

PILOT EFFECTGERICHTE VERWIJDERING FOSFAAT BOLLENSTREEK

RESULTATEN VELDPILOT VOORHOUT EN SYNTHESE DIVERSE MAATREGELEN

HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND

2 februari 2015
078237075:0.7 - Definitief
C01011.200044.0100/GF

ARCADIS Deltares Enabling Delta Life ALTERRA WAGENINGEN UR Hoogheemraadschap van Rijnland

Inhoud

1 Samenvatting 3

2 Inleiding 7
2.1 Aanleiding 7
2.2 Doel 7
2.3 Consortium 8
2.4 Pilot-locatie 8
2.5 Leeswijzer 9
2.6 Dankwoord 10

3 Beschrijving van de maatregelen 11
3.1 Algemeen 11
3.2 IJzerzand 11
3.3 Meetparameters 12
3.4 Fosfaat-bindende drains 14
3.5 Puri-oever 16
3.6 Nutriëntenstuw 20

4 Resultaten 23
4.1 Fosfaat-bindende drains 23
4.1.1 Monitoring 23
4.1.2 Resultaten en discussie 23
4.1.3 Conclusies 27
4.1.4 Aanbevelingen 27
4.2 Puri-Oever 28
4.2.1 Monitoring 28
4.2.2 Resultaten en discussie 30
4.2.3 Conclusies 36
4.2.4 Aanbevelingen 37
4.3 Nutriëntenstuw 37
4.3.1 Monitoring 37
4.3.2 Resultaten en discussie 37
4.3.3 Conclusies 42
4.3.4 Aanbevelingen 43

5 Synthese 44
5.1 Aanpak 44
5.2 Totaal overzicht 46
5.3 Fosfaat-bindende drains 47
5.3.1 Effecten 48
5.3.2 Kosten 49
5.3.3 Toepasbaarheid 50
5.4 Puri-oever 50
5.4.1 Effecten 52

5.4.2 Kosten ... 54
5.4.3 Toepasbaarheid ... 55
5.5 Nutriëntenstuw ... 56
5.5.1 Effecten ... 58
5.5.2 Kosten ... 59
5.5.3 Toepasbaarheid ... 62
5.6 Zuiveren bij gemalen ... 63
5.6.1 Samenvattende beoordeling ... 67
5.7 Helofytenfilters ... 68
5.7.1 Samenvattende beoordeling ... 69
5.8 Bronmaatregelen ... 69
5.8.1 Organische meststoffen ... 69
5.8.2 Teelt de grond uit ... 71

6 Conclusies en discussie ... 73
6.1 Effectiviteit van de maatregelen ... 73
6.2 Zuiveringslocatie ... 73
6.3 Overwegingen en randvoorwaarden bij keuze van maatregelen ... 74
6.3.1 Bron of effect ... 74
6.3.2 Effect van kwel ... 75
6.3.3 Bodemvoorraad ... 75
6.4 Aanpak bij gebiedsspecifieke selectie van maatregelen ... 76
6.5 Beschikbare hoeveelheid ijzerzand ... 78

7 Aanbevelingen ... 80

8 Referenties ... 82

9 Bijlages ... 84

Bijlage 1 Puri-Oever ... 85

Bijlage 2 Nutriëntenstuw ... 92

Bijlage 3 Bijlagen Zuivering bij gemalen ... 95

Bijlage 4 Literatuurstudie Anne Marie van Dam ... 98

1 Samenvatting

Fosfaatbelasting vanuit bollenteeltgebieden vormt een belangrijk obstakel voor de kwaliteit van het oppervlaktewater. Daarom heeft het hoogheemraadschap van Rijnland een studie geïnitieerd met de volgende vragen:
1. Hoe groot is de P belasting voor een representatief bollenperceel?
2. Welke (nieuwe) maatregelen kunnen worden genomen om hier iets aan te doen?

De eerste vraag is onderzocht door het hoogheemraadschap van Rijnland door middel van een twee jaar durende veldstudie op een bollenbedrijf in Voorhout. De tweede vraag is onderzocht aansluitend op het deze veldstudie. Deze studie naar effectgerichte maatregelen die kunnen worden uitgevoerd om fosfaatuitspoeling tegen te gaan is gezamenlijk uitgevoerd door ARCADIS, Alterra en Deltares. In deze rapportage zijn de resultaten van deze studie vastgelegd.

De studie naar de maatregelen omvat twee onderdelen:
1. Een veldstudie van drie maatregelen; fosfaat-bindende drains, de Puri-Oever, en de nutriëntenstuw;
2. Een vergelijking tussen deze drie maatregelen en een aantal andere recent onderzochte maatregelen (de synthese).

Veldstudie
Gedurende 20 maanden (november 2012 - juni 2014) werd de effectiviteit van fosfaat-bindende drains getest, en gedurende 16 maanden (maart 2013 - juni 2014) die van de Puri-Oever en de nutriëntenstuw.

- Fosfaat-bindende drains geven een goede verwijdering van ortho-P (82-92%), en een wat minder goede verwijdering van totaal-P (52-60%). De mate van verwijdering van ortho-P was lager dan in een eerdere proef met een fosfaat-bindende drain bij Egmond; de oorzaak is waarschijnlijk het lagere ijzergehalte van het in Voorhout gebruikte ijzerzand. Er zijn geen problemen opgetreden met de doorlatendheid van het zand;
- De Puri-Oever is een filter langs een slootkant dat drainwater zuivert. Twee varianten zijn getest: met ijzerzand en met een mengsel van poly-aluminiumhydroxide en zand. De variant met ijzerzand verwijdert fosfaat efficiënt (85% voor ortho-P, 93% voor totaal-P) en is goed doorlatend. De variant met polyaluminiumhydroxide-zand verwijdert aanvankelijk P ook efficiënt, maar de efficiëntie gaat met de tijd sterk achteruit en is na 14 maanden gezakt tot 0. De doorlatendheid is ook minder hoog dan bij de variant met ijzerzand, waardoor deze variant (nog) niet geschikt is om in de praktijk toe te passen;
- De nutriëntenstuw die in deze experimentele opzet is gebruikt, bestaat uit een ''reactorvat'' gevuld met ijzerzand, waardoor slootwater gepompt kan worden om fosfaat te verwijderen. Verwijdering van fosfaat is goed (85% voor ortho-P en 81% voor totaal-P), maar de capaciteit om water door te voeren was in de gekozen opstelling beperkt.

Ook andere stoffen zijn bij de verschillende maatregelen gemonitord. Hierbij zijn geen negatieve gevolgen voor de waterkwaliteit geconstateerd voor de verschillende maatregelen.

Alle geteste maatregelen blijken dus goed in staat fosfaat te verwijderen, maar de praktische toepasbaarheid kan nog verder verbeterd worden.

Synthese

In onderstaande tabel zijn de resultaten van de studie samengevat. Weergegeven worden het effect van de maatregel, de kosten en de score op een aantal voor de maatregel relevante criteria uit het in het kader van dit project opgestelde afwegingskader. De resultaten voor toepassen van een helofyten filter en het zuiveren bij gemalen, zijn gebaseerd op literatuurstudie en interviews. Voor de andere maatregelen worden de resultaten van het in het kader van dit project uitgevoerde onderzoek beschreven. Voor de ijzerdrain zijn ook resultaten uit een vergelijkbare studie in Egmond gegeven.

Effectiviteit

Voor de beoordeling van het effect is zowel gekeken naar de kwaliteit van het effluent van de voorziening als naar de effectiviteit. Weergegeven zijn de gemiddelde concentraties aan ortho- en totaalfosfaat over de hele onderzoeksperiode van twee jaar. Hierbij is niet gecorrigeerd voor afwijkende metingen bij de Nutriëntenstuw en de toename van de efficiëntie van de fosfaat-bindende drains. Algemeen geldt dat met alle onderzochte methodes een rendement kan worden gehaald van ca. 80 – 90%, wat betekent dat een aanzienlijk hoeveelheid fosfaat kan worden tegengehouden.

Voor de Nutriëntenstuw en de Puri-oever zijn de effluentkwaliteit en het zuiveringsrendement vergelijkbaar. Het gemiddelde rendement van de nutriëntenstuw is wat lager, wat wordt veroorzaakt door afwijkende metingen en een lagere influentconcentratie.

Voor de ijzerdrains bleek de effluentkwaliteit en daarmee ook de effectiviteit sterk te verschillen tussen het eerste en tweede jaar. In het tweede jaar was het rendement hoger en vergelijkbaar met de behaalde resultaten in Egmond.

Voor helofytenfilters hangt de effectiviteit sterk afvoer de invoer. De rendementen liggen aanzienlijk lager dan die van de in dit project onderzochte maatregelen. Voor zuivering bij gemalen geldt ook dat de rendementen sterk variëren. Er worden waarden gerapporteerd tussen de 50 – 90%.

Kosten

De gerapporteerde kosten zijn geschat op basis van de behandeling van de afvoer uit een gebied van 5 ha. De manier waarop de kosten zijn berekend en het detailniveau dat hierbij past verschilt tussen de maatregelen sterk Daarnaast zijn de totale kosten (euro/kg P) sterk afhankelijk van de invoerconcentratie. Deze concentratie verschilt sterk tussen de verschillende maatregelen, waardoor deze kosten moeilijk te vergelijken zijn.

Voor de Nutriëntenstuw is een gedetailleerde schatting van de kosten gemaakt op basis van een ontwerp gebaseerd op de onderzoeksresultaten. Dit ontwerp is geoptimaliseerd voor het zomerhalfjaar. Een systeem dat ook piekafvoeren tijdens de winter aan wordt te groot. Dat betekent dat de gekozen nutriëntenstuw op jaarbasis minder fosfaat afvangt dan de andere maatregelen. Verder zijn de kosten sterk afhankelijk van de gewenste monitoring en de noodzaak van het plaatsen van een (nieuwe) pomp.

Voor de fosfaat-bindende drains kan er onderscheid gemaakt worden tussen de kosten van de drains en de meerkosten van het omhullen van deze drains. Omdat in de bollenteelt er altijd drainage ligt lijkt het rekenen met meerkosten reëel, indien fosfaatbindende drains worden toegepast bij vervanging. Omdat onderhoud van de drains ook voor reguliere drainage nodig is, zijn er geen kosten voor het onderhoud van de maatregel opgenomen.

De kosten voor een Puri-oever zijn geschat door de investering van de proefopstelling op te schalen voor oever nodig van 5 ha. Hierbij is rekening gehouden met een afname van de kosten van 50% door de opschaling. Daarnaast is er een aanname gedaan voor de meerkosten van de Puri-oever wanneer het water niet onder vrij verval door de bakken kan stromen. Uiteindelijk zullen de kosten ook sterk afhangen van de uiteindelijke uitvoering en inpassing van de Puri-oever. Hier is nog geen inschatting van gemaakt.

De investeringskosten voor een helofytenfilter zijn aanzienlijk hoger door het relatief grote benodigde oppervlak. Hier staat tegenover dat afschrijvingstermijn langer is dan voor de andere maatregelen. Voor zuivering bij gemalen zijn onvoldoende gegevens bekend om een schatting van de kosten te maken.

De beheer en onderhoudskosten verschillen per maatregelen. Voor de fosfaatbindende drain worden geen extra kosten voorzien naast het reguliere onderhoud van de drains. Voor de nutriëntenstuw, bedragen de jaarlijkse kosten circa €700,- (zonder monitoring). Voor de puri-oever is dit circa €500,-- Het beheer van een helofytenfilter kost aanzienlijk meer.

		Nutriëntenstuw Voorhout	Drains Voorhout	Drains Egmond	Puri-Oever IJzerzand Voorhout	Helofytenfilters	Zuivering bij gemalen
Effect	Concentratie influent (mg/l)	oP 1,2 tP 2,2	oP 2,6 tP 8,0	oP 2,5 tP 3,8	oP 1,6 tP 4,8		
	Concentratie effluent (mg/l)	oP 0,15 tP 0,33	oP 0,5 tP 3,2	oP 0,1 tP 0,3	oP 0,17 tP 0,30	Varieert	<0,2 mg
	Effectiviteit (%)*	oP 85% tP 81%	oP 81% tP 60%	oP 96% tP 92	oP 85% tP 93%	0-30% (sterk wisselend)	50-90%
Kosten	Investering (euro/5ha)	10.000 - 35.000 (15 jaar)	12.000 - 55.000 (15 jaar)		25.000 – 35.000 (15 jaar)	100.000 (50 jaar)	Variërend
	Operationeel (euro/jaar/5ha)	700 - 3.700 (onderhoud + monitoring)	- (onderhoud)		500 - 1000 (onderhoud)	2.500 - 5.000 (maaien)	Variërend
	Totaal (euro/kg P)	oP 60 – 260 tP 35 - 160	tP 6 - 19	tP 7 - 20	oP 28 - 42 tP 14 - 21	Hoog	6 - 40
Toepasbaarheid		+ Inpasbaar + Beheerbaar - Piekafvoer - Onderhoud	+ Onderhoud + Ruimte - Drainage nodig		+/- In watergang + Onderhoudsarm + Laag technologisch - Mogelijke barrière piekafvoeren	+ Combinatie ecologie - Ruimtegebruik - Verwijderings-rendement	+ Goedkoop + Bij gemalen - Taak waterbeheerder - Praktijkervaring

Om de methode met elkaar te vergelijken is ook de kosteneffectiviteit berekend, uitgedrukt in euro per kg verwijderd fosfaat. Waarbij de bij de kosten zowel rekening is gehouden met de jaarlijkse onderhoudskosten als de afschrijving.

Conclusie

- Fosfaatbindende drains zijn effectief en relatief goedkoop (meerkosten t.o.v. standaarddrainage ca. 10 euro/kg P). De maatregel heeft als voordeel dat er bovengronds geen ruimte nodig is, maar als nadeel dat er geen controle kan worden uitgeoefend op de doorlatendheid;
- De Puri-Oever is effectief, en wat duurder (14 tot 21 euro/kg P). De maatregel heeft als voordeel dat al het water dat van een perceel afkomt behandeld kan worden en dat de maatregel goed toegankelijk is. Een nadeel kan zijn dat het filter een barrière kan opwerpen voor de afvoer van water;
- De nutriëntenstuw is effectief maar relatief duur (35 tot 160 euro/kg P). Voordeel is dat deze in principe een grote hoeveelheid water zou kunnen filteren op een centrale locatie. Nadeel is dat in de huidige vorm de capaciteit laag is en beheer noodzakelijk is;
- Zuivering bij gemalen lijkt effectief te kunnen zijn en is relatief goedkoop (6-40 euro/kg P). Nadeel is dat er nog weinig tot geen praktijkervaring mee is opgedaan (behalve voor dosering van ijzer(III)chloride);
- Helofytenfilters zijn niet erg effectief voor het verwijderen van P en de kosten hangen sterk af van de beschikbare ruimte. Helofytenfilters zijn alleen aantrekkelijk wanneer het zuiveringsrendement verhoogd kan worden, of andere functies zoals natuurwaarden een voordeel bieden.

Een belangrijk verschil tussen de methoden is de plaats van zuivering: dit is in grote mate bepalend voor de toepasbaarheid ervan. Fosfaatbindende drains pakken de vracht het dichtst bij de bron aan, maar zijn alleen toepasbaar bij percelen die gedraineerd kunnen worden. De Puri-Oever is toepasbaar op een niveau hoger: de overgang van perceel naar sloot. De nutriëntenstuw is toepasbaar op weer een hoger niveau: aan het einde van een complete sloot. Helofytenfilters zijn toepasbaar aan het einde van een aantal percelen. Zuivering bij gemalen tenslotte kan worden toegepast bij de uitwatering van een volledige polder.

Naast deze maatregelen kunnen brongerichte maatregelen zoals het toepassen van fosfaatvrij organisch materiaal een aanvullende bijdrage leveren, maar vanwege de historische voorraad van fosfaat die zich vaak in de bodem bevindt, zullen de eerdergenoemde effectgerichte maatregelen nodig blijven om binnen enkele jaren de waterkwaliteitsdoelen voor P te kunnen bereiken.

Bemesting met groencompost als fosfaatarme organische meststof is effectief om het fosfaatoverschot (fosfaat gift minus fosfaatopname door het gewas) terug te dringen. De vermindering van de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater is echter niet direct gerelateerd aan het fosfaatoverschot. Dit is namelijk afhankelijk van de huidige fosfaattoestand van de bodem en de hydrologie. Om de uitspoeling van P in de tijd te kwantificeren zijn modelberekeningen nodig. Een mogelijke beperking van deze is de beschikbare hoeveelheid groencompost.

Bij de keuze van effectieve maatregelen is de volgende aanpak aan te bevelen:

1. Maak een goede analyse van waterkwaliteitsdoelen en van het gebied (watersysteem en landgebruik). Dit geeft de doelen en randvoorwaarden voor de keuze van maatregelen;
2. Selecteer op basis van deze analyse de meest passende maatregelen op het gebied van zuiveringsrendement, inpasbaarheid en beheerbaarheid;
3. Pas de maatregelen toe in het gebied;
4. Beoordeel de effectiviteit van de maatregelen; dit kan gebeuren door middel van meten en monitoren, maar ook via modellen.

Naast de technische aspecten is het vinden van voldoende draagvlak bij de betrokken agrariërs essentieel.

2 Inleiding

2.1 AANLEIDING

De bollenteelt vertegenwoordigt voor Nederland een belangrijke economische sector. Het telen van bollen gaat echter gepaard met een structurele belasting van het oppervlaktewater met nutriënten en bestrijdingsmiddelen, door afspoeling van en drainage vanuit percelen. Daarmee draagt de bollensector bij aan eutrofiëring en het niet halen van de Kader Richtlijn Water (KRW) doelstellingen voor met name N en P in Nederlandse watersystemen.

In de periode 2010-2012 heeft het hoogheemraadschap in de eerste fase van Onderzoeksproject bollensector (KRW) de fosfor- (P) en stikstof- (N) uitspoeling bij enkele percelen van een representatief bollenbedrijf in Voorhout gemeten en gekwantificeerd (Van Rooden, 2013). Na deze periode van monitoring heeft het hoogheemraadschap besloten maatregelen te testen die de emissie van P kunnen beperken. De concentratie van P in het oppervlaktewater van de Duin- en bollenstreek ligt vele malen (tot 40 maal) boven de KRW-norm. De N-concentratie ligt slechts tot 2 keer boven de norm. De verwachting is dat de stikstofnorm op termijn gehaald kan worden zonder ingrijpende maatregelen.

Om een goede keuze te maken welke maatregelen in te richten om tot een goede emissiereductie te komen in de tweede fase van het project, is uitgebreid met de deelnemende kweker, vertegenwoordiging uit de bloembollensector en kennispartijen gesproken. Er is gezocht naar maatregelen die toepasbaar zijn op de onderzoekslocatie, waarmee op korte termijn een grote waterkwaliteitsverbetering te behalen valt, met zo weinig mogelijk effect op de bedrijfsvoering en met draagvlak bij de sector. Bovendien moesten de maatregelen geschikt zijn om in grote delen van de Duin- en bollenstreek te gebruiken. Teeltmaatregelen (o.a. bodemkwaliteit handhaven en toepassen van fertigatie) en waterhuishoudkundige maatregelen op bedrijfsniveau (bijv. peilgestuurde drainage en gebruik van fosfaatbindende materialen) en polderniveau (zoals compartimentering en zuivering bij het uitslagpunt) zijn hierbij tegen het licht gehouden. Uiteindelijk is vanwege het zicht op onmiddellijke waterkwaliteitsverbetering, het beperkte ruimtebeslag en het grote draagvlak bij de bloembollensector, gekozen voor het aanbrengen van fosfaatbindende materialen op drie verschillende niveaus in het watersysteem: om de drains, langs de slootkant en bij het uitslagpunt.

2.2 DOEL

Het drainagewater en het van bollenpercelen afspoelende water komen nu rechtstreeks terecht in de tussenliggende perceelsloten. Deze komen uit op het boezemwater dat moet voldoen aan de KRW normen. Daarom is het van belang om zoveel mogelijk nutriënten te verwijderen voor het water de boezem bereikt. Drie fosfaat verwijderende maatregelen werden daarom getest door Alterra, Deltares en ARCADIS. Deze maatregelen sluiten aan op verschillende schaalniveaus: drain, sloot(kant) en watergang. Doel van deze proeven is het kwantificeren van de effectiviteit en robuustheid, en het optimaliseren van de maatregelen.

2.3 CONSORTIUM

In dit project wordt in een consortium samengewerkt. Het consortium bestaat uit partijen die op het vlak van de nutriëntenproblematiek zeer actief zijn in het zoeken naar, en onderzoeken van mogelijkheden om zowel stikstof als fosfaat uit het watersysteem te verwijderen en zo een bijdrage te leveren aan het verbeteren van de waterkwaliteit. De consortiumpartners zijn ARCADIS (nutriëntenstuw), Deltares (Puri-Oever) en Alterra (fosfaat-bindende drains). Juist door de samenwerking is de bij de drie partijen aanwezige kennis optimaal uitgewisseld en benut.

De effecten van de aangelegde verwijderingsmethoden is gedurende twee teeltseizoenen gevolgd. De monitoring werd door het hoogheemraadschap uitgevoerd en is per maatregel direct na de aanleg gestart en liep door tot en met juni 2014.

2.4 PILOT-LOCATIE

De pilot wordt uitgevoerd op drie percelen van een representatief bollenbedrijf te Voorhout. Het drainagewater van drie percelen wordt verzameld in een centrale sloot. Door middel van een particulier pompje wordt het waterpeil in deze sloot gereguleerd. Hierbij wordt het peil aangepast aan de groeifase van het gewas. Tijdens een droge periode kan er water ingelaten worden.

Op deze locatie is het hoogheemraadschap sinds 2010 bezig met het monitoren van de waterkwaliteit. Hiervoor zijn op verschillende locaties waterstanden en waterkwaliteitsgegevens verzameld. Ook waren er al verschillende bakken in de watergang aanwezig, die ook tijdens deze pilot benut worden.



Figuur 1: Pilotlocatie. Aangegeven zijn de locatie van (1) de nutriëntenstuw, (2) de Puri-Oever en (3) de fosfaat-bindende drains.

2.5 LEESWIJZER

In hoofdstuk drie worden de opzet van de individuele maatregelen en de overkoepelende eigenschappen beschreven, en in hoofdstuk vier de resultaten van de experimenten. In hoofdstuk 5 worden deze pilot-maatregelen vergeleken met elkaar en met eerder onderzochte fosfor verwijderende maatregelen zoals helofytenfilters en het zuiveren van oppervlaktewater bij gemalen.

In hoofdstuk 6 wordt een afweging gemaakt tussen de verschillende maatregelen en in hoofdstuk 7 worden verschillende aanbevelingen gegeven voor het verder onderzoeken van fosfor verwijderende maatregelen en het toepassen van deze maatregelen binnen Rijnland.

2.6 DANKWOORD

Naast ARCADIS, Deltares en Alterra is er door verschillende personen aan deze pilot meegewerkt. Alleen door hun inzet is het mogelijk geweest om deze pilot op te zetten en te beheren. Daarom willen we in het bijzonder de volgende personen bedanken voor hun inzet:

- Eric Bisschops en familie (eigenaren Pilotlocatie)
- Bert Woertink (technische ondersteuning)
- Ton van Schie en Rene Heistek (Aquon)
- Tonny Hemme (Reststoffenunie)
- Walter Kwakernaak (Kwakernaak b.v.)

3 Beschrijving van de maatregelen

3.1 ALGEMEEN

Tijdens deze pilot zijn drie maatregelen toegepast. Deze drie maatregelen vonden ieder op een eigen locatie in het afvoerproces plaats; op het veld, aan de oever en end-of-pipe. Voor deze drie maatregelen is ijzerzand toegepast, afkomstig uit de drinkwaterindustrie. Een groot deel van het drinkwater wordt gewonnen uit grondwater, dat meestal anaeroob is en ijzerhoudend. Dit ijzer wordt verwijderd omdat ijzer een bruine kleur en een typische smaak aan het drinkwater geeft. Dit verwijderen wordt gedaan door het water te beluchten en door een grofzandfilter te leiden, waardoor het ijzer zich aan het zand hecht.

3.2 IJZERZAND

Voor de drie proeven werden twee soorten ijzerzand gebruikt, met een verschillende herkomst. De eerste partij was afkomstig van het bedrijf GMB in Zutphen, waar ijzerzand uit verschillende drinkwaterzuiveringen tijdelijk worden opgeslagen voordat het ijzerzand wordt geleverd aan afnemers. Alle partijen zijn gekeurd op het voldoen aan het Bouwstoffenbesluit. Door deze herdistributie is het geleverde materiaal niet te herleiden tot een bepaalde drinkwaterproductie locatie. Vanwege de strakke planning was er aan het begin van de pilot geen mogelijkheid om het ijzerzand te testen op doorlatendheid, ijzer- en fosfaatgehalte. Deze eerste partij werd aangebracht rond de drains (hoofdstuk 3.4), een ander deel is later gebruikt voor een van de bakken van Puri-Oever (hoofdstuk 3.5), maar bleek daar niet te voldoen door een te lage doorlatendheid. Naar aanleiding daarvan is door Alterra de verzadigde doorlatendheid (K-sat) gemeten van de eerste partij ijzerzand. Tijdens het meten gedurende 8 uur bleek de K-sat af te nemen, van 160 cm/dag na 1,5 uur, naar 64 cm/dag na 7,5 uur. Mogelijk werd deze afname veroorzaakt door het zich verplaatsen van fijner materiaal binnen de meetkolom, waardoor gedeeltelijke blokkering optrad van de waterstroom. Ter vergelijking: in een eerder door Alterra gestart veldexperiment met een fosfaat-bindende drain werd ijzerzand gebruikt met een K-sat van 384 cm/dag (Chardon et al., 2012; Groenenberg et al., 2013). Het ijzerzand dat uiteindelijk is gebruikt door Deltares in de Puri-Oever en door ARCADIS in de nutriëntenstuw, heeft een K-sat van 5240 cm/dag.

Vanwege de problemen met de waterdoorlatendheid werd gezocht naar een nieuwe partij ijzerzand met een grovere structuur. Deze werd gevonden bij een drinkwaterwinning te Noordbargeres (Drente) en werd ter beschikking gesteld door de Reststoffenunie. In een parallel lopend experiment met een fosfaat-bindende drain in Egmond aan de Hoef (NH), gestart in 2010, werd ijzerzand gebruikt uit Vessem NB). Ter vergelijking zijn in onderstaande tabel en figuren ook gegevens opgenomen van dat type ijzerzand.

Een aantal eigenschappen van beide partijen ijzerzand is bepaald (Tabel 1). Het monster van het zand uit Zutphen werd gesplitst in een fractie met korrels van 2 – 5 mm (circa 50 massa %), korrels < 2 mm (circa 25 massa %) en fijn materiaal (circa 25 massa %).

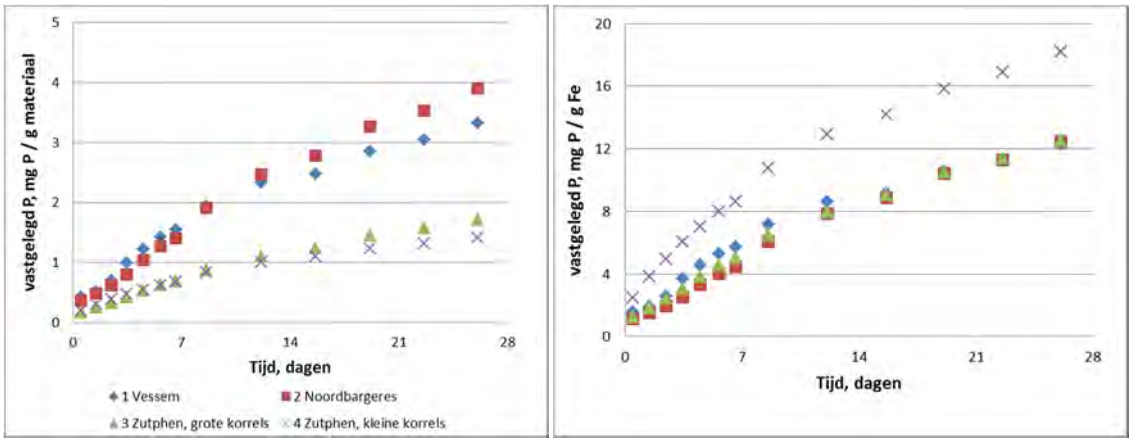
Zoals hierboven genoemd zal met name de fijne fractie verantwoordelijk zijn geweest voor de slechte waterdoorlatendheid. Ter vergelijking zijn ook gegevens opgenomen van ijzerzand uit Vessem, gebruikt rond een fosfaat-bindende drain in Egmond aan den Hoef.

IJzer zandkorrels, herkomst	Fe g/kg	P g/kg	P/Fe molair	Mn g/kg	korrelgewicht * mg
GMB Zutphen 2-5 mm	138	6,0	0,080	2,7	151
GMB Zutphen < 2 mm	78	2,1	0,050	11,5	2
Noordbargeres	314	3,7	0,021	15,0	24
Vessem	271	5,0	0,033	4,6	5

* gemiddeld gewicht van 20 korrels

Tabel 1: Chemische eigenschappen van het toegepaste ijzerzand

Tijdens laboratoriumonderzoek werden kleine kolommen gevuld met de vier materialen, waarbij de hoeveelheid ijzerzand zodanig werd gekozen dat de kolommen steeds eenzelfde hoeveelheid Fe bevatten. Boven en onder het ijzerzand werd zuurgewassen zand aangebracht, zodat het totaalgewicht uitkwam op 10 g per kolom. De kolommen werden gedurende 28 dagen gepercoleerd met een vloeistof die 4 mg ortho-P per L bevatte. In het percolaat van de kolommen werd de concentratie van ortho-P bepaald, waarmee de hoeveelheid P werd berekend die aan de materialen was vastgelegd. De vastgelegde hoeveelheid werd zowel berekend per gram ijzerzand als per gram Fe in de materialen. In onderstaande figuren zijn de resultaten weergegeven. Uit de figuren blijkt dat het ijzerzand uit Noordbargeres en Vessem een vergelijkbare hoeveelheid P vastleggen per gram materiaal, en het ijzerzand uit Zutphen duidelijk minder. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het lagere gehalte aan Fe in het ijzerzand uit Zutphen (zie tabel). Wanneer de vastlegging wordt berekend per gram ijzer dan blijken de kleine korrels (< 2 mm) uit Zutphen het meest effectief, en de drie andere soorten leggen vrijwel evenveel P vast.

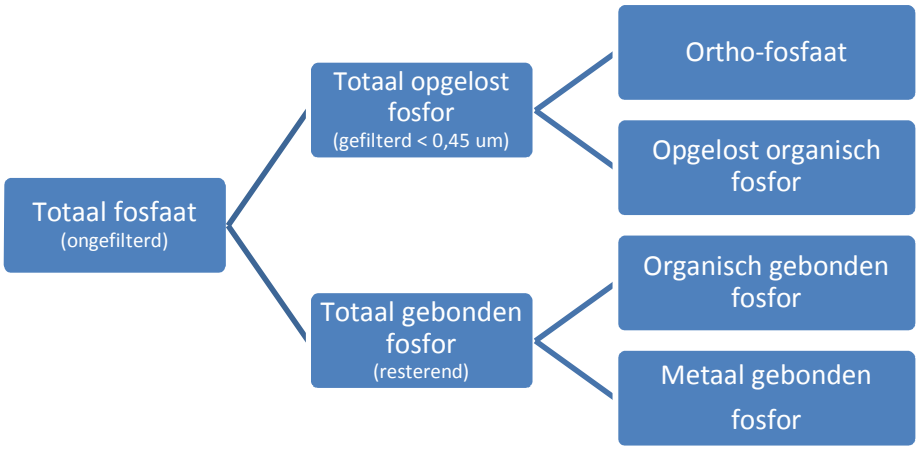


Figuur 2: Vastlegging van ortho-P tijdens een kolomproef met ijzerzand afkomstig uit Noordbargeres en uit Zutphen (korrels van resp. <2 en 2-5 mm), en ijzerzand uit Vessem. Links: vastlegging uitgedrukt als mg P per gram ijzerzand en rechts als mg P per gram ijzer in de materialen.

3.3 MEETPARAMETERS

Om het effect van de onderzochte maatregelen vast te stellen zijn er verschillende parameters van belang die hieronder zijn weergegeven. Niet alle parameters zijn echter bij elke proef bepaald, en soms slechts gedurende een beperkt deel van de tijd.

- **Ortho-P gefiltreerd**
  Het werkend principe van de maatregelen is het binden van opgelost orthofosfaat (ortho-P, een monitoring parameter voor de KRW) aan het ijzerzand. Een watermonster wordt gefiltreerd over een 0,45 µm filter, waarna op ortho-P wordt geanalyseerd.
- **Totaal-P ongefiltreerd**
  Een afname van opgelost ortho-P leidt direct tot een afname van de concentratie van totaal-P in het ongefiltreerde water, een directe normparameter voor de KRW. Daarnaast kan totaal-P ongefiltreerd afnemen doordat aan deeltjes gebonden (= particulair) P wordt afgevangen via filterwerking door het ijzerzand, of uitzakken in een buffercompartiment van een Puri-Oever, of in de pompput van de nutriëntenstuw.
  Totaal-P gefiltreerd en ortho-P ongefiltreerd (niet bepaald)
  In eerste instantie wordt gefocust op ortho-P gefiltreerd en totaal-P ongefiltreerd, omdat hier de grootste veranderingen in concentratie worden verwacht en omdat dit directe normparameters zijn voor de KRW. Wanneer echter afwijkende waarden worden gevonden is het interessant om de verwijdering van andere 'typen' fosfaat nader te beschouwen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de "TU Delft phosphorus distribution method", welke stelt dat overige typen fosfaat rekenkundig kunnen worden bepaald door naast ortho-P gefiltreerd en totaal-P ongefiltreerd ook ortho-P ongefiltreerd en totaal-P gefiltreerd worden gemeten, volgens het onderstaande schema (naar fig. 4.3 in Scherrenberg, 2011).



Figuur 3: Onderverdeling van de verschillende fosfaat-varianten (naar Scherrenberg, 2011). Alleen ortho-P en opgelost "organisch P "worden aan het ijzerzand geadsorbeerd.

- **Fe^{2+} en totaal-Fe ongefiltreerd**
  Fe^{2+} en totaal-Fe werden gemeten omdat het nog onduidelijk is welke nevenreacties plaatsvinden naast de binding van fosfaat aan de ijzerhuidjes op het zand. Indien ijzer in nevenreacties vrijkomt, is het belangrijk om te weten welke ijzerproducten gevormd worden, zodat de condities in een filter in de toekomst beter kunnen worden ingericht om dit te voorkomen. Omdat de reacties waarbij Fe^{2+} en totaal-Fe vrijkomen verschillen en andere gevolgen kunnen hebben, werden beide parameters gemonitord om te kunnen bepalen welke reacties plaatsvinden en welke producten worden gevormd.

- **N-totaal ongefiltreerd**
  Naast fosfaat vormt ook stikstof een belangrijk probleem in de Nederlandse oppervlaktewateren. Hoewel deze pilot zich uitsluitend richt op de (chemische) verwijdering van fosfaat, wordt mogelijk tevens een deel stikstof afgevangen in de vorm van organisch materiaal. Omdat stikstofverwijdering geen specifiek doel is, wordt voor de nutriëntenstuw volstaan met het monitoren van de totale stikstofconcentratie in een ongefiltreerd monster. In monsters van drain- en slootwater werden daarnaast de concentraties van ammonium-N, nitraat-N en nitriet-N gemeten.
- **Zwevende stof / troebelheid**
  De concentratie zwevende stof is een belangrijke operationele parameter, aangezien door verstopping met zwevende stof de doorlatendheid van een ijzerzand-filter sterk kan afnemen. Met name voor opschaling van deze pilot is het van belang om een goed beeld te krijgen van het afvangen van zwevende stof in een voorfilter en in het filter zelf.
- **Debiet**
  Het debiet door een filter is een belangrijke parameter welke (continu) gemonitord dient te worden om te kunnen berekenen wat het totale doorstroomvolume over een bepaalde periode is. Hiermee kan berekend worden welke fosfaatvracht een zandfilter heeft verwerkt, wat de verblijftijd van het water in het filter is geweest, en hoeveel fosfaat is gebonden per massa-eenheid ijzer.
- **O_2 en temperatuur**
  Zuurstof en temperatuur zijn twee parameters die belangrijk zijn op voor de biologische aspecten in een filter. Op basis van deze parameters kan bepaald worden of er veel organisch materiaal wordt afgebroken. Daarnaast kan bij een lage zuurstofverzadiging gebonden fosfaat en ijzer weer mobiel worden.
- **pH**
  De zuurgraad van het filterbed heeft een grote invloed op biologische én chemische processen. Bij een onverwachte werking van een filter kan worden onderzocht of zich afwijkingen in de pH hebben voorgedaan.
- **Mangaan**
  Het vóórkomen van mangaan in drain- of oppervlaktewater is een indicator voor anaerobe (= zuurstofloze) omstandigheden: het nauwelijks oplosbare Mn4+ wordt dan omgezet in het goed oplosbare Mn2+.
- **Overige parameters**
  Als overige parameters werden gemeten: As, Cl, SO_4^{2-}, HCO3-, Mg, Ca, K en een aantal zware metalen.

3.4 FOSFAAT-BINDENDE DRAINS

Door Alterra werden op het perceel Midden in het perceel grenzend aan een van de twee afvoerbakken een groep van drie drainbuizen aangelegd die zijn omhuld met circa 10 cm ijzerzand geleverd door GMB in Zutphen (hoofdstuk 3.2). Tevens werd een sleuf in de slootwand gevuld met ijzerzand, waardoor (in principe) al het water dat in de opvangbak stroomt gezuiverd is met betrekking tot fosfaat. De fosfaat-bindende drains werden gelegd op 2 meter afstand van de in het vooronderzoek bemonsterde drains RGP054, RGP055 en RGP056, aangesloten op verzamelpunt RGP102V. Als referentie dienen de drains RGP058, RGP059 en RGP060 met verzamelpunt RGP103V.

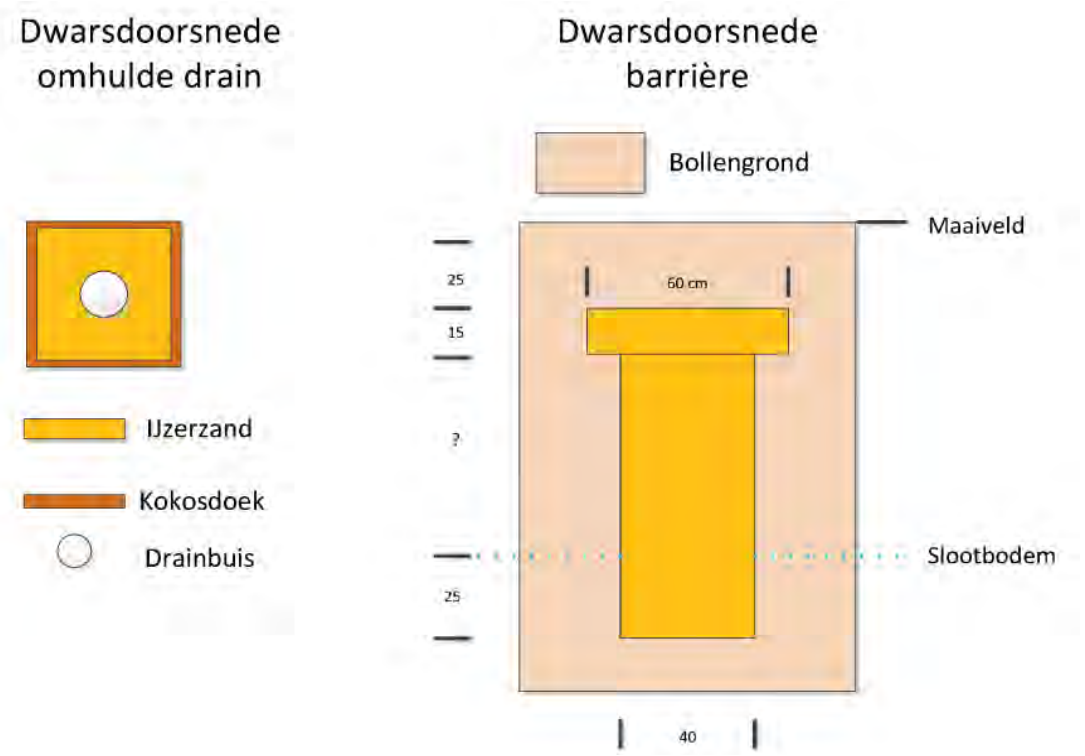


Figuur 4: Aanleg van fosfaat-bindende drains. Een sleuf van 40 cm wordt gegraven tot 10 cm onder drainagediepte. Hierin werd kokosdoek aangebracht en een laag ijzerzand van 10 cm. Daarop wordt een drainbuis aangebracht en een laag ijzerzand naast en op de buis. Het kokosdoek wordt dichtgevouwen en de sleuf wordt weer gevuld met grond.

De opstelling met fosfaat-bindende drains en barrière langs de slootwand is schematisch weergegeven in figuur 5. De bestaande drains zijn afgekoppeld vlakbij de slootwand, en de nieuwe fosfaat-bindende drains zijn daarna aangesloten op de bestaande koppeling RGP102V.



Figuur 5: Schematische weergave van de ligging van bestaande (afgekoppelde) drains en de nieuw aangelegde fosfaat-bindende drains. Langs de slootwand is een barrière aangebracht gevuld met ijzerzand, zodat [in principe] al het water dat in de opvangbak in de sloot terechtkomt gezuiverd is.



Figuur 6: Dwarsdoorsneden van fosfaat-bindende drains en barrière met ijzerzand.

3.5 PURI-OEVER

Bij de tweede maatregel worden afspoelende en uit het perceel stromende nutriënten zo dicht mogelijk bij het perceel afgevangen. Hiertoe is langs de oevers een strook benut voor maatregelen waarmee nutriënten kunnen worden afgevangen. De water afvoerende capaciteit van de sloten is ruim voldoende om aan beide slootkanten een zuiverende "Puri-Oever" van een meter breed aan te leggen. De Puri-Oever bestaat uit een strook met een poreus filter, met daarin toeslagstoffen die zorgen voor een efficiënte binding van fosfaat en, indien gewenst, een stimulering van stikstof- en pesticiden verwijderende (micro)biologische processen. De Puri-Oever is aangebracht in twee al bestaande houten bakken, die door Rijnland waren aangelegd om de afvoer van water en nutriënten te volgen. In deze bakken komen drie drains via een verzameldrain uit, waarna het water in de sloot gepompt kan worden. Na de aanleg van de Puri-Oever loopt het water uit deze drains via het filterbed van de Puri-Oever de sloot in.

Het principe

De pilottesten bij Voorhout zijn gericht op P-verwijdering. Daarom is gekozen voor twee fosfaatbindende materialen, gebaseerd op resp. ijzer en aluminium. Omdat beide materialen specifieke voordelen hebben, kan zo getest kan worden welke het meest geschikt is voor deze toepassing. De eerste Puri-Oever is uitgevoerd met ijzerzand als fosfaatbindend materiaal. Er is voor ijzerzand gekozen vanwege de goede ervaringen die met soortgelijke materialen is verkregen voor de vastlegging van fosfaat. Een mogelijk risico van ijzeroxide is dat dit mobiel zou kunnen worden bij lage redoxpotentiaal. De andere Puri-Oever is uitgevoerd met Poly Aluminium Chloride (PAC) (Al_nCl3_{n}-m$(OH)_m$) als fosfaatbindend materiaal. Dit is een middel dat bij de waterzuivering wordt gebruikt om fosfaat te verwijderen. De fosfaatbindende werking berust op de vastlegging van fosfaat met aluminium. De hoeveelheid fosfaat die met dit materiaal gebonden kan worden is evenredig aan de gedoseerde hoeveelheid aluminium.

De aanwezigheid van OH-groepen buffert de pH-daling die door de hydrolyse van het aluminium kan optreden. Gekozen is voor de variant PAX14 (leverancier: Kemira). Hiermee is ervaring uit twee eerdere projecten (Bakker et al., 2011 KRW Innovatieproject De Bodem Bedekt; De Weert et al., 2011: Spaarbekken De Braakman), waarbij een waterbodem is afgedekt met dit materiaal. PAX14 is in staat effectief fosfaat te binden. Het PAX14 is met NaOH naar pH 8 gebracht om polyaluminium hydroxide vlokken te maken. Deze polyaluminium vlokken zijn voor toepassing gemengd met drainagezand. Voordeel van polyaluminiumchloride is dat het in tegenstelling tot ijzerzand ongevoelig is voor mobilisatie van fosfaat bij lage redoxpotentiaal.



Figuur 7: Toegepaste materialen bij de Puri-Oever: ijzerzand (links), polyaluminiumchloride/zand mengsel (rechts).

Ontwerp: afmetingen

De dimensionering van het filterbed is gedaan uitgaande van de te behandelen waterstroom en de concentratie te verwijderen fosfaat. Deze berekening is belangrijk om twee redenen:

- De vracht aan te verwijderen materiaal stelt eisen aan de hoeveelheid filtermateriaal;
- De verhouding tussen het volume water dat afgevoerd (en dus gezuiverd moet worden) en het volume beschikbaar voor filtermateriaal geeft een verblijftijd. Deze moet voldoende groot zijn om het gewenste zuiveringsrendement te halen. Daarnaast stellen de hoeveelheid af te voeren water en zwevend stof eisen aan de doorlatendheid van het filtermateriaal.

Hieronder geven we in het kort weer hoe deze berekening voorafgaand aan de aanleg en veldproef is uitgevoerd. Hierbij moet worden benadrukt dat dit een schatting van tevoren is, die bedoeld was om een inschatting te maken van de afmetingen. De werkelijke waarde van de belasting in volume en vracht aan P is tijdens de veldproef bepaald en was anders.

In Figuur 1 is op een kaart te zien waar de bakken liggen waarin het filterbed geplaatst wordt. Het water dat vanuit het aangrenzende stuk land naar de sloot stroomt, moet door de bakken behandeld worden. Op basis van meetgegevens van de jaren 2010-2012 zijn de volgende waarden als uitgangspunt voor inschattingen van de eisen aan de zuiveringseenheid genomen:

Parameter	Waarde	
P	3 mg P/liter	3 g P/m^3
Geschatte afvoer	10.000 m^3/ha/jaar (bovengrens)	

Tabel 2: Uitgangspunten voor ontwerp Puri-Oever.

De totale lengte van het te behandelen perceel is 120 meter. De afmetingen van de bakken zijn: breedte: 22 meter; lengte: 1,5 meter; diepte: 0,5 meter. Dit betekent dat per bak het water van 120 m x 22 m = 2640 m^2 wordt behandeld. Er is uitgegaan van een dikte van het fosfaatbindende filterbed van 20 cm, waarbij 20 meter van de bak benut wordt. Uit de bovenstaande gegevens is voorafgaand aan de proef de afvoer per dag geschat op 2640 m^3/bak/jaar =7,2 m^3/bak/dag. De geschatte emissie per bak per dag kwam neer op 20 g P/bak/dag ofwel 8 kg/bak/jaar. De verblijftijd van het water in de reactieve laag per bak is geschat op 0,8 dagen, en op 0,3 dagen bij vulling met porositeit 33%. Dit is voldoende voor vastlegging van fosfaat. Er moet opgemerkt worden dat dit de waarde is bij gemiddelde afvoer. Bij droogte zal de afvoer lager zijn, bij grote regenval zal de afvoer hoger zijn.

Filtermateriaal	Volume filterbed (m3)	Bindingscapaciteit (kg P/m3)	Jaarvracht P (kg P/jaar)
IJzerzand	6	2	8
PAC/zand	6	25	8

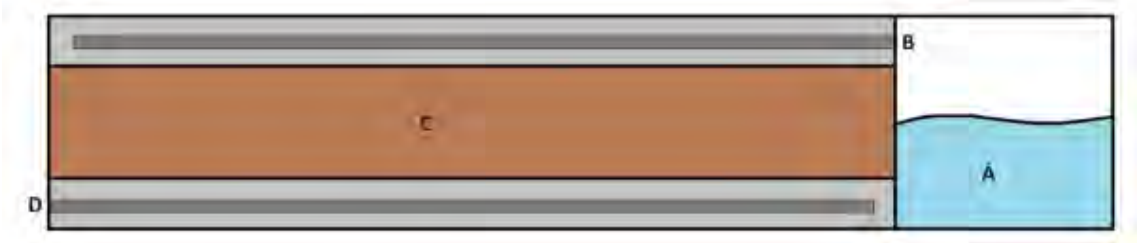
Tabel 3: Karakteristieke ontwerpeigenschappen van veldpilot Puri-Oever. Bronnen bindingscapaciteit: Fe: Groenenberg et al., 2013; PAC/zand: Bakker et al., 2011)

Op basis van deze getallen was vooraf ingeschat dat de bakken genoeg ruimte zouden bieden om minimaal 1,5 jaar fosfaat te kunnen binden.

Ontwerp: uitvoering

Het drainagewater komt eerst in een buffercompartiment. Van hieruit wordt het op basis van niveauregeling op het filterbed gepompt. Hierna passeert het een grindbed aan de bovenkant, waardoor het zich optimaal over het gehele oppervlakte van het filterbed kan verdelen. Vervolgens passeert het water het filterbed met ijzerzand of polyaluminiumchloride/zand. Het gefilterde water komt daarna terecht in een grindbed onder het filterbed. Dit is uitgerust met een drain waardoor het water optimaal het filterbed kan verlaten. Deze drain staat in verbinding met een buis, die het gefilterde water op de sloot loost. De hoogte van deze effluentbuis kan gevarieerd worden, waarmee de hoogte van het water in het filterbed ingesteld kan worden.

De grindbedden boven en onder het fosfaatbindende filterbed hebben een dikte van 10 cm. Het fosfaatbindende filterbed heeft een dikte van circa 20 cm. Dit ontwerp maakt het mogelijk om zowel van boven naar onder als van onder naar boven het filter te doorstromen. Hierdoor kan het filterbed bij (dreigende) verstopping doorspoeld worden. De aanleg van de bakken is op 28 februari 2013 voltooid en de bakken zijn op 4 maart 2013 in gebruik genomen.



Figuur 8: Schematische weergave van Puri-Oever (zij-aanzicht). A: influentbak, waarin drainwater uitmondt; B. influent drain, waarmee water vanuit influentbak A via een grindpakket van boven in het filtermateriaal wordt gebracht; C. filtermateriaal (IJzerzand of PAC/zand mengsel); D. Effluentdrain in grindbed, waardoor gefilterd water naar de sloot kan worden afgevoerd.



Figuur 9: Impressies van de aanleg van de Puri-Oever: a) De onderkant van de bak wordt afgedicht met waterdichte folie. Hierop komt een laag grind met een drainagebuis, van boven afgedekt met worteldoek. b) Boven de onderste laag grind komt de fosfaatbindende filterlaag, hetzij van ijzerzand, hetzij van een mengsel van polyaluminiumchloride en zand. c) De actieve filterlaag wordt afgedekt met worteldoek. d) Het geheel wordt afgedekt met een grindlaag met daarin een drainagebuis voor de waterverdeling.





Figuur 10: Voltooide Puri-Oever opstelling

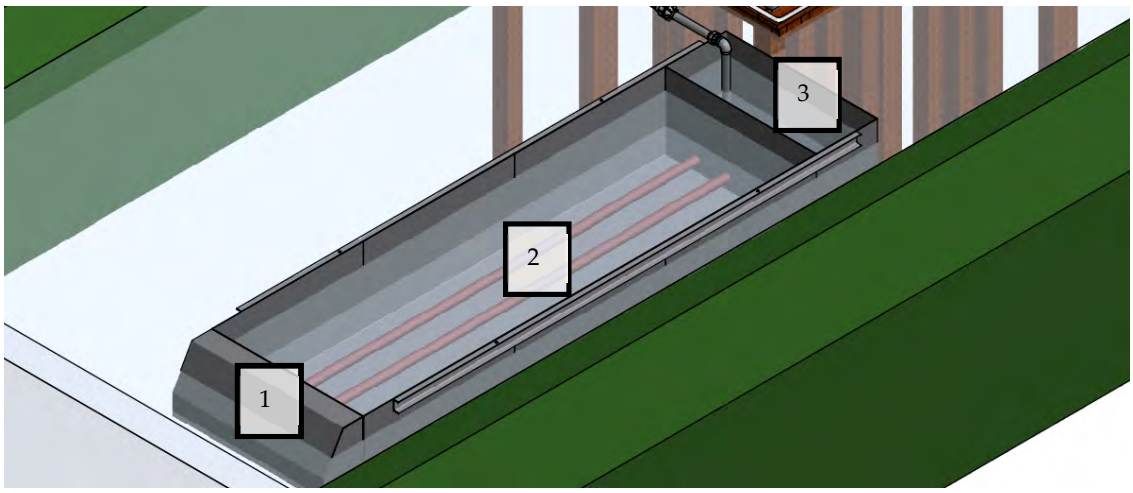
3.6 NUTRIËNTENSTUW

Als derde zuiveringsstap fungeert de nutriëntenstuw. Deze maatregel past aan het einde van het stroomgebied, waardoor de nutriëntenbelasting (voornamelijk P) van het gehele gebied wordt beperkt. Het te zuiveren water wordt hiervoor door een filter gevuld met ijzerzand geleid. Tijdens de pilot is voor een complex ontwerp gekozen om de nutriëntenstuw beter te kunnen monitoren en sturen.



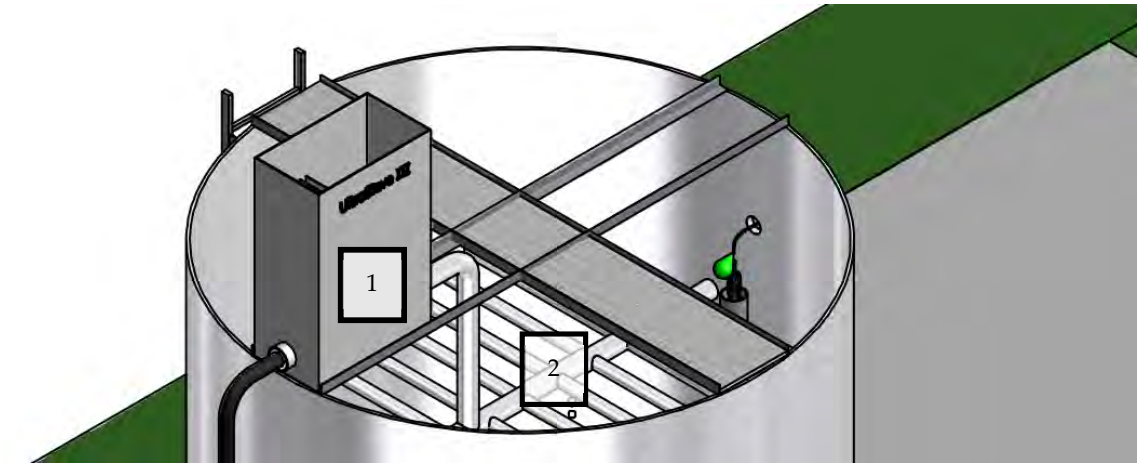
Figuur 11: Foto van de reactor op de steiger (achter) en het voorfilter in de perceelsloot naast de steiger (voor). Bij de reactor is ook de vopo-pomp zichtbaar die het overtollige water verwijdert.

Om te voorkomen dat het ijzerfilter verstopt raakt wordt het water door een voorfilter geleid. Dit voorfilter bestaat uit een drijffilter (1) die drijvend plantenmateriaal uit het voorfilter moet houden. De filterbak zelf (2) is gevuld met fijn grind, met op de bodem grofwandige drains. Deze drains voeren het water naar een pompput (3), waar het water tijdelijk verzameld wordt.



Figuur 12: Voorfilter van de nutriëntenstuw met een drijfschot, filtergrind, drains en een pompput.

Wanneer er voldoende water in de pompput aanwezig is (en er weer water in de reactor nodig is) wordt het water uit de pompput door een microfilter (1) gepompt. Dit filter verwijdert de laatste vervuiling en voorkomt hierdoor dat het ijzerfilter verstopt raakt. Na de microfilter wordt het water in de reactor gebracht. Dit gebeurt door middel van een sproeier (2). Deze sproeier voorkomt dat het binnenstromende water een kuil creëert in het ijzerzand en er preferente stroombanen ontstaan. Onder vrij verval kan het water vervolgens langzaam door het ijzerzand stromen en kan het fosfaat afgevangen worden.



Figuur 13: Reactor van de nutriëntenstuw met een microfilter, sproeier en het ijzerzand.

Doelen van de pilot met de nutriëntenstuw zijn:

- Kwantificeren van het fosfaatbindend vermogen van ijzerzand in een praktijkomgeving;
- Analyseren van het verloop van de doorlatendheid van het filterbed in de tijd;
- Inventariseren van de bijeffecten van de nutriëntenstuw, zoals het verwijderen van stikstof of het uitspoelen van ijzer;
- Ontdekken van praktische knelpunten bij het verwijderen van fosfaat met een nutriëntenstuw;
- Optimaliseren van het ontwerp van de nutriëntenstuw.

De voor deze pilot toegepaste variant van de nutriëntenstuw is relatief complex. Er wordt namelijk gebruik gemaakt van een voorfilter, het te zuiveren water wordt naar de reactor verpompt en de reactor is boven de watergang geplaatst. Dit is gedaan om tijdens de pilot maximale flexibiliteit te hebben en de verschillende processen te kunnen sturen en monitoren. Wanneer de nutriëntenstuw in de praktijk toegepast gaat worden kan er een eenvoudiger model toegepast worden. Zo kan de reactor dan (net als een stuw) in de watergang geplaatst worden en kan het water onder vrij verval of met een bestaande vopo-pomp door de reactor stromen. De ervaringen die in deze pilot wordt opgedaan kunnen hierbij toegepast worden.

4 Resultaten

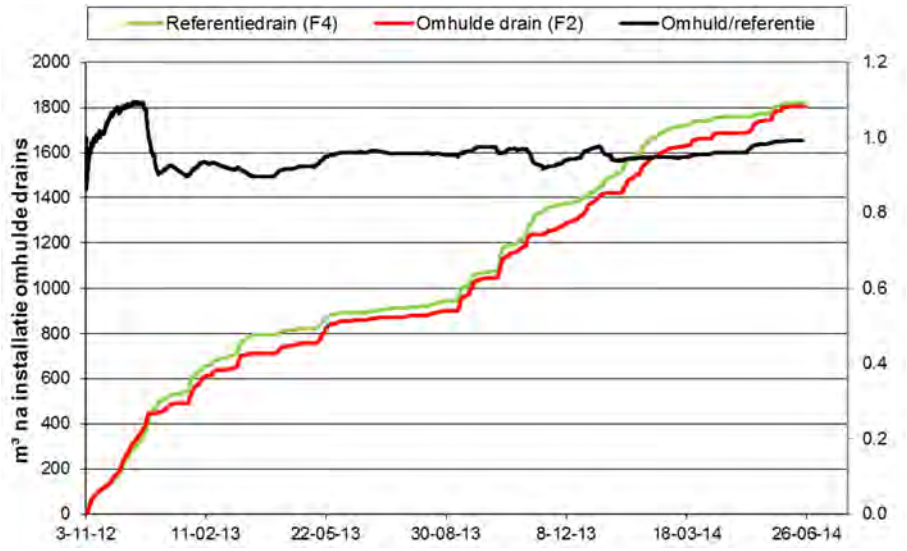
4.1 FOSFAAT-BINDENDE DRAINS

4.1.1 MONITORING

Voor de beoordeling van het functioneren van de fosfaat-bindende drains RGP054, RGP055 en RGP056 wordt gebruikt gemaakt van analyseresultaten van monsters uit de verzameldrain RGP102V (fosfaat-bindende drains) en de op hetzelfde perceel gelegen RGP103V (referentiedrains). De meest relevante parameters voor de beoordeling zijn: ortho-P na filtratie, totaal-P ongefiltreerd, totaal Fe ongefilterd, pH, Mn, en NH_4^+.

4.1.2 RESULTATEN EN DISCUSSIE

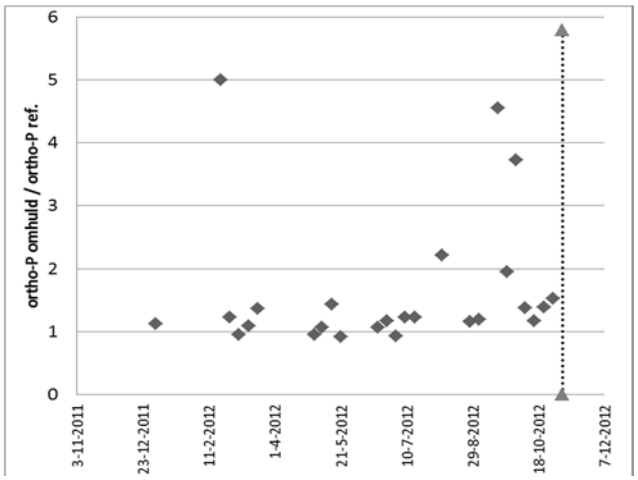
Voor het beoordelen of de fosfaat-bindende drains voldoende water afvoeren werden gegevens bekeken die waren geregistreerd door de flowmeters van de verzameldrains via welke het water uit respectievelijk de fosfaat-bindende drains en de referentiedrains wordt afgevoerd. Figuur 14 geeft de cumulatieve waterafvoer (linker y-as) via beide bakken (Alterra referentie en Alterra omhuld), vanaf het moment van installeren van de fosfaat-bindende drains.



Figuur 14: Cumulatieve afvoer van de drains, met verhouding tussen fosfaat-bindende en referentiedrains

Uit de figuur blijkt dat in het begin de afvoer via de fosfaat-bindende drains wat hoger was (stijgen zwarte lijn). Rond 23-12-2012 was er een storing bij de registratie van de afvoer via de fosfaat-bindende drains (rode lijn horizontaal, groene lijn stijgt, zwarte lijn daalt).

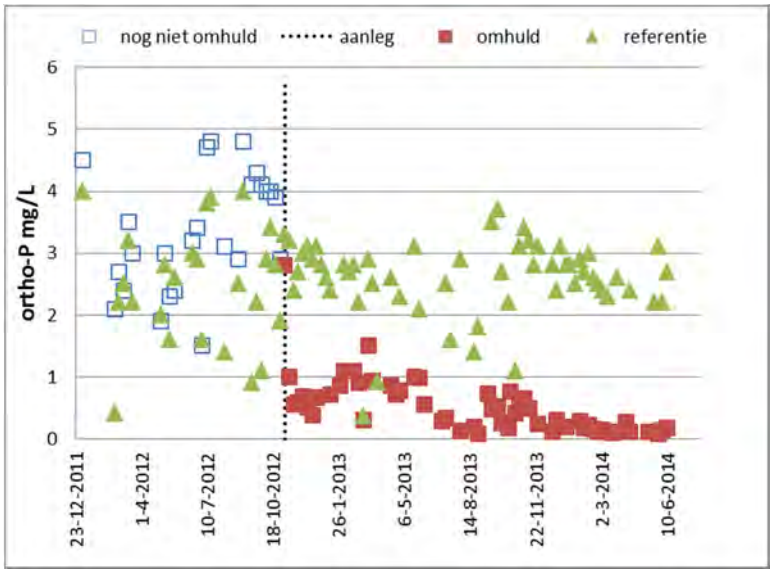
Over de hele periode blijkt de afvoer vrijwel gelijk, dus heeft de lage waterdoorlatendheid van het gebruikte ijzerzand (zie 3.2) geen nadelige invloed gehad op het functioneren van de fosfaat-bindende drains met betrekking tot de waterafvoer. De totale afvoer per groep van drie drains was circa 1800 m^3. Het intrekgebied van de 3 drains (lengte 60 m, drainafstand 10 m) omvat ca. 1800 m^2, zodat in totaal 1 m water is afgevoerd gedurende 600 dagen (5-11-2012 tot 24-6-2014). Dit komt neer op 61 cm per jaar.



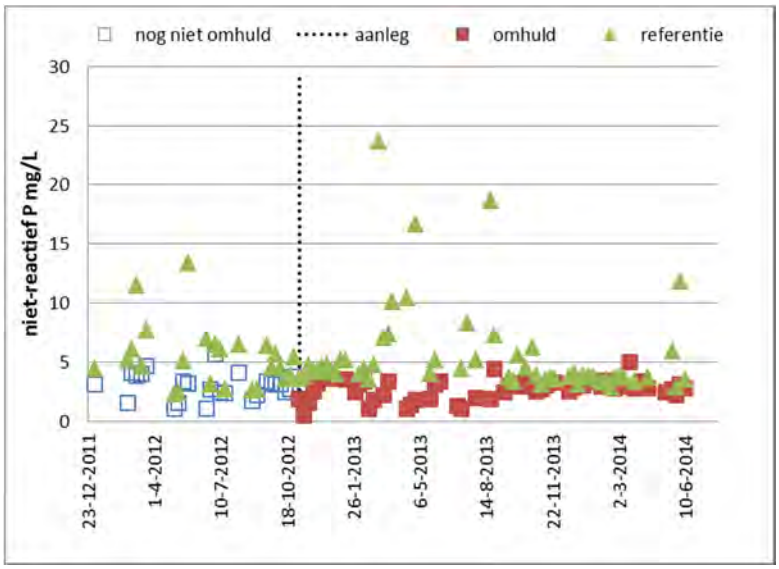
Figuur 15: Vergelijking ortho-P gehalten in referentiedrains en fosfaat-bindende drains. Weergegeven is ortho-P omhuld / ortho-P- referentie. Een waarde > 1 betekent dat het drainwater van de fosfaat-bindende drains meer ortho-P bevat dan het water uit de referentiedrains. De verticale lijn geeft het tijdstip aan waarop de fosfaat-bindende drains werden aangelegd.

Uit Figuur 15 blijkt dat in 2012, tot aan de aanleg van de fosfaat-bindende drains, op die plaats de ortho-P concentraties meestal wat hoger lagen dan bij de referentiedrains. Door een aantal sterk verhoogde concentraties was de gemiddelde concentratie 64% hoger, de mediaanwaarde was 23% hoger. Bij de interpretatie van de effectiviteit van de fosfaat-bindende drains wordt hierop teruggekomen.

In Figuur 16 zijn de resultaten voor ortho-P weergegeven van de fosfaat-bindende drains en van de referentiedrains, en in Figuur 17 is dit gedaan voor totaal-P (in ongefilterde monsters) minus ortho-P. Deze fractie bestaat uit aan deeltjes (> 0.45 µm) gebonden P (= gesuspendeerd P) en uit organisch gebonden P (ook wel niet-reactief P genoemd).



Figuur 16: Ortho-P gehalten in water uit referentiedrains, uit drains waar later fosfaat-bindende drains werden aangebracht, en uit fosfaat-bindende drains.



Figuur 17: Idem, gehalten van niet-reactief P (= totaal-P ongefiltreerd minus ortho-P).

In Figuur 16 is te zien dat vóór de aanleg van de fosfaat-bindende drains op die locatie de ortho-P concentraties hoger lagen dan bij de referentiedrains, uit Figuur 17 blijkt dat voor gesuspendeerd en niet-reactief P het omgekeerde het geval is (mediaan is 34% lager dan bij referentiedrains. Uit Figuur 16 blijkt ook dat voor ortho-P de verschillen tussen omhulde en referentiedrain in de loop van de tijd lijkt toe te nemen, en dus ook het zuiveringsrendement.

Functioneren van de fosfaat-bindende drains

Het rendement van de fosfaat-bindende drains is berekend met onderstaande formule:

$$R = 100 \times \frac{P_{ref} - P_{omhuld}}{P_{ref}} \qquad (1)$$

Voor ortho-P werden de rendementen berekend voor de gehele periode (oktober 2012-juni 2014), maar ook voor het eerste en tweede jaar apart; ook werd een onderscheid gemaakt tussen de zomerperiode (mei t/m augustus) en de winterperiode (september t/m april). De uitkomsten voor de verschillende berekeningen staan in onderstaande tabel.

Meetperiode	ortho-P ref.	ortho-P		totaal-P		niet-reactief P	
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l
Gehele periode na aanleg	2,6	81	0,5	60	3,2	50	2,7
Jaar 1 (okt. 2012 - sept. 2013)	2,5	74	0,6	64	3,2	61	2,6
Jaar 2 (okt. 2013 - juni 2014)	2,7	92	0,2	52	3,2	25	3,0
Zomer (mei t/m aug.)	2,3	86	0,3	70	2,8	73	2,5
Winter (sept. t/m april)	2,6	78	0,6	56	3,4	45	2,8

Tabel 4: Gemiddelde concentratie ortho-P in effluent van referentiedrain, zuiveringsrendement en gemiddelde concentraties in effluent van de met ijzerzand fosfaat-bindende drains berekend voor verschillende perioden.

Uit de tabel kan het volgende worden afgelezen: in het tweede jaar is het rendement voor de verwijdering van ortho-P beter dan in het eerste jaar, maar voor niet-reactief P is dat juist niet het geval.

Gedurende de zomer is voor beide P-vormen het rendement wat beter dan in de winter, dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lagere stroomsnelheid van het drainwater in de zomer, waardoor het fosfaat meer tijd heeft om te reageren met het ijzerzand. Voor ortho-P is het rendement, berekend t.o.v. de referentiedrains, over de gehele periode 81%, vanaf oktober 2013 neemt het toe tot 92%.

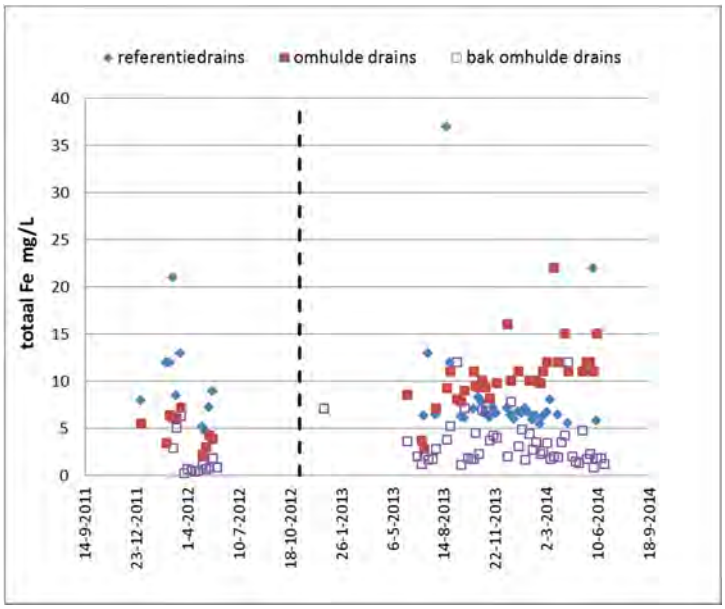
Deze laatste waarde ligt vrijwel op het niveau van het rendement in een proef in Noord-Holland (> 95%, zie Groenenberg et al., 2013). Het voor de omhulling gebruikte ijzerzand verschilt echter van het zand dat in Noord-Holland, de Puri-Oever en de nutriëntenstuw werd toegepast. Het ijzergehalte van het rond de drains aangebrachte zand lag een stuk lager dan bij het zand uit Noordbargeres dat in de Puri-Oever en de nutriëntenstuw is gebruikt. Uit laboratoriumproeven bleek dat het daardoor ook een lagere vastleggingscapaciteit voor fosfaat bezit (zie paragraaf 3.2). Mogelijk zorgde gedurende het eerste jaar een op bepaalde momenten geringe waterdoorlatendheid (Figuur 14) voor het optreden van preferente stroombanen waardoor een deel van het grondwater minder goed werd gezuiverd. Voor ortho-P geeft de rechtstreekse vergelijking van de concentratie P uit de fosfaat-bindende drain met die van de referentie drains mogelijk een onderschatting van het rendement, omdat het niveau van uitspoeling vanuit de plot met referentiedrains vóór de aanleg lager lag dan die vanuit de plot waar later de fosfaat-bindende drains zijn aangelegd. Voor niet-reactief P geldt het omgekeerde: daarvoor lagen de concentraties vanuit de plot met referentiedrains vóór de aanleg juist hoger dan die van de plot waar later de fosfaat-bindende drains zijn aangelegd.

Voor niet-reactief P is de gemiddelde effectiviteit ongeveer 50%. Ondanks de lage effectiviteit wordt er toch een behoorlijke hoeveelheid niet-reactief P verwijderd, dit doordat de concentratie niet-reactief P hoog is ten opzichte van de concentratie ortho-P. Uit de metingen kan niet worden afgeleid of dit niet-reactief P organisch P is of bijvoorbeeld colloïdaal P. Ook het mechanisme van de verwijdering van dit niet-reactieve P is onbekend. Daarom kan niet worden aangegeven of de verwijdering van niet-reactief P invloed heeft op de geschatte levensduur van de fosfaatbindende drains welke berekend is op basis van de adsorptie capaciteit van het ijzerzand voor ortho-P. De pieken tot > 10 mg/L niet-reactief P die bij de referentiedrains werden gemeten traden niet op bij de fosfaat-bindende drains (zie figuur 16). Niet duidelijk is of deze zeer hoge concentraties door de omhulling werden tegengehouden, of dat ze na de aanleg niet meer voorkwamen in ter plaatse van de fosfaat-bindende drains.

Andere componenten

Zuurgraad - pH: het omhullen van de drains had geen invloed op de pH van het drainwater: in het drainwater van de fosfaat-bindende drains was de pH gemiddeld 8,2 (± 0,4), voor de referentiedrains was dit 8.3 (± 0,3).

IJzer: het totaalgehalte van ijzer in het (ongefilterde) drainwater van de fosfaat-bindende drains vertoont een stijgende lijn (figuur 4.5); over de gehele periode na aanleg was de concentratie gemiddeld 10.4 mg/L (± st.dev. 3,8 mg/L), voor de referentiedrains was dit 8,7 ± 5,7 mg/L. Gedurende het tweede jaar (vanaf 1-10-2013) worden de verschillen groter: fosfaat-bindende drains 11,5 ± 2,9 mg/L, en referentiedrains 7,6 ± 3,3 mg/L. De gehalten aan Fe die werden gemeten in de bak van de fosfaat-bindende drains zijn ook weergegeven in figuur 4.5, deze liggen een stuk lager (3,4 ± 2,5 mg/L) dan in het drainwater uit de fosfaat-bindende drains. Dit wijst op het relatief snel neerslaan van het uitgespoelde Fe, waardoor het mogelijk het boezemwater niet bereikt.



Figuur 4.5: Gehalten aan totaal Fe in ongefiltreerd drainwater.

Mangaan: bij de fosfaat-bindende drains was de concentratie Mn in het drainwater gemiddeld 6,3 (± 2,0) mg/L, bij de referentiedrains 1,2 (± 0,3) mg/L; de fosfaat-bindende drains geven dus mangaan af, waarschijnlijk door reductie van het normaliter onoplosbare Mn^{4+} naar het oplosbare Mn^{2+}. Er bestaat echter geen norm voor Mn in zwem- of viswater die overschreden zou kunnen worden. Door oxidatie en vervolgens neerslaan neemt het Mn-gehalte af: in de opvangbak van de fosfaat-bindende drain tot gemiddeld 4,6 (± 2,6) mg/L, en in de opvangbak van de referentiedrains tot 0,7 (± 0,3) mg/L.

Stikstof: bij de fosfaat-bindende drains was de concentratie NH_4^+ in het drainwater gemiddeld 3.8 (± 1,0) mg/L, bij de referentiedrains 3.2 (± 0,4) mg/L. Vóór de aanleg van de fosfaat-bindende drains was de concentratie van NH_4^+ op deze plot ook al 32% hoger dan op de referentieplot. De fosfaat-bindende drains lijken dus (vrijwel) geen invloed te hebben op de concentratie van NH_4^+. De concentraties van NO_3^- in het drainwater lagen vrijwel allemaal onder de detectiegrens, wat een aanwijzing is voor een anaeroob karakter van het via de drains uittredende grondwater.

4.1.3 CONCLUSIES

- De fosfaatbindende drain verwijdert effectief ortho-P en in mindere mate niet-reactief P;
- Ondanks het lagere rendement voor de verwijdering van niet-reactief P worden aanzienlijke hoeveelheden niet-reactief P verwijderd. Het mechanisme van deze verwijdering is niet bekend;
- De concentraties ijzer en mangaan in het effluent van de fosfaatbindende drain zijn verhoogd ten opzichte van die van de referentiedrains. De ijzer en mangaanconcentraties in het water in de sloot dalen door het weer neerslaan van ijzer en mangaan na oxidatie;
- De fosfaatbindende drains hebben een goede drainerende werking, deze is vergelijkbaar met die van de referentiedrains.

4.1.4 AANBEVELINGEN

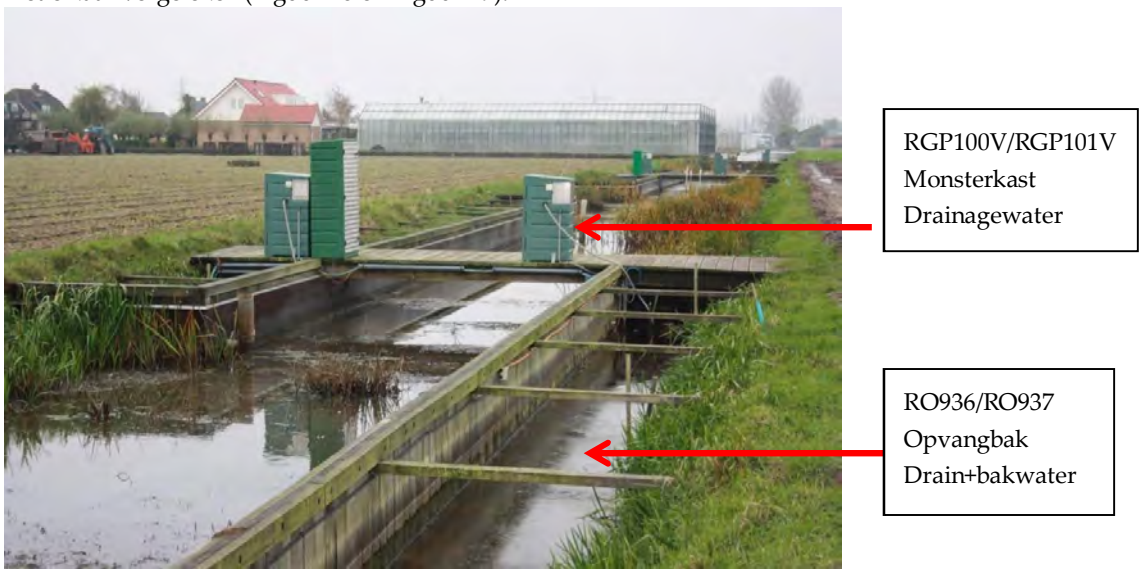
- Voor een goede werking van de fosfaatbindende drain moet ijzerzand geselecteerd worden met een voldoende hoog ijzergehalte en een voldoende hoge doorlatendheid;
- Verder onderzoek naar de samenstelling van niet-reactief P en naar het mechanisme van de binding van niet-reactief P in verband met het inschatten van de levensduur van de drains;

- Verder onderzoek naar de levensduur van de drains, onder meer naar de potentiële vermindering van de adsorptiecapaciteit voor P door reductie en het vervolgens in oplossing gaan van ijzeroxide van het ijzerzand.

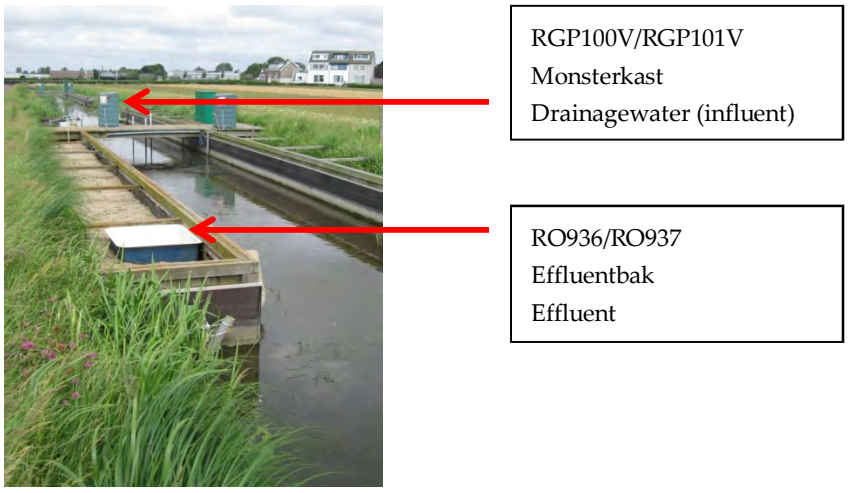
4.2 PURI-OEVER

4.2.1 MONITORING

Voor de beoordeling van de werking van de Puri-Oever zijn de gegevens van de volgende monsterpunten met elkaar vergeleken (Figuur 18 en Figuur 19).



Figuur 18: Monstername voor start experiment Puri-Oever.



Figuur 19: Monstername na start experiment Puri-Oever

Code	Locatie	Voor start Puri-Oever	Na start Puri-Oever
RGP100V	monsterkast Fe oever	drainwater	drainwater (influent)
RGP101V	monsterkast Al oever	drainwater	drainwater (influent)
RO935	sloot		
RO936	opvangbak Fe oever	drain- + bakwater	effluent in effluentbak
RO937	opvangbak Al oever	drain- + bakwater	effluent in effluentbak

Tabel 5: Monsterpunten die zijn geanalyseerd voor de beoordeling van de Puri-Oever.

Monsterpunten RGP100V en RGP101V betreffen de verzameldrains die uitkomen in de bakken. Het gaat hier om monsters die worden genomen met de automatische bemonsteringsopstelling. Na start van de Puri-Oever zijn deze monsters genomen als maat voor het ingaande water van het filterbed (influent). Het water van monsterpunten RO936 en RO937 verschilt tussen voor en na start van de Puri-Oever. Voor de start was dit water uit de houten verzamelbak, waarin zowel drain- als uittredend grondwater uitkwam. Na de start van de filteropstelling is dit het water uit de witte effluentbak, waarin effluentwater uitkomt dat door het filterbed is gestroomd en in het onderste grindbed terecht is gekomen. Ten slotte zijn data voor het slootwater ter vergelijking bekeken.

In de loop van het experiment is een aantal aanpassingen aan de opstelling gedaan. Hieronder geven we de reden hiervoor en de genomen acties.

1. In de effluentbak vond in de zomer algengroei plaats. Dit kan de fosfaatconcentratie beïnvloeden. Daarom zijn de drains in deze effluentbakken verbonden met een verbindingsbuis en de effluentbakken volgestort met grind. Vanaf dit moment zijn de effluentmonsters niet meer genomen uit de effluentbak, maar direct uit het uitstroombuisje van waaruit het gefilterde water uit het onderste grindbed afwatert op het slootwater. De uitstroomopening van dit buisje kon verlaagd worden door het buisje omlaag te draaien; hierdoor kon ook in tijden van geringe afvoer effluent bemonsterd worden;
2. Bij de ijzerbak bleek de influentdrainbuis in het bovenste grindbed te verstoppen, waarschijnlijk door verstopping met ijzer. Daarom is, zowel in de ijzer-oever als in de aluminium-oever, de influentdrain bovenop het grindbed aangelegd (dus niet er in).

Beide aanpassingen zijn in januari 2014 gedaan. Figuur 20 geeft de aangepaste opstelling weer.



Figuur 20: Puri-Oever opstelling met aanpassingen vanaf januari 2014. Links: Influentdrainbuis bovenop bovenste grindpakket; Rechts: Effluentbak vol met grind, water stroomt via afgesloten buis direct naar afwaterpijpje de sloot in.

Voor de watermonsters die geanalyseerd zijn, worden hieronder de volgende parameters besproken:

- Visuele inspectie van bakken en uitstromend water en doorlatendheid;
- Fosfaat: ortho-fosfaat en totaal-P;
- Overige chemische parameters: stikstof, zuurgraad (pH), chloride, sulfaat, waterstofcarbonaat, Mg, Ca, Ag en K.

4.2.2 RESULTATEN EN DISCUSSIE

Algemene waarnemingen

Het effluentwater van beide Puri-Oever pilots is kleurloos: blijkbaar spoelt er niet noemenswaardig veel aluminium(hydr)oxide of ijzeroxide uit. Wel was bij de ijzer-oever te zien dat wanneer er weinig afvoer was en het uitstroombuisje omlaag gezet werd, het effluent aan het begin een roodbruine suspensie bevatte. Na geringe tijd was deze suspensie niet meer te zien en was de vloeistof weer kleurloos.
Bij beide bakken vindt geen totale verstopping plaats, die voorkomt dat er water door stroomt. Wel viel er een verschil in doorlatendheid tussen de twee bakken op. Dit was het duidelijkst te zien doordat er een laagje water op de oever met aluminiumpolychloride stond. De ijzerzandbak vertoonde geen bovenstaand water.

In de loop van de seizoenen vertoonden de oevers een verschillende aanblik. In de loop van de tijd kwam er steeds meer begroeiing op de oevers. In het eerste jaar was deze nog bescheiden, maar in het tweede jaar was er een grote hoeveelheid begroeiing aanwezig op zowel de ijzer- als de aluminium oever (zie Figuur 22).



Figuur 21: Visuele aanblik van de Puri-Oevers (aluminium) met verloop van de tijd. Links: juni 2013; rechts: juli 2014. Let ook op de waterlaag boven de aluminium-oever en de afwezigheid daarvan op de ijzer-oever.

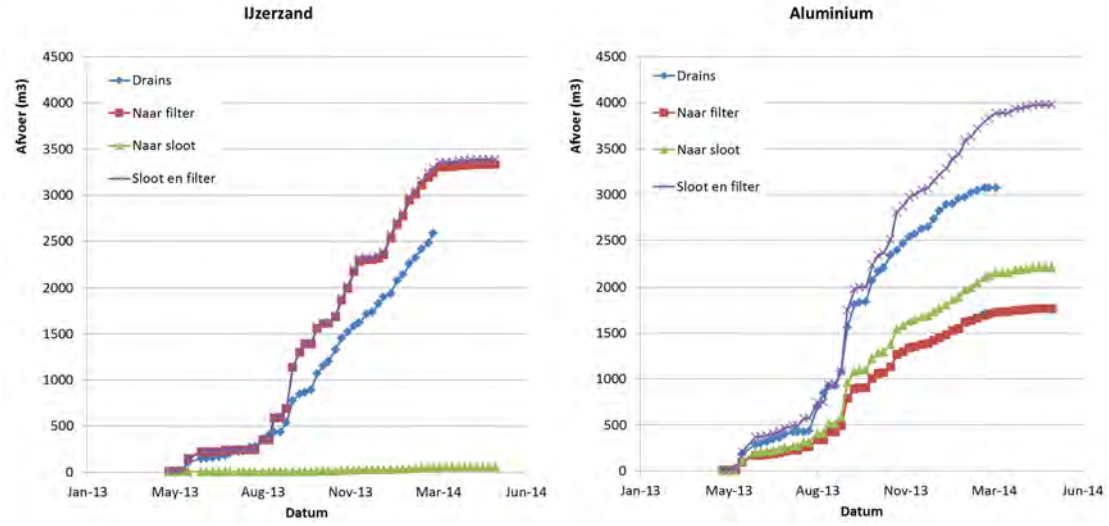


Figuur 22: Visuele aanblik van de Puri-Oevers (ijzer) met verloop van de tijd. Links: juni 2013; rechts: juli 2014.

Waterdoorlatendheid

De waterdoorlatendheid van de Puri-Oevers is twee op verschillende manieren onderzocht: 1. door meting van de waterdebieten in en uit de oever; en 2. door bepaling van de doorlatendheid op basis van de relatie tussen (gemeten) waterhoogte in het filter en snelheid van het uitstromend water.

Figuur 23 laat de aanvoer van drainagewater bij de ijzerzand- en aluminiumoever zien. De blauwe lijn geeft de aanvoer vanuit de drains weer. Deze verschilt iets voor de aluminium- en ijzer-oever, wat verklaard kan worden door natuurlijk aanwezige heterogeniteit. De orde grootte van de twee oevers zijn vergelijkbaar en liggen hoger dan de geschatte afvoer waarop de oevers gedimensioneerd waren (geschatte afvoer: circa 2640 m^3/jaar; gemeten afvoer: circa 3000 m^3/jaar). De overige lijnen geven de debieten weer die op basis van de pompuren berekend konden worden voor de waterstroom vanuit de influentbak naar het filterbed ('naar filter'), naar de sloot ('naar sloot') en de som van deze twee ('sloot en filter').



Figuur 23: Cumulatieve debieten bij de ijzerzand-oever (links) en aluminium-oever, gerekend vanaf de start van de Puri-Oever (12 maart 2013). Blauw: uit verzameldrains (gemeten in meetkastje); rood: van influentbak naar filterbed; groen: van influentbak naar sloot; paars: som van influentbak naar filter en sloot.

Het totaaldebiet vanuit influentvat naar filter en sloot (paars) is voor beide oevers iets hoger dan de debieten vanuit de drains (blauw). Het (geringe) verschil kan worden verklaard door water dat niet via de drains uit het perceel stroomt, zoals water dat vanuit oude drains of de oever in de sloot stroomt, of water dat van het perceel afstroomt. We verwachten dat deze fractie relatief groter zal zijn wanneer de oevers niet zouden zijn aangelegd omdat het ondoorlatende folie aan de onderkant van de oevers een barrière vormt voor water dat het perceel uittreedt.

Vanwege de verschillen in doorlatendheid is drainagewater met verschillende snelheden doorgelaten, zoals aangegeven in Tabel 6. Dit werd gerealiseerd door het water dat vanuit het buffercompartiment gepompt werd, te splitsen in een stroom naar de Puri-Oever en een stroom naar de sloot. Door middel van kraantjes kon de verhouding tussen deze twee stromen gevarieerd worden (Figuur 24). In Tabel 6 zijn de verhoudingen waarmee het water naar de Puri-Oever en naar de sloot is doorgelaten, weergegeven.



Figuur 24: Pompinrichting bij ijzerzand Puri-Oever.

Periode	Polyaluminiumchloride oever		IJzerzand oever	
	Instelling naar oever (liter/min)	Instelling naar sloot (liter/min)	Instelling naar oever (liter/min)	Instelling naar sloot (liter/min)
9 tot 23 april 2013	160	?	200	?
23 april tot 7 mei 2013	105	28	84	48
7 mei – 1 okt 2013	54	66	100	0
1 okt – 30 jan 2014	54	66	100	2
30 jan - 18 mrt 2014	38	64	76	3,2
18 mrt - 22 april 2014	40	64		
18 mrt - 16 april 2014			84	0,6
22 april - 6 mei 2014	38	60		
16 april - 6 mei 2014			86	0,1

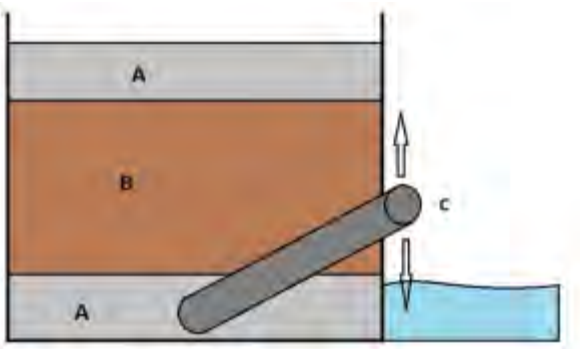
Tabel 6: Pompinstellingen bij Puri-Oever varianten.

Als laatste is de doorlatendheid van de oevers in het veld bepaald door de relatie tussen de waterhoogte in het filterbed en de uitstroomsnelheid te meten.

De hydraulische doorlatendheid k kon worden berekend met behulp van de wet van Darcy (formule 1). Q is hierin het gemeten afvoerdebiet, ΔH het hoogteverschil tussen de uitstroomopening en het waterniveau in het filterbed, en A en L zijn respectievelijk het oppervlak van de Puri-Oever (22 m²) de dikte van het filterbed (0.2 m). Door formule 1 om te schrijven tot formule 2 kan de hydraulische doorlatendheid k berekend worden.

$$Q = -k * A * \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

$$k = \frac{Q*L}{A} * \Delta H^{-1} \quad (2)$$



Figuur 25: Schematische weergave van bepaling van de doorlatendheid met behulp van verstelbare uitstroombuis C. Door het hoogteverschil van de uitstroomopening met het waterniveau in het filterbed B te vergelijken, kon met behulp van formule 2 de doorlatendheid k bepaald worden.

De uitkomsten van deze bepaling staan weergegeven in Tabel 7.

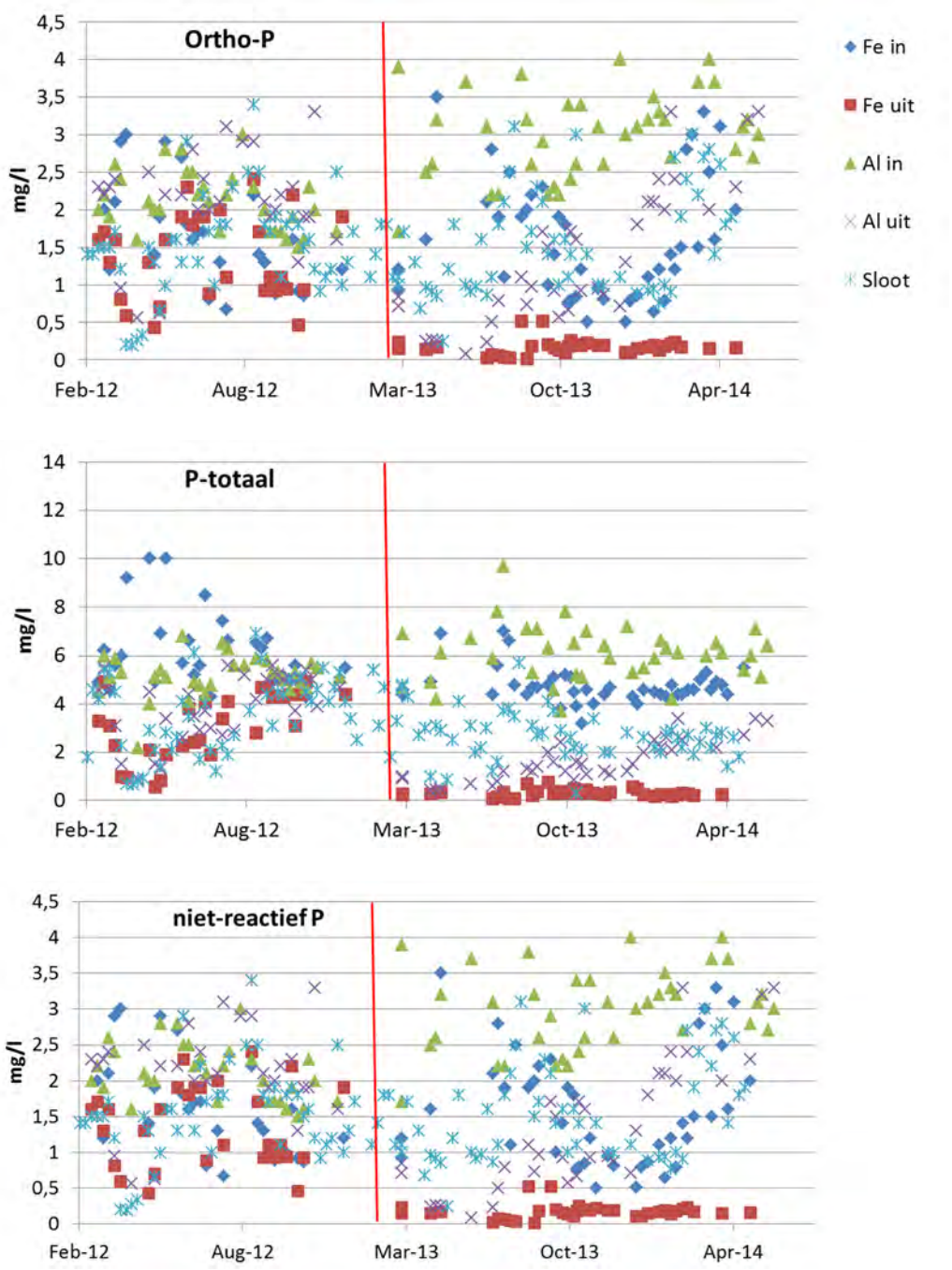
Oever	K (m/dag)	
	Gemiddeld	St. Dev
Fe	3,15	1,01
PAC/zand	0,69	0,18

Tabel 7: Gemiddelde doorlatendheid van ijzer- en aluminium-oever.

Deze metingen bevestigen de hogere doorlatendheid van de ijzer-oever ten opzicht van de aluminium-oever die eerder waargenomen was.

Fosfor

Figuur 26 en Figuur 27 geven de concentraties van totaal-P (ongefiltreerd), opgelost ortho-P en niet-reactief P (totaal-P minus opgelost ortho-P) over verschillende tijdsperiodes. Figuur 26 geeft de concentraties over langere tijd, van ca. 1 jaar voor ingebruikname van de Puri-Oever (februari 2012), tot het eind van de proef. De ingebruikname van de Puri-Oever is aangegeven met een rode lijn. Deze figuur geeft een beeld van de variabiliteit in de P-concentraties in aan- en afwezigheid van de Puri-Oever. Figuur 27 beperkt zich tot de periode waarin de Puri-Oever getest is (maart 2013-mei 2014). De concentraties zijn weergegeven voor in- en effluent van zowel de ijzer- als aluminium-oever. Daarnaast is ter vergelijking ook de concentratie in het slootwater gegeven.

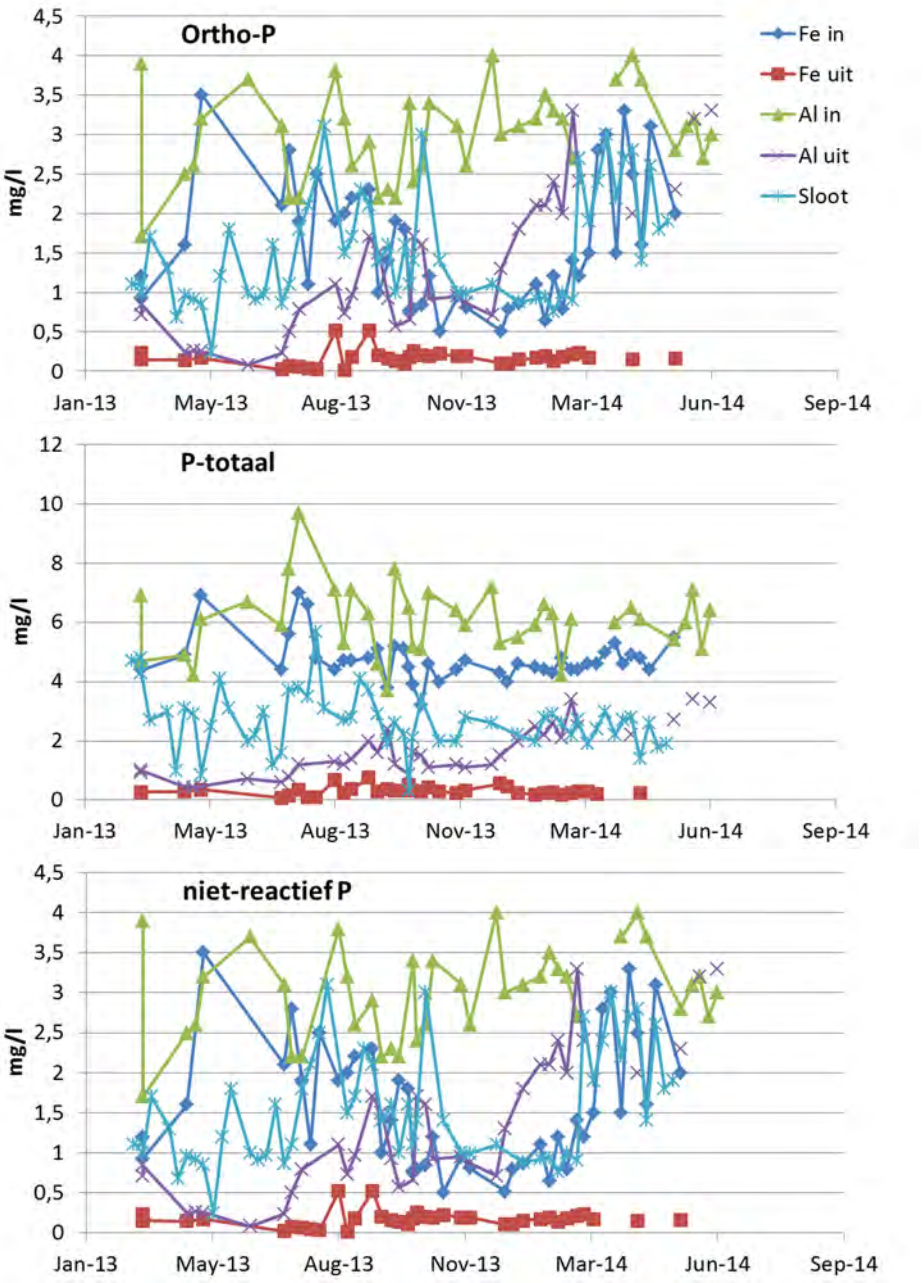


Figuur 26: P concentraties van februari 2012 tot mei 2014 (mg/L).

De concentratie totaal-P is ongeveer twee keer hoger dan de concentratie ortho-P. Vooral het ortho P in de influentbak is onderhevig aan schommelingen. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door binding aan deeltjes of opname door organismen (bijvoorbeeld algen of planten) in de verzamelbak. Deze schommelingen lijken samen te hangen met de seizoenen (in de zomer lagere concentraties dan in de winter), wat kan samenhangen met de groei van en opname door algen en planten in de zomer. Deze fluctuaties zijn minder zichtbaar in het drainwater.

Wel is in Figuur 26 het effect van de met ijzerzand gevulde Puri-Oever duidelijk zichtbaar aan de P concentraties in het effluent van deze Puri-Oever (rode vierkantjes): deze liggen na ingebruikname systematisch een stuk lager dan ervoor.

Figuur 27 geeft meer gedetailleerde informatie over het verloop van de P-concentratie tijdens de Puri-Oever testen.



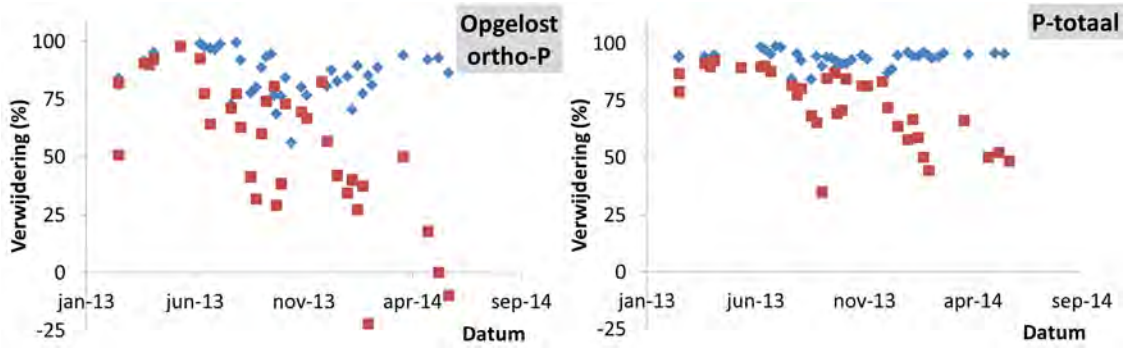
Figuur 27: P concentraties vanaf start Puri-Oever (mg/L).

Uit het verschil tussen concentratie in influent en effluent kan een verwijderingsrendement worden berekend (Figuur 27):

$$Verwijderingsrendement = \left(1 - \frac{Concentratie\ effluent}{Concentratie\ influent}\right) \times 100\% \qquad (3)$$

De verwijdering in de ijzer- en aluminium-oever vertoont een verschillend verloop. In de ijzer-oever is de verwijdering hoog en blijft ook gedurende de gehele periode hoog. Er is geen groot verschil in zomer en winter. De verwijdering van P-totaal is hoger dan voor ortho-P. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat het water eerst in het influentvat terechtkomt, waar ijzer samen kan klonteren tot deeltjes waaraan P kan binden. Dit P kan vervolgens in het filter verwijderd worden.

De aluminium-oever laat een ander patroon zien. De eerste maanden is het zuiveringsrendement ongeveer gelijk aan dat van de ijzer-oever. Daarna daalt het rendement echter snel, en is in mei 2014 gedaald tot vrijwel 0. De oorzaak voor deze daling is momenteel nog niet bekend. Uitspoeling van Al lijkt niet waarschijnlijk, omdat bij het effluent geen Al gemeten kon worden. Uit de literatuur is bekend dat de fosfaatadsorptie-capaciteit van PAC kan teruglopen met de tijd door veroudering (verdere kristallisatie) van de aluminiumhydroxiden (De Vicente, 2008). Deze afname kan 25 tot 75% bedragen.



Figuur 28: P Verwijderingsrendement voor opgelost ortho-P en totaal-P. ◆: IJzerzand; ■: PAC/zand.

	Ortho-P	Totaal-P
Verwijderingsredendement (%)	85 ± 10	93 ± 3
Effluent- concentratie (mg/L)	0,17 ± 0,10	0,30 ± 0,14

Tabel 8: Verwijderingsrendement voor ortho-P en totaal-P voor ijzerzand Puri-Oever.

Andere parameters (bijlage 2)

Zowel voor als na de start van de Puri-Oever vormt ammonium verreweg de belangrijkste stikstoffractie. Er is enige verwijdering van deze en andere vormen van stikstof door de Puri-Oevers, maar deze is niet groot en sterk aan fluctuaties onderhevig. Er is geen noemenswaardig effect van de Puri-Oevers op de zuurgraad, en chloride en sulfaat concentraties. De concentraties van waterstofcarbonaat, Mg, Ca, Ag en K worden alle verlaagd in beide Puri-Oevers. De verandering van de concentraties van deze stoffen heeft geen significant effect op de waterkwaliteit van de sloot. Er is geen noemenswaardige uitspoeling van aluminium en ijzer.

4.2.3 CONCLUSIES

- De twee Puri-Oever varianten verschillen in doorlatendheid: de variant met ijzerzand is goed doorlatend, de polyaluminiumchloride/zand is minder doorlatend;
- Beide Puri-Oever varianten verschillen in fosfaatverwijderend effect;
- De ijzer-oever heeft een hoog rendement, dat weinig varieert per seizoen en over langere tijd (ortho-P: 85 ± 10%; totaal-P: 93 ± 3%);
- Het rendement van de ijzer-oever is hoger voor totaal P dan voor ortho-P;
- Het verwijderingsrendement van de aluminium-oever begint ongeveer even hoog als de ijzer-oever, maar loopt snel terug tot bijna 0 na 14 maanden gebruik;
- De Puri-Oever heeft geen significant effect op de stikstofverwijdering (de stikstof komt in dit geval vooral voor als ammonium);
- Er lijken geen ijzer, aluminium of andere stoffen uit de Puri-Oever te spoelen en er zijn ook geen andere negatieve effecten op waterkwaliteitsparameters vastgesteld.

4.2.4 AANBEVELINGEN

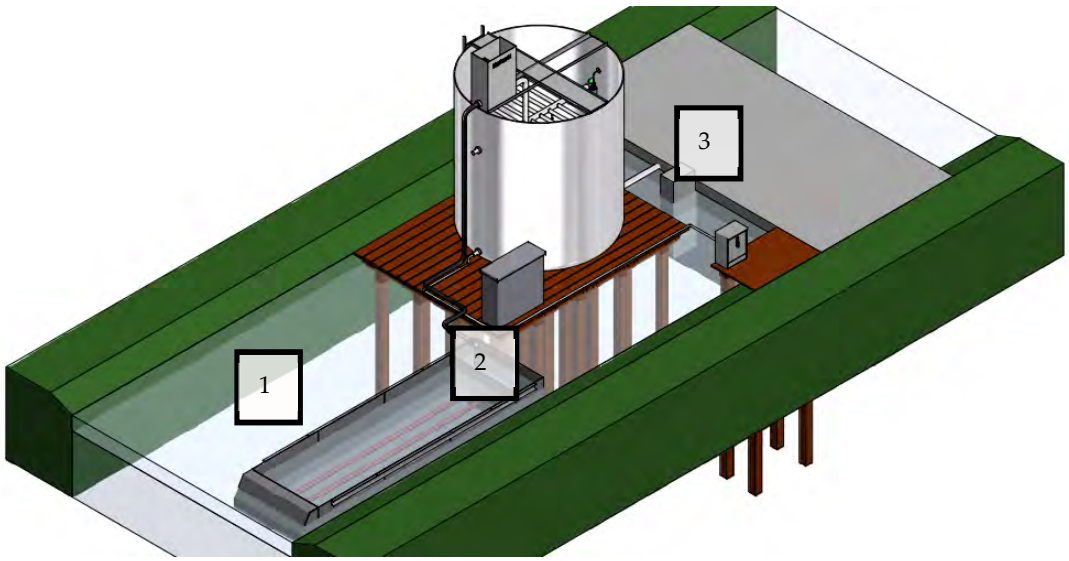
- Onderzoek naar de levensduur van de Puri-Oevers: treedt er verstopping op, en wanneer raakt het materiaal verzadigd?
- Verbeter het ontwerp zodat een optimale vorm ontstaat:
  - Optimale plaats: in de watergang of in de oever;
  - Met of zonder buffercompartiment;
  - Met of zonder pomp (en in het geval met pomp: aandrijving door windmolentje of zonnepaneel).

4.3 NUTRIËNTENSTUW

4.3.1 MONITORING

Om het effect van de verschillende maatregelen te bepalen is op meerdere locaties de waterkwaliteit gemeten Deze metingen zijn uitgevoerd door Aquon. Drie van deze locaties zijn van belang voor het bepalen van het effect van de nutriëntenstuw (Figuur 29):

1. **Perceelsloot**: watergang die al het water van de verschillende drains opvangt. Dit is de aanvoer naar de nutriëntenstuw;
2. **Pompput/Influent**: verzamelbak na het voorfilter, maar nog voor de reactor. Grove delen zijn door het voorfilter verwijderd, maar er is nog geen contact geweest met het ijzerzand;
3. **Effluent**: afvoer vanaf de reactor. Het te zuiveren water is door de reactor gestroomd en is gezuiverd.



Figuur 29: Nutriëntenstuw met de drie waterkwaliteitsmeetpunten.

Naast de waterkwaliteitsgegevens worden ook de waterstanden in de perceelsloot, de waterstand in de reactor en het aantal draaiminuten van de pomp bepaald. Deze gegevens zijn gebruikt voor het monitoren van het functioneren van de pomp.

4.3.2 RESULTATEN EN DISCUSSIE

Maatregelen en kwantitatieve resultaten

Tijdens de proefperiode zijn er verschillende malen visuele inspecties van de pilot-locatie geweest. Eén van de waarnemingen die hierbij is gedaan is het vrijkomen van een ijzersuspensie uit de reactor. Om welke hoeveelheid ijzer het hierbij gaat is onbekend.

De eerste waarnemingen hiervan zijn binnengekomen op 24 juni 2013. Op 1 juli 2013 was er geen ijzersuspensie meer aanwezig in het effluent, maar was het eerder vrijgekomen ijzer nog duidelijk zichtbaar bij het lozingspunt (Figuur 30).

Uit de monitoringsgegevens van de nutriëntenstuw blijkt dat het peil in de reactor van 21 tot 30 juni ongeveer 25 cm lager heeft gestaan dan gewenst. Dit is veroorzaakt door een lager peil in de perceelsloot, waardoor er geen water in de reactor gepompt kon worden. Het zuurstofgehalte in de reactor is hierdoor mogelijk sterk gedaald, waardoor een kleine hoeveelheid ijzer kon oplossen. Dit ijzer slaat vervolgens weer neer bij het verlaten van de reactor.



Figuur 30: Waarneming van een ijzersuspensie die is vrijgekomen uit de nutriëntenstuw.

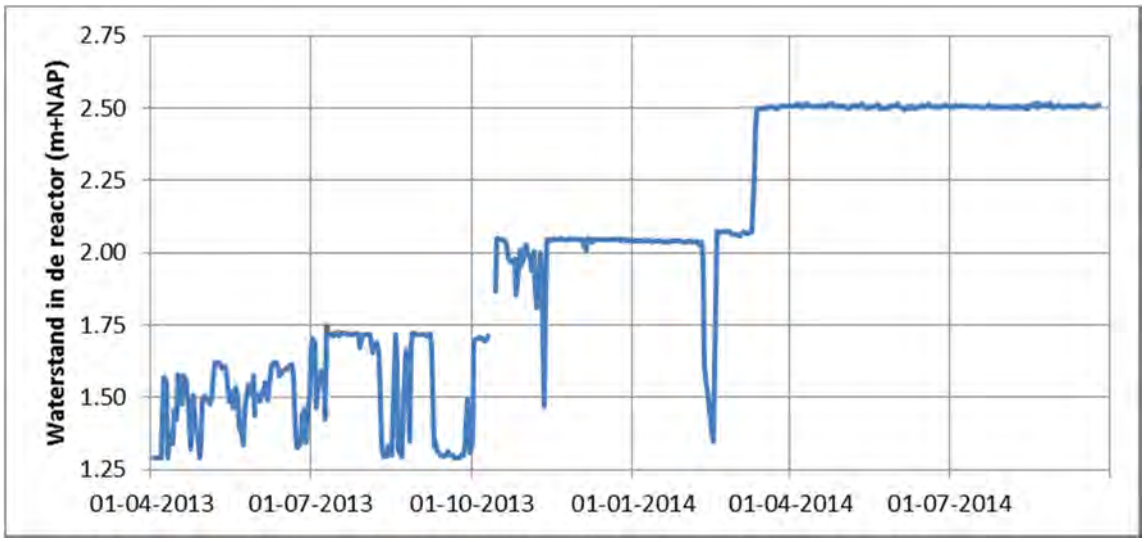
De oorzaak van het lage peil in de reactor is de hoogte van de instroomopening van het voorfilter, in combinatie met het verlagen van het peil in de perceelsloot. Door het verlagen van het peil kon het water maar zeer langzaam door het voorfilter stromen, waardoor de reactor niet gevuld kon worden (Figuur 31).



Figuur 31: Droogvallen van het voorfilter bij een lage waterstand in de perceelsloot

Tijdens de visuele inspectie van het voorfilter bleek er verder relatief veel “sediment” aanwezig te zijn in de omhulling van de drain.

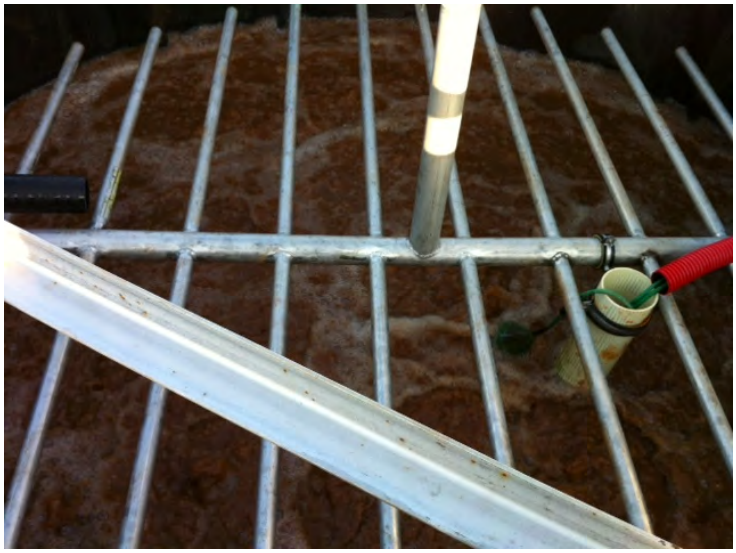
Om ook bij lagere waterstanden voldoende water door het voorfilter te laten stromen is besloten het voorfilter te verlagen. Omdat de waterdiepte beperkt was, kon dit pas uitgevoerd worden na het baggeren van de perceelsloot. Dit is uiteindelijk op 12 februari 2014 uitgevoerd. Hierdoor was het beter mogelijk om voldoende water te filteren om de reactor op peil te houden.



Figuur 32: Waterstandsmetingen in de reactor. In 2013 kon de waterstand in de reactor niet op peil gehouden worden door de beperkte aanvoer vanuit het voorfilter.

Een verdere inspectie van de reactor laat zien dat er bijna geen vervuiling in de reactor aanwezig is. Het voorfilter lijkt het water dus goed te filteren. Dit heeft echter niet voorkomen dat de stroomsnelheid door het ijzerzand in de tijd sterk is afgenomen. Dit kon afgeleid worden op basis van de geregistreerde zaksnelheid van het water in de reactor en de draaitijd van de reactorpomp. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door een verdichte laag aan de bovenkant van het ijzerzand. Deze laag is mogelijk ontstaan door de zetting van het ijzerzand, dichtslibben met aangevoerd sediment of het neerslaan van opgelost ijzer. Om deze dichte laag te breken is op 26 februari 2014 de reactor opgewoeld. Dit is gedaan door met een compressor lucht te blazen in de drains op de bodem van de reactor (Figuur 32).

Mogelijke negatieve gevolgen die konden ontstaan door het opwoelen zijn het vermengen van drainagezand met ijzerzand het ontstaan van preferente stroombanen door het ijzerzand.



Figuur 33: Foto van de binnenkant van de reactor tijdens het opwoelen.

Om het debiet verder te vergroten is het peil in de reactor gedurende de pilot verhoogde. Hierdoor is de waterstand in de reactor toegenomen van NAP 1,72 m tot NAP 2,50 m. Hierdoor is de waterdruk toegenomen van 43 cm naar 121 cm. Deze stapsgewijze toename van de waterdruk heeft echter niet geleid tot een structurele verhoging van het debiet door de reactor. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het versneld dichtslibben van het zandfilter bij een toename van het debiet (Figuur 34).



Figuur 34: Afgeleide cumulatieve debiet door de nutriëntenstuw. In maart 2014 is tijdelijk een verhoogd debiet zichtbaar door het opwoelen. Gedurende de resterende periode is het debiet vrijwel constant.

Kwalitatieve resultaten

Uit de meetgegevens blijkt dat de gemiddelde effectiviteit voor het verwijderen van fosfaat 85% van het totaal-fosfaat is en 88% van het ortho-fosfaat (Tabel 9). Opvallend hierbij is dat het voorfilter een negatieve bijdrage levert aan de verwijdering van fosfaat. Dit houdt in dat er extra fosfaat vrijkomt in of door het voorfilter. Een mogelijke verklaring van dit effect is het aanzuigen van modder door het drijfschot van het voorfilter. Dit drijfschot voorkomt dat drijvend materiaal het filter in kan stromen. Maar doordat de waterdiepte beperkt is, wordt mogelijk het water over de bodem aangezogen.

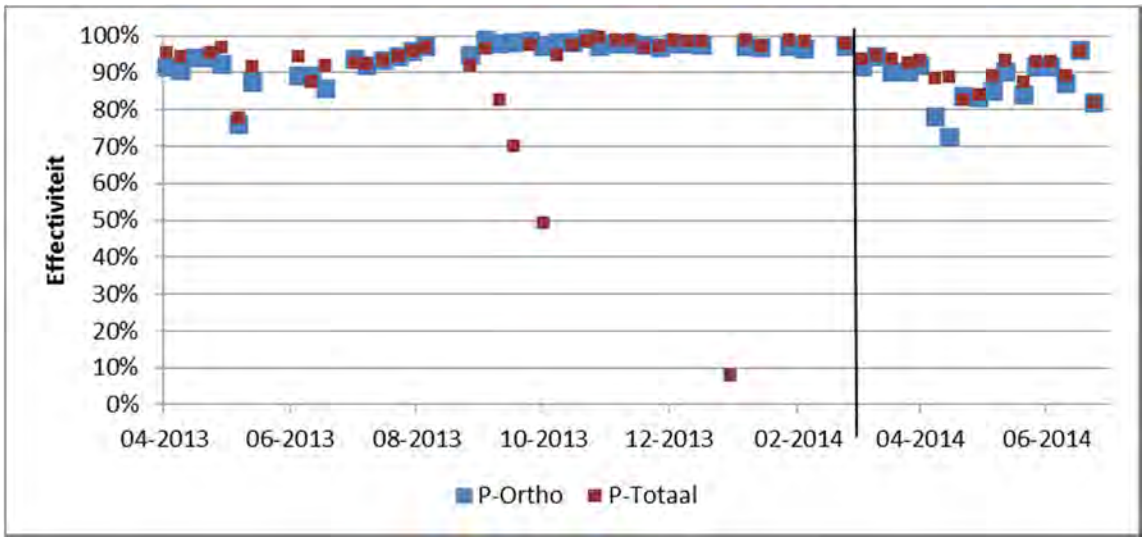
Dit is in overeenstemming met de sterk afgenomen doorlatendheid van het voorfilter en de relatief grote zuurstofafname tussen meetpunt 1 (voorfilter) en meetpunt 2 (influent). Wanneer alleen gekeken wordt naar de reactor stijgt de effectiviteit naar 86% en 92% voor respectievelijk totaal-fosfaat en ortho-P.

	Metingen (mg/l)			Effectiviteit gem.			Effectiviteit med.	Afwijking
	Sloot	Influent	Effluent	Voorfilter	Reactor	Totaal	Totaal	Gemiddeld
Totaal-P	2.14	2.35	0.33	-10%	86%	85%	94%	22%
Ortho-P	1.24	1.77	0.15	-42%	92%	88%	94%	15%
Niet reactief-P	0.90	0.58	0.18	36%	69%	80%		

Tabel 9 Gemiddelde effectiviteit van de nutriëntenstuw bij het verwijderen van fosfaat.

De berekende effectiviteit geld voor de volledige pilotperiode. Tijdens de beginperiode van de pilot is het functioneren van de nutriëntenstuw echter geoptimaliseerd en aan het eind van de pilot is een poging gedaan om het debiet door de nutriëntenstuw te maximaliseren. Daardoor zijn niet alle metingen representatief voor het functioneren van de nutriëntenstuw. Hierdoor is de mediaan een betere weergave van het zuiveringsrendement. Het mediane zuiveringsrendement bedraagt 94% voor zowel ortho-P als totaal-P.

Wanneer de effectiviteit in de tijd wordt uitgezet, blijkt de effectiviteit voor ortho-P vrij constant (Figuur 35). De totaal-fosfaat effectiviteit heeft een afname in de effectiviteit tot 60% op 16 april 2013. De oorzaak hiervan is niet bekend. Omdat dit effect ook niet heeft plaatsgevonden bij andere parameters is het mogelijk dat hier een analysefout is opgetreden. De effectiviteit lijkt hierbij in de tijd nauwelijks af te nemen.



Figuur 35: Berekende effectiviteit van de reactor voor fosfaat inclusief voorfilter. Na het opwoelen van de reactor (markering) neemt de effectiviteit af.

Uit de monitoringsgegevens van de nutriëntenstuw blijkt dat er ongeveer 2.600 m^3 water door de nutriëntenstuw is behandeld in 1,5 jaar. Omdat er gemiddeld 2,02 mg/l P is verwijderd door de reactor, betekend dit dat er ongeveer 5,25 kg fosfaat is vastgelegd.

De stikstofverwijdering is ten opzichte van de fosfaat verwijdering veel beperkter. De gemiddelde effectiviteit is 13% (Tabel 10). Dit is een beperkte verwijdering, maar toch een aanzienlijke bijdrage voor de waterkwaliteit.

	Metingen (mg/l)			Effectiviteit gem.			Effectiviteit med.	Afwijking
	Sloot	Influent	Effluent	Voorfilter	Reactor	Totaal	Totaal	Gemiddeld
N-Totaal	5.05	4.88	4.36	3%	11%	14%	13%	17%

Tabel 10: Effectiviteit van de nutriëntenstuw bij het verwijderen van stikstof.

Bij het gemiddelde zuurstofgehalte (Tabel 10) is het opvallend dat het zuurstofverzadiging in de perceelsloot regelmatig hoger is dan 100%. Dit zou kunnen komen door de aanwezige waterplanten. Het zuurstofgehalte na het voorfilter (meetpunt 2, influent) is fors gedaald. Dit kan ook wijzen op de werveling van zuurstof verbruikend slib. Het water dat de reactor verlaat heeft weer een gezonde hoeveelheid zuurstof, mede door de “douchekop” in de reactor.

	Metingen (mg/l)			Effectiviteit gem.			Effectiviteit med.	Afwijking
	Sloot	Influent	Effluent	Voorfilter	Reactor	Totaal	Totaal	Gemiddeld
O2	25.96	13.28	15.98	49%	-20%	38%	27%	72%

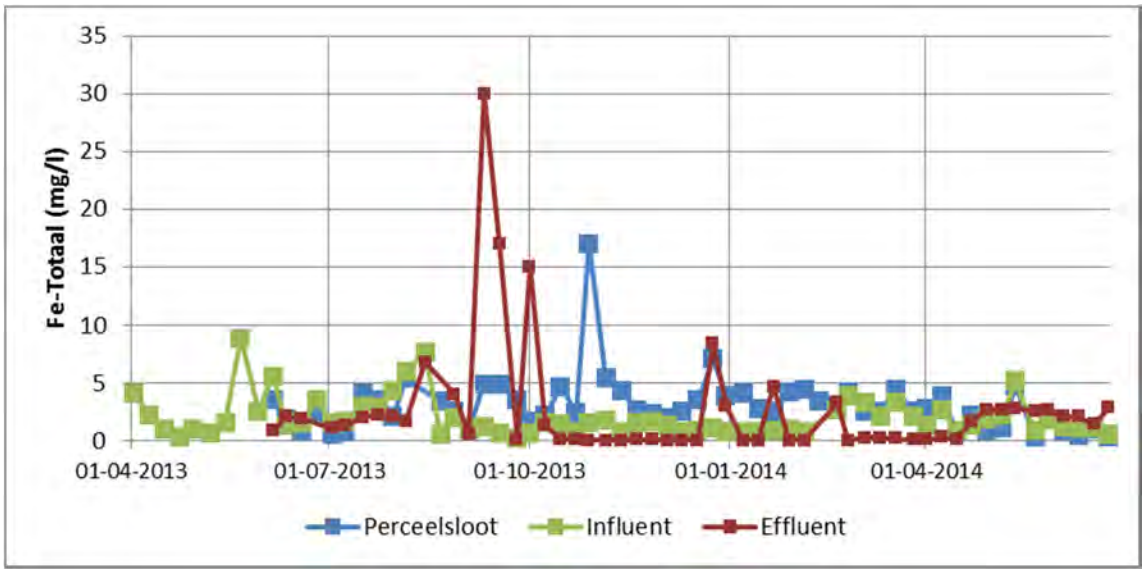
Tabel 11: Zuurstofgehalte in de nutriëntenstuw.

Gedurende het proces daalt de pH (Tabel 12). Deze afname is het grootst tussen de perceelsloot en het influent. Mogelijk wordt dit ook veroorzaakt door de opwerveling van slib in het voorfilter of afbraak van organisch materiaal.

	Metingen (mg/l)			Effectiviteit gem.			Effectiviteit med.	Afwijking
	Sloot	Influent	Effluent	Voorfilter	Reactor	Totaal	Totaal	Gemiddeld
pH	7.79	7.57	7.43	3%	2%	5%	4%	4%

Tabel 12: pH in de nutriëntenstuw.

Eén van de mogelijke effecten van de nutriëntenstuw is een verhoging van het ijzergehalte in het effluent. Uitspoeling van ijzer blijkt ook uit de waarnemingen. Er wordt slechts enkele keren een hoeveelheid Fe2+ gemeten. IJzer totaal wordt wel gemeten (Figuur 13). Uit de metingen blijkt dat de concentratie ijzer in het effluent lager is dan in de watergang.



Figuur 36: Afgeleide cumulatieve debiet door de nutriëntenstuw.

Het droge stof gehalte van het water laat het effect van het voorfilter zien. Het water in dat de reactor instroomt bevat gemiddeld 43% minder droge stof dan de perceelsloot. Hiermee kan echter niet bevestigd worden dat het drijfschot van het voorfilter sediment opwervelt. Wel wordt zichtbaar dat door het voorfilter een aanzienlijke hoeveelheid droogrest wordt verwijderd, maar dat er nauwelijks stikstof en fosfor wordt verwijderd. Gecombineerd met de afname van het zuurstofgehalte wijst dit op de afbraak van organisch materiaal in het voorfilter. De totale effectiviteit voor het verwijderen van droge stof is hoger dan 65%, omdat de detectiegrens van 4 mg/l regelmatig wordt bereikt.

	Metingen (mg/l)			Effectiviteit gem.			Effectiviteit med.	Afwijking
	Sloot	Influent	Effluent	Voorfilter	Reactor	Totaal	Totaal	Gemiddeld
Droogrest	26.0	14.7	9.0	43%	39%	65%	76%	38%

Tabel 13: Effectiviteit van de nutriëntenstuw bij het verwijderen van droge stof.

4.3.3 CONCLUSIES

- De nutriëntenstuw heeft een effectiviteit van 88% (+/- 15%) voor ortho-fosfaat, 85% (+/- 22%) voor totaal-fosfaat en 13% (+/-17%) voor stikstof;

- Het debiet door de nutriëntenstuw neemt de eerste maanden na de aanleg en na het opwoelen sterk af. In de eerste maanden van de pilot werd dit veroorzaakt door het voorfilter. Na het opwoelen kan de afname worden veroorzaakt door zetting en dichtslibben van de reactor;
- De effectiviteit van de nutriëntenstuw neemt na het opwoelen af. Dit wordt waarschijnlijk niet veroorzaakt door het verzadigen van het ijzerzand, maar door het ontstaan van preferente stroombanen;
- Het voorfilter zorgt voor extra fosfor en stikstof in het water. Waarschijnlijk is er slib en organisch materiaal in het voorfilter terecht gekomen. Dit materiaal breekt langzaam af, waardoor er nutriënten vrijkomen. Dit zorgt voor een beperkte afname van de totale effectiviteit van de nutriëntenstuw;
- De nutriëntenstuw heeft geen negatieve invloed op de overige waterkwaliteitsprameters.

4.3.4 AANBEVELINGEN

- Ontwikkelen van een “simpelere” nutriëntenstuw, waarbij er voornamelijk aandacht is voor het optimaliseren van het debiet;
- Mogelijkheid onderzoeken om bestaande kleinschalige pompen te gebruiken;
- Mogelijkheid onderzoeken om een windmolentje of zonnepaneel toe te passen;
- De verdichting van het ijzerzand analyseren bij de huidige nutriëntenstuw.

5 Synthese

5.1 AANPAK

Binnen het hier beschreven veldonderzoek, maar ook daarbuiten, is recent veel informatie verkregen over maatregelen om fosfaat te verwijderen. Om goed te kunnen beoordelen welke maatregelen wanneer toepasbaar zijn, is een synthese uitgevoerd die in dit hoofdstuk wordt beschreven.

Bij deze synthese zijn de volgende onderdelen betrokken:

- Naast de drie in Voorhout onderzochte maatregelen, wordt een aantal gerelateerde onderzoeken meegenomen in de synthese:
  - Zuivering bij gemalen (InnovatieProject KRW 'Zuiver gemalen', 2010);
  - Helofytenfilters (project Hollands Bloementuin, Grontmij).
- Daarnaast wordt ook een vergelijking gemaakt met een aantal andere maatregelen zoals die in het Uitvoeringsprogramma KRW bloembollen 2013-2021 van he Landelijk Milieuuoverleg Blombollen (LMB) zijn beschreven (zuiveren bij gemalen, helofyten en bronmaatregelen).

Door dit bredere pakket aan potentiële maatregelen te vergelijken, ontstaat er een volledigere beeld van kansrijke maatregelen die voor het hoogheemraadschap van Rijnland in de Bollenstreek toepasbaar zijn om effecten van nutriënten uit bollenpercelen op de waterkwaliteit effectief te verminderen.

De vergelijking is uitgevoerd op basis van de berekende effectiviteit en kosten. Wanneer deze gegevens niet bekend zij is er een inschatting gemaakt op basis van expert judgement. Daarnaast zijn onderzoekers van de relevante projecten geraadpleegd (Carlo Rutjes - Grontmij [Helofyten] , Piet Groenendijk - Alterra [Zuiveren bij gemalen] en Anne Marie van Dam – Bdemdienst Van Dam [Bronmaatregelen]). De volgende aanpak is toegepast:

- **Criteria voor de kansrijkheid (**Tabel 14**)**
  Gezamenlijk is door Rijnland en de partners in het consortium een lijst met criteria opgesteld. Met behulp van deze criteria zijn de verschillende maatregelen objectief vergeleken.
- **Beoordeling van de maatregelen**
  Per methode wordt beschreven en onderbouwd wat het resultaat is voor de vastgestelde criteria.
- **Vergelijkende tabel**
  Op basis van de criteria en beoordelingen per methode is een tabel opgesteld, waarin eenvoudig kan worden afgelezen wat sterke en minder sterke punten zijn van de verschillende maatregelen en welke maatregel het meest geschikt is onder gegeven omstandigheden.
- **Aanbevelingen**
  Op basis van de beoordeling en vergelijking van de methoden worden aanbevelingen gedaan t.a.v. het vergroten van de kansrijkheid van de maatregelen en vervolgstappen richting implementatie van de methodes. Hierbij is onder meer worden gekeken naar het verbeteren van de individuele methodes of het combineren van de verschillende sterke eigenschappen. Er worden geen aanbevelingen gedaan voor het opschalen voor heel Rijnland of het toepassen van de methodes buiten Rijnland.

Uitgangspunten bij de beoordeling zijn:

- Een standaard debiet voor de zomer en de winter;
- Een verwijdering in kg P per jaar (niet % of tot P-norm);
- Zuivering op perceelniveau. Uitgangspunt is de totale zuivering van een perceel van 5 ha met een doorkijkje naar 25 ha. Geen complete polder;
- De voorgestelde maatregel wordt toegepast op het hele perceel van 5 ha;
- Toepassing in de Bollenstreek (bodem, landgebruik, concentraties, grondprijs, watersysteem).

Criteriatabel		
Effecten		
	Concentratie effluent	mg/l oP en tP
	Effectiviteit gemiddeld	% oP en tP
	Effectiviteit winter (tijdens hoge afvoer)	% oP en tP
	Effectiviteit zomer (tijdens lage afvoer)	% oP en tP
	Overige verwijdering/effect (NO3, NH4, etc.)	Kwalitatief
	Gemiddelde concentratie P na de maatregel (ter vergelijking met normen)	mg/l oP en tP
Kosten		
	Investeringskosten	euro/kg P
	Operationele kosten	euro/kg P
	Ruimtebeslag en locatie	m2/kg P
	Benodigd ijzerzand	kg/jaar
	Afschrijvingsperiode	Jaren
	Totaalkosten	euro/kg P
Toepasbaarheid		
	Robuustheid (bestendigheid tegen piekafvoeren, vorst, …)	Kwalitatief
	Randvoorwaarden (elektriciteit, drains, ..)	Kwalitatief
	Praktijkrijpheid	Kwalitatief
	Overig belangrijke eigenschappen	Kwalitatief

Tabel 14: De gezamenlijk opgestelde beoordelingscriteria voor de synthese.

5.2 TOTAAL OVERZICHT

In onderstaande tabel zijn de uitkomsten van de beoordeling per methode samengevat. In de daaropvolgende hoofdstukken is de beoordeling per methode in meer detail uitgewerkt.

		Nutriëntenstuw Voorhout	Drains Voorhout	Drains Egmond	Puri-Oever IJzerzand Voorhout	Helofytenfilters	Zuivering bij gemalen
Effect	Concentratie influent (mg/l)	oP 1,2 tP 2,2	oP 2,6 tP 8,0	oP 2,5 tP 3,8	oP 1,6 tP 4,8		
	Concentratie effluent (mg/l)	oP 0,15 tP 0,33	oP 0,5 tP 3,2	oP 0,1 tP 0,3	oP 0,17 tP 0,30	Varieert	<0,2 mg
	Effectiviteit (%)*	oP 85% tP 81%	oP 81% tP 60%	oP 96% tP 92	oP 85% tP 93%	0-30% (sterk wisselend)	50-90%
Kosten	Investering (euro/5ha)	10.000 - 35.000 (15 jaar)	12.000 - 55.000 (15 jaar)		25.000 – 35.000 (15 jaar)	100.000 (50 jaar)	Variërend
	Operationeel (euro/jaar/5ha)	700 - 3.700 (onderhoud + monitoring)	- (onderhoud)		500 - 1000 (onderhoud)	2.500 - 5.000 (maaien)	Variërend
	Totaal (euro/kg P)	oP 60 – 260 tP 35 - 160	tP 6 - 19	tP 7 - 20	oP 28 - 42 tP 14 - 21	Hoog	6 - 40
Toepasbaarheid		+ Inpasbaar + Beheerbaar - Piekafvoer - Onderhoud	+ Onderhoud + Ruimte - Drainage nodig		+/- In watergang + Onderhoudsarm + Laag technologisch - Mogelijke barrière piekafvoeren	+ Combinatie ecologie - Ruimtegebruik - Verwijderings-rendement	+ Goedkoop + Bij gemalen - Taak waterbeheerder - Praktijkervaring

* Bepaald op basis van tijdgemiddelde en niet op basis.
** Op basis van een influentconcentratie van 2,5 mg/l oP en 5,0 mg/l tP.

Tabel 15: Verkorte overzichtstabel met de beoordeling van de verschillende maatregelen.

5.3 FOSFAAT-BINDENDE DRAINS

		Voorhout	Egmond
Effectiviteit gemiddeld	oP	81% 2.1 mg/L 58 kg/j (5 ha)	96% 2.9 mg/L 55 kg/j (5 ha)
	tP	60% 4.9 mg/L 135 kg/j (5 ha)	92% 3.2 mg/L 60 kg/j (5 ha)
	uP	50% 2,8 mg/L 77 kg/j (5 ha)	80% 0,62 mg/L 11 kg/j (5 ha)
Effectiviteit winter	oP	78%	-
	tP	56%	-
	uP	45%	-
Effectiviteit zomer	oP	86%	-
	tP	70%	-
	uP	73%	-
Overige verwijdering/effect		Er wordt geen N verwijderd Uitspoeling Fe uit fosfaat-bindende drain is hoger dan uit referentiedrains en lijkt toe te nemen Verhoogde Mn uitspoeling uit fosfaat-bindende drain	Er wordt geen N verwijderd Na twee jaar verhoogde uitspoeling Fe uit fosfaat-bindende drain t.o.v. referentiedrains verhoogde Mn uitspoeling uit fosfaat-bindende drain
Gemiddelde concentratie P in effluent	oP	0,48 mg/l	0.11 mg/l
	tP	3,2 mg/l	0.27 mg/l
	uP	2,7 mg/L	0.16 mg/L

Tabel 16: Detailtabel effecten.

Investeringskosten	12.000 - 55.000
Operationele kosten	0 euro/kg
Ruimtebeslag	geen
Benodigd ijzerzand (5 ha)	324 m^3 => 416.395 kg (per 15 jaar)
Afschrijvingsperiode	15 jaar
Totaalkosten	De extra kosten ten opzichte van reguliere drainage bedragen 6-20 euro/kg oP en 3-18 euro/kg tP. De totale kosten (inclusief drainagemateriaal) zijn 15-29 euro/kg oP en 6-27 euro/kg tP.

Tabel 17: Detailtabel kosten bij een perceel van 5 ha.

Robuustheid	Functioneert gedurende het hele jaar. Bestendigheid is hoog, in de winter is rendement wat lager. Droogte zal rond drains minder relevant zijn, vorst en onderhoud beide n.v.t., maar doorspuiten zoals bij reguliere drains is een optie. De uitspoeling van ijzer als gevolg van reductie van ijzeroxide vermindert de hoeveelheid ijzeroxide rond de drains en daarmee ook de bindingscapaciteit van fosfaat. Voor de drains bij Egmond is de vermindering van ijzeroxide op basis van Fe uitspoeling geschat op ongeveer 1% per jaar.
Randvoorwaarden	Perceel moet geschikt zijn voor buisdrainage. Verder geen randvoorwaarden, dus breed toepasbaar. Eventueel aanwezige oude drains moeten afgestopt worden zodat zoveel mogelijk water via de fosfaat-bindende drains afgevoerd wordt.
Praktijkrijpheid	Het zuiveringsrendement is voldoende hoog om in de praktijk toegepast te worden. De aanleg is arbeidsintensief vergeleken met het aanleggen van conventionele drains. Bij toepassing op grotere schaal zou een goedkopere manier van aanleggen -zonder sleuf- onderzocht kunnen worden.
Overig	De maatregel is niet zichtbaar, neemt geen ruimte in, in sloot of op land en heeft daardoor geen impact op de bedrijfsvoering. Bij slecht functioneren echter nauwelijks bereikbaar; het vervangen van materiaal is relatief kostbaar. Een aandachtspunt is de verhoogde uitspoeling van ijzer en mangaan uit de fosfaat-bindende drains. Kwel van ijzerhoudend water is ook een natuurlijk fenomeen en heeft geen negatieve effecten op het aquatisch milieu. Het grootste deel van het ijzer zal neerslaan op de slootbodem als ijzeroxide en kan fosfaat uit het slootwater binden. Hoewel er geen oppervlaktewaternormen voor bestaan moet nagegaan worden of de uitspoeling van Mn geen potentieel nadelige effecten op het aquatisch milieu heeft. Omdat het een eenvoudige maatregel betreft, kan het beheer door de ondernemer/ bollenteler uitgevoerd worden.

Tabel 18: Detailtabel toepasbaarheid.

5.3.1 EFFECTEN

De effectiviteit van de maatregel is berekend uit de gemiddelde concentraties van referentie en fosfaat-bindende drains, volgens: verwijderingspercentage =100 * (Pav-ref - Pav-omhuld) / Pav-ref.

Voor de locatie Voorhout is gerekend met een gemeten cumulatieve afvoer van 1800 m3 uit de drie drains over een periode van 600 dagen. Dat komt overeen met een afvoer van 0.61 m3/m2/j. Voor de locatie Egmond is gerekend met een afvoer van 0.42 m3/m2/j op basis van het geschatte neerslagoverschot en kwel (Groenenberg et al., 2012).

De berekende hoeveelheid afgevangen P voor een oppervlakte van 5 ha is berekend als:

*P-afgevangen (kg P/5ha/j) = oppervlakte *afvoer * (Pav-ref - Pav-omhuld).*

Een deel van het perceel zal echter direct afwateren op de sloot omdat dit de kortste route is. Het oppervlak dat direct afwatert, is het oppervlak van een gelijkbenige driehoek met als basis de afstand tussen de drains. Bij een drainafstand van 10 m is het oppervlak 50 m2 voor een perceel van 100 m breed. Bij een perceel van 100 m lengte is dit 5% van het totale perceel. Omdat er ook kortere percelen kunnen voorkomen is het oppervlak van het perceel dat niet afwatert via de drains op 10% gezet. Voor het berekenen van de afgevangen hoeveelheid P is daarom gerekend met 90% van het oppervlak.

Er is een duidelijk verschil in het rendement van de maatregel tussen de veldexperimenten in Voorhout en Egmond. Het hogere rendement in Egmond voor de verwijdering van oP is waarschijnlijk het gevolg van de betere kwaliteit ijzerzand die daar gebruikt is (zie 4.1). In het tweede meetjaar voor oP lag het rendement echter hoger (92%) dan over de gehele periode (81%), en daarmee dichter bij het rendement voor Egmond (96%).

Overige verwijdering/effect
Zowel de fosfaat-bindende drains in Voorhout als in Egmond hebben een verhoogde uitspoeling van mangaan als gevolg van de reductie van mangaanoxide.

5.3.2 KOSTEN

Bij het berekenen van de kosten van de fosfaatbindende drain zijn de kosten berekend voor de meerkosten van het aanleggen van fosfaatbindende drains ten opzichte van het aanleggen van conventionele buisdrainage. Daarnaast zijn ook de totale kosten van het aanleggen van de fosfaatbindende drains berekend.

De informatie van de aanlegkosten is gebaseerd op schattingen door een draineur (Heerschap). Deze zijn geschat voor de methode zoals deze toegepast is in Voorhout. Hierbij is eerst een brede gleuf gegraven, waaruit de uiteindelijke gleuf van 0.9 m diep is gegraven waarin de drainbuis is gelegd met daar omheen het ijzerzand. Daarnaast zijn de kosten geschat voor het graven van een enkele gleuf van 0,4 m breed en 0,9 m diep zoals uitgevoerd bij de aanleg van de fosfaatbindende drain in Egmond. De laatste methode is goedkoper. Een mogelijk probleem hierbij is de stabiliteit van een dergelijke diepe smalle gleuf zoals ondervonden werd bij de aanleg van de drains in Voorhout.

Uitgangspunt bij de berekeningen is een afstand van 10 m tussen de drains.
Overzicht kosten:

- Graafwerkzaamheden sleuf (0,4 m breed, 0,9 m diep) en toedienen ijzerzand 10 cm onder, naast en boven de drains: 0,80 €/m drain;
- Graafwerkzaamheden: graven brede sleuf en vanuit hier graven sleuf van 0.4 m tot 0.9 m en toedienen ijzerzand 10 cm onder, naast en boven de drains: 3,00 €/m drain;
- Benodigde hoeveelheid ijzerzand: 65 m3/ha = 65*1600 kg/m^{-3} (dichtheid nat zand) = 104 ton.$ha^{-1;}$
- Transportkosten: € 70 voor 23 ton, bij een transportafstand van 60 km: (70 x 104/23) = € 317 ha^{-1} ;
- Materiaalkosten drainagematerialen 1500 €/ha.

Berekening kosten per afgevangen kilo P:

$$\textit{Kosten (Euro/kg P) = kosten per jaar / afgevangen P per jaar} \qquad (4)$$

Ten opzichte van conventionele buisdrainage is er geen extra operationele kosten. De operationele kosten voor conventionele drainage bestaan uit het doorspuiten van de drains om verstopping te voorkomen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de kosten per kg verwijderd P, zowel op basis van de geschatte meerkosten ten opzichte van normale buisdrainage (meerkosten) als voor de totale kosten. De minimale kosten zijn die voor het graven van een enkele sleuf bij aanleg, de maximale kosten zijn voor de methode waarbij de sleuf in twee stappen gegraven wordt.

		Meerkosten		Totale kosten	
		Voorhout	Egmond	Voorhout	Egmond
oP	min	6	7	15	16
	max	19	20	28	29
tP	min	3	6	6	15
	max	8	18	12	27

Tabel 19: Overzicht kosten per kg verwijderd P (euro/kg P).

5.3.3 TOEPASBAARHEID

Bij de fosfaat-bindende drain in Egmond is de concentratie ijzer in het uitstromende water van de fosfaat-bindende drain sinds twee jaar na de aanleg sterk verhoogd ten opzichte van de referentiedrains. Dit is het gevolg van het reductief oplossen van de ijzerzandomhulling. De afname van de hoeveelheid ijzer in de omhulling voor een periode van 15 jaar wordt geschat op 15%. Ook bij de drains in Voorhout lijkt de concentratie ijzer uit de ijzerzand fosfaat-bindende drains te stijgen. Een ander aandachtspunt is de uitspoeling van Mn. Hoewel hier geen oppervlaktewater normen voor bestaan moet nagegaan worden of de uitspoeling van Mn geen potentieel nadelige effecten op het aquatisch milieu heeft.

5.4 PURI-OEVER

De beoordeling van de Puri-Oever is alleen uitgevoerd voor de variant met ijzerzand. De variant met PAC/zand is in deze vergelijking buiten beschouwing gelaten omdat deze nog een aantal nadelen vertoont (slechte doorlatendheid, terugloop in zuiveringsefficiëntie).

Effectiviteit gemiddeld	oP	85 ± 10% 205 g P/d (5 ha, 35000 m^3/jaar) 75 kg P/j (5 ha, 35000 m^3/jaar)
	tP	93 ± 3% 450 g P/d (5 ha, 35000 m^3/jaar) 164 kg P/j (5 ha, 35000 m^3/jaar)
Overige verwijdering/effect		N verwijdering varieert sterk. Wel deeltjesverwijdering. Dit is niet relevant bij directe passage van drain- of grondwater, wel bij passage na verblijf in een buffercompartiment. Dan leidt dit tot extra verwijdering van N en totaal P.
Gemiddelde concentratie P in effluent	oP	0,17 ± 0,10 mg/l
	tP	0,30 ± 0,14 mg/l

Tabel 20: Detailtabel effecten Puri-Oever.

Investeringskosten	25.000 -35.000 euro
Operationele kosten	500 euro/jaar (onderhoud) 1600 euro/5 jaar (vervangen ijzerzand)
Ruimtebeslag	250 m^2 (bij uitvoering als oever) 0 m^2 (bij uitvoering als reactieve barrière)
Benodigd ijzerzand (5 ha)	125 m^3/5 jaar
Afschrijvingsperiode	15 jaar, vervanging ijzerzand elke 5 jaar
Totaalkosten	14 euro/ kg P

Tabel 21: Detailtabel kosten Puri-Oever bij een perceel van 5 ha.

Robuustheid	Robuust. Zuivering functioneert zowel in zomer en winter. Geen verstopping. Zonder verstopping geen onderhoud nodig, alleen in het geval van uitvoering als filterbak is maaien nodig. Het filter heeft wel een kleinere doorlatendheid dan drains. Het filter kan het beste zo worden aangelegd, dat dit geen obstructie vormt voor de drainafvoer. Een overloopconstructie voor het geval van piekafvoeren is noodzakelijk.
Randvoorwaarden	Ruimte in de sloot of in de oever voor het aanbrengen van de Puri-Oever moet beschikbaar zijn. Water moet door het filterbed kunnen stromen: er moet een stuwende kracht voor deze stroming door het filterbed aanwezig zijn. Dit kan gerealiseerd worden door natuurlijk verval of een pomp, mogelijk aangedreven door zonne-energie of een windmolen.
Praktijkrijpheid	De zuiveringsmethode is rijp. De uitvoering is nog niet rijp. Aanleg als reactieve barrière is een interessant alternatief omdat hiervoor geen aparte oever met filtermateriaal hoeft te worden aangelegd. Dit moet nog worden geoptimaliseerd.
Overig	Er is mogelijk ecologische meerwaarde wanneer een begroeide oever ontstaat. Aan de andere kant kan dit een nadeel vormen, wanneer dit als bron van onkruid werkt. Wanneer de Puri-Oever in de sloot wordt uitgevoerd, valt het beheer en onderhoud onder verantwoordelijkheid van het waterschap. Door het ruimtegebruik van de sloot heeft dit invloed op de waterberging. Wanneer de Puri-Oever in het land wordt uitgevoerd, valt deze onder verantwoordelijkheid van de telers. In het geval van een reactieve barrière zal er geen beheer nodig zijn, in het geval van een bufferstrook zal er gemaaid moeten worden.

Tabel 22: Detailtabel toepasbaarheid Puri-Oever.

5.4.1 EFFECTEN

Het rendement van de maatregel is berekend uit de concentraties van in- en effluent volgens de volgende formule:

$$Rendement = \left(1 - \frac{Concentratie\ effluent}{Concentratie\ influent}\right) \times 100\% \quad (5)$$

De opschaling van dit rendement in % naar de totale verwijderde kg P per 5 ha per jaar wordt als volgt gemaakt.

$$P\ verwijdering\ per\ 5\ ha\ per\ jaar = rendement\ \times wateraf voer\ per\ 5\ ha\ \times P\ concentratie \quad (6)$$

Voor totaal P wordt een hoger verwijderingsrendement gevonden dan voor opgelost P. Dit is anders dan de uitkomsten van de drains die omhuld waren met ijzerzand. Dit kan waarschijnlijk verklaard worden door het feit dat het water uit de drains bij de experimenten met de Puri-Oever eerst in een buffervat terecht kwamen. Het gereduceerde water uit de drains wordt hier geoxideerd en hierdoor kan bijvoorbeeld ijzer oxideren en vervolgens samenklonteren tot aggregaten, met daaraan gebonden P. Deze aggregaten worden vervolgens door het filter uit het water verwijderd. Wanneer de Puri-Oever wordt uitgevoerd als reactieve barrière, vindt deze oxidatie mogelijk niet plaats en wordt eenzelfde effect verwacht als bij de ijzerzanddrains. Er is geen significant verschil gevonden tussen de effectiviteit in de zomer en in de winter.

Overige verwijdering/effect
Het ijzerzand heeft voornamelijk effect op de fosfor-concentraties. Er wordt niet significant N verwijderd. Er zijn op andere stoffen geen grote effecten te zien. De concentraties van een aantal stoffen verandert wel, maar deze stijging of daling is niet zo groot dat het een significante invloed zal hebben op de waterkwaliteit. Voor overige stoffen werkt de Puri-Oever als een deeltjesfilter. Dit is niet relevant bij directe passage van drain- of grondwater, maar wel op passage na verblijf in buffercompartiment. Hierbij leidt dit tot extra verwijdering van N en totaal P.

Gemiddelde concentratie P in effluent (mg/l)
De gemiddelde effluentconcentratie fosfor na passage door de Puri-Oever op basis van de meetgegevens bedraagt 0,17 ± 0,10 mg/l opgelost P en 0,30 ± 0,14 mg/l totaal P. Ook hierin zijn geen verschillen te zien tussen zomer en winter.

Kosten
De kosten zijn berekend op basis van de volgende aanpak:

- Voor 5 ha van de percelen zoals in Voorhout is berekend wat de **waterafvoer** en daarmee de **vracht aan te verwijderen P** is;
- Voor deze te verwijderen vracht is berekend wat de **vereiste afmetingen van de zuiveringseenheden** zijn;
- Op basis van deze afmetingen zijn de totale **kosten** berekend. Deze zijn opgebouwd uit investeringskosten en onderhoudskosten. Met behulp van de ingeschatte levensduur kunnen de kosten per jaar berekend worden (hoofdstuk 5.4.2).

Waterafvoer en vracht aan te verwijderen P
Voor het opschalen naar 5 ha zijn we van een schematische afmeting van het systeem uitgegaan zoals weergegeven in Figuur 37. We zijn uitgegaan van de afmetingen van de percelen bij Voorhout, en hebben dit versimpeld zodat er niet verschillende percelen met verschillende afmetingen zijn, maar twee percelen van gelijke afmetingen die op 1 sloot afwateren. De verhoudingen tussen lengte en breedte zijn vergelijkbaar met de gemiddelde verhoudingen bij de percelen in Voorhout. In de schematisering zijn we

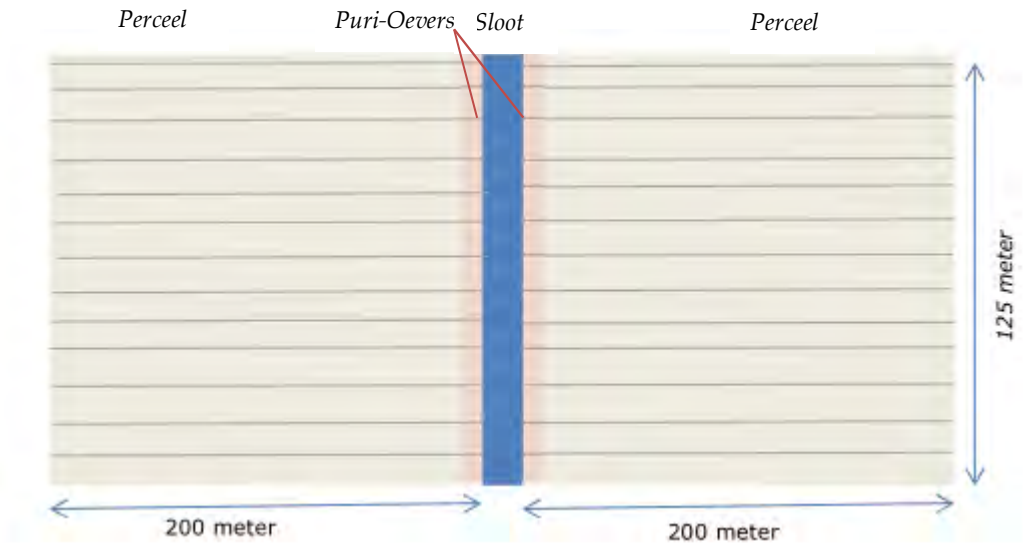
uitgegaan van 1 centrale sloot van 125 meter lengte, die aan weerszijden begrensd is door een perceel van 200 meter diep. We nemen voor beide percelen aan dat de drains telkens op een afstand van 10 meter van elkaar aanwezig zijn. Dat betekent dat er aan weerszijden van de sloot 13 drains liggen van 200 meter lengte (26 drains in totaal).

Voor de aangenomen waterafvoer gaan we uit van de getallen die gemeten zijn bij de afvoer van de VOPO pomp bij de Nutriëntenstuw. In Tabel 20 zijn deze waarden voor de zomer, winter en gemiddeld over het hele jaar weergegeven. We nemen aan dat deze hoeveelheid water gelijkstaat aan het water dat de Puri-Oever passeert, met andere woorden: al het water dat aan het einde van de sloot door de VOPO pomp gaat, is afkomstig uit de percelen.

	Afvoer		Vracht P			
	Afvoer m3/dag	Afvoer m3/jr	Ortho-P kg/jaar	Totaal-P kg/jaar	Ortho-P g/dag	Totaal-P g/dag
Zomer	58	21.000	53	106	145	290
Winter	116	42.000	106	212	290	580
Jaargemiddeld	97	35.000	88	176	242	483

Tabel 23: Waterafvoer en berekende bijbehorende vracht aan P voor afwatering op sloot vanuit percelen in Voorhout, uitgaande van 5 ha.

Uitgaande van een concentratie ortho-P van 2,5 mg/L en een concentratie totaal-P van 5 mg/L (orde-groottes van de concentraties gemeten tijdens de veldproeven) leidt dit tot een **vracht** van resp. **88 kg ortho- P per 5 ha per jaar** en **176 kg totaal-P per 5 ha per jaar**.



Figuur 37: Schematisatie van 2 gedraineerde bollenpercelen aan weerszijden van een sloot met een totaaloppervlak van 5 ha, gebruikt bij kostenberekeningen.

Afmetingen van de zuiveringseenheden

We gaan uit van een strook van ijzerzand langs beide zijden van de watergang, hetzij als oever, hetzij als reactieve barrière, met afmetingen van 1 meter breed en 0,6 meter diep. Deze heeft een totaal volume van:

2 x 125 meter x 1 meter x 0,6 meter = 156 m^3

Dit komt overeen met een hoeveelheid ijzerzand van 156 m^3/5 ha = 156*1600 kg/m^{-3} (dichtheid nat zand) = 250 ton per 5 ha. Dit komt overeen met een **verblijftijd** van het water in de oever van **1,6 dag**, berekend

aan de hand van het jaargemiddelde debiet van 97 m3 per dag en een volume van 156 m^3. Wanneer ook rekening wordt gehouden met een porositeit van ca. 40% komen we uit op een verblijftijd van 0,4 * 1,6 = 0,64 dag. Verder dient hier te worden opgemerkt dat dit de gemiddelde verblijftijd is. Bij pieken is de verblijftijd korter, bij lage afvoer is de verblijftijd langer. We gaan uit van een **levensduur** van **15 jaar**, waarbij het ijzerzand elke 5 jaar vervangen moet worden.

Deze combinatie van levensduur en volume geeft een realistische combinatie van verblijftijd, bindingscapaciteit en ruimtegebruik. Deze afmetingen zijn, gerekend per behandeld oppervlak, iets groter dan die gebruikt in de huidige veldproeven.

5.4.2 KOSTEN

De aanlegkosten van de strook of buffer worden geschat op 25000 €/ 5 ha. Deze kosten zijn gebaseerd op de kosten van aanleg bij de veldproef in Voorhout (zie kolom 2 bakken), en vervolgens opgeschaald naar 5 ha. Bij de opschaling is vanwege de verwachte verhoogde efficiëntie de kosten van de twee bakken niet met een factor 10 (te verwachten op basis van de verhoudingen van de lengtes van de bakken en de totale slootlengte) maar een factor 5 gehanteerd. Bij opschaling komen er een aantal extra kosten bij: 1. versteviging/aanpassing van de verzameldrains om de grotere hoeveelheid water af te voeren; en 2. Stabilisatie van de verzameldrains zodat er geen verzakking plaatsvindt. Voor beide kosten zijn extra materiaal en arbeidskosten gerekend. De opschaling is gemaakt in overleg met Bert Woertink, die de aanleg van de Puri-Oevers heeft uitgevoerd.

Een onzekere factor in de kosten is het wel of niet hanteren van een pomp. In het ideale geval vindt het transport door het filterbed plaats onder vrij verval. Bij de onderstaande berekeningen gaan we uit van een situatie waarbij geen pompen nodig zijn. Daarnaast kan een duurdere variant worden berekend, waarbij extra kosten zijn opgenomen voor pompen, regelsystemen en maatregelen om drainageweerstand te voorkomen. Een range in geschatte kosten, van goedkope tot dure variant is ook realistisch om te veronderstellen gezien het feit dat de meest optimale uitvoeringsvariant moet worden ontworpen. We schatten in dat de duurdere variant tot maximaal ca. 10.000 Euro duurder uitvalt dan de variant in Tabel 24.

Kosten	2 bakken (€)	5 ha (€)
Diverse materialen (waterdichte folie, worteldoek, geotextiel, drainagebuis, buizen,etc)	1500	8000
Grind	1120	5600
Transport grind	380	1900
IJzerzand	0	0
Transport ijzerzand	120	600
Arbeidskosten aanleg	725	4500
Inhuur kraan	850	4250
Totaal	**4695**	**24850**

Tabel 24: Kosten van aanleg Puri-Oever: kosten voor 2 bakken (gebaseerd op aanleg in Voorhout), en geschatte kosten bij opschaling naar 5 ha.

De onderhoudskosten worden geschat op 500 tot 1000 euro voor 5 ha per jaar. Deze kosten zijn een schatting op basis van één keer per jaar maaien door een loonwerker en ingrijpen bij problemen. Daarnaast gaan we er van uit dat elke 5 jaar het ijzerzand vervangen moet worden. Hiervoor rekenen we € 1.600,-- (€ 600,-- transportkosten, € 1.000,-- arbeidskosten).

Ruimtebeslag
Het ruimtebeslag van de Puri-Oever onder deze inschattingen bedraagt 156 m^2/5 ha. De impact hiervan hangt sterk af van de uitvoeringsvorm. Minstens vier varianten zijn mogelijk.

Ten eerste is er de variant zoals getest tijdens de veldpilot. Hierbij vormt de Puri-Oever een strook in de sloot, waarbij het slootoppervlak wordt opgeofferd. Dit is alleen mogelijk als dit niet ten koste gaat van de waterbergingsfunctie.

Een tweede variant is een uitvoering niet als oever, maar onder water. Deze variant heeft als voordeel dat waterbergingsruimte beschikbaar blijft. Nadeel van deze variant is dat deze nog niet in de praktijk getest is en het dus niet bekend is hoe deze functioneert. Een derde variant is het bestemmen van een deel van het land als filtersysteem, waarbij het niet meer gebruikt kan worden. Deze variant is duur, want waardevolle landbouwgrond moet worden opgeofferd.

Bij de vierde variant wordt de Puri-Oever aangelegd als een ondergrondse reactieve barrière. Dit gaat niet ten koste van bruikbaar oppervlak.

Benodigd ijzerzand
In totaal is 250 ton ijzerzand per 5 ha voor 5 jaar nodig. Dit komt neer op een verbruik van circa 50 ton per 5 ha per jaar.

Afschrijvingsperiode
Voor de Puri-oever is een afschrijfperiode gehanteerd van 15 jaar. De vervangingstijd van het ijzerzand is ingeschat op 5 jaar. Deze tijd volgt uit een realistische afmeting van de oever (gebaseerd op ruimte en verblijftijd) en een verwachte bindingscapaciteit van het ijzerzand.

Totaalkosten
De totaalkosten komen neer op 2.500 – 3.700 euro/5 ha per jaar, 14-21 euro / kg P (P-totaal) en 28 – 42 Euro / kg P (P-ortho).

5.4.3 TOEPASBAARHEID

Robuustheid
De Puri-Oever met ijzerzand is een robuuste zuiveringsmethode. De verwijdering van totaal en ortho-P is efficiënt en fluctueert nauwelijks en de doorlatendheid blijft goed. De Puri-Oever is niet kwetsbaar voor vorst. Droogte heeft naar verwachting geen nadelige effecten. Wel is de doorlatendheid van het grindpakket minder groot dan die van drains. Hiermee moet bij de aanleg rekening worden gehouden, zodat bij piekafvoeren geen wateroverlast op het land ontstaat. Dit kan door het aanleggen van een overloopconstructie. Het is raadzaam om regelmatig de doorlatendheid te controleren. De maatregel is goed toegankelijk en controle kan dan ook gemakkelijk plaatsvinden.

Randvoorwaarden
Er moet ruimte langs de oever of in de oever aanwezig zijn voor het aanleggen van de Puri-Oever. Daarnaast moet er voldoende waterdruk zijn om het water door het filterbed te laten stromen. Indien hiervoor toch een pomp nodig is, kan gedacht worden aan energieopwekking met een windmolentje of zonnepaneel. Dit is mogelijk, aangezien er niet veel energie nodig is.

Praktijkrijpheid

Wat betreft de zuiveringsrendement en doorlatendheid lijkt de maatregel praktijkrijp. De belangrijkste ontwikkelpunten liggen op het gebied van de praktische uitvoering: waar en hoe kan het filter het best worden aangelegd, en hoe kan er voor een goede doorstroming gezorgd worden met zo min mogelijk energie en geen wateroverlast voor de boer.

Overig
Groot voordeel van deze methode is dat al het water dat uit de percelen naar het oppervlaktewater stroomt, gezuiverd kan worden. Daarnaast is een groot voordeel dat het water uit de drains weinig deeltjes bevat (het water is eigenlijk al gefilterd door het zand waar het uitstroomt), waardoor er niet snel verstopping van het filterbed optreedt. Zowel totaal als ortho-P worden verwijderd. Een ander voordeel is de locatie van de Puri-oever: de Puri-oever is zeer goed toegankelijk, hetzij voor onderhoud, monitoring, maar ook voor het mogelijk verwijderen van het filtermateriaal. Dit maakt de methode zeer flexibel. Nadeel is dat het huidige ontwerp een barrière voor de afvoer van piekbelastingen van water aanwezig kan zijn. Hiervoor zijn hierboven al een aantal mogelijke oplossingen gegeven.

5.5 NUTRIËNTENSTUW

Effectiviteit gemiddeld	oP	64 g/d 23,2 kg/j
	tP	105 g/d 38,3 kg/j
Effectiviteit winter **(58 m^3/d ipv 116 m^3/d)**	oP	86% (mediaan 97%) 0,99 mg/l 57 g/d
	tP	80% (mediaan 95%) 1,62 mg/l 94 g/d
Effectiviteit zomer **(58 m^3/d)**	oP	92% 1,28 mg/l 74 g/d
	tP	92% 2,14 mg/l 124 g/d
Overige verwijdering/effect		Er wordt voornamelijk vast materiaal verwijderd door het zandfilter (76% droogrest), wat resulteert in een stikstofverwijdering van 13%. Het zuurstofgehalte neemt beperkt af. Er spoelt verder nauwelijks ijzer uit. Doordat de constructie aan het eind van het watersysteem staat wordt (in de zomer) al het water behandeld. Het gaat hierbij zowel om fosfor uit de landbouw, als fosfor uit nalevering en kwel.
Gemiddelde concentratie P in effluent	oP	0,15 mg/l (mediaan 0,09 mg/l)
	tP	0,33 mg/l (mediaan 0,13 mg/l)

Tabel 25: Detailtabel effecten nutriëntenstuw.

Investeringskosten	10.000 euro (basis) – 35.000 euro (compleet)
Operationele kosten	700 euro/jaar (basis onderhoud) – 3.700 euro/jaar (onderhoud + monitoring)
Ruimtebeslag	70 m^2 watergang (moet gecompenseerd worden)
Benodigd ijzerzand (5 ha)	8300 kg/jaar
Afschrijvingsperiode	15 jaar
Totaalkosten (afschrijving en monitoring/beheer)	1.400 – 6.000 euro/j 35 tot 160 euro/kg totaal-P

Tabel 26: Detailtabel kosten nutriëntenstuw bij een perceel van 5 ha.

Robuustheid	Functioneert tijdens extreme omstandigheden minder goed (alleen basis afvoer tijdens extreme neerslag, en niet tijdens vorst), maar raakt niet beschadigd. De constructie moet meerdere keren per jaar bezocht worden voor klein onderhoud. Onderhoud en optimalisaties kunnen eenvoudig worden uitgevoerd.
Randvoorwaarden	De constructie kan alleen worden toegepast in een niet vermaasd systeem. Daarnaast is er hoogteverschil nodig, of moet dit hoogteverschil gecreëerd worden met een pomp (> 0,5 meter). Wanneer een pomp nodig is, dan moet er elektriciteit aanwezig zijn of een zonnepaneel geplaatst kunnen worden. Voor het onderhoud moet de locatie goed bereikbaar zijn.
Praktijkrijpheid	Het zuiveringsrendement is voldoende hoog om in de praktijk toegepast te worden. Het debiet is nog relatief laag, waardoor er een groot oppervlak benodigd is. Dit debiet is afhankelijk van het type ijzerzand en het onderhoud van de constructie. Door slimmer onderhoud of een ander type ijzerzand kan het debiet verder toenemen. Het uiteindelijke ontwerp is nog niet in de praktijk uitgevoerd.
Overig	Doordat de constructie in het watersysteem staat, heeft deze maatregel geen invloed op het bestaande grondgebruik. Er is daardoor geen impact op de bedrijfsvoering. Een klein deel van het watersysteem wordt gebruikt, waardoor berging op een andere locatie in het watersysteem gecompenseerd moet worden. Doordat de nutriëntenstuw een “puntmaatregel” is, is het functioneren goed te onderhouden, monitoren en optimaliseren. Wanneer de maatregel niet meer nodig is, kan de oorspronkelijke situatie eenvoudig hersteld worden. Doordat het een relatief complexe technische maatregel betreft, blijft het beheer bij Rijnland.

Tabel 27: Detailtabel toepasbaarheid nutriëntenstuw.

5.5.1 EFFECTEN

Effectiviteit zomer
In de zomer wordt er gemiddeld 92% oP en 92% tP verwijderd. De fosforverwijdering in de zomer bedraagt hiermee 1,39 mg/l oP en 2,32 mg/l tP. Op basis van het afvoerdebiet van de pilotlocatie is een gemiddelde afvoer van 58 m^3/d berekend voor de maanden mei tot augustus. Dit resulteert in een gemiddelde verwijdering van 74 g/d oP en 124 g/d tP.

De berekende efficiëntie kan sterk beïnvloed worden door uitschieters in de gemeten waterkwaliteit. In de zomerperiode zijn echter nauwelijks uitschieters gemeten. Dit is zichtbaar in de mediane effectiviteit van 91% voor oP en 92% voor tP.

Effectiviteit winter
In de winter wordt er gemiddeld 86% oP en 80% tP uit het behandelde water verwijderd. De berekende verwijderingseffectiviteit wordt sterk negatief beïnvloed door enkele hoge gemeten concentraties in het effluent. Deze hoge concentraties worden waarschijnlijk veroorzaakt door het uitspoelen van filtermateriaal. Het is mogelijk dat dit filtermateriaal niet continu loskomt, maar alleen tijdelijk loskomt tijdens de bemonstering van de effluentleiding. Wanneer deze piekconcentraties buiten beschouwing worden gelaten door middel van de mediane waarden, dan resulteert dit in een effectiviteit van 97% voor oP en 95% voor tP in de winter.

De buiten de zomerperiode gemeten fosfor concentratie bedroeg 1,16 mg/l oP en 2,03 mg/l tP. Dit is beperkt lagere dan de zomerconcentratie. Op basis van het afvoerdebiet van de pilotlocatie is een gemiddelde afvoer van 117 m^3/d berekend voor de maanden september tot april. De piekafvoeren in de winter kunnen echter niet door de Nutriëntenstuw gezuiverd worden. Om wateroverlast te voorkomen wordt het deel van de piekafvoer dat niet gezuiverd kan worden ongezuiverd afgevoerd. Hierdoor kan maar een debiet van gemiddeld 58 m^3/d gezuiverd worden, wat neerkomt op 50% van het totaaldebiet. De totale verwijdering van fosfor in de periode buiten de zomer bedraagt hierdoor 57 g/d oP en 94 g/d tP.

Effectiviteit gemiddeld
De gemiddelde effectiviteit is bepaald op basis ven een gewogen gemiddeld van de zomer- en winterperiode. Dit resulteert in een gemiddelde verwijdering van 64 g/d oP en 105 g/d tP. Op jaarbasis resulteert dit in een verwijdering van 23,2 kg oP en 38,3 kg tP. Dit is relatief laag door het slechts deels zuiveren van de winterafvoer. Ook is de concentratie in het slootwater lager dan de fosfaatconcentratie van het water uit de drains. Hierdoor kan echter wel gegarandeerd worden dat de bollenteelt niet wordt gehinderd, ook water wordt gezuiverd dat niet via de drains afstroomt (kwel en inlaatwater) en in de zomerperiode een maximale effectiviteit wordt behaald.

Bij de totale verwijdering is nog geen rekening gehouden met de eerder genoemde gemeten uitschieters in de effluentconcentraties en het effect van het voorfilter dat tijdens de pilot is gebruikt. Uit de metingen is gebleken dat in het voorfilter een significante hoeveelheid fosfor vrijkomt (0,5 mg/l oP en 0,2 mg/l tP). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de afbraak van organisch materiaal in het voorfilter, wat ook zichtbaar is in het lage zuurstofgehalte. Wanneer hiermee rekening wordt gehouden, dan kan de effectiviteit verder toenemen tot meer dan 95% voor zowel oP als tP. Daarnaast komen er nutriënten in het voorfilter vrij, waardoor de effectiviteit nog niet maximaal is. Wanneer er geen voorfilter wordt toegepast en de nutriëntenstuw goed wordt onderhouden neemt de effectiviteit mogelijk nog verder toe.

Overige verwijdering/effect
Het ijzerzand in de nutriëntenstuw heeft voornamelijk effect op de fosforconcentraties. Voor overige stoffen werkt de nutriëntenstuw voornamelijk als een zandfilter. Hierdoor wordt een aanzienlijke hoeveelheid gesuspendeerd materiaal vastgelegd. Dit resulteert in een afname van de droogrest van het gefilterde water van 76% tijdens de pilot. Ook het voorfilter leverde een aanzienlijke bijdrage in deze verwijdering. Wanneer er geen voorfilter wordt toegepast zal de belasting van het zandfilter toenemen, waardoor er meer gesuspendeerd materiaal door het zandfilter wordt vastgelegd.

Door de nutriëntenstuw wordt ook 14% van het aanwezige stikstof verwijderd. Dit wordt mogelijk voor een aanzienlijk deel veroorzaakt door de verwijdering van gesuspendeerd materiaal in de zandfilter. Het effect van het voorfilter is hierbij echter veel beperkter. Dit komt mogelijk doordat het door het voorfilter vastgelegde organische stikstof wordt afgebroken en daardoor weer vrijkomt.

Gemiddelde concentratie P in effluent (mg/l)
De gemiddelde concentratie fosfor na zuivering door de nutriëntenstuw op basis van de meetgegevens bedraagt 0,15 mg/l oP en 0,33 mg/l tP. Deze waarden worden opnieuw sterk beïnvloed door de individuele afwijkende concentraties in het effluent. Dit is zichtbaar in de mediane concentratie van 0,08 mg/l oP en 0,13 mg/l tP.

	Parameter	effectiviteit	Verwijdering (mg/l)	Debiet (m^3/d)	Verwijdering (g/d)	Verwijdering (kg/j)	Effluent (mg/l)
Winter	oP	86%	0,91	58*	57		0,16*
	tP	80%	1,52	58*	94		0,41*
Zomer	oP	92%	1,26	58	74		0,11
	tP	92%	2,09	58	124		0,17
Totaal	oP	88%			64	23,2	0,15
	tP	85%			105	38,3	0,33

* Slechts een deel van het water kan gezuiverd worden. Het resterende debiet zal ongezuiverd geloosd worden.

Tabel 28: Overzichtstabel verwijdering fosfor.

5.5.2 KOSTEN

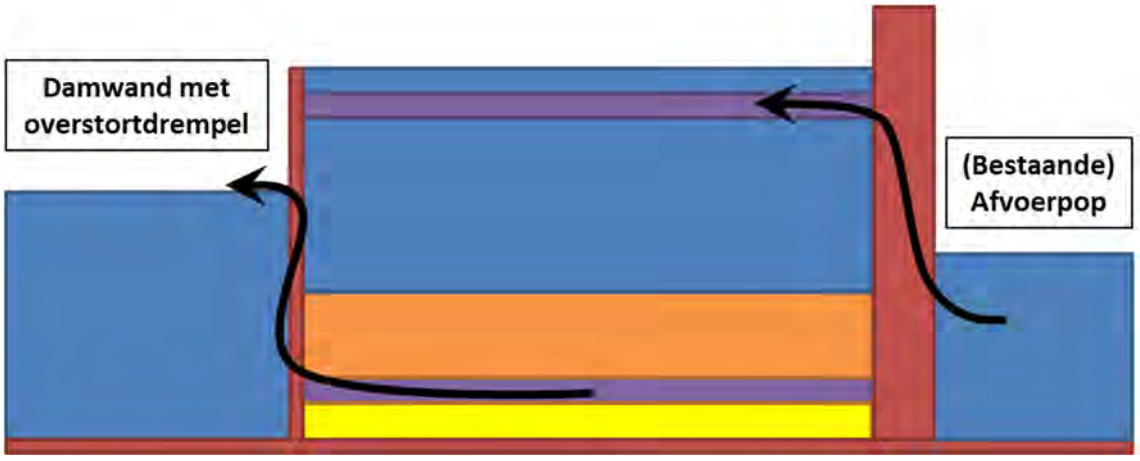
Investeringskosten
In de berekeningen wordt uitgegaan van het zelfde zuiveringsdebiet als wat is bereikt bij de pilot van de nutriëntenstuw in Voorhout. Dit debiet bedraagt 5 m^3/d bij een oppervlak van 6 m^2. Om het zomergemiddelde debiet van 58 m^3/d te verwerken is er daarom ongeveer 70 m^2 aan ijzerzandbed noodzakelijk. Er wordt hierbij aangenomen dat het ijzerzand het zelfde doorlatende vermogen bezit als het ijzerzand dat bij Voorhout is toegepast. De verwachting is dat het debiet groter zal zijn wanneer het ijzerzand met enige regelmaat aangeharkt zal worden. Hier is echter (nog) geen rekening mee gehouden.

Om de investeringskosten realistisch te houden is niet uitgegaan van het ontwerp van de nutriëntenstuw zoals deze is toegepast in de pilot in Voorhout. Deze pilot was gericht op maximale controle van het proces. Daarnaast is het niet realistisch om het huidige ontwerp op te schalen van 5 m^3/d naar 58 m^3/d. De uiteindelijk toegepaste variant van de nutriëntenstuw zal beter ingepast worden in het bestaande watersysteem. Er is daarom voor een ontwerp gekozen waarbij een deel van een sloot wordt afgedamd en met waterdicht doek wordt bekleed. De drainerende functie van de watergang wordt gecompenseerd door het aanbrengen van enkele drains in het talud van de watergang.

De bergende functie van de watergang zal elders in het watersysteem gecompenseerd worden. Dit resulteert in de volgende investeringskosten:

- Plaatsen van een damwand in de watergang;
- Verwijderen van bagger uit de watergang;
- Aanbrengen van een (waterdicht) doek op de bodem en taluds van de afgedamde watergang;
- Aanvoeren en aanbrengen van drainagezand op de bodem;
- Aanbrengen van drains in het drainagezand met een doorspuitput;
- Aanbrengen van ijzerzand;
- Aansluiten van de afvoerdrain;
- Plaatsen van een aanvoerpomp;
- Plaatsen van een aanvoerleiding naar de pomp;
- Aanbrengen van een drain om het water over het ijzerzand te verdelen;
- Peilregistratie in de nutriëntenstuw en in de sloot inclusief aansturing van de pomp;
- Een aansluiting op het bestaande (nabijgelegen) stroomnet;
- Aanpassen van de bestaande aanvoer- en afvoerstructuur naar de perceelsloot;
- Aanbrengen van drains langs de afgedamde watergang;
- Tijdelijke voorzieningen tijdens de aanleg (watergang leegpompen, rijplaten, …..);
- Herstellen van de oorspronkelijke situatie na het overschrijden van de levensduur.

Dit resulteert uiteindelijk in een eenmalige investering van ordegrootte 35.000 euro. Hierbij vormen de kosten voor de pomp (inclusief benodigde aansluitingen) en de uiteindelijke afvoerkosten het grootste deel van de kosten. Wanneer gebruik gemaakt kan worden van de bestaande pomp kunnen de kosten dalen tot ordegrootte 10.000 euro. Bij deze kosten geldt een verwachte minimale levensduur van 15 jaar, waarna voornamelijk het leidingwerk en de drains vervangen moeten worden. Dit resulteert in de jaarlijkse kosten voor een complete uitvoering van ordegrootte 2.300 euro per jaar en basis uitvoering van ordegrootte 700 euro per jaar.



Figuur 38: Schematisch zijaanzicht van de toekomstige Nutriëntenstuw (van boven naar onder; water, aanvoerdrain, water, ijzerzand, afvoerdrain en drainagezand). Aanvoer vindt indien mogelijk plaats door de bestaande afvoerpomp. Bij een te hoge aanvoer stort het water ongezuiverd over de damwand.

Operationele kosten

Naar aanleiding van de pilot is geconcludeerd dat beheer en onderhoud van de nutriëntenstuw belangrijk is. Ook moet na enkele jaren het opgeladen ijzerzand vervangen worden. Hiervoor worden de volgende kosten verwacht:

- 4x per jaar schoonmaken van de aanvoerfilter, aanharken van het ijzerzand en indien nodig handmatig verwijderen van kroos;
- 1x per 3 jaar vervangen van het ijzerzand met een mobiele kraan;
- Stroomkosten van het pompje;
- 1x per maand nemen van twee watermonsters en analyseren voor fosfor;
- Jaarlijks analyseren van de kwantiteit en kwaliteitsresultaten.

De kosten die hierbij horen bedragen ordegrootte 3.700 euro per jaar. Hierbij wordt een 2.500 euro per jaar gereserveerd voor de maandelijkse monitoring en analyse. Wanneer er gebruik gemaakt kan worden van de bestaande vopo-pomp hoeft er geen rekening gehouden te worden met de stroomkosten. Wanneer er alleen rekening wordt gehouden met het driejaarlijks vervangen van het ijzerzand en 4x per jaar schoonmaken van het zandbed, dan dalen de kosten verder tot ordegrootte 700 euro per jaar.

Ruimtebeslag
Voor de nutriëntenstuw wordt een deel van een watergang afgedamd. Het gaat hierbij om 70 m^2. Dit gebeurt bij voorkeur op een locatie waar een peilscheiding aanwezig is. Hierdoor gaat er voor de grondgebruikers geen areaal verloren, is de constructie goed ingepast in het watersysteem en blijven de kosten relatief laag. Voorwaarde is wel dat het huidige functioneren van het watersysteem gehandhaafd blijft.

In het ontwerp zelf is rekening gehouden met de aanvoer en afvoer van water. De bergende functie van het watersysteem gaat echter ook deels verloren. Doordat het peil wordt opgezet in de nutriëntenstuw kan het water in de stuw niet meestijgen met de rest van het peilgebied. Dit wateroppervlak moet daarom gecompenseerd worden. De locatie van de compensatie moet plaatsvinden in hetzelfde peilgebied. Dit zal in veel gevallen de boezem zijn.

Het voor de nutriëntenstuw benodigde oppervlak is erg klein. Daarnaast ligt de nutriëntenstuw buiten het bloembollenperceel. Hierdoor is het niet nodig om de compensatie te zoeken in tuinbouwgrond (35.000 euro/ha /jaar), maar kan ook gecompenseerd worden met grasland of akkerbouw (2.000 euro/ha/jaar). Dit resulteert in een jaarlijkse kosten van ordegrootte 15 euro/jaar.

Benodigd ijzerzand
Voor de benodigde hoeveelheid ijzerzand is uitgegaan van een bindingscapaciteit van 10 gP/kgFe. Uit een eerder experiment bij de Dommel is gebleken dat het ijzerzand ongeveer 28% (massa) Fe bevat. Voornamelijk ortho-fosfaat zal zich aan het ijzer binden. De verwachte verwijdering van ortho-fosfaat op basis van de pilot is 23 kg/jaar. Dit resulteert in een benodigde hoeveelheid ijzerzand van ongeveer 8,3 ton ijzerzand/jaar, wat overeenkomt met 6,4 m^3/jaar. Dit wordt bereikt bij een minimale laagdikte van 9 cm/jaar.

In de huidige pilot is een ijzerzand-dikte toegepast van ongeveer 30 cm. Dit resulteert in een verwachte levensduur van ongeveer 3,3 jaar. De exacte levensduur is echter sterk afhankelijk van de exacte bindingscapaciteit en bindingssnelheid van het toegepaste ijzerzand. Een dikkere laag ijzerzand kan toegepast worden, zodat minder frequent het ijzerzand vervangen hoeft te worden. De doorlatendheid van het ijzerzand is echter lager dan de doorlatendheid van drainagezand, waardoor mogelijk de capaciteit zal afnemen.

Afschrijvingsperiode
Voor de totale levensduur van de nutriëntenstuw is uitgegaan van een uitgegaan van een afschrijvingsperiode van 15 jaar. Na deze periode zullen de toegepaste drains, leidingen en afdekzeil

versleten zijn. De relatief dure damwand in de watergang zal echter nog wel bruikbaar zijn, waardoor de leeftijd van de nutriëntenstuw eenvoudig verlengd kan worden. In de complete uitvoering van de nutriëntenstuw is rekening gehouden met het afvoeren van de volledige constructie na 15 jaar.
Het ijzerzand is waarschijnlijk na 3 jaar verzadigd en moet dan vervangen worden. Deze kosten zijn meegenomen in de operationele kosten.

Totaalkosten
De totale kosten voor 5 ha zijn sterk afhankelijk van de randvoorwaarden en de wens tot monitoring. Wanneer gebruik gemaakt kan worden van een bestaande vopo-pomp (in beheer bij de agrariër) en er niet gemonitord hoeft te worden dan zullen de kosten ordegrootte 1.400 euro per jaar. Wanneer het nodig is om een eigen pomp te beheren en er gemonitord moet worden, dan zullen de kosten stijgen tot ordegrootte 6.000 euro per jaar.

Het is de verwachting dat met deze nutriëntenstuw 38,3 kg tP en 23,2 kg oP per jaar verwijderd kan worden (hoofdstuk 5.5.1). Dit resulteert in een kostprijs van ordegrootte 35 tot 160 euro/kg tP en 60 tot 260 euro/kg oP , afhankelijk van de beschikbare randvoorwaarden en de wens tot monitoring.

5.5.3 TOEPASBAARHEID

Robuustheid
- De nutriëntenstuw piekafvoer niet zuiveren door de beperkte capaciteit. Er ontstaat echter geen schade aan de constructie;
- Bij vorst kan de installatie niet functioneren. Er ontstaat geen schade en het debiet bij vorst is laag;
- Bij droogte wordt er voornamelijk water rondgepompt. Er wordt dan nog wel water gezuiverd. Droogvallen van het ijzerzand moet zoveel mogelijk voorkomen worden om het losraken van ijzerhuidjes te voorkomen;
- De constructie moet meerdere keren per jaar gecontroleerd worden. Dit kan door een beheerder van het waterschap of de eigenaar van het land. Als er een verdichte laag ontstaat of veel vegetatie aanwezig is, dan moet dit verwijderd worden;
- Het ijzerzand is (waarschijnlijk) kwetsbaar bij uitdroging of lage zuurstofgehalten. Hier kan goed op geanticipeerd worden;
- De maatregel is centraal gelegen en goed toegankelijk. Controles en onderhoud kunnen daardoor goed uitgevoerd worden;
- Het functioneren van de nutriëntenstuw kan goed gemonitord worden.

Randvoorwaarden
- Er moet elektriciteit aanwezig zijn. Als alternatief kan er gebruik gemaakt worden van een zonnepaneel;
- Er moet een centrale locatie zijn waar al het water het gebied uitstroomt. Op deze locatie moet een watergang aanwezig zijn die deels afgedamd kan worden voor het plaatsen van de nutriëntenstuw;
- De locatie moet redelijk bereikbaar zijn, zodat meerdere keren per jaar het functioneren van de stuw gecontroleerd kan worden en indien nodig maatregelen kunnen worden uitgevoerd.

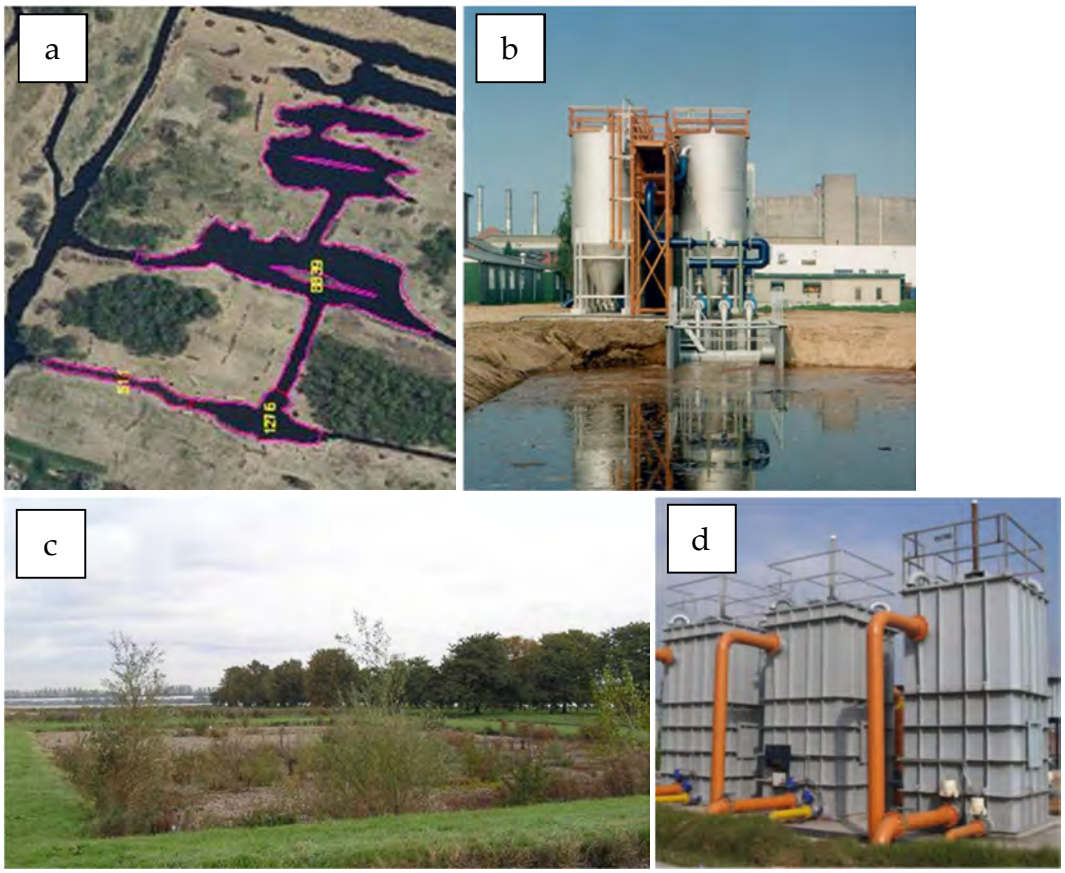
Praktijkrijpheid
- De effectiviteit is al maximaal en zal mogelijk beperkt afnemen bij het vergroten van de doorstroomsnelheid;
- Het te behandelen debiet zal mogelijk toenemen door een betere beheersing;
- De kosten zullen afnemen door het toepassen van goedkoper materiaal en een verbetering van de inpasbaarheid in de huidige waterstructuur.

Overig

- Er is nauwelijks impact op de bedrijfsvoering van de agrariërs in het te zuiveren gebied;
- Wanneer de nutriëntenstuw minder gaat functioneren, kan er eenvoudig ingegrepen worden;
- Het wateroppervlak dat wordt afgedamd moet in de omgeving gecompenseerd kunnen worden.

5.6 ZUIVEREN BIJ GEMALEN

De beoordeling van zuivering bij gemalen is gebaseerd op de haalbaarheidsstudie die is uitgevoerd in het InnovatieProject KRW 'Zuiver gemalen'. De vier rapporten met de resultaten van deze studie vormen de basis voor deze evaluatie (De Boorder et al., 2010; Voort et al., 2010; Buma et al., 2010; Heerdink et al., 2010). Er zijn vier zuiveringsvarianten beschouwd: a. Coagulatie + sedimentatie ('boerenslootmethode'); b. Continue vlokkingsfiltratie; c. Langzame zandfiltratie; d. Fuzzy filter (Figuur 39).



Figuur 39: Beoordeelde zuiveringstechnieken: a. Chemische defosfatering met boerenslootmethode (bezinking); b. Vlokkingsfiltratie; c. Langzame zandfiltratie met Fe-krullen en kalk; d. Fuzzy filter.

De **boerenslootmethode** komt neer op dosering van ijzer(III)chloride bij een gemaal. Dit vlokt vervolgens in het achterliggende watersysteem uit en bindt zo het fosfaat. Deze methode wordt al op een aantal plaatsen toegepast, zoals bij Vinkeveen en Botshol. De prestaties van bestaande installaties variëren sterk. De techniek is relatief goedkoop en robuust: onbemande bedrijfsvoering is mogelijk. Het is goed inpasbaar in een landelijke omgeving, op voorwaarde dat het wateroppervlak beschikbaar is waar het water voldoende langzame stroomsnelheid heeft zodat de vlokken kunnen bezinken.

Vlokkingsfiltratie met een dynamisch zandfilter is een reactorproces. Ook hierbij wordt ijzer(III)chloride gedoseerd, waarna het uitgevlokte ijzerfosfaat in de reactor wordt verwijderd door filtratie.

Langzame zandfiltratie met ijzer en kalk vindt niet plaats in een reactor, maar in een zandbed. Batchgewijs wordt het water in een ijzer- en kalkhoudend zandbed geïnfiltreerd. Hierin wordt het fosfaat vervolgens vastgelegd door het aanwezige ijzer en kalk. Via beluchting wordt het zandbed geregenereerd.

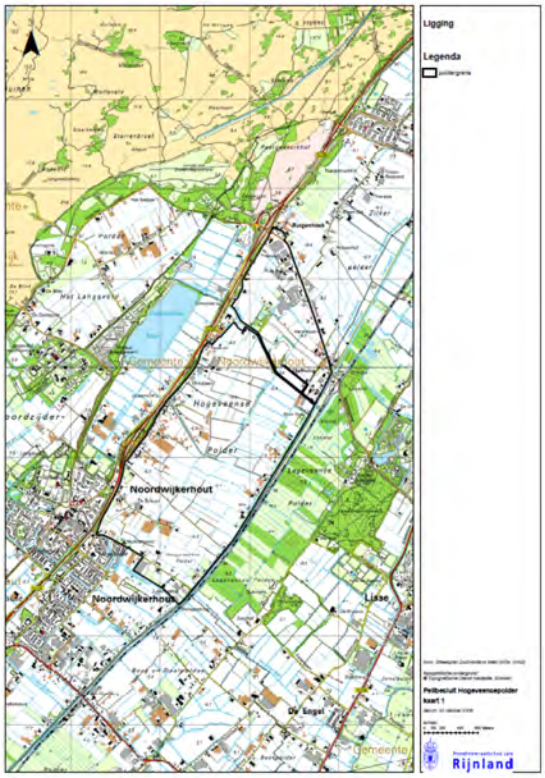
Het **Fuzzy filter** is een reactorsysteem. Het filterbed bestaat uit samendrukbare bolletjes. Deze bolletjes nemen zwevend stof op, inclusief de daaraan gebonden P. De bolletjes kunnen afwisselend samengedrukt en ontlast worden, waardoor ze afwisselend zwevende deeltjes opnemen en juist weer afgeven. Voor de verwijdering van ortho-P is eerst coagulatie nodig.

In bijlage 4 is voor alle vier de genoemde technieken de factsheet uit Voort et al., 2010 opgenomen, met informatie over de bewuste techniek en kentallen. In de genoemde studie zijn deze vier technieken ook vergeleken: Tabel 26 (overgenomen uit Voort et al., 2010) laat deze vergelijking zien.

	Coagulatie+ sedimentatie (boerensloot)	**Continu vlokkings-filtratie**	**Langzame zandfiltratie (ijzer/kalk)**	**Filtratie Fuzzy filter[20]**
rendement stikstof	0	?	?	?
rendement fosfaat	50-80	60-90	70-90	20-60 (schatting)
energieverbruik (Wh/m^3)	5	15	5	10
FeCl3 (g/m^3)	30	20	-	-
slibproductie g/m^3)	45	30	-	10
Ruimtebeslag (m^2)	225 - 450	15	650	4
Investering (k€ per 100 m^3/h)	84 – 420	375 - 625	180 – 300	75 – 125
Exploitatiekosten (€cent/m^3)	2,8 – 3,7	5 – 9	1,5 – 2,5	1,5 – 2,5
Flexibiliteit	+/-	+	-	+
Werking zomer/winter	z+/w-	z+/w?	z+/w?	z+/w?

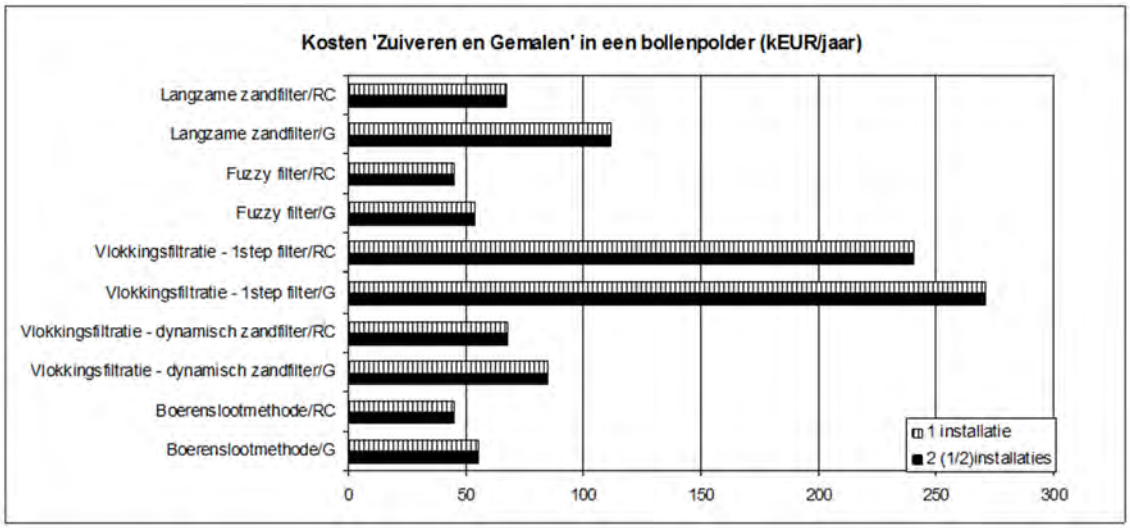
Tabel 29: Overzicht van de vier beschouwde zuiveringstechnieken. Bron: 2 Let op: voor de verwijdering van ortho-P komen voor het fuzzy filter hier nog kosten voor coagulatie met FeCl3 bij.

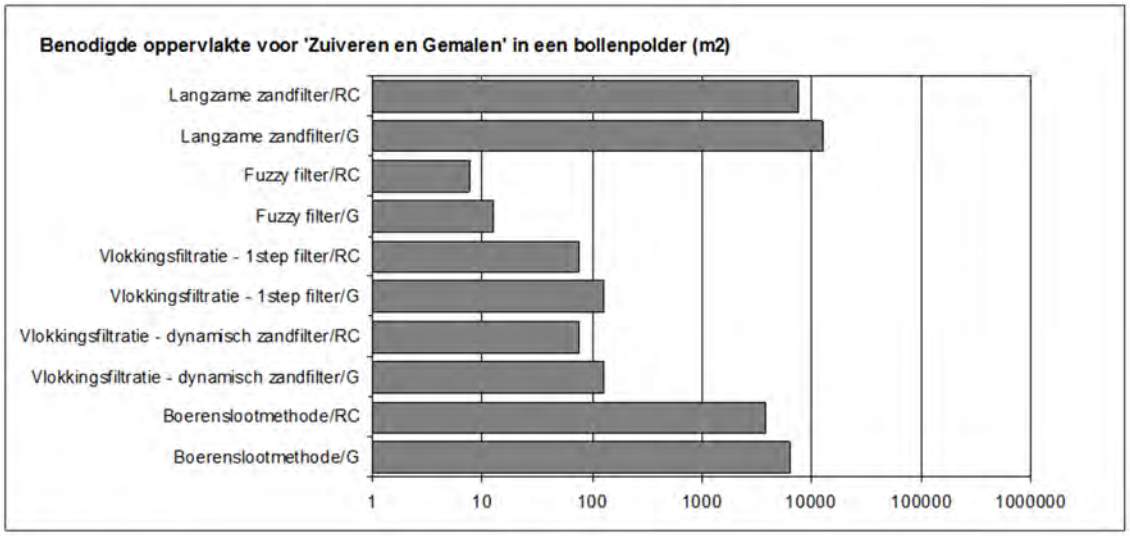
De beoordeling is in het project "Gemalen en zuivering: een logische combinatie?" toegepast op een drietal verschillende voorbeeldpolders, waaronder de Hogeveense polder in de Bollenstreek (zie Figuur 40). Deze beoordeling is gebruikt in deze beoordeling.



Figuur 40: Topografie van Hogeveense polder, waarop deze berekeningen gebaseerd zijn (Heerdink et al., 2010).

De uitkomsten van de kosten- en oppervlakteberekening van de verschillende technieken voor deze polder zijn te zien in Figuur 41 (Heerdink et al., 2010).





Figuur 41: Uitkomsten kosten- en oppervlakteberekeningen Hogeveense polder. Bron: 4. RC = recirculatie; G = gemaal).

In de beoordeling hieronder worden niet alle vier de technieken apart behandeld, ook al kunnen de resultaten sterk afhankelijk zijn van de techniek. In plaats daarvan geven we een beoordeling voor de vier technieken als groep.

Effectiviteit gemiddeld	oP	50-90%
	tP	50-90%
Effectiviteit winter	oP	In de meeste gevallen gelijk aan gemiddelde effectiviteit, in sommige gevallen lager
	tP	In de meeste gevallen gelijk aan gemiddelde effectiviteit, in sommige gevallen lager
Effectiviteit zomer	oP	Zie effectiviteit gemiddeld
	tP	Zie effectiviteit gemiddeld
Overige verwijdering/effect		Kan gecombineerd worden met N verwijdering (10-60%) en deeltjesverwijdering (30-90%)
Gemiddelde concentratie P in effluent	oP	<0,2 mg P/l
	tP	<0,2 mg P/l

Tabel 30: Detailtabel effecten Zuivering bij gemalen.

Investeringskosten	Hoog per unit: 84 tot 625 euro per 100 m3/hr
Operationele kosten	Hoog per unit: 15000 tot 80000 euro per jaar
Ruimtebeslag	Sterk variërend per methode: klein (1-15 m2/100 m3/h) tot groot (225 tot 650 m2/100 m3/h)
Benodigd ijzerzand (5 ha)	Benodigde materialen sterk afhankelijk per methode
Afschrijvingsperiode	Niet bekend
Totaalkosten	6-40 euro/kg P

Tabel 31: Detailtabel kosten Zuivering bij gemalen.

Robuustheid	Voordeel is dat vanwege opschaling gekozen kan worden voor hoger technologische, voor rwzi-schaal bewezen zuiveringstechnologie. Nadelen zijn het feit dat er weinig praktijkervaring is op deze schaal (alleen haalbaarheid) en dat de gemalen alleen bij piekafvoeren op vol debiet draaien. Een uitzondering hierop vormt de boerenslootmethode, die wel op deze schaal is toegepast.
Randvoorwaarden	Het gemaal moet zich lenen voor inpassen van zuiveringstechnologie. Sommige technologieën werken met het laten uitvlokken en bezinken van fosfaat: hiervoor is ruimte nodig in de buurt van het gemaal.
Praktijkrijpheid	De systemen zijn praktijkrijp in die zin dat er gekozen kan worden voor op rwzi-schaal bewezen technologie. Minder rijp is toepassing op deze schaal en plaats.
Overig	De methode heeft als voordeel dat een bewezen intensieve waterzuiveringstechnologie gekozen kan worden. Van de boeren wordt geen inspanning vereist, van de waterbeheerder wel. Vanwege de lokale toepassing blijft de omgevingsimpact beperkt. Deze impact kan wel groot zijn op de specifieke locatie waar de methode wordt toegepast: daar moet in een aantal van de gevallen een duidelijk zichtbaar reactorsysteem worden neergezet. Alleen het water dat de boezem instroomt wordt gezuiverd, het water in het overige deel van het systeem niet.

Tabel 32: Detailtabel toepasbaarheid Zuivering bij gemalen.

5.6.1 SAMENVATTENDE BEOORDELING

Zuivering, kosten en ruimtebeslag
Redelijke rendementen en lage effluentconcentraties zijn in theorie haalbaar. Wel verschilt dit per methode: sommige methoden verwijderen vooral vrij fosfaat, anderen juist gebonden fosfaat. Ondanks de hoge investerings- en onderhoudskosten, zijn de totaalkosten in Euro/kg P niet extreem hoog door opschaling.

Het ruimtebeslag varieert per uitvoering. Bij de varianten die met een reactor werken, is het ruimtebeslag klein. Bij de variant langzaam zandfilter met ijzer en kalk is het ruimtebeslag groter. Bij de variant boerenslootmethode is veel ruimte nodig voor het uitvlokken en bezinken, maar wanneer deze ruimte gevonden kan worden in beschikbare langzaam stromende plassen, is dit geen probleem.

Randvoorwaarden
De twee belangrijkste randvoorwaarden zijn ruimte en beheer. Afhankelijk van de gekozen variant, moet de ruimte voor het in gebruik nemen van een zuiverend gemaal beschikbaar zijn.
Wanneer gekozen wordt voor zuivering bij een gemaal, dan betekent dit dat het op deze plek mogelijk moet zijn om de benodigde technologische ingrepen te doen.

Praktijkrijpheid
In principe is zuivering bij gemalen praktijkrijp. Een groot nadeel is dat er nog weinig praktijkervaring is. Het effect op de boeren is klein, van het waterschap daarentegen wordt een hoge inspanning vereist. Juridisch gezien vallen beheer en effecten geheel onder verantwoordelijkheid van de waterschappen.

Samenvattend
Zuivering bij gemalen kan een interessante optie zijn op een beperkt aantal punten waarbij gecontroleerd en op grote schaal water gezuiverd moet worden. Het grootste nadeel is de beperkte praktijkervaring.

5.7 HELOFYTENFILTERS

We baseren de beoordeling van helofytenfilters voornamelijk op de studies naar het functioneren van Hollands Bloementuin zoals uitgevoerd door Grontmij (Grontmij 2008, 2012A en 2012B).

Effectiviteit gemiddeld	oP	-
	tP	0-30% (sterk wisselend; bij hoge invoerconcentraties hogere verwijderingspercentages)
Overige verwijdering/effect		N: 7-34%
Gemiddelde concentratie P in effluent	oP	Bestrijdingsmiddelen: 12-40%
	tP	Afhankelijk van invoerconcentratie

Tabel 33: Detailtabel effecten Helofytenfilters

Investeringskosten (per 5 ha)	100.000 euro (uitgaande van 10% helofytenfilter).
Operationele kosten	2.500 - 5.000 euro per jaar (afhankelijk van de maaimethode).
Ruimtebeslag	1-5 ha (ca. 10% van te behandelen gebied).
Benodigd ijzerzand (5 ha)	Wordt niet standaard toegepast. Echter, vanwege de geringe biologische verwijdering van P zijn chemisch bindende toeslagstoffen aan te raden. Dit wordt in de praktijk ook bij helofytenfilters toegepast.
Afschrijvingsperiode	50 jaar.
Totaalkosten	4.500 – 7.000 euro/5 ha.

Tabel 34: Detailtabel kosten Helofytenfilters.

Robuustheid	In principe zijn helofytenfilters als systeem robuust. De verwijdering kan echter sterk fluctueren en is sterk afhankelijk van onderhoud.
Randvoorwaarden	Toepassing betekent wel committeren aan onderhoud bijhouden van vegetatieontwikkeling en uit ontwikkelen van het watersysteem. Een belangrijke randvoorwaarde is de beschikbaarheid van voldoende oppervlak.
Praktijkrijpheid	Is praktijkrijp, maar een goede analyse van het watersysteem en het passend maken van watersysteem als aanvoergebied voor helofyten is een belangrijke faalfactor.
Overig	De methode leent zich uitstekend als doelen gecombineerd worden, zoals natuurfunctie, berging van water, stapsteen of een refugium voor biodiversiteit die niet heel veel eisen stelt aan waterkwaliteit. Dit is een soort kunstmatig moeras met ook die functie. Wel kost de maatregel veel ruimte en dat is duur in bollengebieden. Interessant is het niet alleen zuiveren van nutriënten, maar ook andere stoffen.

Tabel 35: Detailtabel toepasbaarheid Helofytenfilters.

5.7.1 SAMENVATTENDE BEOORDELING

Zuivering
Helofytenfilters zijn onder gecontroleerde omstandigheden een goed middel om nutriënten en andere stoffen uit het water te verwijderen. In de praktijk hebben ze echter een sterk wisselend effect op de waterkwaliteit. Dit heeft verschillende oorzaken. Helofytenfilters functioneren het best als er een constante stabiele aanvoer is van water met eenzelfde hoge nutriëntenconcentratie. In de praktijk is vaak sprake van pulsen door regenval, of gebrek aan water. In bollengebieden is de water aan- en afvoer vaak zo goed geregeld dat er in droge periodes geen water uit de bollenvelden komt. Wanneer het regent, is er sprake van een puls aan relatief vuil water. In de praktijk verschilt daardoor de verwijdering per filter en per stof. Verwijdering van fosfaat is goed mogelijk, maar kan sterk fluctueren en is bovendien sterk afhankelijk van het beheer van het watersysteem en vigerende concentraties in het water. De efficiëntie is hoger bij hoge invoerconcentraties. Stikstof kan ook door helofytenfilters verwijderd worden, maar hiervoor gelden dezelfde kanttekeningen als voor fosfaat.

Randvoorwaarden
De twee belangrijkste randvoorwaarden zijn ruimte en beheer. Helofytenfilters hebben een relatief groot oppervlak nodig. Daarom lenen ze zich het beste voor de behandeling van een groter oppervlak. Daarnaast is het juiste beheer nodig voor het goed functioneren van helofytenfilters. Dit dient goed ingebed te worden in de beheercyclus van de beheerder om succesvol te zijn in de nutriëntenverwijdering.

Praktijkrijpheid
Wat betreft het algemeen functioneren zijn helofytenfilters praktijkrijp. Zowel in Nederland als in het buitenland is al veel ervaring opgedaan. Wat betreft de inpassing in de Bollenstreek van het hoogheemraadschap van Rijnland is nog wel verdere praktijkrijpheid vereist, in die zin dat het watersysteem op potentiële locaties moet matchen met de eisen die helofytenfilters stellen.

Overig
Als het alleen om de verwijdering van fosfaat in de Bollenstreek gaat, zijn helofytenfilters niet aantrekkelijk: de verwijdering van P is sterk wisselend, het vereiste oppervlak is groot en de maatregel vereist veel en specifiek beheer. De effectiviteit kan mogelijk verhoogd worden door het toevoegen van fosfaatbindende toeslagstoffen. Helofytenfilters bieden een voordeel wanneer functies gecombineerd kunnen worden, vooral wanneer ecologische meerwaarde gewenst is.

5.8 BRONMAATREGELEN

Naast de hiervoor beschreven end-of-pipe maatregelen kan de uitspoeling van P ook worden beperkt door de aanvoer van P naar de bodem te beperken. Mogelijkheden om de aanvoer van P te beperken zijn o.a. het gebruik van P armere meststoffen of door bijvoorbeeld de teelt niet meer op de bodem uit te voeren zoals onderzocht in het onderzoeksprogramma “teelt de grond uit”. Bij het verminderen van de aanvoer van P naar de bodem moet er wel rekening gehouden worden met het feit dat de reeds aanwezige hoeveelheid P in de bodem gedurende een lange tijd kan blijven uitspoelen waardoor effecten van een dergelijke maatregel pas na langere tijd merkbaar zullen worden.

5.8.1 ORGANISCHE MESTSTOFFEN

Door Bodemdienst van Dam is een beperkte scenariostudie uitgevoerd naar de effecten van het gebruik van P-arme organische bemesting.

Bij de studie is uitgegaan van een voorbeeldbedrijf met een bepaalde gewasteelt (hyacint, dahlia, tulp en narcis) op een duinzandgrond met een bepaalde fosfaattoestand (zie bijlage X). Dit betekent dat de cijfers uit de studie niet algemeen geldig zijn en toepasbaar zijn op een bedrijf met bijvoorbeeld andere gewassen en of een andere P-toestand van de bodem. De studie geeft echter wel inzicht in de trends van de geëvalueerde maatregelen. Er is nog geen directe relatie te leggen tussen de resultaten uit deze studie en een vermindering van de uitspoeling. Daarvoor moet ook rekening gehouden worden met de hoeveelheid P die al in de bodem aanwezig is en de hydrologie van de percelen waarop de maatregel toegepast wordt. Het is nu dus niet mogelijk om de effectiviteit van de maatregel te kwantificeren. Modelberekeningen kunnen een indicatie geven over de verandering in de P-uitspoeling in de tijd. De uitspoeling op lange termijn is maximaal gelijk aan het overschot aan P dat aan de bodem toegediend wordt. Dit overschot is de balans van de totale hoeveelheid P die aangevoerd wordt minus de afvoer door gewasopname. De effectiviteit van de maatregel is dus maximaal gelijk aan het verschil in overschot tussen de gekozen maatregel (scenario) met het basisscenario. De resultaten van de scenariostudie zijn samengevat in onderstaande tabel.

	netto aanvoer P stro (kg P/ha)	aanvoer P org. meststoffen (kg P/ha)	totale aanvoer organisch P (kg P/ha)	aanvoer kunst-mest P (kg P/ha)	totale aanvoer P (kg P/ha)	afvoer P (kg P/ha)	P overschot (kg P/ha)	potentiële verlaging (mg P/L)	kosten (euro/ kg P)
Basisscenario	7	52	59	0	59	19	40	0	-
Stro niet afvoeren	9	44	53	0	53	19	35	1,25	-15
Groencompost	7	25	32	11	44	19	25	3,75	12
Groenbemester	7	51	58	0	58	19	39	0,25	198
Eigen compost	7	57	64	0	64	25	39	0,25	76
Combinatie	9	20	29	15	44	19	25	3,75	18

Tabel 36: Overzicht van fosforaanvoer- en afvoerposten bij het voorbeeld bedrijf en de verschillende scenario's (uit studie Bodemdienst van Dam) met toevoeging van de potentiële verlaging van de P concentratie in uitspoelend water en kosten van de verlaagde P input (Euro/kg P).

Effectiviteit van de maatregel

Uit de tabel blijkt dat de potentieel meest effectieve maatregel het gebruik van groencompost is. Wanneer we uitgaan van een neerslagoverschot van 400 mm/jaar en we aannemen dat al dit water via de bodem afgevoerd wordt naar het oppervlaktewater, kan de potentiële verlaging van de concentratie in het uitspoelende water ten opzichte van het standaardscenario berekend worden. Het is goed mogelijk dat met het standaardscenario de fosfaatuitspoeling in de tijd nog blijft toenemen. De potentiële verlaging mag dus niet van de huidige concentratie in het uitspoelend water afgetrokken worden.

Kosten van de maatregel

De kosten om een verlaging van de P-input, en dus van de potentiële uitspoeling, zijn berekend uit de extra kosten t.o.v. het standaardscenario gedeeld door de verminderde P-input. Uit de tabel blijkt dat het niet afvoeren van stro een beperkte vermindering geeft van de P-input maar ook kosten bespaart. De meest effectieve maatregel, het toepassen van groencompost, kost ongeveer 12 Euro/ kg P. Deze kosten kunnen vergeleken worden met de kosten van de end-of-pipe maatregelen.

Hierbij moet echter wel rekening gehouden worden met het feit dat het hierbij om een vermindering van de P-input gaat en dit niet een op een de vermindering in uitspoeling geeft. De maatregel om de P input te verlagen door het gebruik van groencompost is eenvoudig in te voeren. Een mogelijke belemmering is de beperkte hoeveelheid groencompost.

Robuustheid	De methode is robuust. Het betreft een eenvoudige maatregel die door de teler uit te voeren is.
Randvoorwaarden	Beschikbaarheid van groencompost. Wanneer de tuinbouw op grote schaal op bemesting met groencompost overstapt, kan er schaarste ontstaan. De maatregel werkt alleen voor gronden waarvan de huidige fosfaattoestand hoger is dan welke op termijn met de maatregel bereikt zal worden.
Praktijkrijpheid	De methode is rijp om in de praktijk toegepast te worden.
Overig	De methode heeft alleen effect op uitspoeling van P vanuit de bovengrond. De maatregel heeft geen effect op de uitspoeling van fosfaatrijk kwelwater. Het onderwerken van grote hoeveelheden stro kan door stikstofimmobilisatie het teeltresultaat negatief beïnvloeden.

Samenvattende beoordeling
Van de maatregelen om de aanvoer van P te verminderen is het gebruik van groencompost het meest effectief. Over de effectiviteit met betrekking tot de vermindering van de uitspoeling kunnen geen uitspraken gedaan worden. Hiervoor zijn modelberekeningen nodig met een model dat geschikt is voor berekeningen voor kleine regio's. De maatregel heeft zeker invloed op de toekomstige uitspoeling van P en zal de inzet van end-of-pipe maatregelen in de toekomst verminderen.

5.8.2 TEELT DE GROND UIT

Een potentieel interessante manier om de emissie van nutriënten, waaronder P, naar het oppervlaktewater te verminderen is door het loskoppelen van de teelt en bodem. Door te telen op substraat of een dunne laag bodemmateriaal, kunnen de toegediende nutriënten optimaal gecontroleerd en benut worden. Het onderzoeksprogramma "Teelt de grond uit" gefinancierd door het ministerie EZ, het Productschap Tuinbouw en diverse andere financiers, beoogt de ontwikkeling van rendabele teeltsystemen voor de vollegrondstuinbouw (groenten, bloembollen, boomteelt, fruit, zomerbloemen en vaste planten) die voldoen aan de Europese regelgeving voor de waterkwaliteit. In de afgelopen jaren zijn door PPO verschillende varianten van teelt de grond uit voor de bloembollenteelt getest (de Kool et al., 2013). Uitgangspunt is dat naast een sterke emissiebeperking van o.a. nutriënten, de nieuwe teeltmethoden belangrijke voordelen opleveren voor de ondernemers zoals een grotere arbeidsefficiëntie, betere kwaliteit, een betere controle van ziektes (schimmelinfecties e.d.) en nieuwe marktkansen.

De evaluatie met betrekking tot de mogelijkheden om teeltmethoden van teelt de grond uit in te zetten om de emissie van fosfaat uit de bloembollenteelt te beperken, zijn gebaseerd op de rapportage door PPO (de Kool et al., 2013) en aanvullende informatie door Peter Vreeburg (PPO, Lisse). Tot nu toe zijn de volgende teeltmethoden getest:

- Teelt op substraatbedden (lelie en hyacint);
- Teelt op water in vijvers met voedingsbodem (hyacint);
- Volveldse teelt in een teeltlaag van 45 cm op afgedekte ondergrond (hyacint).

De belangrijkste conclusies met betrekking tot het toepassen van deze teeltmethoden met als doel het beperken van de emissie van nutriënten zijn:

- De methoden zijn in deze fase van het onderzoek nog niet geëvalueerd op de emissiereductie van nutriënten naar het oppervlaktewater. De efficiëntie van de maatregel m.b.t. reductie van de emissie van P naar het oppervlaktewater kan dus nog niet gekwantificeerd worden;
- Er zijn nog geen praktijkrijpe methoden voor het toepassen van teelt de grond uit in de bloembollenteelt;
- De ontwikkelde methoden zijn tot nu toe erg duur en de meerwaarde is nog te beperkt;
- De verwachting is dat de ontwikkeling van economisch rendabele methoden voor het toepassen van teelt de grond uit niet op korte termijn (binnen vijf jaar) te verwachten zijn.

Samenvattende beoordeling

Met de huidige stand van zaken bieden teeltmethoden volgens teelt de grond uit geen mogelijkheden om de emissie van nutriënten vanuit de bollenteelt te beperken. Een verdere ontwikkeling hiervan in economisch rendabele technieken is hiervoor een vereiste.

6 Conclusies en discussie

6.1 EFFECTIVITEIT VAN DE MAATREGELEN

In de voorgaande vergelijking zijn toepasbare maatregelen beoordeeld op effectiviteit, kosten en toepasbaarheid. Hiermee ontstaat een set aan mogelijke maatregelen waaruit kan worden gekozen.

Fosfaatbindende drains zijn effectief en relatief goedkoop. De maatregel heeft als voordeel dat er bovengronds geen ruimte voor nodig is, maar als nadeel dat er geen controle op de doorlatendheid uitgeoefend kan worden en alleen het drainwater gezuiverd wordt.

De Puri-Oever is effectief, en iets duurder. De maatregel heeft als voordeel dat al het water dat van een perceel afkomt behandeld kan worden en dat de maatregel goed toegankelijk is. Een nadeel kan zijn dat het filter een barrière kan opwerpen voor de afvoer van water via de slootwand.

De Nutriëntenstuw is effectief maar relatief duur in de huidige vorm. Voordeel is dat deze maatregel op een centrale locatie geplaatst kan worden en eenvoudig beheerd kan worden. Nadeel is dat de maatregel relatief intensief beheerd moet worden en geen piekafvoeren kan zuiveren.

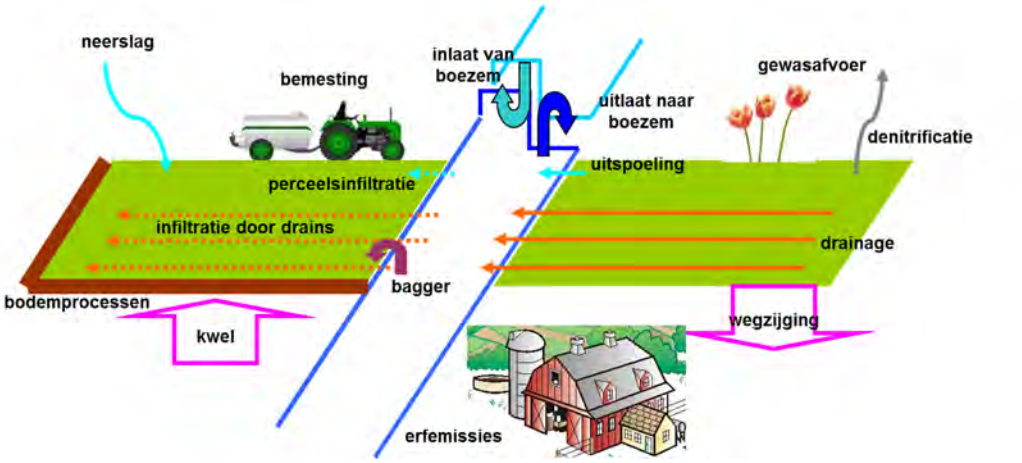
Zuivering bij gemalen lijkt effectief te kunnen zijn en is relatief goedkoop. Er is echter nog geen praktijkervaring (behalve met dosering van ijzer(III)chloride), waardoor de kosten en effectiviteit nog onzeker zijn.

Helofytenfilters zijn niet erg effectief. Doordat een groot oppervlak nodig is, worden de kosten sterk bepaald door de beschikbare ruimte. Helofytenfilters zijn alleen aantrekkelijk wanneer de zuiveringsefficiëntie verhoogd kan worden of de maatregel gecombineerd kan worden met andere doelen zoals natuurontwikkeling.

De kosten van P verwijdering op perceelniveau zijn relatief laag ten opzichte van een vierde trap van een rioolwaterzuiveringsinstallatie. Daar variëren de kosten van € 34 per kg P voor een grote installatie tot € 134 per kg P voor een kleine installatie (Van Soesbergen et al., 2007).

6.2 ZUIVERINGSLOCATIE

Een belangrijk verschil tussen de methoden is de plaats van zuivering. De locatie is in grote mate bepalend voor de toepasbaarheid. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van Figuur 42, waarin een aantal belangrijke routes en punten zijn aangegeven waar maatregelen toegepast kunnen worden.



Figuur 42: Mogelijke aanvoer- en afvoerroutes van nutriënten op en bij het bollenbedrijf (bron: hoogheemraadschap van Rijnland)

De verschillende maatregelen werken allemaal op een andere locatie in het watersysteem. Hierdoor zal het effect van de maatregelen verschillen, waardoor het maximale effect op een andere locatie zal plaatsvinden:

- Fosfaatbindende drains pakken de vracht het dichtst bij de bron aan. De drains zijn echter alleen toepasbaar op percelen die gedraineerd kunnen worden;
- De Puri-Oever is toepasbaar op een niveau verder in de hydrologische weg; de overgang perceel-sloot;
- De Nutriëntenstuw is toepasbaar op weer een niveau verder; aan het einde van een complete sloot;
- Helofytenfilters zijn toepasbaar aan het einde van een aantal percelen, en zijn daarmee vergelijkbaar met de nutriëntenstuw;
- Zuivering bij gemalen is tenslotte een toepassing bij de uitwatering van een volledige polder.

In het algemeen kan worden gesteld dat bij de bron de hoogste nutriëntenconcentraties voorkomen. Hierdoor kunnen nutriënten het meest effectief bij de bron verwijderd worden. De inzet beperkt zich dan wel tot een beperkt aantal bronnen. Daarnaast is het niet overal mogelijk om dicht bij de bron het water te zuiveren. Hierdoor zal de keuze voor een maatregel per locatie verschillen.

6.3 OVERWEGINGEN EN RANDVOORWAARDEN BIJ KEUZE VAN MAATREGELEN

6.3.1 BRON OF EFFECT

Bovenstaande maatregelen zijn alle effectgerichte maatregelen. Daarnaast zijn ook brongerichte of procesgerichte maatregelen mogelijk. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van fosfaatarme organische meststoffen. Hiervoor is door Annemarie van Dam een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (Hoofdstuk 5.8 en Bijlage 4).

Bronmaatregelen kunnen een positief effect hebben wanneer één of enkele bronnen verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van de fosfaatbelasting. Een grote uitdaging daarbij is echter het behouden van een rendabele bedrijfsvoering. Daarnaast zijn er nog een aantal inhoudelijke uitdagingen, zoals het vinden van methoden voor het produceren van fosfaatarme meststoffen.

6.3.2 EFFECT VAN KWEL

Fosfaat kan via verschillende bronnen in het oppervlaktewater terechtkomen. Eén manier waarop dat kan, is door de belasting via de teelt, een andere is via kwel. De verhouding tussen de bijdrage van kwel en de belasting van landgebruik kan per gebied verschillen.

Een voorbeeldstudie naar de invloed van kwel is uitgevoerd voor een bollengebied in Noord-Holland (Van Boekel, 2011). Hieruit bleek dat de verdeling van de herkomst van P over verschillende bronnen sterk verschilt per gebied (bollengebied, droogmakerij, laagveengebied). In deze studie komt het overgrote deel van de P-belasting in het bollengebied via antropogene bronnen. Binnen die bronnen vormen inlaatwater en uit- en afspoeling de belangrijkste bronnen. Deze uitkomsten zijn zeer gebiedsspecifiek en kunnen dan ook voor het gebied van Rijnland anders zijn en zelfs per deelregio verschillen.

Voor de bollenpercelen bij Voorhout is informatie gebruikt uit de voorstudie die voorafgaand aan de veldpilots is uitgevoerd (Groenendijk et al., 2009) alsmede het monitoringsonderzoek dat in de eerste fase van dit project is uitgevoerd (hoogheemraadschap van Rijnland, 2013). De mate van kwel verschilt binnen het beheergebied van Rijnland van gebieden met kwel tot gebieden met wegzijging.

Het effect van bronmaatregelen neemt sterk af wanneer kwel bijdraagt aan de P-belasting. De geanalyseerde pilotmaatregelen zullen echter effectief blijven bijdragen aan het verkleinen van de P-belasting. De exacte invloed van kwel op de maatregelen zal beperkt verschillen tussen de maatregelen, doordat een deel van de kwel direct in de sloten terecht komt. Niet alle maatregelen kunnen dit deel van het fosfaat (volledig) zuiveren.

6.3.3 BODEMVOORRAAD

Het is bekend dat er in de bodem van de bollenstreek een grote voorraad fosfaat aanwezig is die in de afgelopen decennia is opgebouwd. Ook wanneer de bronnen van fosfaat nu weggenomen zouden worden, zou deze voorraad nog lange tijd bijdragen aan de belasting van het oppervlaktewater.

Het type bron bepaalt mede de keuze van de maatregel en de effectiviteit van die maatregel. Onderstaande tabel geeft hiervoor een indicatie.

	Bronnen / emissieroutes	Effect bronreductie	Type emissie	*Achterliggende bronnen*
Beïnvloedbaar, direct effect	RWZI's	Direct effect	Effluentlozing	Huishoudelijk afvalwater, lozingen op riool
	Industriële lozingen	Direct effect	Effluentlozing	Industrie
	Landbouw direct	Direct effect	Diffuse lozingen	Meemesten sloten, erafspoeling, glastuinbouw
	Waterinlaat	Direct effect	Waterinlaat vanuit boezem, Rijkswateren e.a.	Bronnen buiten het gebied
	Overige bronnen	Direct effect	Punt en diffuus	Ongerioleerde lozingen, overstorten
Beïnvloedbaar, effect korte en lange termijn	Actuele bemesting	Korte en lange termijn	Afspoeling en uitspoeling (sloten, greppels, buisdrainage	Huidige grondgebonden landbouw
	Nalevering bodemcomplex landbouwbodems	Lange termijn (via uitlogen)	Uitspoeling (sloten, greppels, buisdrainage)	Geogeen, historische bemesting kwel en depositie
Bronreductie niet beïnvloedbaar [1)]	Atmosferische depositie open water en bodem	Niet haalbaar	Depositie open water en natuur/landbouw bodems	Luchtemissies landbouw, verkeer, industrie, energie, buitenland
	Kwel waterlopen	Niet haalbaar	Kwel direct naar waterlopen en naar bodem	Geogeen, mogelijk verhoogd door antropogene invloed
	Infiltratie oppervlaktewater	Niet haalbaar	Diffuse infiltratie lokaal oppervlaktewater	Lokale en bovenstroomse bronnen
	Natuurgronden		Diffuse uit- en afspoeling	Geogeen, door antropogee invloed verhoogde depositie, kwel

Figuur 43: Bronnen voor nutriënten en mate van beïnvloedbaarheid. (Bron: Van Boekel, 2011)

Door de grote bodemvoorraad en andere niet beïnvloedbare bronnen blijft het nodig om brongerichte maatregelen aan te vullen met effectgerichte maatregelen. Door de effectgerichte maatregelen is het mogelijk om op de "korte" termijn een verbetering te realiseren die de periode kan overbruggen tot de brongerichte maatregelen effectief worden.

6.4 AANPAK BIJ GEBIEDSSPECIFIEKE SELECTIE VAN MAATREGELEN

Uit het bovenstaande wordt duidelijk dat zowel bron- als effectgerichte maatregelen nodig zijn. Het verschil in bijdrage tussen deze maatregelen kan echter per gebied variëren door de verschillen in de typen bronnen. Het gaat hierbij voornamelijk om verschillen in de bijdrage door kwel en de bodemvoorraad.

Bij de keuze van effectieve maatregelen is de volgende aanpak aan te bevelen:
1. Opstellen van een goede analyse van waterkwaliteitsdoelen en het gebied (watersysteem en landgebruik);
2. Selecteer op basis van deze doelen en randvoorwaarden de meest passende maatregelen;
3. Inpassing van de maatregelen in het gebied;
4. Beoordeling van effectiviteit van maatregelen.

Dit kan door middel van meten en monitoren, maar ook via modellen. Ook het maatschappelijke draagvlak van de verschillende maatregelen is hierbij belangrijk.

Internationale ervaringen

Ook in het buitenland vindt onderzoek plaats naar het terugdringen van de belasting met P van het oppervlaktewater. Hier zijn recent instrumenten ontwikkeld voor het ontwerp en de selectie van maatregelen. Een aantal voorbeelden wordt hieronder weergegeven.

Onderzoek naar fosfor-verwijderende structuren door Chad Penn en Josh McGrath
Binnen dit onderzoek zijn eenvoudige bakken ontwikkeld gevuld met staalslakken die fosfaat uit afstromend water kunnen verwijderen. Interessant is ook de software die ontwikkeld wordt, die helpt bij de keuze en ontwerp van een maatregel. Website: http://p-structure.blogspot.nl/.



Phosphoreduc
Een bedrijf dat technieken ontwikkelt en verkoopt om fosfor te verwijderen met behulp van fosfaatbindend filtermateriaal: www.phosphoreduc.org.



Supreme tech project
Een Deens project waarin maatregelen voor verwijdering van P in het veld getest zijn: www.supremetech.dk.



Farmscoper
In Groot-Brittannië is een beslissingsondersteunend instrument ontwikkeld om de effectiviteit van maatregelen tegen diffuse belasting te beoordelen. http://www.adas.uk/Services/Service/farmscoper-397.

6.5 BESCHIKBARE HOEVEELHEID IJZERZAND

De hoeveelheid ijzerzand dat geschikt is voor fosfaatverwijdering is in Nederland beperkt. Hierdoor is het waarschijnlijk niet mogelijk om grootschalige fosfaatverwijdering op te zetten in alle gebieden.

Het ijzerzand dat wordt geproduceerd is niet allemaal geschikt voor fosfaatverwijdering. Hiervoor is een relatief grof zand nodig om een voldoende hoge doorlatendheid te hebben. Ongeveer 27.000 ton ijzerzand heeft een vastestofgehalte van ca. 30% (Hofman-Caris, 2014) en is daarmee potentieel geschikt voor fosfaatverwijdering. Dit resulteert in een beschikbare hoeveelheid droog ijzerzand van 8.100 ton per jaar.

De benodigde hoeveelheid ijzerzand om water te zuiveren verschilt beperkt tussen de pilot-maatregelen. De nutriëntenstuw gebruikt relatief weinig ijzerzand doordat er geen piekafvoeren worden gezuiverd en een deel van het fosfaat is vastgelegd in de watergang. Verwacht wordt dat er bij deze maatregel minimaal 1.600 kg ijzerzand/ha/jaar nodig is voor de fosfaatverwijdering.

Dit houdt in dat het water van ongeveer 5.000 ha gezuiverd kan worden. In Nederland wordt ongeveer 23.000 ha gebruikt voor bloembollenteelt (CBS, 2014). Wanneer het beschikbare ijzerzand alleen voor de bloembollenteelt wordt ingezet betekent dit dat ongeveer 21% van het water gezuiverd kan worden. Er moet daarom bepaald worden welke gebieden prioriteit krijgen bij de fosfaatverwijdering met ijzerzand. Een mogelijke keuze kan hierbij de bloembollenteelt op zandgrond zijn.

In de huidige situatie is slechts een beperkt deel van het ijzerzand geschikt voor fosfaatverwijdering. Ook tijdens de pilot is geconstateerd dat zelfs niet iedere vorm van ijzerzand een voldoende hoge doorlatendheid heeft (Hoofdstuk 3.2). In de toekomst kan de beschikbaarheid van ijzerhoudend filtermateriaal met een goede doorlatendheid echter toenemen door de ontwikkeling van ijzerpellets. Deze ijzerpellets worden gemaakt uit ijzerslib en hebben vergelijkbare adsorptie-eigenschappen als ijzerzand (Hofman-Caris, 2014). Hierdoor kan de beschikbaarheid van geschikt filtermateriaal toenemen met 60% en neemt mogelijk ook de doorlatendheid, en daarmee geschiktheid, van het materiaal toe. Verder zou er onderzocht kunnen worden of importeren van ijzerzand uit het buitenland mogelijk en rendabel is.

7 Aanbevelingen

In deze studie is nieuwe kennis ontwikkeld en bestaande kennis verzameld over effectiviteit van verwijderingsmaatregelen voor fosfaat in de Bollenstreek. Het einddoel is ambitieus: het verminderen van de diffuse belasting van het oppervlaktewater totdat de waterkwaliteitsdoelen van de Kaderrichtlijn Water gehaald worden. Daarom is een diepgaande en brede aanpak gekozen: drie innovatieve maatregelen zijn getest, en een scala van mogelijk alternatieven is beoordeeld. Op basis hiervan is beschreven wat de huidige inschatting van de effectiviteit, toepasbaarheid en voor- en nadelen van de verschillende methoden is. Voor het bereiken van de gestelde doelen zijn vervolgstappen nodig. Hoe kan de kansrijkheid van de maatregelen vergroot worden, en welke vervolgstappen in de richting van implementatie kunnen worden genomen?

Kansrijkheid van de maatregelen
Voor de drie in het veld geteste maatregelen is eerder aangegeven welke vervolgstappen genomen dienen te worden (Hoofdstuk 4.1.4, 4.2.4 en 4.3.4). Hieronder worden deze nogmaals kort samengevat:

Met ijzerzand fosfaat-bindende drains:
- Voor een goede werking van de fosfaatbindende drain moet ijzerzand geselecteerd worden met een voldoende hoog ijzergehalte en een voldoende hoge doorlatendheid;
- Verder onderzoek naar de samenstelling van niet-reactief P en naar het mechanisme van de binding van niet-reactief P in verband met het inschatten van de levensduur van de drains;
- Verder onderzoek naar de levensduur van de drains, onder meer naar de potentiële vermindering van de adsorptiecapaciteit voor P door reductie en het vervolgens in oplossing gaan van ijzeroxide van het ijzerzand.

Puri-Oever:
- Onderzoek naar de levensduur van de Puri-Oevers: treedt er verstopping op en wanneer raakt het materiaal verzadigd?
- Verbeter het ontwerp zodat een optimale vorm ontstaat:
  - Optimale plaats: in de watergang of in de oever.
  - Met of zonder buffercompartiment.
  - Met of zonder pomp (en in het geval met pomp: aandrijving door windmolentje of zonnepaneel).

Nutriëntenstuw:
- Ontwikkelen van een “simpelere” nutriëntenstuw, waarbij er voornamelijk aandacht is voor het optimaliseren van het debiet;
- Mogelijkheid onderzoeken om bestaande kleinschalige pompen te gebruiken;
- Mogelijkheid onderzoeken om een windmolentje of zonnepaneel toe te passen;
- De verdichting van het ijzerzand analyseren bij de huidige nutriëntenstuw;
- Onderzoeken of ijzerpellets gemaakt van ijzerslib leiden tot een verbeterde doorlatendheid en daardoor hogere capaciteit.

Algemeen

Samenvattend kan gesteld worden dat het zuiveringsrendement voor alle drie de methoden goed is, maar de uitvoeringsvorm verbeterd kan worden, waardoor ook de kosten verder zullen dalen. Naast de bovengenoemde maatregelen kan zuiveren bij gemalen of bronmaatregelen zoals bemesting met groencompost of fosfaatarme organische meststof een aanvullende maatregel vormen. Tenslotte verdient het aanbeveling om ook recente internationale ontwikkelingen op dit gebied mee te nemen.

Vervolgstappen richting implementatie

Vergroten praktijkrijpheid

In de uitgevoerde pilot is in de praktijk aangetoond dat met ijzerzand fosfaat verwijderd kan worden. Bovendien is gekwantificeerd welk rendement hiermee behaald kan worden en welke kosten hiermee gepaard gaan. Deze pilot-opstellingen moeten echter verder ontwikkeld worden, om de robuustheid en capaciteit verder te vergroten.

- De verschillende toegepaste maatregelen zijn innovatief en nog maar beperkt getest. De verschillende maatregelen dienen in de praktijk verder geoptimaliseerd worden, mede op basis van de maatregel-specifieke aanbevelingen;
- Bij het grootschalig toepassen van de maatregelen zullen mogelijk agrariërs of andere belanghebbenden het beheer en onderhoud van de maatregelen uitvoeren. Hier is nog geen ervaring mee opgedaan. Dit kan gedaan worden door belangenpartijen intensiever bij een mogelijke vervolg-pilot te betrekken, waardoor het draagvlak van de sector zal toenemen.

Maatregelkeuze en effectverwachting

De verschillende maatregelen zijn niet op elke plek toepasbaar en zullen niet overal dezelfde effectiviteit hebben. Daarom verdient het aanbeveling om een beoordeling te maken voor de keuze van maatregelen. Deze beoordeling kan bestaan uit de volgende onderdelen:

- Vaststellen van het doel van de fosfaatverwijdering en de hierbij behorende waterlichamen. Verder inzicht verkrijgen in de specifieke bronnen die deze waterlichamen beïnvloeden en het potentiële resultaat dat voor dit waterlichaam bereikt kan worden;
- Bepalen van de meeste optimale maatregel voor het beperken van de belasting door de verschillende polders/gebieden binnen Rijnland. Hierbij moet naast de belasting van ieder deelgebied ook inzicht gekregen worden in de potentiële inpasbaarheid door gesprekken met beheerders en vertegenwoordigers van de landbouwsector;
- Uiteindelijk kunnen deze onderdelen gecombineerd worden tot een potentiële waterkwaliteitsverbetering voor de specifieke doelgebieden.

Draagvlak en inbedding

Succesvolle toepassing van de maatregelen is afhankelijk van brede steun en actieve betrokkenheid van alle betrokkenen. Daarbij zijn in ieder geval waterschap, agrarische sector, en uitvoerende partijen (aannemers, draineurs, etc.) van belang. Wie daarbij welke rol heeft, kan niet op voorhand gezegd worden. Belangrijk is in ieder geval om in het toewerken naar praktijktoepassing alle relevante partijen te betrekken. Dit vergroot draagvlak, zorgt er voor dat de uiteindelijke oplossing de steun heeft van alle relevante betrokkenen, en garandeert dat alle relevante kennis en ervaring worden meegenomen. Demonstratieprojecten zijn hiervoor een ideaal middel.

8 Referenties

- Bakker, D., L. Osté, G. Roskam, J.P. de Weert en J. Hemelraad. 2011. De Bodem Bedekt; Het onderzoeken en aanbrengen van een fosfaatbindende afdeklaag in de Bergse Voorplas. Deltares rapport 1201913-000.
- Boekel, E. van, 2011. Natuurlijke en antropogene bronnen nutriënten; Bronnen analyse en afleiding natuurlijke achtergrondgehalten nutriënten voor reële KRW Doelen.
- Boorder, N. de, J. Griffioen en W. Twisk. 2010. Gemalen en Zuivering: Een logische combinatie? Rapport I: Gegevensinventarisatie ten behoeve van ontwerpaspecten. Deltares rapport 1202057 "
- Bruning C., B. Pieters, S. Copray en H.A. Rutjes. 2012. Monitoring helofytenfilters Hollands Bloementuin; Zuivering van gewasbeschermingsmiddelen en nutriënten uit het oppervlaktewater. Rapport Grontmij.
- Buma, J., J. Griffioen. 2010. Zuiveren en Gemalen: Een Logische Combinatie? Rapport III: Ruimtebeslag en ruimtelijke inpassing van het zuiveringssysteem. Deltares rapport 1202057 .
- Centraal Bureau voor de Statistiek. Landbouw; gewassen, dieren en grondgebruik naar regio. 2014. http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=80780NED.
- Chardon, W.J. , J.E. Groenenberg, E.J.M. Temminghoff en G.F. Koopmans. 2012. Use of reactive materials to bind phosphorus. J. Environ. Qual. 41:636-646.
- De Kool, S., P. Vreeburg, C. Slootweg, H. Kok, M. Blind, F. Kreuk, 2012. Teelt de grond uit bloembollen. Rapportage onderzoek 2012, 2013. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, onderdeel van Wageningen UR, Lisse.
- Groenenberg, J.E., W.J. Chardon en G.F. Koopmans. 2013. Reducing phosphorus loading of surface water using iron-coated sand. J. Environ. Qual. 42:250-259.
- Groenendijk, P., S.A.M. de Kool, B. van der Grift, R.J. Stuurman en G.M.C.M. Janssen. 2009. Onderzoeksproject KRW-pilot bollensector: Vooronderzoek en plan van aanpak. Alterra-rapport 1947
- Heerdink, R. en J. Griffioen. 2010. Gemalen en Zuivering: Een Logische Combinatie? Rapport IV: kostenberekening voor drie voorbeeldpolders. Deltares rapport 1202057.
- Hofman-Caris, R., W. Siegers, M. de Graaff, O. van der Kolk en J. Hofman. 2014. Pellets van ijzerslib uit drinkwaterproductie verwijderen fosfaat. H2O-Online, 4 november 2014.
- Jonge, M. de, C. Leerlooijer en R. Schaafsma. 2011. Nutriëntenonderzoek Bloembollen, Literatuur inventarisatie ten behoeve van 'Rijn-West KRW Bloembollen.
- Rooden, J.C.A van. 2013. Water- en stofbalans van een bollenperceel. Hoogheemraadschap van Rijnland 13.67703.
- Scherrenberg, S.M. 2011. Reaching ultra low phosphorus concentrations by filtration techniques. PhD Thesis TU Delft.
- Soesbergen, A. van, R. Brouwer, P. Baan, P.J.G.J. Hellegers en N.B.P. Polman. 2007. Assessing the cost-effectiveness of pollution abatement measures in agriculture, industry and the wastewater treatment sec. WEMPA Report 07, Instituut voor Milieuvraagstukken, Amsterdam, LEI, Den Haag.
- Vicente, I. de, P. Hunag, F. Andersen en H. Jense., 2008, Phosphate adsorption by fresh and aged aluminium hydroxide; Consequences for lake restoration. Environ. Sci. Techn. 42:6650-6655.

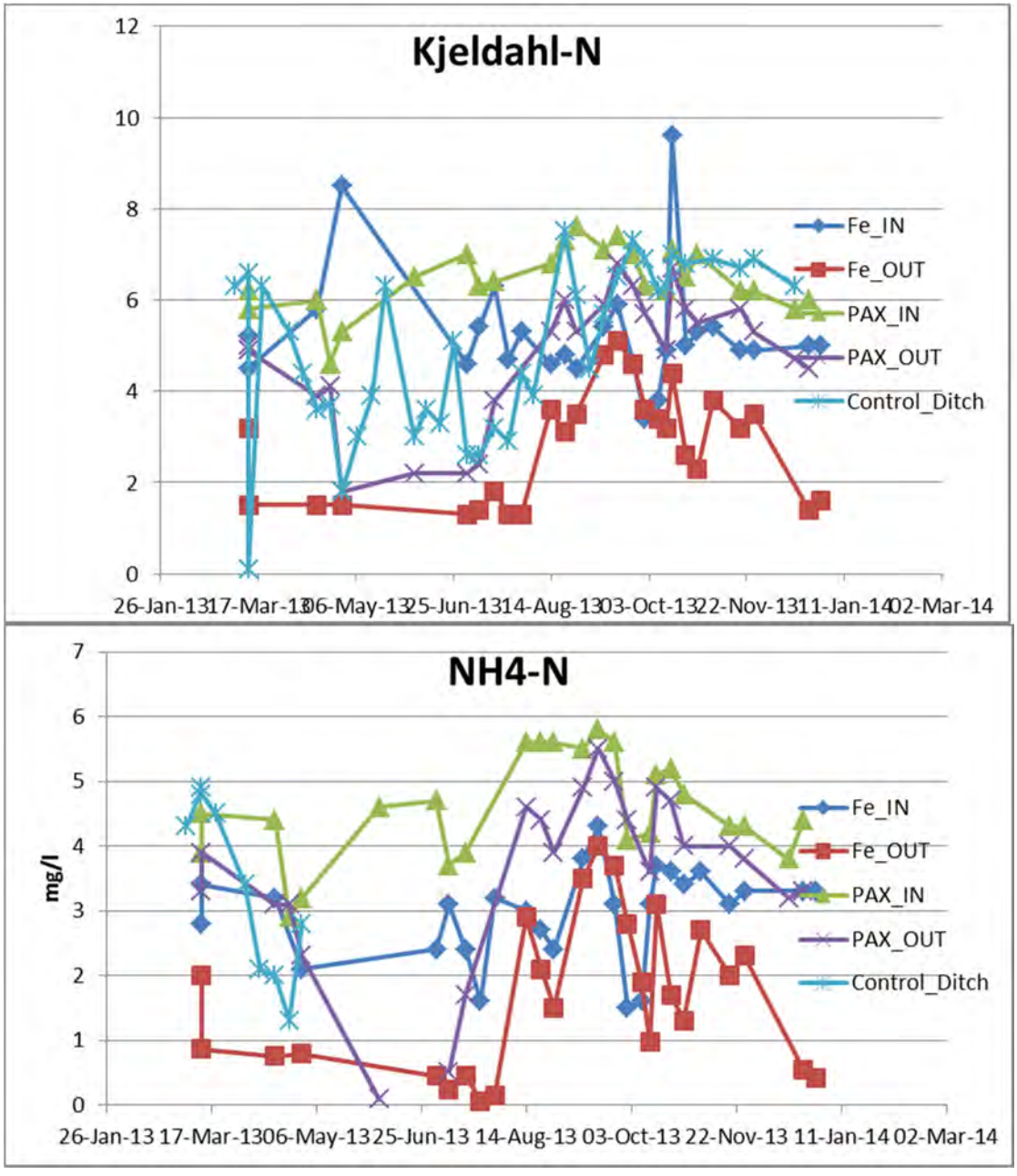
- Voort, J.W., D. Wind, E. Baars. 2010. Gemalen en Zuivering: Een logische combinatie? Rapport II: Technologische en financiële karakterisering zuiveringssystemen.
- Weert, J.P. de, 2012, Afdekken van Spaarbekken de Braakman met zand en PAC; Experimenten ten behoeve van bepaling nalevering fosfaat en mogelijkheden tot afdekken: Spaarbekken De Braakman. Deltares Rapport 1204698.

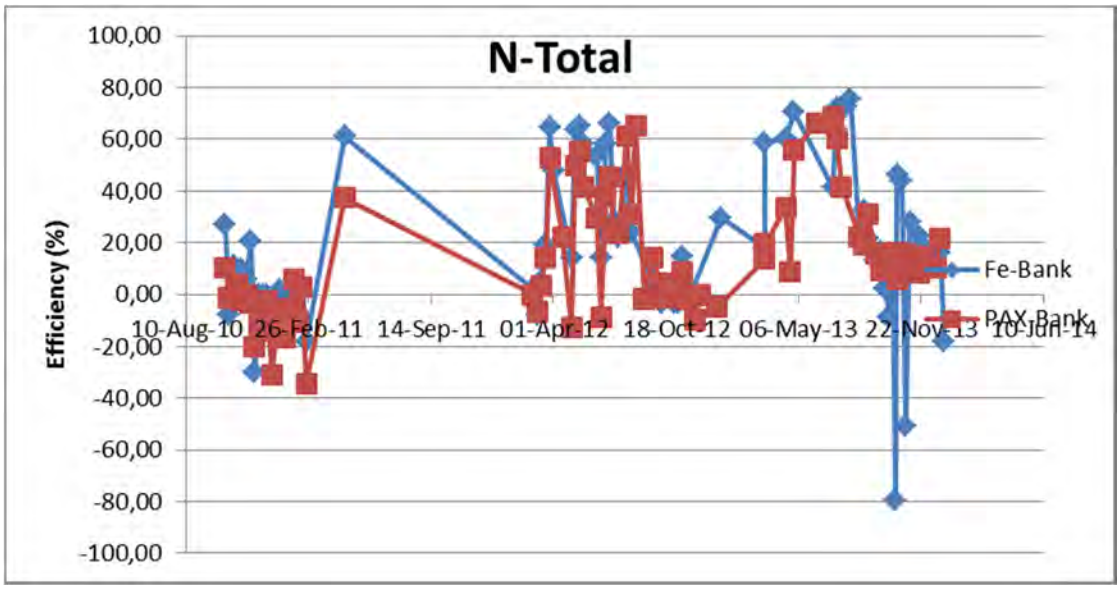
9 Bijlages

1. Fosfaat-bindende drains
2. Puri-Oever
3. Nutriëntenstuw
4. Bijlagen Zuivering met gemalen: factsheets
5. Literatuurstudie effectiviteit fosfaatarme mest

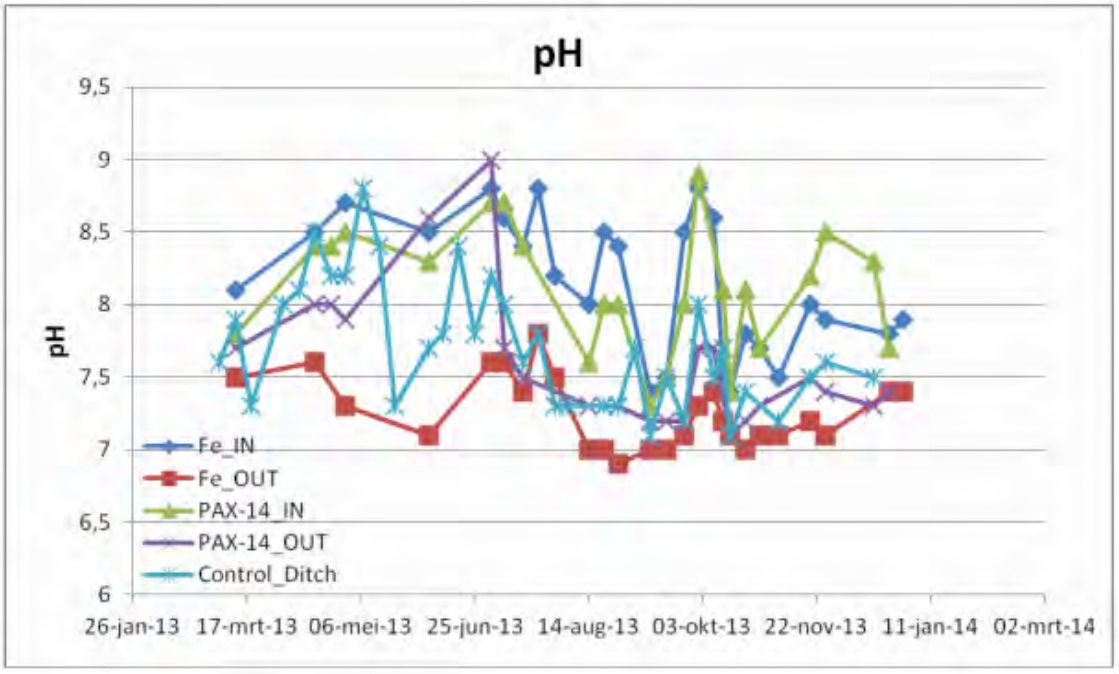
Bijlage 1 Puri-Oever

Stikstof

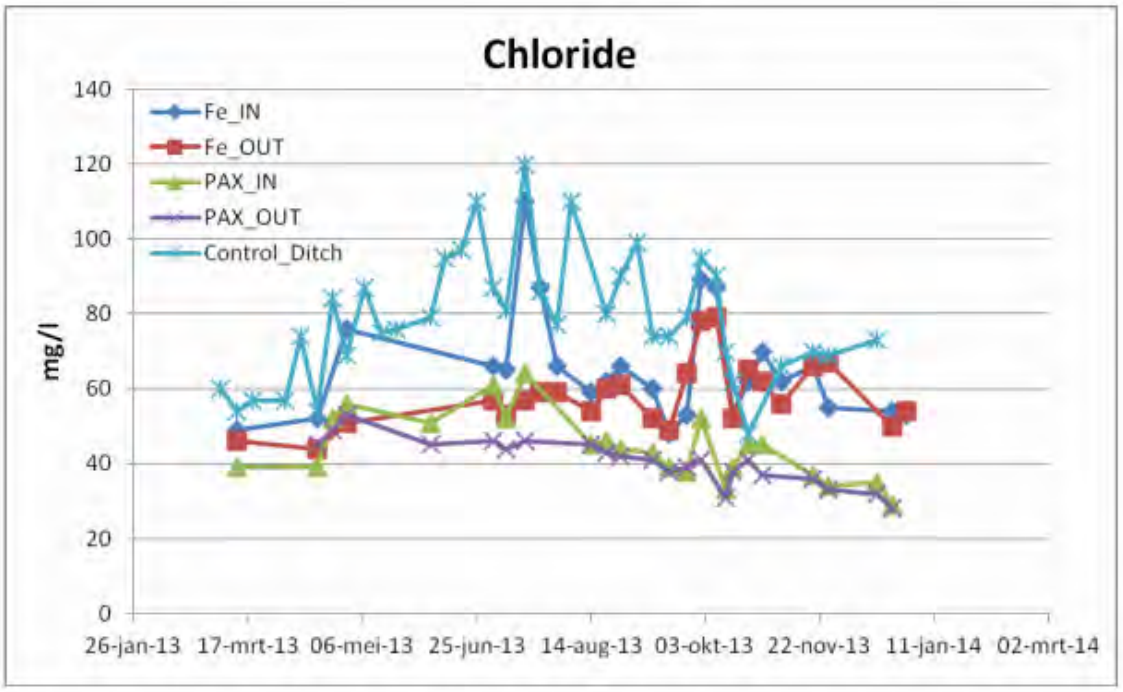



N-Total
Efficiency (%)
100,00
80,00
60,00
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
10-Aug-10
26-Feb-11
14-Sep-11
01-Apr-12
18-Oct-12
06-May-13
22-Nov-13
10-Jun-14
Fe-Bank
PAX-Bank

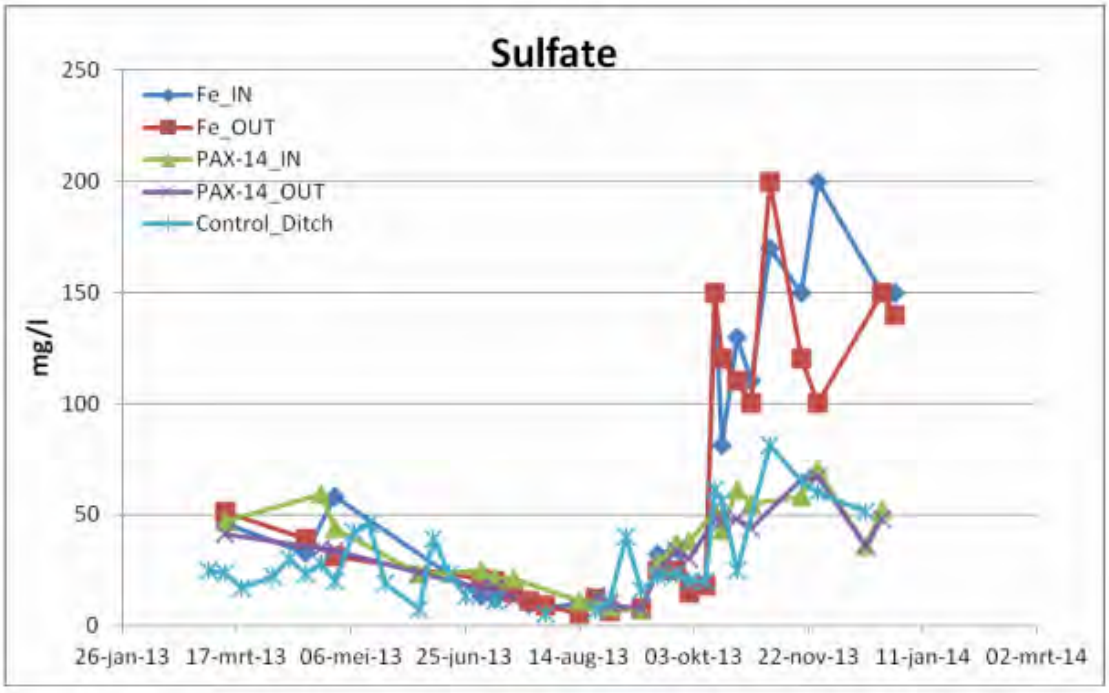
pH


pH
9,5
9
8,5
8
7,5
7
6,5
6
pH
Fe_IN
Fe_OUT
PAX-14_IN
PAX-14_OUT
Control_Ditch
26-jan-13
17-mrt-13
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14
02-mrt-14

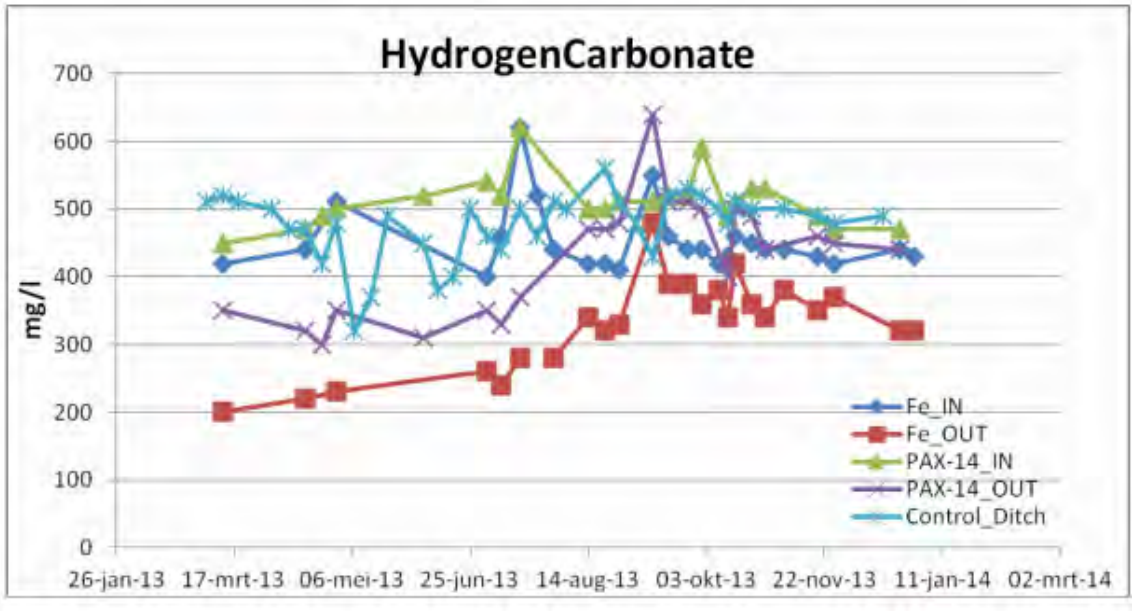
Chloride



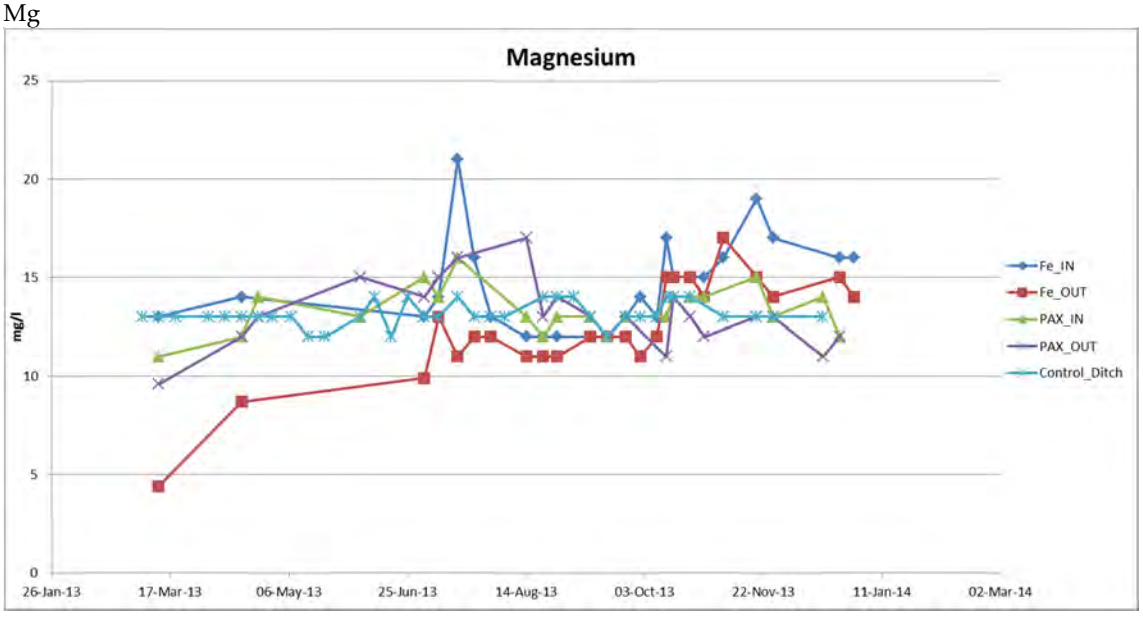
Sulfaat



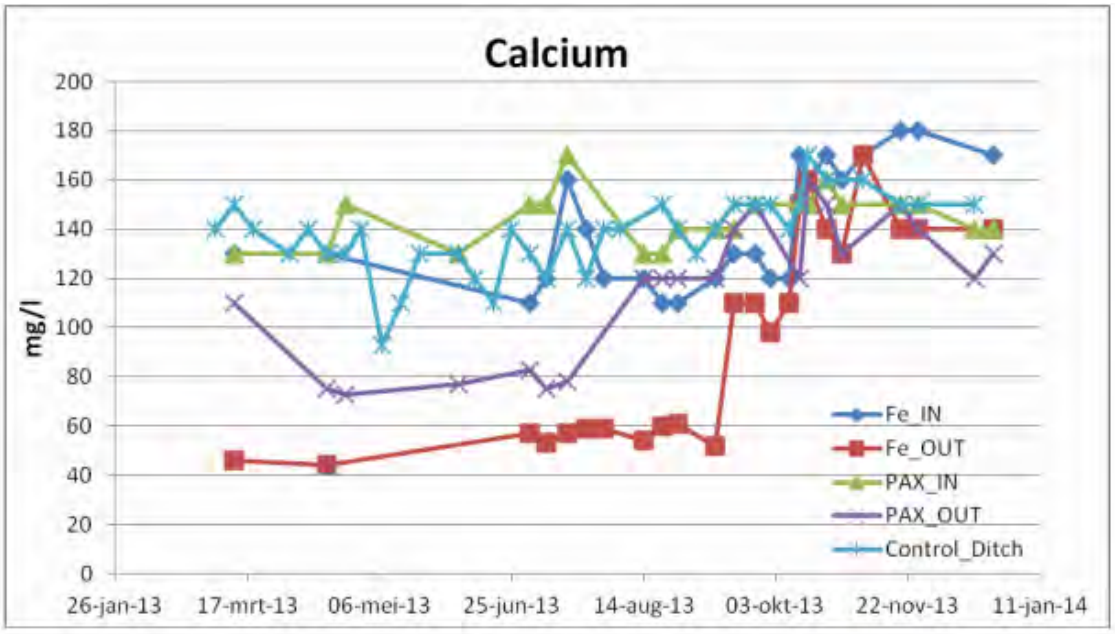
HCO3


HydrogenCarbonate
mg/l
700
600
500
400
300
200
100
0
26-jan-13
17-mrt-13
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14
02-mrt-14
Fe_IN
Fe_OUT
PAX-14_IN
PAX-14_OUT
Control_Ditch

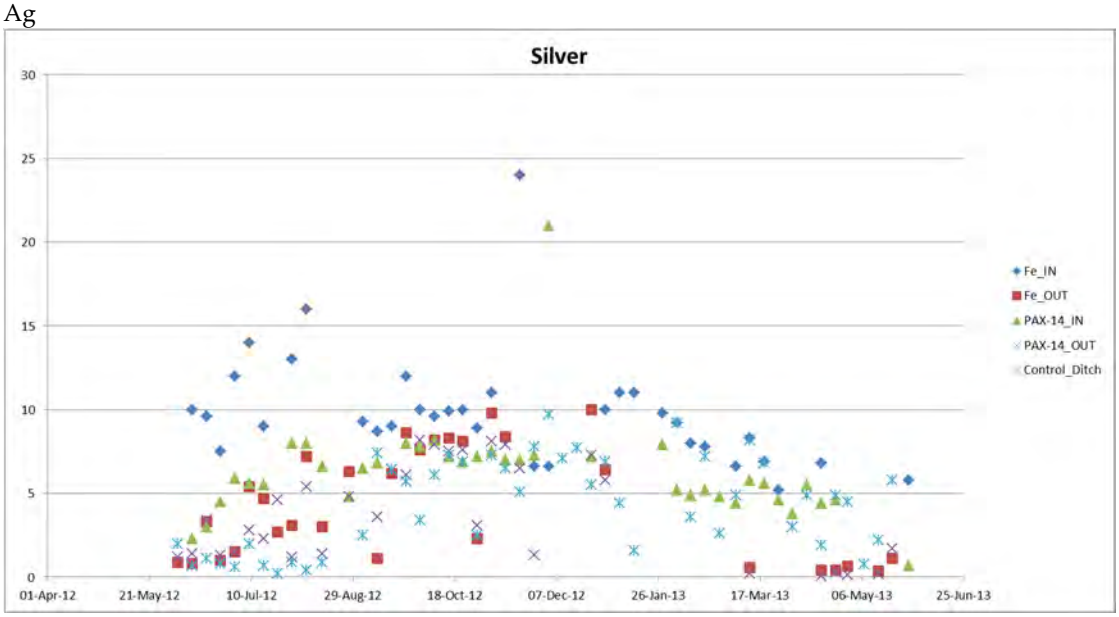
Mg


Magnesium
mg/l
25
20
15
10
5
0
26-Jan-13
17-Mar-13
06-May-13
25-Jun-13
14-Aug-13
03-Oct-13
22-Nov-13
11-Jan-14
02-Mar-14
Fe_IN
Fe_OUT
PAX_IN
PAX_OUT
Control_Ditch

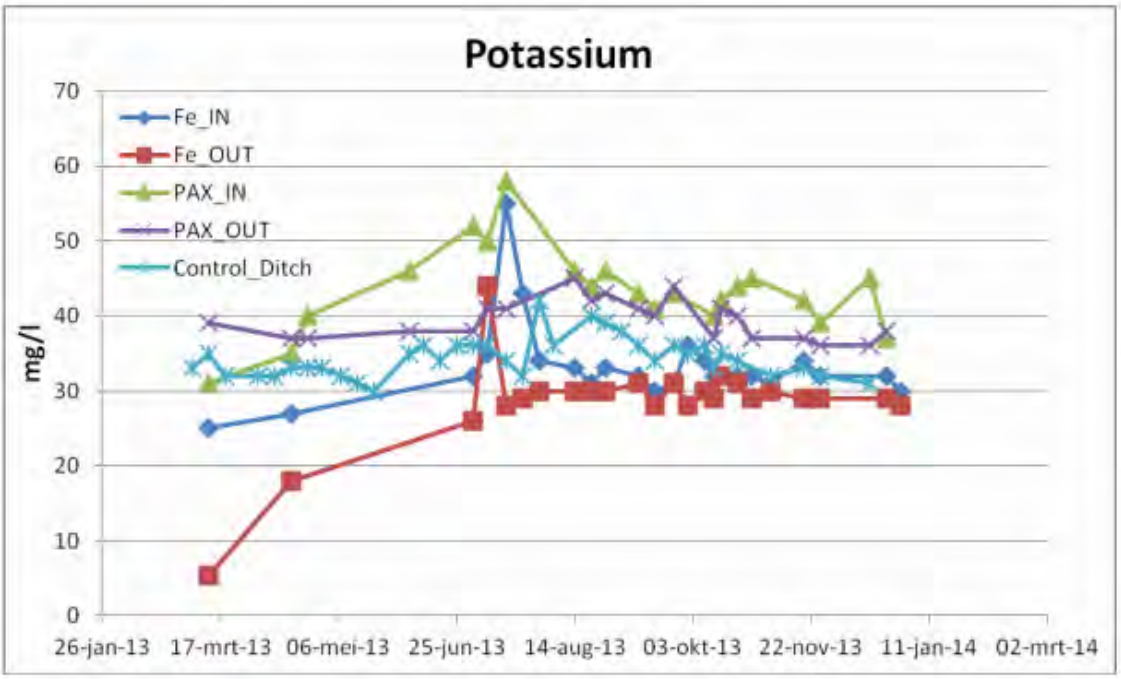
Ca


Calcium
mg/l
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
26-jan-13
17-mrt-13
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14
Fe_IN
Fe_OUT
PAX_IN
PAX_OUT
Control_Ditch

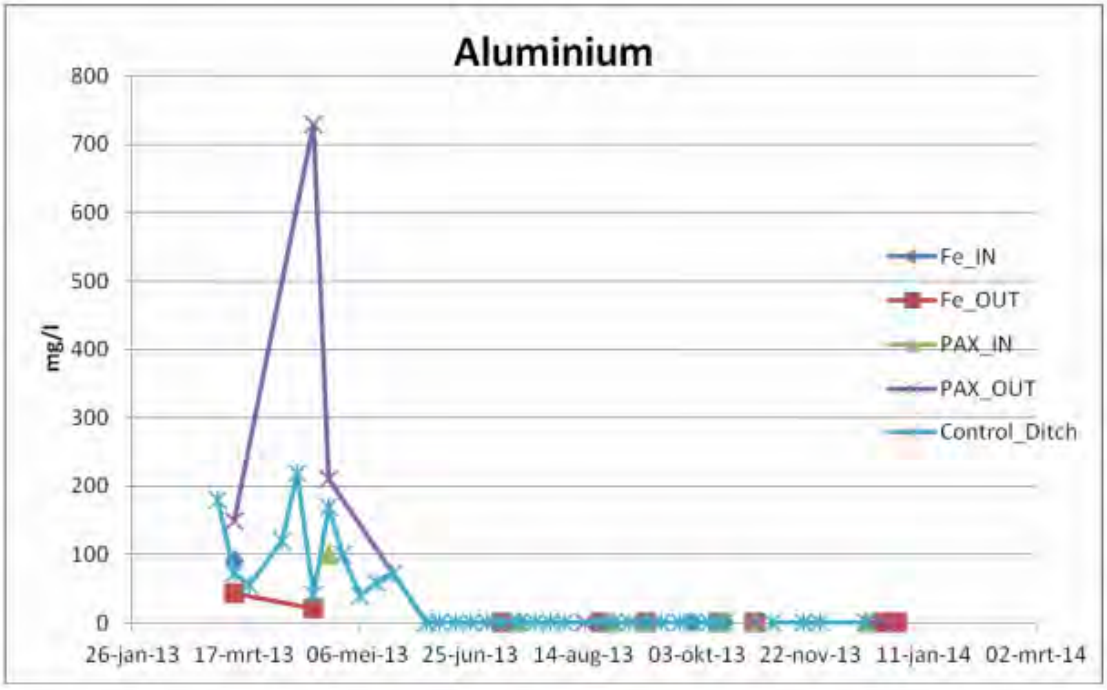
Ag


Silver
30
25
20
15
10
5
0
01-Apr-12
21-May-12
10-Jul-12
29-Aug-12
18-Oct-12
07-Dec-12
26-Jan-13
17-Mar-13
06-May-13
25-Jun-13
Fe_IN
Fe_OUT
PAX-14_IN
PAX-14_OUT
Control_Ditch

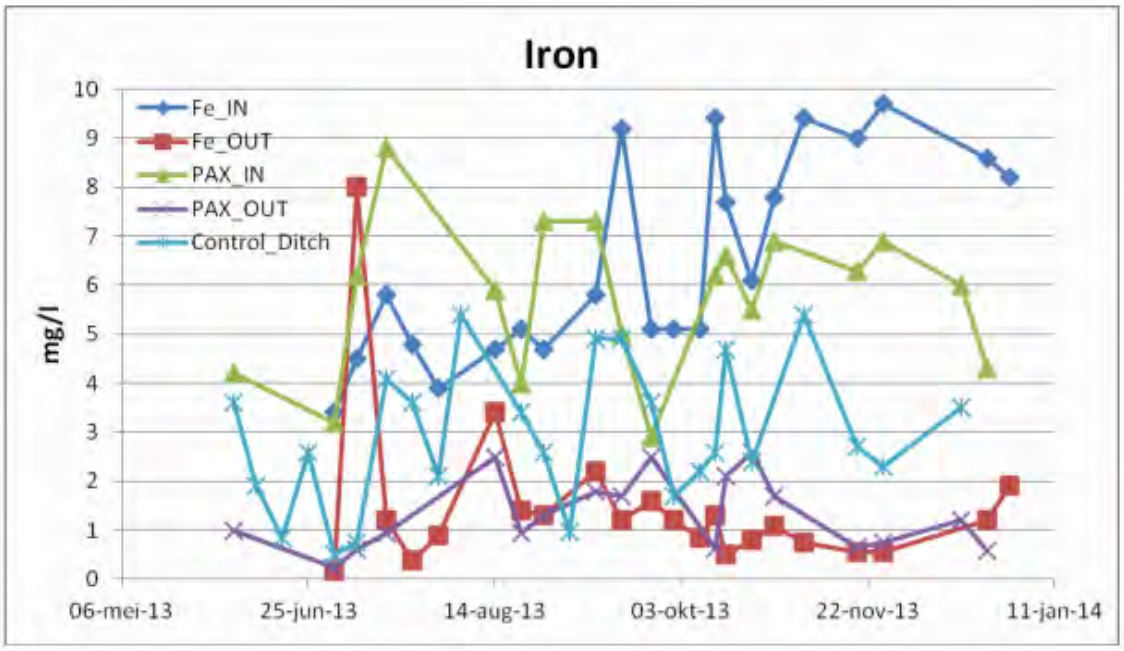
K


Potassium
70
60
50
40
30
20
10
0
mg/l
Fe_IN
Fe_OUT
PAX_IN
PAX_OUT
Control_Ditch
26-jan-13
17-mrt-13
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14
02-mrt-14

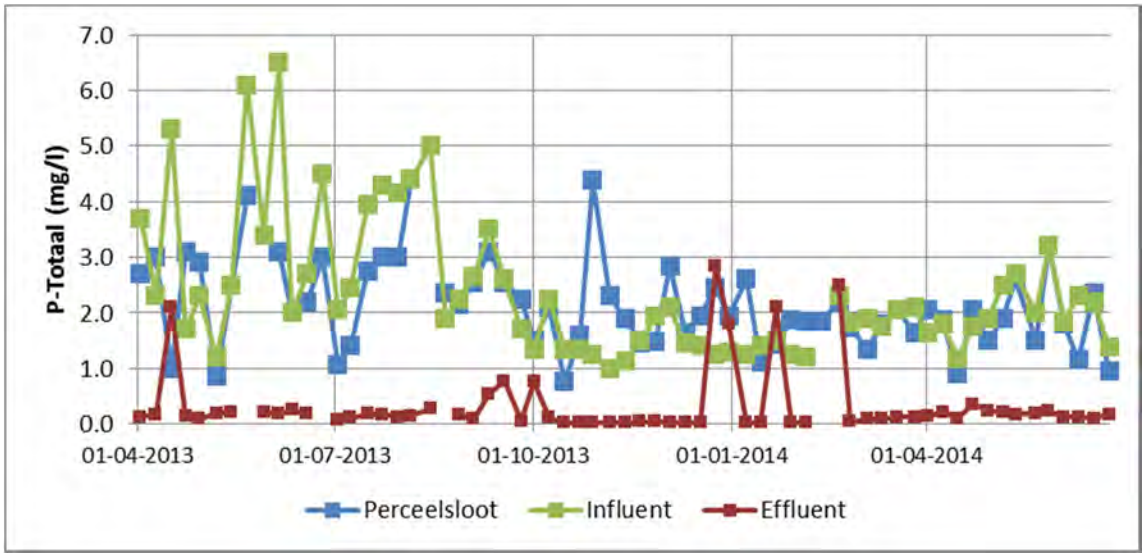
Al

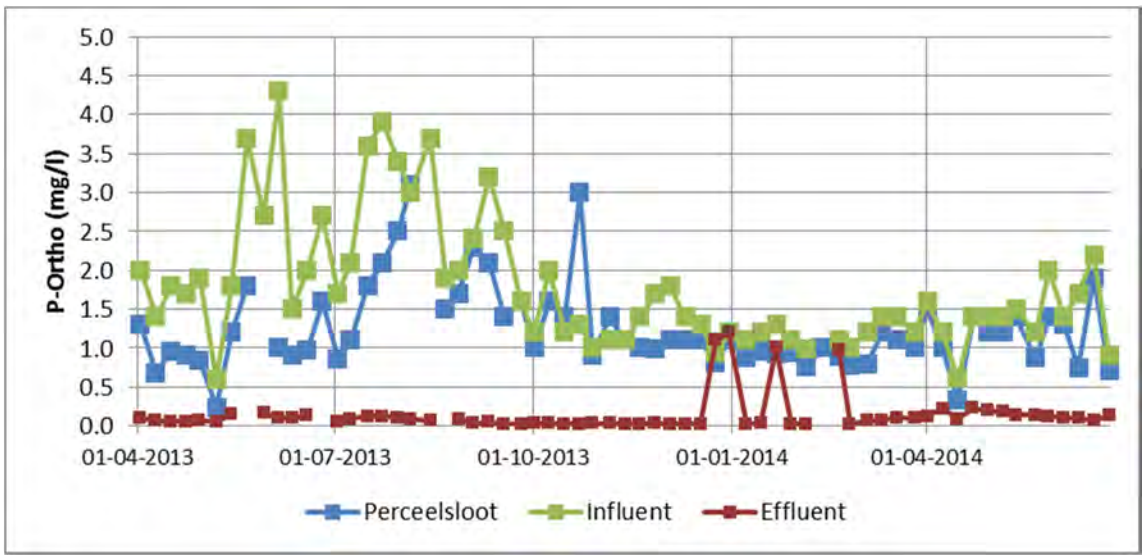

Aluminium
800
700
600
500
400
300
200
100
0
mg/l
Fe_IN
Fe_OUT
PAX_IN
PAX_OUT
Control_Ditch
26-jan-13
17-mrt-13
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14
02-mrt-14

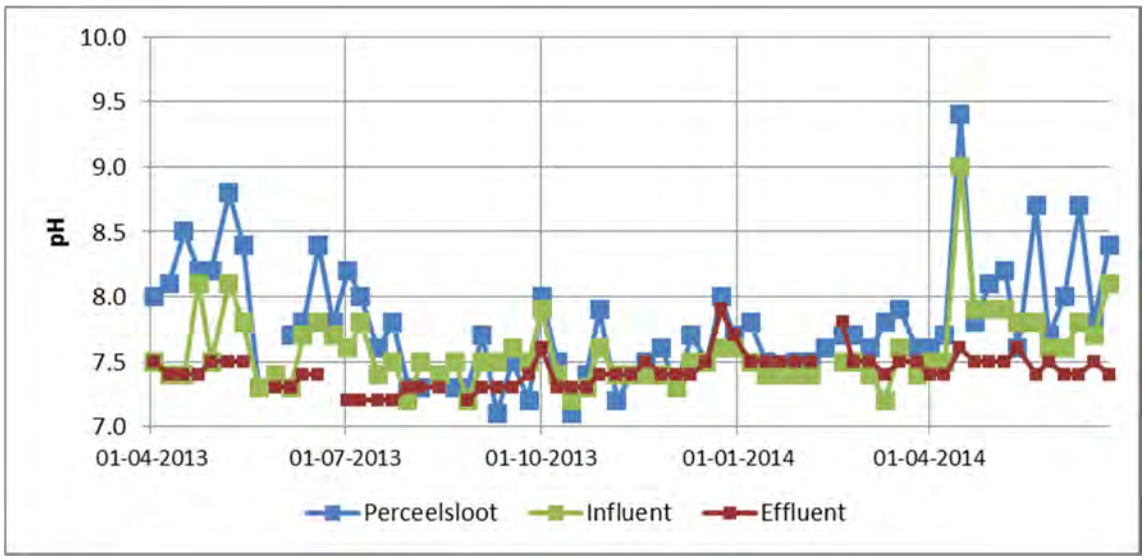
Fe

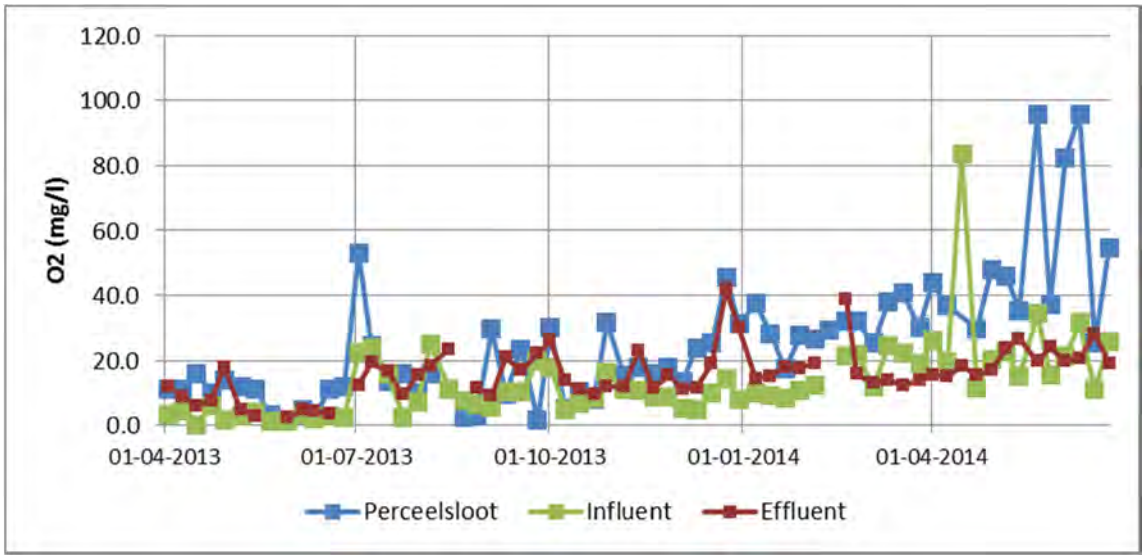

Iron
Fe_IN
Fe_OUT
PAX_IN
PAX_OUT
Control_Ditch
mg/l
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
06-mei-13
25-jun-13
14-aug-13
03-okt-13
22-nov-13
11-jan-14

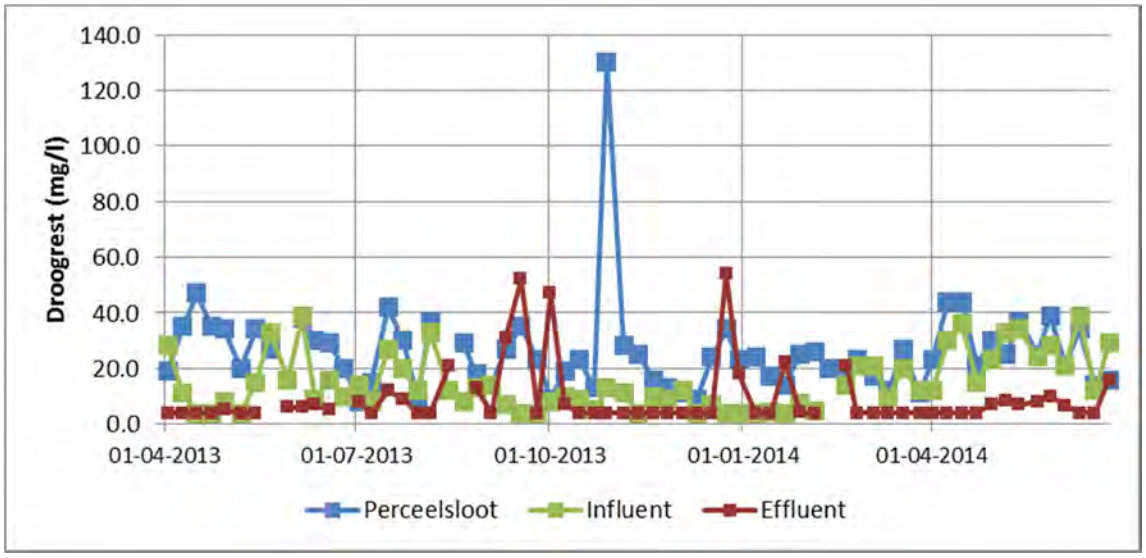
Bijlage 2 Nutriëntenstuw

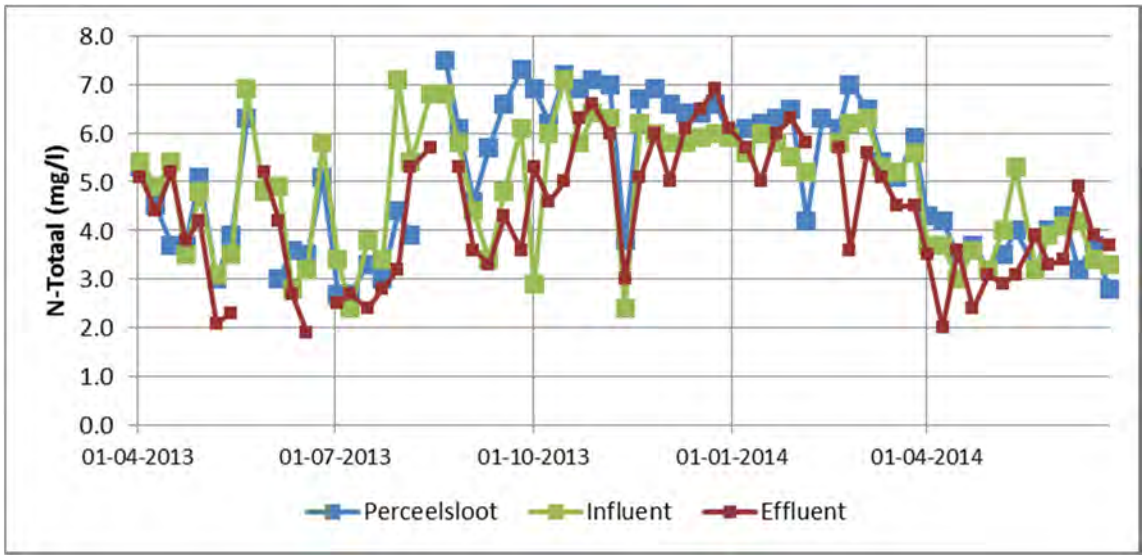


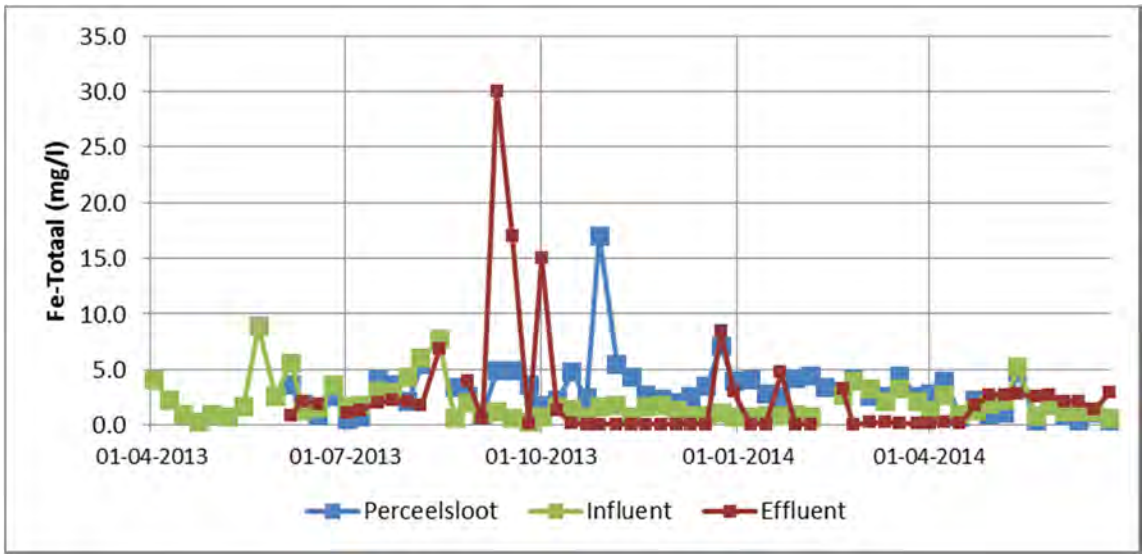


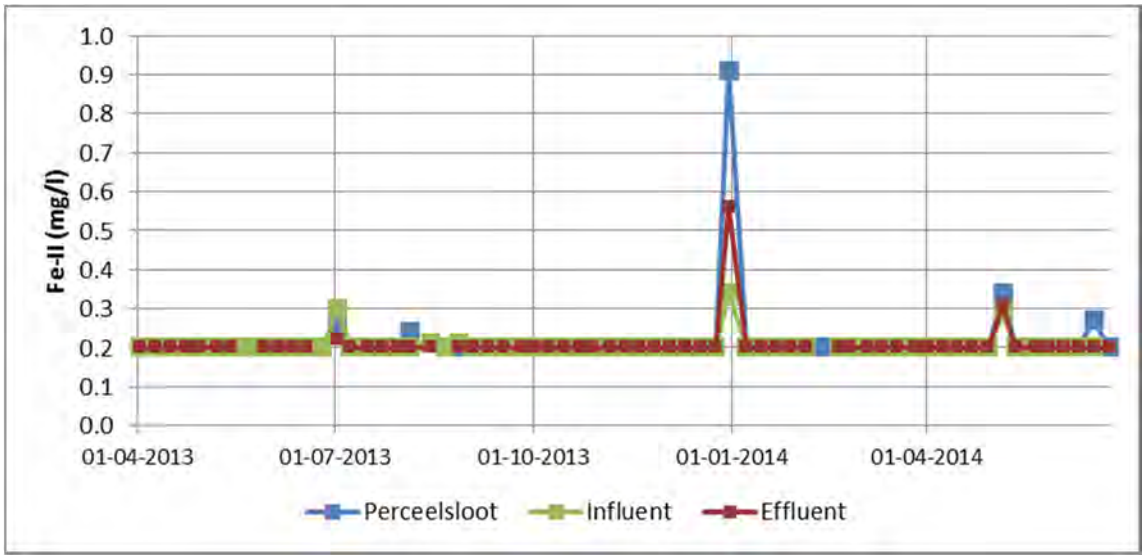



O2 (mg/l)
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
01-04-2013
01-07-2013
01-10-2013
01-01-2014
01-04-2014
Perceelsloot
Influent
Effluent


Droogrest (mg/l)
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
01-04-2013
01-07-2013
01-10-2013
01-01-2014
01-04-2014
Perceelsloot
Influent
Effluent


N-Totaal (mg/l)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
01-04-2013
01-07-2013
01-10-2013
01-01-2014
01-04-2014
Perceelsloot
Influent
Effluent


Fe-Totaal (mg/l)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
01-04-2013
01-07-2013
01-10-2013
01-01-2014
01-04-2014
Perceelsloot
Influent
Effluent


Fe-II (mg/l)
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
01-04-2013
01-07-2013
01-10-2013
01-01-2014
01-04-2014
Perceelsloot
Influent
Effluent

Bijlage 3 Bijlagen Zuivering bij gemalen

Eigenschappen zuiveringstechnieken (bron: Voort et al., 2010)

Factsheet Boerenslootmethode (kleipolders)

Proces

Coagulatie en sedimentatie (de 'boerenslootmethode') bestaat uit het vormen van grotere, bezinkbare vlokstructuren door toevoeging van een vlokmiddel. Vrijwel altijd wordt ijzer(III)chloride toegepast.

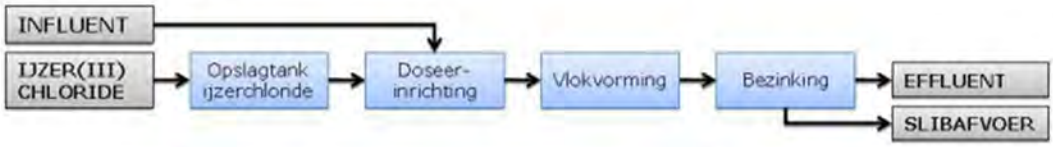


Zuiveringsprestaties	Rendement	60-80% (SS) 60-80% (P) 20-40% (N)
	Effluentkwaliteit	<0,1 mg P/l
	Robuustheid	Redelijk/Goed
Ruimtebeslag	m² per 100 m³/h	225
	% van polder	
	Meervoudig ruimtegebruik	Vijver, park (uitsluitend bezinkingsdeel)
	Inpasbaarheid	Goed
Duurzaamheid	Energieverbruik	5 Wh/m³
	Chemicalienverbruik	Doseerverhouding Fe/P = 10 – 20 (M/M) 35 -70 kg $FeCl_3$ per 1000 m³ behandeld water
	Slibproductie	20 – 40 g/m³
	Terugwinning P/N	Moeilijk
Kosten	Investeringskosten € (per 100 m³/h)	84.000 / 123.000 (recirculatie / gemaal)
	Exploitatiekosten €/jaar (per 100 m³/h)	25.000 / 30.000 (recirculatie / gemaal)
	Exploitatie €ct/m³	2,8 (±0,7) / 3,4 (±0,8) (recirculatie / gemaal)
	Exploitatie €/kg P	
	€/kg N	

Factsheet Boerenslootmethode (veenpolders)

Proces

Coagulatie en sedimentatie (de 'boerenslootmethode') bestaat uit het vormen van grotere, bezinkbare vlokstructuren door toevoeging van een vlokmiddel. Vrijwel altijd wordt ijzer(III)chloride toegepast.



Zuiveringsprestaties	Rendement	60-80% (SS) 60-80% (P) 20-40% (N)
	Effluentkwaliteit	<0,1 mg P/l
	Robuustheid	Redelijk/Goed
Ruimtebeslag	m² per 100 m³/h	450
	% van polder	
	Meervoudig ruimtegebruik	Vijver, park (uitsluitend bezinkingsdeel)
	Inpasbaarheid	Goed
Duurzaamheid	Energieverbruik	5 Wh/m³
	Chemicalienverbruik	Doseerverhouding Fe/P = 10 – 20 (M/M) 35 -70 kg $FeCl_3$ per 1000 m³ behandeld water
	Slibproductie	20 – 40 g/m³
	Terugwinning P/N	Moeilijk
Kosten	Investeringskosten € (per 100 m³/h)	107.000 / 420.000 (recirculatie / gemaal)
	Exploitatiekosten €/jaar (per 100 m³/h)	27.000 / 33.000 (recirculatie / gemaal)
	Exploitatie €ct/m³	3,0 (±0,8) / 3,7 (± 0,9) (recirculatie / gemaal)
	Exploitatie €/kg P	
	€/kg N	

Factsheet Vlokkingsfiltratie (dynamisch zandfilter)

Proces

Continuproces, waarin vlokvorming en filtratie worden gecombineerd in een reactor. Het te filtreren water en het filtermedium gaan tegenstrooms door de reactor, waarna het zand wordt gewassen met lucht en een waswaterstroom vrijkomt.



Zuiveringsprestaties	Rendement	70-90% (SS) 70-90% (P) 30-60% (N) (hoger mogelijk bij dosering C-bron
	Effluentkwaliteit	<0,08 mg P/l
	Robuustheid	Matig
Ruimtebeslag	m² per 100 m³/h	10
	% van polder	
	Meervoudig ruimtegebruik	Niet mogelijk (industriele installatie)
	Inpasbaarheid	Bij bovengronds gemaal: goed
Duurzaamheid	Energieverbruik	15 Wh/m³
	Chemicalienverbruik	Doseerverhouding Fe/P = 10 – 20 (M/M) 35 -70 kg $FeCl_3$ per 1000 m³ behandeld water
	Slibproductie	20 – 40 g/m³
	Terugwinning P/N	Moeilijk
Kosten	Investeringskosten € (per 100 m³/h)	375.000 – 625.000
	Exploitatiekosten €/jaar (per 100 m³/h)	45.000 – 80.000
	Exploitatie €ct/m³	5 – 9
	Exploitatie €/kg P	
	€/kg N	

Factsheet Langzame zandfiltratie met ijzer en kalk

Proces

Batchgewijs proces, waarin fosfaat wordt vastgelegd in een zandbed. Het water wordt in een ijzer- en kalkhoudend zandbed geinfiltreerd, waarna het in gezuiverde vorm weer wordt afgelaten. Via beluchting wordt het zandbed geregenereerd.

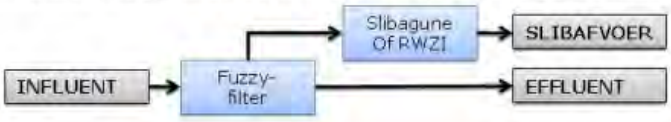


Zuiveringsprestaties	Rendement	70 – 90% (SS) 70 – 90% (P) 20 – 40% (N) (hoger mogelijk bij dosering C-bron
	Effluentkwaliteit	< 0,06 mg P/l
	Robuustheid	Redelijk/Goed
Ruimtebeslag	m² per 100 m³/h	1000
	% van polder	
	Meervoudig ruimtegebruik	Park
	Inpasbaarheid	Goed
Duurzaamheid	Energieverbruik	5 Wh/m³
	Chemicalienverbruik	Geen
	Slibproductie	Na de levensduur met het fosfaatverzadigd zandbed geheel worden vervangen en verwerkt
	Terugwinning P/N	Onbekend
Kosten	Investeringskosten € (per 100 m³/h)	180.000 – 300.000
	Exploitatiekosten €/jaar (per 100 m³/h)	15.000 – 25.000
	Exploitatie €ct/m³	1,5 – 2,5
	Exploitatie €/kg P	
	€/kg N	

Factsheet Fuzzy filter (organisch gebonden N/P)

Proces

Continuproces, waann uitsluitend gebonden fosfaat en stikstof worden afgefiltreerd. Het filterbed bestaat uit samengeperste bolletjes met een vezelstructuur, ingeklemd tussen geperforeerde platen. Deze worden periodiek ontlast, waarbij met behulp van lucht wordt gereinigd en een waswaterstroom vrijkomt.



Zuiveringsprestaties	Rendement	30 – 70% (SS) 20 – 50% (P) fractie P in org. stof 10 – 30% (N) fractier N in org. stof
	Effluentkwaliteit	< 0,2 mg P/l
	Robuustheid	Redelijk/Goed
Ruimtebeslag	m² per 100 m³/h	1 (uitsluitend filteroppervlak)
	% van polder	
	Meervoudig ruimtegebruik	nvt
	Inpasbaarheid	Integreerbaar in gemaal
Duurzaamheid	Energieverbruik	10 Wh/m³
	Chemicalienverbruik	Doseerverhouding Fe/P = 10 – 20 (M/M) 35 -70 kg $FeCl_3$ per 1000 m³ behandeld water
	Slibproductie	20 – 40 g/m³
	Terugwinning P/N	Moeilijk
Kosten	Investenngskosten € (per 100 m³/h)	150.000 – 250.000
	Exploitatiekosten €/jaar (per 100 m³/h)	30.000 – 45.000
	Exploitatie €ct/m³	3 – 5
	Exploitatie €/kg P	
	€/kg N	

Bijlage 4 Literatuurstudie Anne Marie van Dam

Anne Marie van Dam, Bodemdienst Van Dam, november 2014.

1 Literatuurstudie effect van bemestingsmaatregelen op P-verliezen op de P-balans van bloembollenpercelen op duinzandgrond.

Literatuurstudie effect van bemestingsmaatregelen op P-verliezen op de P-balans van bloembollenpercelen op duinzandgrond.

Anne Marie van Dam, Bodemdienst Van Dam, november 2014.

1. Inleiding

In het kader van … wordt in deze studie beschouwd wat het effect is van P-arme organische bemesting op de P-balans van bloembollenpercelen op duinzandgrond. Hiervoor worden een aantal bemestingsmaatregelen toegepast op een voorbeeldbedrijf op duinzandgrond. De vruchtwisseling is hierbij bepalend voor de P-afvoer door het gewas, de fosforbehoefte en het gebruik van stro voor winterdek en stuifbestrijding. De eigenschappen van de grond bepalen de behoefte aan organische bemesting.

2. Systeembeschrijving en gegevens

Aan- en afvoerposten van fosfor in bloembollenpercelen

Fosforbalans = fosforaanvoer – fosforafvoer (in kg P2O5/ha).

Aanvoer van fosfor in de bloembollenteelt wordt om verschillende redenen uitgevoerd:

- Fosforvoeding van het gewas
- Verhogen en handhaven van het organische stofgehalte in de bodem. Hiervoor worden organische meststoffen aangevoerd, die altijd fosfor bevatten.
- Bescherming tegen vorst. Hiervoor wordt een strodek toegepast op een aantal vorstgevoelige gewassen. Stro bevat fosfor
- Bescherming tegen stuiven. Hiervoor wordt stro aangevoerd en vastgestoken, of papierpulp.

Afvoer van fosfor gebeurt via een aantal routes:

- Oogst van bol- en knolgewassen
- Afvoer van strodek en eventueel gewasresten (wordt niet op alle bedrijven gedaan, regelmatig wordt alles in de bodem gewerkt).

Maatregelen om het overschot op de fosfaatbalans te verkleinen

Sinds de jaren negentig wordt er in de bollenteelt gekeken naar maatregelen om het overschot op de fosforbalans en P-belasting van grond- en oppervlaktewater te verminderen. Een paar belangrijke veranderingen:

- Stuifbestrijding wordt niet meer met drijfmest uitgevoerd
- Er is geïnvesteerd in ontwikkeling van een specifiek P-bemestingsadvies voor bolgewassen.
- Ploegen tot 60 cm (z.g. verticale vruchtwisseling) wordt nauwelijks meer toegepast, waardoor de bouwvoordikte, en daardoor de behoefte aan organische meststoffen verminderd is.

- Minerale P-meststoffen en NPK-meststoffen worden nauwelijks meer gebruikt. De behoefte aan aanvoer van organische stof bepaalt de fosforaanvoer die nodig is voor de teelt.
- Er wordt op duinzandgrond steeds meer met – relatief fosforarme – compost bemest en minder met stalmest.
- Er worden meer groenbemesters geteeld voor stuifbestrijding, organische stofproductie en, daarnaast, onkruidonderdrukking en aaltjesbestrijding.

In het algemeen wordt nu, in de praktijk, de P-aanvoer bepaald door de ruimte die de mestwetgeving daarvoor biedt.

Actuele maatregelen

In deze studie worden een aantal actuele maatregelen in beschouwing genomen m.b.t. hun effect op de P-balans:

- Onderwerken van stro in plaats van afvoeren.
- Gebruik van alternatieve organische meststoffen met een lager P-gehalte. Bv. groencompost.
- Teelt van groenbemesters voor organische stofaanvoer
- Composteren eigen organische afval en gebruik compost in plaats van aangevoerde meststoffen.

Voorbeeldbedrijf

Om de effecten van maatregelen te illustreren is een voorbeeldbedrijf gekozen. Het is een bedrijf dat veel stro aanvoert (vanwege de teelt van hyacint en narcis, met winterdek), en daarmee veel organische stof. De fosfaatbehoefte is relatief hoog, vanwege een groot aandeel dahlia en hyacint, en een niet al te hoge fosfaattoestand in de grond. Omdat elk bedrijf anders is, kunnen de getallen niet zo maar als algemeen aangenomen worden. De trends die in dit bedrijf te zien zijn, kunnen wel algemener voorkomen, zoals besproken wordt bij de resultaten.

Fosforbemesting wordt in praktijk en regelgeving weergegeven in kg P_2O_5, in plaats van kg P. Het scenario wordt daarom weergegeven in deze eenheid en teruggerekend naar kg P. 1 kg P komt hierbij overeen met 2,29 kg P_2O_5.

Basisgegevens bedrijf

Gewasareaal: 30% Hyacint, 30% Dahlia, 20% tulp en 20% narcis.
Bodemgegevens:
Grondsoort: duinzandgrond
Bouwvoordikte: 40 cm (4 dm)
Droge bulkdichtheid: 1,45 kg l^{-1} (1 l = 1 dm3)
Fosfaatvoorraad, weergegeven in Pw: 30 mg P_2O_5 l^{-1}
Organische-stofgehalte: 1,5 % op gewichtsbasis
Afbraaksnelheid: 6% $jaar^{-1}$.
Doelstelling organische stof: gehalte handhaven
Huur en verhuur van land wordt bij dit scenario niet meegenomen, maar wel in de discussie van de resultaten.

Behoefte aan organische bemesting

In deze situatie is de jaarlijkse afbraak van organische stof
$1 * 10^6$ dm^2 ha^{-1} * 4 dm * 1,45 kg dm^{-3} * 1,5 % * 6 % $jaar^{-1}$ = 5220 kg/ha^{-1} $jaar^{-1}$

Doelstelling is deze afbraak te compenseren met aanvoer van 5220 kg ha^{-1} effectieve organische stof. Effectieve organische stof in een meststof is de organische stof die een jaar na toediening aan de bodem nog niet is afgebroken.

Strodek

Stro wordt gebruikt voor als winterdek, om vorstschade te voorkomen bij hyacint en narcis, en voor stuifbestrijding. Bij hyacint wordt 18 ton ha^{-1} gebruikt, bij narcis 14, bij tulp 8 en bij dahlia 0 ton ha^{-1} (Schreuder en Van der Wekken, 2005). Bij hyacint wordt de helft van het strodek na de winter afgevoerd van het perceel. Het overige stro wordt, indien nodig, gehakseld, en in de bodem gewerkt. Daarmee draagt de stroaanvoer aanzienlijk bij aan de organische stofvoorziening.

Behoefte aan fosforbemesting:

Bij een Pw van 30 mg P_2O_5 l^{-1} is de behoefte van Dahlia 120 kg P_2O_5 ha^{-1}, van Hyacint 55, van tulp en narcis 20 kg P_2O_5 ha^{-1} (Tabel 1). Bij de gekozen verhoudingen van de gewassen is de behoefte van het bedrijf 61 kg P_2O_5 ha^{-1}, wat overeenkomt met 26 kg P ha^{-1}. Uiteraard wordt dit bepaald door de gewaskeuze en de voorraad beschikbaar fosfor in de grond.

Tabel 1. Fosforbemestingsadvies in kg P_2O_5 ha^{-1} (Van Dam en Van Reuler, 2013).

Pw (mg P_2O_5 l^{-1})	zee- en duinzand		
	Gift (kg P_2O_5 ha^{-1})		
	Dahlia	Hyacint	Tulp, Narcis
10	185	130	100
15	170	110	80
20	150	95	60
25	135	75	40
30	120	55	20
35	105	40	0
40	85	20	
45	70	0	
50	55		
55	35		
60	20		
65	0		

Aanvoer van organische stof en fosfor

In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de eigenschappen van stoffen voor organische bemesting en P-bemesting.

Tabel 2. Materialen die bijdragen aan organische bemesting en P-bemesting. Gegevens uit Van Dam en Van Reuler, 2013.

Materiaal	Organi-sche stof *Kg ton^{-1}*	Effectieve organi-sche stof *Kg ton^{-1}*	P_2O_5 *Kg ton^{-1}*	P-werking gewas *%*	Wettelijke P-werking *%*	N *Kg ton^{-1}*	Wettelijke N-werking *%*
Rundveestalmest	152	76	2,8	90	100	5,3	60
GFT-compost	242	169	6,3	60	50	12,8	10
Groencompost	179	125	2,2	60	50	5	10
Eigen compost	80	60[2]	1,7	60	0	2,6	10
Stro	700	210	2,2	-	0	4	-
Groenbemester[1]	1000	250	-	-	0	-	-
Gewasrest bolgewas[1]	1550	457	-	-	0	-	-
Tripelsuperfosfaat	0	0	460	100	100		

1: niet aangevoerd, ter plekke geteeld.

2: geproduceerd op eigen bedrijf, met eigen gewasresten en stro. Percentage effectieve organische stof gelijk gesteld aan andere compostsoorten, afwijkend van Van Dam en Van Reuler, 2013.

Mestwetgeving

In de mestwetgeving is de gebruiksnorm voor fosfaat apart vastgesteld voor grasland en bouwland, en afhankelijk van de P-voorraad in de grond.

Tabel 2. Bouwland: toegestane P-aanvoer in kg P_2O_5 ha^{-1} jaar^{-1} (www.rijksoverheid.nl).

Pw	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**
<36	80	75	75	75
36 - 55	65	60	60	60
>55	55	50	50	50

Voor compost is 50% van de P-aanvoer vrijgesteld.

3. Scenariostudie

Bij deze studie wordt eerst een 'normaal' basisscenario gedefinieerd. Daarna worden in verschillende scenario's maatregelen doorgevoerd: gebruik van groencompost i.p.v. GFT compost, niet-afvoeren van het strodek bij hyacint, terwijl normaal de helft van het stro afgevoerd wordt, teelt van een groenbemester, en compostering i.p.v. afvoer van het stro, en een deel van de gewasresten.

Tabel 3. Scenario 1: Basisscenario

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organi-sche stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest							
GFT-compost	19	3211	120	60	72		
Groencompost							
Eigen compost							
Stro (netto)	7,1	1491	16	0	-		
Groenbemester							
Gewas	1*	457	0	0	-	43	
totaal		5159	135	60	72	43	92
randvoorwaarde		minimaal 5220[1]		maximaal 60[2]	minimaal 61[3]		

1. Behoefte aan effectieve organische stof voor dit bedrijf
2. Fosfaatgebruiksnorm vanaf 2015
3. Fosfaatbehoefte van de gewassen, gemiddeld over het bedrijf

In het basisscenario wordt standaard organische stof aangevoerd met gewasresten en stro. Stro is aangevoerd naar behoefte van de teelt. In de behoefte aan organische stof wordt verder voorzien met GFT-compost. De wettelijke fosfaatgebruiksruimte beperkt de aanvoer. Daardoor wordt het criterium van minimaal 5220 kg ha^{-1} effectieve organische stof net niet gehaald, en is er geen ruimte om deels met fosfaatrijkere rundveestalmest te bemesten. Er wordt meer fosfor aangevoerd dan het gewas nodig heeft. Er wordt 135 kg P_2O_5 ha^{-1} aangevoerd. Het fosfaatoverschot is 92 kg P_2O_5 ha^{-1}.

Tabel 4. Scenario 2: stro niet afvoeren

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organi-sche stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest							
GFT-compost	16	2704	101	50	60		
Groencompost							
Eigen compost							
Stro (netto)	9,8	2058	22	0	-		
Groenbemester							
Gewas	1	457	0	0	-	43	
totaal		5219	122	50	60	43	79
randvoorwaarde		5220		60	61		

Bij hyacint wordt 18 ton ha^{-1} aangevoerd, waarvan in het basisscenario de helft afgevoerd wordt na het losdekken aan het eind van de winter. In dit scenario wordt het strodek bij hyacint niet afgevoerd, maar alles blijft op het land. Het stro wordt gehakseld en in de paden gewerkt. Na de oogst wordt het stro in de grond ondergewerkt. Hiermee wordt bij hyacint 9 ton ha^{-1} stro extra aan de grond toegediend. Gemiddeld over het bedrijf is dat 2,7 ton ha^{-1}. Daardoor kan de gift GFT-compost met 3 ton ha^{-1} verlaagd worden, terwijl de behoefte aan effectieve organische stof geheel gedekt wordt. Fosfaataanvoer en fosfaat overschot dalen met 13 kg P_2O_5 ha^{-1}, ten opzichte van het basisscenario.

Tabel 5. Scenario 3: GFT-compost vervangen door groencompost

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organi-sche stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest							
GFT-compost							
Groencompost	26,5	3313	58	29	35		
Eigen compost							
Stro (netto)	7,1	1491	16	0	-		
Groenbemester							
Gewas	1	457	0	0	-	43	
tripelsuperfosfaat			26	26	26		
totaal		5261	100	55	61	43	57
randvoorwaarde		5220		60	61		

In dit scenario wordt bemest met groencompost in plaats van GFT-compost. Daarmee kan de P-aanvoer voor organische stofvoorziening verlaagd worden met 62 kg P_2O_5 ha^{-1}. De voor de plant beschikbare P is dan echter 26 kg P_2O_5 ha^{-1} lager dan het bemestingsadvies. Dit wordt in het scenario aangevuld met tripelsuperfosfaat (kunstmest), omdat die meststof op korte termijn de meeste P beschikbaar voor het gewas levert. De effectieve verlaging van P-aanvoer en –overschot bedraagt dan 35 kg P_2O_5 ha^{-1} ten opzichte van het basisscenario.

Wanneer geen dahlia's geteeld zouden worden, maar in plaats daarvan bv. tulp of narcis, gewassen met een lagere P-behoefte, zou deze aanvulling met P-kunstmest niet nodig zijn. Dan geeft gebruik van groencompost dus een grotere verlaging van de P-aanvoer.

De wettelijke P-aanvoer is 5 kg P_2O_5 ha^{-1} lager dan de fosfaatgebruiksnorm van 60 kg P_2O_5 ha^{-1}. In de praktijk wordt deze ruimte waarschijnlijk opgevuld met extra meststoffen, als 'verzekeringspremie' voor jaren waarin de bemesting moeilijker rond te krijgen is.

Tabel 6. Scenario 4: groenbemesters telen

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organi-sche stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest							
GFT-compost	18,5	3127	117	58	70		
Groencompost							
Eigen compost							
Stro (netto)	7,1	1491	16	0	-		
Groenbemester	0,7	175	0	0	-		
Gewas	1	457	0	0	-	43	
tripelsuperfosfaat							
totaal		5250	132	58	70	43	89
randvoorwaarde		5220		60	61		

Groenbemesters kunnen in deze vruchtwisseling geteeld worden na hyacint, tulp en narcis, op 70% van het areaal. Groenbemesters hebben een relatief kort groeiseizoen en vaak een sub-optimale stikstofvoorziening. Daardoor is de biomassa relatief klein. Het verse plantenmateriaal breekt snel af. De bijdrage aan effectieve organische stof is daarom beperkt. Ten opzichte van het basisscenario wordt hierdoor een halve ton ha^{-1} minder GFT-compost aangevoerd. Daarnaast verbetert de organische stofvoorziening met 91 kg ha^{-1} effectieve organische stof. Het effect op P-aanvoer en P-overschot is gering: 3 kg P_2O_5 ha^{-1}.

Tabel 7. Scenario 5: composteren van eigen organische afval

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organische stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest							
GFT-compost	17,5	2958	110	55	66		
Groencompost		0	0	0	0		
Eigen compost	12	720	20	0	12		
Stro (netto)	7,1	1491	16	0			
Groenbemester		0	0	0			
Gewas	0,25	114	-15	0		43	
tripelsuperfosfaat							
totaal		5283	131	55	78	43	88
randvoorwaarde		5220		60	61		

Bij dit scenario wordt de 9 ton ha^{-1} stro die in het basisscenario wordt afgevoerd, op het bedrijf gecomposteerd met gewasresten. Aangenomen wordt dat 75% van de gewasresten van het veld verwijderd worden en gecomposteerd worden. Gewasresten op dit bedrijf bevatten in mediaan 18 kg P_2O_5 ha^{-1} (Ehlert et al., 2009). Aangenomen wordt dat tijdens de compostering geen fosfor verloren gaat. Dan kan berekend worden dat er 12 ton ha^{-1} eigen compost geproduceerd wordt van deze materialen. Door deze eigen compost kan de gift GFT-compost met 2,5 ton ha^{-1} verlaagd worden. De fosfaataanvoer en het fosfaatoverschot worden verlaagd met 4 kg P_2O_5 ha^{-1}.

Tabel 8. Scenario 6: combinatie van groencompost, geen stro afvoeren en groenbemester.

Materiaal	Gift *ton ha^{-1} of *teelt ha^{-1}*	Effectieve organische stof *Kg ha^{-1}*	P_2O_5 aanvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5 telt mee voor wet *kg ha^{-1}*	P_2O_5 beschikbaar voor gewas *kg ha^{-1}*	P_2O_5-afvoer *kg ha^{-1}*	P_2O_5-overschot *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest		0	0	0	0		
GFT-compost		0	0	0	0		
Groencompost	20,5	2563	45	23	27		
Eigen compost		0	0	0	0		
Stro (netto)	9,8	2058	22	0			
Groenbemester	0,7	175	0	0			
Gewas	1	457	0	0		43	
tripelsuperfosfaat			34	34	34		
totaal		5253	101	57	61	43	58
randvoorwaarde		5220		60	61		

In dit scenario zijn drie maatregelen gecombineerd: groencompost i.p.v GFT-compost, stro niet afvoeren en teelt van groenbemesters na hyacint, tulp en narcis. Hiermee wordt de P-aanvoer met organische stoffen verlaagd met 69 kg P_2O_5 ha^{-1} ten opzichte van het basisscenario.

De voor de plant beschikbare P is dan echter 34 kg P_2O_5 ha^{-1} lager dan het bemestingsadvies. Dit wordt aangevuld met tripelsuperfosfaat, omdat die meststof op korte termijn de meeste P beschikbaar voor het gewas levert. Effectief wordt, bij deze vruchtwisseling, P-aanvoer en P-overschot verlaagd met 34 kg P_2O_5 ha^{-1} ten opzichte van het basisscenario. Dat is niet meer dan bij alleen gebruik van groencompost. Wanneer geen dahlia's geteeld zouden worden, maar in plaats daarvan bv. tulp of narcis, gewassen met een lagere P-behoefte, zou deze aanvulling met P-kunstmest niet nodig zijn. Dan is combinatie van de maatregelen wel effectief. Als er een P-overschot is op het bedrijf, zal de P-voorraad in de grond in de loop van jaren stijgen, waardoor benodigde P-gift van het gewas afneemt.

Praktische randvoorwaarden

De productie van compost in Nederland is beperkt. Compost wordt voor verschillende toepassingen gebruikt: als meststof, als ondergrond in stallen, in potgrond en in verbrandingsovens. Wanneer de tuinbouw op grote schaal op bemesting met compost overstapt, kan er schaarste ontstaan.

Het onderwerken van grote hoeveelheden stro, zoals in scenario 2, kan leiden tot een 'inkuileffect', waarbij het stro slecht afbreekt door gebrek aan stikstof en zuurstof. In dat geval blijft er gedurende langere tijd een stikstof-immobiliserend materiaal in de grond aanwezig, dat het teeltresultaat kan verminderen. Ook kunnen zuurstofloze plekken in de grond slecht werken voor de gezondheid van het gewas

Het teeltresultaat van een groenbemester kan zeer variabel zijn, afhankelijk van de weersomstandigheden. Met name de hoeveelheid neerslag aan het begin van de teelt, met effect op stikstofuitspoeling, en de hoeveelheid straling tijdens de groei zijn kunnen sterk verschillen per seizoen. Omdat de groenbemester een relatief kleine impact heeft op het P-overschot, zal deze variatie daarvoor weinig uitmaken.

Productie van compost op eigen bedrijf vraagt tijd een aandacht van de teler. De materialen die voorhanden zijn, zijn in het algemeen stikstofarm. Daarom wordt er vaak een kleine hoeveelheid drijfmest toegevoegd aan de composthoop. Deze is in het scenario niet meegenomen. Drijfmest zal het P-overschot verhogen, en de maatregel ineffectief maken dit overschot te verlagen.

Kosten van bemesting bij de scenario's

Prijzen van meststoffen kunnen variëren Bij compostsoorten is het gehalte aan effectieve organische stof, het gehalte aan fosfor en de transportafstand tussen composteerder en gebruiker bepalend. Voor groenbemesters is de soort bepalend. De productiekosten van eigen compost variëren tussen 7 en 15 euro ton^{-1}. De kosten voor bemesting en aanvoer van stro variëren tussen de scenario´s van € 848 ha^{-1} tot € 1199 ha^{-1}. Met name overschakelen op groencompost en de teelt van een groenbemester verhogen de kosten. Hetgrootste deel van de kosten betreft de aankoop van stro.

Tabel 9. Kosten voor bemesting en aanvoer van stro per ha.

	gft compost[a]	groen-compost[a]	stro aanvoer[b]	stro afvoer[c]	eigen compost[c]	groen-be-mester[d]	tripel-super-fosfaat[e]	totaal
prijs	€ 4 ton^{-1}	€ 9 ton^{-1}	€ 80 ton^{-1}	€ 23 ton^{-1}	€ 12 ton^{-1}	€ 200	€ 0,91 kg^{-1} P_2O_5	
basisscenario	€ 76		€ 784	€ 62				€ 922
stro niet afvoeren	€ 64		€ 784					€ 848
groencompost		€ 239	€ 784	€ 62			€ 24	€ 1.108
groenbemester	€ 74		€ 784	€ 62		€ 200		€ 1.120
eigen compost	€ 70		€ 784		€ 144			€ 998
combinatie		€ 185	€ 784			€ 200	€ 31	€ 1.199

a. www.akkerwijzer.nl
b. www.productschapakkerbouw.nl
c. Mededeling A. Conijn, Alb. Groot. Kosten eigen compost variëren van € 7 tot 15 ton^{-1}
d. Brochure demo groenbemesters, Masterplan Mineralen Management
e. www.melkvee.nl.

4. Discussie en conclusies

De verschillende scenario's worden samengevat in tabel … Hierbij zijn de gegevens van P-aanvoer en –afvoer omgerekend naar kg P ha^{-1}.

Tabel 10. Overzicht van fosforaanvoer- en afvoerposten bij het voorbeeld bedrijf en de verschillende scenario's

overzicht	netto aanvoer P stro *kg P ha^{-1}*	aanvoer P org. meststof-fen *kg P ha^{-1}*	totale aanvoer organisch P *kg P ha^{-1}*	aanvoer kunstmest P *kg P ha^{-1}*	totale aanvoer P *kg P ha^{-1}*	afvoer P *kg P ha^{-1}*	P overschot *kg P ha^{-1}*
basisscenario	7	52	59	0	59	19	40
stro niet afvoeren	9	44	53	0	53	19	35
groencompost	7	25	32	11	44	19	25
groenbemester	7	51	58	0	58	19	39
eigen compost	7	57	64	0	64	25	39
combinatie	9	20	29	15	44	19	25

Hieruit blijkt dat gebruik van groencompost de maatregel is die de grootste reductie geeft in aanvoer van P met organische meststoffen. Daarnaast is het niet-afvoeren van stro een effectieve maatregel. Teelt van een groenbemester en compostering van eigen organisch afval dragen weinig bij aan verlaging van de P-aanvoer en het P-overschot.

De behoefte van de gewassen aan P-bemesting bepaalt of de verlaging in de P-aanvoer gecompenseerd moet worden met extra aanvoer van P-meststoffen. Bij het voorbeeldbedrijf is de P-voorraad in de grond relatief laag – in de praktijk ligt deze meestal hoger. Ook bepaalt het aandeel dahlia in het gewasareaal sterk of de P-behoefte de aanvoer van beschikbaar P met organische meststoffen overschrijdt.

Tabel 11. Gewasparameters van belang voor de p/balans van percelen: behoefte aan strodek, behoefte aan P-bemesting en P-afvoer met het geoogste product.

gewas	Stro-aanvoer *ton ha^{-1}*	P-behoefte	P-afvoer hoofdproduct *kg P_2O_5 ha^{-1}*	P-afvoer hoofdproduct *kg P ha^{-1}*
dahlia	0	hoog	25	11
gladiool	0	middel	56	24
hyacint	18	middel	47	21
iris	5	laag	28	12
krokus	7	middel	49	21
lelie (plantgoed)	4	laag	34	15
lelie (schub)	0	laag	< 34	<15
Narcis	14	laag	58	25
tulp	8	laag	48	21

Voor de P-aanvoer met organische bemesting is de verhouding tussen P en effectieve organische stof die aangevoerd wordt van belang. Deze is het laagst voor stro, gevolgd door groencompost en dan door GFT-compost en rundveestalmest. De aanvoer van stro wordt bepaald door de behoefte van de teelt. Stro is veel duurder dan compost en stalmest, en

wordt daarom niet als organische meststof ingekocht. Daarnaast moet bij stro rekening gehouden worden met stikstofvastlegging in het materiaal, waardoor de stikstofvoorziening van het gewas bedreigd wordt bij het onderwerken van grote hoeveelheden van dit materiaal.

Tabel 12. Verhouding tussen effectieve organische stof en fosfor in meststoffen, en de P-aanvoer waarmee volledige organische stofvoorziening met een meststof gepaard gaat.

Mestsoort	Organische stof *kg ton^{-1}*	Effectieve organische stof *kg ton^{-1}*	P_2O_5 *kg ton^{-1}*	P_2O_5/ effectieve organische stof	P_2O_5-aanvoer bij 5220 kg effectieve org. stof *kg ha^{-1}*	P-aanvoer bij 5220 kg effectieve org. stof *kg ha^{-1}*
Rundveestalmest	152	76	2,8	0,037	203	89
GFT-compost	242	169	6,3	0,037	206	90
Groencompost	179	125	2,2	0,018	97	42
Stro	700	210	2,2	0,010	58	25
Groenbemester	1000	250		0,000	0	0
Gewasresten	1550	457		0,000	0	0

Compostsoorten worden verkozen boven stalmest, omdat in de mestwetgeving de helft van de P-aanvoer in compost vrijgesteld is. Dat maakt het mogelijk om ook met GFT-compost binnen de fosfaatgebruiksnorm de organische stofvoorziening op peil te houden. De inhoudelijke achtergrond van deze vrijstelling is, dat een deel (2 kg P_2O_5 ton^{-1}, Ehlert 200) gebonden is aan grond die in de te composteren materialen aanwezig is. Deze grond wordt in feite met de compost verplaatst van perceel naar perceel en is daarmee geen netto aanvoerpost in de landbouw.

Daarnaast is stalmest steeds minder beschikbaar, doordat het steeds minder op melkveebedrijven geproduceerd wordt. Dat komt door verandering van stalsystemen. De kwaliteit van deze vaste mest wordt steeds variabeler, omdat deze afkomstig is van bedrijven met verschillende soorten vee en verschillende typen stal.

Prijzen van compost variëren met de kwaliteit en de transportafstand tussen de producent en de gebruiker. Er is een trend dat compost met een lagere verhouding tussen P en effectieve organische stof een hogere prijs heeft. Er zijn compostproducenten die hier bewust op sturen, maar het aanbod kan per regio verschillen.

Aan de hand van de scenario's kan een maximale besparing op de P-aanvoer door de keuze van meststoffen berekend worden. Als een bedrijf weinig stro aanvoert, bv 3,5 ton ha^{-1} bij een vruchtwisseling met tulp, krokus, dahlia en gladiool, wordt hiermee 735 kg ha^{-1} effectieve organische stof aangevoerd. Er moet dan nog 4485 kg ha^{-1} effectieve organische stof aangevoerd worden met meststoffen. Met GFT compost leidt dat tot een aanvoer van 167 kg P_2O_5 ha^{-1}, met groencompost 79 kg P_2O_5 ha^{-1}. Een besparing van 88 kg P_2O_5 ha^{-1}, gelijk aan 39 kg P ha^{-1}.

De effecten van groenbemesters en eigen compost zijn veel kleiner, 3 à 4 kg P_2O_5 ha^{-1}, overeenkomend met 1,4 à 1,8 kg P ha^{-1}.

5 Conclusies

Op bloembollenpercelen wordt de P-aanvoer met meststoffen en stro bepaald door:

- Behoefte van de gewassen aan een strodek voor stuifbestrijding en bescherming tegen vorst
- Behoefte aan organische bemesting van de bodem.
- De behoefte aan P-bemesting van de gewassen
- De gehalten aan effectieve organische stof en (beschikbaar) fosfor van de beschikbare meststoffen

De aanvoer van fosfor met meststoffen wordt begrensd door de mestwetgeving.

De goedkoopste meststof waarmee in de organische stofbehoefte van de grond voorzien kan worden, is GFT-compost. De P-aanvoer aanzienlijk verlaagd worden (met maximaal 39 pg P ha^{-1}), door deze te vervangen door groencompost. Groencompost is echter duurder dan GFT-compost.

Het niet-afvoeren van het strodek bij hyacint zorgt er voor dat er aanzienlijk meer effectieve organische stof uit stro ten goede komt aan de bodem. Het effect van deze maatregel op bedrijfsniveau hangt af van het percentage hyacint in het gewasareaal. Als dit aandeel 30% is, zoals in de scenario's (hoofdstuk 3), wordt de fosforaanvoer hierdoor met 6 kg P ha^{-1} verlaagd. Dit getal varieert evenredig aan het aandeel hyacint. Deze maatregel verlaagt de kosten, omdat er niet betaald wordt voro afvoer van stro en er minder compost aangevoerd hoeft te worden. Aandachtspunt is de voorspoedige afbraak van ondergewerkt stro en stikstofvastlegging tijdens de teelt.

Het telen van een groenbemester verlaagt de fosforaanvoer met 1 kg ha^{-1}. Daarmee is dit een relatief dure en weinig effectieve maatregel om de aanvoer te verlagen.

Composteren van eigen organische afval verlaagt het P-overschot met 1 kg P ha^{-1}. Dit is dus eveneens een weinig effectieve maatregel om de P-afvoer te verlagen.

Bij verlaging van de fosforaanvoer met organische meststoffen, kan het voorkomen dat er kunstmest-P toegevoegd moet worden om het gewas van voldoende fosfor te voorzien. In de meeste percelen is de P-toestand echter hoog genoeg om dit te voorkomen.

Bronvermelding

Ehlert, P., P.H.M. Dekker, J.R. van der Schoot, R. Visschers, J.C. van Middelkoop, M.P. van der Maas, A.A. Pronk en A.M. van Dam, 2009. Fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Eindrapportage. Rapport 1773, Alterra, Wageningen.

Schreuder,P. en J. van der Wekken, 2005. Kwantitatieve informatie. Bloembollen en bolbloemen. Rapport nr, 719, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Wageningen.

Van Dam, A.M. en R. van Reuler, 2013. Adviesbasis voor de bemesting van bloembolgewassen. Bodemdienst Van Dan en Praktijkonderzoek Plant en Omgeving B.V.

Colofon

PILOT EFFECTGERICHTE VERWIJDERING FOSFAAT BOLLENSTREEK

RESULTATEN VELDPILOT VOORHOUT EN SYNTHESE DIVERSE MAATREGELEN

OPDRACHTGEVER:

Hoogheemraadschap van Rijnland

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

Arjon Buijert en Renee Talens (ARCADIS)
Wim Chardon en Bert Jan Groenenberg (Alterra)
Stefan Jansen en Jan Gerritse (Deltares)

GECONTROLEERD DOOR:

Renée Talens

VRIJGEGEVEN DOOR:

Renée Talens

2 januari 2015
078237075:0.7

ARCADIS Nederland BV
La Guardiaweg 36-66
1043 DJ AMSTERDAM
Postbus 56825
1040 AV AMSTERDAM
Tel 088-4 261 261
www.arcadis.nl
Handelsregister 09036504