

EFFECTEN VAN DE ADDITIE VAN WATERIJZER IN POLDER WESTVEEN



EFFECTEN VAN DE ADDITIE VAN WATERIJZER IN POLDER WESTVEEN

*Yvon Verstijnen
Hilde Tomassen
Tom van den Broek
Fons Smolders*



Titel rapport:

Effecten van de additie van waterijzer in polder Westveen, conceptrapportage

Auteurs:

Yvon Verstijnen, Hilde Tomassen, Tom van den Broek & Fons Smolders

Rapportnummer:

RP-20.128.22.75

Opdrachtgever:

Provincie Zuid-Holland

Informatie:

Onderzoekcentrum B-WARE BV
Radboud Universiteit Nijmegen
Mercator III, Toernooiveld 1
6525 ED Nijmegen

Contactpersoon:

Fons Smolders
Tel: 024-2122200
a.smolders@b-ware.eu
www.b-ware.eu

© Onderzoekcentrum B-WARE, 2022



INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel van het onderzoek	2
1.3 Reductie interne fosfaatmobilisatie	2
2. Materiaal en methoden	5
2.1 Labexperiment	5
2.2 Veldexperiment	7
2.3 Kasexperiment	9
3. Resultaten labexperiment	12
3.1 Poriewater	12
3.2 Bodem	15
4. Resultaten veldexperiment	18
4.1 Oppervlaktewater	18
4.2 Waterbodem	20
4.3 Poriewater	22
4.4 Geïntroduceerde planten	23
5. Kasexperiment	26
5.1 Poriewater	26
5.2 Oppervlaktewater	27
5.3 Bodem	27
5.4 Waterplanten	28
6. Conclusies en synthese	30
6.1 Labexperiment	30
6.2 Veldexperiment	31
6.3 Kasexperiment	31
6.4 Synthese	32
7. Literatuur	37
8. Bijlagen	39

1. INLEIDING

1.1 Aanleiding

Provincie Zuid-Holland werkt aan de inrichting van polder Westveen. Het gebied is onderdeel van het Natuurnetwerk Nederland (NNN). Polder Westveen maakt daarnaast onderdeel uit van het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen & De Haack. Met de inrichting van dit gebied beoogt de provincie de doelen die vanuit het natuurbeheerplan zijn meegegeven, te realiseren. Daarnaast dient de inrichting van polder Westveen bij te dragen aan het realiseren van de instandhoudingsdoelen waarvoor het Natura 2000-gebied is aangewezen vanuit de Habitat- en Vogelrichtlijn.

Om een groot deel van de doelen te kunnen realiseren is het van groot belang dat de huidige waterkwaliteit sterk verbetert. Deze is op dit moment ontoereikend. Een belangrijke maatregel om de waterkwaliteit te verbeteren is het herinrichten van het watersysteem waarbij inlaat en routing van het water gewijzigd worden, onderbemalingen worden opgeheven en peilen worden aangepast. In het gebied wordt de routing van het water zodanig aangepast dat er een optimaal lange aanvoerweg van het water ontstaat naar de plekken waar het schoonste water nodig is.

De herinrichting van het watersysteem is echter onvoldoende om de waterkwaliteit voldoende te verbeteren. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat de bagger die in de watergangen in polder Westveen aanwezig is zeer voedselrijk is en erg veel fosfaat nalevert aan de waterkolom (Tomassen & Smolders, 2020). Hierdoor is ook het oppervlaktewater te voedselrijk. De huidige waterkwaliteit in de watergangen is als gevolg van de hoge concentraties fosfaat ongeschikt voor soortenrijke vegetaties en daarbij horende fauna. In polder Westveen speelt daar bovenop nog het volgende probleem: het overgrote deel van de watergangen zit tot nagenoeg aan de waterspiegel vol met bagger als gevolg van aanwas (afkalving oevers) en achterstallig onderhoud. Hierdoor is er in polder Westveen in veel van de watergangen überhaupt geen ruimte voor waterleven.

Het is dus noodzakelijk bagger te verwijderen ten einde de waterkwaliteit duurzaam te verbeteren. Omdat het echter om een enorme lengte aan watergangen en daarmee aan een groot volume aan bagger gaat, vormt dit een zeer kostbare maatregel. Daar komt nog bij dat waar de volledige baggerlaag wordt weggehaald (dus tot de vaste bodem) de oevers inzakken omdat er geen tegendruk is. Dit inzakken is, naast erosie (mineralisatie, vertrapping), ook het resultaat van anaerobe (dus onder het waterniveau) afbraak van het veen. Deze afbraak is het gevolg van bodemchemische processen die als gevolg van (historisch) landgebruik, waterbeheer en -kwaliteit sterk negatief zijn beïnvloed.

Wel baggeren dus (ten einde een voldoende diepe waterkolom te realiseren) maar niet alles (om inzakken van de oevers te voorkomen), dat is de boodschap. Maar dan moet wel voorkomen worden dat de bagger die achterblijft geen fosfaat blijft naleveren. Om deze reden is bedacht dat het toevoegen van waterijzer (een restproduct van de drinkwaterwinning) een relatief eenvoudige, goedkope en efficiënte manier zou kunnen zijn om de nalevering van fosfaat vanuit de waterbodem naar de waterlaag sterk te reduceren c.q. te voorkomen. Het idee hierachter is dat een overmaat van ijzer onder de heersende anaerobe condities in de bagger ervoor kan zorgen dat mobiel fosfaat kan binden. Omdat dit vooralsnog stoelt op een theoretische benadering en er niet of nauwelijks gedocumenteerde of gemonitorde praktijkervaring is, wordt de toepasbaarheid van waterijzer eerst proefondervindelijk vastgesteld middels experimenteel onderzoek.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is om na te gaan of het toedienen van waterijzer aan bagger uit polder Westveen de fosforconcentraties in het poriewater van de bagger kan verminderen en daarmee de mobilisatie van fosfaat vanuit de bagger naar de waterlaag helpt te voorkomen of minstens fors kan reduceren. Dit werd in eerste instantie met een zogenaamde kolomproef in het lab getest, waarbij naast bodems uit polder Westveen ook bodems uit polder Bodegraven-Noord, waar sprake is van een soortgelijke problematiek, zijn meegenomen. In het onderzoek werd door verschillende behandelingen in te zetten ook vastgesteld welke hoeveelheid waterijzer per volume-eenheid bagger het beste effect heeft. Deze behandelingen variëren in de hoeveel toegevend ijzer ten opzichte van de hoeveelheid zwavel in de bagger. Onder anaerobe omstandigheden kan zwavel namelijk ijzer binden waarbij fosfaat vrijkomt (mobilisatie). Het is dus zaak om een voldoende overmaat aan ijzer te hebben die echter weer niet te groot mag zijn omdat dit dan weer kan leiden tot toxiciteit. Zo kan de reactie van ijzer(hydr)oxides met reactief organisch materiaal uit de bagger leiden tot het vrijkomen van ammonium en gereduceerd ijzer. Stoffen die voor waterplanten toxisch kunnen zijn. Op basis van de uitkomsten van de kolomproef werd voor beide gebieden een onderbouwde keuze gemaakt voor de dosering in het veld. De resultaten van dit onderzoek zijn al in 2021 gepubliceerd (Verstijnen et al., 2021). In dit rapport worden de resultaten van aanvullende metingen uit 2021 en 2022 meegenomen om iets meer te kunnen zeggen over de werkzaamheid van waterijzer op de langere termijn. Vooraleer waterijzer op grote schaal toe te passen, zal eerst een vervolgonderzoek in polder Westveen worden uitgevoerd.

Op basis van de beste dosering die uit de kolomproef naar voren komt, werd waterijzer in een watergang toegevoegd waarbij een naastgelegen niet behandelde watergang als controle diende. Hier werd een jaar lang, om zo de eventuele invloed van elk seizoen mee te nemen, gevolgd wat het effect was op de waterkwaliteit en op in de sloten geïntroduceerde waterplanten.

Daarnaast werd een kasproef uitgevoerd waarbij bodems werden gemengd met verschillende hoeveelheden waterijzer waarna werd gekeken naar de groei en de nutriëntenopname van geïntroduceerde aarvederkruid (*Myriophyllum spicatum*) planten.

Voorliggende rapportage behandelt de resultaten van het veldexperiment (Hoofdstuk 4) en tevens de aanvullende metingen aan het labexperiment (Hoofdstuk 3) en de resultaten van het kasexperiment met aarvederkruid (Hoofdstuk 5). Beide laatste onderdelen maken geen deel uit van de geoffreerde werkzaamheden, maar zijn wel belangrijk voor het beoordelen van de effecten van waterijzeradditie op veldschaal.

1.3 Reductie interne fosfaatmobilisatie

Toepassing fosfaatbindende stoffen

In Nederland zijn diverse onderzoeken uitgevoerd om de interne fosfaatmobilisatie te reduceren door het toevoegen van fosfaatbindende stoffen. Voorbeelden van fosfaatbindende stoffen zijn ijzer(III)-chloride (FeCl_3), polyaluminiumchloride (PAC/PAX) en lanthaan. Al deze stoffen hebben als effect dat ze werken door fosfaat vast te leggen. De stoffen verschillen wel in de wijze waarop fosfaat wordt vastgelegd, de eventuele risico's, de duurzaamheid van de binding en de kosten van de stoffen.

Het nadeel van het gebruik van ijzer(III)chloride is dat bij oplossen in water door hydrolyse zuur vrijkomt. In wateren die onvoldoende gebufferd zijn, kan dit leiden tot een sterke verzuring van de waterlaag. Buffering van de ijzer(III)chloride-oplossing voor toediening kan dit voorkomen. Een

.....
ander nadeel van het gebruik van ijzer is dat de binding tussen ijzer en fosfaat redoxgevoelig is, waardoor het gebonden fosfaat onder anaerobe omstandigheden weer kan vrijkomen.

De binding tussen aluminium en fosfaat is niet redoxafhankelijk. Daarom is polyaluminiumchloride (PAC) een vaker gebruikte fosfaatbinder. Ook PAC wordt gebufferd toegediend. Buffering voorkomt niet alleen verzuring, maar zorgt ook voor een goede vlokvorming ('flocking') en vergroot daarmee de efficiëntie van de maatregel. De pH van de waterlaag moet na toediening tussen pH 6,5 en 9 liggen, omdat buiten dit bereik zeer toxische aluminiumverbindingen kunnen ontstaan. Het fosfaatbindende vermogen van PAC neemt in de loop van de tijd af. Daardoor is de maatregel minder duurzaam (circa 10 jaar) dan bijvoorbeeld baggeren.

Een andere veel toegepaste fosfaatbinder is Phoslock: een kleisoort (bentoniet) opgeladen met het metaal lanthaan. De werking van Phoslock berust op de onomkeerbare binding van lanthaan met fosfaat. Deze binding is minder afhankelijk van de pH (zoals bij aluminium) of de zuurstofbeschikbaarheid/redoxpotentiaal (zoals bij ijzer). De dosis is afhankelijk van de dikte van de met de waterlaag communicerende bodemlaag. Optimale toediening (als slurrie of diep injecteren) vindt plaats in de winterperiode wanneer er veel fosfaat in het water is opgelost en er geen sprake is van algenbloei. Phoslock wordt vaak ook toegediend samen met een (verzwaard) vlokmiddel (PAC) - een combinatie die bekendstaat als de Flock & Lock-methode. Hierbij wordt niet alleen het opgeloste fosfaat, maar ook fosfaat in particuliere vorm (waaronder algen) vastgelegd. Flock & Lock heeft zich bewezen als een zeer effectieve en veilige methode om de concentratie beschikbaar fosfaat te verlagen. Wanneer de externe bron niet wordt aangepakt, is het zaak de maatregel na circa 10-15 jaar te herhalen.

Verschil tussen waterijzer en ijzer(III)chloride

Het onderzoek in polder Westveen is gericht op de toepassing van waterijzer om de nalevering van fosfaat uit de bagger te reduceren. Waterijzer is een restproduct van de drinkwaterwinning en bestaat uit een suspensie van ijzer(hydr)oxide die vrijkomt bij de ontijzering van grondwater en coagulatie van oppervlaktewater. Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van ingedroogd vloeibaar waterijzer (droge stofgehalte van 69%). Waterijzer bestaat grotendeels uit ijzer(hydr)oxiden die zeer goed in staat zijn om fosfaat te binden. Daarnaast bevat waterijzer ook variërende gehalten aan metalen, calciumcarbonaat en organische stof. Door deze wisselende samenstelling is het belangrijk om voor toepassing de samenstelling te bepalen. Het ijzer is in de driewaardige (geoxideerde) vorm aanwezig. In tegenstelling tot ijzer(III)chloride zit aan de toepassing van waterijzer niet het risico op verzuring. De fosfaatbinding aan ijzer is wel redoxgevoelig, waardoor het gebonden fosfaat onder anaerobe omstandigheden weer kan vrijkomen. Dit risico is lager naarmate de ratio tussen ijzer en fosfaat (Fe/P-ratio) hoger is. Lang niet al het toegevoegde ijzer wordt namelijk gereduceerd onder anaerobe omstandigheden. Dit komt omdat bij een hoge dosis ijzer niet de beschikbaarheid van driewaardig ijzer, maar de beschikbaarheid van reactief organisch materiaal beperkend is voor de ijzerreductie. Fosfaat dat vrijkomt bij de reductie van ijzer kan weer worden gebonden aan nog niet gereduceerde ijzer(hydr)oxides. Reductie van sulfaat in de waterbodem leidt tot de vorming van sulfide. Dit sulfide kan aan gereduceerd ijzer binden waardoor slecht oplosbare FeS_x verbindingen ontstaan die slecht fosfaat kunnen binden. In de waterbodem van polder Westveen is de verhouding tussen ijzer en zwavel in de bodem zeer ongunstig (<1) waardoor het overgrote deel van het ijzer in de waterbodem als FeS_x aanwezig is. Hierdoor is de binding van fosfaat in de bodem slecht.

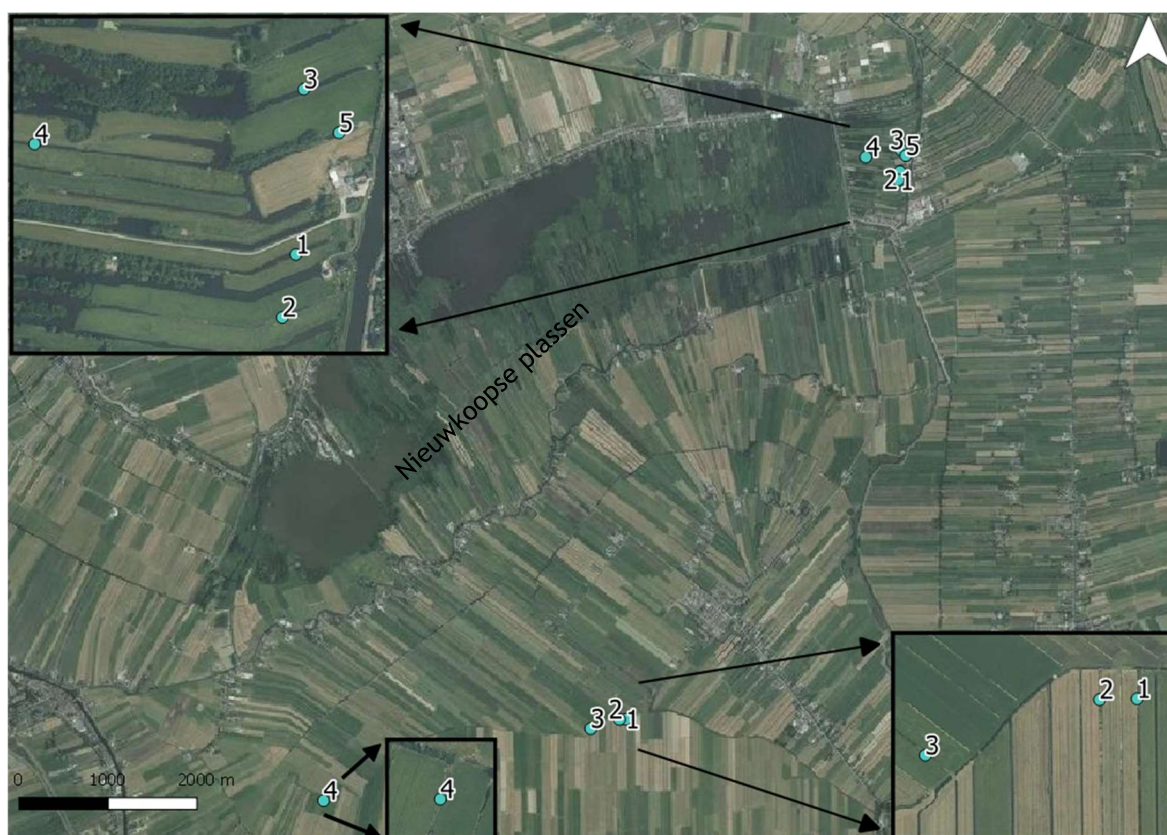
.....

2. MATERIAAL EN METHODEN

2.1 Labexperiment

Begin februari 2021 werden in het veld mengmonsters van de slibbodem verzameld van diverse sloten in polder Westveen en in Bodegraven-Noord (Figuur 1). Dit resulteerde in 11 mengmonsters afkomstig van 9 locaties: vijf locaties in Westveen (waarbij van twee locaties ook de onderliggende venige laag werd bemonsterd) en vier locaties in Bodegraven-Noord. Per locatie/sloot werd het bodemonmonster goed gemengd en vervolgens geanalyseerd op diverse variabelen (drooggewicht, gloeiverlies, destructie en oxalaatextractie). Het materiaal werd daarna zo luchtdicht mogelijk afgesloten en opgeslagen in een donkere koelcel tot aan de start van het experiment.

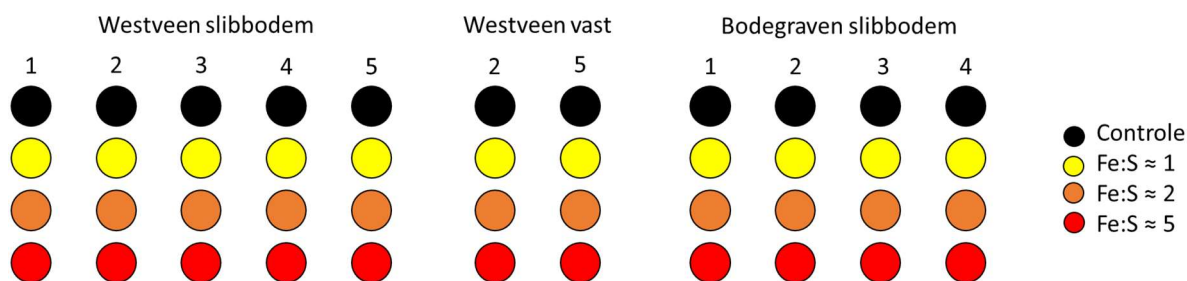
Voor de interpretatie van de resultaten is het belangrijk dat de slibbodems onder water worden gezet met gebiedseigen water. Begin maart 2021 werd daarom in beide gebieden voldoende oppervlaktewater verzameld om de kolommen met slib mee onder water te kunnen zetten. Dit water werd vervolgens in een donkere koelcel opgeslagen tot aanvang van het experiment.



Figuur 1. Monsterlocaties weergegeven op een luchtfoto. Bovenste helft van de kaart: polder Westveen, locaties 1 t/m 5. Onderste helft: polder nabij Bodegraven, locaties 1 t/m 4.

Op 22 maart 2021 werd gestart met het inzetten van het experiment. Hiertoe was vooraf berekend op basis van de bodemanalyses hoeveel waterijzer er moest worden toegevoegd aan de bagger om tot een totaal-ijzer/totaal-zwavel-ratio te komen van respectievelijk 1, 2 en 5. Er wordt gestuurd op de totaal-ijzer/totaal-zwavel ratio omdat problemen met fosfaatbinding in waterbodems met

name ontstaan in bodems waarin deze ratio laag is (<1). Naast deze drie behandelingen met waterijzer werd een controle ingezet die bestond uit bagger waaraan geen waterijzer werd toegevoegd. Per slootbodem en per ijzer/zwavel-ratio, werden de hoeveelheden bagger (en vaste bodem) en waterijzer afgewogen en samen in een bak volledig gemengd. Voor de controle werd alleen bagger afgewogen. Het mengsel werd vervolgens in een glazen kolom (diameter 12-14,5 cm) gegoten tot 20 cm hoog en in een donkere klimaatkamer geplaatst (temperatuur circa 17°C). Voor elke combinatie van slootbodem (9 bagger (5 Westveen + 4 Bodegraven-Noord) en 2 vaste bodems (Westveen)) en behandeling (4) werd steeds één kolom ingezet. In totaal werden daarmee voor beide gebieden samen 44 kolommen ingezet (Figuur 2). Vlak na inzetten van het experiment was het oppervlaktewater nog wat troebel door het opgieten van het water. Het water werd echter snel helder na verloop van tijd. Zie Figuur 3 voor een overzicht van de kolommen in de klimaatkamer, nadat de troebeling bezonken was. Het waterijzer werd om niet geleverd door AquaMinerals B.V., waarvoor dank.

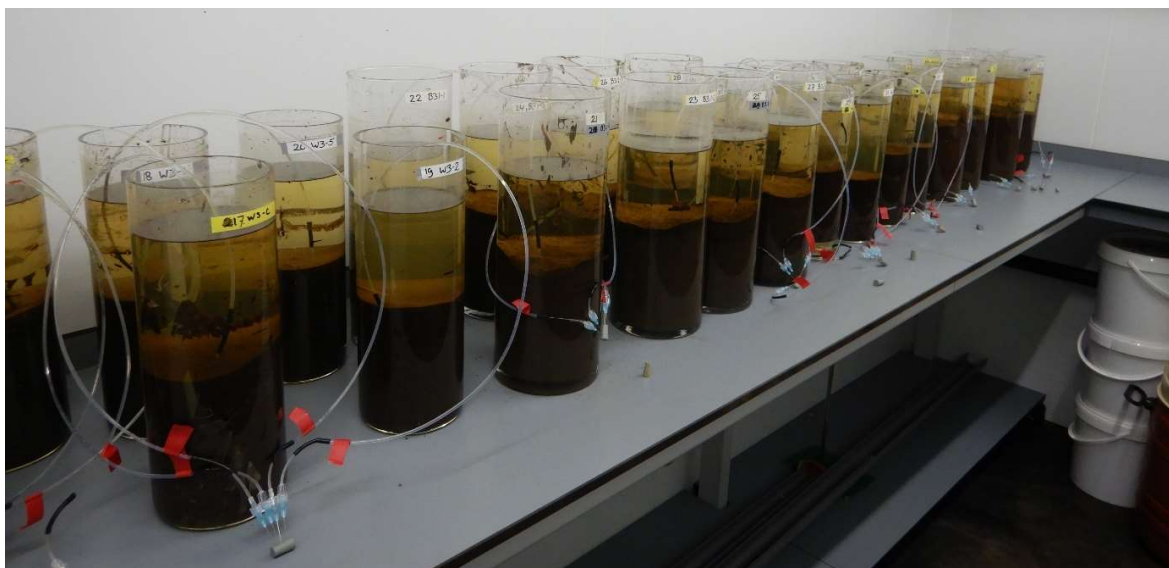


Figuur 2. Schematische weergave van de opzet van het experiment. In totaal werden 44 kolommen ingezet.

De volgende monstermomenten werden aangehouden:

- Poriewater: 0, 2, 4, 8, 12, 27, 36, 52 en 63 weken;
- Oppervlaktewater: 0, 7 en 12 weken;
- Bodem: 0 (destructie) en 12 weken (oxalaatextractie).

Zie Bijlage 1 voor een overzicht en beschrijving van de uitgevoerde analyses.



Figuur 3. Opstelling van de kolommen in de klimaatkamer. Foto is genomen vlak na inzetten van het experiment, maar na bezinken van het opgewervelde bodemmateriaal.

2.2 Veldexperiment

Om de effectiviteit van het waterijzer in de veldsituatie te toetsen, werd een veldexperiment ingericht waarbij, op basis van de resultaten van het labexperiment (Verstijnen et al., 2021), waterijzer tot een Fe/S-ratio van 2 werd toegediend aan een sloot. De sloten voor het veldexperiment werden op basis van de bodemeigenschappen, ligging en praktische overwegingen geselecteerd. Dit waren sloot 3 en 5; beide sloten met een doodlopend eind (Figuur 1). Het veldexperiment werd ingericht op 29 en 30 juni 2021.

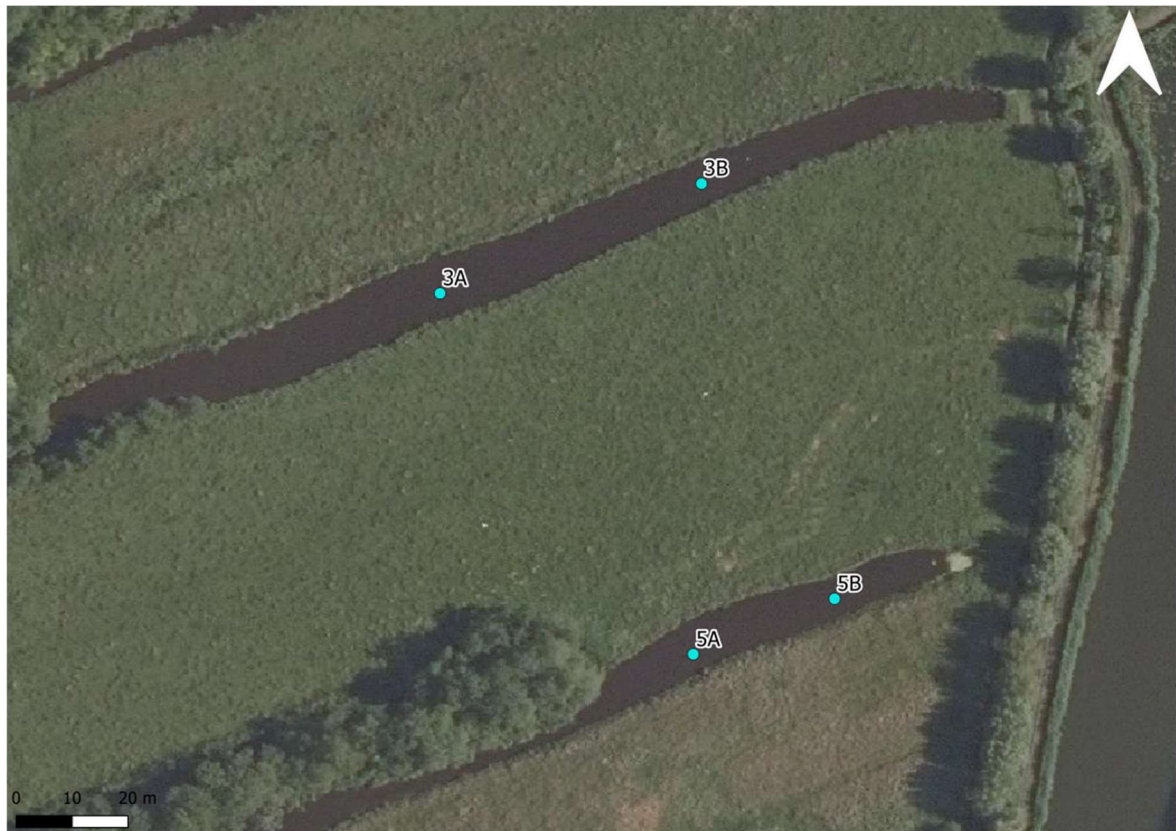
Op 29 juni 2021 werden de twee proefvakken met schotten afgesloten van de rest van de sloot en gebaggerd tot een waterdiepte van 60 cm. Op 30 juni 2021 werden de sloten bemonsterd (nulmeting; $t = 0$). Direct na de bemonstering werd aan sloot 5 circa 125 m³ (ca. 6.000 kg) waterijzer uit Andijk toegediend met behulp van een mestverspreider (Figuur 4). De hoeveelheid waterijzer die nodig was voor het realiseren van een Fe/S-ratio van 2 werd berekend op basis van het slibvolume in de sloot na baggeren (overgebleven slibdikte van 30 cm) en de Fe/S-ratio van de bodem. Van de toegevoegde partij waterijzer werd tevens een mengmonster genomen voor analyse (bepaling drooggewicht, gloeiverlies, destructie en oxalaatextractie). Na inzet werd de bodem en het oppervlaktewater periodiek bemonsterd op 2, 9, 21, 34 en 54 weken na toedienen van het waterijzer.



Figuur 4. Additie van waterijzer in de sloot in polder Westveen.

Doorgaans werd per monsterronde in iedere sloot 1 oppervlaktewatermonster genomen (mengmonster) en monsters van de toplaag (0-10 cm) en de diepere lagen van de bodem inclusief poriewater (Figuur 5). Elk bodemmonster bestond uit een mengmonster van 3 tot 5 steken, bemonsterd met een zuigerboor. Tevens werden in beide sloten enkele veldmetingen uitgevoerd met een HQD-multimeter: pH, zuurstofgehalte en temperatuur van het oppervlaktewater. In februari 2022 werd tevens op enkele locaties in de sloten de slibdikte gemeten.

In elke sloot werden in juli 2021 twee kooien geplaatst (50 cm x 50 cm x 100 cm) waarin waterplanten werden aangebracht. De kooien waren aan alle kanten afgesloten om vraat te voorkomen. De kooien waren wel toegankelijk voor kleine visjes en kleine zoetwaterkreeften. In elke kooi werden de volgende waterplanten geplaatst: 2 kleine krabbenscheer (*Stratiotes aloides*), 1 witte waterlelie (*Nymphaea alba*), 1 grote waterweegbree (*Alisma plantago-aquatica*), 1 waterviolier (*Hottonia palustris*), 1 drijvend fonteinkruid (*Potamogeton natans*) en 1 smalle waterpest (*Elodea nuttallii*).



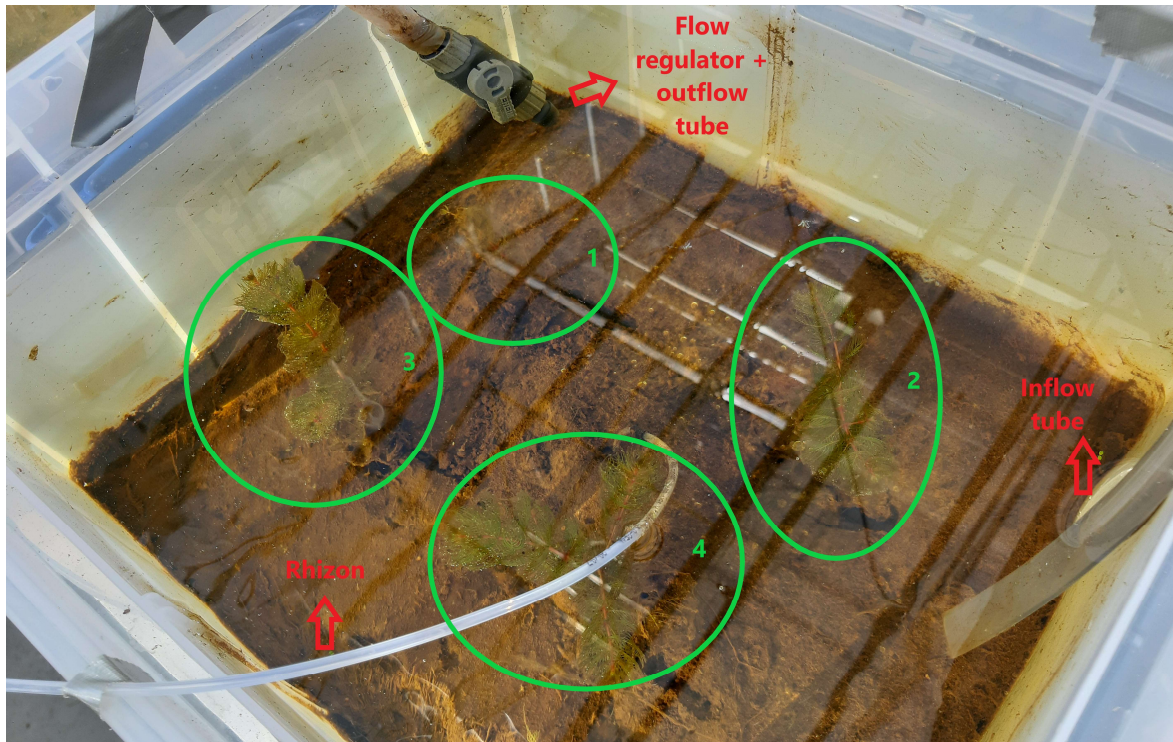
Figuur 5. Overzicht van de bodemonmonsterlocaties in de sloten van het veldexperiment in polder Westveen.

2.3 Kasexperiment

Voor het kasexperiment werd op 22 maart 2022 slib uit de controle sloot (locatie 3 in Figuur 5) verzameld. Direct na verzamelen van het slib werd het experiment in de kassen van de Radboud Universiteit ingezet. Hierbij werden 16 bakken (totale volume van 35 liter) gevuld met 10 liter slib uit polder Westveen. Aan het slib werden verschillende hoeveelheden waterijzer toegevoegd waardoor vier behandelingen werden gerealiseerd: slootslib/waterijzer-mengsel met een Fe/S-ratio van 1 (mol/mol), slootslib/waterijzer-mengsel met een Fe/S-ratio van 2 (mol/mol), slootslib/waterijzer-mengsel met een Fe/S ratio van 5 mol/mol en een controlebehandeling die bestond uit slootslib zonder toegevoegd waterijzer. Elke behandeling bestond uit 4 replica's. Het slib werd onder water gezet door aan elke bak voorzichtig 20 liter demiwater toe te voegen. Ter simulatie van de waterkwaliteit in de polder werden aan het demiwater een aantal zoutoplossingen toegevoegd waardoor dit water uiteindelijk 3000 $\mu\text{mol/l}$ HCO_3^- , 500 $\mu\text{mol/l}$ Ca, 200 $\mu\text{mol/l}$ Mg, 100 $\mu\text{mol/l}$ K en 200 $\mu\text{mol/l}$ SO_4^{2-} bevatte. Om problemen met algen te voorkomen werd het water gefilterd met behulp van een UV-filter.

In elke bak werden vier stengels van aarvederkruid (*Myriophyllum spicatum*) geplaatst met een lengte van 10 cm en een totaal versgewicht van 4-6 gram (Figuur 6). Wekelijks werd er een oppervlaktewatermonster genomen uit elke bak en elke twee weken werd een poriewatermonster uit de slibbodem verzameld via een Rhizon.

Na 6 weken werden de planten geoogst, gedroogd en geanalyseerd. Uit elke bak werden ook mengmonsters van de slibbodem verzameld die werden gedroogd voor verder analyse.



Figuur 6. Detailfoto van een bak (behandeling Fe/S-ratio van 5) met slibbodem uit polder Westveen en de vier aarvederkruid planten vlak na de start van het experiment. Met behulp van een Rhizon werd poriewater verzameld. Bron: Lormans (2022).

.....

3. RESULTATEN LABEXPERIMENT

De resultaten van het labexperiment zijn in detail besproken in een rapportage uit 2021 (Verstijnen et al., 2021). Dit experiment had een officiële doorlooptijd van 3 maanden (tot eind juni 2021) en was bedoeld als ‘proof of principle’. Vanwege het innovatieve karakter van het toedienen van waterijzer hebben we de proef echter laten doorlopen tot in de zomer van 2022 (totale looptijd van 15 maanden). In dit hoofdstuk wordt het verdere verloop van een aantal belangrijke parameters besproken om een beter beeld te krijgen van de langere termijneffecten van de toediening van waterijzer.

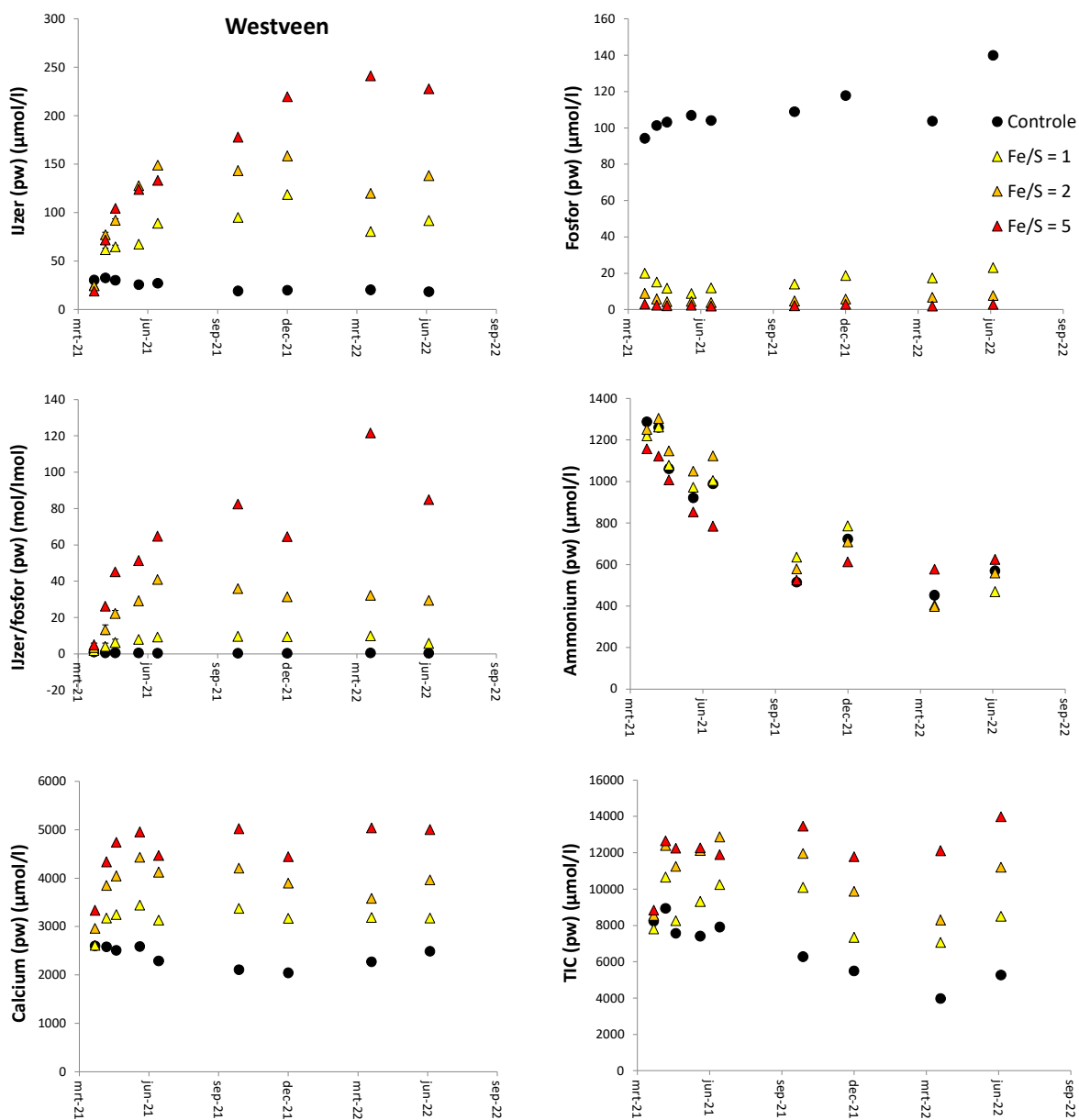
3.1 Poriewater

De opgeloste ijzerconcentraties in het poriewater van de bodems uit de sloten van zowel polder Westveen als Bodegraven-Noord namen sterk toe als gevolg van de additie van waterijzer. Bij aanvang lagen de concentraties gemiddeld rond de 25 $\mu\text{mol/l}$ (Westveen; Figuur 7) en 20 $\mu\text{mol/l}$ (Bodegraven-Noord; Figuur 8). In de controlebehandelingen bleven deze waarden over de eerste 12 weken van het experiment in dezelfde range liggen, waarna ze tussen juni 2021 en juni 2022 nog een lichte afname lieten zien (Figuur 7 en Figuur 8). In de bodems met toegevoegd waterijzer stijgen de ijzerconcentraties door de tijd waarbij er alleen voor de hoogste ijzerdosering (Westveen en Bodegraven) en de op één na hoogste ijzerdosering (Bodegraven) nog sprake was van een verdere toename tussen eind juni en begin december 2021 (Figuur 7 en Figuur 8). In de kolommen met een Fe/S-ratio van 2 en 5 stegen deze sterker dan in de kolommen met een Fe/S-ratio van 1. Het extra toegevoegde ijzer wordt in de anaerobe bodem voor een deel gereduceerd waarbij relatief goed oplosbaar gereduceerd ijzer vrijkomt en ophoopt in het poriewater. De gemiddelde concentraties ijzer in het poriewater lopen voor polder Westveen en Bodegraven op tot respectievelijk 240 en 180 $\mu\text{mol/l}$ in de hoogste waterijzerdosering (Figuur 7 en Figuur 8).

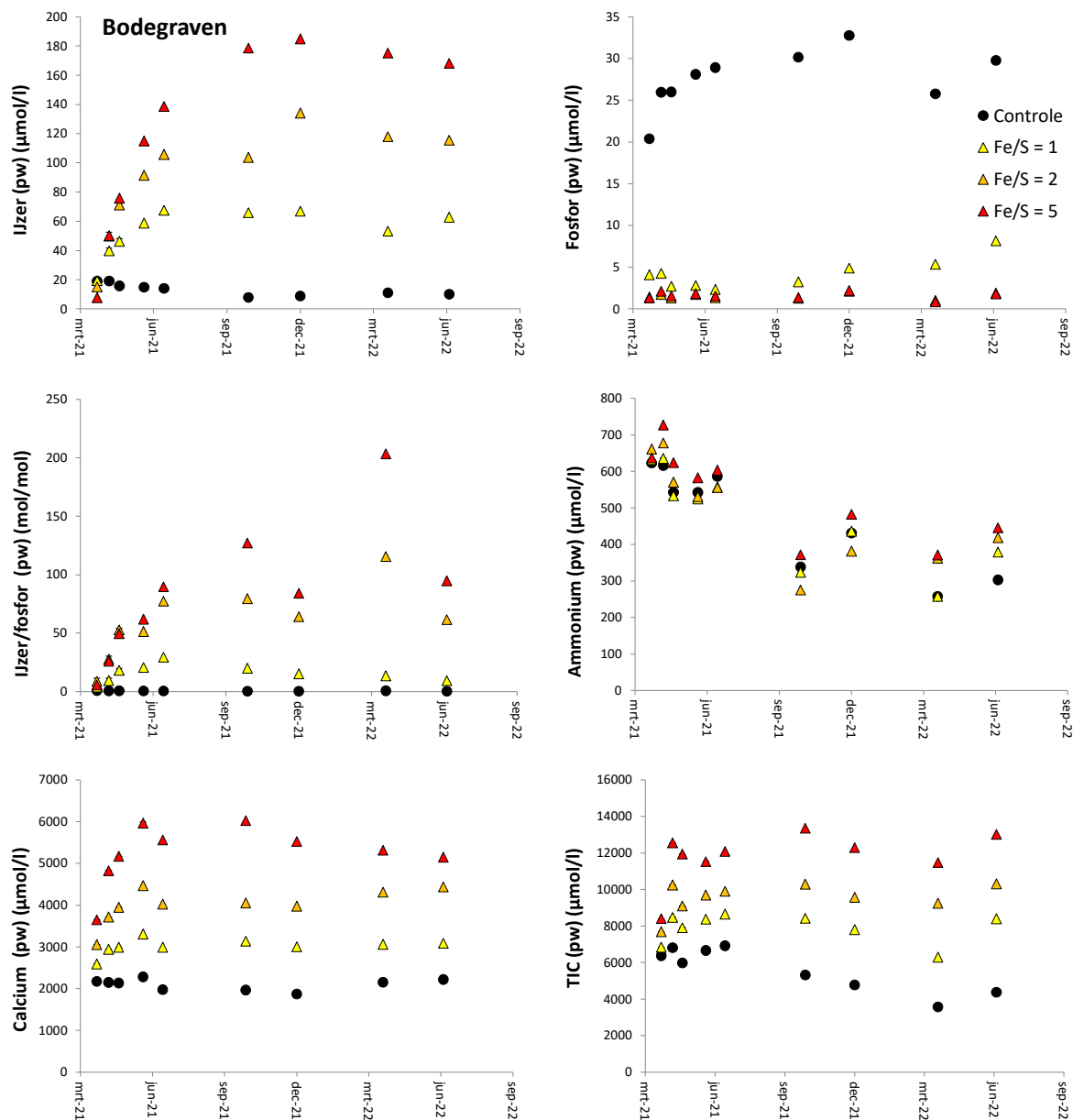
De fosfor (P)-concentratie het poriewater was gelijk na inzetten, al veel lager in de behandelde kolommen dan in de controles waar de P-concentratie gemiddeld 100 $\mu\text{mol/l}$ bedroeg voor de bodems uit polder Westveen en 30 $\mu\text{mol/l}$ voor de bodems uit Bodegraven-Noord (Figuur 7 en Figuur 8). Bij de hoogste waterijzerdosering was de gemiddelde P-concentratie onmiddellijk na inzetten al laag en bleef gedurende de rest van het experiment overwegend lager dan 3 $\mu\text{mol/l}$ voor polder Westveen. Voor Bodegraven-Noord bleven voor zowel de hoogste als de een na hoogste ijzerdosering de gemiddelde P-concentraties lager dan 2 $\mu\text{mol/l}$ gedurende het gehele experiment. Voor de laagste doseringen zien we gedurende de eerste weken na inzetten nog een geleidelijke afname van de P-concentraties van 20 naar 9 $\mu\text{mol/l}$ voor Westveen en van 4 naar 2 $\mu\text{mol/l}$ voor Bodegraven (Figuur 7 en Figuur 8). Hierna stijgen de P-concentraties voor deze behandeling in de loop van de tijd tot 23 $\mu\text{mol/l}$ voor polder Westveen en 8 $\mu\text{mol/l}$ voor Bodegraven-Noord. Voor polder Westveen zien we dat voor de op een na hoogste ijzerdosering de P-concentraties tussen juni 2021 en juni 2022 weer geleidelijk stijgen van 4 naar 8 $\mu\text{mol/l}$ (Figuur 7).

In de behandelingen zal het eerder opgeloste P voor een groot deel gebonden (geadsorbeerd) zijn aan de overmaat aan ijzer(III)(hydr)oxides van het waterijzer. We zien dat in de laagste behandelingen er in de loop van de tijd weer P vrijkomt in de bodem. Dit laat zien dat de binding van P aan ijzer niet irreversibel is en dat er na verloop van tijd weer P kan vrijkomen in de waterbodem afhankelijk van de toegevoegde hoeveelheid waterijzer. Gedurende 15 maanden bleven de concentraties echter veel lager dan in de controle bodems. Wanneer we de lineaire toename van de laagste en op een na laagste doseringen voor polder Westveen zouden

extrapoleren dan zou het nog respectievelijk 7 en 26 jaar duren voordat de concentraties in deze behandelingen weer op het oude niveau zouden liggen.



Figuur 7. Verloop van de gemiddelde ijzer-, fosfor-, ammonium-, calcium- en TIC- (anorganische koolstof) concentraties (μmol/l) in het poriewater, en de ijzer/fosfor-ratio in het poriewater van de verschillende behandelingen van de bodems uit polder Westveen.



Figuur 8. Verloop van de gemiddelde ijzer-, fosfor-, ammonium-, calcium- en TIC- (anorganische koolstof) concentraties (µmol/l) in het poriewater, en de ijzer/fosfor-ratio in het poriewater van de verschillende behandelingen van de bodems uit Bodegraven-Noord.

Als resultante van de stijgende ijzer- en dalende P-concentraties van het poriewater steeg de Fe/P-ratio in het poriewater door de tijd in de behandelingen waaraan waterijzer was toegediend. Deze stijging was het sterkst bij de hoogste dosering en het laagste bij de laagste dosering. Vanaf drie maanden na inzetten van de proef nemen de gemiddelde Fe/P-ratio's geleidelijk iets af voor de twee laagste behandeling en is er nog sprake van een toename voor de hoogste doseringen. De Fe/P-ratio's van de controles waren gemiddeld altijd zeer laag (0,5 voor Westveen en 0,4 voor Bodegraven-Noord). Dergelijke lage ratio's geven in combinatie met de hoge P-concentraties in het poriewater een zeer hoog risico op P-nalevering vanuit de waterbodem naar de waterlaag. Bij ratio's boven de 1 neemt de nalevering sterk af zolang de waterlaag voldoende zuurstof bevat.

.....

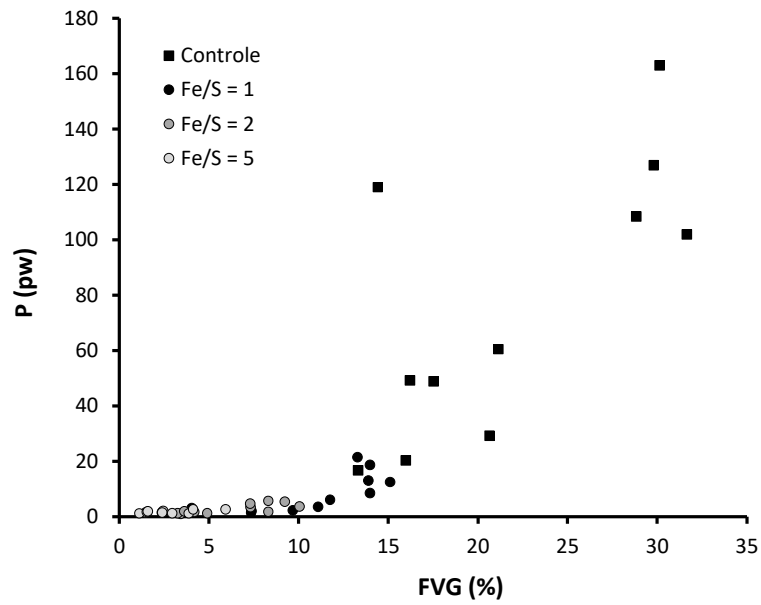
De ammoniumconcentratie in het poriewater was bij aanvang van het experiment zeer hoog in alle bodems; circa ruim 1200 $\mu\text{mol/l}$ voor polder Westveen en 650 $\mu\text{mol/l}$ voor Bodegraven-Noord (Figuur 7 en Figuur 8). Na enkele weken daalden de ammoniumconcentraties iets, met name bij een Fe/S-ratio van 5. De hoge ammoniumconcentraties in de bodems zijn waarschijnlijk het gevolg van de accumulatie van ammonium dat vrijkomt bij de afbraak van reactief organisch materiaal in de bodems. Ammonium kan naar de waterlaag diffunderen waar het kan worden genitrificeerd tot nitraat. In de eerste maanden van het experiment halveren de ammoniumconcentraties in het poriewater voor alle behandelingen. Vanaf september 2021 blijven de concentraties in grote lijnen stabiel. Er worden geen duidelijk effecten van de behandelingen gevonden. De lagere ammoniumconcentraties bij de hoogste dosering voor polder Westveen in het begin van het experiment kan te maken hebben verdunning als gevolg van de menging met ammoniumarm waterijzer en door binding van ammonium aan ijzer(hydr)oxides. Aan het eind van het experiment zien we dat de ammoniumconcentraties weer iets lijken op te lopen waarbij voor Bodegraven-Noord de ammoniumconcentratie hoger is naarmate de ijzerdosering toeneemt.

Verder is te zien in Figuur 7 en Figuur 8 dat er ook verschillen zijn in de gemiddelde calciumconcentraties in het poriewater. De calciumconcentratie is het laagste in de controle en het hoogste in de hoogste waterijzerbehandeling. In de met waterijzer behandelde bodems stijgen ze de eerste weken, waarna ze gemiddeld wat afnemen. Magnesium laat een vergelijkbaar beeld zien. De verschillen met de controle zijn waarschijnlijk het gevolg van extra toegevoegde kationen met het waterijzer (met name totaal-Ca was hoger in het waterijzer dan in de slibbodem) en mogelijk ook als gevolg van kationverdringing van het bodemadsorptiecomplex door calcium en/of gemobiliseerd ijzer.

De anorganische koolstofconcentraties (bicarbonaat plus kooldioxide, TIC) waren wederom hoger bij een Fe/S-ratio van 5 en het laagste in de controle. Deze steeg in de eerste weken van het experiment, maar bleef daarna relatief constant (Figuur 7 en Figuur 8). De toename van anorganisch koolstof kan het gevolg zijn van anaerobe afbraakprocessen (ijzerreductie) in de bodem, waarbij anorganisch koolstof vrijkomt. Doordat in de waterijzerbodem extra ijzer is toegevoegd, kan dit extra ijzer ook gebruikt worden als alternatieve elektronenacceptor voor de afbraak van organisch materiaal. Waarschijnlijk is de toename echter vooral het gevolg van het toedienen van waterijzer waaruit anorganisch koolstof vrijkomt door het oplossen van calcium(bi)carbonaat.

3.2 Bodem

De totaalgehalten van de bodems zijn bepaald na mengen met het waterijzer, dus ter controle of de berekende Fe/S-ratio ook daadwerkelijk werd gerealiseerd. Respectievelijk voor de Fe/S-ratio's van 1, 2 en 5 waren de gerealiseerde ratio's gemiddeld: $1 \pm 0,1$, $2 \pm 0,3$ en $4 \pm 0,8$. Voor de ingezette controle bodems was dit $0,5 \pm 0,2$. De fosfaatverzadigingsgraad was aan het eind van het experiment voor de controle $21 \pm 7,0$ % en voor de behandelde waterbodem met Fe/S-ratio's van 1, 2 en 5 respectievelijk: $11 \pm 3,5$ %, $6,4 \pm 2,5$ % en $2,7 \pm 1,4$ %. De fosfaatverzadigingsgraad was veel lager voor de bodems met waterijzeradditie en zoals verwacht het laagste bij de hoogste Fe/S-ratio. De resulterende P-concentratie in het poriewater (na week 12) was sterk gecorreleerd met de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem. Boven een fosfaatverzadigingsgraad van 12,5 % neemt de P-concentratie van het poriewater lineair toe (zie Figuur 9, beide gebieden samen).



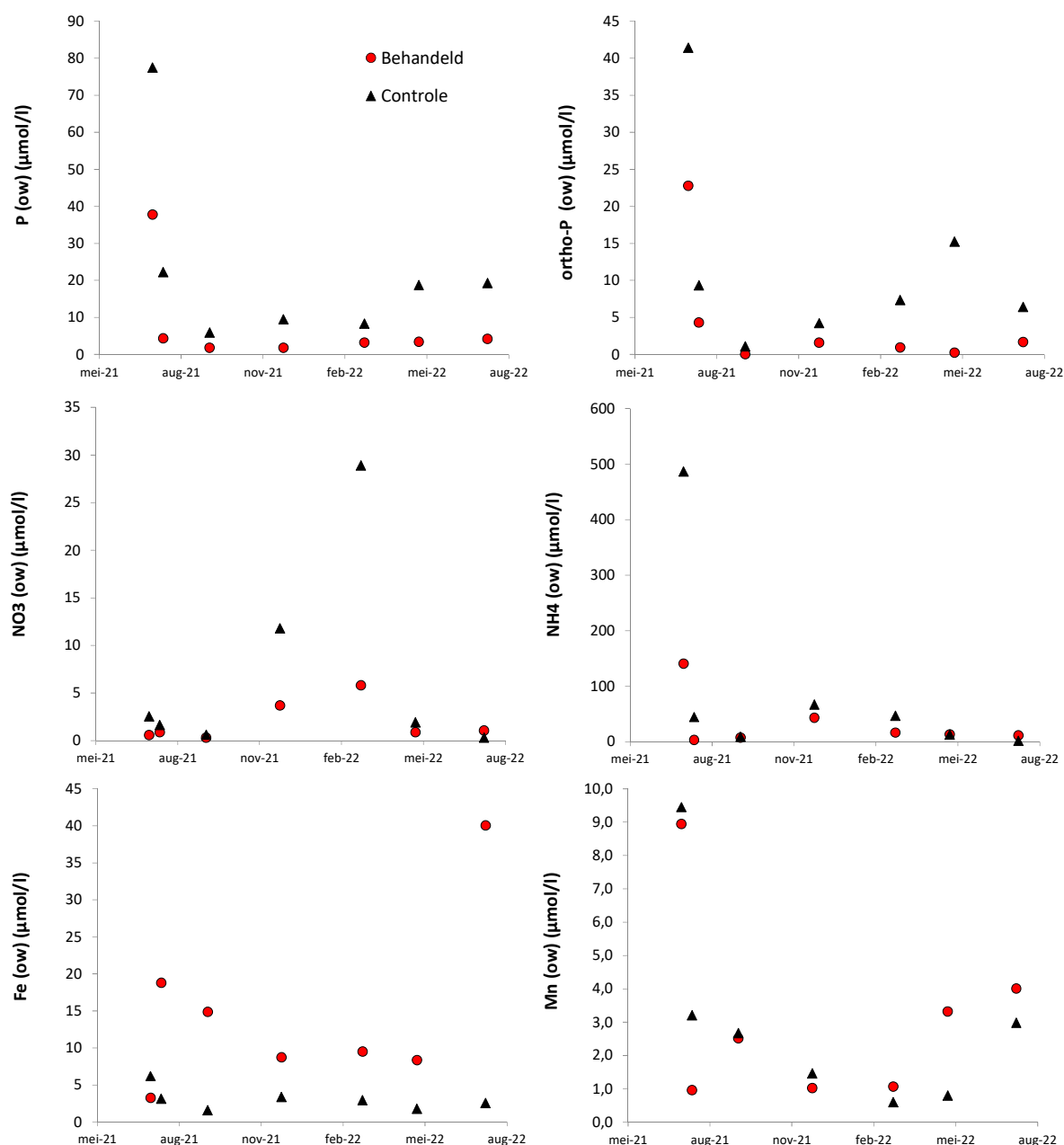
Figuur 9. Fosforconcentraties ($\mu\text{mol/l}$) in het poriewater (op $t = 12$ weken) uitgezet tegen de fosfaatverzadigingsgraad (FVG, %) van de waterbodems uit polder Westveen en Bodegraven-Noord.

.....

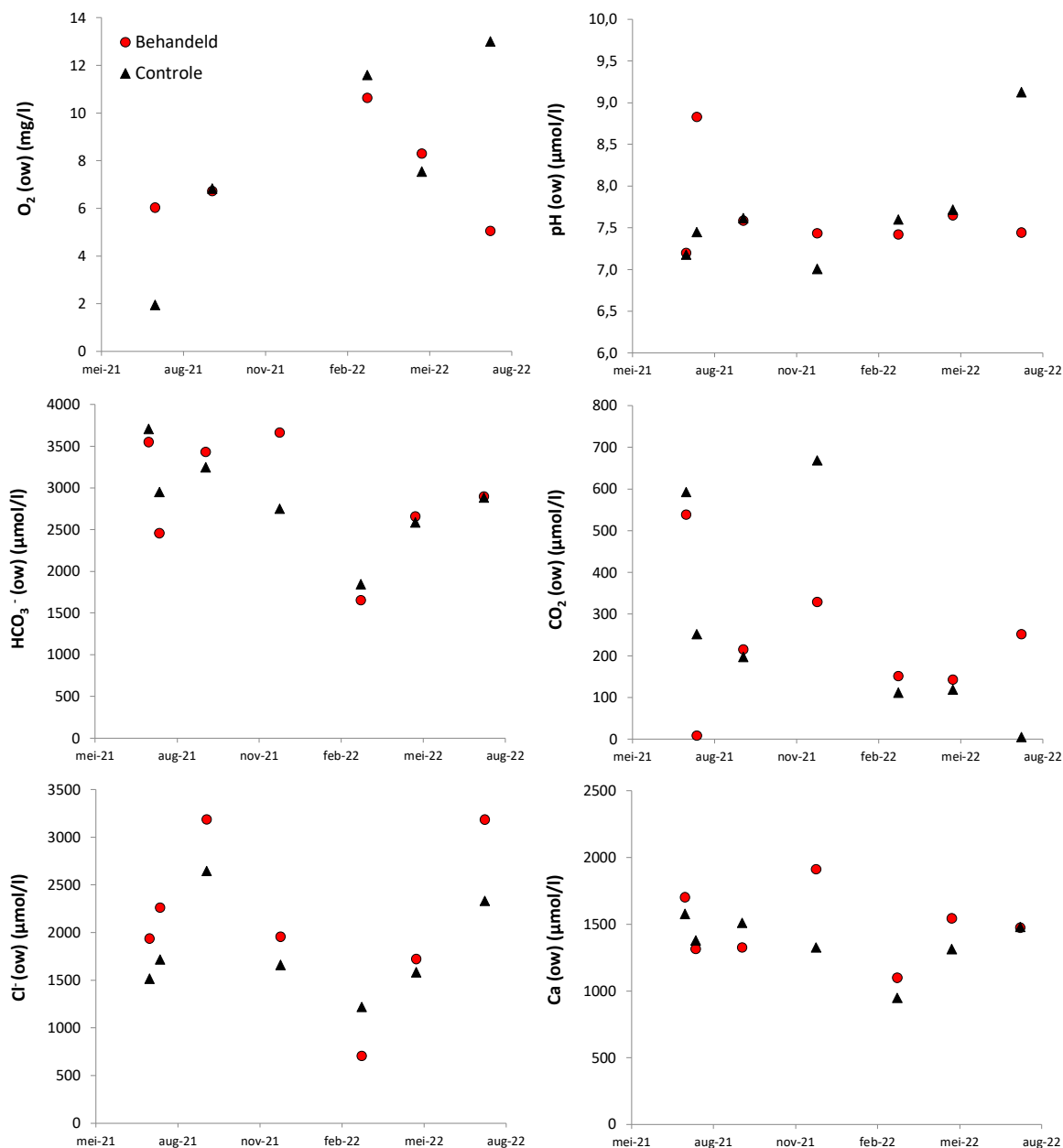
4. RESULTATEN VELDEXPERIMENT

4.1 Oppervlaktewater

In Figuur 10 en Figuur 11 wordt het verloop van een aantal (fysio)chemische parameters van het oppervlaktewater gegeven voor de behandelde en de onbehandelde (controle)sloot in polder Westveen.



Figuur 10. Verloop van de fosfor-, ortho-fosfaat-, nitraat-, ammonium-, ijzer- en mangaanconcentraties ($\mu\text{mol/l}$) in het oppervlaktewater van de controle en behandelde sloot in polder Westveen.



Figuur 11. Verloop van het zuurstofgehalte (mg/l), pH, bicarbonaat-, kooldioxide-, chloride- en calciumconcentraties (μmol/l) in het oppervlaktewater van de controle en behandelde sloot in polder Westveen.

Direct voor het inbrengen van het ijzerwater werden zowel in de behandelde als de controle sloot zeer hoge concentraties fosfor, ortho-fosfaat en ammonium gemeten (Figuur 10). Dit komt doordat de sloten de dag voor het inbrengen van het waterijzer gebaggerd zijn om ze op diepte te brengen (tot ± 60 cm waterdiepte). Door opwerveling van bodemmateriaal is er blijkbaar veel fosfor en ammonium in de waterlaag terecht gekomen. De concentraties waren hoger in de controle sloot waar ook het zuurstofgehalte nog het laagste was (Figuur 11). In de weken daarna zien we dat de concentraties van deze stoffen sterk afnemen in de sloten en het zuurstofgehalte van de controle sloot stijgt. De totaal-fosfor en ortho-fosfaatconcentraties van de behandelde sloot blijven vanaf september 2021 gemiddeld respectievelijk 4 en bijna 8 maal lager dan in de controle sloot (Figuur

10). Deze verschillen laten zien dat er minder nalevering van fosfaat plaatsvindt in de behandelde sloot dan in de controle sloot.

De ammonium- en nitraatconcentraties zijn in de winter hoger dan in de zomer. Dit komt doordat er in de winter minder gekoppelde nitrificatie en denitrificatie plaatsvindt dan in de zomermaanden en er ook minder nitraat en ammonium wordt opgenomen door algen en planten. We zien dat in de winter met name de nitraatconcentratie hoger is in de controle sloot dan in de behandelde sloot (bijna 5 maal hoger in februari 2022; Figuur 10). Het gaat hierbij waarschijnlijk niet om een behandelingseffect.

De ijzerconcentratie is na toedienen van het waterijzer steeds hoger in de behandelde sloot (3 tot 15 maal hoger). Ook de mangaanconcentratie is vanaf februari 2022 steeds hoger in de behandelde sloot (Figuur 10).

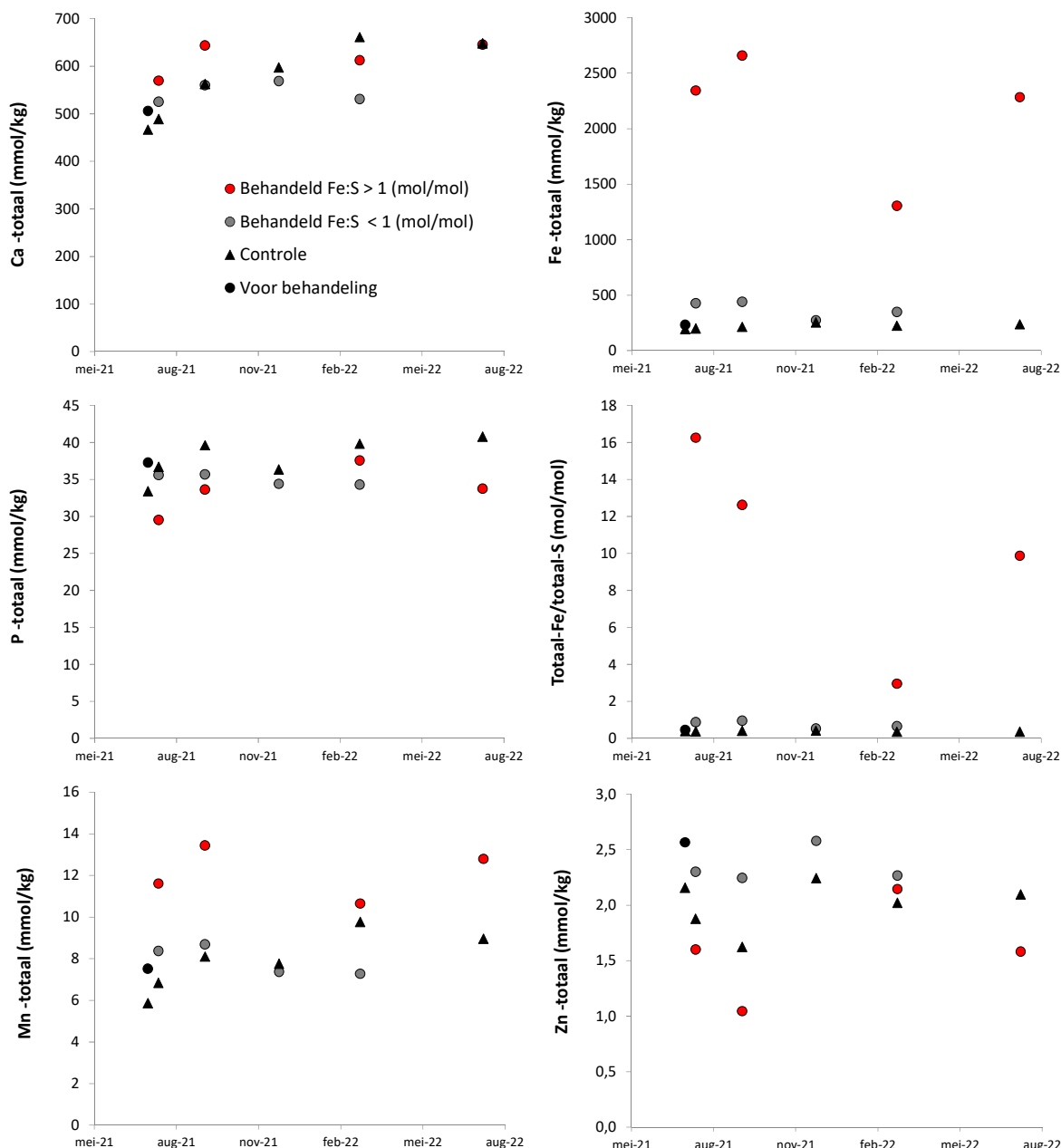
In de waterlaag varieert de pH overwegend tussen 7,2 en 7,7 met een uitschieter naar pH 8,8 in de behandelde sloot in juli 2021 (direct na behandelen) en een uitschieter naar 9 in de controle sloot in juli 2022 (Figuur 11). Bicarbonaat is de dominante anorganische koolstofvorm in de sloten en de kooldioxideconcentraties liggen vaak lager dan 200 $\mu\text{mol/l}$ (Figuur 11). Dit betekent dat ondergedoken waterplanten die bicarbonaat kunnen gebruiken in het voordeel zijn. Er zijn geen hele duidelijke verschillen zichtbaar tussen de behandelde en de controlesloot. De bicarbonaatconcentratie is voor beide sloten veel lager in februari 2022.

Het verloop van de chlorideconcentratie laat een duidelijk seizoenspatroon zien met lagere concentraties in de winter en hogere concentraties in de zomer. In de zomer nemen de chlorideconcentraties toe als gevolg van verdamping waardoor het water 'indikt'. In de winter is er weinig verdamping en vindt er verdunning plaats door regenwater. De lagere concentraties voor calcium en bicarbonaat in februari 2022 (Figuur 11) worden dus ook door verdunning veroorzaakt. Over het algemeen worden in de behandelde sloot wat hoger chloride- en calciumconcentraties gemeten dan in de controle sloot. Dit was echter ook al het geval voordat de behandeling plaatsvond.

4.2 Waterbodem

Bij het bemonsteren van de waterbodems zijn steeds toplaag monsters (0-25 cm) genomen in beide sloten en daarnaast voor de behandelde sloot ook diepere monsters. In november 2021 is dit misgegaan en zijn er geen toplaagmonsters verzameld in de behandelde sloot. In juli 2022 zijn er geen diepere monsters verzameld in de behandelde sloot.

We zien dat zoals verwacht de behandeling met waterijzer een duidelijk effect heeft op de ijzergehaltes van de toplaag van de behandelde sloot (Figuur 12). Ook voor de diepere bodem is er nog sprake van een lichte verhoging van het ijzergehalte ten opzichte van de startmeting en de controle sloot. Overeenkomstig deze hogere ijzergehaltes zijn ook de totaal-ijzer/totaal-zwavel (Fe/S) ratio's van de bodems van de behandelde sloten hoger (Figuur 12). De teruggemeten Fe/S-ratio's zijn veel hoger dan de ratio van 2 waarop gemikt werd. Dit komt waarschijnlijk omdat het waterijzer zich nog niet goed gemengd heeft met de volledige dikte van de sliblaag waarvoor de dosering berekend is. Verder zien we dat de behandeling geen groot effect heeft op het totale fosforgehalte van de monsters. Overwegend is het P-gehalte in de bodems van de behandelde sloot iets lager dan voor de controle sloot terwijl er geen verschil was voor de behandeling (Figuur 12). Het mangaangehalte is wel iets hoger voor de toplaag van de behandelde sloot. Dit komt omdat het waterijzer ook mangaan bevat. Het zinkgehalte van de bodems uit de behandelde sloot is meestal lager dan het zinkgehalte van de controle sloot.



Figuur 12. Verloop van de totale gehalten aan calcium, ijzer, fosfor, mangaan, zink en de ijzer/zwavel-ratio (in mol/mol) in de waterbodem van de controle en behandelde sloot in polder Westveen. Gehaltes zijn uitgedrukt in mmol/kg droge bodem.

In Tabel 1 worden de resultaten gegeven van de metalen analyses die zijn uitgevoerd aan de in juli 2022 verzamelde bodems uit de twee sloten. We zien dat alleen barium, cadmium, kobalt en mangaan hoger zijn in de behandelde sloot. Voor de overige elementen geldt dat de waarden bij benadering gelijk zijn of juist lager in de behandelde sloot. Het gehalte kobalt komt in de behandelde sloot boven de toegestane waarde voor vrije verspreiding in zoet oppervlaktewater uit (Tabel 1). Het is niet duidelijk in hoeverre de verschillen bepaald worden door verschillen die er tussen de sloten bestaan en in hoeverre de additie van waterijzer een rol heeft gespeeld.

Tabel 1. Gehaltes van een groot aantal (zware) metalen in de waterbodem van de controle en behandelde sloot in juli 2022.

		mg/kg ds														g/kg ds
		As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sr	Mn	Zn	Fe	
Controle	Gem	7,5	136,8	0,7	10,6	19,6	57,9	12,9	0,4	20,2	134,9	123,4	491,3	137,0	13,2	
	SD	1,1	9,1	0,1	1,7	3,4	9,4	3,2	0,2	2,8	24,4	7,4	78,8	21,5	1,8	
Behandeld	Gem	6,2	159,1	1,8	69,7	23,1	18,5	6,3	1,9	21,7	63,5	125,8	702,9	103,4	127,5	
	SD	0,4	10,7	0,3	14,0	0,7	12,7	2,3	1,1	0,7	22,7	2,3	77,3	38,4	26,4	
Max waarde kwal klasse A ¹		29	395	4	25	120	96		5	50	138			563		
Max waarde kwal klasse B ²		85	625	14	240	380	190		200	210	580			2000		

¹Maximale Waarden verspreiden baggerspecie in zoet oppervlaktewater

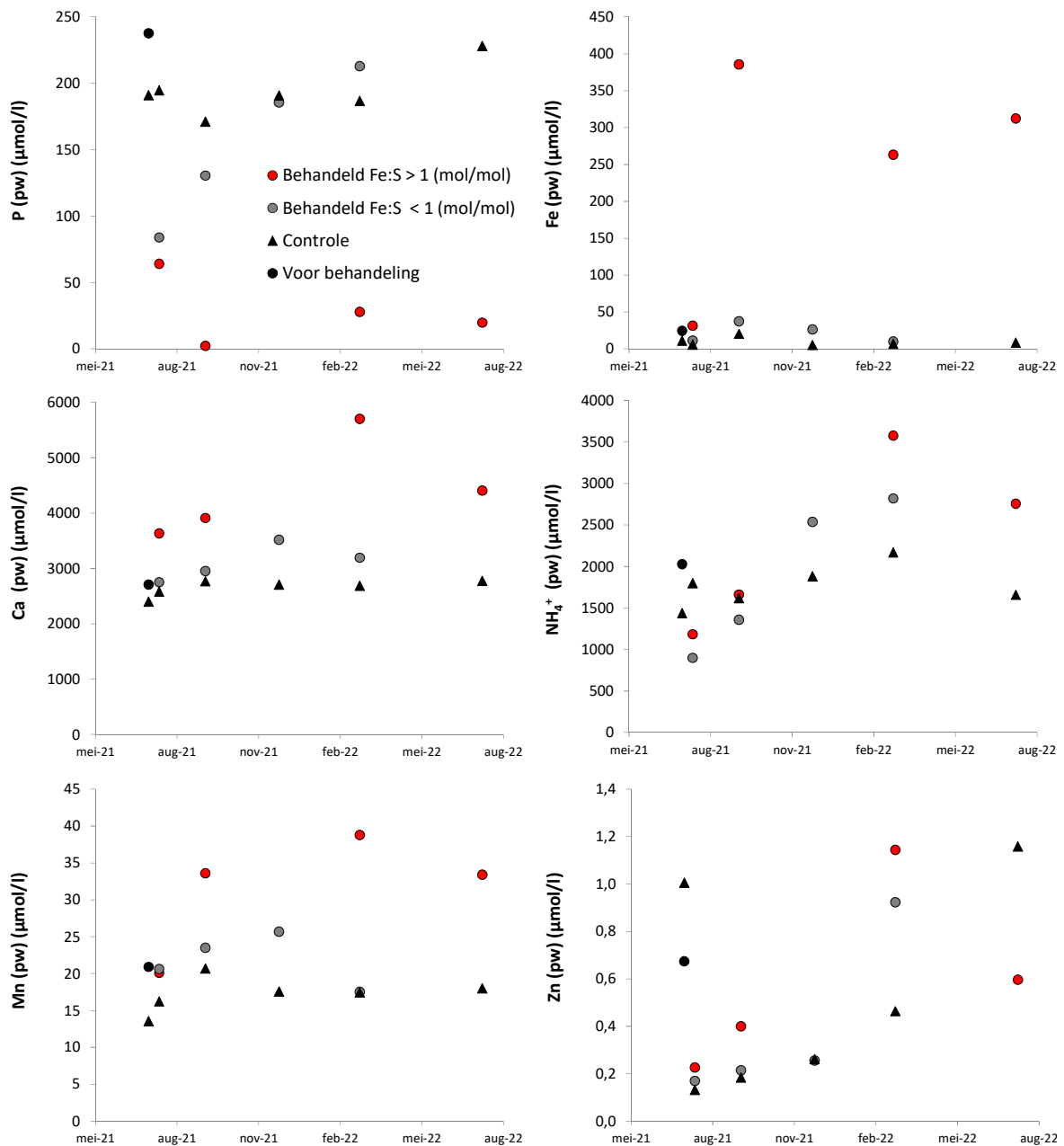
²Interventiewaarden bodem onder oppervlaktewater

Hoewel de sloten in juni 2021 gebaggerd waren tot op een waterdiepte van 60 cm, nam de waterdiepte al snel weer af. In februari 2022 was de waterdiepte in de onbehandelde sloot 25-40 cm (respectievelijk oeverzone en midden in de sloot) met een slibdikte van 30 tot meer dan 60 cm. In de behandelde sloot was de waterdiepte 20-35 cm (respectievelijk oeverzone en midden in de sloot) met een slibdikte van met een slibdikte van 25 tot meer dan 60 cm. In juli 2022 was de waterdiepte in de onbehandelde sloot circa 20 cm en in de behandelde sloot circa 15 cm (richting midden van de sloot). Het lijkt er dus op dat de sloten snel weer vollopen met bagger dat waarschijnlijk van onder het perceel komt omdat de waterijzerbehandeling in de toplaag nog wel goed terug te meten is.

4.3 Poriewater

In het poriewater van de toplaag worden in de behandelde sloot veel lagere fosforconcentraties gemeten dan in de controlesloot (Figuur 13). Na toediening van waterijzer zijn de P-concentraties hier gemiddeld achtmaal lager dan voor de ijzerbehandeling. In de diepere bodemlagen zien we dat er ook sprake is van lagere P-concentraties na de behandeling, maar dat deze weer toenemen in de loop van de tijd. In de controlesloot zijn de ijzerconcentraties laag en deze blijven ook laag gedurende de loop van het experiment. In de behandelde sloot zijn de ijzerconcentraties twee weken na toedienen van het waterijzer nog laag, maar drie maanden na toedienen zijn ze gestegen tot bijna 390 µmol/l (Figuur 13). Daarna nemen de ijzerconcentraties weer af tot gemiddeld 200-300 µmol/l. Ook de mangaan- en calciumconcentraties zijn hoger in het poriewater van de toplaag van de behandelde sloot (Figuur 13).

De anorganische koolstof- (TIC) en de ammoniumconcentraties laten zowel in de behandelde als de controlesloot een geleidelijke toename zien vanaf de start van de metingen tot in de winter (Figuur 13). Deze toename van zowel TIC als ammonium kan samenhangen met de afbraak van vers organisch materiaal in de sliblaag die na het baggeren aan het oppervlak is gekomen. Hierbij komen TIC en ammonium in een vaste verhouding vrij. De gemeten ammoniumconcentraties zijn zeer hoog en varieerden tussen 1000 en 3500 µmol/l. De ammonium- en TIC-concentraties waren hoger in de behandelde sloot waarbij de concentraties het hoogste waren in de ijzerrijke toplaag. Het is onduidelijk in hoeverre deze hogere waarden ook echt een behandelingseffect zijn. IJzer(III)(hydr)oxide kan als alternatieve elektronacceptor dienen voor de afbraak van organisch materiaal waardoor na toediening van waterijzer de afbraak kan worden gestimuleerd en waarbij TIC en ammonium vrijkomen. Gereduceerd ijzer kan ook ammonium en calcium van het bodemadsorptiecomplex verdringen waardoor de concentraties in het poriewater kunnen toenemen. Daarnaast kan ook het oplossen van CaCO₃ leiden tot een verhoging van de calcium- en TIC-concentratie.

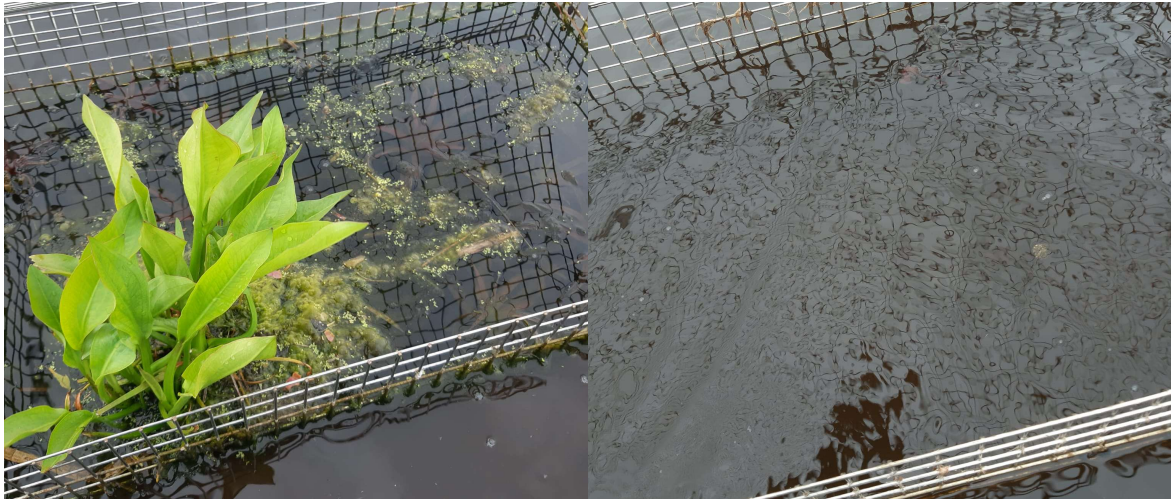


Figuur 13. Verloop van de fosfor-, ijzer, calcium-, mangaan, ammonium- en TIC (totaal anorganisch koolstof) concentratie (in $\mu\text{mol/l}$) in het poriewater van de waterbodembodem van de controle en behandelde sloot in polder Westveen.

4.4 Geïntroduceerde planten

In december 2021 werden in de niet behandelde sloot in één van de kooien respectievelijk 4 krabbenschieren, 1 waterlelie, 1 waterweegbree en 1 waterviolier aangetroffen en in de andere kooi 2 krabbenschieren, 1 waterlelie en 1 waterweegbree. Daarnaast groeide er kroos en FLAB in de sloot. In april 2022 werden er in elke kooi 1 waterweegbree, een wortelstok van waterlelie en 5 krabbescheerplanten aangetroffen (voor impressie zie Figuur 14). In juli 2022 werden er in beide kooien samen 24 krabbescheerplanten, 4 grote waterweegbree planten en 6 waterlelieplanten aangetroffen.

In de behandelde sloot werden er in september 2021 in beide kooien een waterlelie plant en in één van kooien 1 en in de andere kooi 2 krabbescheerplanten aangetroffen. In april en juli 2022 werden er geen planten meer aangetroffen in de kooien in de behandelde sloot (Figuur 14). In de behandelde sloot werden dikke lagen met Nostoc aangetroffen. Het gaat hierbij om bolvormige kolonies van niet giftige, stikstofbindende cyanobacteriën die op de bodem van de sloot groeien. In de niet behandelde sloot werden deze niet aangetroffen. Overigens werden deze Nostoc kolonies ook al aangetroffen voor dat de behandeling met waterijzer plaatsvond. In juli 2022 werd er een laag met Nostoc van 5 tot 10 cm aangetroffen op de bodem van de behandelde sloot.



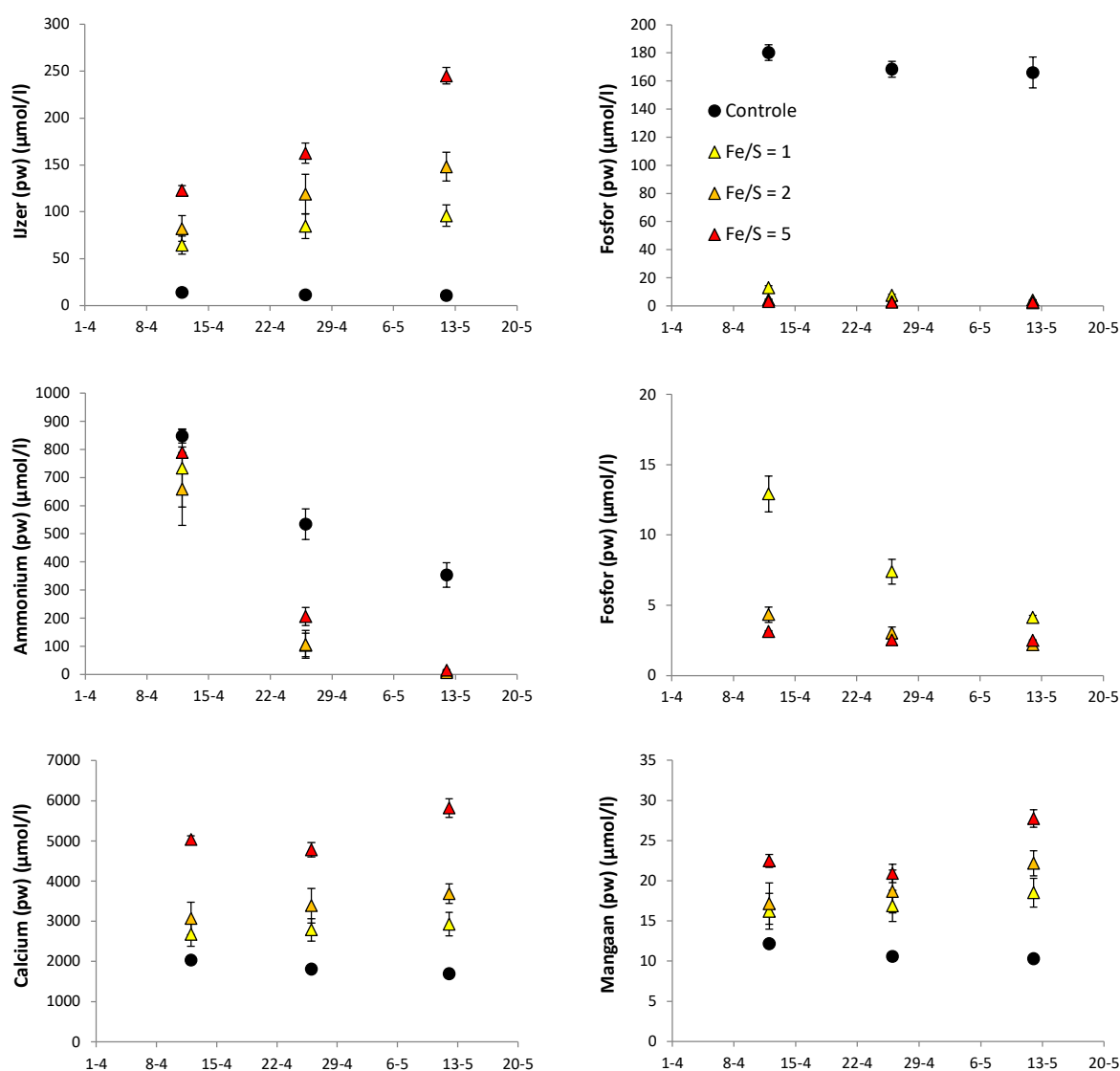
Figuur 14. Foto van een van de kooien met waterplanten in de controle sloot (links) en de behandelde sloot (rechts) in april 2022.

.....

5. KASEXPERIMENT

5.1 Poriewater

We zien dat in de waterijzerbehandelingen de ijzerconcentraties van het poriewater geleidelijk toenemen tot respectievelijk 100, 150 en 250 $\mu\text{mol/l}$ voor de laagste, middelste en hoogste behandelingen (Figuur 15). In de controlebehandeling blijft de ijzerconcentratie gedurende het gehele experiment laag (10-15 $\mu\text{mol/l}$). De fosforconcentratie is voor de controlebehandeling erg hoog (165-180 $\mu\text{mol/l}$) en is voor de met waterijzer behandelde bodems veel lager (Figuur 15). Hierbij neemt de fosforconcentratie voor de laagste behandeling af van 13 naar 4 $\mu\text{mol/l}$, voor de middelste behandeling van 4 naar 2 $\mu\text{mol/l}$ en voor de hoogste behandeling van 3 naar 2 $\mu\text{mol/l}$ (Figuur 15).

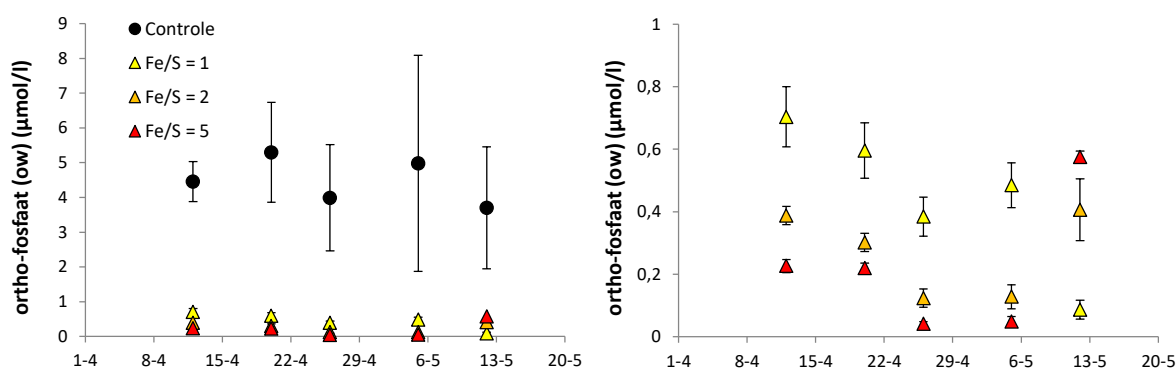


Figuur 15. Verloop van de ijzer-, fosfor-, ammonium, fosfor, calcium- en mangaanconcentratie (in $\mu\text{mol/l}$) in het poriewater van de waterbodem bij de verschillende behandelingen in het kasexperiment.

De ammoniumconcentraties nemen in alle behandeling af in de loop van de tijd (Figuur 15). Hierbij is de afname het geringste in de controlebehandeling. De calcium- en mangaanconcentraties zijn het hoogste in de behandeling met waterijzer waarbij de concentraties toenemen naarmate er meer waterijzer is toegevoegd (Figuur 15). De verhoogde concentraties hangen waarschijnlijk samen met de calcium- en mangaangehaltes van het toegediende waterijzer.

5.2 Oppervlaktewater

We zien in het oppervlaktewater de fosfaatconcentraties (voor algen beschikbare P-fractie) hoger zijn in de controles (gemiddeld 3,7-5,3 $\mu\text{mol/l}$) dan in de waterijzerbehandelingen (gemiddeld 0,4 tot 0,7 $\mu\text{mol/l}$; Figuur 16). Hierbij zien we dat de fosfaatconcentraties in de waterlaag lager zijn naarmate er meer waterijzer is toegediend.



Figuur 16. Verloop van de ortho-fosfaatconcentratie in het oppervlaktewater bij de verschillende behandelingen in het kasexperiment. In de rechter figuur is de y-as aangepast zodat verschillen tussen de behandelde bodems zichtbaar worden.

5.3 Bodem

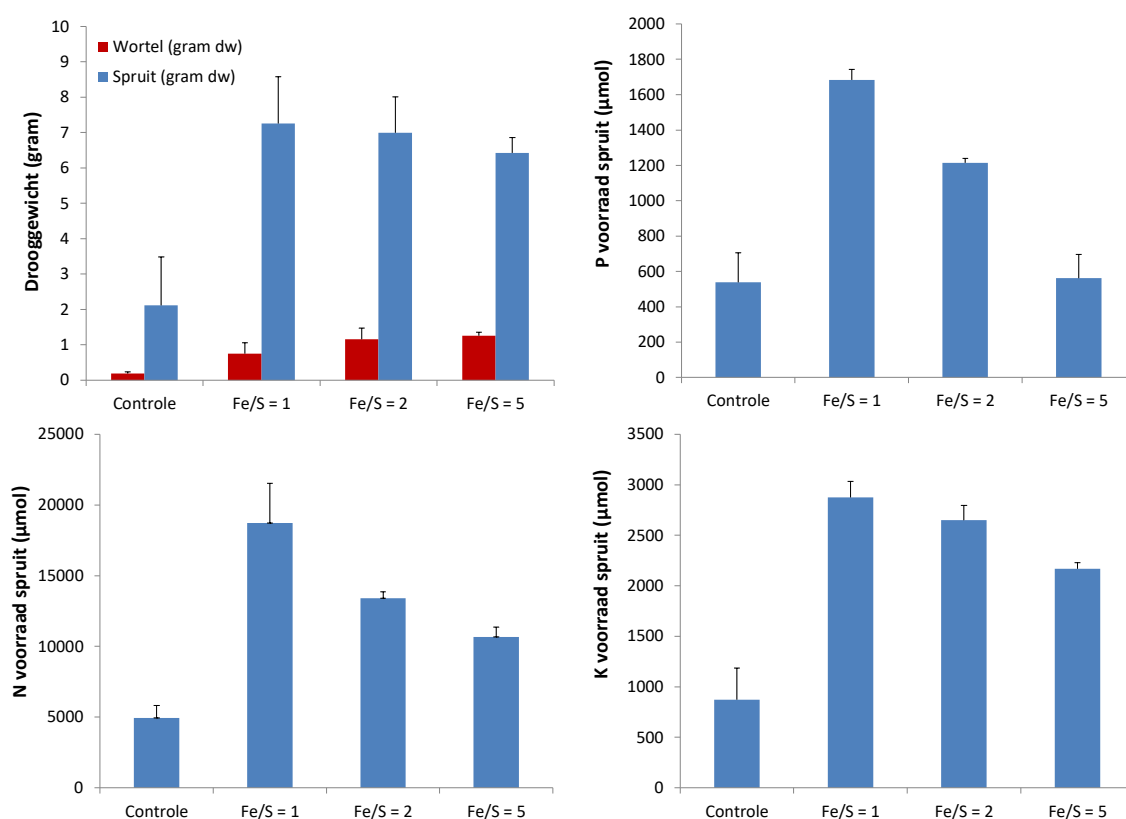
In Tabel 2 wordt de samenstelling van de bodem gegeven voor de verschillende behandelingen. We zien dat de ijzer/zwavel-ratio (Fe/S-ratio) na toediening van verschillende hoeveelheden waterijzer in de buurt komt van de beoogde waarden (respectievelijk 1, 2 en 5). De fosfaatverzadigingsgraad (FVG) is hoog voor de controle bodems (33,5 %) en veel lager voor de behandelde bodems. We zien dat de FVG afneemt naar respectievelijk 11, 6 en 3 % naarmate er meer waterijzer aan de bodem werd toegediend. De binding van fosfaat aan ijzer(III)- en Al(III) (hydr)oxides is sterker naarmate de FVG lager is.

Tabel 2. Gehaltes aan elementen in de bodems van de verschillende behandelingen uitgedrukt in mmol/l bodem. De fosfaatverzadigingsgraad (FVG) is uitgedrukt als percentage.

	Fe	P	S	Fe/S	FVG	Al	Ca	K	Na	Mg	Zn	Mn
	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mol/mol	%	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l	mmol/l
Controle	26,0	4,8	63,0	0,4	33,5	43,8	63,4	3,0	5,7	14,6	0,26	0,8
Fe/S = 1	72,8	4,8	60,7	1,2	11,0	38,1	64,7	2,4	5,3	13,6	0,24	0,8
Fe/S = 2	131,0	4,7	56,0	2,3	6,0	36,3	65,8	2,4	4,8	13,9	0,21	0,9
Fe/S = 5	283,9	5,3	51,6	5,5	3,1	33,0	73,3	2,2	4,5	13,8	0,19	1,2

5.4 Waterplanten

De gemiddelde biomassa, zowel wortel als spruit, van aarvederkruid was hoger in de bakken met waterijzer dan in de controle (Figuur 17). De hogere biomassaproductie is zeer waarschijnlijk het gevolg van minder groei van algen door de afname van de fosfaatmobilisatie door het toevoegen van waterijzer. Bij de controle heeft lichtlimitatie de groei van aarvederkruid beperkt. Ondanks de lagere beschikbaarheid van fosfor is er geen significant effect op de plantengroei gevonden bij de hogere doseringen van waterijzer. Dit geeft aan dat ook bij lagere fosforconcentraties in het poriewater dit niet limiterend was voor de groei van aarvederkruid. Om voldoende P op te kunnen nemen, hebben de planten wel meer wortelbiomassa gevormd (Figuur 17). Uit het kasexperiment blijkt duidelijk dat de hoge ijzerconcentraties in het poriewater van het sediment niet hebben geleid tot ijzertoxiciteit bij aarvederkruid, zelfs niet bij de hoogste dosering met een Fe/S-ratio van 5.



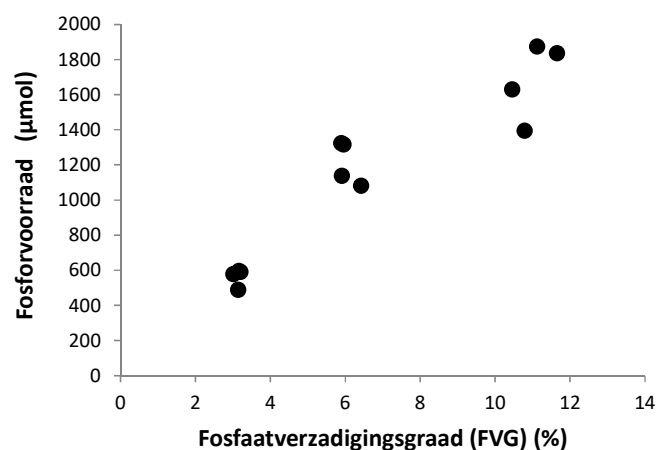
Figuur 17. Drooggewicht van wortel en spruit (in gram), en de voorraad fosfor, stikstof en kalium (in µmol) in de spruit van aarvederkruid bij verschillende behandelingen in het kasexperiment.

De voorraad van de belangrijkste nutriënten (P, N en K) blijkt wel af te nemen bij een toename van de ijzerdosering (Figuur 17). Vooral de P-voorraad in de planten neemt af als gevolg van de lagere beschikbaarheid aan fosfor in zowel het oppervlakte- als poriewater. De P voorraad is lager naarmate er meer waterijzer is toegediend. De nutriëntenvoorraden van de controlebehandelingen zijn steeds het laagste omdat deze een veel lager biomassa hadden (Figuur 17). De lagere P-voorraden en tevens P-concentraties (Tabel 3) in de hogere waterijzerbehandelingen laten zien dat in deze bodems het fosfor beter wordt vastgehouden waardoor er minder in de planten terecht komt. Dit betekent ook dat er minder mobilisatie van P kan plaatsvinden als gevolg van de opname van P door planten uit de bodem. Na het afsterven van de planten kan dit fosfor namelijk deels

ook weer in de waterlaag terecht komen. In de met waterijzer behandelde bodems was de fosforvoorraad van de bovengrondse biomassa gecorreleerd met de fosfaatverzadigingsgraad van de bodems (Figuur 18).

Tabel 3. Gehalten aan elementen (in mmol/kg drooggewicht) in de geoogste bovengrondse biomassa van aarvederkruid.

	Fe	P	S	N	Si	Al	Ca	K	Na	Mg	Zn	Mn
	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg
Controle	8,6	265	148	2619	8,2	15,8	421	406	676	100	0,93	10,2
Fe/S = 1	9,7	235	135	2595	7,1	24,7	379	400	833	89	0,55	2,8
Fe/S = 2	10,5	175	114	1931	6,4	17,0	370	381	752	88	0,54	1,8
Fe/S = 5	14,6	88	108	1672	7,4	6,9	361	338	658	85	0,54	1,3



Figuur 18. Totale fosforvoorraad in de geoogste bovengrondse biomassa voor de met waterijzer behandelde bodems uitgezet tegen de fosfaatverzadigingsgraad van de bodems.

6. CONCLUSIES EN SYNTHESE

6.1 Labexperiment

De resultaten en conclusies gebaseerd op de eerste drie maanden van het labexperiment zijn in 2021 al beschreven (Verstijnen et al., 2021). Deze conclusies worden grotendeels bevestigd door de metingen over een langere periode (15 maanden). Ook over een langere periode blijkt dat met het toedienen van waterijzer aan bagger uit polder Westveen de concentratie fosfor in het poriewater, die initieel (erg) hoog was, zeer fors kan worden gereduceerd. Door de afname van de fosforconcentraties en de toename van de ijzerconcentraties neemt de ijzer/fosfor-ratio van het poriewater sterk toe in vergelijking tot de controle. Dit effect is voor zowel polder Westveen als voor Bodegraven-Noord evident en het sterkst wanneer het waterijzer in een zodanige hoeveelheid wordt toegediend dat dit resulteert in een ijzer/zwavel-ratio van 2 of 5.

Bij de hoogste dosering van waterijzer was de gemiddelde P-concentratie onmiddellijk na inzetten al laag en bleef voor polder Westveen gedurende de gehele looptijd van het experiment overwegend lager dan 3 $\mu\text{mol/l}$. Voor Bodegraven-Noord bleven bij zowel de hoogste als de een na hoogste ijzerdosering de gemiddelde P-concentraties lager dan 2 $\mu\text{mol/l}$ gedurende het gehele experiment. Bij de laagste dosering (Fe/S-ratio 1) stijgen zowel voor polder Westveen als Bodegraven-Noord de P-concentraties weer. Voor polder Westveen stijgen ook bij de één na hoogste ijzerdosering de P-concentraties tussen juni 2021 en juni 2022 weer geleidelijk (van 4 naar 8 $\mu\text{mol/l}$).

Bij de laagste behandelingen komt er in de loop van de tijd weer P vrij in de bodem. Dit suggereert dat de binding van P aan ijzer niet irreversibel is en dat er na verloop van tijd weer P kan vrijkomen in de waterbodem afhankelijk van de toegevoegde hoeveelheid waterijzer. Gedurende 15 maanden bleven de concentraties echter wel veel lager dan in de controle bodems. Uitgaande van een lineaire toename, levert extrapolatie van de resultaten van het labexperiment op dat bij een waterijzeradditie tot een Fe/S-ratio van 2 het nog ca. 26 jaar duurt voordat de P-concentraties weer op het oude niveau zouden liggen. Bij een lagere dosering (Fe/S-ratio van 1) is dit na ca. 7 jaar.

De ammonium- en fosforconcentraties in het poriewater van Bodegraven-Noord zijn lager dan in polder Westveen. De waterbodems in Bodegraven-Noord waren bij aanvang van het experiment al minder voedselrijk dan de bodems van polder Westveen.

Het toedienen van waterijzer lijkt weinig effect te hebben op de concentratie ammonium in het poriewater. Bij alle behandelingen, dus ook de controle, dalen de ammoniumconcentraties in eerste instantie en aan het einde van het experiment lijkt de ammoniumconcentratie iets toe te nemen.

De metingen over een langere periode bevestigen voor zowel polder Westveen als voor Bodegraven-Noord gunstige effecten van het toedienen van waterijzer aan bagger. Het meest gunstig zijn de effecten van de behandelingen met een ijzer/zwavel-ratio van (met name) 2 en 5. Vanwege de hogere voedselrijkdom van de slibbodems in polder Westveen nemen bij een lagere dosering van waterijzer (Fe/S-ratio van 2) de P-concentraties in het poriewater eerder toe. Op basis van de korte termijn resultaten van het labexperiment is voor de veldproef een dosering toegepast van een ijzer/zwavel-ratio van 2. Op basis van effecten op de langere termijn zou het advies mogelijk zijn aangepast en de dosering van waterijzer voor polder Westveen te verhogen tot een ijzer/zwavel-ratio van 5.

6.2 Veldexperiment

Als gevolg van het baggeren direct voorafgaande de start van het veldexperiment, werden zowel in de behandelde als de controle sloot zeer hoge concentraties fosfor, ortho-fosfaat en ammonium in het oppervlaktewater gemeten. In de weken daarna nemen de concentraties sterk af, waarbij de totaal-fosfor en ortho-fosfaatconcentraties van de behandelde sloot door een afname van de nalevering gemiddeld respectievelijk 4 en bijna 8 maal lager zijn dan in de controle sloot. De ijzerconcentratie is ca. 3 tot 15 maal hoger in de waterlaag van de behandelde sloot dan in de controle sloot.

Vanwege de hoge pH van de waterlaag (overwegend pH 7,2 - 7,7) is bicarbonaat de dominante anorganische koolstofvorm in de sloten en waardoor ondergedoken waterplanten die bicarbonaat kunnen gebruiken in het voordeel zijn. Er zijn daarbij geen hele duidelijke verschillen gemeten tussen de behandelde en de controlesloot.

Door de toepassing van waterijzer nemen de ijzergehaltes in de toplaag van de bodem van de behandelde sloot toe. Doordat het zich nog niet goed gemengd heeft met de volledige dikte van de sliblaag zijn de teruggemeten Fe/S-ratio's veel hoger dan de ratio van 2 waarop gemikt werd. Het toevoegen van waterijzer heeft geen groot effect op het totale fosforgehalte van de bodem. Omdat het waterijzer ook mangaan bevat, is het mangaangehalte wel iets hoger in de toplaag van bodem van de behandelde sloot.

De fosforconcentraties in het poriewater van de toplaag van de behandelde sloot zijn gemiddeld ca. 8 keer lager dan in de controlesloot. In de diepere bodemlagen nemen de P-concentraties na de behandeling in eerste instantie af, maar nemen in de loop van de tijd weer toe. In de behandelde sloot zijn de ijzerconcentraties in het poriewater in eerste instantie nog laag, maar na drie maanden sterk gestegen.

Door de toepassing van waterijzer kan ook in de veldsituatie de nalevering van fosfor uit het slib sterk worden gereduceerd. In de praktijk blijkt het lastig om het waterijzer goed te mengen met de volledige baggerlaag, waardoor de Fe/S-ratio in de praktijk hoger uitvalt dan de beoogde ratio van 2. Het is mogelijk dat er in de loop van de tijd een verder menging optreedt tussen de ondiepere en de diepere bodemlagen.

Het lijkt er dus op dat de sloten snel weer vollopen met bagger dat waarschijnlijk van onder het perceel komt omdat de waterijzerbehandeling in de toplaag nog wel goed terug te meten is.

De planten hebben zich goed ontwikkeld in de niet behandelde sloot en zijn in de eerste maanden na introductie verdwenen uit de behandelde sloot. Het is niet zeker dat het hier om een behandelingseffect gaat. De gemeten concentraties aan bijvoorbeeld ijzer in het poriewater zijn niet dusdanig hoog dat de geïntroduceerde soorten hier niet zouden kunnen groeien. Ook bleef de beschikbaarheid aan nutriënten voldoende hoog. Het is goed mogelijk dat andere factoren hier een rol hebben gespeeld. Zo was er in de behandelde sloot een dik pakket van Nostoc (kolonievormende cyanobacteriën) aanwezig.

6.3 Kasexperiment

In het kasexperimenten waren de verschillende behandelingen goed terug te zien in de bodem- en poriewaterchemie. De beschikbaarheid van fosfor in het poriewater was veel hoger in de niet behandelde (controle) bodem. De ijzerconcentraties waren juist veel hoger in het poriewater van de met waterijzer behandelde bodems. Als gevolg van nalevering van fosfor naar de waterlaag was er sprake van hogere fosfor- en fosfaatconcentraties en van algengroei in de controlebehandeling waardoor de geïntroduceerde aarvederkruidelplanten hier relatief slecht groeiden.

Op de behandelde bodems groeiden de aarvederkruid planten veel beter, ondanks het feit dat de beschikbaarheid van fosfor in zowel het poriewater als de waterlaag veel lager was. De planten maakten niet alleen meer bovengrondse maar ook veel meer ondergrondse biomassa (wortels) aan in de behandelde bodems.

De planten werden in het experiment duidelijk in hun groei beperkt door het slechte lichtklimaat in het troebele water boven de onbehandelde bodems. Er werden geen verschijnselen waargenomen die duiden op ijzertoxiciteit in de planten die groeiden op de behandelde bodems. In de met waterijzer behandelde bodems waren er geen significante verschillen in de biomassaontwikkeling tussen de verschillende hoeveelheden waterijzer die waren toegediend. Wel nam het fosforgehalte, en hiermee de totale fosforvoorraad in de planten van de behandelde bodems, af naarmate er meer waterijzer was toegediend en naarmate het fosfor in de bodem dus beter was gebonden.

6.4 Synthese

In veel Nederlandse slootbodems is sprake van een ongunstige verhouding tussen ijzer en zwavel. Hierdoor is veel ijzer in gereduceerde vorm gebonden aan gereduceerd zwavel. Het ijzer is hierdoor geïmmobiliseerd en kan niet meer in gereduceerde vorm diffunderen naar de waterlaag waar het kan worden geoxideerd en fosfor kan binden. Door deze oxidatie van gereduceerd ijzer in de toplaag van de waterbodem wordt de nalevering van fosfor naar de waterlaag sterk geremd. De ongunstige verhouding ontstaat doordat de aanvoer van ijzer via grondwater (kwel) sterk is afgenomen of helemaal niet meer plaatsvindt. Daarnaast vindt in de veengebieden als gevolg van veenoxidatie veel mobilisatie van sulfaat plaats waardoor het oppervlaktewater vaak rijk is aan sulfaat. Sulfaat wordt in de slootbodem gereduceerd tot sulfide dat zich bindt aan het gereduceerd ijzer. Hierdoor is er in de bodems vrijwel geen geoxideerd ijzer meer aanwezig waardoor ook de binding van fosfaat sterk afneemt. Uiteindelijk leidt dit tot bodems waarin de beschikbaarheid van fosfor hoog is en de beschikbaarheid van ijzer laag. Ook kan er in de bodems accumulatie van sulfide plaatsvinden. Dit sulfide is toxisch en kan in bewoonde gebieden tevens voor stankoverlast (geur van rotte eieren) zorgen.

Het herstellen van de ijzer/zwavel-balans is niet eenvoudig. Zwavel kan uit bodems worden verwijderd door de bodems te laten oxideren. Wanneer slootbodems droogvallen komt er zuurstof in de bodem waarbij het gereduceerde zwavel wordt geoxideerd tot sulfaat en het hieraan gebonden gereduceerd ijzer wordt geoxideerd tot ijzer(III)(hydr)oxide. Na vernatting kan door de sloot door te spoelen met sulfaatarm water het sulfaat worden afgevoerd. Het geoxideerde ijzer blijft achter waardoor de ijzer/zwavel-ratio toeneemt. Deze oxidatie van de waterbodems is niet eenvoudig te realiseren en heeft als nadeel dat het ook tot een sterke verzuring van de bodem kan leiden.

Watersystemen kunnen ook 'beijzerd' worden door het toedienen van ijzerchloride. Het ijzer oxideert dan in de waterlaag waarna het uitzakt tot op de bodem. Het nadeel is dat het lang duurt voordat er voldoende ijzer is toegediend om de ijzer/zwavel-balans van de bodems significant te verhogen. Hetzelfde geldt voor het injecteren van opgelost ijzerchloride in de bodem. Het toedienen van waterijzer, een product dat onder andere vrijkomt bij de drinkwaterwinning, is een interessant alternatief omdat er in een korte tijd een relatief grote hoeveelheid ijzer in de bodem kan worden gebracht.

Het mengen van waterijzer door het slib van de sloten uit polder Westveen (in het labexperiment en de kasproef) leidde tot een zeer sterke verlaging van de fosforconcentraties en tot een toename van de ijzerconcentratie in het poriewater van de bodems. De nalevering van fosfor naar de

.....

waterlaag neemt hierdoor sterk af. Hierdoor zal er ook minder algenbloei in de waterlaag plaatsvinden. De fosforconcentraties van het poriewater namen na een jaar wel weer heel geleidelijk toe in de behandeling waarbij de Fe/S-ratio (mol/mol) werd opgekrikt tot 1 of 2. Bij een Fe/S-ratio van 5 bleef de P-concentratie laag.

We zien dit ook terug in de planten die op de behandelde bodems groeiden in het kasexperiment. De planten die op een bodem groeiden met een Fe/S-ratio van 1 hadden de hoogste P-voorraad en de planten die op een bodem met een Fe/S-ratio van 5 groeiden hadden de laagste P-voorraad. Het kasexperiment liet zien dat aarvederkruid prima kan groeien op de behandelde bodems ondanks dat de beschikbaarheid van fosfor in de bodem een stuk lager was. Op de langere termijn zal de groei van aarvederkruid waarschijnlijk wel beperkt worden op de bodems waaraan meer waterijzer wordt toegevoegd. Dit biedt kansen voor planten die een intrinsiek lagere groeisnelheid hebben. Tevens verkleint de verminderde mobilisatie van P vanuit de bodem naar de bovengrondse biomassa de kans op algenbloei als gevolg van afstervende waterplanten in de late zomer of het najaar.

In het veld is een berekende hoeveelheid waterijzer in de sloten gebracht waarbij er geen poging is gedaan om het waterijzer goed te mengen door de sliblaag. In principe zou er natuurlijk wel een manier kunnen worden bedacht om een dergelijke menging te bewerkstelligen maar dit zou het toedienen natuurlijk wel complexer maken. Nu duurde het behandelen van de sloot een krappe tien minuten. We zien dat in de behandelde sloot de beschikbaarheid van P in de waterlaag en de toplaag van de waterbodem veel lager was. Het waterijzer lijkt dus ook in de veldsituatie zijn werk te doen.

De geïntroduceerde planten zijn echter niet aangeslagen in de behandelde sloot terwijl ze in de niet behandelde sloot wel zijn aangeslagen. Het is zeer onzeker of dit te maken heeft met de behandeling met waterijzer. Andere factoren dan het toedienen van waterijzer, kunnen de vestiging hebben belemmerd. Er zijn maar weinig planten geïntroduceerd en dan is de eerste fase kritisch voor de overleving. De omstandigheden die hier op van invloed zijn kunnen tussen twee sloten sterk verschillen. Drie van de soorten, de ondergedoken (submerse) soorten, werden helemaal niet meer teruggevonden ook niet in de niet behandelde sloot. De gemeten concentraties van o.a. ijzer, ammonium, fosfor, etc. in het poriewater vallen binnen de ranges waarin veel waterplanten normaal gesproken goed kunnen groeien. Verder groeide in het kasexperiment aarvederkruid goed op de met waterijzer behandelde bodems.

De vestiging van de planten in de kooien van de niet behandelde sloten laat in ieder geval zien dat waterplanten, wanneer ze beschermd zijn tegen vraat, zich in principe kunnen vestigen in sloten, ook wanneer ze niet behandeld zijn met waterijzer. De planten die zich gevestigd hebben zijn wel de planten die op het water drijven of boven het water uitsteken. Deze hebben minder last van algengroei in het water. Bovendien was het water in de sloot ondiep waardoor er gedurende een groot deel van het jaar in de oeverzones licht tot op de bodem kon doordringen.

Los van de waterkwaliteit zou er dus getracht kunnen worden om grootschalig krabbenscheer te introduceren in de sloten. De resultaten laten zien dat de soort zich in principe kan vestigen in de voedselrijke sloten en zich zelfs kan uitbreiden. Krabbenscheer is een soort die onder voedselrijke omstandigheden in korte tijd veel voedingsstoffen kan vastleggen. Bovendien bedekken de planten de bodem in de winter en de waterlaag in het groeiseizoen, waardoor er ook minder opwerveling van bodemdeeltjes plaatsvindt. Hierdoor wordt het water vaak helder in sloten waarin veel krabbenscheer groeit. Het beheer van de vegetaties is wel belangrijk omdat sloten snel kunnen verlanden wanneer deze niet tijdig geschoond worden.

Voor de inrichting van polder Westveen wordt gedacht aan het op diepte brengen van de sloten door te baggeren waarna waterijzer wordt toedient om in de restende baggerlaag voldoende

.....

fosfaatbinding te creëren. Het op diepte brengen van de sloten is in de twee proefsloten die wij hebben onderzocht niet gelukt. Na baggeren liep de sloot weer snel vol met bagger. De vraag is waar deze bagger vandaan komt. Mogelijk/waarschijnlijk komt deze van onder het perceel vandaan. Dit zou betekenen dat het creëren van de gewenste waterdiepte (60 cm) door te baggeren wel eens problematisch zou kunnen zijn. Het is belangrijk om dit verder uit te zoeken.

Het toedienen van waterijzer lijkt goed te werken. Voor de toediening zou nog gezocht kunnen worden naar een methode waarbij menging van het waterijzer door het slib kan worden gerealiseerd. Het herstel van de ijzer/zwavel-balans zal leiden tot veel minder nalevering van fosfor naar de waterlaag en, afhankelijk van de hoeveel toegevend waterijzer, tot een afname van de beschikbaarheid van fosfor voor wortelende waterplanten. De groei van (ondergedoken) waterplanten in helder water kan indirect wel leiden tot meer mobilisatie van fosfor uit de bodem naar de waterlaag. De planten nemen veel fosfor op dat in de bovengrondse biomassa terecht komt. Wanneer de planten afsterven kan dit fosfor weer vrijkomen in de waterlaag. Ook hier geldt dat een goed beheer belangrijk is. Zo moet overtollige biomassa tijdig uit de sloot worden verwijderd.

Het toedienen van waterijzer aan slib in de sloten is een instrument dat in ieder geval kan werken om de nalevering van fosfor naar de waterlaag tegen te gaan en lokaal helder water te creëren. Het is belangrijk om voor de inrichting goed na te denken in welke sloten het toedienen van waterijzer het meest zinvol is. Hier kan bijvoorbeeld worden gedacht aan delen van het gebied waar als gevolg van de routing van het water relatief schoon oppervlaktewater binnenkomt en de verblijftijd van het water lang is waardoor nalevering uit de waterbodem sterk bepalend is voor de P-concentraties in de waterlaag.

Voor de dosering geldt dat de werking langer duurt naarmate er meer waterijzer wordt gemengd door de bodems. De mobilisatie van fosfor via opname door waterplanten neemt ook af bij hogere doseringen.

Wanneer besloten wordt om grootschalig krabbenscheer te introduceren dan kan het handig zijn om in ieder geval een lage dosering van waterijzer toe te dienen. Niet zo zeer om het fosfaat te binden maar wel om de beschikbaarheid van ijzer in het slib te verhogen. De planten die in juni werden verzameld waren licht chlorotisch als gevolg van ijzergebrek.

Wij adviseren om sloten die in toekomst behandeld worden met waterijzer te monitoren zodat er optimaal geleerd kan worden van de effecten van deze maatregel op de langere termijn.

Het toedienen van waterijzer uit drinkwaterwinningen is veilig en leidde in de behandelde sloot niet tot belangrijke verhogingen van de zware metalen gehaltes van de waterbodem (overschrijding van normen). In principe heeft Waternet geen bezwaar in het toepassen van waterijzer als maatregel om de fosfaatbelasting uit slib te verlagen (

Bijlage 2).

Vervolgonderzoek

Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van het niet bestendig vestigen van de waterplanten in de in 2021 behandelde sloot en het niet of nauwelijks vestigen ervan in Polder Westveen als geheel, wordt in 2022/2023 een vervolgonderzoek uitgevoerd.

Er is ervoor gekozen om deze zomer (augustus 2022) ook de niet behandelde sloot deels te behandelen met waterijzer in gelijke dosering als in 2021. Hierdoor hebben we nu drie situaties

.....
waarin hernieuwd waterplanten (afkomstig uit de kooien in de onbehandelde sloot) die we nog een jaar gaan volgen (chemisch en overleving en groei planten): 1) behandelde sloot 2021, 2) onbehandelde sloot 2021 en 3) behandelde sloot 2022.

Op deze wijze kan het effect van de toediening van waterijzer worden onderzocht:

- op de groei van de waterplanten in dezelfde sloot (vergelijking behandelde en onbehandelde deel);
- op eventueel direct effect als gevolg van toediening waterijzer (dan zouden de waterplanten in de nu (2022) behandelde sloot net als in de behandelde sloot in 2021 niet moeten aanslaan);
- op eventuele vestiging een jaar na toediening (dan zouden de planten in de behandelde sloot in 2021 nu wel moeten aanslaan. Als dat niet gebeurt en in de in 2022 behandelde sloot wel, dan speelt wellicht de aangetroffen blauwalg een rol);
- los van effect waterijzer wordt ook gekeken naar een eventueel effect van vraat als oorzaak voor het niet of nauwelijks vestigen van waterplanten in Westveen. Naast dat waterplanten in kooien zijn geplaatst, zijn ook planten in alle behandelingen c.q., situaties ingebracht zonder kooi maar vastgemaakt aan een stok en daarmee goed bereikbaar voor exotische rivierkreeften, vis en watervogels. Als er zo'n effect is dan zouden de planten zonder kooi het minder goed moeten doen dan die in de kooien.

Volgende zomer weten we meer.

.....

7. LITERATUUR

- Lormans, D. (2022) The potential of restoring submerged plant growth in eutrophicated ditches using iron sludge and zeolite. A research into new measures for the restoration of eutrophicated surface water systems. MsC-rapport Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Tomassen, H. & F. Smolders (2020) Waterbodemonderzoek polder Westveen - onderzoek naar de nalevering van nutriënten. Rapport RP-19.160.19.89, Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen.
- Verstijnen, Y., F. Smolders & T van den Broek (2021) Waterijzeradditie aan bagger uit watergangen in Polder Westveen en Bodegraven-Noord. Rapport BH4939-BH6501-WATRP20210813, Royal HaskoningDHV en Onderzoekcentrum B-WARE.

.....

8. BIJLAGEN

Bijlage 1. Analysemethoden

Bewerking van de bodemmonsters

Drooggewicht en organisch stofgehalte (gloeiverlies)

Om het vochtgehalte van het verse bodemmateriaal te bepalen werd het vochtverlies gemeten door bodemmateriaal in duplo af te wegen in aluminiumbakjes. De bakjes werden precies tot aan de rand afgevuld (volume = 40,5 ml), zodat de soortelijke massa van de bodem kan worden bepaald. De bodems werden gedurende minimaal 48 uur gedroogd in een stoof bij 60 °C. Vervolgens werd het bakje met bodemmateriaal opnieuw gewogen en werd het vochtverlies berekend. De fractie organisch stof in de bodem werd berekend via het gloeiverlies bepaald. Hiertoe werd gedroogd bodemmateriaal gedurende 4 uur verast in een oven bij 550 °C. Na het uitgloeien werd het bakje met bodemmateriaal weer gewogen en werd het gloeiverlies berekend. Het gloeiverlies komt bij benadering overeen met het gehalte aan organisch materiaal in de bodem.

Destructie

Door de bodem te destrueren (ontsluiten) is het mogelijk de totale concentratie van bijna alle elementen in het materiaal te bepalen. Hiervoor werd 200 mg fijngemalen bodemmateriaal nauwkeurig afgewogen en in teflon destructievaatjes overgebracht. Aan het bodemmateriaal werd 5 ml geconcentreerd salpeterzuur (HNO_3 , 65%) en 2 ml waterstofperoxide (H_2O_2 30%) toegevoegd, waarna de vaatjes in een destructie-magnetron (Milestone microwave type mls 1200 mega of Ethos Easy) werden geplaatst. De monsters werden vervolgens gedestruëerd in gesloten teflon vaatjes. Na destructie werd het destruaat nauwkeurig overgebracht in 100 ml maatcilinders en aangevuld tot 100 ml met demiwater. Het destruaat werd bewaard bij 4 °C tot verdere analyse op de ICP-OES.

Zoutextractie

Met een zoutextractie kunnen de zoutuitwisselbare ionen bepaald worden. Hiervoor werd 17,5 gram verse bodem met 50 ml zoutextract ($0,2 \text{ mol l}^{-1} \text{ NaCl}$) gedurende 2 uur geschud op een schudmachine bij 105 rpm. De pH werd gemeten met een HQD pH-electrode. De extracten werden gefilterd met behulp van rhizons. Voor analyse op de ICP-OES werd een deel van het filtraat aangezuurd met salpeterzuur (eindconcentratie 1%) en bewaard bij 4 °C tot verdere analyse. Voor analyse op de auto-analyzers werd niet-aangezuurd filtraat bewaard bij -18 °C tot verdere analyse.

Oxalaatextractie

Met een oxalaatextractie kan de concentratie ijzer- en aluminiumgebonden fosfaat worden bepaald. Hiervoor werd vers materiaal ingewogen overeenkomstig met 2,5 gram droog materiaal en met 50 ml extractiemedium ($(\text{COONH}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$: $0,12 \text{ mol l}^{-1}$ en $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$: $0,12 \text{ mol l}^{-1}$) uitgeschud op een schudmachine bij 105 rpm. De extracten werden gefilterd met behulp van rhizons en het filtraat werd niet-aangezuurd bewaard bij 4 °C tot verdere analyse op de ICP-OES.

Watermonsters

Bemonstering oppervlaktewater en bodemvocht

Oppervlaktewatermonsters werden 10 cm onder het wateroppervlak verzameld en luchtdicht afgesloten in HDPE potten. Bodemvocht/poriewater werd anaeroob verzameld uit de bodemmonsters met rhizon bodemvochtbemonsteraars (Eijkelkamp Agrisearch Equipment) waaraan een vacuüm getrokken 30 ml glazen infuusfles verbonden was.

Standaardmetingen oppervlakte- en poriewater

De pH werd gemeten met een standaard Ag/AgCl₂ elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type TIM840). De hoeveelheid opgelost anorganisch koolstof (TIC: CO₂ en HCO₃) werd bepaald met behulp van infrarood gasanalyse (ABB Advance Optima IRGA). De alkaliniteit (alleen oppervlaktewater) werd bepaald door een deel van het monster te titreren met 0,01 mol l⁻¹ zoutzuur tot pH 4,2. De toegevoegde hoeveelheid equivalenten zuur per liter is hierbij de alkaliniteit. De EGV werd bepaald met een HACH EGV-probe verbonden met een HQD-meter. De turbiditeit van de oppervlaktewatermonsters werd bepaald met een Dentan Turbidimeter (model FN-5). De extinctie (450 nm) van de oppervlaktewatermonsters werd bepaald met een Biotek plaatreader. De monsters voor de auto-analyzer werden bewaard bij een temperatuur van -20 °C tot aan de analyse. De monsters voor de ICP-OES werden aangezuurd voor analyse en bewaard bij 4 °C.

Methaananalyse

Het bodemvocht werd gefixeerd met een 4% HCl-oplossing. De methaanconcentratie werd gemeten met een specifieke gaschromatograaf. De uiteindelijke methaanconcentratie werd teruggerekend naar het oorspronkelijke volume van het bodemvocht.

Chemische analyses

Elementenanalyse (ICP en auto-analysers)

De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), ijzer (Fe), mangaan (Mn), fosfor (P), zwavel (S; als maat voor sulfaat), silicium (Si) en zink (Zn) werden bepaald met behulp van een Inductively Coupled Plasma Spectrofotometer (ICP-OES, ICAP 6300, Thermo Fisher Scientific of, ARCOS MV, Spectro). De concentraties nitraat (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) en fosfaat (PO₄³⁻) werden colorimetrisch bepaald met een Seal auto-analyser III met behulp van resp. salicylaatreagens, hydrazinesulfaat en ammoniummolybdaat/ascorbinezuur. Chloride (Cl⁻) werd colorimetrisch bepaald met een Bran+Luebbe auto-analyser III systeem met behulp van mercuritiocyanide. Natrium (Na⁺) en kalium (K⁺) werden vlamfotometrisch bepaald met een Sherwood Model 420 Flame Photometer.

.....

Bijlage 2. Mail van Waternet

Advies: Geen vergunningplicht toepassen ijzerwater in Westveen

Van: Pieters, Barry <[redacted]>

Verzonden: dinsdag 16 februari 2021 12:36

Aan: [redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]

Onderwerp: Advies: Geen vergunningplicht toepassen ijzerwater in Westveen

Situatie

Om waterkwaliteit te verbeteren wordt ijzerwater, een restproduct van de drinkwaterzuivering van Waternet, toegevoegd aan het oppervlaktewater/de waterbodem in de Westveense Polder. In de polder wordt getracht de natuur te verbeteren door de eigenaar Natuurmonumenten. Het gebruik van ijzerwater is in het verleden enkele malen succesvol toegepast en wordt populairder door de tijdsdruk vanuit KRW. Door het verhogen van het ijzergehalte in het slib van watergangen naar een standaardwaarde, o.a. door menselijk handelen verslechterd in de wateren in het natuurgebied, wordt fosfaat en fosfor vastgehouden in de bodem. Bij een te laag ijzergehalte komt dit juist vrij in het water waardoor deze nutriënten algengroei mogelijk maken: de waterkwaliteit verslechtert dan. De vraag is of het lozen van het ijzerwater vergunningplichtig is wanneer dit wordt gedaan in het kader van beheer van een water.

Meldingen en vergunning

Voor het ontwateren van het baggeren wordt artikel 3.17, lid 2 van het Besluit lozen buiten inrichtingen (Blbi) gehanteerd. Wanneer interventiewaarden zoals gesteld in tabel 2 van bijlage B, behorende bij de Regeling bodemkwaliteit, waarnaar wordt verwezen in artikel 2.26 van de Regeling lozen buiten inrichtingen, worden overschreden dient een werkplan te worden opgesteld met daarin maatregelen om het lozen te beperken.

Het ijzerwater is afkomstig uit een inrichting type C, maar de lozing vindt niet binnen of in de directe nabijheid van de inrichting plaats. Daarom wordt het Activiteitenbesluit milieubeheer niet gehanteerd, maar eveneens de Blbi. In artikel 3.18 staat het volgende: "Het lozen in een oppervlaktewaterlichaam ten gevolge van andere werkzaamheden dan bedoeld in artikel 3.17, is toegestaan indien die werkzaamheden plaatsvinden door of in opdracht van de beheerder in het kader van het beheer van dat oppervlaktewaterlichaam." Omdat hier sprake is van lozing in het kader van het beheer van het oppervlaktewaterlichaam, met de KRW als achterliggende doelstelling en juridische taak, is geen vergunning benodigd. Uit artikel 1.10, lid 1 blijkt dat er ook geen meldingplicht is.

Met vriendelijke groet,

Barry Pieters

Adviseur water & ruimte

T 020 608 5423

Korte Ouderkerkerdijk 7

Postbus 94370, 1090 GJ Amsterdam

Waternet.nl

.....

B
ware

www.b-ware.eu