach, J. (2019). De maatschappelijke waarde van ondernemerschap - Een inventarisatie van de maatschappelijke waarde die het commerciële mkb creëert. *Impact Centre Erasmus & MKB Nederland*.
- Sabri, N. A., Schmitt, H., Van der Zaan, B. M., Gerritsen, H. W., Rijnaarts, H. H. M., & Langenhoff, A. A. M. (2021). Performance of full scale constructed wetlands in removing antibiotics and antibiotic resistance genes. *Science of the Total Environment*, 786, 147368.
- Salzmann, O., Ionescu-Somers, A., & Steger, U. (2005). The business case for corporate sustainability: literature review and research options. *European Management Journal*, 23(1), 27-36.
- Schrijver, R. A. M., & van der Heide, C. M. (2018). De waarde van maatschappelijke kostenbatenanalyses voor natuur en landschap. *Vakblad Natuur Bos Landschap*, (146), 3-7.
- Schuijt, L. M., van Bergen, T., Verdonshot, P. F. M., Smolders, F., & Lamers, L. P. (2018). Waterzuivering & biomassaproductie: Complementaire waterzuivering met planten en dieren-Fase 1. Wageningen University & Research.
- Singh, B., Baudh, K., & Bux, F. (2015). *Algae and environmental sustainability* (Vol. 7). India: Springer.
- Society for Experimental Biology. (2017, July 5). Seashells for sale: A new source of sustainable biomaterials. *ScienceDaily*. Retrieved March 1, 2022 from www.sciencedaily.com/releases/2017/07/170705132919.htm
- Spijker, J. H., Jacobs, C. M. J., & Mol, G. (2019). *Aanpak hittestress Harderwijk*. Wageningen Environmental Research.
- van Steenwijk, A. H. D. V., van Bommel, M., Tamerus, H., & van Zanten, O. Verbetering microbiologische waterkwaliteit RWZI-effluent door nazuivering met waterharmonica. *H2O-Online*. 18 mei 2021.
- Tahir, S., Steele, K., Steichen, M. S. T., Penning, P., & Martin, N. (2018). Water and Circular Economy. Ellen MacArthur Foundation, April.
- Uijterlinde, C.A., Heijkoop, N.W., van Sluis, J.W., (2011). Effluentpolishing met Algentechnologie, Hoofdrapport. *STOWA Rapport 2011-04*.
- United Nations General Assembly. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 1(70), 1-35. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>