

BETER DEFOSFATEREN

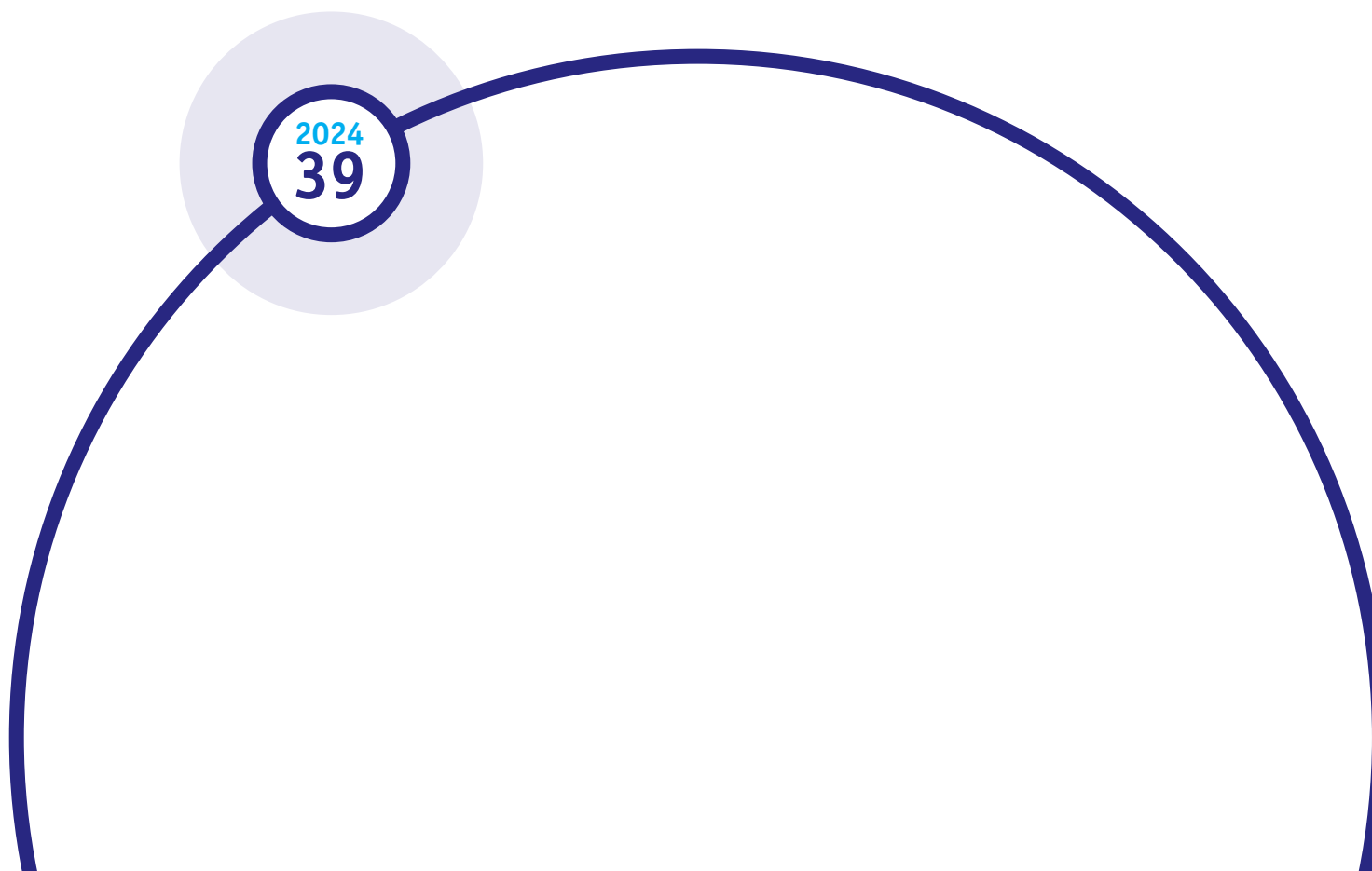
Vergelijking defosfateringstechnieken voor oppervlaktewater

2024
39



BETER DEFOSFATEREN

Vergelijking defosfateringstechnieken voor oppervlaktewater



COLOFON

STOWA-nummer	2024-39
ISBN	978.94.6479.068.9
Download	Dit rapport is als pdf beschikbaar onder publicaties op www.stowa.nl
Publicatie	STOWA Postbus 2180 3800 CD Amersfoort September 2024 © STOWA
Auteur(s)	Marc Nijboer, Niels Nijborg & Arjon Buijert (Arcadis)
Design	Shapeshifter.nl Utrecht
Begeleidingscommissie	Fulco Hillegers (Provincie Overijssel) Stefan Jansen (Deltares) Annet Oling (Provincie Overijssel) Bart Schaub (Hoogheemraadschap van Rijnland) Laura Seelen (Waterschap Brabantse Delta) Jasper Stroom (Waternet) Arjan Verhoeff (Waterschap Drents Overijsselse Delta) Jan-Willem Voort (Waternet) Steven Westerman (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier) Tessa van der Wijngaart (STOWA)

Copyright

De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

Disclaimer

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

➤ INHOUDSOPGAVE

Colofon	3
Ten Geleide	6
Samenvatting	8
HOOFDSTUK 1	INLEIDING
1.1	Aanleiding
1.2	Doel
1.3	Randvoorwaarden en streefwaarden
1.4	Vormen van fosfor
1.5	Zuiveringsprincipes
HOOFDSTUK 2	OVERZICHT DEFOSFATERINGSTECHNIEKEN
2.1	Breed overzicht technieken
2.2	Criteria
HOOFDSTUK 3	ANALYSE DEFOSFATERINGSINSTALLATIES
3.1	Helofytenfilters
3.2	Coagulatie (dosering metaalzouten)
3.3	IJzerzandfilters
3.4	Cascades met biologische componenten (Biocascade)
3.5	Adsorptie met een reactor (BioPhree)
3.6	Waterwasser
3.7	Bioreactor (Nutreact)
3.8	Bezinken en industriële filters
3.9	Alternatieve adsorptie- en filtermaterialen

HOOFDSTUK 4	VRAAG EN GRONDSTOFAANBOD	60
4.1	Vraag	61
4.1.1	Theoretische behoefte	61
4.1.2	Theoretische behoefte versus behoefte in praktijk	62
4.2	Aanbod	62
4.2.1	IJzerzand	63
4.2.2	IJzerpellets	64
4.2.3	IJzerchloride	64
4.3	Vraag versus aanbod	64
HOOFDSTUK 5	SYNTHESE	66
5.1	Samenvatting kansrijke technieken	67
5.2	Defosfateringsinstallaties: een combinatie van zuiveringsprincipes	68
5.3	Voorbeelden per situatie	68
5.3.1	Fluctuerend debiet	69
5.3.2	Beperkte verwijderingsopgave	70
5.3.3	Lage effluentconcentratie	70
HOOFDSTUK 6	CONCLUSIE	72
HOOFDSTUK 7	OPENSTAANDE VRAGEN, AANBEVELINGEN EN VERVOLGONDERZOEK	75
HOOFDSTUK 8	REFERENTIES	77
BIJLAGE A	Gevonden zuiveringstechnieken	84
BIJLAGE B	Gerealiseerde DFI's in Nederland	89
BIJLAGE C	Behoeftte ijzerzand en ijzerchloride	92
BIJLAGE D	Indicatie prestaties, ruimtegebruik en kosten	94
STOWA in het kort		97

➤ TEN GELEIDE



TECHNIEKEN VOOR DEFOSFATERING VAN OPPERVLAKTEWATER: AFWEGINGEN EN KEUZES

Dit rapport biedt waterbeheerders een compleet overzicht van beschikbare defosfateringstechnieken en criteria waarmee zij een passende keuze kunnen maken voor hun specifieke oppervlaktewatersysteem.

Voor het behalen van natuur- en waterkwaliteitsdoelen is systeembegrip noodzakelijk. Voor veel Nederlandse oppervlaktewateren is een hoge toevoer van fosfor een belangrijk knelpunt. Hoewel bronmaatregelen de voorkeur hebben, is in sommige gevallen een “*end-of-pipe*” aanpak noodzakelijk om de gewenste waterkwaliteit te bereiken. Hier kan een defosfateringsinstallatie een doorslaggevende rol spelen.

Op basis van een uitgebreide literatuurstudie en praktijkdata uit een enquête onder waterbeheerders zijn verschillende defosfateringstechnieken beschreven en beoordeeld. Het doel van deze rapportage is niet alleen het bieden van een overzicht van de beschikbare technieken, maar ook om handvatten te geven bij de complexe afwegingen en keuzes die bij de selectie van een defosfateringsinstallatie komen kijken. Elk watersysteem en elke locatie heeft immers unieke kenmerken die de effectiviteit en toepasbaarheid van een techniek bepalen, zoals o.a. ruimtegebruik, duurzaamheid, beheervereisten en kosten. Door inzicht te bieden in de voordelen en beperkingen van verschillende technieken, hopen we waterbeheerders te ondersteunen bij het nemen van maatregelen voor het defosfateren van hun oppervlaktewatersystemen.

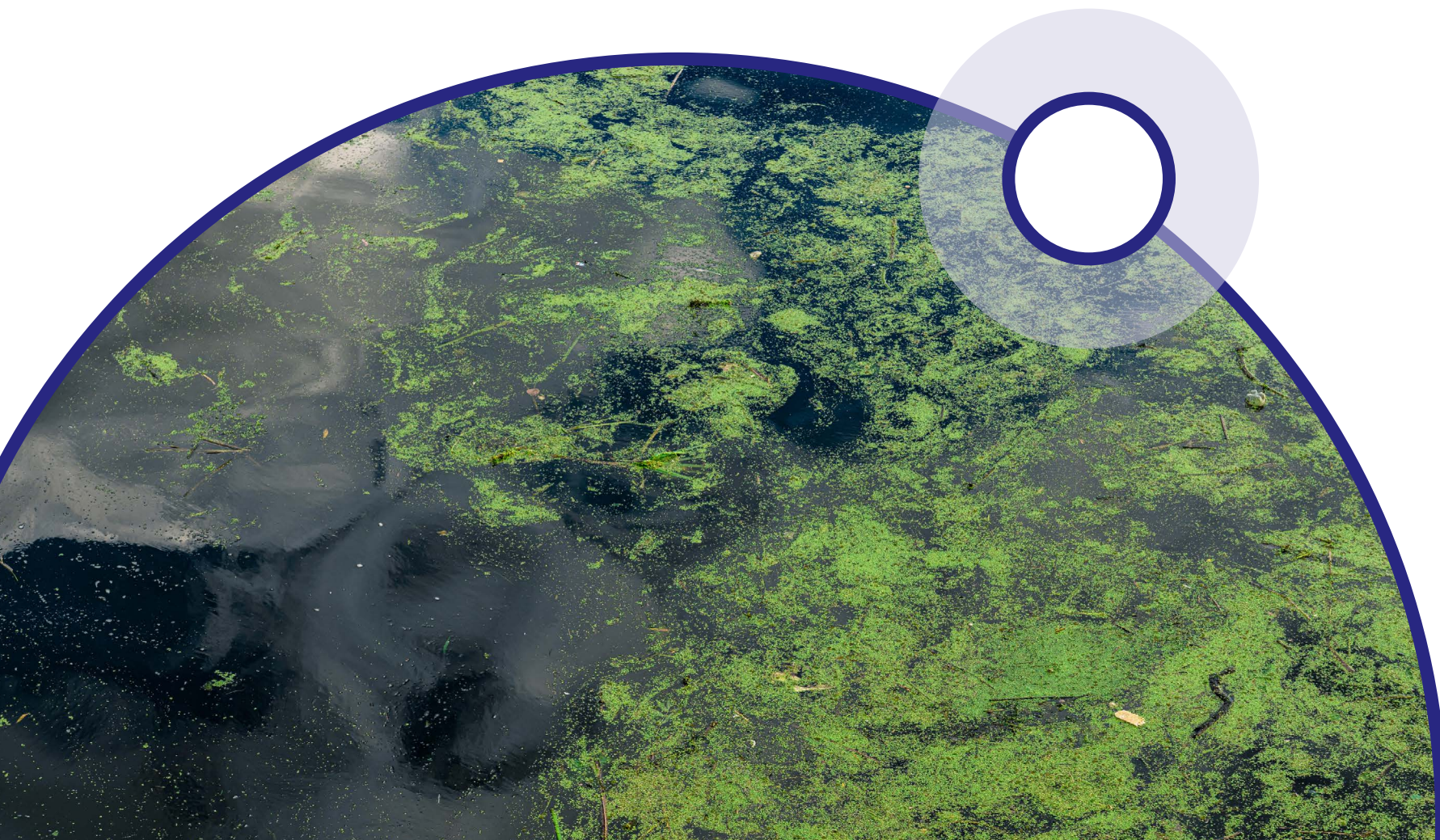
Het blijkt moeilijk om vooraf een haalbare fosforconcentratie in het effluent in te schatten. Dit komt o.a. door de locatiespecifieke omstandigheden en het beheer van de defosfateringsinstallaties, maar ook doordat sommige technieken niet op grote schaal zijn getest en omdat er beperkt data beschikbaar zijn. Gedegen monitoring en goede dataverzameling zijn cruciaal om het succes van een defosfateringsinstallatie vooraf te kunnen bepalen. Precieze metingen voorafgaand aan de implementatie en gedurende de operationele fase bieden de mogelijkheid om de techniek te optimaliseren en eventueel aan te passen aan de omstandigheden.

Het rapport benadrukt dat iedere defosfateringsinstallatie uit meerdere zuiveringsstappen bestaat. Bezinking en/of voorfiltratie is essentieel bij bijna alle technieken, waarna adsorptie of coagulatie noodzakelijk zijn voor verdere fosforverwijdering. Een belangrijke bevinding is ook dat, uit een vergelijking van vraag en aanbod van grondstoffen, de volledige defosfateringsbehoefte niet kan worden voorzien met bijvoorbeeld ijzerzand. Het wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar regeneratie en alternatieve adsorptiematerialen, daarvoor worden ook al stappen gezet. Meer praktijkonderzoek naar opkomende technieken is ook gewenst, mede omdat deze op lab- en proefschaal lage effluentconcentraties laten zien.

Het onderzoek is uitgevoerd met financiering van de STOWA, het Hoogheemraadschap van Rijnland, Waternet, het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Drents Overijsselse Delta en de Provincie Overijssel.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

➡ SAMENVATTING



Om natuur- en waterkwaliteitsdoelen te behalen, moeten er extra maatregelen worden genomen. Deze maatregelen variëren van bronaanpak tot integrale herstelmaatregelen. In sommige situaties zijn de waterkwaliteitsdoelen alleen te behalen door het oppervlaktewater te defosfateren. Meerdere waterbeheerders hebben in de afgelopen jaren met wisselend succes fosfor verwijderd uit oppervlaktewaterstromen. Om waterbeheerders overzicht te geven, is een literatuur- en dataonderzoek uitgevoerd naar verschillende defosfateringstechnieken voor oppervlaktewater. Allereerst is hierbij breed gekeken naar technieken in binnen- en buitenland. Het gaat hierbij nadrukkelijk om technieken die fosfor verwijderen. Technieken die gericht zijn op effectbestrijding van te veel fosfor in oppervlaktewater (bv. algenoverlast) zijn wel benoemd in het overzicht met technieken, maar zijn niet verder uitgewerkt. De kansrijke technieken voor het defosfateren van oppervlaktewater zijn op basis van negen criteria uitgewerkt.

Het doel van dit onderzoek is het geven van een overzicht van beschikbare defosfateringstechnieken en kennisleemtes. Hiermee worden handvatten gegeven om tot een afweging van een defosfateringstechniek te komen. Waterbeheerders kunnen zo een onderbouwde keuze maken voor een bepaalde techniek, afhankelijk van het desbetreffende watersysteem en een set aan criteria (o.a. gewenste P-concentraties, samenstelling P-fracties, ruimtebeslag, kosten, duurzaamheid, beheer etc.).

In de praktijk bestaan defosfateringsinstallaties uit meerdere zuiveringsstappen en is het belangrijk om onderscheid te maken in de bijdrage van de verschillende zuiveringstappen. Bezinking en/of voorfiltratie is bijvoorbeeld essentieel bij bijna alle technieken. Bij veel technieken voorkomt dit verstoppingen en kan een deel van het particulaire fosfor worden afgevangen. Dit resulteert al in een deel van het rendement. Het overige fosfor moet echter verwijderd worden met behulp van adsorptie of

coagulatie. Alleen deze combinatie in stappen resulteert in zeer lage fosforconcentraties ($<0,05$ mg P/l). Het ruimtegebruik van de technieken verschilt sterk. Wanneer een beperkt oppervlak beschikbaar is (en als randvoorwaarde dient), zijn de reactortechnieken (i.e., BioPhree, Nutreact en Waterwasser), coagulatie met industriële filters en upflow ijzerzand waarschijnlijk de meest geschikte technieken. Bij meer ruimte komen coagulatie met bezinking, downflow ijzerzandfilters, helofytenfilters en cascades met biologische componenten ook in beeld. Downflow ijzerzand, helofytenfilters en cascades met biologische componenten kunnen gecombineerd worden met meervoudig ruimtegebruik voor bijvoorbeeld natuur, recreatie of agrarische doeleinden. Daarnaast verschillen de technieken ook in duurzaamheid. Installaties met meer technische componenten zoals de reactortechnieken, coagulatie en industriële filters gebruiken meer energie, metalen en chemische stoffen. Hierdoor zijn meer natuurlijke technieken met relatief weinig onderhoud, zoals de cascade met biologische componenten of downflow ijzerzandfilters wat duurzamer. Qua kosten (investering en operationele kosten) en risico's zijn er eveneens grote verschillen in de technieken. Een keuze voor een techniek dient daarom op verschillende aspecten te worden beoordeeld.



Uit de studie blijkt dat er vaak beperkte data beschikbaar is van het influent en ontbreekt het aan een goede monitoring van de installatie en het oppervlaktewater. Dit zorgt er in de huidige analyse voor dat het moeilijk is om een haalbaar effluent per techniek in te schatten. Daarnaast zijn sommige installaties nog niet op grote schaal getest. Enkel helofytenfilters, toepassingen met ijzerzand en installaties voor ijzerchloridedosering met bezinking zijn op grote schaal toegepast. Hierbij worden de laagste effluentconcentraties gehaald met ijzerzand. Om desinvesteringen te voorkomen, is het van belang om vooraf onderzoek te doen naar de voorkomende fosforfracties en andere stoffen in het influent. Humuszuren zorgen bijvoorbeeld voor een verslechterde vlokvorming, waardoor coagulatie slechter presteert. Een

hoge hoeveelheid sulfaten vermindert daarentegen de fosforbindingscapaciteit van adsorptietechnieken. Ook na het aanleggen van een defosfateringsinstallatie is het verstandig om de monitoring te blijven uitvoeren om het functioneren van de installatie te borgen, aan te passen of te beheren. De samenstelling van het influent, de debieten en de wisselende omstandigheden in oppervlaktewater maken het namelijk moeilijk om continue lage effluentconcentraties te halen ($<0,05$ mg P/l). In praktijk variëren de effluentconcentraties bij ijzerzand tussen de 0,02 en 0,12 mg P/l en bij coagulatie tussen de 0,03 en 0,25 mg P/l. Monitoring kan helpen om contacttijden van adsorbens te verlengen of doseringen van coagulatie te optimaliseren om zo tot gewenste concentraties te komen.

De verwachting is dat er meer vraag gaat ontstaan naar het defosfateren van oppervlaktewater in verband met de KRW- en N2000-doelen. Uit de vergelijking van vraag en aanbod van grondstoffen voor defosfatering blijkt dat er niet altijd voldoende grondstoffen beschikbaar zijn om de volledige defosfateringsbehoefte met bijvoorbeeld ijzerzand te realiseren. Het is daarom zinvol om nader onderzoek te doen naar regeneratie en alternatieve adsorptiematerialen, bijvoorbeeld naar de ijzerpellets die op dit moment in ontwikkeling zijn. Daarnaast is de aanbeveling om de adsorptieprocessen te optimaliseren en om meer praktijkonderzoek te doen. Voor het aanbod van ijzerchloride worden geen knelpunten verwacht.



➤ HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1

1.1 AANLEIDING

Waterbeheerders moeten extra maatregelen uitvoeren om de (N2000- en KRW-) waterkwaliteitsdoelen te bereiken. Dat vraagt om een mix van maatregelen, variërend van bronaanpak tot integrale systeemherstelmaatregelen. Een bronaanpak is de meest duurzame oplossing, maar dit is (op de korte termijn) lang niet overal haalbaar. Daarnaast is het nemen van bronmaatregelen alleen meestal ook niet voldoende, aangezien er rekening moet worden gehouden met de erfenis uit het verleden, zoals (water)bodems die fosfor naleveren als gevolg van gebruik in het verleden. Om de waterkwaliteitsdoelen te bereiken, is er daarom een toenemende behoefte om oppervlaktewater te defosfateren. Daarvoor is het essentieel om te weten hoe dit het beste gedaan kan worden.

Om waterbeheerders overzicht te bieden, is een literatuur- en dataonderzoek naar verschillende defosfaterings-technieken van oppervlaktewater uitgevoerd. Allereerst is hierbij breed gekeken naar technieken in binnen- en buitenland. Een aantal van deze nieuwe technieken presteren nu al goed genoeg en zijn op praktijkschaal uitgetest, andere technieken zijn pril en in ontwikkeling. De vraag is welke technieken geschikt zijn om toe te passen, wat er geoptimaliseerd kan worden en hoe een installatie in de praktijk uit te voeren. Er is kennis en ervaring, maar het ontbreekt aan een duidelijk overzicht. Deze rapportage helpt waterbeheerders om op basis van verschillende criteria potentieel geschikte technieken te onderscheiden die van toepassing zijn op hun situatie.

1.2 DOEL

Het doel van het project is om een overzicht te geven van de huidige stand van zaken van de defosfateringstechnieken en kennisleemtes. Hiermee worden handvatten gegeven om tot een keuze van een geschikte techniek voor defosfatering te komen. Waterbeheerders kunnen zo een onderbouwde keuze maken voor een bepaalde techniek, afhankelijk van het desbetreffende watersysteem en een set aan criteria (o.a. gewenste P-concentraties, samenstelling P-fracties, ruimtebeslag, kosten, duurzaamheid, beheer etc.).

1.3 RANDVOORWAARDEN EN STREEFWAARDEN

Als kader zijn er een aantal randvoorwaarden opgenomen. De randvoorwaarden zijn bedoeld om focus te houden op de doelen van het project, maar ook om te voorkomen dat er oneindig gevarieerd kan worden. De randvoorwaarden zijn als bandbreedte geformuleerd, zodat deze representatief zijn in veel voorkomende situaties in Nederlandse watersystemen:

- Het gaat primair om het defosfateren van oppervlaktewater. Defosfateren van afvalwater valt buiten de scope van dit rapport (zoals effluent van rioolwaterzuiveringen en grijs/zwart huishoudelijk afvalwater).
- Het gaat primair om verwijdering van totaal fosfor (P_{tot}) en opgelost orthofosfaat (PO_4).
- Het gaat om het defosfateren van relatief grote volumestromen, met een debiet van 3,5 - 35 m³/min.
- Het gaat om het zuiveren van de aan- of afvoer van een watersysteem op een 'puntlocatie'. Hierdoor wordt er niet gekeken naar defosfatering in meren/ plassen of het reduceren van diffuse bronnen.

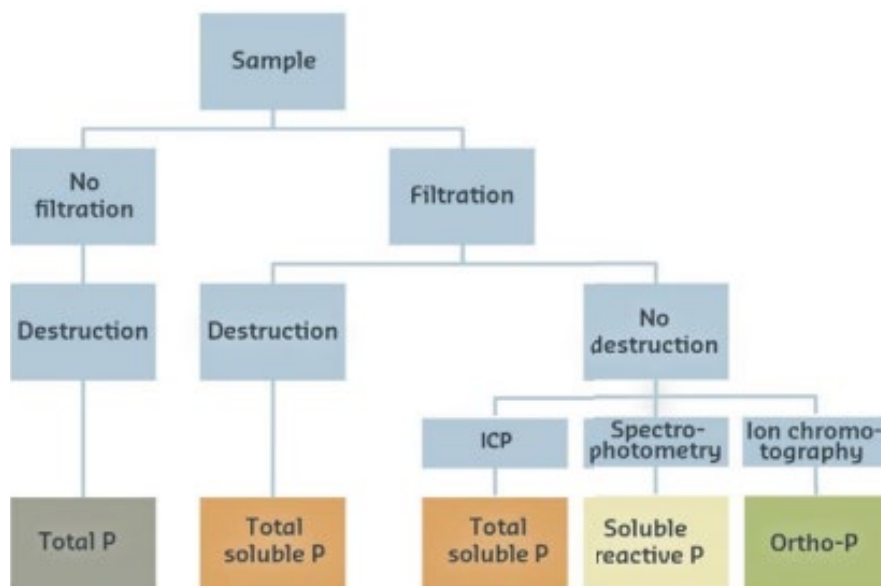
De effectiviteit van een defosfateringstechniek is sterk afhankelijk van de chemische samenstelling van het water en het beheer van de installatie. Ook kan het gewenste zuiveringsrendement per locatie sterk verschillen. Er is daarom geen harde randvoorwaarde voor het zuiveringsrendement of de concentratie van het influent en effluent. Er zijn wel streefwaarden afgesproken om richting te geven bij het selecteren en beoordelen van de technieken:

- concentraties van het influent in de range van 0,07 - 1,2 mg/l P_{tot} ,
- concentraties van het effluent in de range van 0,04 - 0,10 mg/l P_{tot} .

Verder gaat het nadrukkelijk om technieken die P verwijderen. Technieken die gericht zijn op effectbestrijding van te veel P in het oppervlaktewater (bv. algenoverlast) worden wel benoemd in het overzicht met technieken, maar zijn niet verder uitgewerkt.

FIGUUR 1

Verschijningsvormen voor fosfor gebaseerd op filtratie, digestie en analytische methode (van der Grift, 2017)



	DOP	DIP	COP	CIP	POP	PIP
Total P						
Total soluble P						
Soluble reactive P						
Orthophosphate						

DOP: dissolved organic phosphorus, DIP: dissolved inorganic phosphorus (ortho-phosphate), COP: colloidal organic phosphorus, CIP: colloidal inorganic phosphorus, POP: particulate organic phosphorus, PIP: particulate inorganic phosphorus

1.4 VORMEN VAN FOSFOR

Fosfor kan in het water voorkomen in verschillende gebonden vormen of in opgeloste vorm. De verschillende zuiveringsprincipes verwijderen niet iedere verschijningsvorm even goed. Daarnaast zijn de verschillende verschijningsvormen niet even goed beschikbaar voor planten, waardoor bijvoorbeeld (ecologische) effecten die erdoor ontstaan verschillend zijn. Wel kan het fosfor overgaan in een andere vorm. Daarom wordt in de KRW-normen uitgegaan van totaal fosfor en wordt in dit onderzoek ook niet exclusief gekeken naar één verschijningsvorm. Voor het selecteren van de juiste defosfateringstechniek is het echter wel goed om dit onderscheid te kennen. Globaal kan het volgende onderscheid in verschijningsvormen worden aangehouden (Figuur 1):

1. Particulair fosfor:
 - a. organisch gebonden (algen en organische resten);
 - b. mineraal gebonden (aan klei- of metaaldeeltjes).
2. Colloïdaal fosfor (kleiner dan 1 µm):
 - c. reactief (PO_4 gebonden aan metaal-oxyhydroxides → CIP, colloidal inorganic phosphate);
 - d. niet reactief (ortho-fosfaat gebonden aan organische deeltjes → COP, colloidal organic phosphate).
3. Opgelost fosfor:
 - e. reactief (PO_4 , → DIP, dissolved inorganic phosphate);
 - f. niet reactief (humuszuren → DOP, dissolved organic phosphate).

Ook fosfor dat opgenomen is door algen wordt gezien als particulier fosfor en is daardoor ook onderdeel van totaal fosfor (P_{tot}). Over het algemeen rapporteren Nederlandse laboratoria de totaal-P en ortho-P fracties. Totaal-P is dus alle fracties opgeteld en ortho-P is hetzelfde als DIP / PO_4 .

Fosfor kan overgaan van verschijningsvorm. Zo kan organisch gebonden fosfor beschikbaar komen door afbraak en is er in water een evenwicht tussen PO_4 en mineraal gebonden fosfor. Hierdoor komt er na verloop van tijd weer PO_4

beschikbaar wanneer alleen PO_4 uit het water verwijderd wordt. Daarom wordt bij defosfateringstechnieken vaak ingezet op het verwijderen van meerdere verschijningsvormen om zo eutrofiëring te voorkomen.

1.5 ZUIVERINGSPRINCIPES

Defosfateringstechnieken zijn gebaseerd op een bepaalde set zuiveringsprincipes. De definities van deze zuiveringsprincipes zijn belangrijk voor de nadere analyse en vergelijking van de defosfateringstechnieken. De twee dominante zuiveringsprocessen voor verwijdering van fosfor uit oppervlaktewater zijn: (1) adsorptie, complexering en precipitatiereacties met mineralen in het sediment en (2) opname uit het water door algen en micro-organismen en opname uit sediment door planten. Verder toonde een globaal vooronderzoek aan dat naast adsorptie, precipitatie en biologische verwijdering ook filtratie en bezinking worden toegepast bij defosfateringstechnieken. Dit leidt tot vijf algemene zuiveringsprincipes:

1. Adsorptie
2. Precipitatie en coagulatie
3. Biologie
4. Filtratie
5. Bezinking

De meeste defosfateringstechnieken combineren deze principes, waarbij één principe vaak centraal staat.

- ➔ **Adsorptie** is het proces waarbij PO_4 geadsorbeerd wordt door mineralen. Voorbeelden zijn ijzer- en aluminiumoxide, kleideeltjes of schelpenresten. Het toevoegen van adsorptiemateriaal aan het water zorgt ervoor dat (in hoge mate) PO_4 en (in mindere mate) DOP worden vastgelegd. Hierdoor is minder fosfor beschikbaar voor planten en algen. Het gebruikte adsorptiemateriaal blijft hierbij een niet opgeloste vaste stof.
- ➔ **Precipitatie en coagulatie** is het proces waarbij PO_4 reageert met een metaalion, waarna het grotere vlokken vormt die bezinken. Deze metaalionen worden toegevoegd door metaalzouten te doseren in het water. Voorbeelden hiervan zijn het toevoegen van ijzerchloride, aluminiumchloride of kalk. De opgeloste metaalionen reageren vervolgens met de PO_4 , waarbij ze een vaste stof vormen. Hierbij ontstaat dus particulier fosfor. Vervolgens vormen de geprecipiteerde fosfaat-zouten vlokken (coagulatie) die sedimenteren. Hiermee verlaat het particuliere fosfor het oppervlaktewatersysteem en komt het in de waterbodem terecht.
- ➔ **Biologisch defosfateren** is het proces waarbij planten of algen reactief fosfor (DIP en CIP) uit het water opnemen om te groeien. Daarnaast kunnen planten ook particulier fosfor filteren met behulp van biofilms rondom hun stengels. Bodemmicroben zetten vervolgens dit particuliere fosfor om in reactief fosfor. Deze planten en algen assimileren het reactieve fosfor in hun cellen. Door planten te maaien of algen te bezinken/filteren kan het fosfor definitief uit het watersysteem verwijderd worden.
- ➔ **Filteren** is het proces waarbij particulier fosfor uit het water wordt verwijderd. Doordat het fosfor gebonden is aan deeltjes van een bepaalde grootte, kunnen deze deeltjes met het fosfor verwijderd worden door het water via een medium te laten lopen die deze deeltjes tegenhoudt. Voorbeelden hiervan zijn zandfilters, doekenfilters, schijf- of ringenfilters

en membraanfilters. Filters moeten wel regelmatig schoongemaakt of teruggespoeld worden zodat ze niet verstopt raken met een ophoping van al deze deeltjes. Dit gebeurt bijna altijd automatisch. Hoe fijner de filters zijn, des te meer deeltjes worden tegengehouden. Wel is er bij fijnere filters meer energie nodig om water door het filter te persen en moet het filter vaker schoongemaakt worden.

- **Bezinken** is het proces waarbij deeltjes met particulier fosfor uitzakken naar de bodem van een watergang, bak of versneld in een lamellenfilter. Hiervoor moet het water lang genoeg in het filter aanwezig zijn en mag er geen turbulentie zijn. Vervolgens kan het particuliere fosfor verwijderd worden uit het water door middel van baggeren. Het kan ook begraven worden onder ander sediment. Bezonken particulier fosfor kan wel weer opwervelen of mobiel worden (afbraak organisch materiaal of oplossen reduceren van ijzeroxide), waardoor het weer beschikbaar komt in de waterkolom.

De bovengenoemde zuiveringsprincipes worden vaak gecombineerd in defosfateringsinstallaties (DFI's) om zo een optimaal rendement te behalen. Zo bezinken in de bezinkvoorziening van een DFI met ijzerchloride niet alleen de gecoaguleerde deeltjes, maar ook een deel van het particulier fosfor. Een ander voorbeeld is het voorfilter van een DFI met ijzerzand. Dit filter is primair bedoeld om verstopping te voorkomen, maar verwijdert hierdoor ook particulier fosfor. Verder worden biologische opname en adsorptie soms gecombineerd om extra fosfor te verwijderen en te zorgen dat P_{tot} ook in de winter (wanneer planten/algen nauwelijks groeien) wordt verwijderd. In een DFI wordt dus gezocht naar een set van verschillende zuiveringsprincipes in combinatie met verwijdering waarmee optimaal fosfor uit het watersysteem wordt verwijderd.

⇒ HOOFDSTUK 2

OVERZICHT DEFOSFATERINGSTECHNIEKEN



2

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de defosfateringstechnieken. In eerste instantie is een breed overzicht gemaakt. Dit overzicht is opgenomen in Bijlage A. Deze technieken zijn gegroepeerd op basis van het belangrijkste principe of de meest kenmerkende factor van een techniek. Vervolgens zijn kansrijke technieken geselecteerd die voldoen aan de randvoorwaarden zoals genoemd in hoofdstuk 1. Daarnaast zijn de criteria waarop de kansrijke technieken beoordeeld worden, toegelicht. Een defosfateringstechniek kan hierbij ook bestaan uit een combinatie van verschillende zuiverings- en verwijderingsprincipes. In Bijlage B is een overzicht opgenomen van bestaande defosfateringsinstallaties en locaties die in de praktijk al worden toegepast.

2.1 BREED OVERZICHT TECHNIEKEN

Tabel 1 geeft een overzicht van de technieken met de bijbehorende zuiveringsprincipes en of ze wel of niet worden meegenomen in de verdere analyse.

A	Adsorptie
P&C	Precipitatie en Coagulatie
Bio	Biologie
F	Filtratie
B	Bezinken

De kruisjes tussen haakjes geven principes aan die soms worden gecombineerd met de techniek. De cijfers in 'Nader te beschouwen' zijn gecorreleerd aan de cijfers van de uitleg. Vrijwel alle technieken maken gebruik van meerdere zuiveringsprincipes, in stappen achter elkaar of tegelijkertijd.

TABEL 1

Technieken	Zuiveringsprincipes			Nader te beschouwen in rapportage		
	A	P&C	Bio	F	B	
IJzerzand(/pellets)filter	X		(x)	X	(x)	Ja ¹
Biocharfilter	X					Beperkt ²
Magnetisch defosfateren	X					Beperkt ²
Lanthaan (Phoslock/Phosflow)	X					Beperkt ³
Overige adsorptiefilters	X					Beperkt ²
HAIX (BioPhree) reactor	X			(x)		Ja ⁴
Bioreactor (Nutreact)			X	(x)		Ja ⁴
NaFRAd reactor	X			(x)		Nee ⁵
Helofytenfilter	(x)		X	(x)		Ja ⁶
Biocascade	X		X	X		Ja ⁷
Waterharmonica	X		X	X		Ja ⁷
Algen + mosselen			X			Nee ⁸
Aquafarm			X			Nee ⁸
Microalgen met bacteriën			X			Nee ⁸
Wilgenfilter	X		X			Nee ⁹
Elektrocoagulatie		X			X	Nee ¹⁰
Waterwaster		X			X	Ja ¹¹
Dosering ijzer/aluminium/calcium		X		(x)	X	Ja ¹²
Bezinkvoorziening					X	Ja ¹³
Mechanische filtratie				X		Ja ¹³
Ultrafijne luchtbellen (WaterQi)				X		Nee ¹⁴
Ultrasonisch trillingen (bijvoorbeeld LGsonic)						Nee ¹⁵
Uvox/Peroxide						Nee ¹⁵
SusPhos						Nee ¹⁵

Toelichting tabel op de volgende pagina ➔

TABEL 1 TOELICHTING

1. Onder de adsorptietechnieken is bekend dat ijzerzandfilters al vaker zijn toegepast in Nederland en daarbuiten. Daarom wordt deze techniek, zowel upflow als downflow ijzerzandfilters verder beschouwd in de analyse.
2. Deze technieken binnen de adsorptiegroep zijn voornamelijk nog op lab- en proefschaal (Mendes, Pugliese, Canga, Wu, & Heckrath, 2022; Zahed, et al., 2022). Hierdoor is de informatie over het gebruik van deze technieken bij oppervlaktewater beperkt inzichtelijk. De keuze is gemaakt om deze technieken kort te beschrijven in het hoofdstuk over ijzerzandfilters.
3. Hoewel lanthanum (i.e., PhosLock) al vaker is toegepast in meren/plassen is het nog niet uitgebreid ingezet rondom puntbronnen met een aan- of afvoer (Spears, et al., 2013). Het product voor deze puntbronnen PhosFlow is pas net op de markt en nauwelijks toegepast (PET, 2023). Lanthanum is beschreven in paragraaf 3.9 over alternatieve adsorptiematerialen.
4. Zowel een Nederlandse vorm van de HAIX genaamd BioPhree en de bioreactor Nutreact zijn uitgebreid behandeld in een eerder STOWA-onderzoek over TEO-installaties met fosforverwijdering (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Hierdoor bevat het waardevolle informatie over beschikbare producten in Nederland en is het meegenomen in de verdere analyse.
5. De NaFRad-installatie is enkel toegepast tijdens de George Barley Prize (Naja & van Lent, 2020). Hierna is de techniek omgedoopt tot BioPhree (Korving, e-mail, 8 april 2024).
6. Er is gekozen om in de analyse helofytenfilters mee te nemen, aangezien hiervan al meerdere installaties in Nederland zijn en er relatief veel onderzoek naar is gedaan (Duel & te Broekhorst, 1990; Land, et al., 2016; Lorenz, 2001). De twee dominante zuiveringsprocessen in helofytenfilters voor verwijdering van fosfor uit oppervlaktewater zijn: (1) adsorptie, complexering en precipitatiereacties met mineralen in het sediment en (2) opname uit het water door algen en micro-organismen en opname uit sediment door planten. In deze rapportage wordt gekeken naar een helofytenfilter zonder een adsorberend filtermateriaal.
7. De biocascade en waterharmonica's worden ook meegenomen in de verdere analyse. Deze installaties zijn namelijk in een grotere praktijkproef gebruikt binnen Nederland en worden gezien als veelbelovende defosfateringsinstallatie (Kwakernaak, Jansen, van Kempen, Smolders, & van Rheenen, 2015; van den Boomen & Kampf, 2013).
8. De andere installaties binnen de biologiegroep zijn niet of nauwelijks toegepast binnen de randvoorwaarden van dit onderzoek en worden daarom ook niet verder meegenomen (AquaFarm, 2024; Dorenbosch, van Gogh, & Lengkeek, 2018; Liu, et al., 2017).
9. Meetgegevens van een wilgenfilter bij het Reitdiep (Groningen) laten veelbelovende resultaten zien. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat andere wilgenfilters beduidend minder goed presteren (Stichting RIONED, 2024). Het wilgenfilter bij het Reitdiep is uniek ten opzichte van de andere filters door het gebruik van een adsorbens, in dit geval roodzand. Verder worden de filters allemaal gebruikt om grijs of zwart water te reinigen en is het wilgenfilter nog niet toegepast voor oppervlaktewater. Daarnaast is het filter bij Reitdiep ca. 7.000 m² groot met een grijswaterdebiet van ca. 30 m³/dag. Dit resulteert in een verblijftijd van circa 35 dagen, waardoor ook de invloed van neerslag op het filter niet verwaarloosd kan worden. Hierdoor voldoet het wilgenfilter niet aan de randvoorwaarden van deze rapportage en wordt daarom niet meegenomen in de verdere analyses.
10. Elektrocoagulatie wordt niet verder geanalyseerd, aangezien de techniek enkel nog op kleine schaal is getest (KWR, 2024).
11. De waterwasser is uitgebreid getest in de Langeraarse Plassen, waarbij wordt gekeken naar het opschalen van de techniek in andere gebieden binnen Nederland (Hoek & van den Bulk, 2021). Hierdoor is ervoor gekozen om de waterwasser mee te nemen in de verdere analyse.
12. Doseringsinstallaties worden al langere tijd gebruikt om Nederlandse oppervlaktewateren te defosfateren (Voort, Wind, & Baars, 2010). Deze techniek is dus al behoorlijk volwassen en vormt daarmee goed vergelijkingsmateriaal voor de nieuwere technieken. Daarom wordt ook deze techniek meegenomen in de verdere analyse.
13. Bezinkvoorzieningen en mechanische filters worden veel gebruikt binnen rioolwaterzuiveringen om zo o.a. de particuliere fosforvracht te verlagen. Daarom worden deze technieken meegenomen in de analyse ter vergelijking met de andere groepen.
14. De techniek ultrafijne luchtbubbels is niet hoofdzakelijk bedoeld voor fosforverwijdering en de verwijderde concentraties zijn ook (nu nog) nihil (Jansen & Lamers, 2023). Daarom wordt de techniek niet meegenomen in de verdere analyse.
15. Deze technieken verwijderen niet specifiek PO₄. Ultrasonische trillingen en UVox/Peroxide doden algen. Echter kunnen bij het doodgaan van algen juist nutriënten vrijkomen, waardoor ze eerder PO₄ toevoegen aan het water. Dus wordt de techniek niet meegenomen in de verdere analyse.

2.2 CRITERIA

De verschillende typen defosfateringsinstallaties zijn met elkaar vergeleken op basis van negen criteria. Hiervoor zijn criteria gekozen die bepalend kunnen zijn bij het kiezen van een specifieke techniek. Deze criteria zijn:

1. Ruimtegebruik
2. Beheeraspecten
3. Risico's
4. Prestaties
5. Volwassenheid
6. Toekomstbestendigheid
7. Koppelkansen
8. Duurzaamheid
9. Kosten

Bij de beoordeling van de criteria is uitgegaan van een (constant) debiet van 10 m³ per minuut. Dit debiet is in vergelijking met veelgebruikte (decentrale) zuiveringen relatief hoog. Verder wordt ervan uitgegaan dat kosten en grondgebruik redelijk lineair met het debiet schalen. Bij een fluctuerend debiet moet het water gebufferd worden, wordt een deel van het water tijdelijk niet gezuiverd of moet de installatie gedimensioneerd zijn op de hoogste debietpieken.

- ➔ **Ruimtegebruik:** Ruimtegebruik houdt in hoeveel vierkante meter oppervlak nodig is om een zuiveringsinstallatie te realiseren. Hierbij is gebruik gemaakt van kenmerken van bestaande zuiveringen en vuistregels voor het ontwerp.
- ➔ **Beheeraspecten:** Bij de beheeraspecten wordt er gekeken naar hoeveel onderhoud de zuiveringsinstallatie na realisatie nodig heeft. Het kan hierbij bijvoorbeeld gaan om baggeren, oogsten, filters vervangen/doorspoelen, onderhoud installatie etc. Bij elke installatie wordt aangegeven aan welke beheeraspecten moeten worden gedacht.

Verder wordt gekeken hoe vaak bepaalde vormen van beheer moeten worden uitgevoerd. Dit geeft een beeld van hoe beheerintensief een zuiveringsinstallatie is. Dit kan ook eisen stellen aan de bereikbaarheid van de installatie.

- ➔ **Risico's:** Het criterium risico's geeft aan met welke risico's rekening moet worden gehouden bij een bepaalde zuiveringsinstallatie. Hierbij kan gedacht worden aan het uitspoelen van risicovolle stoffen, het aantrekken van ongewenste insecten en dieren of het weg-/uitvallen van essentiële factoren. Daarnaast worden marktrisico's ook benoemd. Denk hierbij aan grondstofaanbod en marktcapaciteit (i.e. aanbod van leverende bedrijven). De robuustheid van een installatie (risico op verminderde effectiviteit) wordt behandeld bij beheeraspecten, prestaties en volwassenheid.
- ➔ **Prestaties:** De prestaties zijn vergeleken op basis van een aantal factoren. In de eerste plaats is een globale bandbreedte gegeven van de te behalen effluentconcentraties en het zuiveringsrendement of verwijderingspercentage (zie tekstvak p.13). Dit is een relatief grote bandbreedte, omdat de prestaties van veel factoren afhankelijk zijn. Vervolgens worden de belangrijkste factoren benoemd, waarbij is aangegeven of deze installatie hier goed mee om kan gaan. De belangrijkste factoren zijn temperatuur (verschillend in zomer of winter), afvoerregime (constant of sterk variërend), influentconcentratie (hoog = 1,0 mg/l en laag 0,1 mg/l; stabiel of fluctuerend) en fosforvorm (particulair of opgelost). Dit geeft per zuiveringsinstallatie een beknopt overzicht van de verwachte prestatie.
- ➔ **Volwassenheid:** De volwassenheid van een zuiveringsinstallatie geeft weer in hoeverre de installatie direct kan worden toegepast. Dit houdt in dat er genoeg ervaring met de installatie is om het in de praktijk toe te passen (zonder aanvullende ontwikkelkosten of risico's). Een minder volwassen installatie is bijvoorbeeld een installatie die nog maar enkele keren is

toegepast, daardoor intensievere monitoring nodig heeft en nog verder geoptimaliseerd kan/moet worden. Het toepassen van minder volwassen technieken kan hierdoor onverwachte problemen en kosten veroorzaken.

- ➔ **Toekomstbestendigheid:** Het criterium toekomstbestendigheid geeft inzicht in de flexibiliteit van een installatie, in combinatie met verwachte ontwikkelingen en optimalisaties. Een toekomstbestendige installatie kan gebruik maken van deze ontwikkelingen en hierdoor beter zuiveren of efficiënter worden. Dit is inclusief het inspelen van de installatie op nieuwe marktontwikkelingen. Een filter gebaseerd op een toekomstbestendige installatie kan worden geoptimaliseerd wanneer de installatie is doorontwikkeld of verbeterde materialen op de markt komen. Verder kan worden gedacht aan de mogelijkheid tot terugwinning van fosfor of de omgang met extremere afvoerregimes in verband met klimaatverandering. Terugwinning is in de toekomst mogelijk belangrijk, wanneer traditionele fosforbronnen uitgeput raken (Scholz, Ulrich, Eilittä, & Roy, 2013).
- ➔ **Koppelkansen:** In het criterium koppelkansen worden de positieve eigenschappen van een installatie benoemd die niet direct iets te maken hebben met defosfateren. Hierbij kan gedacht worden aan een positieve invloed op recreatie en het versterken van de natuur in de omgeving. Daarnaast wordt er ook gekeken naar positieve effecten van de installatie op andere waterkwaliteitsfactoren, zoals stikstof en andere verontreinigingen.
- ➔ **Duurzaamheid:** Bij de uitwerking van dit criterium is gekeken naar (1) het materiaal- en grondstofgebruik, (2) energieverbruik en (3) aan- en afvoer van materiaal (bv. afvoer van reststromen).
- ➔ **Kosten:** Voor de kosten is onderscheid gemaakt tussen investeringskosten en operationele kosten (beheer en onderhoud) van de desbetreffende

technieken. Op basis van beschikbare ramingen en literatuur van gerealiseerde en ontworpen defosfateringsinstallaties zijn de hoeveelheden zo goed als mogelijk geschaald naar een capaciteit van 10 m³/min en geïndexeerd naar hetzelfde prijspeil. Hierbij is zoveel mogelijk uitgegaan van een vergelijkbare influent en effluentconcentratie. Dit is echter niet volledig mogelijk, omdat deze informatie vaak niet beschikbaar is en kosten niet eenvoudig geschaald kunnen worden wanneer de concentraties wel bekend zijn. Voor wat betreft de investeringskosten is alleen gekeken naar de bouwkosten. Er is geen rekening gehouden met engineeringskosten, vastgoedkosten en overige bijkomende kosten. Dat wil echter niet zeggen dat deze kostenposten klein of verwaarloosbaar zijn. Met name voor de technieken waarvoor een groot oppervlak nodig is, kan de aankoop van grond een significant deel uitmaken van de kosten. Anderzijds is het aannemelijk dat de engineerskosten voor relatief nieuwe technieken een groot deel kunnen uitmaken van de totale kosten. Ook is geen rekening gehouden met project- en/of locatiespecifieke omstandigheden of maatregelen. Het doel van dit criterium is om de technieken onderling met elkaar te kunnen vergelijken. De bedragen zijn indicatief en in sommige gevallen is het gebaseerd op bedrijfsvertrouwelijke informatie. Om deze reden is ervoor gekozen om de belangrijkste kostenposten te benoemen bij de uitwerking van de technieken en een tabel op te nemen in hoofdstuk 5 waar inzichtelijk wordt gemaakt hoe de kosten per techniek zich verhouden tot elkaar.

Na de behandeling van deze negen criteria volgt een algemeen oordeel omtrent de toepassing van een defosfateringsinstallatie in oppervlaktewater (conform randvoorwaarden, hoofdstuk 1.3). Hierin wordt een kort overzicht gegeven van de sterke en zwakke aspecten van een techniek. Verder is er aangegeven onder welke omstandigheden deze techniek kansrijk is. Het is hierbij ook mogelijk dat een techniek potentie heeft, maar eerst verder ontwikkeld moet worden.

Omgaan met rendementen, verwijderingspercentages en verblijftijd

In veel data, rapportages en wetenschappelijke artikelen wordt gesproken over rendementen of verwijderingspercentages om de prestatie van een defosfateringsinstallatie (DFI) aan te geven. Over het algemeen spreekt men dan over de fractie van het verwijderde fosfor t.o.v. het inkomende fosfor, conform:

$$\text{Rendement} = \frac{[\text{influent}] - [\text{effluent}]}{[\text{influent}]}$$

Het is belangrijk om te beseffen dat het rendement sterk afhankelijk is van de verblijftijd in de DFI, die gekoppeld is aan het volume van de DFI, het debiet en de porositeit:

$$\text{Verblijftijd} = \text{Volume DFI} \times \text{Porositeit} / \text{Debiet}.$$

Vaak worden rendementen per meting gemiddeld. Deze methode is echter niet volledig geschikt om verschillende DFI's objectief met elkaar te vergelijken. Het effect van de verblijftijd (en dus van de grootte) van de DFI op het verwijderingsrendement wordt met deze methode genegeerd, en het gebruik van verwijderingsrendementen op basis van concentraties in plaats van op vrachten leidt tot rekenfouten, zoals hieronder zal worden geïllustreerd.

De rendementen laten niet zien wat de gemeten concentratie van het influent is. Dit houdt in dat DFI's die dezelfde effluentconcentraties halen bij lagere influentconcentraties een slechter rendement behalen. Verder wegen negatieve rendementen zwaarder dan positieve rendementen. Oftewel, wanneer op meetmoment 1 een influent van 3 is gemeten en een effluent van 1, dan is het rendement 67%. Wanneer dan op meetmoment 2 een influent van 1 is gemeten en een effluent van 3, dan is het rendement -200%. Dit negatieve rendement passeert dan -100% terwijl het positieve rendement nooit de +100% kan overstijgen. Het gemiddelde rendement wordt -67% (negatief). Het werkelijke verwijderingsrendement over deze twee metingen is echter 0%. Er is evenveel fosfor in- als uitgegaan.

De rendementen genoemd in deze rapportage bevatten vaak deze beperkingen. In de praktijk worden daarom regelmatig alleen positieve rendementen meegenomen, maar dit is niet zichtbaar in de resultaten. In deze rapportage is daarom waar mogelijk benoemd onder wat voor omstandigheden (inclusief influent) het rendement is behaald. Wanneer dit niet bekend is, is dit ook vermeld in de tekst. De rendementen dienen dus niet op zichzelf beoordeeld te worden, maar in de context van de rest van de beoordeling.

⇒ HOOFDSTUK 3

ANALYSE DEFOSFATERINGSINSTALLATIES

3

3.1 HELOFYTENFILTERS

Helofytenfilters (ook wel zuiveringsmoerassen genoemd) zuiveren water met behulp van moerasachtige vegetatie. Helofytenfilters worden voornamelijk toegepast als decentrale zuivering, waarbij vooral organische stof en stikstof verwijderd worden. De organische stof bezinkt en wordt afgebroken. Stikstof kan denitrificeren in zuurstofloze zones in het filter. Fosfor wordt in een helofytenfilter in beperkte mate verwijderd door de planten zelf of wordt vastgelegd in de bodem (zie verwijderingspercentages in Tabel 2).

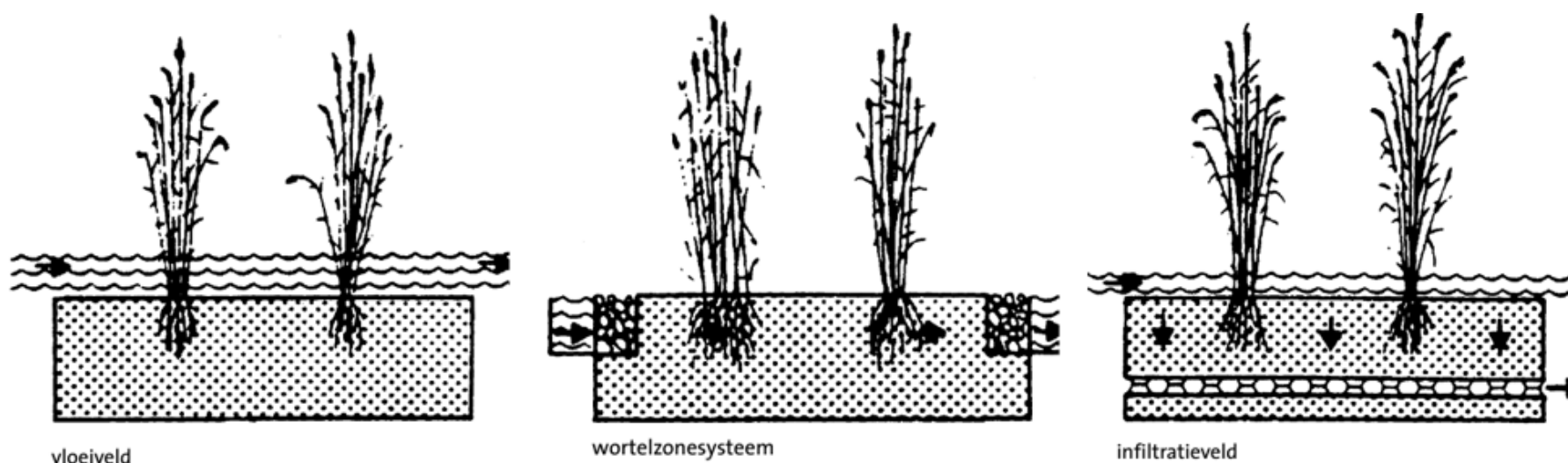
Bacteriën en schimmels in de bodem zetten particulier fosfor om in door planten opneembare reactieve fosfor. Deze reactieve fosfor slaan ze op in

hun plantenstelsel, waarna dit verwijderd kan worden van de locatie door de helofyten te oogsten. Er zijn vele varianten van een helofytenfilter (Fonder & Headley, 2010). In hoofdlijn zijn de helofytenfilters te onderscheiden in drie hydrologische varianten, simplistisch weergegeven in Figuur 2:

1. Vloevelden
2. Horizontaal doorstroomde helofytenfilters (ook wel wortelzonesysteem genoemd)
3. Verticaal doorstroomde helofytenfilters (ook wel infiltratiesysteem genoemd)

De doorstroming van de helofytenfilters beïnvloedt de zuiveringsprocessen.

FIGUUR 2 Wijze van doorstroming in de drie verschillende typen helofytenfilters (Rijs, 1994)



Bij vloeivelden stroomt het water horizontaal langs de bovengrondse plantdelen. Vloeivelden bestaan vaak uit een voorbezinkbassin gevolgd door enkele zuiveringssloten waarin helofyten zoals riet, lisdodde, mattenbies en/of ondergedoken waterplanten groeien. De waterdiepte is meestal 0,2-0,5 m en het te zuiveren water heeft in de sloten een lange verblijftijd van ongeveer tien dagen nodig. De processen die in een vloeiveld voor zuivering zorgen, zijn (Verhoeven & Meuleman, 1999):

- het bezinken van zwevend stof met daaraan gebonden verontreinigingen;
- diffusie van opgeloste stoffen naar de bodem;
- afbraak van organisch materiaal;
- opname van nutriënten door vegetatie en micro-organismen;
- bacteriële omzettingen;
- vastlegging in de bodem.

Deze vloeivelden verwijderen nutriënten via diffusie waardoor lange verblijftijden nodig zijn (Duel & te Broekhorst, 1990). Het blijkt dat met name PO_4 moeilijk te verwijderen is in een vloeiveld. Met de huidige randvoorwaarden is het nagenoeg onmogelijk om deze lange verblijftijden te realiseren en te komen tot de gewenste effluentconcentraties, waardoor vloeivelden niet verder worden meegenomen in deze rapportage.

Bij **horizontaal doorstroomde helofytenfilters** stroomt het water horizontaal door de bodem of het zandpakket langs de ondergrondse plantdelen. Het water wordt via drains weer afgevoerd. De processen die voor zuivering zorgen in een horizontaal doorstroomd helofytenfilter zijn dezelfde als bij het verticaal doorstroomd helofytenfilter. Een essentieel verschil is dat een horizontaal doorstroomd filter voornamelijk anaeroob is. Anaerobe afbraak kan leiden tot broeikasgasemissies en gaat langzamer dan aerobe afbraak.

Bij **verticaal doorstroomde helofytenfilters** stroomt het water verticaal door de bodem of het zandpakket en wordt het water afgevoerd via drains. De zwaartekracht zorgt voor het transport van water door het systeem. De

diepte van de bodemlaag varieert veelal van 0,6-1 meter. De processen die voor zuivering zorgen in een verticaal doorstroomd helofytenfilter zijn (Verhoeven & Meuleman, 1999):

- filtratie van zwevend stof met daaraan gebonden verontreinigingen;
- afbraak van organisch materiaal;
- opname van nutriënten door vegetatie en micro-organismen;
- bacteriële omzettingen;
- vastlegging in de bodem.

In een verticaal doorstroomd helofytenfilter spelen opname van nutriënten door de vegetatie, microbiële activiteit en vastlegging in de bodem een belangrijke rol in de zuivering. Dit proces wordt gestimuleerd door wisselende zuurstofcondities in de bodem door middel van het afwisselend droogvallen en onder water zetten van het filter ('fill and draw'). Een essentieel verschil met het horizontaal doorstroomd helofytenfilter is dat een verticaal doorstroomd helofytenfilter voornamelijk aeroob is.

Naast de vele hydrologische variaties is er ook veel variatie in vegetatie. In Nederland worden voornamelijk de plantensoorten riet, biezen, zegge en lisdodde gebruikt. Deze planten groeien namelijk snel en zijn goed bestand tegen afvalstoffen in het water. De meeste helofytenfilters uit de praktijk moeten goed tegen afvalstoffen kunnen, aangezien ze vooral gebruikt worden om huishoudelijk afvalwater te zuiveren. Ze worden minder vaak ingezet om oppervlaktewater te zuiveren.

Tenslotte worden in meerdere helofytenfilters ook adsorptietechnieken gebruikt. Dit is echter niet altijd duidelijk aangegeven in de literatuur en hier dient bij de interpretatie van meetgegevens en zuiveringsrendementen dan ook zorgvuldig naar gekeken te worden. Helofytenfilters zijn theoretisch vooral gebaseerd op de biologische fosforopname van de helofyten. Hierbij geschiedt verwijdering van P door maaien en afvoeren. Voor de beschrijving van helofytenfilters wordt er in dit rapport van uitgegaan dat

er geen adsorberende materialen worden toegepast als filtermateriaal in het helofytenfilter. Hiermee wordt een duidelijk onderscheid gemaakt in de biologische component van helofytenfilters en de adsorptietechnieken. Ook wordt er bij een 'gewoon' helofytenfilter vaak maar een beperkte hoeveelheid adsorberend materiaal toegepast, waardoor de bijdrage van het adsorptieproces na enkele jaren vaak sterk afneemt.

1. Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik van helofytenfilters verschilt tussen de hydrologische varianten. Verticale infiltratie is qua oppervlak het meest compact, maar heeft vaak wel een grotere diepte. Er moeten bij verticale infiltratie namelijk ook drainagebuizen worden aangelegd en meerdere lagen zand en grind. Er moet worden gedacht aan een diepte van minstens één meter (van den Bulk, *et al.*, 2022). Aangezien bestaande helofytenfilters voornamelijk zijn aangelegd voor huishoudelijk afvalwater, zijn deze ontworpen voor relatief kleine debieten en een korte verblijftijd (bijv. zes uur, Van den Bulk *et al.*, 2022).



Het ruimtegebruik voor een helofytenfilter met 10 m³/min en een verblijftijd van vier dagen resulteert in een benodigd oppervlak van ongeveer 23 ha (uitgaande van een worteldiepte van 0,5 m en porositeit van 50%). Afhankelijk van het gewenste zuiveringsrendement kan de verblijftijd nog geoptimaliseerd worden. Zo groeien helofyten bij hogere instroomconcentraties sneller (bijv. huishoudelijk afvalwater). Ter illustratie: het grootste helofytenfilter voor huishoudelijk en agro-industrieel afvalwater in Europa is gelegen in Orhei, Moldavië. Dit filter beslaat 3,5 ha en heeft een hydraulische capaciteit van 3,2 m³/min.

2. Beheer

Voor een goede werking van helofytenfilters moet de begroeiing minimaal jaarlijks gemaaid en afgevoerd worden. Het beste moment hiervoor is op de overgang van de winter naar de lente. Het afsterven van de helofyten in de winterperiode kan er namelijk voor zorgen dat fosfor opnieuw vrijkomt door afbraak van organisch materiaal. Een optimaal maaibeheer moet op basis van omgevingsfactoren en filterontwerp onderzocht worden (van Wijk, *et al.*, 2022). Er is grootschalig onderhoud nodig wanneer de drains en bodem gaan dichtslibben, waarbij de eerste stappen zijn om de drains door te spuiten en na een aantal jaar de gevormde sliblaag te verwijderen om verstopping van het filter te voorkomen. De frequentie hiervan is afhankelijk van de belasting van het filter, de samenstelling van het influent en de mate van voorzuivering.

3. Risico's

Verstopping is een van de belangrijkste risico's voor het goed functioneren van het helofytenfilter. In het ontwerp dient dan ook rekening te worden gehouden met een voorzuivering afhankelijk van de (chemische) samenstelling van het filter. Doordat bij helofytenfilters met levende planten wordt gewerkt, zitten er risico's aan die voorkomen kunnen worden met een goed ontwerp. De planten kunnen namelijk sterven door parasieten als wortel- en stengelboorders. Dit risico stijgt bij grotere monoculturele helofytenfilters (Duel & te Broekhorst, 1990). Daarnaast zouden verschillende

soorten helofyten toegepast kunnen worden, maar de ervaring is dat de snelst groeiende plant uiteindelijk gaat overwoekeren. Verder kan langdurig stilstaand water in een helofytenfilter voor muggenplagen zorgen of een broedplaats voor ongedierte. Ook kunnen helofytenfilters leiden tot stankoverlast, wanneer afgestorven organisch materiaal gaat rotten in de filters (Numan, 1999). Tenslotte kunnen de filters ook uitdrogen wanneer er niet genoeg water wordt aangeleverd. Wel kunnen de filters redelijk goed omgaan met een variabel debiet.

4. Prestaties

De planten nemen zelf PO_4 op, maar door verticale of horizontale filtratie blijft ook particulier fosfor achter in het filter. Uit meetgegevens van verschillende helofytenfilters en de literatuur blijkt dat de variatie in effectiviteit groot is, in sommige gevallen is er zelfs sprake van nalevering als gevolg van ontoereikend beheer en onderhoud. Uit data van helofytenfilters uit Friesland kwam naar voren dat P_{tot} effluentconcentraties van 0,05 mg P/l gehaald konden worden bij influentconcentraties tussen de 0,1 en 0,3 mg P/l, maar dat nalevering ook mogelijk is. De nalevering kan dan voor een verhoging van soms wel 0,2 mg P/l zorgen. Bij de interpretatie van meetgegevens en het bepalen van effectiviteit van het helofytenfilter is het daarom belangrijk om rekening te houden met het beheerregime, de verblijftijden en ontwerp van het filter, maar ook een eventuele voorzuivering. Typische verwijderingspercentages van de helofytenfilters zijn weergegeven in Tabel 2.

TABEL 2

Typische verwijderingsprestaties van helofytenfilters (Dotro, et al., 2017) voor afvalwater.

PARAMETERS	HORIZONTAAL HELOFYTENFILTER	VERTICAAL HELOFYTENFILTER
Totaal zwevend stof	>80%	>90%
Organische stof (gemeten als zuurstofvraag)	>80%	>90%
Ammonium	20-30%	>90%
Totaal stikstof	30-50%	<20%
Totaal fosfor (lange termijn)	10-20%	10-20%

De prestatie van helofytenfilters is ook sterk afhankelijk van de concentraties in het influent en het aanvoerdebiet. Een hogere influentconcentratie met een gelijk aanvoerdebiet zal voor een hoger rendement zorgen. Een gelijke concentratie met een hoger aanvoerdebiet zal juist leiden tot een lager rendement, doordat de verblijftijd korter wordt. Daarnaast zijn de prestaties van helofytenfilters in de winter over het algemeen lager door de vermindering in biologische activiteit bij lagere temperaturen. Dit kan bij onvoldoende verwijdering van biologisch materiaal zelfs voor nalevering (i.e. negatief rendement) zorgen (Duel & te Broekhorst, 1990). Hierdoor is goed beheer een belangrijke prestatiefactor. Te laat maaien kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat meer fosfor in de wortels zit en weinig fosfor wordt afgevoerd, terwijl te vroeg maaien ervoor kan zorgen dat de planten niet optimaal kunnen groeien of zelfs afsterven (Lorenz, 2001). Verder zijn de prestaties van helofytenfilters ook afhankelijk van het toegepaste bodemtype, aangezien adsorptie vaak de belangrijkste verwijderingsvorm is van helofytenfilters en niet de biologische opname (Lorenz, 2001). Afhankelijk van de concentraties in het influent en de verblijftijd zijn de helofyten zelf verantwoordelijk voor ongeveer 10% P_{tot} verwijdering (Maucieri, Salvato, & Boing, 2020). Daarnaast is de soort vegetatie geen bepalende factor in de verwijderingspercentages van fosfor. Uit de literatuur blijkt dat de verschillen tussen het toepassen van

verschillende plantensoorten slechts minimaal is (Okada & Vymazal, 2023). Tenslotte kan een helofytenfilter belucht worden om de effectiviteit van het filter te verbeteren.

Doordat de bodem verzadigt, zal de opname van PO_4 in de tijd gaan afnemen, ook als er geen gebruik gemaakt wordt van adsorberende materialen in de bodem. Zand heeft een zeer beperkte adsorberende capaciteit en zal daardoor ook snel verzadigd zijn. De toepassing van filtermateriaal met een hoge adsorptiecapaciteit zal ervoor zorgen dat de PO_4 verwijderingsprestaties sterk zullen toenemen. In deze rapportage wordt dit beschouwd als andere systemen, zoals ijzerzandfilters of biocascades.

5. Volwassenheid

Helofytenfilters zijn al veel toegepast in verschillende situaties.

Helofytenfilters zijn bewezen systemen en er is veel ervaring mee. In situaties waar een helofytenfilter niet goed functioneert, heeft dit veelal te maken met onzorgvuldig ontwerp of beheer. De meeste filters in Nederland zijn relatief kleinschalig (< 1 ha) en voornamelijk bedoeld voor het (na)zuiveren van huishoudelijk afvalwater.

Daarnaast is de werking van helofytenfilters sterk gebonden aan influentconcentratie, verblijftijd, temperaturen en het beheer en onderhoud. Het toepassen van helofytenfilters is maatwerk en ze dienen ontworpen te worden op basis van de locatiespecifieke omstandigheden. Het is daardoor ook initieel moeilijk in te schatten of helofytenfilters correct functioneren over de verwachte levensduur.

6. Toekomstbestendigheid

De levensduur van een helofytenfilter wordt geschat op 25 jaar (Lorenz, 2001). Bij grootschalig onderhoud van een bestaand helofytenfiltersysteem kan ervoor gekozen worden om een filtermateriaal toe te passen met PO_4 adsorberende eigenschappen. Dit vergt echter wel een aanzienlijke ingreep

omdat het filter als het ware opnieuw wordt opgebouwd. Bestaande systemen kunnen door toevoeging van een beluchtingscompressor relatief eenvoudig worden aangepast, wat de effectiviteit kan verbeteren. De effectiviteit van het helofytenfilter zelf wordt daardoor niet direct beter, maar het geheel van zuiveringsstappen verhoogt de effectiviteit wel. Deze maatregel kan zinvol zijn wanneer voldaan moet worden aan bepaalde randvoorwaarden met betrekking tot de concentraties in het effluent. Tenslotte zouden hogere debieten (bv. als gevolg van klimaatverandering) alleen opgevangen kunnen worden door uitbreiding van het filter.

7. Koppelkansen

Helofytenfilters hebben een natuurlijke uitstraling. Daarmee kunnen de helofytenfilters ook een nevenfunctie bekleden als recreatie- of natuurfunctie. Daarnaast is een combinatiefunctie met waterberging mogelijk, waarbij er dan in het ontwerp rekening zal moeten worden gehouden met grote hoeveelheden water, wat dus eisen stelt aan de grootte van het systeem. Verder verwijderen helofytenfilters naast fosfor ook andere nutriënten en afvalstoffen. Hierbij kan gedacht worden aan stikstof, metalen, pesticiden, pathogenen en schadelijke bacteriën (STOWA, 2022). Tenslotte kan het maaisel eventueel gebruikt worden als isolatiemateriaal, biobrandstof of in de landbouwsector. Voorbeelden van nuttige gewassen hiervoor zijn bijvoorbeeld lisdodde, riet en biezengras. Voor de helofytenfilters is een bepaalde mate van ontwerp vrijheid om te kiezen voor geschikte vegetatie afhankelijk van het beoogde medegebruik, zoals bouwmaterialen of eventueel het vergroten van de biodiversiteit. Helofyten zijn in de handel verkrijgbaar, maar het is aan te bevelen om lokaal plantmateriaal toe te passen dat past bij de bodemsoort en de voedselrijkdom van het helofytenfilter.

8. Duurzaamheid

Het materiaal- en grondstofgebruik is relatief groot doordat er afhankelijk van de benodigde oppervlakte bepaalde hoeveelheden filtermateriaal (drainzand, grind of ander doorlatend zand) aangevoerd moeten worden

om het helofytenfilter op te bouwen. Additioneel wordt er ook nog een geotextiel boven de drains toegepast om te voorkomen dat rietwortels de drains beschadigen. Het benodigde oppervlak van filter is daarin dus bepalend, maar op basis van de verblijftijd en het debiet (zie ruimtegebruik) blijkt dat het oppervlak voor een helofytenfilter vergeleken met de andere defosfateringsinstallaties groot is. Energieverbruik is afhankelijk van de inzet van een pomp (o.i.d.) relatief laag en de grondstoffen om het filter op te bouwen, zijn in voldoende mate beschikbaar. Aan- en afvoer van materiaal gedurende de exploitatie is beperkt tot jaarlijks afvoeren van het maaisel. Mits goed ontworpen en beheerd, wordt de levensduur geschat op ca. 25 jaar, waarbij verstopping van de bovenlaag met slib of de doorlatendheid van de drains waarschijnlijk de beperkende factor zijn. Afhankelijk van het ontwerp (bv. wel of geen toepassing van geotextiel) zouden eventueel nieuwe drains aangelegd kunnen worden zonder dat er nieuw filtermateriaal toegepast hoeft te worden.

9. Kosten

De investeringskosten betreffen hoofdzakelijk het leveren en aanbrengen van het filtermateriaal (bv. drainzand en grind), het aanbrengen van een drainagesysteem met toebehoren en het aanbrengen van de helofyten. Voor wat betreft helofyten zou het in sommige gevallen ook kunnen dat deze spontaan tot ontwikkeling komen. Daarnaast kunnen afhankelijk van de locatiespecifieke omstandigheden damwanden en geotextiel nodig zijn. Het aanbrengen van een drainerende onderlaag en het drainagesysteem zijn met name de grootste kostenposten, omdat het ruimtegebruik van een helofytenfilter voor een capaciteit van 10 m³/min aanzienlijk is. Verder is bij het bepalen van de kosten nog geen rekening gehouden met grondaankoop, wat bij helofytenfilter het belangrijkste deel van de totale kosten kan zijn. De operationele kosten daarentegen zijn relatief laag, omdat het beheer eenvoudig is en hoofdzakelijk bestaat uit jaarlijks maaien en afvoeren. De beheer- en onderhoudsinspanning is dus beperkt zolang drains en bodem niet dichtslibben. De kosten zijn ingeschat en geschaald aan de hand van ramingen van gerealiseerde helofytenfilters.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

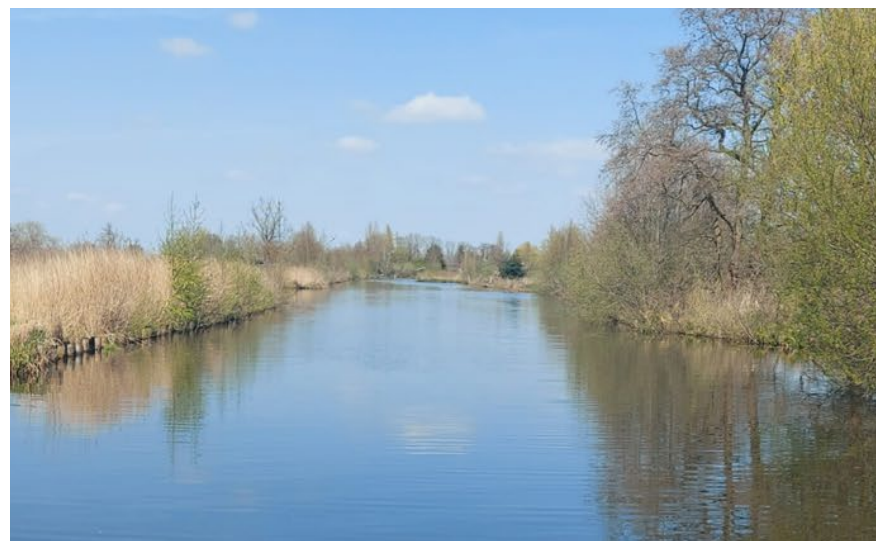
Helofytenfilters passen in een natuurlijke omgeving en zijn effectief in het verwijderen van zwevend stof, organisch stof en stikstof. Doordat ze zelfstandig kunnen functioneren, worden ze regelmatig toegepast als decentrale zuivering met een beperkt debiet. Voor het primair defosfateren van oppervlaktewater zijn helofytenfilters echter niet effectief. De helofyten verwijderen maar 10%-20% van het totaal fosfor en het filter heeft relatief veel oppervlak nodig. In de praktijk wordt in een helofytenfilter het meeste fosfor vastgelegd in de bodem door adsorptie. Hierdoor is de fosforverwijdering van een helofytenfilter de eerste jaren na realisatie hoger, maar neemt dit na enkele jaren sterk af. De fosforverwijdering kan verhoogd worden door een adsorbens toe te voegen aan de bodem (bv. ijzerzand). Dit compliceert echter het onderhoud en beperkt de mogelijkheid van een helofytenfilter om anaeroob te denitrificeren. Een standaard helofytenfilter is daardoor niet geschikt voor het primair defosfateren van oppervlaktewater conform de randvoorwaarden uit paragraaf 1.3, maar kan wel van toegevoegde waarde zijn om de impact van lokale bronnen te beperken.

3.2 COAGULATIE (DOSERING METAALZOUTEN)

Doseringsinstallaties voegen ijzerchloride, aluminiumzout of kalk in oplossing aan het water toe. De vrijgekomen ijzer-, aluminium-, of calciumionen reageren vervolgens met het PO_4 in het water. Hierbij ontstaat particulier fosfor dat neerslaat achter de doseringsinstallatie. Ook organisch fosfor coaguleert door het toevoegen van metaalzouten en bezinkt vervolgens langzaam achter de doseerinstallatie. De bezonken fosfordeeltjes kunnen vervolgens met baggeren verwijderd worden of begraven worden onder ander sediment. Naast het laten bezinken van het gevormde particulier fosfor is vlokfiltratie direct achter de doseringsinstallatie ook mogelijk. Dit vermindert ruimteverbruik. In Nederland worden vooral ijzerchloride-

installaties toegepast. Aluminiumzouten worden minder toegepast, aangezien aluminiumchloride en aluminiumsulfaat sinds 2018 op de RIVM-lijst staan van potentieel zeer zorgwekkende stoffen (RIVM, 2023). Daarnaast verhoogt kalktoevoeging het pH van het oppervlaktewater en werkt kalk pas optimaal bij een pH van 10,5 of hoger (Dirkzwager & Karper, 1971) (STOWA, 1993). Aangezien dergelijke pH-waarden bij veel waterlichamen voor ontoereikende KRW-normeringen zorgen, is kalktoevoeging aan oppervlaktewater ten behoeve van defosfateren niet wenselijk (van der Molen, *et al.*, 2018). Hierdoor zijn de criteria voornamelijk behandeld voor ijzerzoutinstallaties.

FIGUUR 3 Coagulatie (ijzerchloridedosering) bij de Nieuwkoopse Plassen (links) en de bijbehorende bezinkslot (rechts). Foto's afkomstig van B. Schaub, Rijnland.



1. Ruimtegebruik

Doseringsinstallaties zijn relatief compact, waarbij het ruimtegebruik afhankelijk is van het afvangen van het gevormde particulier fosfor. Bezinking (i.e., boerenslootmethode) heeft bij 10 m³/min ongeveer 0,1 ha aan ruimte nodig in kleigebieden en 0,2 ha in een veengebied (Voort, Wind, & Baars, 2010). De extra benodigde ruimte in veengebieden wordt veroorzaakt door het humusrijke water in deze gebieden. Humusdeeltjes zorgen namelijk voor lichtere en minder compacte vlokken waardoor ze langzamer bezinken. Hierdoor is een grotere bezinkvoorziening achter de doseerinstallatie nodig in vergelijking met kleigebieden. Verder neemt het ruimtegebruik ook toe als de installatie direct achter een gemaal geplaatst wordt. De doseringsinstallatie moet dan namelijk om kunnen gaan met de hoge piekafvoeren van de gemalen. Voort, Wind, & Baars (2010) zijn uitgegaan van een piekfactor van 1,7 die opgevangen moet worden. Hierdoor neemt het totaaloppervlak inclusief bezinksloot toe tot maximaal 0,3 ha in een veengebied. Het ruimtegebruik kan wel beperkt worden door in plaats van een bezinksloot gebruik te maken van een lamellenfilter. Het ruimtegebruik vermindert dan naar 160 m₂ (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022).

2. Beheer

Een doseringsinstallatie heeft verschillende beheercomponenten. De volgende componenten zijn periodiek nodig:

- aanvoer van chemicaliën (ijzerzouten);
- onderhoud van de doseringsinstallatie;
- afvoeren van gevormd slib.

Het beheerpersoneel moet voldoende chemicaliën aanvoeren om de installatie werkende te houden. Daarnaast moeten de technische componenten van de installatie met regelmaat worden gecontroleerd om storingen en problemen te voorkomen. Tenslotte moet het gevormde slib worden verwijderd uit de bezinksloot of het filter.

3. Risico's

Doseringsinstallaties voegen stoffen toe aan het water, waarbij er chemische reacties ontstaan. Dit creëert een aantal risico's. De chemische reactie van metaalzouten verlaagt de pH van het water (STOWA, 1993). De verzuring van het water leidt er vervolgens toe dat meer (zware) metalen in oplossing komen, waardoor het water toxischer wordt. Echter is verzuring te voorkomen door een basisch middel toe te voegen aan de waterkolom (bijvoorbeeld kalk of natronloog). Voor oppervlaktewateren zijn hierover overigens geen praktijkvoorbeelden van bekend.

De toevoeging van ijzerzouten zorgt ook voor een beperkt hoger chloridegehalte (1 tot 2 procent) in het uitstromende water (Waternet, persoonlijke communicatie, 14 maart 2024). Te hoge chlorideconcentraties kunnen schadelijk zijn in een zoetwatermilieu. Verder zijn metaalzouten nooit volledig zuiver. In de doseringschemicaliën zitten resten van andere (zware) metalen (bijvoorbeeld vanadium en chroom) die in te hoge concentraties toxisch voor het waterleven kunnen zijn (van der Oost, 2020). Dit risico is goed te voorkomen door zuivere (en duurdere) ijzerzouten te gebruiken. In hoeverre de risico's daadwerkelijk voor problemen gaan zorgen, hangt mede af van het doseringsregime en de omgevingscondities. Door een goede analyse van de gebruikte metaalzouten, monitoring en toxicologisch onderzoek kunnen deze risico's goed ondervangen worden. De leveringszekerheid van ijzerchloride wordt besproken in hoofdstuk 4.2.3.

4. Prestaties

Ijzerzout doseren kan zorgen voor een hoog zuiveringsrendement van ongeveer 80-95% (Lenntech, sd; Szabó, *et al.*, 2008; Zhang, *et al.*, 2022). Echter komen deze cijfers uit rioolwaterzuiveringen met hoge influentconcentraties (>0,5 mg P/l). Data van ijzerzout doseringsinstallaties in Nederland laten een zuiveringsrendement variërend tussen -53% en 87% zien voor lagere P_{tot} influentconcentraties (<0,4 mg P/l). Hierbij valt op dat vooral lage P_{tot} influentconcentraties (<0,15 mg P/l) negatief rendement kunnen hebben.

Wel variëren de zuiveringsrendementen sterk per locatie. Szabó *et al.* (2008) toont aan dat steeds hogere ijzerchloridedoseringen nodig zijn bij lagere P_{tot} influentconcentraties. De toename in dosering neemt exponentieel toe bij een P_{tot} concentratie onder 1 mg/l. Daarnaast is het rendement afhankelijk van de factoren in de watersamenstelling zoals pH, hoeveelheid organisch materiaal en hoeveelheid gesuspendeerd sediment. Zo is de optimale pH tussen de 5-7 en wordt het rendement lager bij hogere hoeveelheden organisch en gesuspendeerd materiaal (Voort, Wind, & Baars, 2010; Szabó, *et al.*, 2008). Verder is de grootte, afvoersnelheid en hoeveelheid bochten van de bezinksloot bepalend voor het rendement, aangezien een verkeerd ontwerp lagere rendementen oplevert door de vermindering van vlokvorming en bezinking (Voort, Wind, & Baars, 2010). Te hoge afvoersnelheden, te kleine bezinksloten en teveel bochten zorgen ervoor dat de vlokken onvoldoende kunnen bezinken. Hierdoor spoelt teveel P_{tot} uit in het gezuiverde waterlichaam. In dit waterlichaam kunnen zuurstofloze bodemcondities zorgen voor nalevering van fosfor uit de bodem, waardoor ijzer reduceert en het geadsorbeerde PO_4 weer in oplossing gaat (Münch, *et al.*, 2024). Deze nalevering verklaart bijvoorbeeld hogere effluent- dan influentconcentraties. Szabó *et al.* (2008) vonden wel dat 0,01 mg/l PO_4 mogelijk is, maar gemiddeld een uitstroomconcentratie van 0,6 tot 0,9 mg/l werd gevonden. Systemen in Nederland laten zien dat een P_{tot} concentratie onder 0,05 mg/l gehaald kan worden, maar de meeste systemen zitten tussen de 0,05 tot 0,15 mg/l. Ook laten systemen nalevering zien wanneer influentconcentraties onder 0,1 mg/l komen. De nalevering kan voorkomen worden door het fosforrijke slib regelmatig te baggeren. Tenslotte is bij de Pot (Nieuwkoop) aangetoond dat optimalisatie door een verhoging van de dosering en toevoeging van een flocculent mogelijk is (Roskam, 2017). Hierdoor kunnen prestaties in de toekomst misschien voor het oppervlaktewater nog verder verbeterd worden.

5. Volwassenheid

Sinds 1950 is er veel onderzoek gedaan naar coagulatie-installaties voornamelijk in RWZI's (Morse, Brett, Guy, & Lester, 1997). Hierdoor zijn de doseerinstallaties goed commercieel verkrijgbaar en is er veel kennis over de werking en onderhoud van de installaties. Verder zijn er meerdere coagulatie en sedimentatie installaties in beheer voor oppervlaktewateren in Nederland sinds de jaren 90 (Voort, Wind, & Baars, 2010). Er is dus veel kennis en ervaring over het gebruik van de systemen, waardoor weinig problemen door schaalvergroting of optimalisatie verwacht worden. De benodigde bezinking of filtratie van het geocoaguleerde fosfor is gebiedsafankelijk en vraagt om maatwerk.

6. Toekomstbestendigheid

In Voort, Wind, & Baars (2010) is een civiele en werktuigbouwkundige afschrijftermijn van 50 jaar opgegeven. De elektrotechnische en procesautomatiseringstermijnen zijn korter (25 en 10 jaar). Het is hierdoor niet eenvoudig om grootschalige aanpassingen door te voeren, wel kan op termijn de doseerinstallatie geoptimaliseerd worden. Daarnaast is het mogelijk om beter werkende of duurzamere chemicaliën toe te passen (bijvoorbeeld een magnetisch verwijderbaar middel) of kan de dosering aangepast worden aan veranderende doelen en/of aanvoerconcentraties. Hoewel er nog steeds veel onderzoek wordt gedaan naar PO_4 coagulatie, is deze techniek minder populair dan adsorberende technieken (Zhang, *et al.*, 2022). Zhang *et al.* (2022) laten ook zien dat de potentie tot hergebruik van geocoaguleerd fosfor erg laag is door de sterke binding. Hierdoor zal geocoaguleerd fosfor minder snel in oplossing komen, dus minder makkelijk worden teruggewonnen. Daarom kan gekeken worden of adsorberende materialen gebruikt kunnen worden in plaats van coagulerende materialen. Dit vergroot de toekomstbestendigheid van de installaties aangezien er meer potentie voor terugwinning wordt gevonden in adsorptie.

7. Koppelkansen

Naast een coagulant werkt bijvoorbeeld ijzer(III)chloride ook als flocculant. Hierdoor kunnen doseringsinstallaties ook zwevende deeltjes verwijderen. Deze zwevende deeltjes bevatten vaak zware metalen, medische en organische stoffen. Dus doseringsinstallaties kunnen naast fosfor ook andere stoffen door middel van flocculatie verwijderen.

8. Duurzaamheid

Het materiaal- en grondstofgebruik zit voornamelijk in het gebruik van chemicaliën, zoals bijvoorbeeld ijzerchloride. De chemicaliën moeten gedurende de exploitatie steeds worden aangevoerd. Het energieverbruik is van ondergeschikt belang als de installatie bij een bestaande pomp wordt geplaatst en bovendien is het energieverbruik relatief laag. Deze installatie zorgt voor een reststroom van slib, die moet worden verwerkt of afgevoerd. Momenteel kan dit slib nog niet (her)gebruikt worden. Bij een gewenste lage effluentconcentratie neemt het gebruik van chemicaliën exponentieel toe, onafhankelijk van de influentconcentratie. Dit zorgt voor inefficiënt gebruik van grondstoffen. Verder is het nog niet goed mogelijk om de dosering te sturen op basis van een fluctuerende P_{tot} concentratie.

9. Kosten

De investeringskosten voor het opbouwen van een installatie (exclusief gemaal en eventuele additionele filters) voor coagulatie zijn relatief laag. De operationele kosten daartegen zijn een stuk hoger in verband met het verbruik van chemicaliën (coagulant), het onderhoud aan de installatie en het periodiek afvoeren van het slib. Met name het baggeren en afvoeren van het slib is een grote kostenpost. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met fluctuerende prijzen voor het aanvoeren van geschikte coagulanten. De kosten zijn ingeschat en geschaald op basis van Cusell *et al.* (2022).

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Coagulatie is een efficiënte techniek om fosfor uit oppervlaktewater te halen bij hoge concentraties. Hierbij wordt in de eerste plaats orthofosfaat verwijderd (coagulatie), maar ook een deel van het particulier fosfor (flocculatie en/of bezinking). Lage effluentconcentraties zijn wel mogelijk (bijv. $<0,1 \text{ mgP/l}$), maar dan moet relatief veel gedoseerd worden. Dit is minder duurzaam, resulteert in hogere operationele kosten en een toename van de chlorideconcentratie in het water. Bij coagulatie moet er ook rekening gehouden worden met een bezinkvoorziening of een industrieel filter (bijvoorbeeld een lamellenfilter) om het gebonden fosfor te verwijderen. Bochten in de bezinkvoorziening, aanwezigheid van humuszuren en piekafvoeren beperken het bezinken. Verder wordt niet altijd een flocculant toegevoegd in verband met de kosten en impact op de omgeving. Hierdoor kan gebonden fosfor met het effluent meestromen, waarna het opnieuw als fosfaat kan vrijkomen. Een bezinkvoorziening moet daarom met zorg ontworpen worden. Bij een hoge acceptabele effluentconcentratie is coagulatie vaak kosteneffectief en is er relatief weinig ruimte nodig.

3.3 IJZERZANDFILTERS

Ijzerzandfilters combineren adsorptie en filtratie in één installatie. Het zand filtert een groot deel van het particulier fosfor, terwijl de ijzer(hydr)oxiden om het zand het PO_4 adsorberen. Daarnaast vindt er ook biologische activiteit in ijzerzandfilters plaats. Deze microben kunnen particulier fosfor omzetten naar PO_4 , waarna het geabsorbeerd wordt. Ijzerzandfilters kunnen toegepast worden met twee vormen van verticale infiltratie, namelijk upflow en downflow. Bij upflow wordt water onder in het filter gebracht en stroomt het omhoog door het filter. Downflow werkt andersom, waardoor water boven op het filter wordt gebracht en vervolgens naar beneden infiltreert en via drainagebuizen wordt afgevoerd. Doordat bij upflow een hogere druk kan worden opgebouwd, wordt er gemiddeld meer en sneller water doorheen gestuurd. Ook is het bij upflow makkelijker om het water evenredig over het filter te verdelen. Om verstoppingen van het filter te voorkomen, kunnen eventueel voorfilters worden gebruikt.

Voorfiltratie kan door middel van bezinking of filtratie. De evaluatie van up- en downflowfilters is gebaseerd op de aanwezige systemen in Nederland. Het gaat hierbij om het upflowfilter bij Zwemlust en de downflowfilters bij Groote Meer en het Paterswoldsemeer.

1. Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik van een ijzerzandfilter is afhankelijk van de gewenste verwijderingshoeveelheid. De contacttijd en doorstroomsnelheid zijn hiervoor bepalend (Barcala, Zech, Osté, & Behrends, 2023). De contacttijd is weer afhankelijk van de adsorptiecapaciteit van het materiaal (Usman, Aturagaba, Ntale, & Nyakairu, 2022). Voor ijzerzand is gekeken naar praktijkvoorbeelden in Nederland. Het upflowfilter bij Zwemlust heeft een relatief korte contacttijd (± 15 minuten) en grote laagdikte. Hierdoor is het ruimtegebruik beperkt (ongeveer 1.000 m^2 bij $10 \text{ m}^3/\text{min}$) (Stroom, Voort, & van Dusseldorp, 2022). Bij downflowfilters is sprake van een lagere doorstroomsnelheid en langere contacttijd (± 3 uur). Hierdoor is het ruimtegebruik groter (ongeveer 2 ha

bij $10 \text{ m}^3/\text{min}$), maar is er minder snel een voorfilter nodig. Veel zwevend stof bezinkt in de verdeelsloot. Zwevend stof dat toch op het filter bezinkt, zorgt door de lage stroomsnelheid niet direct voor een beperking in de doorlatendheid. Wel wordt geadviseerd om het filter regelmatig droog te laten vallen, zodat organische stof kan afbreken en zuurstof de bodem in kan trekken.

2. Beheer

Er is een sterk verschil tussen het beheer van een upflow- en downflowfilter. Bij het upflowfilter van Zwemlust zijn een voorfilter en pomp geïnstalleerd. Het voorfilter heeft maandelijks onderhoud nodig, terwijl de pomp aanzienlijk minder onderhoud vergt. Daarnaast moet het voorfilter teruggespoeld worden om verstoppingen te voorkomen. Het terugspoelen gaat veelal volautomatisch, waardoor dit geen extra beheer vergt. Wel ontstaat hierdoor een afvalstroom van slib en geconcentreerd spoelwater. Deze afvalstroom (enkele procenten van het debiet) moet verwerkt worden. De downflowfilters in Nederland hebben geen voorfiltratie of pomp. Er is wel een bezinkvoorziening en er vindt begroeiing plaats op het filter. De bezinkvoorziening is nodig om het dichtslibben van het filter te voorkomen en moet op termijn gebaggerd worden (1x per 5-10 jaar). De begroeiing moet verwijderd worden om nutriënten af te voeren en boomgroei te beperken. Afhankelijk van het (ecologische) streefbeeld kan dit één keer per 1-2 jaar gedaan worden. De drains in het filter moeten alleen gereinigd worden wanneer er verstopping optreedt. Eventuele automatische kunstwerken (pomp en stuw/schuif) moeten beheerd worden, maar hebben geen frequent onderhoud nodig. In verband met de opbouw van slib en eventueel dichtslibben van het filter wordt geadviseerd om het filter jaarlijks droog te laten vallen.

3. Risico's

Ijzerzand kan zware metalen bevatten (in het bijzonder arseen). Deze kunnen onder specifieke omstandigheden uitspoelen en in de omgeving terecht komen.

Koopmans, 2022). Het ijzerzand legt ook zware metalen vast (koppelkans), maar door langjarige accumulatie in het filter kan dit er bij het einde van de levensduur voor zorgen dat het ijzerzand moet worden afgevoerd naar een erkende verwerker. Verder is het bij slecht beheer mogelijk dat in het filter (met name bij downflow) ongewenste insecten en waterplanten gaan groeien (bijvoorbeeld muggen en exoten).

4. Prestaties

De prestaties van ijzerzandfilters zijn afhankelijk van meerdere fysisch-chemische omstandigheden. De belangrijkste eigenschappen zijn contacttijd, pH, hoeveelheid adsorbens en de samenstelling van het aanvoerwater (Usman, Aturagaba, Ntale, & Nyakairu, 2022). Onder laboratoriumomstandigheden kunnen ijzerhoudende adsorbentia >98% van het PO_4 verwijderen met een effluentconcentratie onder 0,01 mg/l bij influentconcentraties van 0,15 en 0,7 mg/l (Pugliese, *et al.*, 2023). Veldstudies laten zien dat P_{tot} concentraties onder 0,15 mg/l gehaald worden onder variërende omstandigheden met een zuiveringsrendement van 93%, waarbij de opgeloste fosforfractie zelfs 0,1 mg/l haalde met een rendement van 97% (Chardon, Groenenberg, Vink, Voegelin, & Koopmans, 2022). Deze effluentconcentraties komen ook overeen met de resultaten van het upflow ijzerzandfilter bij Zwemlust (Waternet), waarbij de P_{tot} concentraties tussen de 0,02 en 0,09 mg P/l zitten met influentconcentraties tussen de 0,05 en 0,2 mg P/l en een rendement van ongeveer 50% (Stroom, Voort, & van Dusseldorp, 2022). Een kortere contacttijd, meer competitieve ionen in het influent (bijvoorbeeld sulfaat) en hoge DOP of COP kunnen dit rendement verminderen doordat minder fosfor adsorbeert en meer door het filter heen gaat (Lilienfein, Qualls, Uselman, & Bridgham, 2004; Usman, Aturagaba, Ntale, & Nyakairu, 2022). Dit kan tot hogere effluentconcentraties leiden. Bij een zeer korte contacttijd van enkele minuten kan het rendement zelfs nihil zijn (Bauwe, Petra, & Lennartz, 2019). Dit is afhankelijk van het adsorptiemechanisme van ijzerzand, waarbij er een snel en langzaam mechanisme aanwezig is (Barcala, Zech, Osté, & Behrends, 2023). Het langzame mechanisme representeert de bulk van de adsorptiecapaciteit, het snelle mechanisme kan al snel verzadigd

zijn. Onderzoeken van Bauwe, Petra & Lennartz (2019) en Stroom, Voort, & van Dusseldorp (2022) laten wel zien dat er een continue verwijdering van P_{tot} is door ijzerzand in situaties dat PO_4 nauwelijks wordt verwijderd. Dit toont aan dat naast PO_4 ook particulier fosfor goed wordt verwijderd door ijzerzand. Tenslotte kunnen langdurige zuurstofloze omstandigheden in combinatie met een lage bindingscapaciteit in theorie ervoor zorgen dat fosfor opnieuw in oplossing komt. Echter is dit in lab- en praktijkproeven nog niet gevonden, omdat de hoeveelheid ijzeroxide in de korrels waarschijnlijk zo groot is, dat reducerende condities lang moeten aanhouden om de ijzeroxide significant te verlagen (Barcala, *et al.*, 2023).

5. Volwassenheid

Ijzerzandinstallaties zijn in Nederland inmiddels op meerdere locaties op praktijkschaal toegepast. Het betreffen drie downflowvarianten en één upflowvariant. Ook is ijzerzand toegepast in meerdere praktijkproeven en wordt ijzerzand mogelijk ook toegepast in reactortechnieken. Verder zijn er minimaal vier filters in voorbereiding, waardoor er veel over het ontwerp wordt nagedacht. Adsorptie is weliswaar een bewezen techniek en tegelijkertijd zijn de gerealiseerde ijzerzandfilters nog maar enkele jaren operationeel waardoor langetermijneffecten onzeker zijn. Hierdoor wordt de techniek vaak overgedimensioneerd, is er ruimte voor optimalisatie en wordt er extra gemonitord. De optimalisatie en extra monitoring kan resulteren in meer of juist minder investeringen gedurende de levensduur van het filter. Door het overdimensioneren wordt een relatief grote hoeveelheid ijzerzand toegepast en zit de optimalisatie in het verkleinen van het oppervlak. Doordat er nog relatief weinig meetgegevens en ervaringen over langere termijn beschikbaar zijn, is het moeilijk om het exacte zuiveringsrendement over de verwachte levensduur te voorspellen. Hierdoor worden mogelijk meer kosten gemaakt dan strikt noodzakelijk door het aanleggen van grotere ijzerzandfilters dan nodig. De installatie is ook modulair inzetbaar (met name upflow filters). Hierdoor kan de installatie makkelijk opgeschaald worden wanneer dit nodig wordt geacht.

6. Toekomstbestendigheid

Er wordt veel onderzoek gedaan naar potentiële adsorptiematerialen (Mendes, Pugliese, Canga, Wu, & Heckrath, 2022). Op dit moment is ijzerzand echter preferabel, aangezien het een reststroomproduct is, dat bij fosforverwijdering hoogwaardig wordt ingezet. Hierdoor zijn de kosten van ijzerzand laag vergeleken met de relatief hoge adsorptiecapaciteit. Echter blijft de wetenschappelijke interesse in adsorptiematerialen hoog (Zhang, *et al.*, 2022). Hierdoor kan binnen aanzienlijke tijd een verbeterd adsorptiemateriaal gevonden worden. Door een korte levensverwachting van kleinere upflow ijzerzandfilters kan het adsorptiemateriaal relatief snel door betere alternatieven worden vervangen.

Echter kan het ijzerzand van upflow ijzerzandfilters ook optimaler worden benut door een langere contacttijd te hanteren (Barcala, Zech, Osté, & Behrends, 2023). Downflow ijzerzandfilters maken door deze langere contacttijd optimaler gebruik van de totale adsorptiecapaciteit van het ijzerzand. Hierdoor gaat een downflowfilter afhankelijk van het ontwerp en de belasting wel 25 tot 100 jaar mee. Het eventueel vervangen van het adsorptiemateriaal in deze periode is kostbaar waardoor hier in het ontwerp rekening mee moet worden gehouden. Kleinere upflow ijzerzandfilters kunnen modulair opgebouwd worden. Hierdoor kan er snel geschakeld worden wanneer de zuiveringscapaciteit groter moet worden. Tenslotte zou terugwinning van fosfor uit het ijzerzand en het materiaal opnieuw toepassen in de toekomst tot een kostenbesparing kunnen leiden, zeker als dit op de locatie zelf uitgevoerd kan worden.

7. Koppelkansen

Naast fosfor kunnen ook (zware) metalen uit het water worden verwijderd met een ijzerzandfilter. Met name arseen wordt effectief verwijderd door ijzerzand (Groenenberg, Chardon, & Koopmans, 2013; Huang, Yang, & A, 2014). Andere metalen die verwijderd kunnen worden, zijn zink, lood en koper (metingen ijzerzandfilter Paterswoldsemeer en Groote Meer). Hiervoor is het belangrijk

om te voorkomen dat er ijzer(zand) uitspoelt uit het filter. Verder kan het ijzerzandfilter op een natuurlijke manier worden ingericht zodat de locatie bijvoorbeeld bijdraagt aan de natuurdoelen die er voor een bepaald gebied gelden. Daarnaast kan het ijzerzandfilter ook gebruikt worden als bassin om pieken in de waterafvoer op te vangen of als recreatieve functie.

8. Duurzaamheid

Ijzerzand is een reststroom vanuit de drinkwaterindustrie, die opgewerkt is voor toepassing in oppervlaktewater of andere nuttige toepassing. In die zin zou het gebruik van ijzerzand als duurzaam beschouwd kunnen worden, omdat het anders wordt afgevoerd, als ophoogmateriaal gebruikt wordt of gestort wordt bij een erkende verwerker. Als er eveneens geen aanbod is van fosfor dan verzadigt het ijzerzand ook niet of nauwelijks waardoor het dan lang mee kan gaan. Qua materiaalgebruik scoort de upflowvariant minder goed ten opzichte van de downflowvariant in verband met toepassing van voorfilters, werktuigbouwkundige en elektrotechnische installaties. Dat geldt ook voor het energieverbruik omdat het water in de upflowvariant actief door het filter gepompt wordt. Het ruimtegebruik is daarentegen wel beperkt bij het upflowfilter. De downflowvariant gebruikt namelijk veel meer ijzerzand om zo voor een langere periode mee te gaan en water onder vrijverval door het filter gaat. Hierbij wordt het filter hydraulisch gezien niet continu optimaal gebruikt. Bij de upflowvariant zorgt de extra technologie ervoor dat het filterbed wel hydraulisch optimaal wordt gebruikt tot verzadiging.

9. Kosten

Om een beeld te geven van de kosten moet onderscheid gemaakt worden in een downflow (traag) ijzerzandfilter en een upflow (snel) ijzerzandfilter, omdat deze qua opbouw en benodigdheden van elkaar verschillen. De investeringskosten voor een downflow ijzerzandfilter worden in grote mate bepaald door het leveren en aanbrengen van het drain- en ijzerzand en het drainagesysteem. Daarnaast zijn er vaak nog een aantal waterhuishoudkundige objecten zoals stuwen, duikers en/

of in-/uitlaatvoorzieningen nodig om het geheel te laten functioneren.

Aandachtspunt en risico hierbij is dat de prijs van ijzerzand vermoedelijk gaat fluctueren als gevolg van toenemende vraag en het beperkte aanbod. Verder is bij het bepalen van de kosten nog geen rekening gehouden met grondaankoop, wat bij ijzerzandfilters een substantieel onderdeel van de totale kosten kan zijn. De operationele kosten bestaan hoofdzakelijk uit het maaien en afvoeren van begroeiing, periodiek (bv. vijf jaar) baggeren en indien nodig doorspuiten van de drains. De beheer- en onderhoudsinspanning is relatief laag en eenvoudig waardoor de operationele kosten ook relatief laag uitvallen. De kosten zijn ingeschat en geschaald op basis van een gerealiseerd downflow ijzerzandfilter en ramingen voor toekomstige downflow ijzerzandfilters. Voor een upflow ijzerzandfilter is aanzienlijk minder ruimte nodig, maar zijn er meer civiele, werktuigbouwkundige en elektrotechnische installaties nodig om het geheel te laten functioneren. De investeringskosten worden dan ook hoofdzakelijk bepaald door voorgenoemde componenten. De operationele kosten worden met name bepaald door het periodiek vervangen van het ijzerzand, omdat dit relatief snel verzadigd raakt, en het frequente onderhoud aan het systeem. Ten opzichte van een downflow ijzerzandfilter zijn de operationele kosten dus relatief hoog. De kosten zijn ingeschat en geschaald op basis van de werkelijk gemaakte kosten van het filter bij Zwemlust, waarbij rekening is gehouden met de relatief kleine schaal en het experimentele karakter van dit filter.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Om lagere effluentconcentraties te bereiken, kan een ijzerzandfilter toegepast worden. Deze filters worden al op enkele locaties in Nederland toegepast. Doordat het om een filterbed gaat, is het filter wel gevoelig voor verstopping, waardoor voorfiltratie of een bezinkvoorziening voor het ijzerzandfilter nodig kan zijn. De filters zijn robuust en kunnen jaarrond fosfor verwijderen. Bij hoge influentconcentraties kan het ijzerzand relatief snel verzadigd raken. Daardoor kan bij een hoge influentconcentratie (bijv. $>0,5$ mg P/l) soms beter gekozen worden voor coagulatie of een combinatie met andere technieken zoals bij een Biocascade wordt gedaan. Grofweg kunnen ijzerzandfilters opgedeeld worden in trage filters (downflow) en snelle filters (upflow). De trage filters hebben als voordeel dat het beheer en onderhoud eenvoudig is en dat de filters goed passen in een natuurlijke omgeving. Vanwege de lage hydraulische belasting is het benodigde oppervlak voor downflow ijzerzandfilters wel relatief groot, maar kleiner dan helofytenfilters en cascades met biologische componenten. De techniek is vooral geschikt voor het behalen van lage effluentconcentraties op locaties waar voldoende ruimte beschikbaar is en een technische oplossing of het toepassen van chemicaliën minder wenselijk is. Upflow ijzerzandfilters behalen potentieel een lagere effluentconcentratie door een goede voorfiltratie en optimalisatie van de contacttijd. Hierdoor is er wel meer onderhoud nodig. De beperkte beschikbaarheid van ijzerzand is een aandachtspunt voor downflow ijzerzandfilters. Voor upflow ijzerzandfilters zijn ijzerpellets mogelijk een goed alternatief, doordat het filtermateriaal bij upflow na enkele jaren vervangen moet worden.

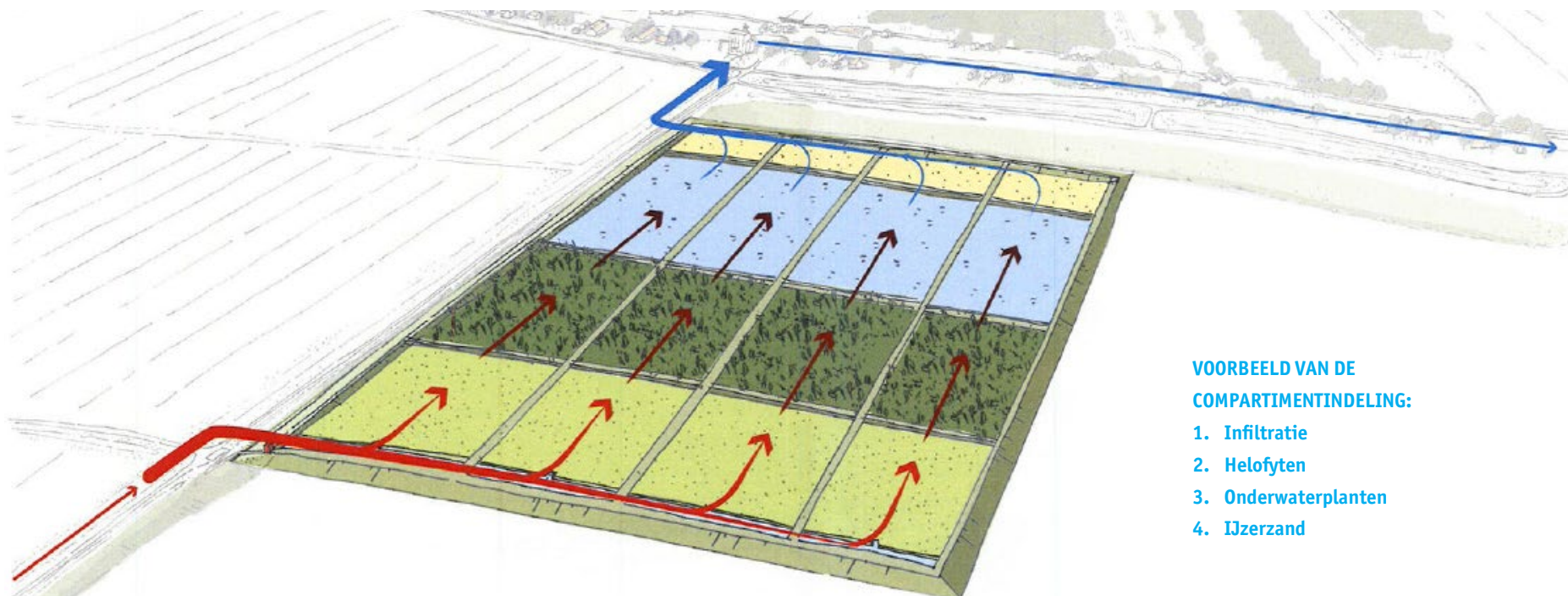
3.4 CASCADES MET BIOLOGISCHE COMPONENTEN (BIOCASCADE)

Cascades met biologische componenten zijn een opeenvolging van fosforverwijderende organismen (eventueel) aangevuld met adsorberende lagen. Hierbij worden verschillende compartimenten zo ingericht dat fosfor optimaal kan worden verwijderd alsook de biologische producten. In het buitenland zijn hier verschillende voorbeelden van, waarbij de cascades vaak de vorm hebben van een uitgebreid helofytenfilter.

Biologische cascades kennen een range van toepassingen, echter is net als bij helofytenfilters een vorm van adsorbens nodig voor een goede PO_4 verwijdering (van den Boomen & Kampf, 2013). Een goed voorbeeld van deze aaneenschakeling is 'de Biocascade' (Kwakernaak, Jansen, van Kempen, Smolders, & van Rheenen, 2015). Dit concept is voor de Nederlandse situatie uitgewerkt en getest op een proeflocatie. Deze uitwerking past het beste bij

FIGUUR 5

Voorbeeld ontwerp en functioneren van een Biocascade met vier zelfstandige eenheden (Hermans, Westendorp, & Cusell, 2019). Drie eenheden kunnen operationeel zijn, terwijl één eenheid wordt geoogst.



de randvoorwaarden van dit onderzoek en is daarom als voorbeeld gebruikt in de verdere uitwerking. Bij de toepassing in de praktijk is het mogelijk om de exacte combinatie van componenten af te stemmen op de kenmerken van het influent en de gewenste P concentratie in het effluent. Uniek aan de Biocascade is ook de regeneratie van het filter. Dit onderdeel is in de praktijk overigens nog niet getest.

Bij de Biocascade komt het water eerst in een bezinkcompartiment. Hierin zitten vaak organismen die het particulier fosfor kunnen omzetten naar PO_4 en planten die het dan opnemen. Vervolgens stroomt het water naar een inzijgingscompartiment. Dit compartiment bevat raaigras of pitrus met daaronder een laag ijzerhoudend zand. Dit compartiment moet ervoor zorgen dat de helofyten niet overbelast raken, waardoor ze langer meegaan. Een filter kan eventueel ook zonder dit compartiment worden aangelegd. Na het inzijgingscompartiment komt het water via de drains onder vrij verval in een horizontaal helofytenfilter terecht. Vervolgens zal het water in een compartiment komen met onderwaterplanten. Tenslotte gaat het water (meestal) nog door een compartiment met een adsorberende bodem (bijvoorbeeld ijzerzand). Daarna stroomt het water uit het filtersysteem. De voorkeur gaat uit om dit alles onder vrij verval te doen, waarbij water vanuit een watergang naar een bezinkbassin of vanuit een bezinkbassin naar het eerste compartiment wordt gepompt. Wanneer het systeem is opgeladen met fosfaat worden de compartimenten onder water gezet. Dit zorgt voor anaerobe omstandigheden, waarbij de fosfaten weer vrijkomen in het water. Azolla (grote kroosvaren) wordt vervolgens gebruikt om dit fosfaat te verwijderen uit het water. Vervolgens wordt de Azolla geoogst en kan het gebruikt worden als groene meststof.

1. Ruimtegebruik

Het oppervlak van een cascade met biologische componenten is afhankelijk van de gekozen zuiverende stappen. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een adsorbens, dan is het oppervlak van een cascade met biologische componenten

kleiner dan die van een helofytenfilter (zonder adsorbens) en groter dan die van een downflow ijzerzandfilter (ordegrootte 4 ha bij $10 \text{ m}^3/\text{min}$). Zonder het gebruik van een adsorbens zal het oppervlak echter vergelijkbaar zijn met dat van een helofytenfilter. Doordat cascades worden opgedeeld in compartimenten kan meer ruimte nodig zijn.

2. Beheer

Het beheer van een cascade met biologische componenten is een combinatie van het beheer van een helofytenfilter en ijzerzandfilter. Hierdoor moeten de biologische componenten periodiek vervangen worden. Daarnaast is er een sturing van het peilbeheer nodig en moeten pompen of inlaten onderhouden worden. Dit zorgt voor een minimaal onderhoud van één keer per jaar. Door het scheiden van de zuiverende stappen in individuele compartimenten kan het onderhoud wel gericht en efficiënt uitgevoerd worden. Voor 'de Biocascade' zijn er ook verdeelwerken en afsluiters nodig die periodiek bediend worden. Het opladen duurt een aantal jaar, waardoor het ontladen en oogsten van Azolla geen jaarlijkse frequentie heeft. Daarnaast moet het inzijgingscompartiment (vergelijkbaar met traag zandfilter) voldoende waterdoorlatend blijven. Bij verstoppingen moet de bovenlaag van het inzijgingscompartiment verwijderd of bewerkt worden.

3. Risico's

De risico's van een cascade met biologische componenten met adsorbens zijn een combinatie van de risico's van helofytenfilters en ijzerzandfilters. De biologische componenten kunnen afsterven en rotten. Dit kan zorgen voor stankoverlast. Daarnaast kan stilstaand water zorgen voor overlast door muggen of kan ander ongedierte zich huisvesten in het filter. Tenslotte kunnen er uit het adsorbens ongewenste stoffen vrijkomen (bijv. ijzer, carbonaat, zware metalen). Bij het ontladen met Azolla is er ook een risico dat Azolla in het oppervlaktewater buiten de compartimenten komt wanneer dit niet volledig geoogst wordt. Azolla is echter geen invasieve exoot in Nederlandse wateren.

4. Prestaties

De proeflocatie van de Biocascade in Nijmegen laat een P_{tot} effluentconcentratie onder de 0,05 mg P/l zien bij influentconcentraties rond de 0,3 mg P/l en een hydraulische belasting van waarschijnlijk 4,8 cm/d (Kwakernaak, Jansen, van Kempen, Smolders, & van Rheenen, 2015). De prestaties zijn hierbij afhankelijk van dezelfde factoren als helofytenfilters en ijzerzand. Echter zorgt de combinatie van deze twee systemen ervoor dat zeer lage effluentconcentraties kunnen worden behaald. Daarnaast zullen de biologische componenten het water al dermate filteren dat eventuele verstoppingen in het ijzerzand minder snel voorkomen. Echter kan bij een slecht ontwerp of bij slecht onderhoud het tegenovergestelde gebeuren, waarbij deeltjes of stoffen van voorgaande compartimenten het ijzerzand doen verstopen. Verder werken de biologische componenten minder goed in de winterperiode, maar kan het ijzerzand dan voor de nodige verwijdering zorgen. Voor het optimaal functioneren is intensieve monitoring van de compartimenten nodig, zodat het peilbeheer geoptimaliseerd kan worden.

5. Volwassenheid

In Nederland is de techniek nog maar één keer als praktijkproef toegepast (Kwakernaak, Jansen, van Kempen, Smolders, & van Rheenen, 2015). Verder is er in binnen- en buitenland wel meer te vinden over de combinatie van helofytenfilters met een adsorptiemateriaal (Verhoeven & Blom, 2007; Zheng, Wang, Xiong, Lui, & Zhao, 2014). Ook zijn de individuele componenten al vaker toegepast en getest. Echter is er geen standaard biocascade die wordt toegepast. Resultaten uit eerdere onderzoeken zijn dus moeilijk te verhouden naar nieuw geplande installaties. Een nieuwe installatie heeft hierdoor nog intensieve monitoring nodig en zal waarschijnlijk verder geoptimaliseerd moeten worden.

6. Toekomstbestendigheid

De levensverwachting van een Biocascade-installatie zal waarschijnlijk overeenkomen met dat van een helofytenfilter. Hierdoor wordt groot

onderhoud na circa 25 jaar verwacht. Het adsorbens is dan mogelijk al eerder verzadigd, maar de Biocascade heeft als uitgangspunt dat dit wordt geregenereerd. Tijdens groot onderhoud kunnen verbeterde adsorptiematerialen en/of biologische componenten worden gebruikt. Daarnaast kunnen biologische componenten ook eerder worden vervangen, mocht dit nodig worden geacht. De Biocascade heeft hierbij als voordeel dat er meerdere zelfstandige eenheden worden gebruikt, waardoor onderhoud de werking van het filter niet belemmert. Tenslotte kan fosfor worden teruggewonnen uit het geoogste biologische materiaal of adsorptiemateriaal. Dit is echter nog niet op praktijkschaal getest.

7. Koppelkansen

De meekoppelkansen van een biocascade zijn vergelijkbaar aan de voordelen van een helofytenfilter. Uniek hierbij is het oogsten van plantmateriaal, dat eventueel gebruikt kan worden als eiwitbron (algen en kroos) of bouw materiaal (riet). Afhankelijk van de locatie kan de biocascade zo ontworpen en ingericht worden, dat deze passend wordt gemaakt binnen het bestaande landschap.

8. Duurzaamheid

Het materiaal- en grondstofgebruik kan afhankelijk van de gekozen zuiveringsstappen aanzienlijk zijn doordat grote hoeveelheden drainzand (of ander goed doorlatend zand) en/of ijzerzand aangevoerd moeten worden om de biocascade op te bouwen. Daarnaast wordt er soms ook nog een geotextiel boven de drains toegepast om te voorkomen dat rietwortels de drains beschadigen. Het benodigde oppervlak van het filter is daarin bepalend. Aan de andere kant worden er geen chemicaliën toegepast en kunnen gebruikte grondstoffen hergebruikt worden aan het einde van de levensduur. Daarnaast kan de oogst voor materialen gebruikt worden voor nader te bepalen toepassingen (bv. bouw materiaal). Energieverbruik is afhankelijk van de inzet van een pomp (o.i.d.) laag of heel beperkt en de grondstoffen om het filter op te bouwen zijn veelal in voldoende mate beschikbaar. Aan- en afvoer van

materiaal gedurende de exploitatie is beperkt tot jaarlijks afvoeren van het maaisel. Mits goed ontworpen en beheerd, wordt de levensduur geschat op ca. 25 jaar, waarbij de drains waarschijnlijk de beperkende factor zijn.

9. Kosten

De investeringskosten bestaan hoofdzakelijk uit het leveren en aanbrengen van een drainerende onderlaag (bv. drainzand), leveren en aanbrengen van een adsorptiemateriaal (bv. ijzerzand), het pompsysteem, het aanbrengen van een drainagesysteem met toebehoren en het aanbrengen van helofyten, zoals rietstekken. Voor wat betreft rietstekken zou het in sommige gevallen ook kunnen dat deze spontaan tot ontwikkeling komen. Daarnaast kunnen afhankelijk van de locatiespecifieke omstandigheden damwanden en geotextiel nodig zijn. Het aanbrengen van een drainerende onderlaag, toepassing adsorptiemateriaal en het drainagesysteem zijn met name de grootste kostenposten, omdat het ruimtegebruik van een biocascade voor een capaciteit van 10 m³/min groot is. Verder is bij het bepalen van de kosten geen rekening gehouden met grondaankoop, wat bij biocascades een aanzienlijk onderdeel van de totale kosten kan zijn. De operationele kosten zijn relatief laag, omdat het beheer eenvoudig is en hoofdzakelijk bestaat uit jaarlijks maaien en afvoeren. De beheer- en onderhoudsinspanning is dus beperkt zolang drains en bodem niet dichtslibben. De kosten zijn ingeschat en geschaald aan de hand van ramingen van Cusell *et al.* (2022).

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Een cascade met biologische componenten kan tot lagere effluentconcentraties leiden dan enkel een ijzerzandfilter of coagulatiesysteem. Deze cascades zijn breed inzetbaar door het combineren van verschillende zuiveringsprincipes. De indeling van een cascade met biologische componenten kan hierbij geoptimaliseerd worden per locatie. Een belangrijk onderdeel hierbij is het 'oogsten' van planten, kroos of algen. Dit wordt mede mogelijk gemaakt door het batchgewijs vullen van parallelle filtervakken. Hierdoor kunnen cascades met biologische componenten een lagere effluentconcentratie behalen dan andere technieken (bijv. lager dan 0,05 mg P/l).

De biologische component is vooral effectief bij hogere fosforconcentraties en inzet in het zomerhalfjaar. Bij lagere fosforconcentraties wordt de bijdrage van bezinken en adsorptie steeds belangrijker. Hierdoor is het benodigde oppervlak relatief groot en is er ook relatief veel beheer en onderhoud nodig. Cascades met biologische componenten zijn daardoor vooral interessant op locaties met een hogere influentconcentratie, lage gewenste effluentconcentratie en een specifieke afzetmarkt voor de biologische component.

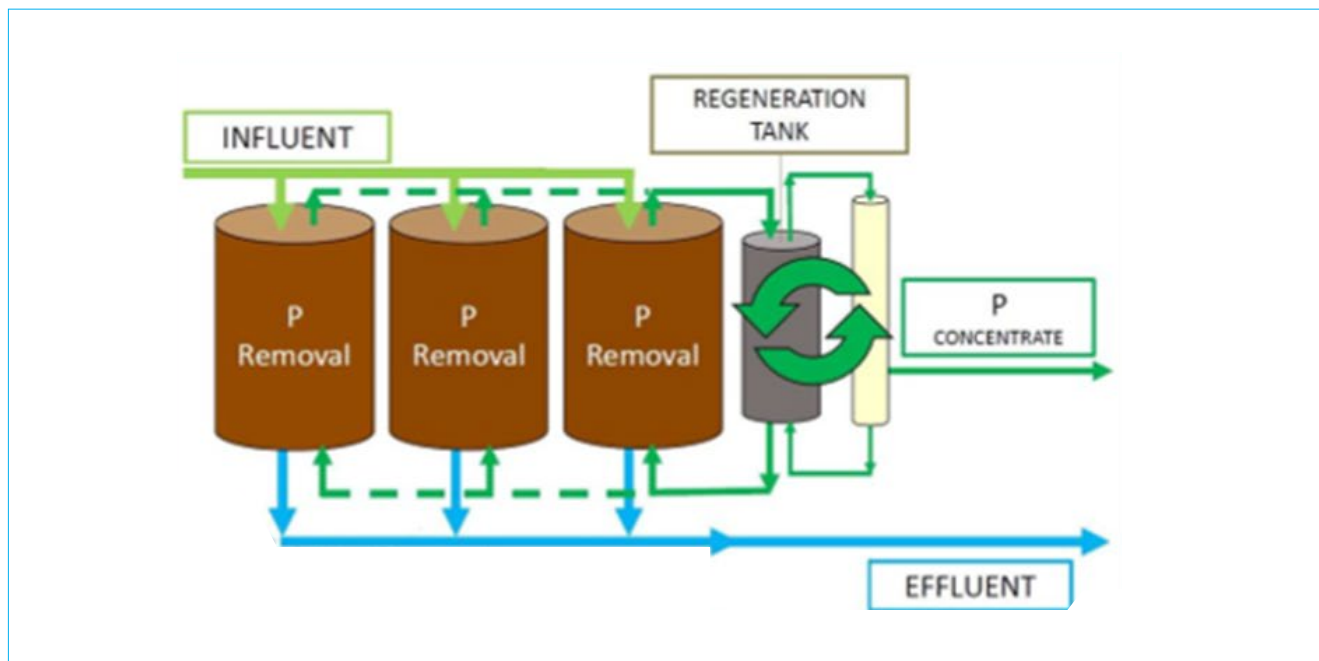
3.5 ADSORPTIE MET EEN REACTOR (BIOPHREE)

De adsorptie met een reactor heeft hetzelfde zuiveringsprincipe als ijzerzandfilters, maar werkt met een industriële installatie waarbij optimale condities worden bereikt. De systemen bevatten een voorfilter om particulier fosfor op te vangen en voorstoppingen te voorkomen. Daarna gaat het water door een reactorvat waarin een adsorptiemateriaal zit. Dit adsorptiemateriaal is speciaal ontwikkeld

voor een hoge bindingscapaciteit met PO_4 en potentiële terugwinning met behulp van een regeneratievloeistof. Bij verzadiging van het adsorptiemateriaal wordt de regeneratievloeistof door de reactors geleid om PO_4 te desorberen, waarna het adsorptiemateriaal opnieuw PO_4 kan adsorberen. Tenslotte kan de capaciteit opgeschaald worden door reactorvaten parallel te schakelen.

FIGUUR 6

Schetsmatige weergave van de BioPhree (links) waarbij aanvullend rekening moet worden gehouden met een voorfilter; een voorbeeld van de installatie in de praktijk (rechts).
Informatie afkomstig van Aquacare.nl.



In deze paragraaf wordt de hybride anionwisselaar (HAIX) van Aquacare (BioPhree) behandeld. De BioPhree-installatie is namelijk eerder uitgebreid onderzocht in een STOWA-onderzoek, waardoor veel informatie beschikbaar is (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). In dit onderzoek is ook een doorrekening gemaakt voor een installatie van 600 m³/u (10 m³/min). Bij dit debiet wordt een volume van 30 m³ adsorptiemateriaal genoemd door Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf (2022). Door het volume te delen door het debiet volgt een contacttijd van 3 minuten. Dit is aanzienlijk lager dan de 10-20 minuten gerapporteerd door Martin, *et al.* (2018). Daarom is er navraag gedaan bij Aquacare over de contacttijd. Hieruit blijkt dat gedurende praktijkproef bij de RWZI in Dronten, succesvol een contacttijd van 5 minuten is aangehouden (De Jager (Aquacare), e-mail, 30 augustus 2024). Voor de volledigheid wordt er rekening gehouden met de gerapporteerde dimensies én de dimensies op basis van een contacttijd van 5 minuten.

1. Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik van een BioPhree-installatie is ingeschat op 70 m² (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat 30 m³ adsorptiemiddel nodig is. Dit komt neer op ongeveer 136 parallelle BioPhree-kolommen van 220 liter die Aquacare op dit moment hanteert. Daarnaast is 45 m³ voor randapparatuur ingeschat, inclusief regeneratiesysteem. Er is hierbij geen rekening gehouden met het afvoeren van het regeneraat.

Wanneer van een contacttijd van 5 minuten wordt uitgegaan, wordt het ruimtegebruik groter. Bij een debiet van 10 m³ per minuut en een contacttijd van 5 minuten is een volume van 50 m³ aan adsorptiemiddel nodig. Dit komt neer op 228 parallelle BioPhree-kolommen van 220 liter¹. Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf (2022) hielden daarnaast de regel aan dat het totaalvolume van de installatie 2,5 keer het volume van het adsorptiemateriaal is. Dit vertaalt naar 125 m³ aan apparatuur. Het ruimtebeslag zal hierbij waarschijnlijk tussen de 75 en 100 m² liggen. De verwachting is dat

bij opschaling de constructie compacter kan worden gebouwd en de randapparatuur nog maar 50% van het volume inneemt (De Jager (Aquacare), e-mail, 30 augustus 2024).

2. Beheer

Het adsorptiemateriaal moet elke 7 jaar worden vervangen uitgaande van regeneratie gedurende deze periode. Verder zal het regeneratiemateriaal (natronloog) moeten worden aangevoerd en het met PO₄ verzadigde regeneratiemiddel worden afgevoerd. Dit is mogelijk via leidingen, maar transport over de weg is ook een optie. Het zal aan de influentconcentratie liggen hoe vaak het verzadigde regeneratiemateriaal moet worden vervangen, mocht dit niet continu afgevoerd worden. Het fosfor kan lokaal teruggewonnen worden (regeneratie), al is het in verband met de schaalgrootte ook mogelijk om dit op een centrale locatie te doen. Bij lokale regeneratie hoeft alleen het teruggewonnen fosfor afgevoerd te worden en kan het natronloog worden hergebruikt. Tenslotte is periodiek beheer nodig voor de pompen en chemicaliën.

3. Risico's

Doordat de techniek redelijk nieuw is, zijn de risico's grotendeels onbekend. Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf (2022) benoemen de kleine kans dat het effluent te basisch kan zijn na een regeneratiecyclus. Er blijft namelijk wat natronloog achter in de adsorptiekolom. Dit kan bij de volgende spoeling voor basische omstandigheden zorgen. Echter kan dit opgevangen worden door een zuur toe te voegen in de effluent opvangtank. Verder werkt Aquacare met twee opties aan adsorptiemiddelen in de BioPhree. Beide adsorptiematerialen zijn volgens de producent niet milieuschadelijk. Er is geen openbare data om dit te ondersteunen. Praktijkproeven lieten echter zien dat bij correct functioneren

¹ Het is aannemelijk dat bij opschaling grotere kolommen worden toegepast waardoor minder parallelle kolommen nodig zijn.

er geen milieuvreemde stoffen in het water komen. Echter zal monitoring bij grotere installaties moeten aangeven dat dit continu het geval is.

4. Prestaties

In het onderzoek is een constante effluentconcentratie van 0,02 mg P/l bereikt aan P_{tot} (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Aquacare geeft aan dat dit getest is voor influentconcentraties tussen de 0,15 en 5,0 mg P/l. Dit komt neer op een zuiveringsrendement tussen de 87 en 99 procent. De verdere samenstelling van het influentwater is niet bekend, waardoor het effect van competitieve ionen en verschillen in fosforfracties moeilijk is mee te nemen. Bij de praktijkproef werd wel een voorfilter gebruikt, dat het particulier fosfor afvangt. Aquacare adviseert het voorfilter om verstopping van de BioPhree-kolommen te voorkomen. Zonder het voorfilter zal organisch materiaal adsorberen aan het filtermateriaal en/of het filtermateriaal verstopping, wat de adsorptiecapaciteit van een HAIX-systeem vermindert (Guida, Rubertelli, Jefferson, & Soares, 2021).

Verder is de contacttijd van PO_4 belangrijk om tot lagere concentraties te komen (Martin, *et al.*, 2018). Een langere contacttijd zorgt voor lagere effluentconcentraties en vaker gebruik van een kolom voor een regeneratiecyclus (Usman, Aturagaba, Ntale, & Nyakairu, 2022). Op basis van deze onderzoeken kan een contacttijd van 3 minuten (bijna) niet resulteren in een effluent van 0,02 mg P/l aan P_{tot} . Een contacttijd van 10 minuten zal dan ook realistischer zijn. Verder is mogelijk om het debiet door de BioPhree en de contacttijd actief te variëren. Hierdoor is er de optie om de BioPhree aan te sturen op gewenste effluentconcentraties. Op deze manier is een optimale verhouding tussen effluentconcentratie en debiet mogelijk met snelle bijsturing.

5. Volwassenheid

BioPhree heeft de installatie op proefschaal getest met 5 m³/u en 7,5 m³/u. Opschaling is goed mogelijk met parallelschakelingen, maar dit is in de

praktijk nog niet gedaan. Ook is de levensduur van de systemen nog niet in de praktijk bewezen. De intensiteit in onderhoud van meerdere kolommen en de randapparatuur (die voornamelijk automatisch werken) is ook nog niet bekend.

6. Toekomstbestendigheid

Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf (2022) geven aan dat het adsorptiemateriaal eens per 7 jaar moet worden vervangen. Gedurende deze 7 jaar zal het adsorptiemateriaal regelmatig geregenereerd worden om zo fosfor terug te winnen. Echter is ingeschat dat na 7 jaar het adsorptiemateriaal is uitgeput. Dus per 7 jaar kan ervoor gekozen worden om een nieuw/verbeterd adsorptiemateriaal te gebruiken. De verdere technische installatie gaat naar waarschijnlijkheid tussen de 15-20 jaar mee. Verder is er met de BioPhree een optie tot terugwinning van fosfor gedurende de operationele periode. De precieze uitwerking hiervan wordt op dit moment onderzocht bij onder andere RWZI Dronten als onderdeel van een STOWA onderzoek (Waterschap Zuiderzeeland, nd). Tenslotte is er een grote variatie in debieten mogelijk door het gebruik van een parallelschakeling. Hierdoor wordt bij lagere debieten nog steeds hetzelfde verwijderingsrendement gehaald. Het is waarschijnlijk ook mogelijk om ijzerzand als adsorptiemateriaal te gebruiken. Ijzerzand heeft waarschijnlijk wel een lagere adsorptiecapaciteit en hogere contacttijd nodig. Dit maakt de toepassing van ijzerzand in een reactor minder kansrijk. Ijzerpellets zijn hierbij mogelijk interessanter (hoofdstuk 3.9). Voor alternatieven moet daarbij wel worden gekeken of er een mogelijkheid tot regeneratie is van het adsorptiemateriaal en wat de methode van regeneratie is. Zonder regeneratie is het adsorptiemateriaal niet/minder geschikt voor de BioPhree.

7. Koppelkansen

Door het terugwinnen van fosfor kan de BioPhree producten voor landbouw en industrie creëren en verkopen. Op dit moment wordt het regeneratieproces getest bij een proefinstallatie op RWZI Dronten. De effectiviteit van

terugwinning wordt waarschijnlijk gepubliceerd na deze praktijkproef. Op korte termijn lijkt dit nog geen economisch haalbare optie. Daarnaast is het mogelijk om dezelfde installatie met ander adsorptiemateriaal te gebruiken voor stikstof en dit in serie te schakelen met PO_4 verwijdering (Huang, Guida, Jefferson, & Soares, 2020).

8. Duurzaamheid

Volgens Aquacare zijn er twee voorkeurtypen aan adsorptiemateriaal. Het gaat om een opgewerkt product uit de drinkwaterindustrie en een polymeer-gebaseerd materiaal. Beide adsorptiematerialen en het regeneratiemateriaal (i.e., natronloog) worden niet beschouwd als schaarse grondstof (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Het energieverbruik wordt ingeschat op 150.000 kWh/j voor de BioPhree-installatie (inclusief regeneratie). Hier komt nog een extra 54.750 kWh/j bij voor een voorfiltratie met doekenfilter. Materiaalaan- en -afvoer moet eens per 7 jaar. Na het afvoeren kan het materiaal verder verwerkt worden voor fosforterugwinning door precipitatie met calcium of via nano-filtratie. Het schoonspelen van het voorfilter en afvoeren van het spoelwater zal echter wel vaker nodig zijn. Het is nog niet inzichtelijk gemaakt hoe het spoelwater en slib worden verwerkt.

9. Kosten

De investeringskosten zijn relatief hoog door het opbouwen van de parallel geschakelde kolommen, civieltechnische, werktuigbouwkundige en elektrotechnische componenten. De operationele kosten worden voornamelijk bepaald door het energieverbruik, het chemicaliënverbruik en de beheer- en onderhoudsinspanning van het systeem. Ondanks dat de technologie bijna volledig geautomatiseerd is, dienen voorfilters onderhouden te worden en dient de regeneratievloeistof en het adsorptiemateriaal periodiek vervangen te worden. De kosten voor het adsorptiemateriaal worden beperkt door het materiaal te regenereren en het fosfor terug te winnen. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de afvoer van slib uit de voorfilters. De inschatting van de kosten is gebaseerd op (Kruitwagen, Luimstra, & van

der Werf, 2022). Hier blijkt eveneens uit dat de kosten per verwijderde kg P omhooggaan naarmate de influentconcentraties omlaag gaan.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Een BioPhree installatie haalt heeft een hoge prestatie op een klein oppervlak. Door het combineren van een voorfilter en een reactorvat met adsorptiemateriaal, wordt zowel particulier fosfor als PO_4 verwijderd uit het oppervlaktewater. Hiermee is in proeven een P_{tot} effluentconcentratie van 0,02 mg P/l behaald bij een influentconcentratie tussen de 0,15 en 5,0 mg P/l. Daarnaast is de techniek in theorie ook in staat om fosfor terug te winnen. De praktijk van terugwinning wordt momenteel getest bij een RWZI in Dronten. Het nadeel is dat deze techniek nog nauwelijks op grote schaal is toegepast voor oppervlaktewater. Hierdoor zijn de kosten (zowel investeringskosten als operationele kosten) en risico's relatief groot.

Daarnaast zijn de rendementen en capaciteiten die door de leverancier zijn genoemd ook nog niet onafhankelijk te verifiëren. Er is zeker potentie, waarbij wordt verwacht dat de techniek eerst verder ontwikkeld zal worden bij RWZI's. Wanneer de technieken hier succesvol is, is het interessant om dit ook toe te passen voor oppervlaktewater met grotere debieten en lagere (influent en effluent) concentraties.

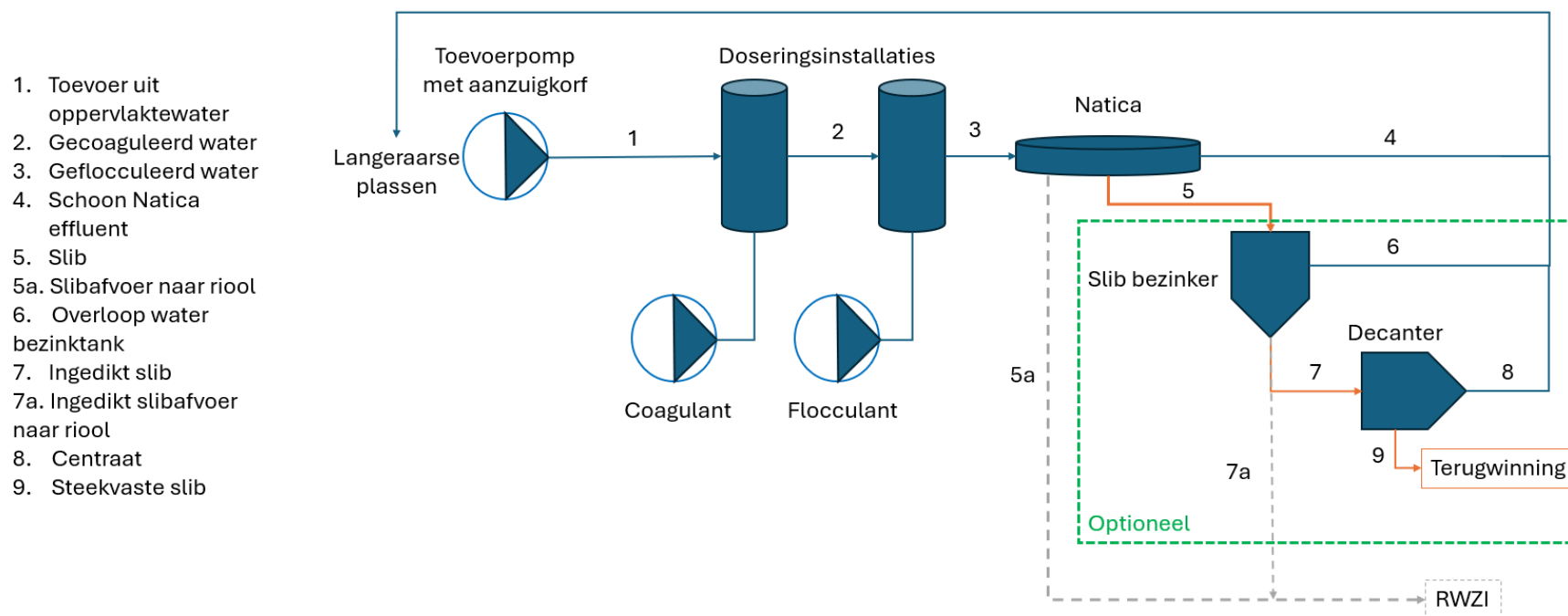
3.6 WATERWASSER

De waterwasser bestaat uit een doseringsinstallatie en een lage g-kracht seperator (Natica seperator) van het bedrijf AQUA HD. De doseringsinstallatie voegt een coagulant en flocculant toe. Hierdoor wordt PO_4 gecoaguleerd en samen met particulier fosfor geflocculeerd. Vervolgens worden deze vlokken naar de buitenrand van de seperator geslingerd. Hier wordt het gescheiden van het overige water. Dit resulteert in een met fosfor verrijkte reststroom van 10% en een schoonwaterstroom van 90%.

De reststroom kan vervolgens indien nodig verder ingedikt en verwerkt worden om eventueel fosfor terug te winnen. Het indikken verhoogt de fosfaatterugwinningsfactor naar 95 tot 99%. De waterwasser is enkel nog getest tijdens een praktijkproef op de Langerse Plassen (Hoek & van den Bulk, 2021). Hierbij is een debiet van $3,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ gebruikt. Daarnaast is een doorkijk van een full-scale installatie met een debiet van $300 \text{ m}^3/\text{uur}$ ($5 \text{ m}^3/\text{min}$) gemaakt.

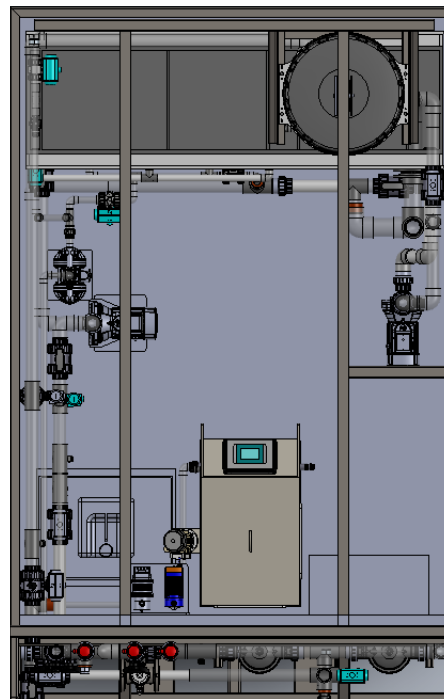
FIGUUR 7

Schematische weergave waterwasser. De nabehandeling van het slib met behulp van een decanter is een optionele stap afhankelijk van projectkeuzes en locatiespecifieke omstandigheden. Het kan namelijk zijn dat vergaande ontwatering van het slib niet nodig is. Bron: schema is opgesteld door N. Nijboer (Arcadis) op basis van informatie van de leverancier.



FIGUUR 8

Overzicht van de gehele installatie (links) en bovenaanzicht van de container (rechts) voor de pilot op de Langeraarse Plassen (Hoek & van den Bulk, 2021).



1. Ruimtegebruik

Voor 5 m³/min is er ca. 300 m² nodig voor de waterwasser inclusief slibopvang en verwerking, waarbij de apparatuur hoofdzakelijk in zeecontainers wordt geplaatst. Daarbij dienen de containers bereikbaar en geschikt te zijn voor vrachtwagens. Afval/transportvolumes kunnen geminimaliseerd worden door een Sedicanter (speciale decanter van de firma Flottweg) te gebruiken om het slib verder in te dikken tot een steekvaste pasta. Deze steekvaste pasta moet

vanuit de Sedicanter naar de opvangcontainers worden getransporteerd met een transportband. Voor een installatie van 300 m³/u is een gebouw van 15 bij 14 meter nodig (210 m²). Dit is exclusief oppervlak voor slibontwatering en opvang. Wel kan worden aangenomen dat dit maximaal om 1.500 m² moet gaan, wanneer het oppervlak van de slibdecanter en slibcontainers lineair groeit met de capaciteit van de installatie. Uitgaande van deze lineair groei zal bij 10 m³/min (600 m³/u) maximaal 3.000 m² nodig zijn voor de

installatie. Het gaat hierbij om verhard oppervlak dat beschikbaar moet zijn voor vrachtwagens voor het ontwaterde slibtransport. Dit is dus de benodigde ruimte voor de doseringsinstallaties, Natica, bezinktank, Sedicanter en afvalopslag. Voor de doseringsinstallaties en de Natica-seperator is maximaal 420 m² aan oppervlak nodig. Het direct transporteren van het Natica-slib naar de riolering bijvoorbeeld vermindert het oppervlak dus aanzienlijk.

2. Beheer

De beheercomponenten van de waterwasser zijn vergelijkbaar met die van een ijzerchloride doseringsinstallatie. Zo moeten chemicaliën worden aangeleverd, enkele keren per maand slib worden afgevoerd en de (elektro)technische installatie worden onderhouden. Verder zijn er ook meer installaties die onderhouden moeten worden. Naast de doseerinstallaties voor de coagulant en flocculant moeten ook de Natica, Sedicanter en slibtransportschroeven worden onderhouden. Inclusief de benodigde leidingen en elektra. Aangezien de Natica geen bewegende onderdelen heeft, zal het onderhoud vooral liggen bij de Sedicanter en transportschroeven.

3. Risico's

De waterwasser gebruikt in de praktijkproef coagulant (FeCl₃) en flocculant (EcoPure SPC200400). Hierdoor worden chemicaliën toegevoegd aan het water en ontstaan ongeveer dezelfde risico's als bij coagulatie. De praktijkproef toonde aan dat dit voor hogere ijzer- en chlorideconcentraties zorgde in het uitspoelende water. Wel bleven de chlorideconcentraties onder de streefwaarden van het waterschap. De uitspoelconcentraties van de flocculant waren niet gemeten. Daarnaast is ook niet gekeken naar de effluentconcentraties van zware metalen of de zuurgraad van het effluent. Door het gebruik van FeCl₃ is er een klein risico dat de zuurgraad afneemt en de concentraties van zware metalen toenemen via desorptie uit de waterbodem of vervuiling van het gebruikte ijzerzout (van der Oost, 2020; STOWA, 1993). Er kunnen overigens verschillende coagulanten en flocculanten gebruikt worden zolang fosfor (en eventueel ook algen) maar gebonden wordt

in vlokken. Naast de potentiële risico's voor de waterkwaliteit werden er ook andere risico's opgemerkt tijdens de praktijkproef.

Zo zorgde de waterwasser gedurende de praktijkproef voor geluidsoverlast, waardoor de keuze werd gemaakt om de installatie 's nachts uit te zetten. Hierdoor zakten de vlokken uit in de Natica-installatie, waardoor de kans op verstopping toeneemt. Het stilstaande water zorgde voor biofouling (aangroei van biofilm). Hierdoor slibden de leidingen dicht. Als oplossing werd zoutzuur of zand toegevoegd of werd 1 minuut gespoeld met oppervlaktewater. Volgens AQUA HD kwam de geluidsoverlast door een luchtcompressor. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een geluidsarme compressor kan de waterwasser continu draaien. Dit voorkomt dan ook het risico op biofilmvorming. Tenslotte kan het opgevangen slib misschien voor geuroverlast zorgen. Dit is niet gebleken uit de praktijkproef, maar kan bij opschaling potentieel voorkomen.

4. Prestaties

Door de hoge toevoer van de coagulant FeCl₃ (0,43 l/u) wordt een stoichiometrische Fe/P-verhouding van 26 gerealiseerd. Dit zit ver boven de verhouding van 1/1,5 die vaak bij rioolwaterzuiveringen wordt gebruikt (STOWA, 1993). Door deze hoge verhouding kunnen zeer lage P_{tot} concentraties worden gerealiseerd (Szabó, *et al.*, 2008). De praktijkproef van de waterwasser had met een gemiddelde P_{tot} winterconcentratie van 0,5 mg P/l en een gemiddelde P_{tot} zomerconcentratie van 0,15 mg/l in het influent een continue P_{tot} effluentconcentratie van 0,05 mg P/l (Hoek & van den Bulk, 2021). De PO₄ concentratie lag zelfs grotendeels onder de detectiewaarde van 0,006 mg P/l bij influentconcentraties tot 0,45 mg/l. Hierdoor is het zuiveringsrendement van de waterwasser ongeveer 80%. Waarbij in het voorjaar een wat lager rendement wordt gehaald door een lagere influentconcentratie. De lage influentconcentratie kwam doordat algen PO₄ uit het water opnemen. Door het toevoegen van de Natica achter de doseringsinstallaties wordt organisch gebonden fosfor dus ook goed afgevangen. Dit zorgt voor continue lage fosforconcentraties gedurende het jaar. Het direct afvangen en verwerken

van het fosforrijke slib voorkomt ook het probleem van nalevering van fosfor uit de bodem van een bezinksloot. Tot slot liet de praktijkproef een paar uitschieters zien, waarbij dezelfde chlorideresultaten tussen in- en effluent lijken weer te geven dat er geen coagulant was toegevoegd op deze dagen. Het toevoegen van een coagulant is dus essentieel voor een succesvolle installatie.

5. Volwassenheid

Er bestaat in Nederland nog maar één praktijkproef met de waterwaster voor oppervlaktewater. Hierdoor is de waterwaster enkel nog getest op kleine schaal (3,5 m³/uur). Hoek & van den Bulk (2021) hebben een doorkijk gemaakt naar een volschaal installatie van 300 m³/u. Er is echter nog weinig praktische ervaring met een grotere waterwaster. Hierdoor kunnen onvoorziene problemen ontstaan bij schaalvergroting. AQUA HD heeft aangegeven dat er al wel enige ervaring is met grotere installaties, want er draait er een Natica-seperator in Maleisië met rivierwater op 200 m³/u. Verdere ontwikkeling van de installatie in Europa is op dit moment ongewis in verband met de verhuizing van het bedrijf van Israël naar de Verenigde Staten. Op dit moment worden er vanuit de Verenigde Staten geen zaken gedaan met Europa.

6. Toekomstbestendigheid

Aangezien de waterwaster ook doseringsinstallaties gebruikt, zal de toekomstbestendigheid van dit deel van de installatie lijken op die van coagulatiesystemen (par. 3.2). Hoek & van den Bulk (2021) houdt verder rekening met een werktuigbouwkundige afschrijvingsperiode van 15 jaar. Tijdens de praktijkproef is aangetoond dat het coagulent en flocculent makkelijk aangepast kunnen worden voor prestatieverbeteringen of uit duurzaamheidsoverwegingen. Verder bestaat het systeem uit verschillende modules en meerdere Natica's. Zo opperen Hoek & van den Bulk (2021) om de coagulantdoseringsinstallatie te vervangen door elektrocoagulatie om chemicaliëngebruik voor coagulatie te voorkomen. Daarnaast bevat een systeem van 300 m³/u minimaal 25 Natica-modules in parallelschakeling. Bij onderhoud of vervanging van een module kan de installatie dus blijven

werken. Tenslotte is er ook veel ervaring met slibopvang en verwerking binnen rioolwaterzuivering.

7. Koppelkansen

Doordat de waterwaster ook algen afvangt, verlaagt de installatie ook de hoeveelheid stoffen die opgenomen zijn door de algen. Zo verwijdert de waterwaster ook organisch materiaal en stikstof. De stikstof-totaalwaarden vallen hierdoor ook onder het streefpeil van 2,5 mg N/l in de zomerperiode. In de winterperiode is het rendement een stuk lager aangezien stikstof voornamelijk aanwezig is in oplosbare vorm.

8. Duurzaamheid

Het energieverbruik van de waterwaster (inclusief ontwatering) is relatief hoog. Verder wordt er relatief veel ijzerchloride toegepast en is er een polymeer (flocculant) nodig om het proces goed te laten werken. Daarnaast is er sprake van een reststroom slib dat verwerkt moet worden. Voor de reststroom wordt er met deze installatie wel een methode toegepast om het slib zoveel mogelijk te ontwateren waardoor het materiaal mogelijk geschikt is voor andere toepassingen (bv. in de landbouw). Het feit blijft dat het materiaal opgehaald en afgevoerd moet worden. Afhankelijk van de beschikbare ruimte en de capaciteit van de installatie dient dit waarschijnlijk meerdere malen per week of per maand te gebeuren. Hierbij zal de slibproductie afhangen van het debiet en de hoeveelheid fosfaten, algen en gedoseerde chemicaliën.

9. Kosten

De investeringskosten zijn relatief hoog door de diverse voorzieningen die er getroffen moeten worden om de waterwaster op te bouwen. Dit bestaat uit de waterwasterinstallatie, toevoerpompen, verhardingen, leidingwerk, decanter, transportschroeven en elektrotechnische componenten. Circa 40% van de investeringskosten gaat zitten in de ontwateringsstap van het slib met de Sedicanter. Mogelijk is een vergaande ontwateringsstap niet noodzakelijk en kan het slib op andere manieren worden afgevoerd, zoals bijvoorbeeld via de

riolering. Daarnaast is een full-scale waterwasser met een capaciteit van 10 m³/min nog niet in de praktijk gerealiseerd waardoor er onzekerheden en risico's zijn met betrekking tot de kostencomponenten. Bovendien is de waterwasser een innovatieve techniek ontwikkeld door de firma AQUA HD waardoor ook rekening gehouden moet worden met de nodige engineering, risico's en afstemming om het concept geschikt te maken/te optimaliseren voor een projectspecifieke locatie. Op basis van de ramingen gemaakt door Hoek & van den Bulk (2021) is dit een significante kostenpost. De operationele kosten zijn eveneens relatief hoog. De operationele kosten bestaan in hoofdzaak uit het beheer en onderhoud van de installaties, slibverwerking, energieverbruik, ijzerchloride en het polymeerverbruik.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

De waterwasser haalt een hoge prestatie op een klein oppervlak. Door het combineren van coagulatie met de Natica, wordt zowel particulier fosfor als PO₄ verwijderd uit het oppervlaktewater. Hiermee werd in de praktijkproef een continue P_{tot} effluentconcentratie van 0,05 mg P/l behaald bij een influentconcentratie tussen de 0,15 en 0,5 mg P/l. Deze prestaties zijn onafhankelijk getest. Daarnaast wordt het fosforrijke slib opgevangen en kan dit mogelijk nuttig toegepast worden. Het hergebruiken van het afgevangen slib is echter nog niet getest. Verder is deze techniek slechts één keer toegepast voor oppervlaktewaterzuivering gedurende een praktijkproef bij de Langerse plassen. Hierdoor zijn de kosten (zowel investeringskosten als operationele kosten) en risico's relatief groot. De waterwasser gebruikt daarnaast ook relatief grote hoeveelheden ijzerchloride en flocculant, wat tot relatief hoge operationele kosten leidt. Daarnaast zorgt dit ook voor significant hogere chloridegehalten in het oppervlaktewater. De techniek laat echter wel zien dat constante P_{tot} effluentconcentraties onder de 0,05 mg P/l gehaald kunnen worden. Er is dus zeker potentie, waarbij wordt verwacht dat de techniek eerst verder geoptimaliseerd zal worden op de Amerikaanse markt. Wanneer vervolgens de kosten verlaagd zijn, de reststroom hergebruikt kan worden en de techniek weer beschikbaar komt op de Europese markt, is het interessant om de techniek in te zetten voor oppervlaktewaterzuivering. Aandachtspunten zijn dan wel de chloride- en flocculantconcentraties in het effluent en slib.

3.7 BIOREACTOR (NUTREACT)

Een bioreactor creëert optimale condities voor biologische processen om fosfor op te nemen. Vaak zijn dit algen met symbiotische bacteriën die snel en effectief PO_4 kunnen opnemen. Bioreactoren hebben net als adsorptiereactoren een voorfilter nodig om verstopping te voorkomen en specifiek fosfor te verwijderen. In de reactor zitten zogenoemde cartridges waarop de organismen groeien. Om de groei te stimuleren, kan een koolstofbron worden toegevoegd. Bij verzadiging van het filter moeten de cartridges met biologisch materiaal verwijderd worden. Het biologisch materiaal kan vervolgens worden hergebruikt of er kan fosfor uit worden gewonnen.

In dit hoofdstuk wordt als voorbeeld de Nutreact bioreactor van Avecom gebruikt. Deze is namelijk ook uitgebreid onderzocht in een eerder STOWA-onderzoek (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Het is belangrijk om te vermelden dat de genoemde ervaringen en cijfers zijn gebaseerd op basis van informatie afkomstig van de ontwikkelaars van de installatie en zijn daardoor niet eenduidig te verifiëren.

1. Ruimtegebruik

Avecom gaat uit van een volume van 400 m^3 bij een debiet van $600 \text{ m}^3/\text{uur}$ voor enkel de bioreactoren. Deze reactoren worden dan parallel geschakeld. Avecom gaf aan dat dit volume wordt vertaald naar een oppervlak van 160 m^2 . Dit is inclusief randapparatuur. Echter is een reactor met dit volume nog niet gebouwd en moet een aanstaande praktijkproef in Bergen-op-Zoom meer inzicht geven in de dimensies van grotere installaties (Boeren (Avecom), e-mail, 2 september 2024).

2. Beheer

Beheer is vooral nodig voor het standaard functioneren van de installatie. Dit gaat om het onderhoud van filters en pompen, het aanvullen van de koolstofbron en het oogsten van de biomassa. Het is onduidelijk met welke herhalingsduren deze beheertaken nodig zijn. Naar waarschijnlijkheid is dit afhankelijk van de groeisnelheid van de biomassa en de doseringshoeveelheid van de koolstofbron.

3. Risico's

De techniek is redelijk nieuw en alleen op proefschaal getest. De risico's met de installatie zijn dus nog slecht inzichtelijk. Uit de praktijkproeven bleek echter dat er geen grote risico's aan de techniek zitten, maar op grote schaal is dit op de lange termijn niet duidelijk. Er is een kans op uitspoeling van azijnzuur of dragermateriaal/biomassa, echter bij goed functioneren zal in principe niets vanuit de installatie in het oppervlaktewater terechtkomen. Daarnaast kan de uitspoeling van azijnzuur of biomassa ook gemeten worden, waarna een goede werking hersteld kan worden.

4. Prestaties

Avecom geeft aan dat een P_{tot} effluentconcentratie van $0,01 \text{ mg/l}$ mogelijk is onder alle condities. Deze concentratie is ook gedurende de praktijkproef

gehaald. Hierbij is geen inzicht gegeven in de influentsamenstelling en verblijftijd. Een effluentconcentratie van 0,01 mg/l is namelijk het streven en hierna wordt bijgestuurd met behulp van extra toediening van de koolstofbron of opschaling van het systeem. De omschreven effluentconcentraties zijn erg laag en bijzonder consistent. Vergelijkbare systemen uit de literatuur laten meer variatie zien (60-99% zuiveringsrendement) (Bunce, Ndam, Ofiteru, Moore, & Graham, 2018; Jia, *et al.*, 2023). Doordat Avecom niet aangeeft welke bacteriën, algen en/of schimmels zijn gebruikt, zijn de getallen moeilijk te verifiëren met onafhankelijke bronnen. Daarnaast is gedurende de praktijkproef een voorfilter gebruikt. Het belang van deze voorfilters voor particuliere fosforverwijdering is niet omschreven. Mogelijk wordt zonder het voorfilter minder P_{to} verwijderd.

5. Volwassenheid

Avecom heeft de installatie enkel op proefschaal getest (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). Opschaling is theoretisch snel realiseerbaar met behulp van parallelschakelingen, maar dit is in de praktijk nog niet getest. Ook is de levensduur van de systemen nog niet in de praktijk bewezen. Er zijn dus nog veel onzekerheden rondom de opschaalbaarheid en toepasbaarheid van de Nutreact. Om meer inzichten te geven, vindt eind 2024 een praktijkproef plaats bij Bergen op Zoom.

6. Toekomstbestendigheid

Op de installatie zit een afschrijvingsperiode van 15 jaar. Gedurende deze periode kan gewisseld worden in koolstofbron en biologisch materiaal. De micro-organismen zijn namelijk geplaatst op dragermateriaal, waarbij het dragermateriaal met micro-organismen moet worden vervangen wanneer de micro-organismen uitgegroeid zijn. Indien efficiënter werkende micro-organismen zijn gevonden, kunnen deze in de installatie geplaatst worden. Hierdoor is er de mogelijkheid om de techniek snel aan te passen aan de nieuwste wetenschappelijke bevindingen. Verder is er door de parallelschakeling de mogelijkheid om verschillende micro-organismen te

testen per schakeling. Verder wil Avecom in de toekomst uitzoeken wat gedaan kan worden met de gevormde biomassa.

7. Koppelkansen

Naast fosfor verwijdert de Nutreact ook stikstof tot een concentratie onder 0,1 mg N/l. Hierdoor is maar één installatie nodig voor watersystemen waar zowel teveel fosfor als stikstof aanwezig is.

8. Duurzaamheid

In de Nutreact-technologie worden geen schaarse grondstoffen gebruikt. De voornaamste grondstoffen die verbruikt worden, zijn azijnzuur en het dragermateriaal. Avecom en Dutch Water Tech geven aan dat voor een installatie van 10 m³/min 74.000 kg azijnzuur per jaar gebruikt wordt en dat het dragermateriaal moet worden afgevoerd. Het energieverbruik is beperkt en er wordt gebruik gemaakt van P-accumulerende micro-organismen.

9. Kosten

De investeringskosten zijn relatief laag doordat er weinig civieltechnische, werktuigbouwkundige en elektrotechnische componenten worden gebruikt voor het opbouwen van de installatie. Wel dient opgemerkt te worden dat een full-scale bioreactor met een capaciteit van 10 m³/min nog niet in de praktijk gerealiseerd is waardoor er onzekerheden en risico's zijn met betrekking tot de kostencomponenten. Bovendien is de bioreactor een innovatieve techniek waardoor ook rekening gehouden moet worden met de nodige engineering, risico's en afstemming om het concept geschikt te maken/ te optimaliseren voor de projectspecifieke locatie. De operationele kosten zijn relatief hoog. De operationele kosten bestaan in hoofdzaak uit het beheer en onderhoud van de installaties, slibverwerking, energieverbruik, azijnzuurverbruik en het dragermateriaal (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022). De gegevens zijn aangeleverd door de ontwikkelaars van de techniek, maar hierbij lijkt geen rekening gehouden met de afvoer van de reststromen. Juist de afvoer van de reststroom kan een aanzienlijke kostenpost zijn waar men rekening mee moet houden.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Een Nutreact installatie haalt een hoge prestatie op een klein oppervlak. Door het combineren van een voorfilter en een reactorvat met een fosfaat verwijderende biomassa, wordt zowel particulier fosfor als PO_4 verwijderd uit het oppervlaktewater. Hiermee wordt geclaimd dat een P_{tot} effluentconcentratie van 0,01 mg P/l gehaald kan worden onder alle condities. De gewenste effluentconcentratie bepaalt hierbij de grootte van de opstelling en de toediening van een koolstofbron. Door het opnemen van het fosfor groeit de biomassa. De volgroeide biomassa kan vervolgens worden verwijderd uit het reactorvat en mogelijk gebruikt worden voor andere doeleinden. Deze weg van terugwinning is echter nog niet afdoende getest. De Nutreact kan potentieel tot zeer lage effluentconcentraties komen en heeft weinig ruimte nodig. Het nadeel is dat deze techniek nog nauwelijks is toegepast. Hierdoor zijn de kosten (zowel investeringskosten als operationele kosten) en risico's relatief groot. Daarnaast zijn de rendementen en capaciteiten die door de leverancier zijn genoemd ook nog niet onafhankelijk te verifiëren. Het lijkt hierbij vaak te gaan om de verwijdering onder optimale omstandigheden die vaak niet van toepassing zijn bij de zuivering van oppervlaktewater (fluctuerende debieten, fosforvormen en chemische omstandigheden). Er is zeker potentie, waarbij is aangegeven dat de techniek zich vooral zal focussen op oppervlaktewater (Avecom, e-mail, 9 februari 2024). Verdere praktijkproeven moeten uitwijzen in hoeverre de Nutreact op grotere schaal kan worden toegepast.

3.8 BEZINKEN EN INDUSTRIËLE FILTERS

Bezinken en industriële filters verwijderen alleen particulier fosfor. Veel installaties gebruiken deze filters als eerste stap om verstopping te voorkomen. Op basis van deeltjesgrootte of massa wordt een bepaald percentage van het particulier fosfor verwijderd. Bij bezinken gaat het om een verlaging van de stroomsnelheid, waardoor zwaardere deeltjes naar de bodem zakken. Bezinking of voorfiltratie is vaak de eerste stap in een zuiverings- of defosfateringsinstallatie. Industriële filters houden de grotere deeltjes tegen, waarna water met kleinere deeltjes en opgeloste stoffen doorstromen. Industriële filters kunnen ook achter elkaar worden geplaatst om verschillende fracties op grootte te scheiden. Hierdoor raken de filters minder snel verstopt. Voorbeelden van industriële filters zijn zand-, doek-, schijf- en ringfilters. De filters variëren in prijs en installatiegrootte.

1. Ruimtegebruik

In het ruimtegebruik van de installaties zit veel variatie. Eenvoudige technieken zoals bezinkplassen of zandfilters hebben een fors groter oppervlak nodig dan industriële technieken als doek-, schijf- en ringfilters. Op basis van uitgangspunten uit Voort, Wind, & Baars (2010) blijkt dat een bezinkslot/plas minimaal 700 m² heeft voor polderwater en 400 m² voor rivierwater bij 10 m³/min. Echter worden bezinksloten/plassen vaak groter ontworpen, wat neerkomt op een oppervlakte van ongeveer 0,15 ha bij 10 m³/min. Bij veel organisch materiaal met een lage dichtheid zijn nog grotere dimensies nodig. Bij zandfilters is de doorstroomsnelheid bepalend. Uitgaand van een zeer goede doorlatendheid (>10 m/dag) is maximaal 0,15 ha nodig voor een debiet van 10 m³/min. Tenslotte zitten doek-, schijf- en ringfilters vaak al ingecorporeerd in reactorinstallaties om verstopping in de reactoren te voorkomen. Hierdoor is ervan uitgegaan dat een fractie van het ruimtegebruik van de reactorsystemen in de voorfiltratie gaat zitten via deze filters. Dit komt neer op ongeveer 0,003 ha (30 m²).

FIGUUR 9

Bezinkplas Nieuwe Dordtse Biesbosch (links) en foto doekfiltratie Wendlingen afkomstig uit De Wilt & Roeleveld (2020) (rechts).



2. Beheer

Het beheer van bezinklocaties en zandfilters is sterk afhankelijk van de samenstelling van het influentwater. Het kan zijn dat bezinkplassen moeten worden gebaggerd om nalevering te voorkomen bij hoge aanvoer van particulier fosfor en lage zuurstofconcentraties. Zandfilters kunnen daarentegen verstopt raken wanneer veel zwevend stof aanwezig is, waarbij de bovenlaag vervangen of verwijderd moet worden om een goede doorspoeling te behouden. Ook andere industriële filters raken na verloop van tijd verzadigd/verstopt. Hierdoor moeten ze periodiek schoongemaakt of vervangen worden. De frequentie hiervan is afhankelijk van de kwaliteit

van de filters en de hoeveelheid zwevende stof in het oppervlaktewater. Om beheermomenten te verminderen, zijn er systemen om ze automatisch schoon te krijgen (bv. terugspoelen), echter hebben deze systemen eveneens onderhoud nodig. Daarnaast moet het spoelwater ook afgevoerd of verwerkt worden. Het periodieke onderhoud zou gelijktijdig plaats kunnen vinden met het onderhoud van de pompen, die meestal ook in dit systeem zitten.

3. Risico's

Bij stilstaand water kunnen bezinkplassen voor muggen- en/of stankoverlast zorgen. Daarnaast speelt het issue dat in omstandigheden met lage zuurstofconcentraties nalevering kan optreden. Zand-, doek-, schijf- en ringfilters kunnen verstopt raken en hierdoor niet meer naar behoren functioneren. Wanneer er geen overlaat aanwezig is, kunnen deze verstoppingen leiden tot inundaties.

4. Prestaties

De prestaties van bezinkplassen en industriële filters zijn afhankelijk van de fractie particulier fosfor, aangezien er geen PO_4 wordt verwijderd. De prestatie van deze systemen nemen dus toe met het aandeel particulier fosfor. Verder zijn de installaties ook afhankelijk van de stroomsnelheid van de bezinkplas of poriegrootte van de industriële filters. Lagere stroomsnelheden en kleinere poriën verwijderen meer slib en zwevend stof uit het water en daarmee meer particulier fosfor.

Echter moeten bezinkplassen groter worden gemaakt om lagere stroomsnelheden en langere verblijftijden te bereiken en zullen industriële filters met kleinere poriën sneller verstopt raken. Hoewel de prestaties erg afhankelijk zijn van de verhouding van het influentwater, laten studies zien dat het rendement hoog kan zijn. Zo kan bijvoorbeeld met filtratie tot 0,1 micrometer een P_{tot} effluentconcentratie onder de 0,2 mg/l worden behaald (Wilén, Johansen, & Mattsson, 2012). Hierbij zijn echter de influentconcentraties niet bekend. Daarnaast kan het rendement met enkel

zandfiltratie oplopen tot bijna 80 procent, maar neemt het rendement snel af bij verstoppingen (Egemose, 2018). Ook bij deze studie zijn de influent- en effluentconcentraties niet genoemd. Dit zijn enkele voorbeelden, waarbij de getallen niet representatief zijn voor de installaties in het algemeen. In de praktijk is de verwachting dat voor het defosfateren van oppervlaktewater (met influentconcentraties zoals opgenomen in paragraaf 1.3) niet de benodigde P_{tot} effluentconcentraties onder de 0,1 mg/l zal halen. Alleen wanneer de opgeloste fracties onder 0,1 mg/l liggen, kan enkel bezinken of filtreren voldoende zijn.

5. Volwassenheid

Er zijn meerdere bezinkplassen in gebruik, bijvoorbeeld bij het Waterschap Hollandse Delta en er is ook veel ervaring met bezinksloten achter doseringsinstallaties (zie 3.2). Verder worden industriële filters al lang gebruikt in rioolwaterzuiveringen. Hierdoor is er al veel ervaring met het gebruik en onderhoud van deze systemen. Er is echter weinig openbare data over hoe de systemen functioneren ten opzichte van fosforverwijdering.

6. Toekomstbestendigheid

Bezinkplassen of sloten zijn vaak onderdeel van een (her)inrichting van een gebied, maar kunnen wel opnieuw worden ingericht om stroom- en bezinksnelheden aan te passen. Op deze manier kunnen dan grotere of kleinere fracties particulier fosfor worden gevangen. Tenslotte moeten schijf-, doek- en ringfilters regelmatig vervangen worden, hierbij kunnen ze vervangen worden door technologisch beter systemen.

7. Koppelkansen

Bezinkplassen kunnen ingericht worden als onderdeel van een natuur- en recreatiegebied. Daarnaast bezinken er naast deeltjes met particulier fosfor ook andere stoffen. Hierdoor zorgen bezinkplassen ook in andere opzichten voor een betere waterkwaliteit benedenstrooms. Ditzelfde geldt voor industriële filters. Naast fosforrijke deeltjes worden ook andere vaste

en gebonden stoffen uit het water verwijderd. Hierdoor worden naast fosfor bijvoorbeeld ook zware metalen uit het water verwijderd. Daarnaast worden de filters ook vaak voor of achter andere defosfateringsinstallaties geplaatst om zo tot een beter rendement te komen (Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022; Scherrenberg, 2011).

8. Duurzaamheid

Bezinken is in principe een duurzame techniek. Er worden geen energie, chemicaliën of andere grondstoffen gebruikt. Het PO_4 kan mogelijk teruggewonnen worden door de plas te baggeren, echter zijn de voordelen maar beperkt (Deltaprogramma Agrarisch Waterbeheer, n.d.). De bagger zou, mits van schone kwaliteit, ook gebruikt kunnen worden om nabijgelegen landbouwgronden te verbeteren of op te hogen. Het baggeren zelf kost wel energie en mogelijk zijn er vervuilende stoffen in de baggerspecie aanwezig, die afgevoerd moeten worden naar een erkende verwerker. Bij industriële filters wordt er energie gebruikt om het water door het filter te persen. Ook ontstaat er een reststroom. Dit kunnen de doeken zijn die in een doekenfilter gebruikt worden of terugspoelwater van een ringenfilter. Dit effluent moet afgevoerd en verwerkt worden, wat ook energie kost. In sommige gevallen worden er chemicaliën toegevoegd om te sturen op de deeltjesgrootte die door het filter gaat. Het chemicaliën- en grondstofgebruik blijft echter relatief laag.

9. Kosten

De investeringskosten voor het aanleggen van een bezinkplas of een bezinkslot zijn in principe relatief laag. Qua werkzaamheden gaat het hoofdzakelijk om het uitvoeren van grondwerk en mogelijk het realiseren van een in- en uitlaatwerk om het water door de plas te laten stromen. Afhankelijk van de grondgesteldheid en de herbruikbaarheid van de grond in de directe nabijheid van het gebied kunnen de investeringskosten laag gehouden worden. Op het moment dat er sprake is van grond die niet herbruikbaar is en mogelijk zelfs afgevoerd moet worden, zijn er daarentegen weer erg hoge kosten mee gemoeid.

Daarnaast moet het benodigde ruimtegebruik voor bezinkplassen en/of -sloten niet vergeten worden, zeker niet als dit moet worden aangekocht. De operationele kosten zijn ook relatief laag, omdat er eigenlijk alleen sprake is van maaien en afvoeren en het eens in de x-aantal jaren baggeren van de plas of watergang.

Voor industriële filters geldt dat de investeringskosten relatief hoog zijn. Dit komt hoofdzakelijk door de aanschaf van het filter inclusief de werktuigbouwkundige en elektrotechnische installaties, maar denk ook aan de engineeringkosten om het filter optimaal te laten functioneren. Qua ruimtegebruik daarentegen is de benodigde ruimte ten opzichte van een bezinkplas bijvoorbeeld nihil, dus daar zitten de kosten niet in. De operationele kosten bestaan uit het beheer en onderhoud van de pompen, de filters (schoonhouden en vervangen), het afvoeren van de reststroom en in sommige gevallen ook het toevoegen van chemicaliën.

De kosten zijn ingeschat en geschaald aan de hand van de kosten voor een P_{tot} verwijderende installatie (i.e. doekenfilter) bij de RWZI in Gieten.

10. Algemeen oordeel toepassing oppervlaktewater

Voor het defosfateren van oppervlaktewater zijn industriële filters en bezinkvoorzieningen een kosteneffectieve oplossing voor locaties met relatief veel gebonden fosfor en een beperkte opgave. Het grote voordeel is dat de industriële filters slechts een beperkt ruimtegebruik hebben. Ze worden daardoor veel toegepast bij RWZI's. Het gaat hierbij wel om relatief hoge influentconcentraties in vergelijking met oppervlaktewater. De techniek wordt in de praktijk vaak gecombineerd met andere technieken. Zo kan een industrieel filter of een bezinkvoorziening gebruikt worden om het verstopt raken van een ijzerzandfilter te voorkomen of om het met coagulatie gebonden fosfor te verwijderen. Aandachtspunt hierbij is het verwerken van de 'afvalstroom' en de hierdoor relatief hoge operationele kosten.

3.9 ALTERNATIEVE ADSORPTIE- EN FILTERMATERIALEN

Door de toegenomen interesse in fosforverwijdering wordt er ook gewerkt aan nieuwe materialen waarmee PO_4 uit water verwijderd kan worden. De alternatieve materialen zullen net als de ijzer(hydr)oxiden het PO_4 adsorberen. Hierbij variëren de verschillende adsorptiematerialen in bindings- en zuiveringscapaciteit, kosten, risico's en beschikbaarheid. Er zijn veel adsorptiematerialen onderzocht op deze factoren, waarbij een uitgebreide analyse te vinden is in de literatuur (Leader, Dunne, & Reddy, 2008; Suresh Kumar, Korving, van Loosdrecht, & Witkamp, 2019; Mendes, Pugliese, Canga, Wu, & Heckrath, 2022; Pugliese, *et al.*, 2023). In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen voor deze verschillende adsorptiematerialen behandeld. Hierbij wordt gekeken naar de meest voorkomende metaal(hydr)oxiden (Zirkonium, Lanthanium, Aluminium en Ijzer) en calcium gebaseerde stoffen. Voorbeelden hiervan zijn magnetisch defosfateren, ijzerpellets, Phoslock/PhosFlow (Lanthanium), staalslakken en Biochar. Ze worden hierbij vergeleken met ijzerzand, waarbij de voornaamste voor- en nadelen van het alternatieve adsorptiemateriaal worden benoemd.

➔ **Magnetische adsorptiematerialen** zijn materialen waarmee het adsorbens met het opgenomen fosfaat magnetisch gescheiden kan worden van het (oppervlakte)water. In Nederland worden op dit moment de ViviMag en MAD (magnetic adsorption and desorption) technieken op proefschaal getest (Nijholt, 2022; WUR, 2023). De ViviMag gebruikt magneten om vivianiet (een ijzerfosfaatmineraal) te winnen uit het slib na coagulatie. Hierdoor is de techniek niet gefocust op adsorptiematerialen, maar kan het gebruikt worden na coagulatie. De MAD-techniek gebruikt wel het magnetische adsorptiemateriaal magnetiet. Deze technologie bestaat al sinds de jaren 90, maar werd toen nog gecombineerd met ijzerchloride en kalkdoseringen. Echter was het economische perspectief van de techniek op dat moment zeer zwak. De kosten waren namelijk relatief hoog in vergelijking met andere defosfateringstechnieken en de afzetmarkt voor restproducten was beperkt (van Velsen, 1994). WUR (2023) geeft

aan dat met huidige technieken magnetiet kan worden gebruikt zonder doseringen. Echter is dit een lopend onderzoek en is er nog weinig informatie over deze vernieuwde vorm van magnetisch defosfateren. Verder zijn bij magnetisch defosfateren ook (elektro)magneten nodig, die voor extra onderhoud zorgen. Dit terwijl de adsorptiecapaciteit per 100 m^2 ruimtegebruik vergelijkbaar is met ijzerzand (Surech Kumar, 2018). Het voordeel is dus voornamelijk de terugwinning die kan plaatsvinden met magnetiet. Het nadeel is de stadia van ontwikkeling waar de techniek zich in bevindt. Hierdoor is de techniek nog niet bewezen effectief op grotere schalen bij oppervlaktewaterzuivering.

➔ **Ijzerpellets** worden gezien als alternatief voor ijzerzand. KWR doet in samenwerking met AquaMinerals, Vitens, Waternet en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier onderzoek naar het maken en toepassen van ijzerpellets². Ijzerpellets worden gemaakt van waterijzer afkomstig van het drinkwaterzuiveringsproces. De adsorptiecapaciteit van de ijzerpellets ligt $\pm 5x$ hoger dan dat van ijzerzand³. Dit komt onder andere doordat de bindingscapaciteit mede afhankelijk is van de kristalstructuur van het ijzer. Bij het maken van de ijzerpellets wordt hier expliciet rekening mee gehouden door geen extreme druk of extreem hoge temperatuur toe te passen. De productie van ijzerpellets is nog in de onderzoeks-/praktijkproeffase. De uitgevoerde onderzoeken tonen aan dat de pellets in ieder geval ruim vier maanden stabiel en slijtvast zijn, inclusief het terugspoelen van het filter (KWR, e-mail, 22 juli 2024). Er loopt momenteel ook een onderzoek waarbij de pellets getest worden voor een periode van meer dan zes maanden. Wanneer dit experiment goed verloopt en het lukt om de productie op te schalen, dan zijn de pellets interessant voor filters met een hoge

² <https://www.kwrwater.nl/projecten/polishing-pellets>

³ Gegevens over de ijzerpellets zijn verkregen via KWR.

belasting. Hierbij kan gedacht worden aan P_{tot} verwijdering uit behandeld RWZI effluent en/of oppervlaktewater. Naast de verdere opschaling richten lopende onderzoeksinitiatieven zich op de regeneratie van de PO_4 beladen pellets met chemicaliën. Hierdoor ontstaat een korte toepassingscyclus en wordt terugwinning van fosfor mogelijk. Door de pellets meerdere keren te kunnen (her)gebruiken, hoeven er relatief weinig ijzerpellets in omloop te zijn. Ook na het nu lopende onderzoek naar ijzerpellets blijft het onduidelijk of ijzerpellets gebruikt kunnen worden voor trage zandfilters en biocascades. Adsorptiematerialen blijven hierin vaak >10 jaar aanwezig. Er is dan sprake van natte en droge omstandigheden, vorst, biologische activiteit en mechanische stress. Ook verandert de kristalstructuur in de pellets, waardoor de bindingscapaciteit afneemt. Hierdoor liggen momenteel ijzerpellets voor deze trage filters minder voor de hand. De voordelen van ijzerpellets zijn dus de hogere adsorptiecapaciteit en de verbeterde mogelijkheid tot terugwinning. Het nadeel is dat er nog geen hoge productiecapaciteit gerealiseerd is en de onzekerheid rond de stabiliteit over meerdere jaren. Op dit moment wordt er meer onderzoek gedaan en toegewerkt naar een hogere productiecapaciteit door KWR en Aquaminerals.

➔ **Roodzand** wordt ook gezien als een alternatief voor ijzerzand. Roodzand is bijvoorbeeld toegepast in het wilgenfilter van de nieuwbouwwijk Reitdiep te Groningen. Het gaat hierbij om zand dat rood is gekleurd door het ijzer dat het bevat. Echter wordt de term roodzand soms ook gebruikt voor straatzand, geel zand of woudzand. Hierbij gaat het dan niet om de kleur maar om de toepassing van het zand. Roodzand is bij veel zandhandelaren te koop, maar het ijzergehalte varieert, mede door de variatie in terminologie, aanzienlijk tussen de handelaren. Daarnaast is het ijzergehalte van roodzand ook beduidend lager dan het ijzergehalte in het ijzerzand dat gebruikt is in de huidige downflow en upflow filters (~3x hoger dan dat van roodzand). Aangezien de ijzer(hydr)oxiden in ijzerhoudend zand het fosfaat binden, vertaalt een hoog ijzergehalte zich

door naar een hogere adsorptiecapaciteit. Naast de lagere ijzergehaltenes heeft roodzand ook een lagere hydraulische doorlatendheid dan ijzerzand, doordat het uit een fijnere zandfractie bestaat. Hierdoor zijn grotere oppervlaktes en volumes nodig bij toepassing van roodzand in vergelijking met ijzerzand. Kortom, roodzand is minder effectief dan ijzerzand in het adsorberen van fosfaat. Daarnaast maakt de variatie in ijzergehalte tussen partijen roodzand een onzeker product voor het toepassen in een defosfateringsinstallatie. Echter kan roodzand bij een gebrek in aanbod van ijzerzand als alternatief worden gebruikt. Wel wordt dan geadviseerd om vooraf kolomproeven te doen, zodat een inschatting kan worden gemaakt naar de adsorptiecapaciteit van de aangekochte partij. Dit verbetert de inschatting van de benodigde dimensies voor een effectief roodzand filter.

➔ **Phoslock/Phosflow** wordt geproduceerd door PET Water Solutions uit Australië. Hierbij is het product Phoslock al vaker gebruikt in Nederlandse plassen, maar is Phosflow nog niet ingezet. Hierdoor ligt de verdere focus vooral op Phoslock, hoewel dit product niet voldoet aan de randvoorwaarden in deze rapportage (par. 1.3). Phoslock wordt namelijk niet gebruikt voor defosfatering van een 'puntlocatie', maar voor het defosfateren van diffuse bronnen zoals plassen/meren. Een plas of meer wordt dan in één keer gedefosfateerd, waarna Phoslock op de bodem achterblijft om fosfor vanuit de bodem af te vangen. Wel kan Phosflow een alternatief adsorptiemateriaal zijn in stromende systemen. Phosflow komt namelijk in een korrelformaat in plaats van het kleiformaat van Phoslock. De laatste zal in stromende systemen namelijk niet bezinken. Het belangrijkste adsorptiecomponent van deze gepatenteerde technologie (i.e., Phoslock / Phosflow) is lanthanum. Lanthanum is een zeldzaam aardmetaal met een hoge affiniteit tot PO_4 (Wu, Lam, Lee, & Lau, 2007; Zhang, *et al.*, 2012). Hierdoor bindt het PO_4 sterk en komt het niet snel terug in de waterkolom (tevens is het daardoor ook moeilijk om fosfor terug te winnen). Echter is ook gevonden

dat opgelost lanthanum toxisch kan zijn voor het milieu (Li, Verweij, & van Gestel, 2018). Vandaar dat Phoslock/Phosflow lanthanum bindt aan bentoniet (i.e., klei) om zo het vrijkomen van lanthanum in het water te voorkomen, waardoor het niet als ecotoxisch wordt gezien (Martin & Hickey, 2001). Hierdoor voorkomt Phoslock ook nalevering vanaf de waterbodem. Verder komt PO_4 ook niet vrij onder anoxische condities bij Phoslock (Ross, Haghseresht, & Cloete, 2008). Echter zijn wel erg hoge doseringen nodig om tot lage P_{tot} concentraties te komen (Reitzel, Andersen, Egemose, & Jensen, 2013; Ross, Haghseresht, & Cloete, 2008).

Daarnaast neem de adsorptiecapaciteit van Phoslock ook sterk af bij lagere influent PO_4 concentraties (Zamparas, Gavriil, Coutelieres, & Zacharias, 2015). Het voordeel van lanthanumproducten als Phoslock en Phosflow is dat het PO_4 sterk bindt, waardoor er vervolgens geen nalevering plaatsvindt. Het nadeel is dat er hoge concentraties aan Phoslock/ Phosflow nodig zijn om tot P_{tot} waarden onder de 0,1 mg P/l te komen (Lüring & van Oosterhout, 2013). Dit kan mede veroorzaakt worden door hoge concentraties aan organisch fosfor. Organisch materiaal zorgt namelijk voor een verminderde effectiviteit van lanthaan producten (Spears, *et al.*, 2016).

- ➔ **Staalslakken** zijn een restproduct uit de staalindustrie en kunnen in filters worden toegepast net zoals ijzerzand. Dit product heeft een adsorptiecapaciteit van ongeveer 2 mg P/g adsorptiemateriaal. Daarnaast creëert het ook een sterke verbinding met PO_4 waardoor nalevering niet snel een probleem zal zijn (Sellner, Hua, Ahiablame, Hay, & Kjaersgaard, 2019). Echter lijken staalslakken bij concentraties onder 0,2 mg P/l nauwelijks te werken (Gonzalez, Penn, & Livingston, 2020). Daarnaast geeft het RIVM aan dat staalslakken mogelijk schadelijk zijn voor het milieu door uitloging van zware metalen en de lage zuurgraad van het effluent (Broekman, 2022). Dit zou wel opgelost kunnen worden door de staalslakken vooraf te behandelen om de zware metalen eruit

te krijgen. Echter is niet duidelijk hoe lang deze behandeling zou duren en wat de verbonden kosten zullen zijn. Het voordeel is dus de goedkope beschikbaarheid van een restproduct wat tevens een goed adsorptiemateriaal is. De nadelen zijn de potentiële toxiciteit en de slechtere werking bij lage influentconcentraties.

- ➔ **Biochar** is een houtskoolproduct dat wordt geproduceerd door pyrolyse (i.e., verbranding bij weinig/geen zuurstof) van organisch materiaal. Dit adsorptiemateriaal kan in filters worden toegepast in plaats van bijvoorbeeld ijzerzand. Biochar is er in vele verschillende vormen. De samenstelling van Biochar hangt namelijk af van het organische materiaal dat gebruikt wordt en of er nog fosforbindende metalen worden toegevoegd. Het toevoegen van deze metalen kan namelijk de adsorptiecapaciteit aanzienlijk verhogen (Almanassra, McKay, Kochkodan, Ali Atieh, & Al-Ansari, 2021). Deze adsorptiecapaciteiten zijn veel hoger dan dat van ijzerzand. Verder kan Biochar ook worden toegepast als langzame meststof in de landbouw (Luo, *et al.*, 2023). Echter is het meeste onderzoek nog in laboratoriumfase en lijkt Biochar nog niet inzetbaar op grotere schaal onder de randvoorwaarden gesteld in dit onderzoek. Biochar heeft als voordelen dat het een hoge adsorptiecapaciteit heeft en kan worden hergebruikt als kunstmestbron. Het nadeel is dat Biochar nog niet goed getest is op de schaal waar dit rapport naar kijkt. Hierdoor is Biochar op dit moment nog geen volwaardige vervanger van ijzerzand, maar kan dit over 5 tot 20 jaar wel het geval zijn.

⇒ HOOFDSTUK 4 VRAAG EN GRONDSTOFAANBOD

4



Momenteel wordt voor het defosfateren van water vooral ijzerchloride gebruikt. Het gaat hierbij met name om doseringen op RWZI's. De afgelopen 10 jaar zijn er echter ook verschillende DFI's ingericht voor oppervlaktewater waarbij o.a. gebruikt is gemaakt van adsorptiematerialen. Verwacht wordt dat dit de komende jaren verder zal toenemen, waardoor ook de vraag naar de adsorptiematerialen zal toenemen.

Om hier inzicht in te krijgen, is een enquête verstuurd naar alle waterbeheerders, waaronder waterschappen, provincies en grotere natuurbeherende organisaties. De enquête is 25x ingevuld door verschillende organisaties. Het gaat hierbij voornamelijk om de waterschappen. Alle 21 waterschappen hebben gereageerd waardoor een goed beeld is verkregen over de kennis en behoefte voor het defosfateren van oppervlaktewater. Verder zijn er reacties van Rijkswaterstaat en enkele provincies. De waterschappen en provincies staan veelal ook aan de lat voor het bereiken van Natura 2000- en KRW-waterkwaliteitsdoelstellingen. Een deel van de waterschappen en provincies is dan ook actief bezig met o.a. het verlagen van P-concentraties in bepaalde wateren en gebieden. De reacties zijn geen officieel standpunt van het bestuur van deze organisaties, maar een inschatting van de specialisten en adviseurs van deze organisaties. In dit hoofdstuk wordt enerzijds gekeken naar de vraag voor het defosfateren van oppervlaktewater (onder andere op basis van de resultaten uit de enquête) en anderzijds naar het grondstofaanbod (onder andere op basis van informatie afkomstig van AquaMinerals en KWR).

4.1 VRAAG

Van de 22 waterbeheerders (21 waterschappen en RWS) geven er vijf aan dat er geen (directe) behoefte is tot het (meer) defosfateren van oppervlaktewater. Het gaat hierbij om:

- Waterschap Hunze en Aa's;
- Waterschap Scheldestromen;
- Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard;
- Waterschap Zuiderzeeland;
- Waterschap Limburg.

Deze waterbeheerders liggen meestal al op koers om hun doelen voor fosfor te behalen en verwachten daarom niet dat er nog extra fosfor verwijderd moet worden. Dat wil echter niet zeggen dat deze waterbeheerders op dit moment geen actieve defosfateringsinstallaties in bedrijf hebben of in het verleden hebben toegepast. Het kan ook zijn dat er binnen het beheergebied van deze waterbeheerders überhaupt geen probleem met fosfor is.

4.1.1 Theoretische behoefte

De overige waterbeheerders hebben een inschatting gegeven van het aantal locaties waar fosfor verwijderd moet worden uit het oppervlaktewater. De nauwkeurigheid verschilt sterk per waterbeheerder. Door vijf waterbeheerders is er geen kwantitatief aantal aangegeven (voorbeeld: heel veel). Voor deze waterschappen is uitgegaan van het gemiddelde van de overige waterbeheerders (2,7 per waterbeheerder, inclusief waterbeheerders met geen behoefte). Dit resulteert uiteindelijk in een verwacht aantal van 60 nieuwe DFI's.

De uiteindelijke zuiveringsbehoefte hangt niet alleen af van het aantal DFI's, maar ook van het debiet van de DFI, het aantal dagen per jaar dat de DFI actief is en de benodigde P verwijdering per locatie. Deze kenmerken kunnen sterk verschillen per locatie en zijn vooraf ook niet volledig in te schatten. Daarom zijn de volgende aannames gedaan:

- Er is aangenomen dat een DFI 25% van het jaar actief is. Voor DFI's die worden gebruikt voor 'aanvoer' is dit bij benadering het zomerkwartaal. Voor gebieden waarvan de afvoer gezuiverd moet worden, is dit waarschijnlijk aan de hoge kant, afvoergemalen staan ongeveer 15% van het jaar aan.
- Voor het debiet is uitgegaan van 10 m³/min. Dit komt overeen met het uitgangspunt dat in de rest van dit onderzoek is toegepast. Voor RWS gaat het om het zuiveren van (de aanvoer naar) de zuidelijke randmeren. Dit is een veel groter debiet en is ingeschat op 140 m³/min.
- De benodigde P verwijdering is afhankelijk van de huidige concentratie van het inlaatwater en de overschrijding van het doel. Hiervoor is per waterbeheerder op basis van de KRW-factsheets een inschatting gedaan. Dit geeft per waterbeheerder een specifieke verwijdering tussen de 0,1 en 0,4 mg P/l.

De resultaten hiervan zijn opgenomen in Bijlage C en resulteert in een totale verwijderingsbehoefte van bijna 20.000 kg P/jaar. Waterbeheerders met de grootste behoefte zijn hierbij Hollands Noorderkwartier (20%) en Rijkswaterstaat (14%). De grote behoefte van Hollands Noorderkwartier komt door het relatief grote verwachte aantal DFI's (5-10) in combinatie met een relatief hoge benodigde verwijdering (0,4 mg P/l). Voor Rijkswaterstaat komt de grote behoefte met name door het hoge aangenomen debiet (140 m³/min).

De verwijderingsbehoefte kan op verschillende manieren ingevuld worden. Wanneer er voor ijzerzand gekozen wordt kan er uitgegaan worden van een (maximale) bindingscapaciteit van 1,5 g P/kg ijzerzand (Boujelben, *et al.*, 2008; Chardon, Groenenberg, Temminghoff, & Koopmans, 2012; Groenenberg, Chardon, & Koopmans, 2013). Dit resulteert in een gemiddelde behoefte van **13.000 ton/jaar**.

Bij het gebruik van ijzerchloride is de gebruikte molverhouding van belang en de aard van het aangeboden P (orthofosfaat of particulier). Een gangbare molaire P:FeCl verhouding is 1:4. Dit resulteert in een ijzerchloridebehoefte van 400 ton/jaar puur ijzerchloride. Ijzerchloride wordt als oplossing toegepast, met een massagehalte van 40% (van der Oost, 2020). Gecombineerd met de dichtheid resulteert dit in een behoefte van 725 m³/j aan ijzerchlorideoplossing. In de praktijk wordt er wel regelmatig een hogere molaire verhouding gebruikt om zo een lagere effluentconcentratie te bereiken. Dit kan oplopen tot 1:30 (bijvoorbeeld bij de waterwasser), waardoor ook de benodigde behoefte toeneemt.

4.1.2 Theoretische behoefte versus behoefte in praktijk

De theoretische behoefte aan adsorptiemateriaal komt niet volledig overeen met de praktijk. Voor ijzerzand zijn hier twee redenen voor. In de huidige situatie worden de filters overgedimensioneerd. Dit wordt gedaan omdat de theoretische bindingscapaciteit niet volledig benut kan worden (voorkomen doorslaan van het filter), een deel van het ijzer uitspoelt of bindt met

andere stoffen en omdat de kans op een matig functionerend filter beperkt moet worden. Bij het ijzerzandfilter in Ossendrecht spoelt er geen ijzer uit, maar wordt dit juist vastgelegd (+0,3 mg/l). Bij het ijzerzandfilter aan de Hoornsedijk (Paterswoldsemeer) bevat het water meer organische stof (en ijzer). Hierdoor bevat het water minder zuurstof en spoelt er bijna 3 mg/l aan ijzer uit. Verder zal het filter al 'doorslaan' voor het filter volledig verzadigd is en is de realisatie nooit perfect, waardoor niet al het ijzerzand volledig benut kan worden. Mede hierdoor is er in de praktijk ongeveer 4x zoveel ijzerzand toegepast dan wat er theoretisch nodig zou zijn voor de benodigde levensduur. Bij ijzerchloride neemt de bindingscapaciteit sterk af wanneer er veel organische stof in het water aanwezig is en/of er een relatief lage uitstroomconcentratie gewenst is. Hierdoor kan de molaire P:FeCl verhouding oplopen tot 1:30 (waterwasser). Bij de dosering van ijzerchloride is het beter mogelijk om na realisatie de dosering te optimaliseren. Hierdoor zal de jaarlijkse vraag maar beperkt fluctueren.

Een tweede afwijking ontstaat doordat de jaarlijkse vraag niet gelijk is aan de instantane vraag die ontstaat bij de aanleg van een filter. Dit is met name relevant voor ijzerzandfilters. Bij een upflow-ijzerzandfilter wordt er een hoeveelheid ijzerzand toegepast die genoeg is voor 2-5 jaar functioneren. Uitgaande van 10 m³/min, 25% functioneren, een verwijdering van 0,15 mg P/l, overdimensionering van 4x en een dichtheid van 1,6 ton/m³ resulteert dit in een instantane vraag van 125 m³ ijzerzand. Wanneer gekozen wordt voor een downflow ijzerzandfilter wordt er vaak gekozen voor een verwachte levensduur van 25 jaar. De instantane vraag neemt daardoor toe tot ongeveer 1.000 m³ ijzerzand. Dit is een significante hoeveelheid met het oog op de voorraad en het jaarlijkse aanbod van ijzerzand.

4.2 AANBOD

Een analyse van het grondstofaanbod is noodzakelijk om na te gaan of beschikbaarheid op enig moment limiterend wordt. In paragraaf 4.1 is inzicht verkregen in de huidige en toekomstige vraag (defosfateringsbehoefte)

naar benodigde grondstoffen en hulpstoffen. Op basis van de geanalyseerde technieken is eerst gekeken naar de benodigde grond- en hulpstoffen om vervolgens te bepalen wat qua aanbod mogelijk limiterend zou kunnen zijn. Voor wat betreft de natuurlijke filters zonder adsorberende lagen (helofyten, aquafarm, waterharmonica's) en de industriële filters is het niet aannemelijk om te veronderstellen dat dit in de toekomst limiterend zou kunnen zijn. Het grootste risico zit naar alle waarschijnlijkheid in de grond- en hulpstoffen voor wat betreft de adsorptie- en coagulatietechnieken. Ook bij de natuurlijke filters blijkt namelijk dat het noodzakelijk is om adsorberende materialen toe te passen om significante Ptot verwijdering te bewerkstelligen.

Bij de reactortechnieken wordt er gebruik gemaakt van verschillende chemicaliën, onder andere om het adsorbens te regenereren. Deze chemicaliën zijn algemeen beschikbaar en er kan relatief eenvoudig overgestapt worden op alternatieve chemicaliën. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat er een tekort aan grondstoffen ontstaat.

Bij een aantal reactortechnieken is er wel sprake van gepatenteerde technieken, die maar door één of enkele bedrijven gerealiseerd kunnen worden. Dit kan de afhankelijkheid van deze bedrijven vergroten en beperkt de schaalbaarheid van deze technieken. Dit geldt ook voor het toepassen van Phoslock/ Phosflow.

Op basis van de resultaten uit de enquête, maar ook op basis van het gesprek met AquaMinerals is de verwachting dat de vraag naar adsorptiematerialen gaat toenemen vanwege de P-verwijderingsambities van de waterschappen. Het gaat hierbij ook om een toenemende vraag vanuit de rioolwaterzuiveringen. Voor het aanbod wordt er gekeken naar ijzerzand, ijzerpellets en ijzerchloride. Over deze materialen is voldoende bekend om het aanbod in te schatten. De andere eerdergenoemde materialen in par. 3.9 zijn niet meegenomen door uiteenlopende redenen. Zo zijn staalslakken en aluminiumzouten niet meegenomen doordat ze beschouwd worden als milieuschadelijke of zeer

zorgwekkende stoffen (Broekman, 2022; RIVM, 2023). Verder wordt Biochar nu vooral nog experimenteel getest en nog niet gezien als volwaardige vervanger voor bijvoorbeeld ijzerzand. Hetzelfde geldt voor magnetische absorbentia.

4.2.1 IJzerzand

IJzerzand is een restproduct van de drinkwaterproductie uit grondwater. In veel van de waterbronnen van de drinkwaterbedrijven in Nederland en België zit van nature ijzer opgelost in het water. Door zuurstof toe te voegen aan dit zuurstofarme water slaat het ijzer neer (ijzerhydroxide). Dit neerslaan gebeurt op speciaal hiervoor aangelegde zandbedden. Deze zandbedden worden regelmatig gespoeld om het ijzer te verwijderen, maar in de loop der tijd ontstaat een ijzerhuidje, als een soort coating, rondom de zandkorrels. Een deel van het ijzer komt vrij tijdens het schoonspoelen van het zandbed (waterijzer/ijzerslib). IJzerzand komt voornamelijk beschikbaar wanneer het filter compleet wordt vervangen.

AquaMinerals is het samenwerkingsverband van drinkwaterbedrijven en waterschappen, dat (rest)stoffen uit de waterbehandeling vermarkt. AquaMinerals is verantwoordelijk voor het distribueren van de reststoffen en het geschikt maken voor diverse toepassingen. Dat geldt dus ook voor het ijzerzand dat geschikt zou kunnen zijn voor toepassing in oppervlaktewater om PO₄ te binden. De kwaliteit van het ijzerzand verschilt van locatie tot locatie. Het materiaal varieert in korrelgrootte van de fractie zand tot grind, de hoeveelheid ijzerslib die tussen het zand zit, de dikte van het ijzerhuidje en ook de milieukundige kwaliteit van het materiaal verschilt. Om zicht te krijgen op het aanbod van geschikt ijzerzand is AquaMinerals benaderd.

De hoeveelheid vrijkomend ijzerzand ligt rond de 8.500 ton per jaar (was eerder 7.000 ton per jaar). Kwalitatief goed ijzerzand wordt gewassen en gezeefd om een stabiele en gecontroleerde kwaliteit te leveren. Na het zeven blijft er een fractie over van 2 tot 8 mm. Het filterzand heeft oorspronkelijk een diameter van 0,8 tot 1,6 mm. Met het zeven wordt er een ondergrens van 2 mm gekozen om te borgen dat er voldoende ijzer aan het zand is gehecht. Het ijzerzand met deze

fractie komt neer op ca. **5.100 ton per jaar** (ca. 60% van het totaal). Dit is dan ook het materiaal dat geschikt is voor toepassing in oppervlaktewater. Het overige materiaal voldoet milieukundig niet aan de norm, vaak door de aanwezigheid van een te hoog arseen- en/of antracietgehalte, of de korrelgradatie is < 2 mm. Het arseen komt van nature voor in grondwater, terwijl het antraciet in een filterstap gebruikt wordt. Er wordt gestreefd naar het verminderen van het antracietgebruik bij drinkwaterwinningen, waardoor er in de toekomst mogelijk minder ijzerzand afgekeurd hoeft te worden. Verder is antraciet niet schadelijk, maar hoort dit niet in het oppervlaktewater terecht te komen.

De fractie die milieukundig wel voldoet, maar kleiner is dan 2 mm, zou ook geschikt kunnen zijn voor toepassing in oppervlaktewater. Wel moet dan rekening gehouden worden met een lagere adsorptiecapaciteit en lagere doorlatendheid.

4.2.2 fosfaat

Ijzerpellets worden gemaakt van waterijzer afkomstig van het drinkwaterzuiveringsproces. Jaarlijks komt er ongeveer 70.000 ton vloeibaar waterijzer (7,5% ds) en 20.000 ton steekvast waterijzer (30% ds) beschikbaar. De productie van ijzerpellets is nog in de onderzoeks-/praktijkproeffase. Echter verwacht KWR dat ongeveer 50% van dit materiaal (voornamelijk vloeibaar) geschikt is voor de productie van pellets. Dit resulteert in een pelletproductie van maximaal ± 10.000 ton per jaar.

4.2.3 IJzerchloride

Ijzerchloride is een donkerbruine oplossing en reageert heftig met basen en metalen. De stof wordt (mede) geproduceerd uit ijzerschroot bij staalfabrieken. Een andere belangrijke grondstof is zoutzuur. De gewenste concentratie van 40% wordt over het algemeen bereikt door de oplossing in te dampen. Er zijn wereldwijd ongeveer 20 producenten van het eindproduct, waaronder een enkele producent in Nederland (Akzo Nobel), België (Tessenderlo) en Duitsland (BASF en Sidra).

Over het algemeen is er genoeg ijzerchloride beschikbaar. Het productieproces bestaat echter uit verschillende processtappen die worden uitgevoerd door een wereldwijde keten van producenten. In 2021 is daardoor toch een wereldwijd tekort ontstaan. Door een combinatie van een storm, COVID en de stijgende grondstofprijzen zijn de lopende contracten (tijdelijk) aangepast. Dit had wereldwijd gevolgen, wat ook werd ervaren in de Nederlandse waterzuiveringen. Het lijkt hierbij te gaan om een unieke combinatie van omstandigheden, die niet regelmatig zal voorkomen.

Verwacht wordt dat de wereldmarkt voor ijzerchloride ongeveer 5,5% zal groeien over de periode 2023-2030 (Mordor Intelligence, 2023). Andere belangrijke gebruikers zijn drinkwaterproducenten (voornamelijk US) en staalproducenten.

4.3 VRAAG VERSUS AANBOD

Op basis van een vergelijking tussen de vraag en het aanbod van defosfateringsmiddelen kan geconstateerd worden dat er niet altijd voldoende grondstoffen beschikbaar zijn om de volledige defosfateringsbehoefte met één techniek te realiseren.

Er is voldoende ijzerchloride beschikbaar en de productiecapaciteit kan verhoogd worden. Het gaat echter wel om een wereldwijde markt, waardoor er fluctuaties in de beschikbaarheid kunnen ontstaan, zoals in 2021. In 2021 ging het wel om een unieke combinatie van omstandigheden.

Er is onvoldoende ijzerzand beschikbaar om de volledige defosfateringsvraag in te vullen. Het is wel mogelijk om het aanbod de komende jaren met een vergelijkbare hoeveelheid ijzerpellets te verhogen. Deze ijzerpellets zijn nog in ontwikkeling en zijn mogelijk met name interessant voor RWZI's, upflow ijzerzandfilters en reactors.



Aanvullend knelpunt bij het ijzerzand is de instantane beschikbaarheid van ijzerzand en pellets. Er is nog geen productie van ijzerpellets en dit zal naar verwachting ook nog wel enkele jaren duren (afhankelijk van de vraag). Er is verder een beperkte ijzerzandvoorraad waarmee maar enkele filters gerealiseerd kunnen worden. De realisatie van defosfatering met ijzerzand is daardoor vooral afhankelijk van de hoeveelheid ijzerzand die jaarlijks beschikbaar komt. Vroegtijdige afstemming met AquaMinerals en/of leveranciers van ijzerzand is daarom nodig wanneer een ijzerzandfilter wordt ontworpen.

⇒ HOOFDSTUK 5

SYNTHESE

5



5.1 SAMENVATTING KANSRIJKE TECHNIEKEN

Op basis van de analyse in hoofdstuk 3 is een overzicht gecreëerd van alle technieken (Tabel 3). Hierbij zijn de technieken onderling vergeleken om zo een beeld te geven van de best presterende techniek voor een specifiek criterium. Een ++ betekent hierbij dat de techniek relatief goed presteert, terwijl -- aangeeft dat een techniek minder goed scoort op dat specifieke criterium. Belangrijk aandachtspunt bij het beschouwen van de tabel is dat de technieken zo goed als mogelijk geschaald zijn naar de randvoorwaarden

zoals gehanteerd in deze rapportage (zie par. 1.3). Dit uit zich bijvoorbeeld in het benodigde oppervlak voor de desbetreffende technieken. De uitschieter hierin is het helofytenfilter, gezien de lange verblijftijd die nodig is om voldoende fosforverwijdering te behalen. Ondanks dat het realiseren en het beheer van een helofytenfilter relatief eenvoudig is, moet men dus wel rekening houden met het grote oppervlak dat hiervoor benodigd is. Voor het helofytenfilter resulteert dit bijvoorbeeld in de hoogste investeringskosten van de technieken.

TABEL 3

Vergelijking van de kansrijke technieken per criterium ten opzichte van elkaar.

Criteria	Helofytenfilter	Coagulatie met bezinking	IJzerzand (down-flow)	IJzerzand (upflow)	Opkomende technieken				
					Cascade met biologische componenten (Biocascade)	Adsorptie met reactor (BioPhree)	Waterwasser incl. ontwateringstap	Bioreactor (Nutreact)	Industriële filters
Ruimtegebruik	--	+*	+/-	++	-	++	++	++	++
Beheer	++	+/-	++	+	+/-	+/-	--	-	+
Risico's	+	-	-	+/-	+/-	+/-	--	+	++
Prestaties	--	+/-	+	+	++	++	+	++	-
Volwassenheid	+	++	+	+/-	-	-	--	--	++
Toekomstbestendigheid	+/-	-	+/-	+	+	+	+	+	+/-
Koppelkansen	++	-	++	-	++	-	+/-	+	--
Duurzaamheid	++	+/-	++	+	++	-	--	-	+/-
Investeringskosten	--	++	+	+/-	+/-	-	--	+/-	-
Operationele kosten	+	-	++	+/-	+	-	--	-	+/-
Beschikbaarheid grondstoffen	++	+	-	-	+/-	+/-	+	+	++

Uit de vragenlijst verspreid onder waterbeheerders bleek dat prestaties, ruimtegebruik en kosten veelal de belangrijkste criteria zijn om voor een bepaalde techniek te kiezen. Er bleek dan ook behoefte om indicatief, of op basis van vuistregels de technieken kwantitatief met elkaar te kunnen vergelijken. Ondanks dat voor elke situatie maatwerk noodzakelijk is, doordat de omgevingsfactoren verschillend zijn (bv. de chemische samenstelling van het water, de locatie- en terreinomstandigheden, het beoogde doelbereik etc.), is in bijlage D een globaal overzicht gegeven van de kosten en de prestaties in relatie tot het ruimtegebruik.

5.2 DEFOSFATERINGSINSTALLATIES: EEN COMBINATIE VAN ZUIVERINGSPRINCIPES

De kansrijke technieken combineren over het algemeen meerdere zuiveringsprincipes om lage effluentconcentraties te halen. Hierbij zijn de belangrijkste zuiveringsprincipes om opgeloste orthofosfaten (PO_4) te verwijderen plant- en algenopname, adsorptie en precipitatie + coagulatie. Het particuliere fosfordeel wordt verwijderd door middel van de zuiveringsprincipes filtratie, bezinking of opname door (micro)organismen als bacteriën (organisch materiaal) en vissen (algen). Twee zuiveringsprincipes moeten dus minimaal gecombineerd worden om beide fosforfracties te verwijderen. Naast industriële filters maken alle technieken gebruik van minimaal twee zuiveringsprincipes. Een industrieel filter zal daardoor geen orthofosfaat verwijderen en leidt daardoor over het algemeen tot relatief slechte prestaties bij toepassing in oppervlaktewater.

Buiten de opkomende technieken valt op dat adsorptietechnieken met filtratie (ijzerzand) tot de beste prestaties leidt. De prestatie van coagulatie met bezinking is minder effectief en enkel biologische verwijdering (helofytenfilter) is vaak onvoldoende om zeer lage P_{tot} effluentconcentraties ($<0,1 \text{ mg P/l}$) te halen. Wanneer lage effluentconcentraties bereikt moeten worden, zal een adsorptietechniek met filtratie of eventueel voorbezinking de voorkeur hebben. Bij weinig ruimte kan dan eerder voor een upflow variant gekozen worden, terwijl een downflow variant leidt

tot lagere kosten en een meer natuurlijke inrichting. Het nadeel is wel dat de hoeveelheid adsorptiemateriaal steeds groter wordt bij een hogere belasting (hogere concentraties in combinatie met hogere debieten). Bij hoge influentconcentraties (bijv. $>0,5 \text{ mg P/l}$) kan er daarom mogelijk beter gekozen worden voor coagulatie met bezinking om kosten en ruimte te besparen. Hierbij wordt dan waarschijnlijk niet een zeer lage eindconcentratie ($<0,05 \text{ mg P/l}$) gehaald, maar wordt er wel veel fosfor verwijderd. Een helofytenfilter zonder een adsorptiecomponent gaat over het algemeen niet leiden tot voldoende fosforverwijdering in relatie tot de gewenste lage effluentconcentraties uit paragraaf 1.3.

Binnen de opkomende technieken valt op dat prestaties vergelijkbaar zijn. Zowel de coagulatie (waterwasser), adsorptie (BioPhree) en biologische (Nutreact) technieken claimen zeer lage P_{tot} effluentconcentraties ($<0,05 \text{ mg P/l}$). Bij de overige criteria scoort de Nutreact het beste, hoewel de gegevens nog niet verifieerbaar zijn en daardoor ook onzeker. De BioPhree is daarentegen al vaker getest en dus verder in de ontwikkelingsfase/volwassener. Verder valt op dat een combinatie van filtratie, adsorptie en biologie (Biocascade) ook leidt tot zeer lage P_{tot} effluentconcentraties. Een cascade kost ten opzichte van een ijzerzandfilter echter meer ruimte en leidt ook tot hogere kosten, terwijl het helofytenfilter bewijst dat de biologische component maar een beperkte bijdrage levert aan de fosforverwijdering. Daarnaast zijn de individuele componenten van een cascade redelijk goed getest, maar is er slechts één proefinstallatie geweest van een volledige cascade in Nederland (de Biocascade). De opkomende technieken zijn nog volop in ontwikkeling, waardoor criteria als kosten, volwassenheid en beheer kunnen verbeteren. Echter moet hierdoor nog wel in de opkomende technieken worden geïnvesteerd in de vorm van grootschalige proefinstallaties met intensieve monitoring.

5.3 VOORBEELDEN PER SITUATIE

Het overzicht in deze rapportage biedt voor waterbeheerders in Nederland

een eerste inzicht. Voor het realiseren van een defosfateringsinstallatie op een nieuwe locatie zal in alle gevallen maatwerk noodzakelijk zijn, gebaseerd op de projectspecifieke omstandigheden. Hierbij zijn een aantal vragen relevant om te stellen (Tabel 4). In de voorbeeldsituaties zijn deze vragen meegenomen om zo tot een passende defosfateringsinstallatie (DFI) te komen.

5.3.1 Fluctuerend debiet

Bij het dimensioneren van een DFI is het te zuiveren debiet één van de belangrijkste kenmerken. Een relatief constant debiet maakt het hierbij mogelijk om de DFI optimaal in te zetten en het benodigde oppervlak beperkt te houden. Er zijn echter veel locaties met een sterk fluctuerend debiet. Voorbeelden hiervan zijn grondwater gevoede beken in hellend gebied (seizoenale dynamiek) en de afvoer van een poldergemaal (kortdurende pieken). Door de grote variatie in stroomsnelheid is het hierbij ook mogelijk dat de waterkwaliteit in de tijd varieert. Hogere stroomsnelheden kunnen bijvoorbeeld zorgen voor een groter fosforgebonden sedimentvracht. Echter kan een grotere hoeveelheid aan water ook voor verdunning zorgen. De verhouding tussen verdunning en extra sedimentvracht is afhankelijk van de locatie en de tijd. Onder deze omstandigheden kunnen technieken die werken met coagulatie nog relatief effectief werken. De bezinkvoorziening kan namelijk een bufferende werking hebben en de dosering kan worden aangepast met een verandering in debiet. De kosten van een grotere doseerinstallatie zijn beperkt. De verwijdering van de ontstane vlokken/deeltjes is wel een aandachtspunt. Coagulatie wordt daarom extra interessant wanneer er al een geïsoleerde plas aanwezig is met voldoende oppervlak voor bezinken. Het is hierbij ook wenselijk dat onder extreme omstandigheden de stroomsnelheid in de bezinkvoorziening beperkt blijft, zodat al bezonken deeltjes niet alsnog meegevoerd worden.

Een alternatief is het creëren van een buffervoorziening in/op het filter als onderdeel van de DFI. Hiermee kunnen kortdurende pieken gebufferd worden (bijv. achter een gemaal of na stedelijk gebied). Het ijzerzandfilter

TABEL 4

Vragen bij het realiseren van een defosfateringsinstallatie.

VRAGEN	WAAROM?
Wat zijn de effluenteisen? • Totaal-P • Ortho-P	Niet met iedere techniek kan een zeer lage fosforconcentratie gehaald worden. Daardoor vallen er technieken af of moeten deze gecombineerd worden. Daarnaast is de dimensionering van de techniek hiervan afhankelijk.
Welk deel van het water moet er gezuiverd worden en wanneer?	Als water in de winter gezuiverd moet worden, werken technieken met een biologische component minder goed. Ook is het niet (altijd) nodig om 100% van het water te zuiveren, afhankelijk van de effluenteis en het voorkomen van piekafvoeren.
Hoeveel oppervlak is er beschikbaar?	De 'natuurlijkere' technieken hebben relatief veel oppervlak nodig. Als er weinig oppervlak beschikbaar is wordt een technische oplossing waarschijnlijker.
Wat is de samenstelling van het influent? • Troebelheid/zwevende stof • Totaal-P • Particulair P • Ortho-P (PO_4) • Sulfaat • Humuszuren	Filteren op technieken aan de hand van het influent of het al dan niet toepassen van voorfilters of bezinkvoorzieningen. Sommige technieken werken beter voor particulier P en andere technieken werken beter voor ortho-P. Humuszuren verstoren bijvoorbeeld het coagulatieproces, terwijl sulfaten het adsorptievermogen van ijzerzand verlagen. Hierdoor moet het filter groter worden of moet een lagere effluentconcentratie verwacht worden. Ook kan op basis van de influent samenstelling de voorkeur van een techniek wijzigen.
Wat is het debiet en varieert dit sterk per dag of over het jaar?	Noodzakelijk voor dimensionering van een defosfateringsinstallatie (capaciteit). Sommige technieken werken beter bij een continue belasting. Bij kortdurende fluctuaties is het bufferen van het debiet kansrijk, wat bij sommige technieken makkelijker kan.

bij het Paterswoldsemeer en Groote Meer bevatten deze buffervoorzieningen bijvoorbeeld al. Hierdoor krijgt het oppervlak een dubbele functie. Dit kan voornamelijk met technieken die een natuurlijke inrichting kennen (helofyten, ijzerzand (downflow) en cascades). In deze filters staat standaard een klein laagje water (bijv. 0,1 m), maar met de inrichting kan rekening gehouden worden met een tijdelijke toename tot bijv. 0,5 m. Aandachtspunt hierbij is dat er onder deze omstandigheden relatief veel deeltjes kunnen bezinken op de filters. Deze deeltjes kunnen het filter verstoppert. Hier dient in het ontwerp rekening mee worden gehouden of in de voorbereiding moet bepaald worden dat er maar weinig zwevende delen in het water aanwezig zijn.

Bij de andere technieken is een losse buffervoorziening wel mogelijk, maar zorgt dit voor een significante toename van het oppervlak. De meerwaarde van deze technieken gaat daardoor vaak verloren.

5.3.2 Beperkte verwijderingsopgave

Het is ook mogelijk dat de huidige waterkwaliteit al bijna voldoet aan de gewenste waterkwaliteit en dat er maar beperkt fosfor verwijderd hoeft te worden. Een voorbeeld hiervan is een polder waar veel bollen worden geteeld, maar die niet direct loost op een KRW-waterlichaam. Het is wenselijk om de belasting uit deze polder te beperken, maar het is niet direct nodig om een lage concentratie te behalen. Een ander voorbeeld is een diepe droogmakerij, waarbij ook nog niet wordt voldaan aan andere normen (stikstof totaal, ammonium, doorzicht, etc.). Onder deze omstandigheden kan een industrieel filter, bezinkvoorziening of helofytenfilter een oplossing zijn. Deze technieken verwijderen maar een beperkte hoeveelheid fosfor, met name particulier fosfor. Dit particuliere fosfor is niet direct biologisch beschikbaar, maar kan wel weer beschikbaar komen door afbraak.

De industriële filters kunnen met name goed toegepast worden bij bijvoorbeeld aanvoergemalen of locaties waar ook gewerkt wordt aan het winnen van warmte uit oppervlaktewater. Op deze locaties is het debiet vrij constant en

is de infrastructuur al aanwezig voor een technische oplossing. De technische installatie kan hierbij relatief goed ingepast worden. Het is hierbij ook niet altijd nodig om al het water te zuiveren, doordat de verwijderingsopgave beperkt is.

Op meer afgelegen locaties met een beperkte verwijderingsopgave kan een bezinkvoorziening een oplossing zijn. Hiermee wordt particulier fosfor verwijderd. Dit heeft ook als voordeel dat het doorzicht verbetert en andere stoffen bezinken. Dit gebeurt bij voorkeur in al bestaande waterlichamen die hierdoor verbeterd worden. Bijvoorbeeld door het reguleren van de aanvoer, plaatsen van een eindstuw, beperken van windwerking en jaarlijks verwijderen van het slib. Een bezinkvoorziening kan in de vorm van openwater, maar een helofytenfilter is ook mogelijk (vloeiveld of infiltratie).

Op locaties met een hoge influentconcentratie en beperkte verwijderingsopgave is coagulatie met een relatief lage dosering (i.e., de minimaal benodigde dosering voor vlokvorming) ook een optie. Bij hoge influentconcentraties en een beperkte opgave zijn er relatief kleine hoeveelheden van bijvoorbeeld ijzerchloride nodig. Hierdoor is coagulatie onder deze omstandigheden (financieel) gunstig. Dit kan in de vorm van coagulatie met een bezinkvoorziening (traditioneel). Op locaties waar een bezinkvoorziening niet haalbaar is, kan er nagedacht worden over een lamellenfilter, doekenfilter of 'een waterwasser'. Deze technieken zijn relatief duur en vragen meer onderhoud, maar hiermee is het toch mogelijk om een DFI te realiseren op een locatie met weinig ruimte.

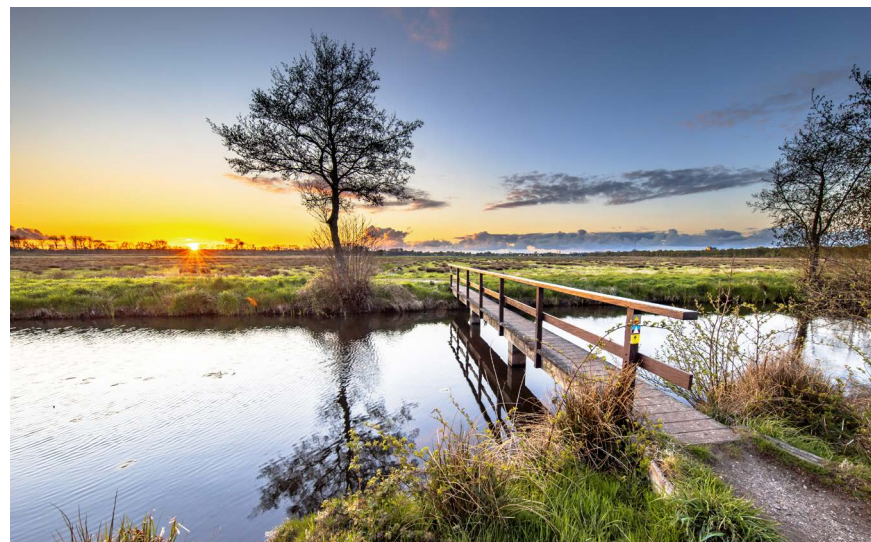
5.3.3 Lage effluentconcentratie

Voor het structureel behalen van een lage effluentconcentratie is een techniek met adsorptie of coagulatie nodig. Dit is met name relevant voor locaties die direct lozen op een KRW-waterlichaam met een lage norm voor fosfor (vaak plassen en meren) of inlaatvoorzieningen naar zwemwaterlocaties. In verschillende van de genoemde technieken wordt dit toegepast. Bij coagulatie

is het behalen van een effluentconcentratie van 0,05 mg/l P beperkt mogelijk. Dit stelt namelijk relatief hoge eisen aan de filters of bezinkvoorziening na de doseerinstallatie. Ook moet er relatief veel chemicaliën toegevoegd worden om deze concentratie te behalen. Het voordeel is dat de dosering op basis van de omstandigheden en gewenste effluentconcentraties geoptimaliseerd kan worden.

Ook met ijzerzandfilters zijn lage effluentconcentraties haalbaar, zowel met upflow- als downflowfilters. Afhankelijk van het aanvoerwater is ook een goede voorfiltratie nodig, om zo verstopping van de filters te voorkomen en extra particulier fosfor te verwijderen. Upflowfilters kunnen hierbij beter toegepast worden op locaties met weinig ruimte, waarbij de locaties ook goed bereikbaar moeten zijn voor onderhoud. Door het onderhoud is het filter en daarmee de effluentconcentratie beter bestuurbaar. Downflowfilters kunnen beter toegepast worden op locaties die minder makkelijk bereikbaar zijn en in een natuurlijke omgeving liggen.

De opkomende technieken zoals BioPhree, Biocascade, de Bioreactor en de waterwasser hebben duidelijk potentie. Inhoudelijk zijn de verwijderingsprincipes vergelijkbaar met de al bestaande technieken. De Biocascade lijkt bijvoorbeeld veel op een downflow ijzerzandfilter. De Biocascade voegt hier meer componenten aan toe, die ook gericht zijn op het (her)gebruik en educatie/beleving. Een Biocascade heeft daardoor een meerwaarde wanneer een lage effluentconcentratie gecombineerd moet worden met recreatie, duurzaamheid of de verwijdering van andere stoffen in het water. De BioPhree, Bioreactor en waterwasser lijken ook op bestaande technieken, maar bij deze technieken is de vormgeving geoptimaliseerd en is er vaak een mogelijkheid tot terugwinnen toegevoegd.



De technieken zijn echter nog beperkt getest in oppervlaktewater, waarbij de omgevingsomstandigheden sterk fluctueren en de debieten vele malen hoger liggen. Daardoor zijn de technieken interessant op locaties waar een lage effluentconcentratie gewenst is, maar het debiet beperkt is en de locatie goed bereikbaar is voor onderhoud en optimalisatie. Hierbij kan in eerste instantie gedacht worden aan een RWZI (geen oppervlaktewater).

⇒ HOOFDSTUK 6 CONCLUSIES

6

Het onderzoek laat zien dat er diverse technieken zijn om oppervlaktewater te defosfateren, maar ook dat er slechts een beperkt aantal technieken op dit moment op praktijkschaal worden toegepast. Hierbij gaat het om ijzerzandfilters (upflow en downflow), helofytenfilters en coagulatie met bezinking. Naast deze technieken zijn er ook opkomende technieken die zich naast fosfaatverwijdering focussen op de terugwinning van fosfor. Hierbij gaat het om de adsorptie met een reactor (BioPhree), waterwasser, cascade met biologische componenten (Biocascade) en een bioreactor (Nutreact). De opkomende technieken laten goede prestaties zien. Echter zijn verdere ontwikkelingen, extra investeringen en praktijkproeven nodig om deze technieken op praktijkschaal toe te kunnen passen. De opkomende technieken zijn hierbij vaak een optimalisatie van al bestaande technieken. Zo is de theoretische basis van de ijzerzandfilters en de BioPhree hetzelfde, gebruikt de waterwasser een techniek gebaseerd op coagulatie, zet de Nutreact in op symbiotische biologische processen zoals bij een helofytenfilter en is de Biocascade een combinatie van ijzerzand en biologische filterstappen. Daarnaast ligt bij de opkomende technieken een extra focus op het terugwinnen van fosfor.

Uit het data- en literatuuronderzoek komt verder naar voren dat de prestaties variëren per locatie. Hierdoor moet rekening gehouden worden met locatiespecifieke omstandigheden bij de keuze van een techniek en het ontwerpen van de defosfateringsinstallatie. Hierbij moet vooraf worden nagedacht aan welke randvoorwaarden een techniek moet voldoen. Om desinvesteringen te voorkomen, is het van belang om vooraf onderzoek te doen naar de voorkomende fosforfracties en andere stoffen in het influent om na te gaan welke defosfateringstechnieken geschikt zijn. Zo kunnen sulfaten in het water de adsorptiecapaciteit van ijzerzand verminderen en humuszuren de werking van coagulatie verslechteren. Deze kennis in de samenstelling van het influent kan een voorkeur of dimensionering van een techniek veranderen. Indien de verwijdering van de particulaire fractie voor gewenste effluentconcentraties zorgen, kunnen bezinkvoorzieningen

of industriële filters voldoende zijn. In de praktijk bestaan de meeste technieken voor oppervlaktewater echter uit meerdere zuiveringsstappen. Bezinking en/of (voor)filtratie is bijvoorbeeld essentieel bij bijna alle technieken om het particulaire fosfor te verwijderen en/of verstopping te voorkomen. Daarnaast wordt het opgeloste orthofosfaat verwijderd met behulp van adsorptie, precipitatie + coagulatie of biologische processen. Helofytenfilters tonen aan dat enkel biologische processen met behulp van planten onvoldoende zijn om de doelconcentraties te halen. Enkel in een bioreactor zoals de Nutreact kunnen biologische processen potentieel tot lage effluentconcentraties leiden. De technieken op praktijkschaal laten zien dat de voorkeur uitgaat naar adsorptie of coagulatie + precipitatie. Hierbij worden de laagste effluentconcentraties gehaald met adsorptietechnieken. In de praktijk wordt vaak ijzerzand toegepast als adsorbens. Echter zal er bij een hoge belasting (i.e., hoog debiet en hoge fosfor concentraties) veel ijzerzand nodig zijn, waardoor vanuit kostenoverwegingen gekozen kan worden voor een coagulatietechniek zoals een ijzerdoseringsinstallatie. Bij een goede evaluatie is het van belang dat niet alleen naar de zuiveringsrendementen wordt gekeken, maar juist naar de fosforvruchten en verblijftijden van water in de defosfateringsinstallatie om zo tot de gewenste effluentconcentraties te komen. Deze factoren hebben veel invloed op andere criteria die uiteindelijk doorslaggevend kunnen zijn (o.a. ruimtegebruik, kosten, beheer, duurzaamheid, etc.).

De voorkeuren in het belang van criteria naast de prestatie kan leiden tot een keuze voor een bepaalde installatie. Bij adsorptie hebben downflow ijzerzandfilters lagere kosten dan upflow ijzerzandfilter, maar een groter ruimtegebruik. Een ijzerdoseringsinstallatie heeft nauwelijks een grondstoffenprobleem en lagere investeringskosten in vergelijking met ijzerzandfilters, maar de duurzaamheid is minder en de operationele kosten liggen hoger. De waterwasser, BioPhree en Nutreact zijn nog geen volwassen technieken en leiden op dit moment nog tot relatief hoge kosten. Daarentegen is het ruimtegebruik van deze technieken klein en kan verdere ontwikkeling

leiden tot lagere kosten. Een cascade met biologische componenten heeft veel ruimte nodig, maar biedt in theorie veel koppelkansen. In deze rapportage is voornamelijk gekeken naar de Biocascade, waarbij de koppelkansen en prestaties nog niet zijn bewezen op schaal. De Biocascade wordt dan ook nog niet beschouwd als een volwassen techniek, hoewel de verschillende zuiveringstappen afzonderlijk van elkaar wel bewezen zijn. De voorbeelden geven weer hoe deze afwegingen kunnen leiden naar een voorkeurstechiek. Hoewel elke techniek voor- en nadelen heeft en elke locatie andere voorkeuren creëert, komt in dit onderzoek naar voren dat enkel adsorptie met filtratie en precipitatie + coagulatie met bezinking direct toepasbaar zijn op grote schaal met het oog op de randvoorwaarden zoals gehanteerd in deze rapportage. Helofytenfilters worden op basis van dit onderzoek afgeraden als defosfateringsinstallatie. Verder hebben opkomende technieken veel potentie, maar is een ontwikkelingsperiode nodig voordat ze op grote schaal inzetbaar zijn (Bijlage A). De verwachting is dat er in korte tijd meer vraag gaat ontstaan naar het defosfateren van oppervlaktewater in verband met de KRW- en N2000-doelen. Op basis van een vergelijking tussen de vraag en aanbod van grondstoffen voor defosfatering kan geconstateerd worden dat er niet altijd voldoende grondstoffen beschikbaar zijn om de volledige defosfateringsbehoefte met één techniek te realiseren.

Met name voor ijzerzand is de verwachting dat er op korte termijn onvoldoende aanbod is om de defosfateringsvraag in te vullen. Er zou daarom ook goed gekeken moeten worden naar regeneratie en alternatieve adsorptiematerialen. Ijzerpellets lijken hiervoor op dit moment een veelbelovend alternatief. Echter kan ook worden gekeken naar andere adsorptiematerialen. Extra onderzoek kan uitwijzen welke van deze materialen geschikte vervangers voor ijzerzand kunnen zijn. Voor het aanbod van ijzerchloride worden geen knelpunten verwacht.



⇒ HOOFDSTUK 7

OPENSTAANDE VRAGEN, AANBEVELINGEN EN VERVOLGONDERZOEK

7



Op basis van het uitgevoerde data- en literatuuronderzoek zijn er een aantal aanbevelingen om openstaande vragen te beantwoorden. Adsorptie blijkt op dit moment vanuit de literatuur en vanuit de praktijk het meest populair en het meest geschikt om te gebruiken in defosfateringsinstallaties voor oppervlaktewater. Vooral van filters met ijzerhoudende materialen zijn talrijke voorbeelden beschikbaar in de literatuur en zijn al op verschillende locaties in Nederland installaties operationeel. Desondanks zijn de prestaties wisselend en zijn de dimensies vaak niet gebaseerd op duidelijke en onderbouwde ontwerpgrondslagen. De onderwerpen voor eventueel nader onderzoek zijn (niet uitputtend):

- de optimale contacttijd in combinatie met de influentconcentratie en effluentconcentratie. Hierbij is specifieke aandacht nodig voor de verschillende processen in het ijzerzand die de adsorptiesnelheid bepalen;
- het effect van lage redoxpotentiaal op het uitspoelen van ijzer en eventueel vrijkomen van fosfor en andere stoffen;
- de mate van beïnvloeding van adsorptie van verschillende stoffen in het influent, zoals sulfaat;
- nut en noodzaak van voorfiltratie in relatie tot risico's op afname van de doorlatendheid of zuurstofloos raken van het filter;
- de bijdrage die voorfiltratie levert in de al operationele defosfateringsinstallaties (voornamelijk ijzerzand).

De aanbeveling is dan ook om empirische kennis op te bouwen op praktijklocaties en onder de omstandigheden in het veld, gericht op het optimaliseren van adsorptieprocessen. Dit zal uiteindelijk ten goede komen aan (het voorspellen van) de effectiviteit, dimensies van het filter, verminderen van de risico's, de duurzaamheidsaspecten en de beheeraspecten van bestaande en nieuwe installaties. Ook is de hoeveelheid ijzerzand beperkt. Hierdoor wordt ook aanbevolen om in te zetten op de ontwikkeling en toepassing van alternatieve adsorptiematerialen. Ijzerpellets laten bijvoorbeeld veel potentie zien.

Naast technieken gebaseerd op adsorptiematerialen lijken de reactortechneken (i.e., waterwasser, BioPhree en Nutreact) in potentie geschikt om lage effluentconcentraties te halen ($< 0,05$ mg P/l). In het huidige stadium van ontwikkeling zijn deze technieken op dit moment echter nog onvoldoende geschikt om oppervlaktewater met wisselende debieten, samenstelling en omgevingsfactoren afdoende te defosfateren, mede gezien de risico's en beperkte beschikbare data vanuit de praktijk. Voor deze technieken lijken toepassingen in rioolwaterzuiveringen of andere locaties, waarbij meer gecontroleerde omstandigheden aanwezig zijn, geschikter. Desalniettemin, geldt ook voor deze technieken dat nader onderzoek en met name praktijkonderzoek gewenst is.

Er is al veel bekend over coagulatie en de techniek wordt op meerdere locaties toegepast. De effectiviteit wordt echter vooral bepaald door de hoeveelheid ijzerchloride die wordt gedoseerd in combinatie met de invloed van stoffen als humuszuren in het influent. Daarnaast hebben ook de mengenergie na dosering en de grootte van de bezinkvoorziening ten opzichte van de hydraulische belasting invloed op de effectiviteit van een doseringsinstallatie. Hier is al veel over bekend, maar in de praktijk werkt dit vaak nog niet optimaal. Onderzoek van het Hoogheemraadschap van Rijnland in samenwerking met Deltares bij de Pot laat zien dat optimalisatie nog wel mogelijk is door doseringshoeveelheden te verhogen (Roskam, 2017). Aanvullend onderzoek zou uitgevoerd kunnen worden om vooraf de optimale dosering te bepalen en daardoor vooraf een betere inschatting te kunnen maken van de kosten (chemicaliëngebruik is een belangrijke kostenpost). De bezinkvoorziening (en verwijdering) wordt vaak nog gezien als een sluitpost bij het ontwerp, terwijl dit essentieel is om het gebonden fosfor ook daadwerkelijk uit het systeem te verwijderen. Daarnaast bestaat bij deze techniek het risico op nalevering van fosfor uit bezonken ijzerhoudend slib. Het verdient de aanbeveling om dit risico verder in te schatten en eventuele mitigerende maatregelen verder te onderzoeken.

➤ HOOFDSTUK 8 REFERENTIES

8

- Almanassra, I., McKay, G., Kochkodan, V., Ali Atieh, M., & Al-Ansari, T. (2021). A state of the art review on phosphate removal from water by biochars. *Chemical Engineering Journal*, 409, 128211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128211>
- Aquafarm. (2024, February 29). *De praktijk in Nijmegen*. Opgehaald van Aquafarm: <https://www.aquafarm.nl/initiatiefnemers-aquafarm/>
- Barcala, V., Jansen, S., Gerritse, J., Mangold, S., Voegelin, A., & Behrends, T. (2023). Phosphorus adsorption on iron-coated sand under reducing conditions. *Journal of Environmental Quality*, 52, 74-87. doi:10.1002/jeq2.20432
- Barcala, V., Zech, A., Osté, L., & Behrends, T. (2023). Transport-limited kinetics of phosphate retention on iron-coated sand and practical implications. *Journal of Contaminant Hydrology*, 255, 104160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104160>
- Bauwe, A., Petra, K., & Lennartz, B. (2019). Impact of Filters to Reduce Phosphorus Losses: Field Observations and Modelling Tests in Tile-Drained Lowland Catchments. *Water*, 11(12), 2638. doi:<https://doi.org/10.3390/w11122638>
- Boujelben, N., Bouzid, J., Elouear, Z., Feke, M., Jamoussi, F., & Montiel, A. (2008). Phosphorus removal from aqueous solution using iron coated natural and engineered sorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1), 103-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.057>
- Broekman, M. (2022). *Milieuhygiënische kwaliteit LD-staalslakken*. Bilthoven: RIVM.
- Bunce, J. T., Ndam, E., Ofiteru, I. D., Moore, A., & Graham, D. W. (2018). A Review of Phosphorus Removal Technologies and Their Applicability to Small-Scale Domestic Wastewater Treatment Systems. *Frontiers in Environmental Science*, 6(8). doi:10.3389/fenvs.2018.00008
- Chardon, W., Groenenberg, J., Temminghoff, E., & Koopmans, G. (2012). Use of iron-coated sand for removing soluble phosphorus from drainage water. *Science of the total environment*, 41(3), 636-646. doi:<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0055>
- Chardon, W., Groenenberg, J., Vink, J., Voegelin, A., & Koopmans, G. (2022). Use of iron-coated sand for removing soluble phosphorus from drainage water. *Science of The Total Environment*, 815, 152738. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152738>
- Cusell, C., Mandemakers, J., van Dijk, G., van Rottermda, D., Kooijman, A., & Poelen, M. (2022). *Onderzoek verbeteren waterkwaliteit Wieden en Weerribben*. Deventer: Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
- de Wilt, A., & Roeleveld, P. (2020). *Haalbaarheidsstudie PAK + Doekfiltratie voor verwijdering van microverontreinigingen op RWZI's, rapport 21*. Amersfoort: STOWA.
- Deltaprogramma Agrarisch Waterbeheer. (n.d., n.d. n.d.). *Hergebruik fosfor en stikstof uit slootbagger*. Opgeroepen op April 8, 2024, van agriconnect: <https://agriconnect.nl/thema/hergebruik-fosfor-en-stikstof-uit-slootbagger>
- Dirkzwager, A., & Karper, R. (1971, 4). Fosfaatverwijdering uit afvalwater. *H2O*, pp. 79-85.
- Dorenbosch, M., van Gogh, I., & Lengkeek, W. (2018). *Dreissena mosselen als waterzuiveraar in stadswateren*. Culemborg: Bureau Waardenburg.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetland 7*. IWA Publishing.
- Duel, H., & te Broekhorst, J. (1990). *Helofytenfilters voor verbetering van de kwaliteit*

- van het oppervlaktewater in het landelijk gebied, een programmeringsstudie. Rijswijk: RMNO.
- Egemose, S. (2018). Removal of particulate matter and phosphorus in sand filters treating stormwater and drainage runoff: A case study. *Urban Water Journal*, 388-391. doi:<https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1479435>
- Fonder, N., & Headley, T. (2010). Systemic classification, nomenclature and reporting for constructed treatment wetlands. In J. Vymazal, *Water and nutrient management in natural and constructed wetlands* (pp. 191-219). Dordrecht: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-90-481-9585-5_15
- Gonzalez, J., Penn, C., & Livingston, S. (2020). Utilization of steel slag in blind inlets for dissolved phosphorus removal. *Water*, 12(6), 1593. doi:<https://doi.org/10.3390/w12061593>
- Groenenberg, J. E., Chardon, W. J., & Koopmans, G. F. (2013). Reducing phosphorus loading of surface water using iron-coated sand. *Journal of Environmental Quality*, 42, 250-259. doi:doi:10.2134/jeq2012.0344
- Groenenberg, J., Chardon, W., & Koopmans, G. (2013). Reducing phosphorus loading of surface water using iron-coated sand. *Journal of Environmental Quality*, 42(1), 250-259. doi:<https://doi.org/10.2134/jeq2012.0344>
- Guida, S., Rubertelli, G., Jefferson, B., & Soares, A. (2021). Demonstration of ion exchange technology for phosphorus removal and recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129913. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129913>
- Hermans, A., Westendorp, P., & Cusell, C. (2019). *Biocascade: Nadere uitwerking pilot Wieden-Weerribben*. Deventer: Witteveen+Bos.
- Hoek, M., & van den Bulk, J. (2021). *Duurtest Waterwaster Langeraarse Plassen*. Deventer: Tauw.
- Huang, X., Guida, S., Jefferson, B., & Soares, A. (2020). Economic evaluation of ion-exchange processes for nutrient removal and recovery from municipal wastewater. *npj Clean Water*, 3, 7. doi:<https://doi.org/10.1038/s41545-020-0054-x>
- Huang, Y., Yang, J.-K., & A, K. A. (2014). Removal of Arsenic and Phosphate from Aqueous Solution by Metal. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 1128-1138. doi:[dx.doi.org/10.1021/sc400484s](https://doi.org/10.1021/sc400484s)
- Jansen, S., & Lamers, N. (2023). *WaterQi*. Deltares. Opgehaald van <https://waterqi.nl/wp-content/uploads/2023/03/Deltares-MKB-Challenge-WaterQi.pdf>
- Jia, Z., Yuan, Q., Roots, P., Sabba, F., Rosenthal, A. F., Kozak, J. A., & Wells, G. F. (2023). Partial Nitrification/Anammox and biological phosphorus removal integration in a single bioreactor under mainstream conditions. *Bioresource technology*, 373, 128714. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128714>
- Kruitwagen, G., Luimstra, V. M., & van der Werf, M. F. (2022). *TEO en P-Verwijdering: Uitwerking maatschappelijke waardebeoordeling*. Amersfoort: STOWA 2022-43.
- Kwakernaak, C., Jansen, P., van Kempen, M., Smolders, F., & van Rheeën, H. (2015, Oktober). Slimme oplossing voor te weinig, te veel en te vuil water. *Water Matters*, pp. 30-33.
- KWR. (2024, February 29). *Toepassing van elektrocoagulatie op water met lage geleidbaarheid*. Opgehaald van KWR: Bridging Science to Practice: <https://www.kwrwater.nl/projecten/toepassing-van-elektrocoagulatie-op-water-met-lage-geleidbaarheid/>

- Land, M., Granéli, W., Grimvall, A., Hoffmann, C., Mitsch, W., Tonderski, K., & Verhoeven, J. (2016). How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental evidence*, 5, 9. doi:<https://doi.org/10.1186/s13750-016-0060-0>
- Leader, J., Dunne, E., & Reddy, K. (2008). Phosphorus sorbing materials: Sorption dynamics and physicochemical characteristics. *Journal of environmental quality*, 37, 174-181. doi:[doi:10.2134/jeq2007.0148](https://doi.org/10.2134/jeq2007.0148)
- Lenntech. (sd). *Phosphorous removal from wastewater*. Opgehaald van Water Treatment Solutions: <https://www.lenntech.com/phosphorous-removal.htm#:~:text=The%20first%20process%20is%20included,lower%20than%200.5%20mg%2F1>.
- LGsonic. (2023). Cases. Opgeroepen op April 22, 2024, van [lgsonic.com](https://www.lgsonic.com/cases/): <https://www.lgsonic.com/cases/>
- Li, J., Verweij, R., & van Gestel, C. (2018). Lanthanum toxicity to five different species of soil invertebrates in relation to availability in soil. *Chemosphere*, 193, 412-420. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.040>
- Lilienfein, J., Qualls, R., Uselman, S., & Bridgham, S. (2004). Adsorption of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Soils of a Weathering Chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*, 620-628.
- Liu, J., Wu, Y., Wu, C., Muylaert, K., Vyverman, W., Yu, H.-Q., . . . Rittmann, B. (2017). Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: A review. *Bioresource Technology*, 241, 1127-1137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.054>
- Lorenz, C. (2001). *Zuiveringsmoerassen voor licht verontreinigd water*. Utrecht: STOWA.
- Luo, D., Wang, L., Nan, H., Cao, Y., Wang, H., Vijay Kumar, T., & Wang, C. (2023). Phosphorus adsorption by functionalized biochar: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 497-524. doi:[10.1007/s10311-022-01519-5](https://doi.org/10.1007/s10311-022-01519-5)
- Lürling, M., & van Oosterhout, F. (2013). Case study on the efficacy of a lanthanum-enriched clay (Phoslock®) in controlling eutrophication in Lake Het Groene Eiland (The Netherlands). *Hydrobiologia*, 710, 253-263. doi:<https://doi.org/10.1007/s10750-012-1141-x>
- Martin, B. D., De Kock, L., Gallot, M., Guery, E., Stanowski, S., MacAdam, J., . . . Jefferson, B. (2018). Quantifying the performance of a hybrid anion exchanger/adsorbent for phosphorus removal using mass spectrometry coupled with batch kinetic trials. *Environmental Technology*, 39(18), 2304-2314. doi:[10.1080/09593330.2017.1354076](https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1354076)
- Martin, M., & Hickey, C. (2001). *Determination of HSNO Ecotoxic Thresholds for Granular Phoslock™, Phase 1: Acute Toxicity*. Hamilton, New Zealand: National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.
- Maucieri, C., Salvato, M., & Boing, M. (2020). Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 152, 105853. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105853>
- Mendes, L., Pugliese, L., Canga, E., Wu, S., & Heckrath, G. (2022). Analysis of reactive phosphorus treatment by filter materials at the edge of tile-drained agricultural catchments: A global view of the current status and challenges. *Journal of Environmental Management*, 324, 116329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116329>
- Mordor Intelligence. (2023). *Ferric Chloride Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029)*. Opgehaald van <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/ferric-chloride-market>

- Morse, G., Brett, S., Guy, J., & Lester, J. (1997). Review: Phosphorus removal and recovery technologies. *The Science of the Total Environment*, 212, 69-81.
- Mulder, M., Rijs, G., & Uijterlinde, C. (2019). *Innovatieprogramma microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater*. Amersfoort: STOWA.
- Münch, M., van Kaam, R., As, K., Peiffer, S., ter Heerdt, G., Slomp, C., & Behrends, T. (2024). Impact of iron addition on phosphorus dynamics in sediments of a shallow peat lake 10 years after treatment. *Water Research*, 248, 120844. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120844>
- Naja, G., & van Lent, T. (2020, Mei 14). *The winners of the George Barley water prize pilot stage competition are...* Opgeroepen op April 8, 2024, van The solutions Journal: <https://thesolutionsjournal.com/winners-george-barley-water-prize-pilot-stage-competition/>
- Nijholt, R. (2022, November). *ViviMag: 'Op wereldschaal een belangrijke innovatie'*. H2O, pp. 34-35.
- Numan, F. (1999). *Waterzuivering met helofytenfilters. Een praktijkproef op twee melkveebedrijven in Waterland*. Purmerend: Samenwerkingsverband Waterland.
- Okada, K., & Vymazal, J. (2023, Mei). The effect of aboveground biomass harvesting on nutrients removal in a constructed wetland treating municipal sewage. *Ecological Engineering* 190.
- PET. (2023, Augustus 1). *projecten*. Opgeroepen op April 8, 2024, van petwatersolutions: <https://petwatersolutions.com/nl/projecten/>
- Pugliese, L., Canga, E., Bruun Hansen, H., Kjaergaard, C., Heckrath, G., & Poulsen, T. (2023). Long-term phosphorus removal by Ca and Fe-rich drainage filter materials under variable flow and inlet concentrations. *Water Research*, 247, 120792. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120792>
- Reitzel, K., Andersen, F., Egemose, S., & Jensen, H. (2013). Phosphate adsorption by lanthanum modified bentonite clay in fresh and brackish water. *Water Research*, 47(8), 2787-2796.
- Rijs, G. B. (1994). Het toepassen van helofytenfilters bij de zuivering van kleinschalige afvalwaterlozingen, het einde...! *Studiedag Individuele Behandeling Afvalwater*. (pp. 1-8). Leeuwarden: Van Hall Instituut.
- RIVM. (2023, 10 4). *Lijst van Potentieel Zeer Zorgwekkende Stoffen*. Opgehaald van Risico's van stoffen: <https://rvszoeksysteem.rivm.nl/ZZSlijst/PotentieleZZSlijst>
- Roskam, G. (2017). *Optimalisatie defosfatering bij de Pot*. Delft: Deltares.
- Ross, G., Haghseresht, F., & Cloete, T. (2008). The effect of pH and anoxia on the performance of Phoslock, a phosphorus binding clay. *Harmful Algae*, 7(4), 545-550. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.12.007>
- RVO. (2023, Augustus 17). *Technology Readiness Levels (TRL)*. Opgeroepen op April 22, 2024, van [rvo.nl](https://www.rvo.nl/onderwerpen/trl): <https://www.rvo.nl/onderwerpen/trl>
- Scherrenberg, S. M. (2011). *Reaching ultra low phosphorus concentrations by filtration techniques*. Delft: Water Management Academic Press.
- Scholz, R. W., Ulrich, A. E., Eilittä, M., & Roy, A. (2013). Sustainable use of phosphorus: A finite resource. *Science of the total environment*, 461-462, 799-803. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.043>
- Sellner, B., Hua, G., Ahiablame, L. T., Hay, C., & Kjaersgaard, J. (2019). Evaluation of industrial by-products and natural minerals for phosphate adsorption from subsurface drainage. *Environmental Technology*, 40(6), 756-767. doi:<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1407364>

- Spears, B., Lürling, M., Yasseri, S., Castro-Castellon, A., Gibbs, M., Meis, S., . . . van Oosterhout, F. (2013). Lake responses following lanthanum-modified bentonite clay (Phoslock) application: an analysis of water column lanthanum data from 16 case study lakes. *Aquatic Ecology and Water Quality Management*, 47(15), 5930-5942. doi:10.1016/j.watres.2013.07.016
- Spears, B., Mackay, E., Yasseri, S., Gunn, I., Waters, K., Andrews, C., . . . Lürling, M. (2016). A meta-analysis of water quality and aquatic macrophyte responses in 18 lakes treated with lanthanum modified bentonite (Phoslock®). *Water Research*, 97, 111-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.020>
- Stichting RIONED. (2024, February 29). *Wilgenfilter*. Opgehaald van Saniwijzer: <https://www.saniwijzer.nl/technieken/verwerking-afvalwater/natuurlijke-systemen/wilgenfilter>
- STOWA. (1993). *Handboek chemische P-verwijdering*. Utrecht: STOWA.
- STOWA. (2022). *Verkenning natuurlijke zuiveringssystemen voor verwijdering van organische microverontreinigingen 2022-42*. Amersfoort: STOWA .
- Stroom, J., Voort, J., & van Dusseldorp, M. (2022). *Managementsamenvatting DFI Zwemlust*. Amsterdam: Waternet.
- Surech Kumar, P. (2018). *Phosphate recovery from wastewater via reversible adsorption*. Delft: Delft University of Technology. doi:10.4233/uuid:f75d3713-8ef2-4f92-884f-06664b040f47
- Suresh Kumar, P., Korving, L., van Loosdrecht, M., & Witkamp, G.-J. (2019). Adsorption as a technology to achieve ultra-low concentrations of phosphate: Research gaps and economic analysis. *Water Research X*, 4, 100029. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100029>.
- SusPhos. (2024, February 15). *SusPhos: Making phosphate sustainable* . Opgehaald van SusPhos: <https://www.susphos.com/>
- Szabó, A., Takács, I., Murthy, S., Daigger, T., Licskó, I., & Smith, S. (2008). Significance of design and operational variables in chemical phosphorus removal. *Water Environment Research*, 80(5), 407-416. doi:10.2175/106143008X268498
- Usman, M. O., Aturagaba, G., Ntale, M., & Nyakairu, G. W. (2022). A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. *Water Science and Technology*, 86(12). doi:10.2166/wst.2022.382
- van den Boomen, R., & Kampf, R. (2013). *Waterharmonica's in Nederland*. Amersfoort: STOWA.
- van den Bulk, J., Hoek, M., Rempe, F., Blom, J., Wagner, T., Schuman, E., . . . Otte, A. (2022). *Verkenning natuurlijke zuiveringssystemen voor verwijdering van organische microverontreinigingen*. Amersfoort: STOWA 2022-42.
- van der Grift, B. (2017). *Geochemical and hydrodynamic phosphorus retention mechanisms in lowland catchments*.
- van der Molen, D., Pot, R., Evers, C.H.M., van Herpen, F., & van Nieuwerburgh, L. (2018). *Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de kaderrichtelijk water*. Amersfoort: STOWA.
- van der Oost, R. (2020). *Analyse van de toxiciteit van ijzerchloride suppletie Terra Nova*. Amsterdam: Waternet.
- van Velsen, A. (1994). *Onderzoek deemonstratie-installaties magnetische defosfatering*. Lelystad: RIZA.

- van Wijk, D., Teurlincx, S., Brederveld, R., de Klein, J., Janssen, A., Kramer, L., . . . Mooij, W. (2022). Smart nutrient retention networks. *Inland Waters*, 12(1), 138-153. doi:10.1080/20442041.2020.1870852
- Verhoeven, C., & Blom, J. (2007). Fosfaatverwijdering zonder chemicaliën. *H2O*, pp. 27-29.
- Verhoeven, C., de Burger, M., & Blom, J. (2004). Grootschalige proef met helofytenfilter Leidsche Rijn. *H2O*, pp. 17-19.
- Verhoeven, J. T., & Meuleman, A. F. (1999). Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations. *Ecological Engineering* 12, 5-12.
- Voort, J., Wind, D., & Baars, E. (2010). *Gemalen en Zuivering: Een logische combinatie?* Amsterdam: Waternet.
- Water Alliance. (2021). UVOX Redox ontwikkelt waterzuiveringssysteem met hoge log reductie. *H2O*, 1. Opgehaald van <https://www.h2owaternetwerk.nl/new-business/uv-ox-redox-ontwikkelt-waterzuiveringssysteem-met-hoge-log-reductie>
- Waterschap Hollandse Delta. (2024, April 22). *Nieuwe Dordtse Biesbosch*. Opgehaald van [wshd.nl](https://www.wshd.nl/nieuwe-dordtse-biesbosch): <https://www.wshd.nl/nieuwe-dordtse-biesbosch>
- Waterschap Zuiderzeeland. (nd, nd nd). *Onderzoek: verwijdering fosfaat uit afvalwater met Biophree*. Opgeroepen op mei 6, 2024, van [zuiderzeeland.nl](https://www.zuiderzeeland.nl/over-ons/wat-doet-zzl/zuiveren-van-afvalwater/biophree): <https://www.zuiderzeeland.nl/over-ons/wat-doet-zzl/zuiveren-van-afvalwater/biophree>
- Wetsus. (2024, February 15). *Phosphate recovery*. Opgehaald van Wetsus: <https://www.wetsus.nl/research-themes/phosphate-recovery/>
- Wilén, B. M., Johansen, A., & Mattsson, A. (2012). Assessment of sludge particle removal from wastewater by disc filtration. *Water Practice and Technology*, 7(2). doi:<https://doi.org/10.2166/wpt.2012.037>
- Wu, R., Lam, K., Lee, J., & Lau, T. (2007). Removal of phosphate from water by a highly selective LA(III)-chelex resin. *Chemosphere*, 69(2), 289-294.
- WUR. (2023, September 27). *Duurzaam fosfaat uit afvalwater filteren met een magnetisch veld*. Opgeroepen op April 18, 2024, van [WUR.nl](https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/food-biobased-research/show-fbr/duurzaam-fosfaat-uit-afvalwater-filteren-met-een-magnetisch-veld.htm): <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/food-biobased-research/show-fbr/duurzaam-fosfaat-uit-afvalwater-filteren-met-een-magnetisch-veld.htm>
- Zahed, M. A., Salehi, S., Tabari, Y., Farraji, H., Ataei-Kachooei, S., Zinatizadeh, A. A., . . . Mahjouri, M. (2022). Phosphorus removal and recovery: state of the science and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 58561-58589. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-21637-5>
- Zamparas, M., Gavriil, G., Coutelieres, F., & Zacharias, I. (2015). A theoretical and experimental study on the P-adsorption capacity of Phoslock. *Applied Surface Science*, 335, 147-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.042>
- Zhang, L., Zhou, Q., Liu, J., Chang, N., Wan, L., & Chen, J. (2012). Phosphate adsorption on lanthanum hydroxide-doped activated carbon fiber. *Chemical Engineering Journal*, 160-167.
- Zhang, Y., Wan, Y., Zhang, Y., Huang, J., Yang, Y., Tsang, D., . . . Gao, B. (2022). Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorous removal technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(11), 1148-1172. doi:10.1080/10643389.2022.2128194
- Zheng, Y., Wang, X., Xiong, J., Lui, Y., & Zhao, Y. (2014). Hybrid constructed wetlands for highly polluted river water treatment and comparison of surface- and subsurface-flow cells. *Journal of Environmental Sciences*, 26, 749-756. doi:DOI: 10.1016/S1001-0742(13)60482-9

➤ BIJLAGE A GEVONDEN ZUIVERINGSTECHNIEKEN



Door middel van literatuuronderzoek en een enquête bij waterbeheerders is uitgezocht welke technieken er bestaan en in de praktijk worden toegepast om fosfor uit het watersysteem te verwijderen. Tabel 1 geeft hiervan een beknopt overzicht. In Tabel B1 worden de technieken kort beschreven en is er naast het zuiveringsprincipe ook aangegeven in welke ontwikkelingsfase de techniek zit en referenties naar deze techniek. De ontwikkelingsfase is op basis van het 'Technology Readiness Levels'-principe (RVO, 2023). Dit principe bestaat uit negen levels waaraan een (ontwikkel)tijd is gekoppeld (zie Figuur B1). Deze tijd geeft per level aan hoelang het nog duurt voordat de techniek echt bewezen is.

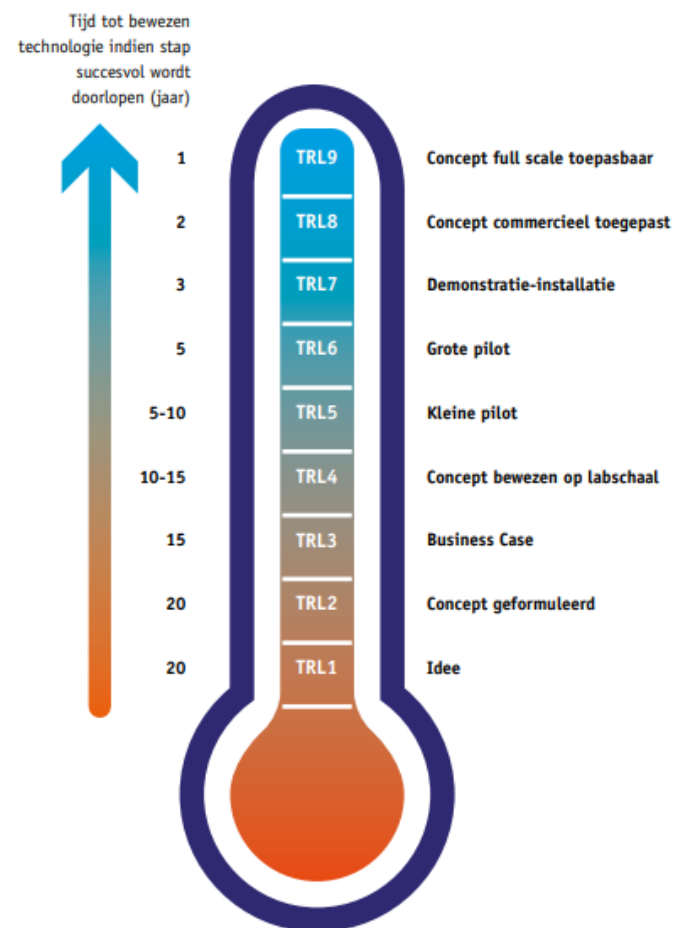
De negen levels zijn vervolgens weer onder te verdelen in vier fases:

1. Verkennen (TRL 1, 2 en 3)
2. Ontwikkelen (TRL 4, 5 en 6)
3. Demonstreren (TRL 7 en 8)
4. Opschalen en vermarkten (TRL 9).

Deze vier fases worden aan elke techniek gekoppeld op basis van gevonden literatuur en eigen ervaringen. Hierbij volgt een korte uitleg. De ontwikkelfase is hiermee vooral een indicatie van de huidige stand van zaken.

FIGUUR B1

Overzicht van de negen TRL en de corresponderende tijd tot het een bewezen technologie is (Mulder, Rijs, & Uijterlinde, 2019)



TABEL B1

Gevonden defosfateringstechnieken met korte beschrijvingen op basis van literatuur en antwoorden op de uitgezette enquête (inclusief technieken die soms als fosforverwijderend worden gezien, maar dit feitelijk niet zijn).

TECHNIEKEN	BESCHRIJVING	ZUIVERINGSPRINCIPES	ONTWIKKELFASE	REFERENTIE
Biochar	Koolstof kan PO_4 aan zich binden. De materialen kunnen ook verbeterd worden door metalen toe te voegen.	Adsorptie	Ontwikkelen (TLR 4 / 5) Biochar komt op dit moment in vele varianten voor. Vandaar dat sommige varianten een lager level hebben.	(Almanassra, McKay, Kochkodan, Ali Atieh, & Al-Ansari, 2021)
Overige adsorptiefilters	Naast, in Nederland bekende, ijzerzand en Phoslock zijn er veel meer adsorberende materialen die toegepast kunnen worden. Denk hierbij aan zirkonium, aluminiumzand, schelpenzand, ZeroValentIron (ZVI), staalslakken en rood/woud-zand.	Adsorptie	Ontwikkelen / Demonstreren (TLR 4 / 5 / 6 / 7) Door de grote variatie aan genoemde filtermaterialen zijn er veel levels. Staalslakken en aluminiumzand zitten bijvoorbeeld wel echt op level 7, terwijl zirkonium en ZVI eerder op level 4 zitten. De rest ligt er meer tussenin.	(Sellner, Hua, Ahiablame, Hay, & Kjaersgaard, 2019)
Phoslock/Phosflow	Met lanthaan verrijkte klei wordt toegevoegd aan een waterlichaam, waarbij PO_4 aan het lanthaan wordt geadsorbeerd.	Adsorptie	Demonstreren (TLR 8) / Ontwikkelen (TLR 4) Phoslock is al meerdere keren op grote schaal toegepast, terwijl Phosflow nog maar weinig is getest. Vandaar de discrepantie in levels.	(PET, 2023)
IJzerzand(/pellets)filter	Opgeloste fosfaten worden geadsorbeerd door ijzerzand (een reststof uit drinkwaterwinning), terwijl het zand ook gebonden P en algen tegenhoudt.	Adsorptie + Filtratie + (Bezinken)	Demonstreren (TLR 7 / 8) / Ontwikkelen (TLR 4) IJzerzand wordt nu op meerdere locaties grootschalig toegepast. IJzerpellets zitten echter nog middenin de ontwikkeling.	(Chardon, Groenenberg, Vink, Voegelin, & Koopmans, 2022)
HAIX (BioPhree)	Via een adsorptiemateriaal worden opgeloste fosfaten geadsorbeerd. Met een regeneratievloeistof kan daarna het opgeloste fosfaat teruggewonnen worden.	Adsorptie	Ontwikkelen (TLR 6) De BioPhree wordt op dit moment uitgebreid getest bij RWZI Dronten. Hierna wordt gekeken naar een demonstratie installatie (TLR 7).	(Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022)
NaFRAd	Met behulp van een natuurlijke flocculant en adsorptiemateriaal (granulair ijzeroxide) wordt particulier fosfor geflocculeerd en PO_4 gebonden. Deze producten worden vervolgens gescheiden en bewerkt voor terugwinning.	Adsorptie	Ontwikkelen (TLR 4) De NaFRAd technologie is na deze ontwikkeling opgenomen in de BioPhree techniek (Korving, e-mail, 8 april 2024).	(Naja & van Lent, 2020)
Magnetisch defosfateren	Met behulp van een magnetisch adsorptiemateriaal kan PO_4 worden gebonden en vervolgens met magneten uit het water worden verwijderd.	Adsorptie	Verkennen (TLR 2 en 3) De nieuwste variant zonder gebruik van coagulatie wordt sinds kort onderzocht door de WUR. De oude variant met coagulatie was eerder in de demonstratiefase, maar nooit bij level 9 gekomen.	(WUR, 2023)

TECHNIEKEN	BESCHRIJVING	ZUIVERINGSPRINCIPES	ONTWIKKELFASE	REFERENTIE
Ultrasonisch (onderwater) geluid (bijvoorbeeld LGsonic)	Met behulp van ultrasoon geluid worden algen onderin de waterkolom gehouden, waardoor ze sterven en niet voor overlast kunnen zorgen (verwijderd geen PO₄).	Algenverwijdering	Opschalen en vermarkten (TLR 9) Het product wordt al over de hele wereld gebruikt in verschillende sectoren.	(LGSonic, 2023)
Uvox/Peroxide	Met behulp van UV-licht en/of oxidatie (met bijvoorbeeld peroxide) worden algen gedood zonder schadelijke stoffen toe te voegen aan het water (verwijderd geen PO₄).	Algenverwijdering	Demonstratie (TLR 7 / 8) Het product wordt al veel gebruikt voor zwembadwater en kleine drinkwatervoorzieningen. Echter is het nog maar mondjesmaat op grotere schaal in oppervlaktewateren getest.	(Water Alliance, 2021)
Bezinkvoorziening	Door het vertragen van de stroomsnelheid bezinken deeltjes waaraan fosfor is gebonden.	Bezinken	Demonstreren (TLR 8) Bezinken is een bewezen techniek. Echter is het ook erg locatiespecifiek. Hierdoor zal de techniek nooit echt TLR 9 kunnen bereiken en blijft het maatwerk.	(Waterschap Hollandse Delta, 2024)
Algen + mosselen	Algen nemen de fosfaten in het water op, waarna mosselen de algen uit het water filteren en fosfor gebonden sediment.	Biologische opname	Ontwikkelen (TLR 5) De techniek is nu een paar keer op grotere schaal getest en lijkt enigszins te werken. Echter moeten sommige onderdelen van het concept nog verbeterd worden.	(Dorenbosch, van Gogh, & Lengkeek, 2018)
Aquafarm	Verschiedende organismen worden gebruikt om fosfor om te zetten in PO ₄ en vervolgens in biologisch materiaal wat geoogst kan worden.	Biologische opname	Ontwikkelen (TLR 4) De techniek wordt nu nog in verschillende varianten op labschaal getest.	(Aquafarm, 2024)
Bioreactor (Nutreact)	Met behulp van bacteriën en algen worden fosfaten onder optimale omstandigheden uit het water verwijderd.	Biologische opname	Ontwikkelen (TLR 4 / 5) De techniek heeft al een aantal kleine prototypen gehad. Echter zijn resultaten en uitgangspunten van het concept nog schaars, waardoor onafhankelijke validatie moeilijk is.	(Kruitwagen, Luimstra, & van der Werf, 2022)
Helofytenfilter	Moerasplanten nemen fosfor uit het water op, waarbij ze worden verwijderd door oogsten.	Biologische opname (+ adsorptie + filtratie)	Demonstreren (TLR 8) Helofytenfilters zijn een bewezen techniek. Echter is het ook erg locatiespecifiek. Hierdoor zal de techniek nooit echt TLR 9 kunnen bereiken en blijft het maatwerk.	(van den Bulk, <i>et al.</i> , 2022)
Microalgen met bacteriën	Een symbiosevorm van microalgen met bacteriën kunnen effectiever fosfaten opnemen, terwijl ze groeien op de waterbodem.	Biologische opname	Verkennen (TLR 3) Er zijn wetenschappelijke indicaties dat deze techniek goed kan werken. Echter moeten hiervoor nog de goede symbiotische varianten worden gevonden om tot verdere ontwikkeling over te gaan.	(Liu, <i>et al.</i> , 2017)
Wilgenfilter	Wilgen nemen PO ₄ op voor hun groei. Vaak wordt dit gecombineerd met (ijzerhoudend) roodzand voor adsorptie.	Biologische opname (+ adsorptie)	Demonstreren (TLR 7) Verschillende varianten van het wilgenfilter zijn en worden nu geïmplementeerd. Echter moeten deze ook nog goed gemonitord worden om de effectiviteit te bewijzen.	(Stichting RIONED, 2024)

TECHNIEKEN	BESCHRIJVING	ZUIVERINGSPRINCIPES	ONTWIKKELFASE	REFERENTIE
Biocascade	Water wordt door een cascade van moerasplanten, algen en ijzerzand geleid, waarbij zowel gebonden fosfor als PO_4 worden verwijderd.	Biologische opname + Adsorptie + Filtratie	Ontwikkelen (TLR 5) De optimale variant van de biocascade wordt nog uitgebreid onderzocht. Wel kan een biocascade een samenvoeging zijn van al beter bewezen technieken (bijv. ijzerzand + helofyten).	(Kwakernaak, Jansen, van Kempen, Smolders, & van Rheenen, 2015)
Fill and draw	Een hydrologische techniek, waarbij een helofytenfilter volledig gevuld wordt en na een specifieke periode mag leeglopen via drainage.	Biologische opname + Adsorptie + Filtratie	Demonstreren (TLR 7) Dit is een variant van het helofytenfilter. Hierbij wordt dit iets verbeterd, waardoor het nog verder geoptimaliseerd moet worden.	(Verhoeven, de Burger, & Blom, 2004)
Dosering ijzer/ aluminium/calcium	IJzerzouten, aluminiumzouten en kalk lossen op in het water, waarna het vrijgekomen ijzer, aluminium en calcium coaguleren met PO_4 en bezinken of worden gefilterd.	Coagulatie + Bezinken/ Filtratie	Demonstreren (TLR 7 en 8) Hoewel de techniek al lang wordt toegepast, zijn er vaak toch nog aanpassingen nodig bij implementatie in een nieuwe omgeving. Hierdoor blijft de techniek gevoelig voor locatiespecifieke eigenschappen.	(Voort, Wind, & Baars, 2010)
Elektrocoagulatie	Door een elektrische stroom op een anode en kathode te zetten, komen metalen vrij die kunnen coaguleren met PO_4 en vervolgens bezinken.	Coagulatie + Bezinken	Ontwikkelen (TLR 4) De techniek is nog maar op erg kleine schaal getest.	(KWR, 2024)
Waterwasser	Een coagulatiemiddel wordt toegevoegd aan het water, waarna het een centrifugerende beweging ingaat. PO_4 rijke algen en deeltjes bezinken op deze manier sneller en kunnen worden afgevangen.	Coagulatie + Bezinken	Ontwikkelen (TLR 5) Er is een kleine praktijkproef geweest bij de Langerse Plassen. Aan een grotere praktijkproef moet nog begonnen worden.	(Hoek & van den Bulk, 2021)
Mechanische filtratie	Particulair fosfor wordt op basis van deeltjesgrootte tegengehouden en verwijderd uit het water. Voorbeelden hiervan zijn schijf-, zand- en doekfiltratie. Alternatieven zijn lamellenfiltratie en trilzeven.	Filtratie	Opschalen en vermarkten (TLR 9) Mechanische filtratie wordt in de industrie en bij RWZI's al vaker toegepast en is op deze schaal bewezen effectief.	(Wilén, Johansen, & Mattsson, 2012)
Ultrafijne luchtbellen (WaterQi)	Met behulp van ultrafijne luchtbellen wordt water geoxideerd. Dit kan voorkomen dat fosfaten opnieuw in het water komen door redoxreacties of fosfaten laten neerslaan met geoxideerd ijzer. Verder kunnen de luchtbellen met behulp van flotatie deeltjes omhoog brengen naar het oppervlak in de vorm van schuim.	Algenverwijdering	Ontwikkelen (TLR 5) Op meerdere locaties zijn kleine installaties bevestigd. Het effect wordt op dit moment nog gemonitord.	(Jansen & Lamers, 2023)
SusPhos	Gepatenteerde techniek om struviet en slibas om te zetten in hoogwaardige fosforproducten.	Terugwinning	Demonstreren (7 / 8) Een test in Friesland is succesvol afgerond en nu is met de slibverwerker SNB afgesproken om een volledig werkende installatie voor de industrie te bouwen.	(SusPhos, 2024)

➤ BIJLAGE B GEREALISEERDE DFI'S IN NEDERLAND

**B**

Tijdens het onderzoek voor deze rapportage is een enquête uitgezet bij o.a. waterbeheerders, gemeenten en provincies om zicht te krijgen op bestaande DFI's, plannen voor toekomstige DFI's en welke informatiebehoefte er is omtrent defosfatering van oppervlaktewater. Uit de enquête kwam een groot aantal locaties waar al aan defosfatering wordt gedaan. Deze uitkomst is gecombineerd met een overzicht aangeleverd door Waternet en overige bronnen (gevonden locaties uit de literatuur en eigen kennis). Tabel B2 geeft een niet-uitputtende lijst van gerealiseerde DFI's in Nederland.

TABEL B2
Overzicht gerealiseerde DFI's in Nederland op basis van externe en eigen kennis.

TYPE FILTER	BESCHIKBARE MEETGEGEVENS	EIGENAAR OF BEHEERDER	LOCATIE	BRON
Adsorptie (Fe-zand)	Ja	Brabantse Delta	Ossendrecht	Overzicht Waternet
Adsorptie (Fe-zand)	Beperkt	Brabantse Delta	Wouwse Plantage	Overzicht Waternet
Adsorptie (Fe-zand)	Ja	De Dommel	Onbekend	Enquête
Adsorptie (Fe-zand)	Ja	Hollands Noorderkwartier	't Twiske	Overig
Adsorptie (Fe-zand)	Ja	Noorderzijlvest	Paterswoldsemeer	Overzicht Waternet
Adsorptie (Fe-zand) (drainage)	Ja	Rijnland	Bollenstreek	Enquête
Adsorptie (Fe-zand) (drainage)	Ja	Stichtse Rijnlanden	Spengen	Enquête
Adsorptie (Fe-zand) + voorfilter	Ja	Amstel, Gooi en Vecht	Zwemlust	Overzicht Waternet
Bezinkplassen	Ja	Hollandse Delta	Nieuwe Dordts Biesbosch	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Amstel, Gooi en Vecht	Botshol	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Amstel, Gooi en Vecht	Naardermeer	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Amstel, Gooi en Vecht	Vinkeveense Plassen	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Hollands Noorderkwartier	Stad van de Zon Heerhugowaard	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Rijnland	De Pot	Enquête + Overzicht Waternet
Coagulatie (fecl3)	Ja	Rijnland	Amstelveensepoel	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Ja	Rijnland	Nieuwkoop	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Beperkt	Schieland en de Krimpenerwaard	Kralingse Plas	Enquête
Coagulatie (fecl3)	Beperkt	Schieland en de Krimpenerwaard	Bergse Plassen	Enquête
Combinatie	Onbekend	Brabantse Delta	Kaatsheuvel	Overig
Helofytenfilter	Nee	Brabantse Delta	Noordrand Midden	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Brabantse Delta	Breda	Enquête

TYPE FILTER	BESCHIKBARE MEETGEGEVENS	EIGENAAR OF BEHEERDER	LOCATIE	BRON
Helofytenfilter	Ja	Gemeente Groningen	Drielanden	Enquête
Helofytenfilter	Nee	Gemeente Leeuwarden	Meinga	Overig
Helofytenfilter	Ja	GeoFort	GeoFort	Overig
Helofytenfilter	Onbekend	HDSR	Leidsche Rijn	Overig
Helofytenfilter	Nee	Hollandse Delta	Onbekend	Enquête
Helofytenfilter	Nog niet	Limburg	Landbouwperceel	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Noorderzijlvest	Kardingeplas	Overig
Helofytenfilter	Ja	Rivierenland	Meerdere	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	Kantoor Wetterskip Fryslân	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	Rottige Meenthe	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	Brandemeer	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	Boornburgumer petten	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	Alde Feanen	Enquête
Helofytenfilter	Ja	Wetterskip Fryslân	het Nannewiid	Enquête
Riet- en wilgenfilter	Ja	Gemeente Groningen	Reitdiep	Overig
Sedimentvangers	Ja	De Dommel	Onbekend	Enquête
UVox (UV + ozon)	Ja	Brabantse Delta	t Smokkelstrand	Overzicht Waternet
Waterharmonica	Ja	De Dommel	Meerdere	Enquête
WaterQi	Ja	Stichtse Rijnlanden	Veldhuizerplas	Enquête
Waterwasser	Ja	Rijnland	Langeraaarse Plassen	Enquête + Overig

➤ BIJLAGE C BEHOEFTE IJZERZAND EN IJZERCHLORIDE



WATERSCHAP	BEHOEFTE		DEBIET		VERWIJDERING			BEHOEFTE (TON/J)	
	BESCHRIJVING	#	(M³/MIN/#)	INZET	(MG/L)	(KGP/J)	AANDEEL	IJZERZAND	IJZERCHLORIDE
Aa en Maas*	Nog niet duidelijk	2,7	10	25%	0,25	889	5%	593	19
Amstel, Gooi en Vecht	3 à 4	3,5	10	25%	0,10	460	2%	307	10
Brabantse delta	1 à 2	1,5	10	25%	0,15	296	2%	197	6
De Dommel	1	1	10	25%	0,15	197	1%	131	4
Delfland**	Heel veel	2,7	10	25%	0,40	1423	7%	949	30
Drents-Overijsselse Delta	7	7	10	25%	0,15	1381	7%	920	29
Hollands Noorderkwartier	5 tot 10	7,5	10	25%	0,40	3945	20%	2630	83
Hollandse delta	2	2	10	25%	0,20	526	3%	351	11
Hunze en Aa's	-	0	-	-	-	-		-	-
Limburg	Geen behoefte	0	-	-	-	-		-	-
Noorderzijlvest*	Afwachten van ons eerste ijzerzandfilter	2,7	10	25%	0,25	889	5%	593	19
Rijkswaterstaat***	Randmeren Zuid	1	140	25%	0,15	2753	14%	1835	58
Rijn en IJssel	Tot circa 5	5	10	25%	0,10	657	3%	438	14
Rijnland	1 of 2	1,5	10	25%	0,25	493	3%	329	10
Rivierenland	2	2	10	25%	0,25	657	3%	438	14
Scheldestromen	Geen	0	-	-	-	-		-	-
Schieland en de Krimpenerwaard	Geen	0	-	-	-	-		-	-
Stichtse Rijnlanden*	Waterinfiltratieprojecten in veenweidegebied	2,7	10	25%	0,10	356	2%	237	7
VALLEI EN VELUWE	Onduidelijk	2,7	10	25%	0,20	712	4%	474	15
Vechtstromen	4	4	10	25%	0,15	789	4%	526	17
Wetterskip Fryslan	Stuk of 10	10	10	25%	0,25	3287	17%	2192	69
Zuiderzeeland	Geen behoefte	0	-	-	-	-		-	-
Gemiddeld		2,7							
Totaal		60				19711	100%	13141	413

Voor de behoefte van de Randmeren Zuid is uitgegaan van een aanvoer van 5 mm/d.

➤ BIJLAGE D INDICATIE PRESTATIES, RUIMTEGEBRUIK EN KOSTEN



Uit de vragenlijst verspreid onder waterbeheerders blijkt dat prestaties, ruimtegebruik en kosten veelal de belangrijkste criteria zijn om voor een bepaalde techniek te kiezen. Er bleek dan ook behoefte om indicatief, of op basis van vuistregels de technieken kwantitatief met elkaar te kunnen vergelijken. Ondanks dat voor elke situatie maatwerk noodzakelijk is, doordat de omgevingsfactoren verschillend zijn (bv. de chemische samenstelling van het water, de locatie- en terreinomstandigheden, het beoogde doelbereik etc.), is in onderstaande tabel een globaal overzicht gegeven van de kosten van de geanalyseerde defosfateringsinstallaties. Vervolgens is in Figuur B2 globaal inzichtelijk gemaakt hoe de prestaties zich verhouden tot het ruimtegebruik.

DISCLAIMER

De tabel en de grafiek dienen gebruikt te worden om gevoel te krijgen bij de prestaties, het ruimtegebruik en de kosten ten opzichte van de andere technieken. Het is nadrukkelijk niet de bedoeling dat de getallen als absoluut worden aangenomen om hierop een keuze voor een bepaalde techniek te baseren. Locatiespecifieke omstandigheden en projectkeuzes kunnen de getallen sterk doen veranderen waardoor maatwerk noodzakelijk is. Interpretatie van de gegevens in de tabel en de grafiek dient daardoor met de nodige zorgvuldigheid te gebeuren.

TABEL B3 Berekende oppervlakttes en indicatie onderverdeling van de kosten.

	Opkomende technieken								
	Helofytenfilter	Coagulatie incl. bezinking	Ijzerzandfilter traag (downflow)	Ijzerzandfilter snel (upflow)	Cascade met biologische componenten (Biocascade)	Adsorptie met reactor (BioPhree)	Waterwaster incl. ontwateringsst appen met decanter	Bioreactor (Nutreact)	Industriële filters
Debiet (m3/min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Investeringskosten obv levensduur / afschrijving (jaar)	25	25	25	25	25	15	15	15	15
Verblijftijd (uren)	96		3,0	0,25					
Porositeit	40%		33%	33%					
Dikte (m)	0,6		0,3	1,0					
Capaciteit (m/d)	0,06		0,8	32	0,35				
Oppervlakte (ha)	24	<0,5	1,8	0,05	4,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Investeringskosten per jaar (EUR/j)	€ 640.000	€ 40.000	€ 60.000	€ 90.000	€ 90.000	€ 440.000	€ 570.000	€ 80.000	€ 340.000
Operationele kosten (EUR/j)	€ 60.000	€ 160.000	€ 20.000	€ 80.000	€ 50.000	€ 210.000	€ 940.000	€ 250.000	€ 110.000
Totale kosten per jaar (EUR/j)	€ 700.000	€ 200.000	€ 80.000	€ 170.000	€ 140.000	€ 650.000	€ 1.510.000	€ 330.000	€ 450.000

Algemene uitgangspunten

Project- en/of locatiespecifieke maatregelen zijn niet meegenomen in de kosten.

Investeringskosten bevatten alleen bouwkosten. Er is geen rekening gehouden met engineeringkosten, vastgoedkosten en overige bijkomende kosten.

Alle bedragen zijn exclusief BTW.

Bedragen zijn gebaseerd op een defosfateringscapaciteit van 10 m3/min.

Bedragen voor de verschillende technieken zijn afkomstig uit verschillende bronnen. Geprobeerd is zo goed als mogelijk de kosten te schalen naar de uitgangscapaciteit van 10 m3/min.

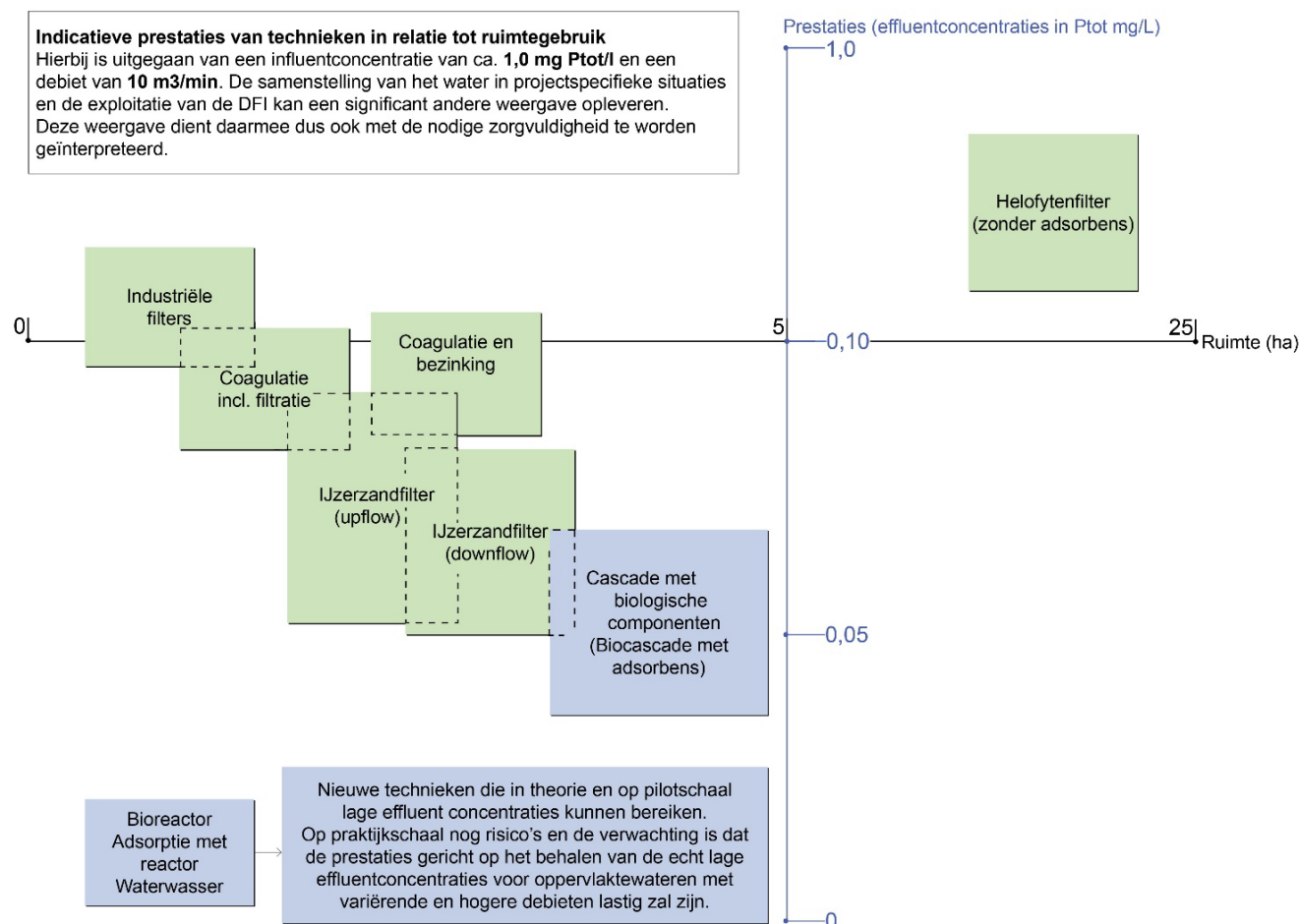
Bedragen zijn geïndexeerd naar prijspeil 01-10-2023. Hiervoor is CBS index groep 42/43 GWW toegepast.

Bedragen zijn slechts indicaties en geschikt om technieken onderling te kunnen vergelijken op kostenaspect. Aan de kosten kunnen geen rechten worden ontleend.

Voorgaande tabel laat op hoofdlijn zien wat de verschillen zijn in de technieken met betrekking tot de investeringskosten en de operationele kosten. Belangrijk aandachtspunt bij het beschouwen van de tabel is dat de technieken zo goed mogelijk geschaald zijn naar de gewenste effluentconcentraties zoals deze in de rapportage van toepassing zijn. Dit uit zich onder andere in het benodigde oppervlak voor de desbetreffende technieken. De uitschieter hierin is het helofytenfilter gezien de lange verblijftijd die nodig is om voldoende fosforverwijdering te behalen. Ondanks dat het realiseren en het beheer van een helofytenfilter relatief eenvoudig is, moet men dus wel rekening houden met het grote oppervlak dat hiervoor benodigd is. Voor het helofytenfilter resulteert dit bijvoorbeeld in de hoogste investeringskosten van de technieken. Coagulatie incl. bezinking is daarentegen qua investeringskosten de laagste in het rijtje, echter moet men daar weer rekening houden met relatief hoge operationele kosten. Over de gehele levensduur komen de technieken met ijzerzand gunstiger uit dan coagulatie. Voor wat betreft de opkomende technieken hangt er een grotere bandbreedte om de kosten, omdat deze hoofdzakelijk nog op kleinere schaal zijn getest en er waarschijnlijk ruimte is voor optimalisaties in de toekomst.

FIGUUR B2

Globale indicatie prestatie versus ruimtegebruik. Uiteindelijk prestaties in de praktijk zijn afhankelijk van meerdere factoren en projectspecifieke omstandigheden, waaronder ook aanwezige P-fracties in het influent. Blauwe vakken = opkomende technieken; groene vakken = veelvoorkomend / bekende technieken.



➡ STOWA IN HET KORT



STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' - de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft - om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede van alle waterschappen.

DE GRONDBEGINSELEN VAN STOWA ZIJN VERWOORD IN ONZE MISSIE:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

STOWA

Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

BEZOEKADRES

Stationsplein 89, vierde etage
3818 LE Amersfoort

033 460 32 00

stowa@stowa.nl

www.stowa.nl



stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
[Stationsplein 89](#) 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD Amersfoort