



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

PILOT PAK + DOEKFILTRATIE



RAPPORT

2022
45

ISBN 978.90.5773.990.3



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Arnoud de Wilt - Royal HaskoningDHV
Xian Riedijk - Royal HaskoningDHV
Tonke van der Pol – ELIQUO BV

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Patricia Clevering-Loeffen - Sweco
Herman Evenblij – Royal HaskoningDHV
Anna Koenis – Hoogheemraadschap van Rijnland
John Koop – Waterschap Hunze en Aa's
Dirk Koot – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Ad de Man – Waterschapsbedrijf Limburg
Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management
Gerard Rijs – Rijkswaterstaat
Ruud Schemen – Waterschap De Dommel
Cora Uijterlinde – STOWA
Bart Verberkt – Waterschap Aa en Maas
Miriam Verdurmen – Waterschap Vallei en Veluwe
Roger Vingerhoeds – Waterschap Brabantse Delta
Ellen van Voorthuizen – Royal HaskoningDHV

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-45
ISBN 978.90.5773.990.3

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

PAK + Doekfiltratie is een veelbelovende technologie voor de verregaande verwijdering van microverontreinigingen én fosfor uit rwzi effluent. In navolging van de eerder afgeronde haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-21) is de technologie op pilotschaal onderzocht.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat worden diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Binnen het thema 'Poederactiefkool' is de PAK + Doekfiltratie technologie nader onderzocht in een pilotstudie. De onderzoeksvragen die voortkwamen uit de voorafgaande haalbaarheidsstudie PAK + Doekfiltratie zijn onderzocht op pilotschaal. Met de uitkomsten van de pilottesten is een nauwkeuriger vergelijking te maken met de referentietechnologieën PACAS, GAK-filtratie en Ozonisatie + Zandfiltratie op de aspecten verwijderingsrendement, kosten en duurzaamheid (CO₂-footprint).

De pilottesten zijn uitgevoerd op rwzi Vinkel van Waterschap Aa en Maas in de periode van maart tot augustus 2021. Het pilotonderzoek is uitgevoerd onder de vlag van het consortium 'PAK+Doek'. Dit bestond naast STOWA uit de waterschappen Aa en Maas, Hunze en Aa's, Vallei en Veluwe, Waternet, Rijn en IJssel en de Dommel, en Logisticon Water Treatment, ELIQUO en Royal HaskoningDHV. De pilottesten zijn succesvol uitgevoerd waarbij inzicht is verkregen in de verwijdering van microverontreinigingen en fosfor en de parameters die belangrijk zijn voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van de technologie.

Op basis van de uitkomsten van het pilotonderzoek lijkt PAK + Doekfiltratie een aantrekkelijke technologie voor de combinatie van verwijdering van microverontreinigingen en verregaande verwijdering van fosfor. Tegen een vergelijkbare CO₂-footprint en iets hogere kosten worden niet alleen microverontreinigingen maar ook fosfor verwijderd ten opzichte van de referentietechnologieën. Met name door het lagere verbruik van PAK in vergelijking met PACAS scoort de PAK + Doekfiltratie technologie beter op CO₂-footprint dan PACAS. Voor fosfor kan een effluentkwaliteit worden bereikt die volstaat voor KRW-doeleinden.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

PAK + Doekfiltratie is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) wordt gedoseerd aan het effluent van een rwzi en middels een bezink- en doekfiltratiestap wordt afgescheiden van het afvalwater. Gelijk aan andere adsorptietechnologieën worden microverontreinigingen uit het afvalwater verwijderd door adsorptie aan actiefkool. De dosering van coagulant zorgt voor een verregaande verwijdering van fosfor. De PAK + Doekfiltratie technologie wordt al op enkele rwzi's in Duitsland op praktijkschaal succesvol toegepast voor de verwijdering van microverontreinigingen en verregaande verwijdering van fosfor.

Op rwzi Vinkel zijn testen op pilotschaal uitgevoerd om de PAK + Doekfiltratie technologie nader te onderzoeken. De hoofddoelen van het pilotonderzoek zijn 1) het nagaan of de technologie op een Nederlandse rioolwaterzuivering goed functioneert, 2) testen of de technologie uitgevoerd kan worden met een lamellenseparator als alternatief voor een nabezinktank, en 3) onderzoeken welke verwijderingsrendementen en effluentkwaliteit voor microverontreinigingen en fosfor behaald kunnen worden. Aanvullend op de hoofddoelen is ook onderzocht of verregaande verwijdering van fosfor bereikt kan worden met een configuratie enkel bestaande uit metaalzoutdosering en doekfiltratie.

De pilotinstallatie met een capaciteit van 1 tot 5 m³/uur is gedurende enkele maanden bedreven. In deze periode zijn PAK-doseringen van 5, 10 en 15 mg/L getest. Voor de coagulatie is FeCl₃ als metaalzout gedoseerd in concentraties van 2 tot 7 mg Fe/L. Bevonden is dat de dosering van poly-elektrolyt (PE) in de range van 0,3 tot 0,5 mg/L vereist is om tot een goede afscheiding te komen tussen water en slib (mengsel van PAK en metaalzout). De slibconcentratie in de contacttank is gevarieerd tussen de 1 en 3,5 g/L. De lamellenseparator is in staat gebleken om het slib bij deze concentraties af te scheiden met een hoog rendement van 99%. Met het doekfilter werden de laatste restanten slib afgescheiden tot een troebelheid in de afloop-pilot van 0,5 tot 5 NTU (ca. 1,5 tot 12,5 mg/L onopgeloste bestanddelen).

De gemiddelde verwijdering van de 7 beste van de 11 gidsstoffen was bij de PAK-doseringen van 5, 10 en 15 mg/L respectievelijk 67%, 92% en 95%. Hiermee wordt ruim aan de doelstelling voldaan om een rendement van 70% te behalen over de gehele rwzi. Op basis van de behaalde verwijderingsrendementen is de inschatting gemaakt dat een PAK-dosering van 8 mg/L volstaat om het gewenste rendement te behalen. Middels de bioassays microtox, daphniatox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux en GR-Calux is een afname in biologische effecten over de pilotinstallatie bepaald. Bij PAK-doseringen van 10 en 15 mg/L namen de ecotoxiciteitswaarden van bijna alle bioassays met 50% of meer af. De P-totaal concentraties in de oploop- en afloop-pilot waren gedurende twee stabiele maanden pilotbedrijf gemiddeld respectievelijk $0,96 \pm 0,47$ en $0,18 \pm 0,10$ mg/L. Gedurende een periode van twee weken is de gemiddelde P-totaal concentratie niet boven de 0,10 mg/L uitgekomen. De voornaamste P-fractie in de oploop-pilot was ortho-P, deze fractie is vrijwel volledig verwijderd (0,81 tot 0,05 mg/L). Noemenswaardig is dat ook de P-fractie opgelost organisch-P werd verwijderd van gemiddeld 0,09 tot 0,02 mg/L. Vermoed wordt dat een deel aan de PAK geadsorbeerd is, dit is echter niet nader onderzocht. Er is geen verwijdering van stikstof waargenomen. Wel vond er in geringe mate omzet van ammonium tot nitraat plaats.

Gedurende een periode van 2 weken is de configuratie zonder toevoeging van PAK gericht op de verwijdering van fosfor getest. De gemiddelde P-totaal concentraties in de oploop- en afloop-pilot waren gemiddeld respectievelijk 0,39 en 0,16 mg/L. De relatief lage P-totaal concentratie in de oploop-pilot in combinatie met lage concentraties onopgeloste bestanddelen in de oploop-pilot van ca. 4-5 mg/L bemoeilijkten het coagulatie-flocculatie proces. De vlokvorming was hierdoor niet optimaal. Vanuit full-scale praktijkvering is bekend dat P-totaal concentraties <0,1 mg/L voor nabehandeling van rwzi-effluent behaald kunnen worden.

Op basis van de pilottesten kunnen de drie hoofddoelstellingen beantwoord worden. Geconcludeerd kan worden dat 1) de PAK + Doekfiltratie technologie ook op een Nederlandse rwzi goed functioneert, 2) een lamellenseparator kan gebruikt worden als alternatief voor een nabezinktank, en 3) goede verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen tot 95% en een goede effluentkwaliteit voor fosfor behaald tot <0,1 mg/L behaald kunnen worden. Voor de aanvullende doelstelling kan geconcludeerd worden dat een verregaande verwijdering van fosfor mogelijk is in de configuratie zonder PAK-dosering. In het algemeen geldt wel dat lage concentraties P-totaal (<0,4 mg/L) en onopgeloste bestanddelen (<5 mg/L) in de oploop van de nabehandeling de verregaande verwijdering van fosfor bemoeilijken.

Met de ervaring uit het pilotonderzoek is de uitwerking van de PAK + Doekfiltratie technologie zoals tijdens de haalbaarheidsstudie (STOWA 2021-21) gemaakt nogmaals geëvalueerd. De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in Tabel 1. Op hoofdlijnen kan gesteld worden dat de gegevens uit de haalbaarheidsstudie grotendeels overeenkomen met de bevindingen uit het pilotonderzoek. Het belangrijkste verschil is dat de dosering van PE noodzakelijk blijkt voor een goede scheiding van slib en water. De CO₂-footprint neemt door de PE-dosering ca. 5% toe, de kosten met minder dan 5%. De in de haalbaarheidsstudie voorgestelde PAK-dosering van 8 mg/L lijkt voldoende voor het behalen van het vereiste verwijderingsrendement van 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen wanneer ca. 1,5 maal DWA behandeld wordt. Bij PAK-doseringen van 10 en 15 mg/L kan dit verder verhoogd worden met meerdere procentpunten. De dosering van metaalzout is hoger dan in de haalbaarheidsstudie voorzien. Dit is waarschijnlijk een locatie specifiek gegeven. De daadwerkelijk benodigde dosering is vooral afhankelijk van het wel/niet toepassen van chemisch-P verwijdering in het actiefslibproces en de concentratie P-totaal in de oploop van de nabehandeling.

TABEL 1 VERGELIJKING PAK + DOEKFILTRATIE TECHNOLOGIE MET REFERENTIE TECHNOLOGIEËN OP DE IPMV-TOETSINGSCRITEIA

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	Haalbaarheidsstudie PAK + Doek	Pilot PAK + Doek ¹
CO ₂ -footprint ²	kg CO ₂ /m ³	122	128	325	95	113
CO ₂ -footprint	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.774	1.870
Kosten ²	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,15	0,15
Verwijderingsrendement gidsstoffen ^{3 4}	%	70-75%	80-85%	80-85%	70-80%	70-80%

In aanvulling op de drie ontwerpen uit de haalbaarheidsstudie zijn met de inzichten uit het pilotonderzoek twee additionele ontwerpen toegevoegd op basis van een lamellenseparator. Deze kennen gelijke kosten en een kleiner ruimtebeslag ten opzichte van de drie ontwerpen uit de haalbaarheidsstudie. De ontwerpen met lamellenseparatoren lenen zich beter voor een modulaire bouwwijze. Lamellenseparatoren zelf zijn goed modulair uit te voeren terwijl een traditionele bezinktank zich daar niet goed voor leent.

- 1 Bij PAK-dosering 8 mg/L, metaalzoutdosering 5 mg Fe/L en PE-dosering 0,4 mg/L
- 2 Per m³ behandeld afvalwater
- 3 Verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazol, claritromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazol, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering
- 4 Tussen uitvoering van de haalbaarheidsstudie en het pilotonderzoek is de selectie gidsstoffen aangepast. Claritromycine, propranolol en sulfamethoxazol zijn vervangen door gabapentine, irbersartan en venlafaxine. De haalbaarheidsstudie en de referentietechnologieën zijn dus beoordeeld op een gedeeltelijk andere selectie stoffen dan het pilotonderzoek. De verwachting is dat dit op de toetsingscriteria nauwelijks invloed heeft.

DE 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 aan 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.

PILOT PAK + DOEKFILTRATIE

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Technologie	1
	1.3 Doelstelling	3
	1.4 Aanpak	3
	1.4.1 Configuratie 1 'Verwijdering micro's en fosfor'	3
	1.4.2 Configuratie 2 'Verwijdering fosfor'	4
2	ONDERZOEKSOPZET	5
	2.1 Onderzoekslocatie	5
	2.2 Beschrijving van de pilotinstallatie	5
	2.3 Testperioden	7
	2.4 Monsternamen	7
	2.5 Analyses	8
	2.6 Verwerking meetgegevens	10
3	RESULTATEN	11
	3.1 Configuratie 'Verwijdering micro's & fosfor'	11
	3.1.1 Afscheiding van het slibmengsel	11
	3.1.2 Microverontreinigingen	14
	3.1.3 Biologische effecten	15
	3.1.4 Fosfor	16
	3.1.5 Stikstof	19
	3.2 Configuratie 'Verwijdering fosfor'	20
	3.2.1 Afscheiding van vlokken	20
	3.2.2 Fosfor	22
4	TOEPASSING VAN PAK + DOEKFILTRATIE IN DE NEDERLANDSE SITUATIE	25

5	VERGELIJKING PILOTONDERZOEK EN HAALBAARHEIDSSSTUDIE	26
5.1	CO ₂ -footprint	26
5.2	Ontwerpgrondslagen	27
5.3	Kosten	28
5.4	Verwijderingsrendement gidsstoffen	30
5.5	Modulariteit	30
6	CONCLUSIES	31
7	DANKWOORD	33
8	LITERATUURLIJST	34
BIJLAGE A	CONCENTRATIES EN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MICROVERONTREINIGINGEN	35
BIJLAGE B	FOSFOR FRACTIES 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'	38
BIJLAGE C	UITGANGSPUNTEN IPMV TOETSINGSCRITEIA	43
BIJLAGE D	UITGANGSPUNTEN IPMV KOSTENBEREKENINGEN	44

1

INLEIDING

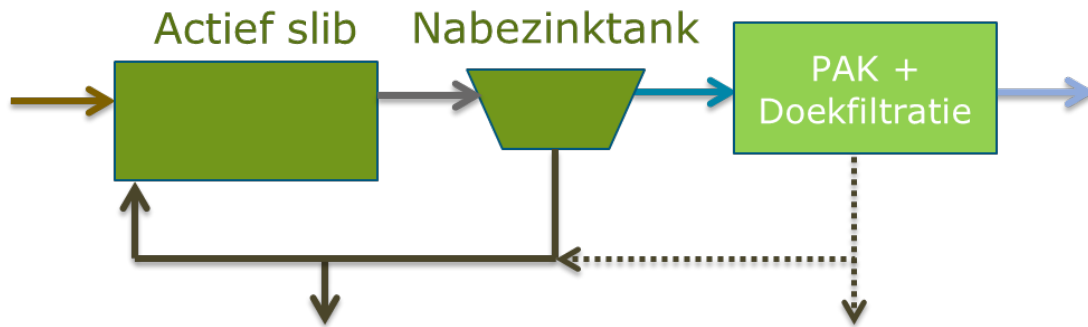
1.1 ACHTERGROND

De aanwezigheid van medicijnresten en andere organische microverontreinigingen (of opkomende stoffen) in oppervlaktewater is een bron van toenemende zorg. Medicijnresten hebben een negatieve invloed op de ecologische toestand en maken bovendien het oppervlaktewater minder geschikt als bron voor drinkwater. Vanuit het ministerie IenW is daarom het uitvoeringsprogramma ‘Ketenaanpak Medicijnresten uit Water’ gestart. Dit programma beoogt stappen te zetten in de gehele keten van productie, gebruik tot en met de lozing van medicijnresten via het riool en de rwzi om medicijnresten uit het milieu te houden. STOWA geeft ondersteuning aan dit programma via het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) uit afvalwater. In dit programma worden tal van technologieën onderzocht voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen. Een van deze technologieën is PAK + doekfiltratie, een nageschakelde technologie voor de combinatie van verwijdering van microverontreinigingen en verregaande verwijdering van fosfor. Het onderzoek naar PAK + doekfiltratie is ondergebracht in de IPMV-begeleidingscommissie ‘Poederactiefkool’. Voorafgaand aan het pilotonderzoek PAK + doekfiltratie is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (STOWA 2020-21). Hieruit volgde dat PAK + doekfiltratie een kansrijke technologie lijkt voor de gecombineerde (verregaande) verwijdering van microverontreinigingen en fosfor. In Duitsland wordt de technologie al meerdere jaren succesvol full-scale toegepast. Een succesvolle introductie in Nederland lijkt goed mogelijk. Het ruimtebeslag van de technologie is echter relatief groot, met name door een traditionele nabezinktank voor de benodigde bezinkfase. In de haalbaarheidsstudie is een innovatieve uitvoeringsvorm voorgesteld die gebruik maakt van een lamellenseparator waardoor het ruimtebeslag sterk afneemt. In het pilotonderzoek is deze uitvoeringsvorm onderzocht, voorliggende rapportage bevat de resultaten en conclusies van dit onderzoek.

1.2 TECHNOLOGIE

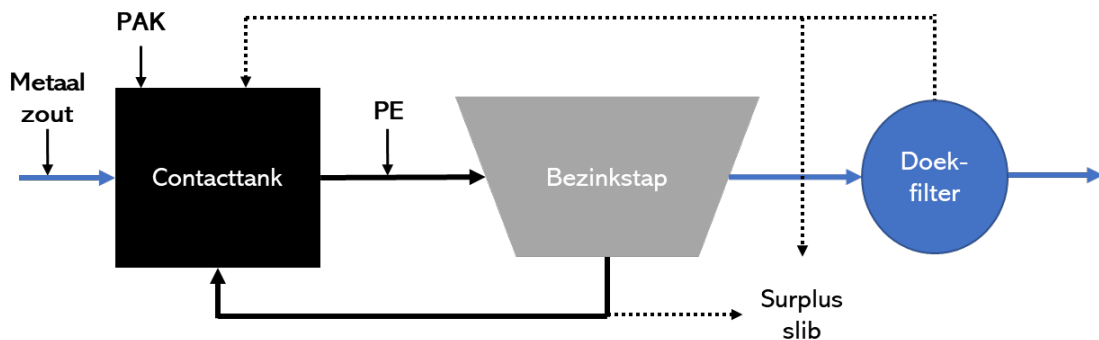
De PAK + doekfiltratie technologie is een nageschakelde technologie voor de verwijdering van microverontreinigingen en fosfor uit het effluent van een rwzi, zie Figuur 1. Poederactiefkool (PAK) en metaalzout worden toegevoegd aan de afloop van een nabezinktank van het actief-slibproces. Microverontreinigingen en fosfor binden aan de PAK en metaalzout en vormen slib. Door middel van een bezink- en doekfiltratiestap wordt dit slib afgescheiden van het water. Het schone water kan vervolgens geloosd worden, het slib moet afgevoerd worden. Dit kan middels de reguliere afvoerroute voor slib of als separate afvalstroom.

FIGUUR 1 INPASSING PAK + DOEFILTRATIE TECHNOLOGIE OP EEN RWZI



In Figuur 2 is een schematische weergave gegeven van de PAK + doekfiltratie technologie. Gelijk aan andere technologieën met actiefkool worden microverontreinigingen uit het afvalwater verwijderd door adsorptie aan actiefkool. Door aanpassing van de PAK-dosering, het type PAK, de PAK-concentratie in de contacttank en de PAK-verblijftijd in het systeem kan het verwijderingsrendement bijgesteld worden en het proces geoptimaliseerd worden. In lijn met andere technieken voor verwijdering van fosfor, zoals zandfiltratie, wordt metaalzout gedoseerd als coagulant om fosfaat te binden. Bij de PAK + doekfiltratie technologie dient de dosering van metaalzout ook een tweede doel; de coagulatie van PAK. Aanvullend hierop is ook de dosering van poly-elektrolyt (PE) nodig om met name in de bezinkstap het mengsel van PAK en metaalzout af te scheiden van het water.

FIGUUR 2 SCHEMATISCHE WEERGAVE PAK + DOEFILTRATIE TECHNOLOGIE



De scheiding van het slib (mengsel PAK, metaalzout en PE) en water vindt plaats in een tweetraps scheidingsconfiguratie. In de eerste stap wordt de bulk van het slib door middel van gravitatie bezonken in een lamellen separator. Het bezonken slib wordt grotendeels teruggevoerd naar de contacttank. Een deel van het bezonken slib wordt als surplus slib gespuid. Dit deel bestaat uit nagenoeg verzadigde PAK, gecoaguleerd ijzerfosfaat, PE en alles wat daar aan gebonden is. In de tweede stap wordt het resterende slib, dat nog aanwezig is in de afloop van de bezinkstap, afgescheiden via doekfiltratie. Het doekfilter wordt periodiek gereinigd om het afgevangen slib af te voeren. Deze stroom wordt teruggevoerd naar de contacttank of afgevoerd als surplus slib.

Verdere technologische beschouwing en achtergrond van de doekfiltratie technologie is terug te vinden in de haalbaarheidsstudie PAK + doekfiltratie (STOWA 2020-21).

1.3 DOELSTELLING

In navolging van de haalbaarheidsstudie zijn de *hoofddoelen* van het pilotonderzoek PAK + doekfiltratie om te onderzoeken:

- of de technologie op een Nederlandse rioolwaterzuivering goed functioneert;
- of de technologie uitgevoerd kan worden met een lamellenseparator, als alternatief voor een nabezinktank;
- welke verwijderingsrendementen en effluentkwaliteit voor microverontreinigingen en fosfor er behaald kunnen worden.

Het streven is om voor de verwijdering van microverontreinigingen minimaal te voldoen aan de eisen die binnen het IPMV worden gehanteerd⁵.

Aanvullend op bovenstaande doelen heeft het pilotonderzoek als *extra doelstelling* om te onderzoeken of verregaande verwijdering van fosfor bereikt kan worden met een configuratie enkel bestaande uit metaalzoutdosering en doekfiltratie.

1.4 AANPAK

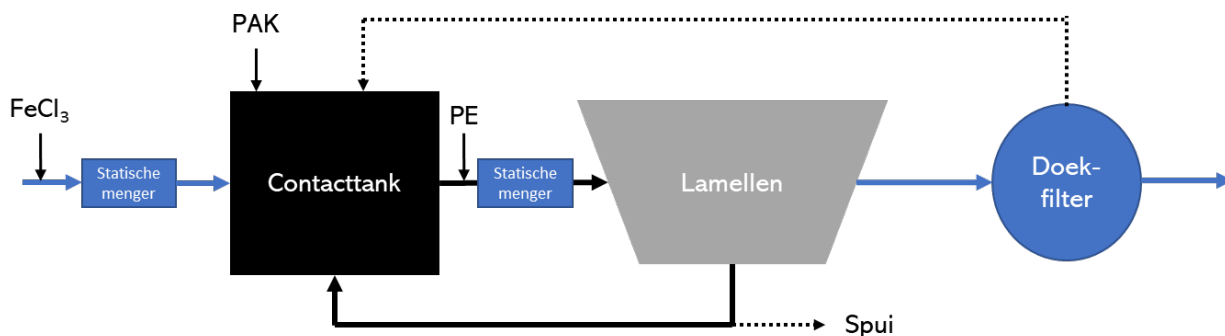
Het onderzoek bestaat uit het uitvoeren van pilottesten op rwzi-effluent. Het pilotonderzoek is opgedeeld in twee fases, waarbij de configuratie van de pilotinstallatie en de doelstelling verschilt:

- Configuratie 1 - 'Verwijdering micro's en fosfor', gericht op de verregaande verwijdering van microverontreinigingen & fosfor door dosering van metaalzout, PAK en PE;
- Configuratie 2 - 'Verwijdering fosfor', gericht op de verregaande verwijdering van fosfor door dosering van metaalzout.

1.4.1 CONFIGURATIE 1 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'

Deze fase is gericht op het behalen van de hoofddoelen. Hiervoor is de pilot bedreven in een configuratie zoals weergegeven in Figuur 3. In deze fase ligt de focus op de te behalen verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen en fosfor in relatie tot de afstemming tussen de contacttank, de lamellenseparator en het doekfilter en de benodigde doseringen van PAK, metaalzout en PE.

FIGUUR 3 SCHEMATISCH WEERGAVE CONFIGURATIE FASE 1 'VERWIJDERING MICRO'S & FOSFOR'

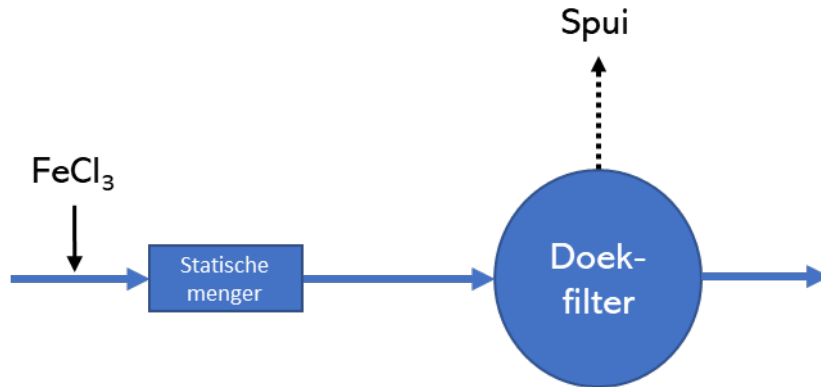


5 Over de gehele rwzi beschouwd (influent t.o.v. effluent) een verwijderingsrendement van 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen: som 4-,5-methylbenzotriazol, benzotriazol, carbamazepine, diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, irbesartan, metoprolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine.

1.4.2 CONFIGURATIE 2 'VERWIJDERING FOSFOR'

Deze fase is gericht op het behalen van de extra doelstelling (verregaande verwijdering van fosfor uit rwzi effluent). De pilot is hiervoor bedreven in een configuratie zoals weergegeven Figuur 4. In fase 2 ligt de focus op de verwijdering van fosfor: het coaguleren van fosfor in de vorm van ijzervlokken, om deze vervolgens met het doekfilter af te vangen en af te voeren.

FIGUUR 4 SCHEMATISCHE WEERGAVE CONFIGURATIE FASE 2 'VERWIJDERING FOSFOR'



2

ONDERZOEKSOPZET

2.1 ONDERZOEKSLOCATIE

Waterschap Aa en Maas heeft rwzi Vinkel beschikbaar gesteld als locatie voor de pilot test. De capaciteit van rwzi Vinkel bedraagt circa 62.000 inwonerequivalenten. Bij droog weer aanvoer (DWA) ligt het influentdebiet op circa 600 m³/uur. Bij regen weer aanvoer (RWA) kan maximaal 2.500 m³/uur verwerkt worden. Het biologische zuiveringsproces beslaat een beluchtingscircuit met twee nabezinktanks. De afloop van beide nabezinktanks komt samen in een effluentgoot alvorens het geloosd wordt. Spui slib wordt na een gravitaire indikstap afgevoerd naar rwzi Dinther voor verdere verwerking. In een meetcampagne voorafgaand aan het pilotonderzoek is geconcludeerd dat het effluent van rwzi Vinkel concentraties aan microverontreinigingen (medicijnresten) bevat die ruim boven de rapportagegrenzen van de gangbare analytische methoden liggen en in lijn zijn met concentraties die op andere rwzi's worden aangetroffen.

2.2 BESCHRIJVING VAN DE PILOTINSTALLATIE

De pilotinstallatie is nabij de effluentgoot geplaatst. Het rwzi-effluent uit deze goot is gebruikt als aanvoer naar de pilotinstallatie. Op hetzelfde punt heeft de monstername voor oploop van de pilot plaatsgevonden, monsternamepunt 'oploop-pilot'. In Figuur 5 is de pilotinstallatie weergegeven.

FIGUUR 5 OPSTELLING VAN DE PILOTINSTALLATIE RECHTS NAAST DE EFFLUENTGOOT MET LINKS DE LAMELLENSeparator, MIDDENACHTER DE CONTACTTANK, MIDDENVOOR HET DOEKFILTER, EN RECHTSACHTER DE CONTROLECONTAINER



In Figuur 3 is de pilotinstallatie schematisch weergegeven. Logisticon Water Treatment heeft de meeste onderdelen van de pilotinstallatie geleverd. Het Mecana doekfilter is geleverd door ELIQUO. De capaciteit van de pilotinstallatie was variabel tussen de 1 en 5 m³/uur. Voor de aanvoer van rwzi-effluent uit de effluentgoot naar de pilot werd een dompelpomp gebruikt voor het creëren van een opvoerfase, verdere doorstroom van de pilot verliep onder vrij verval. De aanvoerleiding na de pompfase was voorzien van een doseerpunt voor metaalzout en een statische menger. Vanwege positieve ervaringen in Duitsland is gekozen om als metaalzout ijzerchloride (FeCl₃) te gebruiken.

Het afgevoerde water met FeCl₃ stroomde vervolgens in een 4 m³ contacttank voorzien van mengers. Afhankelijk van het aanvoerdebiet was de verblijftijd in de contacttank ca. 1 tot 2 uur. PAK werd gedoseerd nabij het inlaatpunt van de contacttank. Op basis van de resultaten van vooraf uitgevoerde lab-testen met verschillende PAK-typen, is gekozen de Norit SAE Super van Cabot te gebruiken in de pilottesten. De afloop van de contacttank stroomde door een leidingwerk voorzien van een PE doseerpunt en statische menger. Praestol™ K 232 L van Solenis is gebruikt als PE, uit lab-testen is gebleken dat deze kationische PE goed werkte voor het bezinken van het PAK-FeCl₃ mengsel.

Na toevoeging van PE volgde een 2,5 m³ lamellenseparator waarin slib en water gescheiden werden (zie Figuur 6). Bezonken bestanddelen werden vanaf de onderzijde van de lamellenseparator geretourneerd naar de oploop van de contacttank. Een gedeelte van deze bestanddelen werden gespuid naar de slibindikker en verlieten de rwzi via de slibafvoerroute. Overstortwater van de lamellenseparator stroomde het doekfilter in (zie Figuur 7). Voor het doekfilter bevond zich het monsternamepunt 'oploop-doeckfilter'. Het doekfilter was voorzien van een Optifiber^(R) PES-14 doek met een oppervlak van 2 m², hiermee kunnen afhankelijk van de vuillast debieten van 10 - 30 m³/uur worden behandeld. Het pilotdebiet van 1 - 5 m³/uur was dus voldoende laag om het doekfilter hydraulisch niet te beperken om te kunnen onderzoeken of er op zeker moment een beperking in slibbelasting ontstaat. Waswater van het doekfilter werd teruggevoerd naar de contacttank. Het waswaterdebiet was gemiddeld 4% en maximaal 5% van het pilotdebiet. In de praktijk zoals bijvoorbeeld in Duitsland hebben full-scale installaties een iets lagere waswaterproductie. De terugvoer van het waswater naar de contacttank zorgde voor hydraulische schokbelastingen van de lamellenseparator. Schokbelastingen komen het afscheidingsrendement van een lamellenseparator doorgaans niet ten goede. In een full-scale toepassing zou de terugvoer van waswater daarom anders zijn, het waswater wordt dan idealiter teruggevoerd naar het actiefslibproces. De afloop van het doekfilter werd teruggevoerd naar de effluentgoot van de rwzi. Monstername vond plaats voor vermenging met rwzi-effluent in de effluentgoot, monstername punt 'afloop-pilot'. De dosering van FeCl₃, PAK en PE vond debietsproportioneel plaats. FeCl₃ dosering was ingesteld in de range van 2,7 – 7 mg Fe/L (≈ 0,5 g Fe/g PAK), PAK in de range van 5 – 15 mg/L, en PE in de range van 0,3 – 0,5 mg actief PE/L (≈ 0,03 g PE/g PAK).

FIGUUR 6 BOVENAANZICHT LAMELLESEPARATOR



FIGUUR 7 OVERSTORT VAN DE LAMELLESEPARATOR (LINKS) EN HET DOEKFILTER VOOR AANVANG VAN DE PILOTTTESTEN (RECHTS)



2.3 TESTPERIODEN

Het pilotonderzoek besloeg verschillende perioden waarin beide onderzoeksconfiguraties zijn getest:

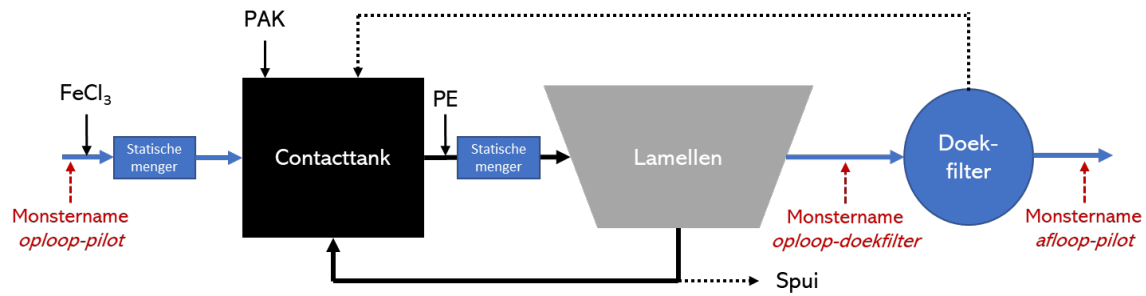
- | | | |
|----------------------------------|----------|-------------------------|
| • Opstart en inregelen | | < 12 april 2021 |
| • Verwijdering fosfor | 4 weken | 12 april t/m 8 mei 2021 |
| • Verwijdering micro's en fosfor | 12 weken | 12 mei t/m 31 juli 2021 |
| • Verwijdering fosfor | 2 weken | 1 aug t/m 13 aug 2021 |

2.4 MONSTERNAME

In Figuur 8 zijn de monsternamepunten van de pilot aangegeven voor de configuratie 'Verwijdering micro's en fosfor'. De configuratie 'Verwijdering fosfor' kende enkel de monsternamepunten 'oploop-pilot' en 'afloop-pilot'. Naast de aangegeven monsternamepunten zijn er ook monsters genomen uit de contacttank en in de slib-retourstroom voor bepaling van onopgeloste bestanddelen en bezinkbaarheid.

FIGUUR 8

SCHEMATISCHE WEERGAVE MONSTERNAMEPUNTEN

**24-UURS VERZAMELMONSTERS**

De monsternamepunten 'oploop-pilot' en 'afloop-pilot' waren voorzien van monsternamekasten waarmee tijdsproportionele monsters zijn genomen. Doordat het debiet van de pilot gedurende een monstername constant was zijn tijdsproportionele monsters gelijk aan debietsproportionele monsters. Gestreefd is naar monstername van 24-uur, startende rond 9:00 en eindigend om 9:00 de volgende dag voor beide monsternamepunten. Door operationele aspecten is dit niet altijd gelukt en zijn op meerdere meetdagen monsters over circa 16 tot 24 uur genomen. De analyse van microverontreinigingen, stikstof en biologische effecten is uitgevoerd op verzamelmonsters. Analyses van fosfor, ijzer en onopgeloste bestanddelen zijn zowel op verzamelmonsters als steekmonsters uitgevoerd.

STEEKMONSTERS

Voor het analyseren van fosfor, ijzer en onopgeloste bestanddelen zijn vrijwel dagelijks steekmonsters genomen. Steekmonsters zijn genomen op de monsternamepunten 'oploop-pilot', 'oploop-doekfilter', 'afloop-pilot' en uit de contacttank en slib-retourstroom.

INVLOED RWA OP MONSTERNAME

Bij RWA treedt verdunning op van de concentratie microverontreinigingen in het influent van rwzi Vinkel. Tijdens en vlak na RWA zijn de concentraties microverontreinigingen in de oploop van de pilot hierdoor ook laag. Concentraties van microverontreinigingen onder of rondom de rapportagegrens verhinderen een goede evaluatie van de pilotprestaties. Voor de analyse van microverontreinigingen en biologische effecten is daarom gekozen enkel monsters te nemen op dagen waarop het dagdebiet van de rwzi minder is dan 2x DWA. Monstername voor overige metingen is niet opgeschort op RWA dagen.

2.5 ANALYSES**MICROVERONTREINIGINGEN**

Microverontreinigingen zijn in het laboratorium van Aquon gemeten. Het analysepakket gidsstoffen omvatte de analyse van de volgende microverontreinigingen: 1,2,3-benzotriazol, Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol, Amisulpride, Azitromycine, Cadesartan, Carbamazepine, Citalopram, Claritromycine, Diclofenac, Furosemide, Gabapentine, Hydrochloorthiazide, Irbesartan, Metoprolol, Propranolol, Sotalol, Sulfamethoxazol, Trimethoprim en Venlafaxine. Dit zijn alle gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen zoals medio 2021 in de IPMV-voorschriften opgenomen.

BIOLOGISCHE EFFECTEN

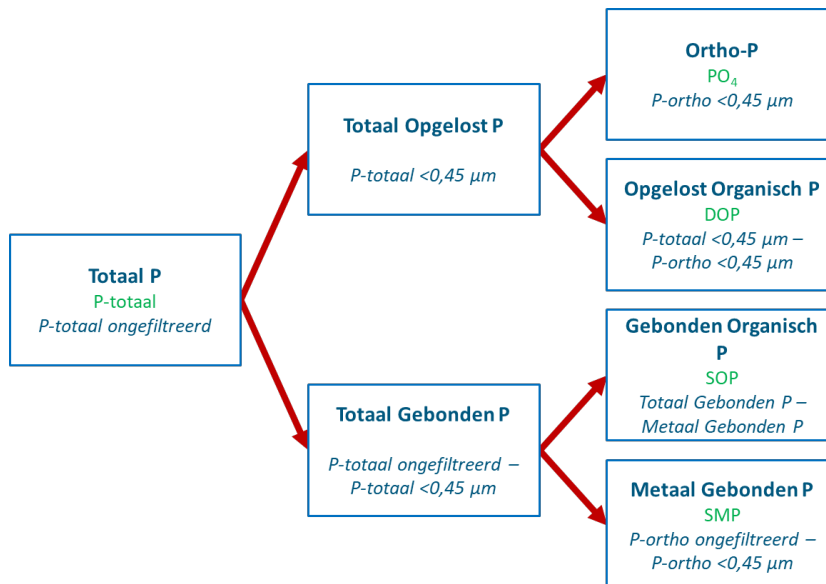
Om te bepalen of er een effect is op de (eco)toxiciteit van het behandelde water zijn conform de IPMV-richtlijnen biologische effectmetingen uitgevoerd. Deze analyses zijn gedaan door Bio Detection Systems. In totaal zijn twee monsters geanalyseerd, bij een PAK dosering van 10 mg/L en bij een dosering van 15 mg/L. De volgende bioassays zijn uitgevoerd:

- Microtox (*Metabolisme bacteriën*)
- Daphniatox (*Watervlooien immobiliteit*)
- PAH-Calux (*PAH activiteit*)
- ER-Calux (*Oestrogene activiteit*)
- PXR-Calux (*Xenobiotische signalerings activiteit*)
- GR-Calux (*Glucocorticoïde activiteit*)

FOSFOR-FRACTIES

Zowel op locatie middels Hach-Lange cuvettentesten als in het laboratorium van Aquon zijn metingen fosfor-totaal (P-totaal) en orthofosfaat (ortho-P) voor en na filtratie over een 0,45 µm filter uitgevoerd om de diverse fosfor-fracties te kunnen bepalen. Voor de bepaling van de diverse fracties is het schema aangehouden zoals in Figuur 9 is weergegeven.

FIGUUR 9 VERSCHILLENDE P-FRACTIES EN HOE ZE BEREKEND WORDEN



OVERIGE METINGEN

Op locatie zijn metingen uitgevoerd om de onopgeloste bestanddelen te meten. Dit is gedaan op een relatief simpele wijze met een oven voor huishoudelijk gebruik (100-120°C) en een analytische balans. De inschatting is dat met name bij lage concentraties opgeloste bestanddelen (<10 mg/L) de meetonnauwkeurigheid hierdoor ±40% is. De pilotinstallatie was voorzien van NTU-metingen (troebelheid) in de oploop- en afloop van het doekfilter. In het laboratorium van Aquon zijn stikstof metingen uitgevoerd (Nkj, NH₄, NO_x en NO₂) voor en na filtratie. Op locatie zijn metingen van ijzer (II) en ijzer (III) uitgevoerd middels Hach-Lange cuvettentesten. Er is geen analyse uitgevoerd om de concentraties PE in het slibmengsel, in de contacttank of in de afloop-pilot te bepalen.

2.6 VERWERKING MEETGEGEVENS

Vanwege de verregaande P-verwijdering zijn meermaals fosfor concentraties in de afloop van de pilot onder de meet- of rapportagegrens aangetroffen. Fosfor metingen die door Aquon zijn uitgevoerd hebben een rapportagegrens van 0,006 mg P/L. Enkel voor fosfaat is enkele keren een meting onder de rapportagegrens aangetroffen. In dat geval is de rapportagegrens gerapporteerd. Voor de Hach-Lange cuvettesten die op locatie zijn uitgevoerd is de meetgrens 0,05 mg P/L. Indien een waarde onder de 0,05 mg P/L is aangetroffen is deze gerapporteerd als 0,04 mg P/L. Voor de berekening van de diverse P-fracties is rekening gehouden met bovengenoemde rapportagegrenzen.

Voor microverontreinigingen waarvan de concentratie in de oploop-pilot onder de rapportagegrens lag, is geen verwijderingsrendement berekend. Indien de concentratie in de afloop-pilot onder de rapportagegrens en de concentratie in de oploop-pilot boven de rapportagegrens lag, is voor de afloop-pilot gerekend met 50% van de rapportagegrens. Deze aanpak is toegepast in eerdere pilotstudie (STOWA 2020-41). Deze methode wijkt af van het koepelvoorschrift 2021-15 waarin kleiner dan de rapportagegrens gerapporteerd wordt als de rapportagegrens. Omdat de pilot in Vinkel een nageschakelde installatie betreft waarbij de ingaande concentraties al lager liggen dan in het influent van de rwzi is bewust gekozen voor het rapporteren van 50% van de rapportagegrens. De dataset was niet geschikt voor toepassing van de Volkert Bakker methodiek.

FIGUUR 10 PILOTINSTALLATIE



3

RESULTATEN

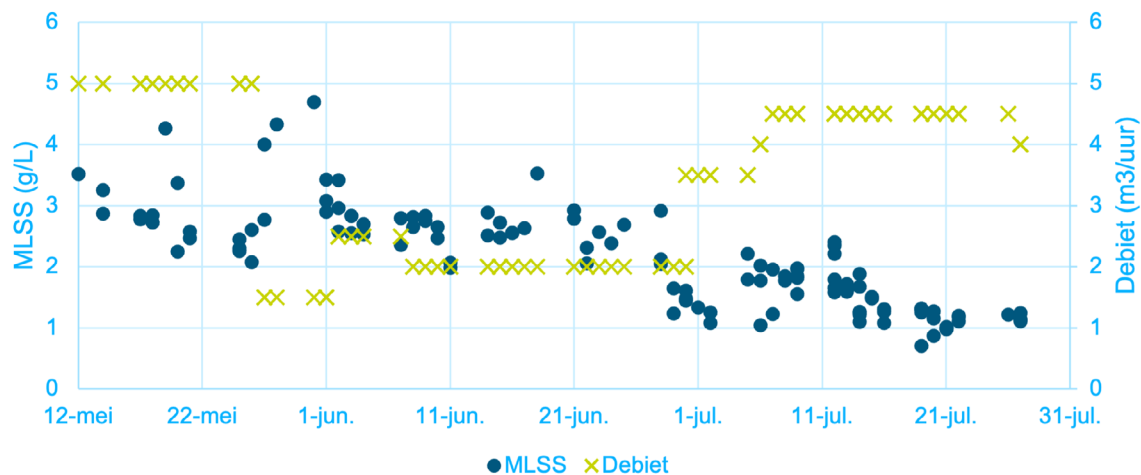
3.1 CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S & FOSFOR'

Onderstaand zijn de resultaten beschreven van de configuratie 'Verwijdering micro's en fosfor' waarvoor zowel metaalzout, PE als PAK in de pilotinstallatie zijn gedoseerd.

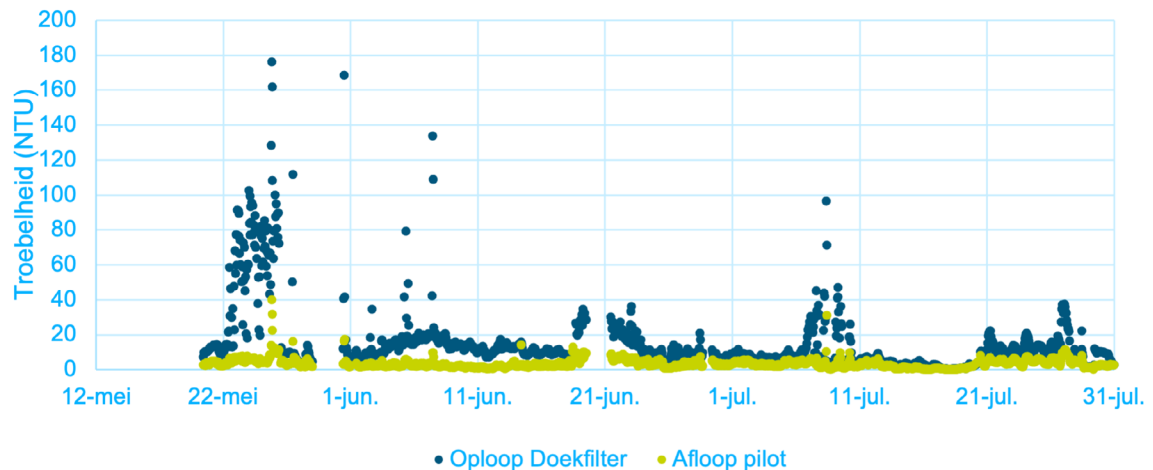
3.1.1 AFSCHEIDING VAN HET SLIBMENGSEL

Een van de doelstellingen van het pilotonderzoek is het onderzoeken of een configuratie met lamellenseparator als alternatief voor een conventionele bezinktank werkt. Om dit te testen is onderzocht welke vracht van het slibmengsel uit de contacttank in de lamellenseparator afgescheiden kan worden, zonder dat dit het doekfilter overbelast. In Figuur 11 zijn de concentratie mixed liquor suspended solids (MLSS, ook wel TSS genoemd) in de contacttank en het debiet waarop de pilot bedreven is weergegeven.

FIGUUR 11 MLSS IN DE CONTACTTANK EN HET DEBIET VAN DE PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



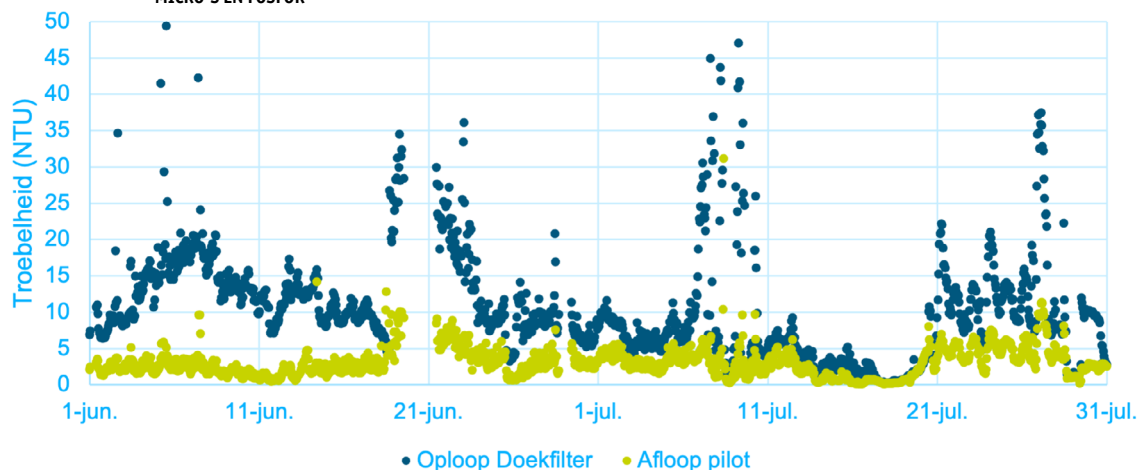
FIGUUR 12 **TROEBELHEID IN OPLOOP-DOEKFILTER EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'.**
GEDURENDE MEERDERE DAGEN IS DE DATA NIET GOED GELOGD WAARDOOR GEEN TROEBELHEID KAN WORDEN GEGEVEN, O.A. IN DE
PERIODE VOOR 21-MEI



In Figuur 12 is de troebelheid in de oploop van het doekfilter en afloop van de pilot (afloop doekfilter) weergegeven. Uit de troebelheidsmetingen is te concluderen dat in de periode tot 1 juni de oploop van het doekfilter een hoge troebelheid had (>20 NTU). Dit is de periode dat de pilot werd bedreven op een debiet van 5 m³/uur en een MLSS van 2,5 – 4,5 g/L. Bij deze instellingen is gebleken dat de lamellenseparator overbelast werd waardoor het doekfilter te veel deeltjes (gemeten als troebelheid) te verwerken kreeg. Visueel kon vastgesteld worden dat het slibbed in de lamellenseparator omhoog kwam en er veel slibvlokjes uit de lamellenseparator richting het doekfilter stroomden. Ondanks dat het doekfilter hierdoor flink belast werd waren de prestaties relatief goed. Bij NTU-waarden van 50 tot 100 in de oploop van het doekfilter resulteerde dit in ca. 10 NTUs in de afloop van het doekfilter. Een typische algemene conversiefactor van NTU naar onopgeloste bestanddelen is 2,5 mg/L per NTU. Uitgedrukt in slibbelasting (TSS) werd het doekfilter dus gevoed met 1250 – 2500 g TSS/ uur (250 – 500 mg/L onopgeloste bestanddelen en 5 m³/uur) en daardoor beladen met 675 – 1250 g/m²/uur. Dit is een zeer hoge belading. Ook bij deze belading is de effluentkwaliteit met ca. 10 NTU (ca. 25 mg TSS/L) relatief goed gebleven. Hiermee is het inzicht verkregen dat bij incidentele verstoringen die resulteren een (tijdelijke) verhoogde slibbelasting van een (full-scale) PAK + doekfiltratie installatie er een grote mate van robuustheid is m.b.t. de effluentkwaliteit. In het pilotonderzoek is niet onderzocht hoe de combinatie van een (tijdelijke) verhoogde slibbelasting in combinatie met een (tijdelijke) verhoogde hydraulische belasting functioneert. Vanuit praktijkervaring met full-scale doekfilter installaties is bekend dat in zo'n situatie de reinigingsfrequentie van het doek sterk toeneemt zonder enorm in te boeten op de effluentkwaliteit.

Eind mei is besloten om het debiet van de pilot te verlagen tot 1,5 – 2,5 m³/uur en de MLSS te sturen op 2,5 – 3 g/L. Bij deze instellingen heeft de pilot stabiel gedraaid. De lamellenseparator haalde in deze periode een hoog afscheidingsrendement van 99%. De belasting van de lamellenseparator was ca. 0,65 m/uur. Eind juni is de MLSS verlaagd naar 1 - 2 g/L en het debiet verhoogd naar 3,5 - 4,5 m³/uur. Ook bij deze instellingen heeft de pilot stabiel gedraaid met een hoog afscheidingsrendement van 99%. De belasting van de lamellenseparator was in deze periode ca. 1,45 m/uur. In Figuur 13 is de troebelheid weergegeven van deze beide periode waarin de pilot stabiel gedraaid heeft.

FIGUUR 13 TROEBELHEID IN OPLOOP-DOEKFILTER EN AFLOOP-PILOT TIJDENS DE STABIELE PERIODEN VAN CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



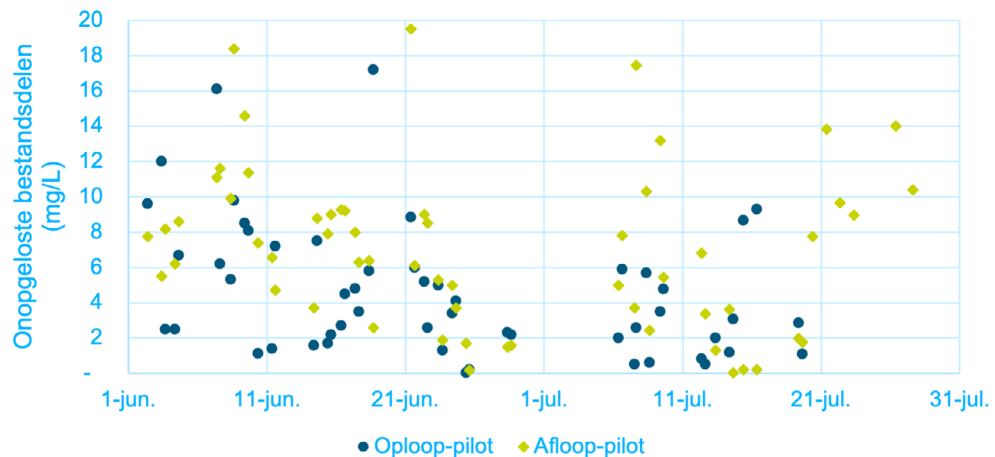
Tijdens beide stabiele perioden was de troebelheid in de oploop van het doekfilter (afloop lamellenseparator) op enkele piekmomenten na kleiner dan 20 NTU en gemiddeld 10 NTU. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij deze procesinstellingen (debiet en MLSS) de lamellenseparator goed functioneerde.

Het doekfilter functioneerde ook goed in deze periode, al laten diverse andere (full-scale) doekfilterinstallaties nog net iets betere NTU-waarden zien (Fundneider et al, 2020 en Fundneider et al, 2021). De troebelheid in de afloop-pilot schommelde tussen 0,5 en 5 NTU en was gemiddeld 3 NTU. Met name de troebelheid die gemeten is bij 3 NTU of hoger wordt grotendeels bepaald door hoe goed het coagulatieproces verloopt. In de periode waarin de troebelheid 3 of meer NTU was is visueel vastgesteld dat niet goed filtreerbare vlokjes gevormd werden waardoor het doekfilter ze niet goed tegen kan houden. Dit zou ook gelden voor andere technologieën zoals bijvoorbeeld zandfiltratie. Een goede coagulatie en vlokvorming is zeer belangrijk. In de pilotinstallatie was dit mogelijk sub-optimaal.

In Figuur 14 is de concentratie onopgeloste bestanddelen weergegeven in de oploop- en afloop van de pilot. Hierbij moet worden opgemerkt dat de meetwaarden een aanzienlijke onnauwkeurigheid kennen (inschatting $\pm 40\%$) omdat de metingen op simpele wijze zijn uitgevoerd en de meetwaarden dermate laag zijn dat deze aan de onderzijde van het meetbereik liggen. De concentratie onopgeloste bestanddelen in de oploop-pilot kent enige fluctuatie. Gemiddeld is de concentratie 4,3 mg/L, dit is zeer laag voor een rwzi. De concentratie in de afloop-pilot fluctueert ook, gedeeltelijk komt dit patroon overeen met de troebelheidsmetingen. Gemiddeld is de concentratie onopgeloste bestanddelen in de afloop-pilot 7,1 mg/L.

FIGUUR 14

CONCENTRATIE ONOPGELOSTE BESTANDSDELEN IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS DE STABIELE PERIODEN VAN CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



De meetonauwkeurigheid buiten beschouwing gelaten lijkt er dus sprake van een toename in onopgeloste bestanddelen door de pilot. Dit is enerzijds te verklaren door de zeer lage concentratie onopgeloste bestanddelen in de oploop-pilot. Anderzijds komt dit doordat ook in de stabiele bedrijfsvoering periode tussen 1 juni en 31 juli er af en toe procesinstellingen van de pilot zijn gewijzigd (o.a. FeCl_3 -dosering, aanvoerdebiet, mengenergie). De combinatie van de lamellenafscheider en het doekfilter zorgen samen voor een afname van circa 1 tot 4 g/L MLSS die uit de contacttank stroomt tot gemiddeld 7,1 mg/L onopgeloste bestanddelen in de afloop-pilot.

3.1.2 MICROVERONTREINIGINGEN

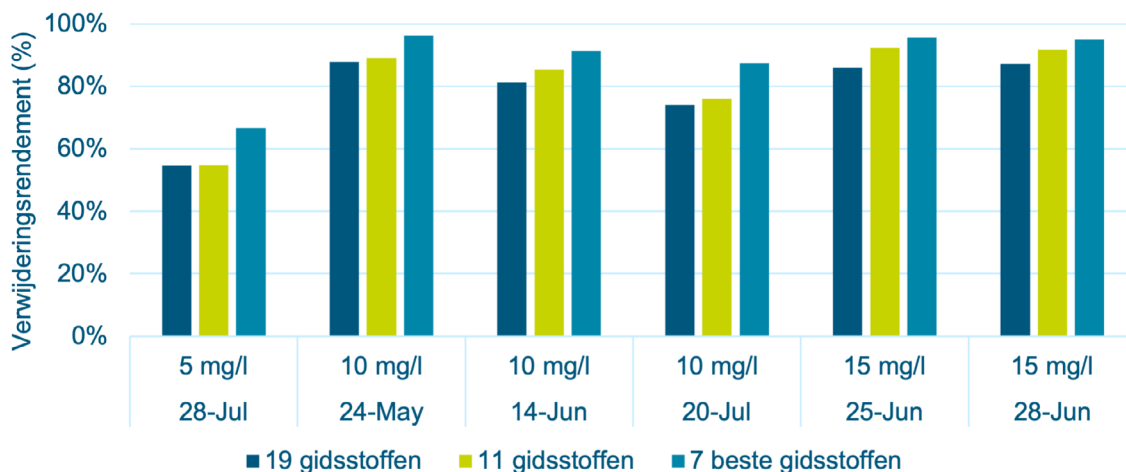
Op 6 meetdagen zijn 24-uurs verzamelmonsters van oploop- en afloop-pilot geanalyseerd op de aanwezigheid van microverontreinigingen. Eén daarvan behorend bij een PAK-dosering van 5 mg/L, drie bij 10 mg/L en twee bij 15 mg/L. Amisulpride is geen enkele metingen boven de rapportagegrens aangetroffen. Er is daarom geen verwijderingsrendement voor amisulpride berekend. Azitromycine, claritromycine en furosemide zijn in de oploop-pilot respectievelijk twee-, drie- en driemaal niet boven de rapportagegrens aangetroffen. Voor de keren dat azitromycine, claritromycine en furosemide wel boven de rapportagegrens zijn aangetroffen is een verwijderingsrendement berekend. Meerdere microverontreinigingen zijn in de afloop-pilot niet boven de rapportagegrens aangetroffen. Voor het berekenen van het verwijderingsrendement is in deze gevallen gerekend met 50% van de rapportagegrens voor de concentraties in de afloop-pilot.

De verwijderingsrendementen van alle 19 gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen⁶, van de 11 gidsstoffen⁷ en van de 7 van de 11 best verwijderde gidsstoffen zijn berekend per meetdag en weergegeven in Figuur 15.

⁶ Feitelijk 18 want amisulpride is nooit boven de rapportagegrens aangetroffen.

⁷ Gidsstoffenlijst IPMV 2021: Benzotriazol, Carbamazepine, Diclofenac, Gabapentine, Hydrochloorhiazide, Irbersartan, Metoprolol, Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol, Sotalol, Trimethoprim en Venlafaxine

FIGUUR 15 GEMIDDELTE VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MICROVERONTREINIGINGEN OVER DE 6 MEETDAGEN (DATUM) BIJ VERSCHILLENDE PAK-DOSERINGEN (MG/L)



Bezien over de 6 meetdagen is het verwijderingsrendement van de 7 beste van de 11 gidsstoffen gemiddeld 67% (N=1), 92% (N=3) en 95% (N=2) voor PAK-doseringen van respectievelijk 5, 10 en 15 mg/L. De 7 best verwijderde gidsstoffen waren altijd de volgende 6 gidsstoffen: benzotriazol, carbamazepine, metoprolol, som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol, sotalol en trimethoprim. Per meetdag verschilde het wat de 7^e gidsstof was.

Voor alle 11 gidsstoffen is het verwijderingsrendement over de 6 meetdagen gemiddeld 55% (N=1), 84% (N=3) en 92% (N=2) voor PAK-doseringen van respectievelijk 5, 10 en 15 mg/L. In Tabel 11 en Tabel 12 van Bijlage A zijn voor alle individuele microverontreinigingen de gemeten concentraties en berekende verwijderingsrendementen weergegeven.

3.1.3 BIOLOGISCHE EFFECTEN

Op 2 meetdagen zijn 24-uurs verzamelmonsters van de oploop- en afloop-pilot geanalyseerd op biologische effecten. De resultaten van de Daphniatox en Microtox testen zijn samengevat in Tabel 2. De resultaten van de Calux testen zijn weergegeven in Tabel 3.

TABEL 2 RESULTATEN VAN DE DAPHNIATOX EN MICROTOX TESTEN. WAARDEN TUSSEN HAAKJES GEVEN HET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL

Meetdag	Meetpunt	PAK-dosering mg/L	Daphniatox			Microtox		
			NOEC _f	EC _{f,50}	TU	EC _{f,20}	EC _{f,50}	TU
14 juni	Oploop-pilot	10	10,2	17,2 (14,9 – 19,8)	0,058 (0,051 – 0,067)	<4,6	15,5 (14,8 – 16,2)	0,064 (0,062 – 0,067)
14 juni	Afloop-pilot		33,4	>66,8	<0,015	7,7 (6,2 – 9,6)	>30,1	<0,033
25 juni	Oploop-pilot	15	39,5	>79,1	<0,013	5,5 (4,6 – 6,6)	27,8 (23,3 – 33,1)	0,036 (0,030 – 0,043)
25 juni	Afloop-pilot		70,1	>70,1	<0,014	>31,5	>31,5	<0,032

De uitkomsten van de Daphniatox en Microtox testen zijn de $EC_{f,50}$, de No Effect Concentration factor ($NOEC_f$) en/of de $EC_{f,20}$. De $NOEC_f$ is de concentratiefactor die het monster kan ondergaan, waarbij er nog net geen effect optreedt. De $EC_{f,20}$ en/of $EC_{f,50}$ geeft de concentratiefactor weer waarbij respectievelijk 20% en 50% effect optreedt. Een $EC_{f,50}$ waarde van bijvoorbeeld 10 betekent dat het effect is vastgesteld op 10x geconcentreerd afvalwater. Daarnaast wordt ook de TU-waarde opgenomen. Deze is berekend als $1/EC_{f,50}$ -waarde en drukt de toxiciteit uit per

liter van het oorspronkelijke watermonster. Deze kan worden vergeleken met de ecologische signaleringswaarde van 0,05 (STOWA 2016-15A).

In de monsters van 14 juni zijn zowel voor oploop-pilot en afloop-pilot effecten in de Daphniatox en Microtox test vastgesteld. Voor beide testen is gevonden dat de effecten in de afloop-pilot circa 50% of meer lager zijn ten opzichte van de oploop-pilot. In de oploop-pilot is voor beide testen sprake van een overschrijding van de ecologische signaleringswaarde ($TU \geq 0,05$). Deze overschrijding is niet aanwezig in de afloop-pilot. De toxiciteit is dus afgenomen. In de blanco monsters zijn geen effecten vastgesteld (data niet getoond).

In de monsters van 25 juni zijn geen overschrijdingen van de ecologische signaleringswaardes gevonden. Wel zijn er effecten aangetroffen. Ook in deze monsters nemen de biologische effecten voor alle testparameters af over de pilotinstallatie. Enkel voor de Microtox wordt bij de $EC_{f,20}$ waarde een reductie van meer dan 50% behaald, voor de andere waarden is het minder dan 50%. In de blanco monsters zijn geen effecten vastgesteld (data niet getoond).

Met behulp van de Calux-methode zijn specifieke activiteiten gemeten. De gemeten parameters zijn oestrogene activiteit, glucocorticoïde activiteit, polycyclisch aromatische koolwaterstoffen (PAH) activiteit, en xenobiotische signalering activiteit. De gevonden activiteiten worden uitgedrukt in concentraties van een referentiestof per liter water. De testresultaten zijn weergegeven in Tabel 3.

TABEL 3 RESULTATEN CALUX-TESTEN

Meetdag	Meetpunt	PAK-dosering mg/L	ER-calux	GR-Calux	PAH-Calux	PXR-Calux
			ng 17 β -estradiol eq/L	ng dexamethasone eq/L	ng benzo[a]pyrene eq/L	μ g nicardipine eq/L
14 juni	Oploop-pilot	10	1,6	59	57	43
14 juni	Afloop-pilot		0,12	7	9,9	15
25 juni	Oploop-pilot	15	1,3	38	280	54
25 juni	Afloop-pilot		0,045	<2,0	11	8,3

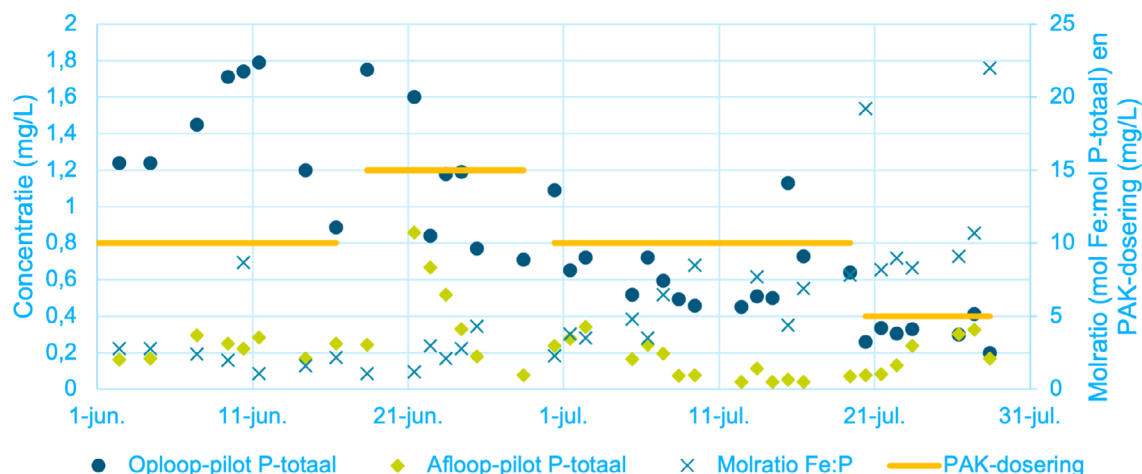
Op beide meetdagen is een afname te zien in de diverse activiteiten over de pilotinstallatie. Concentraties van equivalent-stoffen liggen in de afloop-pilot 50% lager ten opzichte van de oploop-pilot. Bij de doseringen van zowel 10 als 15 mg PAK/L vindt dus een halvering plaats van biologische effecten door behandeling met de PAK + doekfiltratie technologie.

3.1.4 FOSFOR

P-TOTAAL

In de periode waarin de pilot stabiel draaide (1-juni tot 31 juli) zijn dagelijks P-totaal metingen uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 16 Hierin is ook de dosering van metaalzout ($FeCl_3$) uitgedrukt als toegepaste molratio Fe:P weergegeven. De molratio is berekend op basis van P-totaal in de oploop van de pilot.

FIGUUR 16 CONCENTRATIE P-TOTAAL IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT (MG/L), MOLRATIO FE:P (MOL FE:MOL P-TOTAAL) EN PAK-DOSERING TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



De concentratie P-totaal in de afloop-pilot fluctueerde op drie uitschieters na tussen de 0,04 en 0,35 mg/L en was gemiddeld 0,18 mg/L. De molratio Fe:P en de concentratie P-totaal in de oploop-pilot hebben duidelijk een invloed op de concentratie P-totaal in de afloop-pilot. De PAK-dosering lijkt van iets mindere invloed.

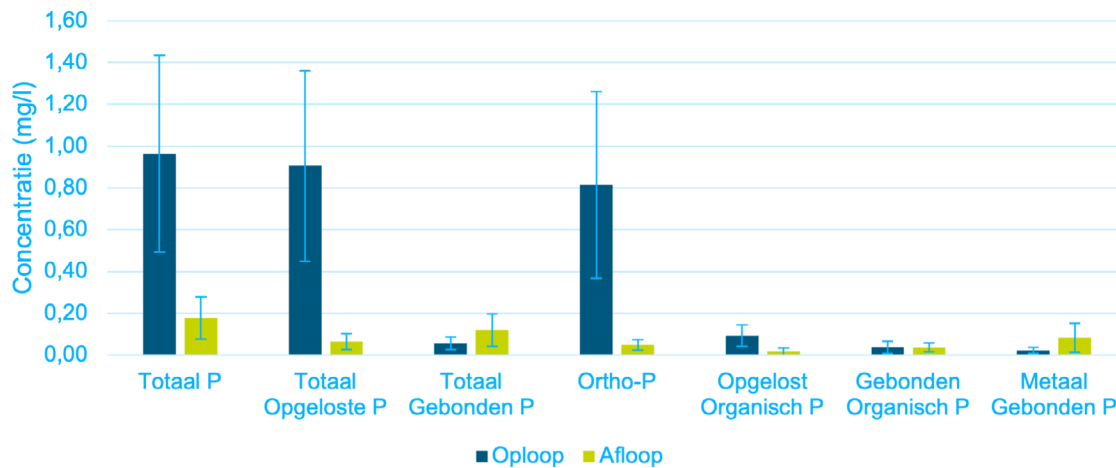
Bij P-totaal concentraties in de oploop-pilot van ca. 0,3 mg/L zoals tussen 20 en 28 juli neemt de P-totaal verwijdering af over de pilot af. In deze periode wordt de coagulatie bemoeilijkt omdat er weinig fosfor aanwezig is om mee te coaguleren. Een lage concentratie P-totaal in de oploop-pilot ging doorgaans gepaard met een lage concentratie onopgeloste bestanddelen in de pilot (ca. 4-5 mg/L). Ook de afwezigheid van onopgeloste bestanddelen bemoeilijkt de coagulatie. De gelijktijdig lage concentraties P-totaal en onopgeloste bestanddelen resulteren in de vorming van zeer kleine vlokjes bestaand uit fosfor en ijzer die niet door het filter worden afgevangen en in de afloop-pilot terecht komen. Het lijkt dus bevorderlijk voor een lage P-totaal concentratie in de afloop-pilot om in de oploop-pilot een P-totaal concentratie van meer dan 0,3 mg/L te hebben. Deze ervaring is ook bekend uit de praktijk van andere technologieën waarbij coagulatie een rol speelt zoals bijvoorbeeld zandfiltratie.

De metaalzoutdosering in de pilotinstallatie werd niet gestuurd op een fosfor/fosfaat sensor maar handmatig ingesteld op een doseerdebiet. Hierdoor fluctueert de molratio Fe:P met een vergelijkbare trend als de P-totaal concentratie in de oploop-pilot. In een full-scale toepassing kan met een fosfor/fosfaat sensor het proces beter gestuurd worden waardoor mogelijk lagere molratio's en een stabielere effluentkwaliteit behaald wordt.

P-FRACTIES

In Figuur 17 en Tabel 4 zijn voor de periode met een PAK-dosering van 10 mg/L de concentraties van de verschillende P-fracties weergegeven. In de tabel zijn ook de behaalde verwijderingsrendementen gegeven. De P-fracties zijn minder vaak bepaald dan de P-totaal metingen zoals gegeven in Figuur 16.

FIGUUR 17 P-FRACTIONERING BIJ PAK-DOSERING 10 MG/L (N=14)



TABEL 4 P-FRACTIONERING EN VERWIJDERING BIJ PAK-DOSERING 10 MG/L (N=14)

Fractie	Oploop-pilot		Afloop-pilot		Verwijdering %
	Gemiddelde concentratie	Standaard afwijking	Gemiddelde concentratie	Standaard afwijking	
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
Totaal P	0,96	0,47	0,18	0,10	82%
Totaal Opgeloste P	0,91	0,46	0,06	0,04	93%
Totaal Gebonden P	0,06	0,03	0,12	0,08	-108%
Ortho-P (P04)	0,81	0,45	0,05	0,03	94%
Opgelost Organisch P (DOP)	0,09	0,05	0,02	0,02	82%
Gebonden Organisch P (SOP)	0,04	0,03	0,04	0,02	2%
Metaal Gebonden P (SMP)	0,02	0,01	0,08	0,07	-266%

In zowel Figuur 17 als Tabel 4 zijn standaardafwijkingen gegeven. Dit is mogelijk niet volledig correct conform de spelregels van de statistiek omdat waarden op- en nabij de meetgrens niet normaal verdeeld zijn. De standaardafwijking geeft echter wel een indicatie van de spreiding tussen metingen. Hieruit blijkt dat voornamelijk voor de lage concentraties de spreiding gering is.

Zoals verwacht is voornamelijk de fractie ortho-P verregaand verwijderd door de pilot. Ortho-P wordt met metaalzout gecoaguleerd, de zogenaamde metaal gebonden P-fractie (SMP). Deze fractie wordt als vlok ingevangen in het slibmengsel en verlaat uiteindelijk als spui-slib de pilot. Door de opzet van de pilotinstallatie was het coagulatieproces mogelijk suboptimaal. Dit resulteerde vermoedelijk in de vorming zeer kleine ijzerfosfaat verbindingen die zich niet tot filtreerbare vlok ontwikkelen. Ook kunnen soortgelijke verbindingen ontstaan doordat een deel van de reeds gevormde vlokken in de contacttank door de aanwezige mengers (gedeeltelijk) kapot gaan. Deze SMP-fractie passeert de lamellenafscheider en het doekfilter en is in de afloop van de pilot dan ook de meest aanwezige P-fractie. Gelijk aan de troebelheidsresultaten heeft dit vooral te maken met het coagulatieproces dat in een pilotinstallatie suboptimaal is vergelijking met een full-scale installatie. Voor vergelijkbare filtratieprocessen zoals zandfiltratie zal vermoedelijk hetzelfde effect optreden. Een optimalisatie van het coagulatieproces door een betere dosering en menging en het beter op elkaar afstemmen van de systeemcomponenten (contacttank, bezinkstap en doekfilter incl. verbindend leidingwerk) kan de SMP-fractie in de afloop-pilot mogelijk verlagen.

De opgelost organisch P-fractie (DOP) die doorgaans als inert wordt beschouwd, wordt in de PAK + doekfiltratie technologie grotendeels verwijderd. De concentratie DOP in de oploop-pilot was met 0,09 mg/L al relatief laag. In de afloop-pilot is deze fractie nagenoeg afwezig. De gerapporteerde concentratie van 0,02 mg/L kan ook gelezen worden als ver onder meetbereik. Dit omdat DOP berekend wordt als de meting totaal opgeloste P minus de meting ortho-P. Meerdere keren zijn deze beide fracties onder het meetbereik van 0,05 mg/L aangetroffen waardoor ze als 0,04 mg/L gerapporteerd zijn. De concentratie DOP zou dan rekenkundig gezien nul zijn. In dat geval is 0,02 mg/L gerapporteerd als DOP concentratie.

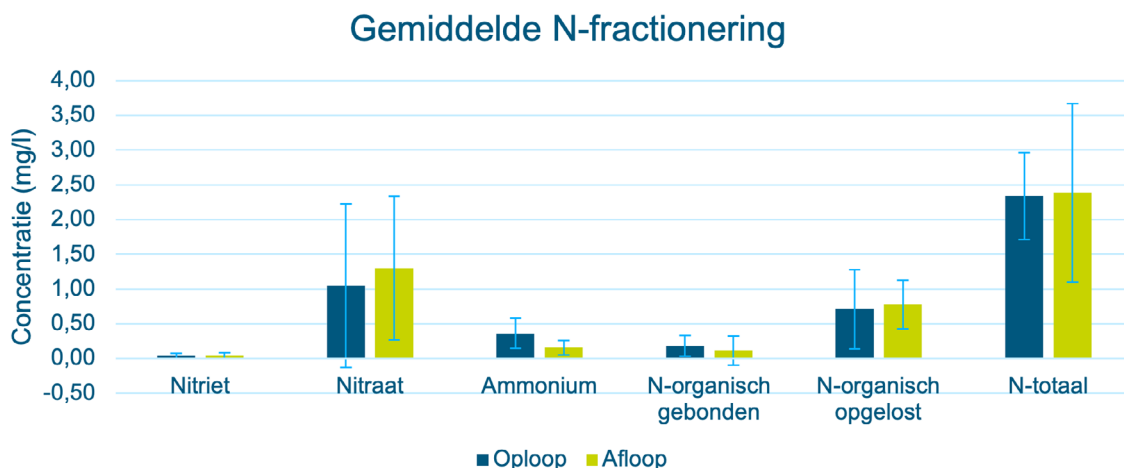
De P-fracties tijdens de PAK-doseringen van 5 en 15 mg/L zijn in bijlage B gegeven. De resultaten bij een PAK-dosering van 15 mg/L komen zeer overeen met de resultaten bij een PAK-dosering van 10 mg/L. Ortho-P en DOP worden goed verwijderd. SMP is de meest aanwezige P-fractie in de afloop-pilot.

De P-fracties bij de PAK-dosering van 5 mg/L zien er duidelijk anders uit. Opgemerkt moet worden dat er bij deze PAK-dosering slechts 2 P-fractionaties zijn uitgevoerd. Daarnaast was de P-totaal concentratie in de oploop-pilot met gemiddeld 0,22 mg/L heel erg laag. De concentratie P-totaal in de afloop-pilot was met gemiddeld 0,08 mg/L ook heel laag. Op deze twee meetpunten is ook SMP in de afloop-pilot laag en is ortho-P de fractie die het voornaamst verwijderd is.

3.1.5 STIKSTOF

In totaal zijn 6 monsters geanalyseerd op diverse stikstof fracties, de resultaten van deze analyses zijn weergegeven in Figuur 18. In grote lijnen lijkt er weinig te gebeuren met de diverse stikstof fracties. De concentratie N-totaal verandert van 2,34 tot 2,39 mg/L over de pilot niet noemenswaardig. Er vindt dus geen stikstofverwijdering plaats. Dit is naar verwachting omdat PAK + doekfiltratie een niet-biologische technologie is. Door de onopzettelijke aanwezigheid van geringe hoeveelheden micro-organismen en de voornamelijk aerobe condities vindt er wel in enige mate omzetting van ammonium tot nitraat plaats. Voor vrijwel elke individuele meetdag is de afname in ammonium nagenoeg gelijk aan de toename in nitraat. Van de gebonden organische N-fractie vindt een geringe afname plaats, van gemiddeld 0,18 tot 0,11 mg/L. De standaarddeviatie is echter behoorlijk groot, dit komt mede doordat de concentratie gebonden organische stikstof volgt uit een berekening van andere metingen (NKj minus NKj na filtratie). In tegenstelling tot de opgelost organische P-fractie neemt de opgelost organische N-fractie niet af. Deze concentratie lijkt zelfs licht toe te nemen van gemiddeld 0,71 tot 0,78 mg/L. Ook hiervoor geldt dat de standaarddeviatie hoog is en het een concentratiebepaling is op basis van twee andere metingen (NKj na filtratie minus ammonium).

FIGUUR 18 N-FRACTIONERING VAN METINGEN TIJDENS FASE 'TOTAALCONCEPT MICROVERONTREINIGINGEN & FOSFOR'

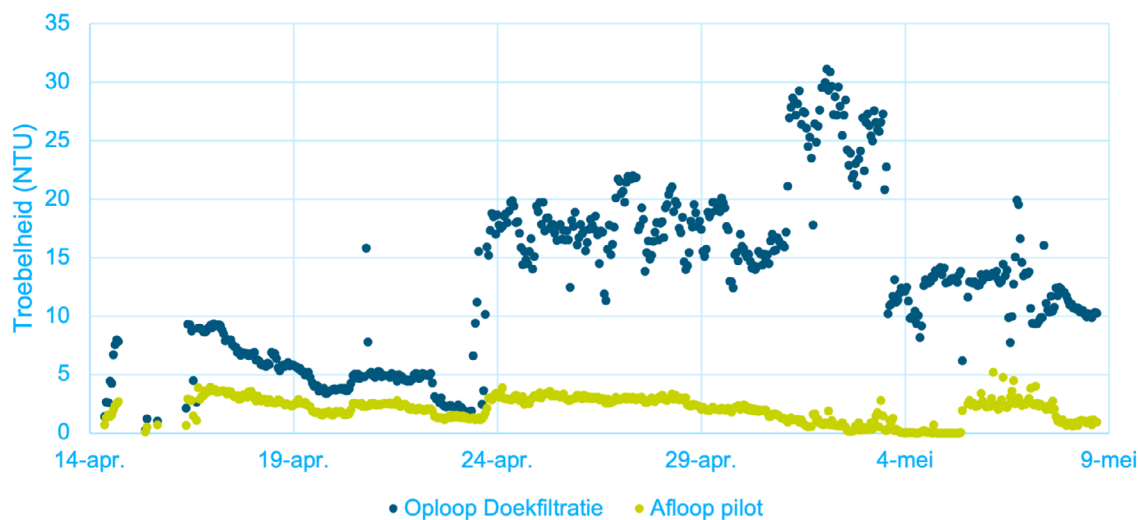


3.2 CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR'

3.2.1 AFSCHIEDING VAN VLOKKEN

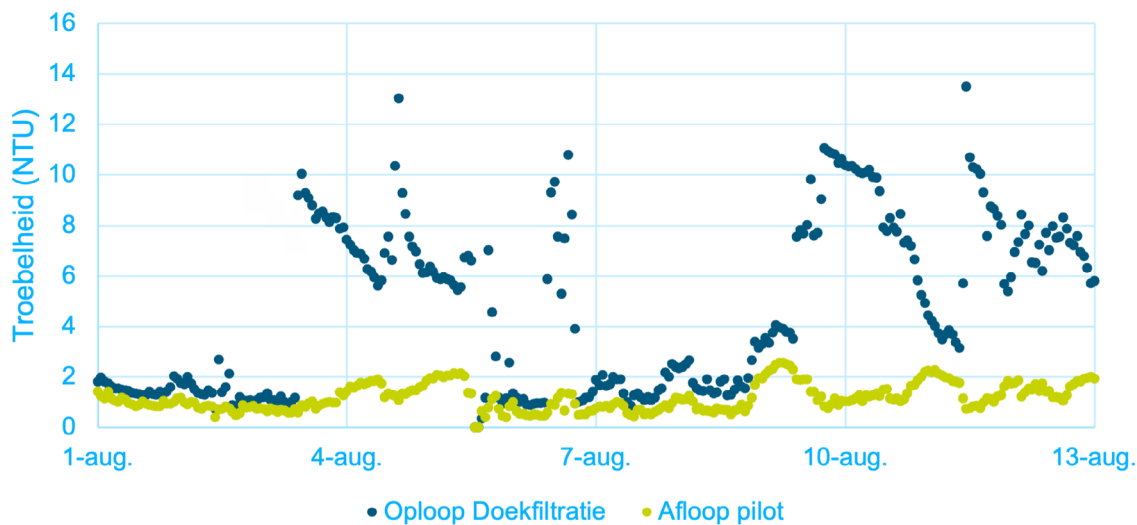
Gedurende twee periodes is de configuratie 'Verwijdering fosfor' onderzocht. In Figuur 19 en Figuur 20 zijn de troebelheid in de oploop van het doekfilter en afloop van de pilot (afloop doekfilter) weergegeven voor deze beide periodes.

FIGUUR 19 TROEBELHEID IN OPLOOP-DOEKFILTER EN AFLOOP-PILOT VAN DE CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR' IN DE PERIODE APRIL-MEI



De troebelheidsresultaten tot 7 mei tonen de eerste periode waarin de pilotinstallatie bedreven is. Tijdens deze fase zijn nog veel stappen gezet in het verbeteren van de pilotprestaties door instellingen van de pilotonderdelen aan te passen. De prestaties in deze eerste periode zijn daarom niet representatief en kunnen niet als stabiele bedrijfsvoering gezien worden. De troebelheid in de periode tot 7 mei was gemiddeld 13 en 2,0 NTU in respectievelijk de oploop-doekfiltratie en afloop-pilot waarbij er met name naar boven flinke uitschieters zijn waargenomen.

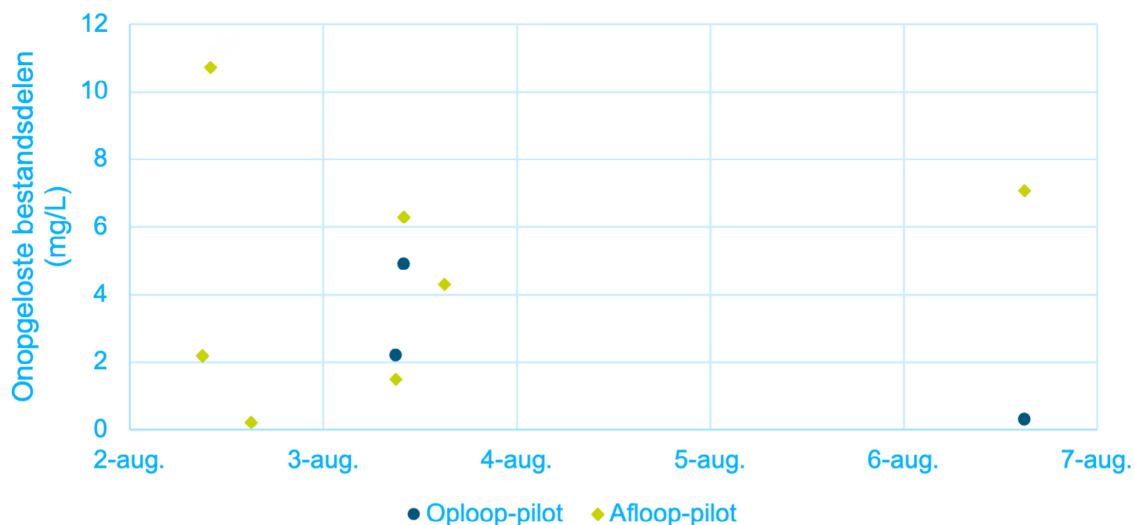
FIGUUR 20 TROEBELHEID IN OPLOOP-DOEKFILTER EN AFLOOP-PILOT VAN DE CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR' IN DE PERIODE AUGUSTUS



In de tweede periode (augustus) zijn er weinig instellingen van de pilotinstallatie aangepast waardoor deze periode als stabiele bedrijfsvoering kan worden beschouwd. De belangrijkste instelling die in deze periode wel is aangepast is de metaalzoutdosering, vanwege de lage concentraties P-totaal en onopgeloste bestanddelen. Hierdoor was het lastig om een goede vlokvorming te bewerkstelligen. De troebelheid in deze periode (augustus) was gemiddeld 4,8 en 1,2 NTU in respectievelijk de oploop-doekefiltratie en afloop-pilot.

In Figuur 21 is de concentratie onopgeloste bestanddelen weergegeven in de oploop- en afloop van de pilot. Hierbij moet worden opgemerkt dat de meetwaarden een aanzienlijke onnauwkeurigheid kennen (inschatting $\pm 40\%$) omdat de metingen op simpele wijze zijn uitgevoerd, het een combinatie van steekmonsters en 24-uursmonsters betreft en de meetwaarden dermate laag zijn dat deze aan de onderzijde van het meetbereik liggen. In de oploop-pilot is de concentratie onopgeloste bestanddelen slechts 3 maal bepaald. De gemiddelde concentratie hiervan was 2,5 mg/L, dit is extreem laag voor een rwzi. De concentratie in de afloop-pilot was gemiddeld 4,6 mg/L, dit betreft 7 bepalingen.

FIGUUR 21 CONCENTRATIE ONOPGELOSTE BESTANDSDLEN IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT VAN DE CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR' IN DE PERIODE AUGUSTUS'



Door het geringe aantal metingen zijn er weinig conclusies te trekken over onopgeloste bestanddelen. Een verwijdering is moeilijk te bepalen, wel kan gesteld worden dat de concentratie in de afloop-pilot laag is ten opzichte van een rwzi die doorgaans 7,5 – 10 mg/L onopgeloste bestanddelen in het effluent heeft. Vanuit de conversiefactor 2,5 van NTU naar onopgeloste bestanddelen kan gesteld worden dat bij een NTU-waarde in de afloop van gemiddeld 1,2 de concentratie onopgeloste bestanddelen 3 mg/L was.

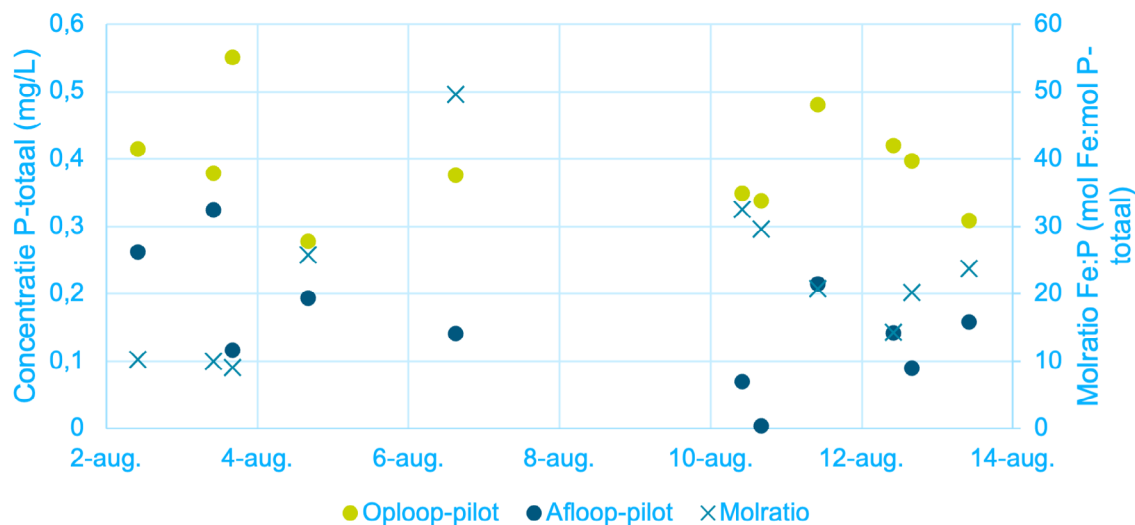
De samenstelling van de onopgeloste bestanddelen is vermoedelijk ook anders in de oploop en afloop van de pilot. Onopgeloste bestanddelen aanwezig in de afloop van de nabezinktank (oploop pilot) zijn voornamelijk restanten van het actiefslibproces. Deze worden (gedeeltelijk) ingevangen in het doekfilter. Door de additie van metaalzout worden nieuwe onopgeloste bestanddelen gevormd. Als deze niet volledig afgevangen worden verandert hierdoor de samenstelling van de onopgeloste bestanddelen. Deze schuift op in de richting van een meer metaalhoudend mengsel.

3.2.2 FOSFOR

P-TOTAAL

In de periode waarin de pilot stabiel draaide (augustus) zijn P-totaal metingen uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 22, hierin is ook de dosering van metaalzout (FeCl_3) uitgedrukt als toegepaste molratio Fe:P weergegeven. De molratio is berekend op basis van P-totaal in de oploop van de pilot.

FIGUUR 22 CONCENTRATIE P-TOTAAL IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT (MG/L) EN MOLRATIO FE:P (MOL FE:MOL P-TOTAAL) TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR'

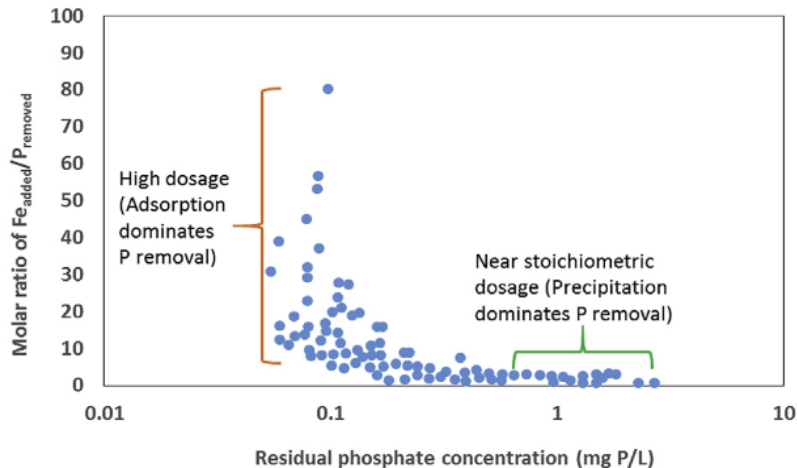


De concentratie P-totaal in de afloop-pilot fluctueerde tussen de 0,004 en 0,32 mg/L en was gemiddeld 0,16 mg/L. De concentratie P-totaal in de oploop-pilot fluctueerde tussen de 0,28 en 0,55 mg/L en was gemiddeld 0,39 mg/L. Dit is een lage P-totaal concentratie voor een rwzi-effluent waardoor een goede vlokvorming werd bemoeilijkt.

Om bij deze lage P-totaal concentratie de aanwezige ortho-P te coaguleren en vlokken te vormen zijn relatief hoge molratios Fe:P toegepast. De metaalzoutdosering in de pilotinstallatie werd niet gestuurd op een fosfor/fosfaat sensor maar handmatig ingesteld op een doseerdebiet. Hierdoor fluctueert de molratio Fe:P met een vergelijkbare trend als de P-totaal

concentratie in de oploop-pilot. Wanneer een hogere Fe:P molratio werd toegepast is een lagere concentratie P-totaal in de afloop-pilot behaald. Dit komt overeen met de literatuur zoals te zien is in Figuur 23.

FIGUUR 23 VERHOOGING VAN DE FE-DOSERING ALS FUNCTIE VAN DE RESTERENDE P-CONCENTRATIE. FIGUUR OVERGENOMEN UIT KUMAR (2018)



Daarnaast hangt het verwijderingsrendement van P-totaal niet alleen af van de toegepaste Fe:P molratio, maar ook van de P-totaal concentratie in de oploop-pilot. Bij een lage P-totaal concentratie in de oploop-pilot is er een hogere Fe:P molratio nodig voor een goede coagulatie (Bratby 2006).

De toegepaste Fe:P molratio is niet specifiek gerelateerd aan de doekfiltratie technologie maar geldt voor alle technologieën die gebruik maken van coagulatie, flocculatie en filtratie (bijvoorbeeld conventionele zandfiltratie). Dergelijke technologieën lijken gebaat bij concentraties P-totaal en onopgeloste bestanddelen die iets hoger liggen dan die zich voordeden tijdens de pilottesten met configuratie 'Verwijdering fosfor'. Voor de meeste Nederlandse rwzi's liggen deze concentraties ook hoger en zal een goede P-verwijdering ook bij een lagere Fe:P molratio bereikt kunnen worden.

P-FRACTIES

In de periode augustus is eenmaal een P-fractionering uitgevoerd, de uitkomst hiervan is gegeven in Tabel 5.

TABEL 5 P-FRACTIONERING TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING FOSFOR'

Fractie	Oploop-pilot	Afloop-pilot
	Concentratie mg/L	Concentratie mg/L
Totaal P	0,42	0,262
Totaal Opgeloste P	0,39	0,004
Totaal Gebonden P	0,025	0,258
Ortho-P (PO_4)	0,29	0,004
Opgelost Organisch P (DOP)	0,105	0,001
Gebonden Organisch P (SOP)	0,02	0,093
Metaal Gebonden P (SMP)	0,005	0,165

Omdat het slechts één meting betreft is het moeilijk om conclusies over de P-fractionering te trekken. Duidelijk is dat de fractie ortho-P vrijwel volledig verwijderd is. Dit lijkt ook voor de DOP-fractie te gelden. De P-totaal die na doekfiltratie nog in de afloop-pilot aanwezig is bestaat voornamelijk uit SMP. Vermoedelijk zijn dit zeer kleine ijzerfosfaat-deeltjes die niet goed gecoaguleerd zijn en daardoor dus niet afgevangen zijn met het doekfilter.

4

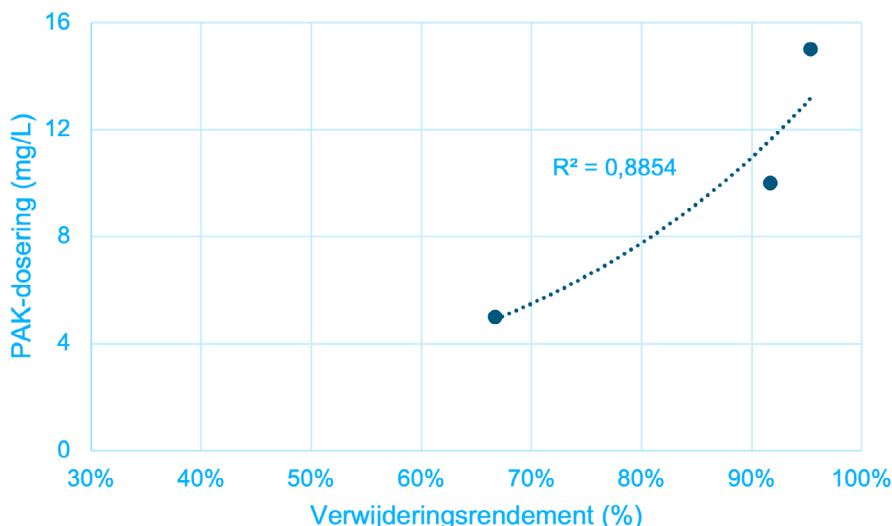
TOEPASSING VAN PAK + DOEKFILTRATIE IN DE NEDERLANDSE SITUATIE

Op enkele rwzi's in Duitsland wordt de PAK + doekfiltratie technologie reeds toegepast (STOWA 2021-22). De technologie is daar uitgelegd op een capaciteit die doorgaans groter is dan DWA maar niet de volledige RWA behandelt. Tijdens RWA wordt een deel van het water via een by-pass om de PAK + doekfiltratie installatie geleid. Voor de Nederlandse situatie zal dit niet heel anders zijn. In STOWA rapportage 2020-06 zijn handvatten gegeven hoe voor een nageschakelde technologie de bepaling van de benodigde capaciteit uit te voeren, welk debiet te behandelen en welk debiet te by-passen. Hieruit volgt dat afhankelijk van het rendement in de rwzi zelf en dat van de nageschakelde technologie een capaciteit tussen DWA en 1,66 maal DWA doorgaans volstaat voor de in het IPMV beoogde 70% verwijdering van microverontreinigingen over de gehele rwzi.

De pilottesten op rwzi Vinkel hebben aangetoond dat bij PAK-doseringen van 5, 10 en 15 mg/L verwijderingsrendementen van gemiddeld respectievelijk 67%, 92% en 95% voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen behaald worden. In Figuur 24 is dit weergegeven inclusief exponentiële trendlijn. Deze verwijdering in combinatie met het verwijderingsrendement van een rwzi zelf (gemiddeld ca. 30%) is de grondslag om de benodigde capaciteit van de PAK + doekfiltratie technologie te bepalen.

FIGUUR 24

PAK-DOSERING UITGEZET TEGEN HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE 7 BESTE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN IN DE PILOT PAK + DOEKFILTRATIE INCLUSIEF EEN EXPONENTIËLE TRENDLIJN ($R^2=0.89$)



Nageschakelde technologieën voor nutriëntverwijdering worden doorgaans uitgelegd op een capaciteit van ongeveer 1,5 maal DWA waarmee ca. 80% van het jaardebiet behandeld wordt. Dit uitgangspunt toegepast op een denkbeeldig voorbeeld betekent dat bij een rwzi met een gemiddeld verwijderingsrendement voor microverontreinigingen (30%) een PAK-dosering van ca. 8 mg/L volstaat om aan het beoogde rendement van 70% te voldoen.

5

VERGELIJKING PILOTONDERZOEK EN HAALBAARHEIDSSSTUDIE

In de haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-21) voorafgaand aan het pilotonderzoek PAK + doekfiltratie is de technologie op papier uitgewerkt voor een 100.000 i.e. rwzi (zie rwzi gegevens in bijlage C). Deze uitwerking is beoordeeld op de drie toetsingscriteria van het IPMV; CO₂-footprint, kosten en verwijderingsrendement gidsstoffen. Op de toetsingscriteria is de technologie vergeleken met de drie referentietechnologieën PACAS, Ozon met zandfiltratie en GAK-filtratie.

Op basis van het pilotonderzoek is de beoordeling op de toetsingscriteria geëvalueerd. In Tabel 6 is de originele vergelijking op de toetsingscriteria zoals opgenomen in de haalbaarheidsstudie weergegeven inclusief een extra kolom waarin de uitkomsten van het pilotonderzoek zijn opgenomen.

TABEL 6 VERGELIJKING PAK + DOEFILTRATIE TECHNOLOGIE MET REFERENTIE TECHNOLOGIEËN OP DE IPMV-TOETSINGSCRITEIA

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	Haalbaarheidsstudie PAK + Doek	Pilot PAK + Doek ⁸
CO ₂ -footprint ⁹	kg CO ₂ /m ³	122	128	325	95	113
CO ₂ -footprint	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.774	1.870
Kosten ⁹	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,15	0,15
Verwijderingsrendement gidsstoffen ^{10 11}	%	70-75%	80-85%	80-85%	70-80%	70-80%

De kennis voortkomend uit het pilotonderzoek heeft geen grote impact op de beoordeling van de PAK + doekfiltratie technologie. Het belangrijkste inzicht is dat de CO₂-footprint iets hoger is, de kosten nagenoeg gelijk zijn en het verwijderingsrendement onveranderd. Onderstaand zijn deze inzichten nader toegelicht.

5.1 CO₂-FOOTPRINT

In de haalbaarheidsstudie is de CO₂-footprint berekend op basis van een PAK-dosering van 8 mg/L en een elektriciteitsverbruik van 120.000 – 140.000 kWh/jaar. De haalbaarheidsstudie is een CO₂-footprint bepaald van 95 kg CO₂/m³ en 1.774 ton CO₂/jaar.

8 Bij PAK-dosering 8 mg/L, metaalzoutdosering 5 mg Fe/L en PE-dosering 0,4 mg/L

9 Per m³ behandeld afvalwater

10 Verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazool, claritromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering

11 Tussen uitvoering van de haalbaarheidsstudie en het pilotonderzoek is de selectie gidsstoffen aangepast. Claritromycine, propranolol en sulfamethoxazol zijn vervangen door gabapentine, irbersartan en venlafaxine. De haalbaarheidsstudie en de referentietechnologieën zijn dus beoordeeld op een gedeeltelijk andere selectie stoffen dan het pilotonderzoek. De verwachting is dat dit op de toetsingscriteria nauwelijks invloed heeft.

In de haalbaarheidsstudie is geen PE-dosering voorzien. In het pilotonderzoek is gebleken dat PE-dosering wel noodzakelijk is voor de eerste afscheidingsstap (lamellenseparator) en daarmee voor het goed functioneren van de PAK + doekfiltratie technologie. Doseringen van 0,3 tot 0,5 mg actieve PE/L zijn toegepast. In aanvulling op de haalbaarheidsstudie is de CO₂-footprint uitgebreid met een 0,4 mg/L PE-dosering. Dit resulteert in een aanvullende 4 kg CO₂/m³ en 21 ton CO₂/jaar waardoor de CO₂-footprint met ca. 5% stijgt tot 99 kg CO₂/m³ en 1.797 ton CO₂/jaar.

Zoals vermeld in de haalbaarheidsstudie is de ervaring van rwzi's Lahr en Wendlingen dat de metaalzoutdosering over de gehele rwzi niet toeneemt door het toepassen van PAK + doekfiltratie. De dosering van metaalzout in het actiefslibstelsysteem wordt verminderd en in de nageschakelde PAK + doekfiltratiestap gedoseerd. Op rwzi Vinkel vindt in het actiefslibproces geen metaalzoutdosering plaats. De FeCl₃-dosering in de pilot is dus te zien als aanvullend. De dosering tijdens het pilotonderzoek varieerde tussen 2,7 – 7 mg Fe/L. Voor de berekening van de CO₂-footprint is gerekend met 5 mg Fe/L. Dit resulteert in een aanvullende 14 kg CO₂/m³ en 73 ton CO₂/jaar waardoor de CO₂-footprint stijgt tot 113 kg CO₂/m³ en 1.870 ton CO₂/jaar.

Voor de volledigheid is in Tabel 7 weergegeven wat de invloed van de PAK-dosering en metaalzoutdosering is op de CO₂-footprint.

TABEL 7 INVLOED VAN PAK-DOSERING EN METAALZOUTDOSERING OP DE CO₂-FOOTPRINT

	Eenheid	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6
PAK-dosering	mg PAK/L	8	10	12	8	10	12
Additionele metaalzoutdosering ¹²	mg Fe/L	-	-	-	5	5	5
CO ₂ -footprint ¹³	kg CO ₂ /m ³	99	118	138	113	132	151
CO ₂ -footprint	ton CO ₂ /jaar	1.797	1.900	2.004	1.870	1.974	2.078

5.2 ONTWERPGRONDSLAGEN

In de haalbaarheidsstudie zijn drie verschillende ontwerpen van de PAK + doekfiltratie technologie uitgewerkt. Een daarvan is gebaseerd op een SBR-design, de twee andere op bezinktanks. Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat de bezinktank vervangen kan worden door een lamellenseparator. In Tabel 8 zijn de ontwerpgrondslagen van de varianten uit de haalbaarheidsstudie en twee ontwerpen met een lamellenseparator gegeven. Deze zijn gebruikt als uitgangspunten voor de kostenraming.

12 Praktijkervaring uit Duitsland is dat de metaalzoutdosering over de gehele rwzi niet toeneemt maar enkel het doseerpunt verschuift door het toepassen van PAK + doekfiltratie voor rwzi's waar in het actiefslibproces al metaalzoutdosering plaatsvindt (chemisch-P verwijdering). De dosering in het actiefslibproces wordt evenredig verminderd met de dosering die in de nabehandeling wordt toegepast. In dat geval is als waarde '-' ingevuld. Voor rwzi's waar geen metaalzoutdosering in het actiefslibproces wordt toegepast betekend een positieve waarde een additionele metaalzoutdosering in mg Fe/L.

13 Per m³ behandeld afvalwater

TABEL 8 DIMENSIONERING VAN DE ONTWERPEN UIT DE HAALBAARHEIDSSSTUDIE AANGEVULD MET ONTWERPEN O.B.V. DE KENNIS UIT DE PILOTSTUDIE

Parameter	Eenheid	Haalbaarheidsstudie (STOWA 2021-21)			Pilot	
		Ontwerp 1	Ontwerp 2	Ontwerp 3	Ontwerp 4	Ontwerp 5
Omschrijving		SBR en doekfiltratie	Contacttank, bezinktank en 2-traps doekfiltratie	Contacttank, bezinktank en doekfiltratie	Contacttank, lamellen separator en doekfiltratie	Contacttank, lamellen separator en doekfiltratie
Jaardebiet rwzi	m ³ /jaar			7.665.000		
Aandeel behandeld jaardebiet	%			70		
Behandeld debiet	m ³ /jaar			5.365.500		
Ontwerp piek aanvoer	m ³ /uur			1.040		
HRT-absorptiefase	minuten			30		
PAK-dosering	mg/L			8		
PAK-verbruik	ton/jaar			43		
Metaalzout-dosering ¹⁴	mg Fe/L		2			5
PE-dosering	mg/L					0,4
Extra af te voeren slib	ton ds/jaar		83			123
Opvoerhoogte	m			2		
TSS-concentratie adsorptiefase	g/l	3	0,5	3		1,5
Bezinksnelheid PAK+metaalzout mengsel	m/uur	2	5	1,5		
Oppervlaktebelasting lamellen (ruimtelijk) ¹⁵	m ³ /m ² /uur				4	2,5
Ruimtebeslag absorptiefase	m ²	1200	200	200	200	200
Ruimtebeslag bezinkfase	m ²		350	700	260	420
Doekoppervlak	m ²	130	390	130	130	130
Ruimtebeslag doekfilters	m ²	50	150	50		50
Elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	120.000	120.000	140.000	140.000	140.000
Personele belasting	FTE			0,4		

5.3 KOSTEN

In de haalbaarheidsstudie zijn drie verschillende ontwerpen van de PAK + doekfiltratie technologie op kosten gezet. Aanvullend zijn ook voor de twee ontwerpen met een lamelenseparator kosten geraamd, hierin zijn als extra kostenposten een lamelenseparator en PE-doseerinstallatie meegenomen. De kostenramingen zijn weergegeven in Tabel 9.

14 Conform de richtlijnen vindt er reeds metaalzoutdosering op de 100.000 i.e. rwzi plaats. Ervaring van rwzi's Lahr en Wendlingen is dat de metaalzoutdosering over de gehele rwzi niet toeneemt. Het doseerpunt verandert wel.

15 De aangehouden oppervlaktebelasting van de lamellen in de pilot was ca. 2,5 m³/m²/uur, deze parameter is niet uitvoerig onderzocht. Vanuit praktijkervaring met afscheiding van diverse slib-mengsels met lamellen is bekend dat oppervlaktebelastingen van 4 tot 5 m³/m²/uur goed haalbaar zijn.

TABEL 9

INVESTERINGSKOSTEN EN JAARLIJKSE KOSTEN VAN DE VIJF VERSCHILLENDE ONTWERPEN

Investeringskosten		Ontwerp 1 SBR en doekfiltratie			Ontwerp 2 Contacttank, bezinktank en 2-traps doekfiltratie			Ontwerp 3 Contacttank, bezinktank en doekfiltratie			Ontwerp 4 Contacttank, lamellen separator en doekfiltratie			Ontwerp 5 Contacttank, lamellen separator en doekfiltratie		
		C	WTB	E/PA	C	WTB	E/PA	C	WTB	E/PA	C	WTB	E/PA	C	WTB	E/PA
Kale bouwkosten		467.904	1.430.600	237.000	549.723	2.020.200	229.000	701.513	1.383.400	237.000	428.088	1.604.400	308.000	468.088	1.734.400	338.000
Onvolledigheid	25%	116.976	357.650	59.250	137.431	505.050	57.250	175.378	345.850	59.250	107.022	401.100	77.000	117.022	433.600	84.500
Opslag aannemerskosten	25%	146.220	447.063	74.063	171.788	631.313	71.563	219.223	432.313	74.063	133.778	501.375	96.250	146.278	542.000	105.625
Stichtingskosten	80%	584.881	1.788.250	296.250	687.154	2.525.250	286.250	876.891	1.729.250	296.250	535.110	2.005.500	385.000	585.110	2.168.000	422.500
Totaal per post		1.315.981	4.023.563	666.563	1.546.096	5.681.813	644.063	1.973.005	3.890.813	666.563	1.203.998	4.512.375	866.250	1.316.498	4.878.000	950.625
Totaal			6.010.000			7.870.000			6.530.000			6.580.000		7.150.000		
Jaarlijkse kosten																
		Jaarlasten	per kuub	per i.e.	Jaarlasten	per kuub	per i.e.	Jaarlasten	per kuub	per i.e.	Jaarlasten	per kuub	per i.e.	Jaarlasten	per kuub	per i.e.
		€/jaar	€/m3	€/i.e.	€/jaar	€/m3	€/i.e.	€/jaar	€/m3	€/i.e.	€/jaar	€/m3	€/i.e.	€/jaar	€/m3	€/i.e.
Kapitaalslasten C		76.103	0,01	0,76	89.411	0,02	0,89	114.099	0,02	1,14	69.627	0,01	0,70	76.133	0,01	0,76
Kapitaalslasten WTB		361.884	0,07	3,62	511.028	0,10	5,11	349.944	0,07	3,50	405.848	0,08	4,06	438.733	0,08	4,39
Kapitaalslasten E/PA		59.951	0,01	0,60	57.928	0,01	0,58	59.951	0,01	0,60	77.911	0,01	0,78	85.500	0,02	0,86
Onderhoud C		3.656	0,00	0,04	4.295	0,00	0,04	5.481	0,00	0,05	3.344	0,00	0,03	3.657	0,00	0,04
Onderhoud WTB		67.059	0,01	0,67	94.697	0,02	0,95	64.847	0,01	0,65	75.206	0,01	0,75	81.300	0,02	0,81
Onderhoud E/PA		11.109	0,00	0,11	10.734	0,00	0,11	11.109	0,00	0,11	14.438	0,00	0,14	15.844	0,00	0,16
Personeel		20.000	0,00	0,20	20.000	0,00	0,20	20.000	0,00	0,20	20.000	0,00	0,20	20.000	0,00	0,20
Kosten actiefkool		85.848	0,02	0,86	85.848	0,02	0,86	85.848	0,02	0,86	85.848	0,02	0,86	85.848	0,02	0,86
Kosten coagulant		9.300	0,00	0,09	9.300	0,00	0,09	9.300	0,00	0,09	23.100	0,00	0,23	23.100	0,00	0,23
Kosten PE											6.439	0,00	0,06	6.439	0,00	0,06
Kosten elektriciteit		11.717	0,00	0,12	12.188	0,00	0,12	13.845	0,00	0,14	13.845	0,00	0,14	13.845	0,00	0,14
Kosten extra slibafvoer		49.800	0,01	0,50	49.800	0,01	0,50	49.800	0,01	0,50	73.800	0,01	0,74	73.800	0,01	0,74
Totaal		756.427	0,14	7,56	945.229	0,18	9,45	784.224	0,15	7,84	869.406	0,16	8,69	924.198	0,17	9,24
<i>Berekend over volledige debiet rwzi</i>			0,10			0,12			0,10			0,11		0,12		

In aanvulling op de kostenraming van ontwerpen 4 en 5 met lamellenafscidders is ook de gevoeligheid uitgewerkt voor de toepassing van diverse PAK-doseringen. In Tabel 10 is aangegeven wat het effect in jaarlasten is bij gebruik van PAK-doseringen gelijk of hoger aan de voorziene 8 mg/L. Voor de overzichtelijkheid van de gevoeligheidsanalyse is aangenomen dat de metaalzoutdosering en PE-dosering respectievelijk 5 en 0,4 mg/L zijn, en gelijk blijven bij PAK-doseringen tussen de 8 en 12 mg/L.

TABEL 10 GEVOELIGHEID VAN DE JAARLASTEN VOOR PAK-DOSERINGEN BIJ SCENARIO ONTWERPEN 4 EN 5 MET LAMELLENAFSCIDERS

PAK-dosering	Extra slibafvoer	Kosten actiefkool	Kosten extra slibafvoer	Totaal	Verhoging t.o.v. 8 mg/L
mg/L	ton ds/jaar	€/jaar	€/jaar	€/jaar	€/jaar
8	123	€ 86.000	€ 74.000	€ 160.000	€ -
10	134	€ 107.000	€ 80.000	€ 187.000	€ 27.000
12	144	€ 129.000	€ 87.000	€ 216.000	€ 56.000

5.4 VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN

In de haalbaarheidsstudie is de inschatting gemaakt dat een PAK-dosering van 8 mg/L volstaat om het vereiste 70% verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen te behalen gezien over effluent versus influent van de rwzi. Hierbij is uitgegaan dat PAK + doekfiltratie een technologie is die circa 1,5x DWA behandelt en daardoor een rendement over de technologie zelf nodig heeft van circa 80% of 7 van de 11 gidsstoffen.

In het pilotonderzoek is bevonden dat met een PAK-dosering van 10 mg/L een verwijderingsrendement van meer dan 90% op 7 van de 11 gidsstoffen behaald wordt. Zoals beschreven in hoofdstuk 0 is de verwachting dat bij een PAK-dosering van 8 mg/L een rendement van 80% in de nabehandeling wordt behaald waarmee aan het vereiste 70% rendement over de gehele rwzi gezien wordt voldaan. De inschatting uit de haalbaarheidsstudie lijkt dus goed overeen te komen met de bevindingen uit het pilotonderzoek.

5.5 MODULARITEIT

Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat een lamellenafscieder gebruikt kan worden als 1^e afscheidingsstap i.p.v. een bezinktank. Het voordeel hiervan is dat een meer modulaire en flexibele installatie gebouwd kan worden. Waar bezinktanks doorgaans voornamelijk civiele constructies zijn met veel beton en daardoor niet modulair kan een lamellenafscieder modulair opgebouwd worden uit meerdere units. Hiermee kan ingespeeld worden op veranderende aanvoer of procesconfiguratie. Ook biedt het kansen om overdimensionering tegen te gaan door in 1^e instantie minimaal te bouwen en enkel wanneer nodig een extra module bij te plaatsen. Ook qua materiaalkeuze is een lamellenafscieder meer flexibel, er zijn diverse uitvoeringsvormen in verschillende materialen beschikbaar.

6

CONCLUSIES

Reflecterend op de doelstellingen van het pilotonderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden uit beide configuraties:

CONFIGURATIE VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR:

Toepasbaarheid lamellenseparator

- Met een lamellenseparator kan het slibmengsel van PAK-Fe-PE afgescheiden worden. Een lamellenseparator is een praktijkrelevant alternatief voor een bezinktank.

Verwijdering microverontreinigingen

- Bij een PAK-dosering van 10 mg/L worden verwijderingsrendementen van 92% en 84% behaald voor respectievelijk 7 van de 11 gidsstoffen en alle 11 gidsstoffen. Voor een PAK-dosering van 15 mg/L is dit respectievelijk 95% en 92%. Voor een PAK-dosering van 5 mg/L is dit 67% en 55%.
- Een PAK-dosering van ca. 8 mg/L bij een behandelingscapaciteit van ca. 1,5x DWA volstaat voor de meeste rwzi's om aan het vereiste verwijderingsrendement te voldoen van het IPMV en de bijdrageregeling van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Doseringen van 10 en 15 mg/L volstaan om vrijwel alle biologische effecten >50% te reduceren. Bij deze doseringen is afname tot onder signaleringswaarde bereikt wat betekent dat effluent niet toxisch is op de onderzochte toxicologische eindpunten.

Verwijdering fosfor

- Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat P-totaal concentraties kleiner dan 0,15 mg/l goed bereikt kunnen worden in de afloop van de pilot. Dit is aangetoond bij Fe:P molratios van 2,5 -10 en P-totaal concentraties in de oploop van de pilot van ca. 0,5 tot 1 mg/L.
- De P-fractie ortho-P is voor meer dan 95% verwijderd tot concentraties onder de 0,05 mg/L. Opgelost organisch-P (DOP) wordt vrijwel volledig verwijderd.
- De resterende P-totaal in de afloop van de pilot bestaat voornamelijk uit metaal gebonden P (SMP) en organisch gebonden P (SOP). SMP wordt gevormd door toevoeging van FeCl₃ en voor het grootste gedeelte ook weer verwijderd. Het gedeelte dat niet door het doekfilter wordt tegengehouden bestaat vermoedelijk uit zeer kleine (colloïdale) ijzer-fosfaat deeltjes

Verwijdering stikstof

- Er vindt geen noemenswaardige verwijdering van stikstof plaats. Er is wel een geringe omzetting van ammonium naar nitraat.

Geconcludeerd kan worden dat PAK + doekfiltratie een technologie is die goed functioneert op het effluent van een Nederlandse rioolwaterzuivering waarmee een verregerende verwijdering van microverontreinigingen en fosfor behaald kan worden.

CONFIGURATIE VERWIJDERING FOSFOR:

Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat P-totaal concentraties kleiner dan 0,15 mg/l goed bereikt kunnen worden. Dit is aangetoond bij Fe:P molratios van 10 - 30 en P-totaal concentraties in de oploop van de pilot van ca. 0,3 tot 0,5 mg/L. De P-fracties ortho-P en DOP zijn vrijwel volledig verwijderd. De resterende P-totaal bestaat voornamelijk uit metaal gebonden P. Vermoedelijk zijn dit zeer kleine (colloïdale) ijzer-fosfaat deeltjes.

Doekfiltratie met metaalzoutdosering lijkt een effectieve technologie voor verregaande verwijdering van fosfor. Dit is volledig in lijn met ervaringen in het buitenland zoals beschreven in de haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-21).

7

DANKWOORD

Dank gaat uit naar het gehele consortium 'PAK+Doek' zonder wie het pilotonderzoek PAK + Doekfiltratie niet mogelijk was geweest. Het consortium bestond uit STOWA, de waterschappen Aa en Maas, Hunze en Aa's, Vallei en Veluwe, Waternet, Rijn en IJssel en de Dommel, en Logisticon Water Treatment, ELIQUO en Royal HaskoningDHV. De waterschappen en STOWA hartelijk dank voor de inhoudelijke betrokkenheid bij het pilotonderzoek, de financiële bijdrage en de kritische reflectie op uitkomsten en rapportage.

Dank aan de STOWA IPMV begeleidingscommissie 'Poederactiefkool' voor het begeleiden van de haalbaarheidsstudie en pilotstudie.

Logisticon Water Treatment (Klaas en Nico) en ELIQUO (Bert) dank voor het voorzien van een technisch functionele en robuuste pilotinstallatie. Dank aan Mecana (Thomas en Jonathan) voor het optimaliseren van de doekfilterbedrijfsvoering en delen van praktijkervaring.

In het bijzonder een woord van dank richting waterschap Aa en Maas (Bart, Karin, Ron, Dennis en de overige collega's van 'team Dinther-Vinkel') voor de zeer prettige samenwerking, hulpvaardigheid en vriendelijke ontvangst op rwzi Vinkel. Jullie support was onmisbaar voor het slagen van de pilottesten.

Last-but-not-least, dank aan Devon, Tonke en Xian voor het dagelijks bedrijven van de pilot, vergaren en uitwerken van de meetresultaten en opstellen van de rapportage.

8

LITERATUURLIJST

STOWA 2016-15A, Ecologische Sleutelfactor Toxiciteit. Hoofdrapport

STOWA-2020-06, Verwijdering van organische microverontreinigingen. Handvatten voor de keuze van behandelingstechniek in combinatie met de benodigde hydraulische capaciteit

STOWA 2020-21, Haalbaarheidsstudie PAK + doekfiltratie voor verwijdering van microverontreinigingen op rwzi's

STOWA 2020-41, Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent rwzi Aarle-Rixtel

Bratby, J., 2006, Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA Publishing. London. UK

Fundneider, T., Alejo, L. en Lackner, S. 2020. Tertiary phosphorus removal to extremely low levels by coagulation-flocculation and cloth-filtration. Water Science and Technology 82 (1), 131 – 143.

Fundneider, T. and Grabbe, U. 2021. Weitestgehende Phosphorentfernung mittels Metallsalzen und Tuchfiltration - Anwendungsbeispiele und Synergieeffekte, DWA. DOI: 10.13140/RG.2.2.15209.01125

Kumar, P. Suresh., 2018, Phosphate recovery from wastewater via reversible adsorption. Doctoral-thesis, Delft University of Technology ISBN 978-94-6332-429-8

BIJLAGE A

**CONCENTRATIES EN
VERWIJDERINGSRENDEMENTEN
MICROVERONTREINIGINGEN**

TABEL 11

CONCENTRATIES ($\mu\text{g/L}$) VAN MICROVERONTREINIGINGEN IN DE OPLOOP EN AFLOOP VAN DE PILOTINSTALLATIE. WAARDEN IN ROOD WEERGEGEVEN TONEN DAT DE CONCENTRATIE ONDER DE RAPPORTAGEGRENIS LIGT, DEZE WAARDEN ZIJN NIET MEEGENOMEN IN RENDEMENTSBEREKENINGEN. WAARDEN IN WIT ZIJN CONCENTRATIES IN DE AFLOOP VAN DE PILOTINSTALLATIE DIE ONDER DE RAPPORTAGEGRENIS LAGEN, HIERVOOR IS DE HELFT VAN DE RAPPORTAGEGRENIS IN DE TABEL OPGENOMEN. DEZE WAARDEN ZIJN GEBRUIKT VOOR RENDEMENTSBEREKENINGEN

Datum	PAK dosering (mg/l)	Soort monster	Benzotriazol	Amisulpride	Azitromycine	Candesartan	Carbamazepine	Citalopram	Clarithromycine	Diclofenac	Furosemide	Gabapentine	Hydrochloorthiazide	Irbersartan	Metoprolol	Propranolol	Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	Sotalol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Ventlafaxine
24-May	10	Oploop	2.9	0.01	0.67	0.18	0.28	0.13	0.05	0.35	0.84	2.4	2.2	1.1	1.5	0.06	1.3	1.5	0.38	0.11	0.32
24-May	10	Afloop	0.1	0.01	0.05	0.08	0.01	0.005	0.05	0.05	0.1	1.2	0.12	0.24	0.005	0.005	0.06	0.07	0.08	0.005	0.02
14-Jun	10	Oploop	2.7	0.01	0.98	0.3	0.55	0.2	0.05	0.54	1.2	4	3	1.7	1.8	0.08	1.8	2.1	0.45	0.08	0.48
14-Jun	10	Afloop	0.3	0.01	0.05	0.22	0.06	0.005	0.05	0.14	0.26	0.25	0.51	0.67	0.09	0.005	0.11	0.3	0.21	0.005	0.09
25-Jun	15	Oploop	1.8	0.01	0.1	0.16	0.25	0.13	0.05	0.24	0.2	2	1.4	0.92	1.1	0.04	0.74	1.2	0.29	0.06	0.24
25-Jun	15	Afloop	0.1	0.01	0.1	0.08	0.01	0.005	0.025	0.03	0.2	0.27	0.12	0.19	0.02	0.005	0.015	0.05	0.07	0.005	0.01
28-Jun	15	Oploop	2.10	0.01	0.1	0.19	0.30	0.14	0.06	0.25	0.2	2.20	1.60	1.00	1.20	0.04	0.78	1.30	0.32	0.06	0.28
28-Jun	15	Afloop	0.10	0.01	0.1	0.07	0.02	0.005	0.025	0.015	0.2	0.42	0.15	0.16	0.02	0.005	0.015	0.08	0.06	0.005	0.03
20-Jul	10	Oploop	0.70	0.01	0.55	0.14	0.24	0.12	0.05	0.25	0.2	1.20	1.50	0.85	0.95	0.04	0.70	0.97	0.39	0.05	0.25
20-Jul	10	Afloop	0.25	0.01	0.11	0.09	0.03	0.005	0.05	0.100	0.2	0.70	0.34	0.35	0.05	0.005	0.060	0.13	0.19	0.005	0.04
28-Jul	5	Oploop	2.3	0.01	9.9	0.21	0.38	0.16	0.06	0.3	0.72	0.94	6.7	1.2	1.1	0.06	0.8	1.1	0.59	0.05	0.33
28-Jul	5	Afloop	0.98	0.01	3.4	0.21	0.17	0.02	0.025	0.22	0.33	0.36	3.2	0.96	0.23	0.005	0.23	0.55	0.46	0.005	0.2

TABEL 12 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN INDIVIDUELE MICROVERONTREINIGINGEN OVER DE GEHELE PILOTINSTALLATIE. WAARDEN IN ROOD TONEN EEN VERWIJDERINGSRENDEMENT DAT IS BEREKEND OP BASIS VAN CONCENTRATIES IN HET EFFLUENT DIE ONDER DE RAPPORTAGEGREN S LIGGEN. GEEL GEARCEERDE WAARDEN TONEN PER MEETDAG DE 7 VAN DE 11 BEST VERWIJDERDE GIDDSSTOFFEN. IN GROEN DE 11 GIDDSSTOFFEN, IN WIT DE 8 KANDIDAAT-GIDDSSTOFFEN

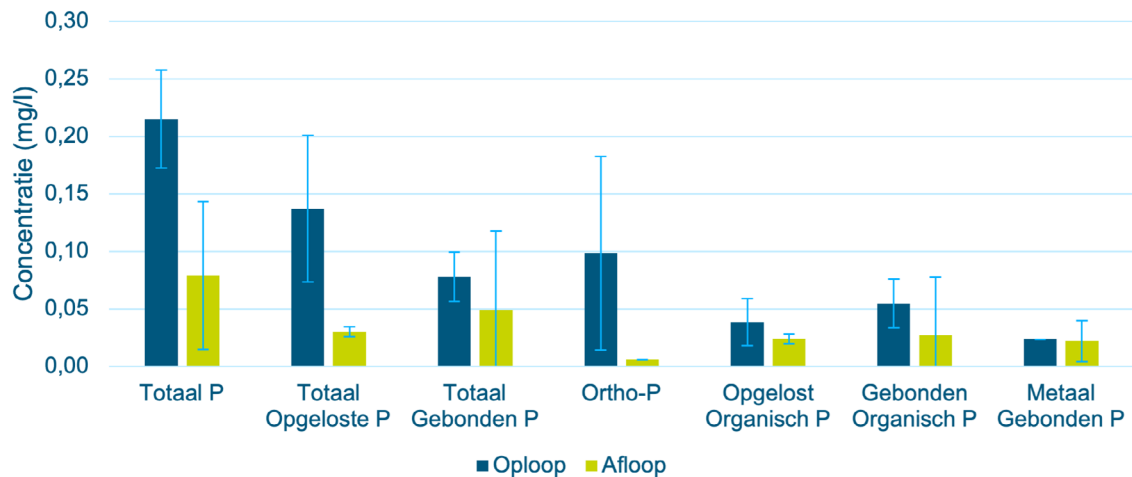
Datum	PAK dosering (mg/l)	Benzotriazool	Amisulpride	Azitromycine	Candesartan	Carbamazepine	Citalopram	Clarithromycine	Diclofenac	Furosemide	Gabapentine	Hydrochloorthiazide	Irbersartan	Metoprolol	Propranolol	Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	Sotalol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Venlafaxine
24-May	10	97%	n.b.	93%	56%	96%	96%	n.b.	86%	99%	50%	95%	78%	100%	92%	95%	95%	79%	95%	94%
14-Jun	10	89%	n.b.	95%	27%	89%	98%	n.b.	74%	78%	94%	83%	61%	95%	94%	94%	86%	53%	94%	81%
25-Jun	15	94%	n.b.	n.b.	50%	96%	96%	50%	88%	n.b.	87%	91%	79%	98%	88%	98%	96%	76%	92%	96%
28-Jun	15	95%	n.b.	n.b.	63%	93%	96%	58%	94%	n.b.	81%	91%	84%	98%	88%	98%	94%	81%	92%	89%
20-Jul	10	64%	n.b.	80%	36%	88%	96%	n.b.	60%	n.b.	42%	77%	59%	95%	88%	91%	87%	51%	90%	84%
28-Jul	5	57%	n.b.	66%	0%	55%	88%	58%	27%	54%	62%	52%	20%	79%	92%	71%	50%	22%	90%	39%

BIJLAGE B

FOSFOR FRACTIES 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'

P-FRACTIONERING BIJ PAK-DOSERING 5 EN 15 MG/L

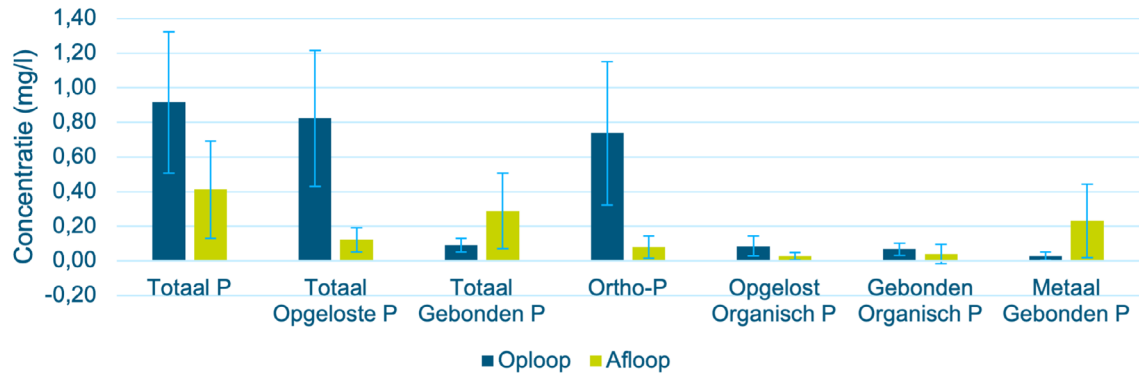
FIGUUR 25 P-FRACTIONERING BIJ PAK-DOSERING 5 MG/L (N=2)



TABEL 13 P-FRACTIONERING EN VERWIJDERING BIJ PAK-DOSERING 5 MG/L (N=2)

Fractie	Oploop-pilot		Afloop-pilot		Verwijdering %
	Gemiddelde concentratie mg/L	Standaard afwijking mg/L	Gemiddelde concentratie mg/L	Standaard afwijking mg/L	
Totaal P	0,22	0,04	0,08	0,06	63%
Totaal Opgeloste P	0,14	0,06	0,03	0,00	78%
Totaal Gebonden P	0,08	0,02	0,05	0,07	37%
Ortho-P (PO ₄)	0,10	0,08	0,01	0,00	94%
Opgelost Organisch P (DOP)	0,04	0,02	0,02	0,00	38%
Gebonden Organisch P (SOP)	0,05	0,02	0,03	0,05	50%
Metaal Gebonden P (SMP)	0,02	0,00	0,02	0,02	6%

FIGUUR 26 P-FRACTIONERING BIJ PAK-DOSERING 15 MG/L (N=7)



TABEL 14 P-FRACTIONERING EN VERWIJDERING BIJ PAK-DOSERING 15 MG/L (N=7)

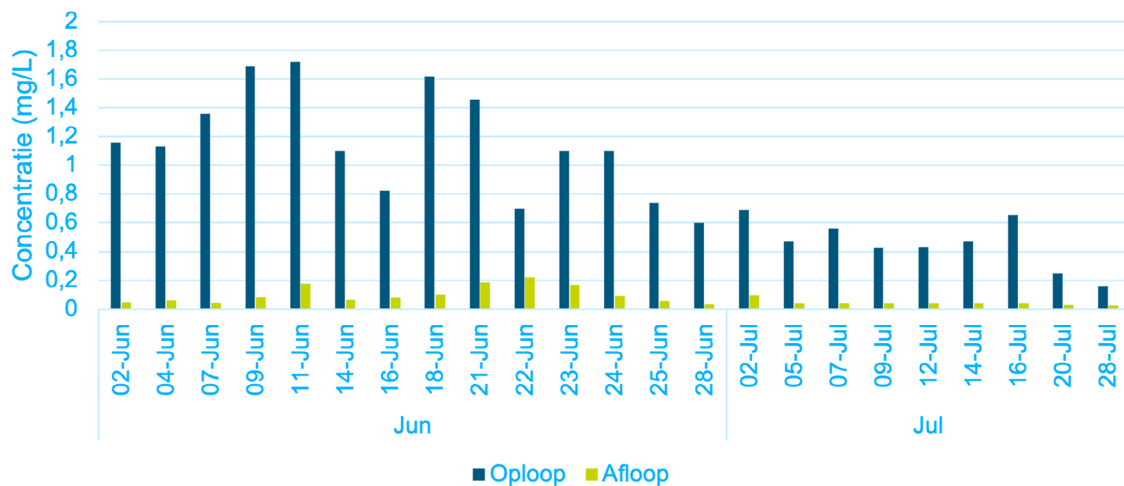
Fractie	Oploop-pilot		Afloop-pilot		Verwijdering %
	Gemiddelde concentratie mg/L	Standaard afwijking mg/L	Gemiddelde concentratie mg/L	Standaard afwijking mg/L	
Totaal P	1,15	0,41	0,41	0,28	64%
Totaal Opgeloste P	1,05	0,39	0,12	0,07	88%
Totaal Gebonden P	0,10	0,04	0,29	0,22	-181%
Ortho-P (PO ₄)	1,05	0,42	0,08	0,06	92%
Opgelost Organisch P (DOP)	0,06	0,06	0,03	0,02	52%
Gebonden Organisch P (SOP)	0,07	0,04	0,04	0,06	44%
Metaal Gebonden P (SMP)	0,03	0,02	0,23	0,21	-790%

INDIVIDUELE P-FRACTIES

Over de totale periode configuratie 'Verwijdering micro's en fosfor'.

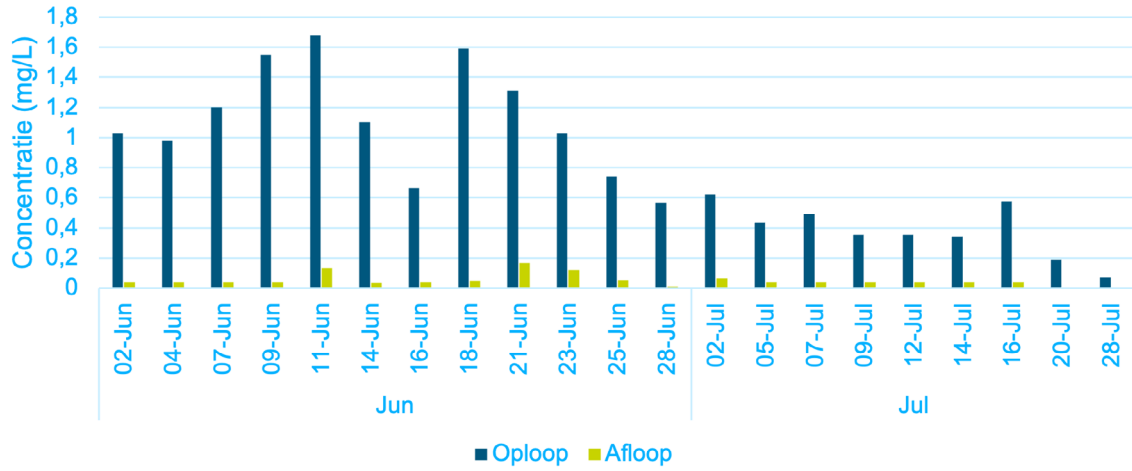
Totaal Opgeloste P

FIGUUR 27 CONCENTRATIES TOTAAL OPGELOSTE FOSFOR IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



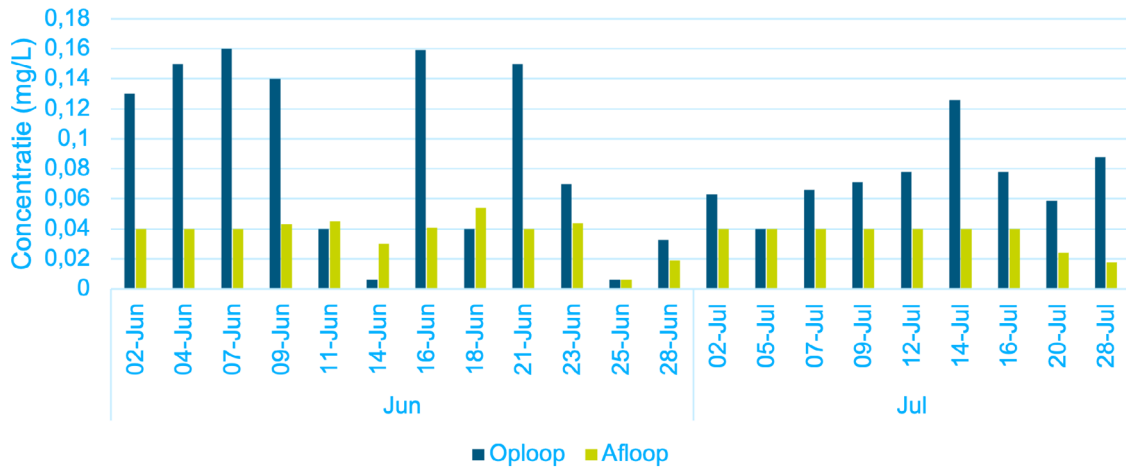
Ortho-P (PO₄)

FIGUUR 28 CONCENTRATIES OPGELOST ORTHO-FOSFAAT (PO₄) IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



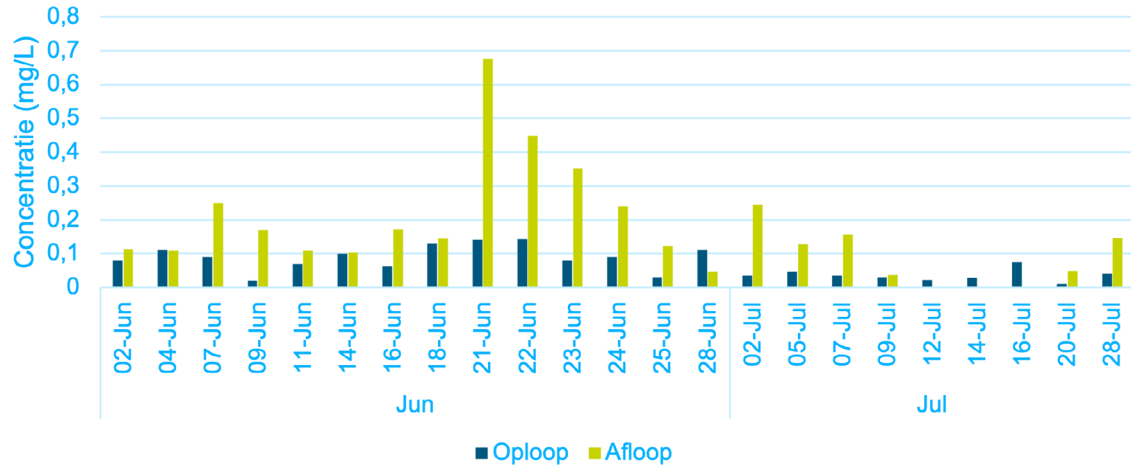
Opgelost Organisch P (DOP)

FIGUUR 29 CONCENTRATIES OPGELOST ORGANISCH FOSFOR (DOP) IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



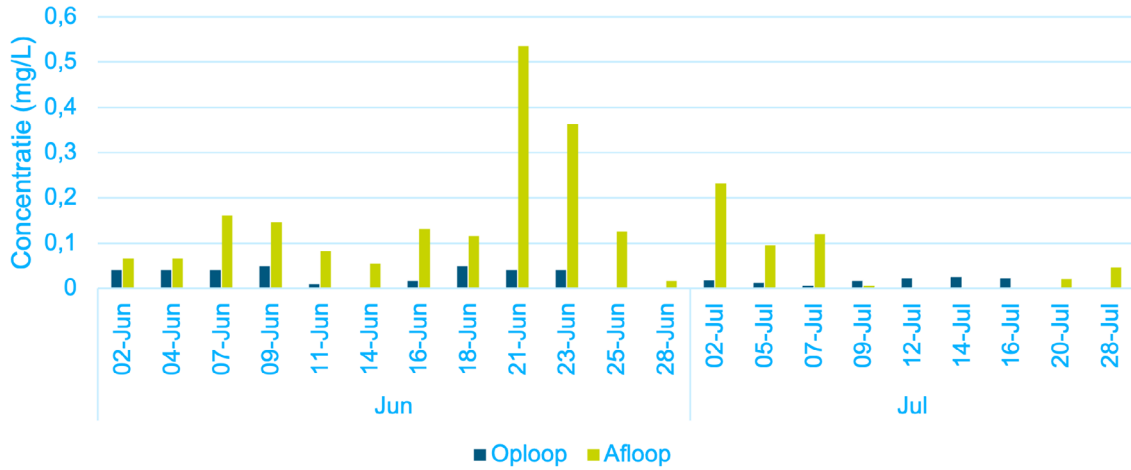
Totaal Gebonden P

FIGUUR 30 CONCENTRATIES TOTAAL GEBONDEN FOSFOR IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



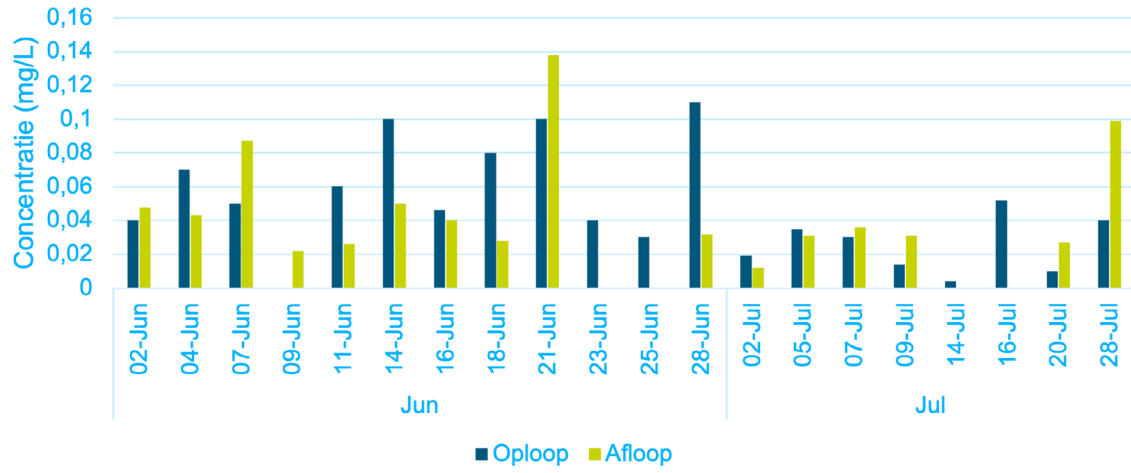
Metaal Gebonden P (SMP)

FIGUUR 31 CONCENTRATIES METAAL GEBONDEN FOSFOR (SMP) IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



Gebonden Organisch P (SOP)

FIGUUR 32 CONCENTRATIES ORGANISCH GEBONDEN FOSFOR (SOP) IN OPLOOP- EN AFLOOP-PILOT TIJDENS CONFIGURATIE 'VERWIJDERING MICRO'S EN FOSFOR'



BIJLAGE C

UITGANGSPUNTEN IPMV

TOETSINGSCRITERIA

De volgende afvalwaterhoeveelheid en -samenstelling is gehanteerd:

- Capaciteit rwzi 100.000 i.e. 150g TZV
- Dagdebiet 21.000 m³/dag
- Jaardebiet 7.665.000 m³/jaar
- Aandeel jaardebiet naar nabehandeling 70%
- Totaal debiet nabehandeling 5.365.500 m³/jaar
- Hydraulische capaciteit nabehandeling 1.040 m³/h

BIJLAGE D

UITGANGSPUNTEN IPMV

KOSTENBEREKENINGEN

Onderstaande uitgangspunten en de daarbij behorende kostenraming zijn gebaseerd op prijspeil Q4 2017.

BEREKENING INVESTERINGEN

Onvolledigheid

In de kostenberekeningen is rekening gehouden met een onvolledigheidsfactor van 25%.

Aannemerskosten

Over kale investeringskosten voor civiele, werktuigbouwkundige, elektrotechnische en procesautomatisering werkzaamheden is rekening gehouden met een opslag van 25%. Deze opslag bestaat uit kosten voor de aannemer om het werk uit te voeren, zoals algemene bouwplaatskosten, uitvoeringskosten, algemene kosten, winst en risico.

Bouwkosten en stichtingskosten

Er is een percentage van 80% aangehouden om bouwkosten naar stichtingskosten om te zetten. Deze bestaat uit kosten voor btw, onvoorzien, engineering, projectmanagement, directievoering, verzekeringen, tijdelijke voorzieningen tijdens ombouw en opstart, opleiding en communicatie.

NB naast bovengenoemde opslagen zijn geen verdere posten onvoorzien opgenomen.

BEREKENING JAARLASTEN

Ten aanzien van de berekening van de jaarlasten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Kapitaalslasten zijn berekend op basis van lineaire afschrijving over 30 jaar voor civiele onderdelen, 15 jaar voor werktuigbouwkundige en elektrotechnische onderdelen, 5 jaar voor procesautomatisering en een rente van 4%.
- Onderhoudskosten: 0,5% van de bouwkosten voor civiele onderdelen en 3% van de bouwkosten voor W/E/PA onderdelen.

Overige kosten inclusief btw

- Personeelskosten: € 50.000 per fte per jaar
- Elektriciteit: € 0,10/kWh
- PE: € 3,-/kg ingekocht product
- Zuivere zuurstof: € 0,20/kg
- IJzerchloride en Aluminiumchloride: € 120/ton 40% w/w
- Poedervormig Actief Kool: € 2,0 /kg
- Granulair Actief Kool: € 1.200 /m³
- Gereactiveerd granulair actief kool: € 500 /m³

- Methanol: € 355/kg
- Slibverwerking: € 600 per ton ds (slibindikking, slibontwatering en slibeindverwerking incl. transport)
- Productie spoelwater: € 0,04/m³
- Verwerking spoelwater op rwzi: € 0,01/m³