

De Bodem Bedekt Revisited

Langetermijneffecten van het afdekken van de waterbodem in de Bergse Plassen met zand en aluminiumhydroxide



De Bodem Bedekt Revisited

Langetermijneffecten van het afdekken van de waterbodem in de Bergse Plassen met zand en aluminiumhydroxide

Auteur(s)

Peter Overvest

Leonard Osté

Gerlinde Roskam

De Bodem Bedekt Revisited

Langetermijneffecten van het afdekken van de waterbodem in de Bergse Plassen met zand en aluminiumhydroxide

Opdrachtgever	Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard
Contactpersoon	de heer J. Hemelraad
Referenties	--
Trefwoorden	Afdekken, fosfaat, interne eutrofiering, waterkwaliteit, aluminium

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	17-12-2021
Projectnummer	11207125-002
Document ID	11207125-002-ZWS-0001
Pagina's	48
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Peter Overvest	
	Leonard Osté	
	Gerlinde Roskam	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.1	Leonard Osté	Arjan Wijdeveld	Bianca Peters	

Samenvatting

De Bergse Plassen horen tot de regionale laagveenplassen met een lange verblijftijd van het water, waar sprake was van interne eutrofiëring. De nalevering van fosfaat uit de waterbodem naar het oppervlaktewater, kan in hoofdlijnen worden tegengegaan door het verontreinigde sediment ofwel weg te baggeren of af te dekken met een deklaag. Met een afdeklaag kan het contact tussen (organismen in) de waterkolom en de verontreinigde waterbodem worden voorkomen. Een afdeklaag voorkomt ook de opwerveling van verontreinigde bodemdeeltjes door biota, wind, scheepvaart of stroming, die vervolgens in het oppervlaktewater verder kunnen worden verspreid.

De waterbodem van de Achterplas is 20 jaar geleden gesaneerd; dat wil zeggen: gebaggerd en afgedekt met zand. De Voorplas is in 10 jaar geleden afgedekt. Omdat er in de Voorplas sprake is van een kwelsituatie, is besloten om de bindingscapaciteit van de zandlaag te vergroten door onder het zand een laag aluminiumhydroxide aan te brengen die het aluminium in de kwelstroom chemisch bindt.

In dit rapport is de waterbodemkwaliteit opnieuw gemonitord. De activiteiten en de resultaten van deze monitoringsronde worden gerapporteerd en ze worden gepresenteerd in samenhang met de data van 2009, 2010, 2011 en 2012. Het doel van de monitoring is om de onderstaande vragen te beantwoorden:

- Werkt de zandlaag, met of zonder aluminium er onder, nog steeds als buffer tussen het oude eutrofe slib en het bovenstaande water in de Bergse Plassen?
- Wat is de huidige bijdrage aan het afdekken aan de interne eutrofiëring?
- Wat mag er in de toekomst verwacht worden van de afgedekte bodem?

Deze vragen worden beantwoord door sedimentkernen te steken en deze laag voor laag te bemonsteren met poriewatersamplers en totaalgehalten te meten. Daarnaast is het in 2011 toegevoegde aluminium teruggevonden. Daardoor kon de daadwerkelijke binding aan het aluminiumhydroxide in het veld worden bepaald. De resultaten sluiten goed aan bij de eerdere monitoring, waardoor er een beeld wordt verkregen van de langetermijnontwikkelingen.

Werkt de zandlaag, met of zonder aluminium er onder, nog steeds als buffer tussen het oude eutrofe slib en het bovenstaande water in de Bergse Plassen? Ja, de zandlaag is goed in tact en vormt dus een blijvende fysische buffer tussen het oude slib en het oppervlaktewater. Er treedt geen accumulatie van fosfaat op in het zand. Er gaat wel transport door de zandlaag heen, maar het is lastig bepalen hoeveel. In elk geval is in de profielen zonder aluminium ook na 20 jaar weinig verschil te zien. Poriewaterconcentraties in het zand variëren van 2-4 mg P/L. In de gebieden die met aluminium zijn behandeld heeft het aluminium ca. 100 g P/kg Al gebonden. In het poriewater in de zandlaag leidt dat tot lagere P-concentraties, die in de afgelopen tien jaar zijn opgelopen van <0,5 naar ca. 1,5 mg P/L voor de hoge toevoeging en van ca. 1 naar 2 mg P/L voor de lage toevoeging.

Wat is de huidige bijdrage aan het afdekken aan de interne eutrofiëring?

De interne eutrofiëring wordt primair bepaald door de eigenschappen van het slib in de toplaag. De belangrijkste vraag is daarom of er transport door het zand plaatsvindt waardoor het nieuwe slib eutrofer wordt dan alleen op basis van de externe belasting. Op basis van de P-balans die in 2020 is opgesteld door Witteveen+bos kan het P-gehalte in slib niet verklaard worden uit het jaarlijkse surplus op de balans.

Dat laat ruimte voor een extra bron, namelijk als gevolg van transport vanuit het oude slib door het zand. Aan de andere kant zijn er enkele signalen die een indicatie geven voor het isolerende effect van het afdekken: de gehalten in het nieuwe slib zijn (zeker in de Voorplas) lagere dan in het oude slib. Daarnaast zijn de gehalten in slib in de Voorplas het laagst op de locatie met de hoogste aluminiumtoevoeging hetgeen er op wijst dat aluminium zorgt voor een extra buffer. Echter, in alle gevallen is de onnauwkeurigheid van de cijfers te groot om hierover een betrouwbare uitspraak te kunnen doen.

Wat mag er in de toekomst verwacht worden van de afgedekte bodem?

Vooralsnog is er sprake van een fysisch en chemisch stabiele situatie. De experimenten naar de restcapaciteit van het aluminium geven aan dat er nog wel restcapaciteit aanwezig is, maar minder dan op basis van experimenten in 2010 werd geschat. Dat zou kunnen betekenen dat de belasting vanuit het oude slib op termijn nog iets kan toenemen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Problematiek	8
1.2	Het gebied en de uitgevoerde werkzaamheden	8
1.3	Monitoring de Bodem Bedekt – Ontwikkeling van de waterbodem in de Bergse Plassen op lange termijn	10
2	Materiaal en methoden werkzaamheden 2021	11
2.1	Veldwerk	11
2.2	Verwerken boorkernen	12
2.3	Analyses	12
3	Resultaten 2021	14
3.1	Beschrijving van de kolommen	14
3.2	Analyses	15
3.2.1	Sedimentprofielen	16
3.2.2	Poriewaterconcentraties	20
4	De data van 2021 in de tijd bekeken	26
4.1	De beschikbare data voor de verschillende locaties	26
4.2	Achterplas – verloop in de tijd	27
4.2.1	Sedimentprofielen	27
4.2.2	Poriewaterprofielen	28
4.3	Voorplas – verloop in de tijd	30
4.3.1	Sedimentprofielen	30
4.3.2	Poriewaterprofielen	32
5	Restcapaciteit toeslagstof aluminium	34
5.1	Materiaal en methoden adsorptie aluminium	34
5.1.1	Experiment 1 – bepalen gehalte aluminium en gebonden fosfaat	34
5.1.2	Experiment 2 – sediment blootstellen aan oplopende fosfor concentraties	35
5.2	Resultaten bepalingen restcapaciteit	35
5.2.1	Experiment 1 – bepalen gehalte aluminium en gebonden fosfaat	35
5.2.2	Experiment 2 – sediment blootstellen aan oplopende fosfor concentraties	36
6	Discussie	38
6.1	Methodische discussiepunten	38
6.1.1	Is de hoeveelheid aluminium in de kolommen representatief?	38
6.1.2	Restcapaciteit toeslagstof aluminium	39
6.2	Werkt de zandlaag met of zonder aluminium als buffer?	41
6.2.1	Totaalgehalten	41

6.2.2	Poriewaterconcentraties	42
6.2.3	Effect in de tijd?	42
6.2.4	Naar de toekomst?	42
6.2.5	Concluderend	43
6.3	Reduceert de zandlaag met of zonder aluminium de interne belasting?	43
6.4	Hoeveel effect heeft afdekken in de toekomst?	44
7	Conclusies	45
7.1	Werkt de zandlaag (al of niet met aluminium) als buffer?	45
7.2	Reduceert de zandlaag, met of zonder aluminium, de interne belasting?	45
7.3	De toekomst?	45
8	Literatuur	46
A	Beschrijving van de kolommen	47

1 Inleiding

1.1 Problematiek

In veel regionale wateren met een lange verblijftijd van het water, waaronder veenplassen, is sprake van interne eutrofiëring. In de waterbodem van deze wateren zijn de gehalten aan nutriënten (N en P) sterk verhoogd door enerzijds mineralisatie van de oorspronkelijke veenbodem en anderzijds door vastlegging van fosfaten, die via uitspoeling van landbouwgronden, riooloverstorten of ongezuiverde lozingen zijn aangevoerd. In veel gevallen zijn de externe bronnen in de loop der jaren gesaneerd, maar levert de waterbodem nog langdurig fosfaat na naar de waterkolom en heeft de waterbeheerder hierdoor ecologische problemen zoals excessieve (blauw)algengroei (bloei) en/of een onvolledig en slecht functionerend ecosysteem.

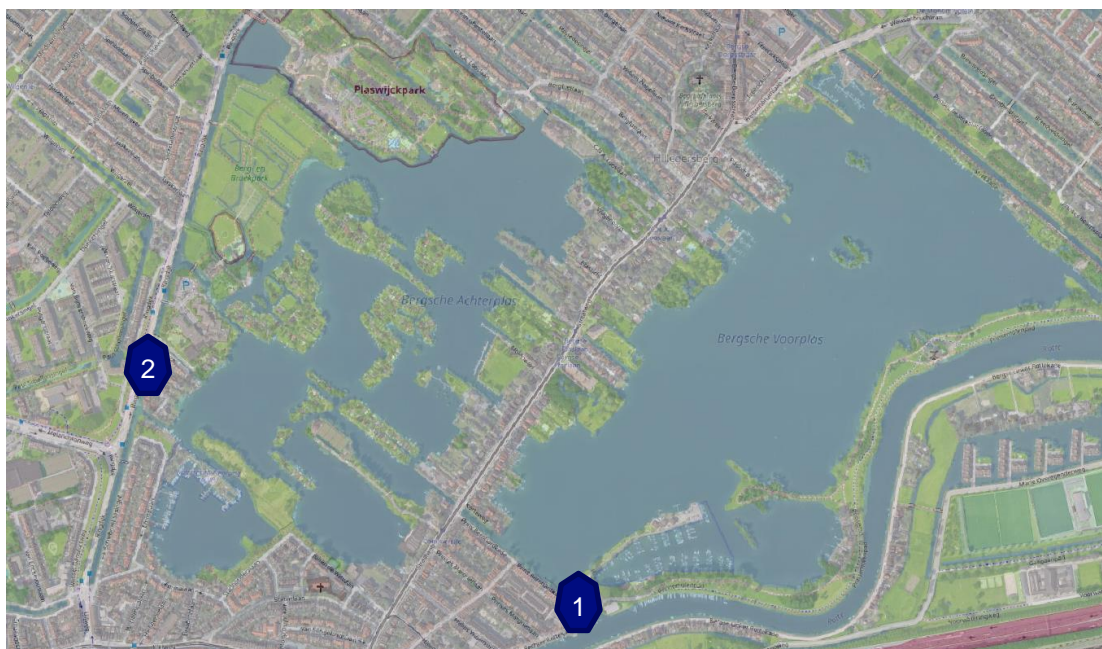
De nalevering van fosfaat of andere verontreinigingen uit de waterbodem naar het oppervlaktewater, kan in hoofdlijnen worden tegengegaan door het verontreinigde sediment ofwel weg te baggeren of af te dekken met een deklaag. Met een afdeklaag kan het contact tussen (organismen in) de waterkolom en de verontreinigde waterbodem worden voorkomen. Een afdeklaag voorkomt ook de opwerveling van verontreinigde bodemdeeltjes door biota, wind, scheepvaart of stroming, die vervolgens in het oppervlaktewater verder kunnen worden verspreid. Dit principe geldt voor alle stoffen, maar dit rapport richt zich op fosfaat vanwege de eutrofiëringsproblematiek in de Bergse Plassen.

Transport van opgeloste verontreinigingen vanuit het poriewater van de waterbodem naar het oppervlaktewater via diffusie of kwel, kan door een afdeklaag in ieder geval worden vertraagd of, indien de verontreiniging in de afdeklaag opgeloste verontreinigingen adsorbeert of precipiteert, voor langere tijd worden voorkomen. Om verontreinigingen effectief te binden binnen een afdeklaag, moet deze voldoende adsorptiecapaciteit hebben of voldoende stoffen bevatten die met de verontreiniging precipiteren. Wanneer men de bindingscapaciteit van de afdeklaag wil vergroten, kan een actieve component aan deze laag worden toegevoegd.

1.2 Het gebied en de uitgevoerde werkzaamheden

De Bergse Plassen (Figuur 1.1) bestaan uit een Voorplas en een Achterplas die via een smal kanaal met elkaar zijn verbonden. Het waterpeil in de Bergse Plassen wordt beheerd door het gemaal Berg en Broek Verlaat gelegen naast de sluis. De plassen (Figuur 1.1) zijn in het verleden (sterk) eutroof geworden door het effluent van een AWZI, inlaat van voedselrijk water, ongerioleerde lozingen vanuit recreatiewoningen, en door mineralisatie van de veenbodem. Intussen is de AWZI geamoveerd, zijn de ongerioleerde lozingen gesaneerd, wordt het ingelaten water via gemaal ringdijk met ijzerchloride gedefosfateerd en zijn er maatregelen genomen gericht op verbetering van de waterbodemkwaliteit. Een totaal overzicht van alle werkzaamheden en de effecten is te vinden in Hemelraad (2019).

Dit rapport richt zich op de waterbodem. De waterbodem van de Achterplas is bijna 20 jaar geleden (2002) gesaneerd; dat wil zeggen: gebaggerd om voldoende diepte te creëren, waarbij een deel van het slib is blijven liggen, en afgedekt met zand. Tegelijkertijd is ook circa 20% van de Voorplas gebaggerd, maar niet afgedekt.

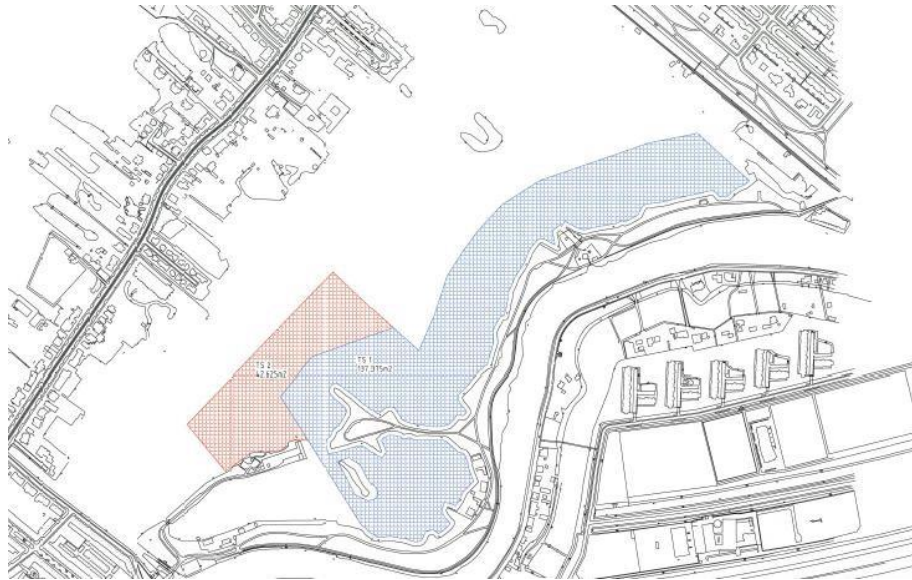


Figuur 1.1: Bergse Plassen in Rotterdam. (OpenStreetMap and Google Satellite). 1= de sluis & gemaal Berg en Broek Verlaat. 2 = gemaal Ringdijk

De Bergse Achterplas is in 2002 na het baggeren afgedekt met een laag zand van ongeveer 30 cm. Onder dit zand is geen toeslagstof toegevoegd die zorgt voor extra chemische binding van fosfaat. De Bergse Achterplas vormt zodoende een goede referentiesituatie waarin onderzocht kan worden wat het lange termijn effect is van een zandlaag zonder toeslagstof. Behalve een beperkt baggerwerk (zie eerder in de deze paragraaf) is met de aanpak van de Bergse Voorplas gewacht om te zien hoe de waterkwaliteit zich in de Achterplas ontwikkelde en te volgen in hoeverre deze waterkwaliteitsverbetering ook de Voorplas zou beïnvloeden.

Omdat het herstel van de Achterplas sneller verliep dan dat van de Voorplas, is in 2011 ook de Voorplas afgedekt (Bakker et al., 2011). Omdat er in de Voorplas sprake is van dijkse kwel, is besloten om de bindingscapaciteit van de zandlaag te vergroten door het gebruik van een toeslagstof en zodoende langdurig de nalevering van fosfaat te beperken. De gebruikte toeslagstof is polyaluminiumchloride (PAC); de merknaam is PAX-14. Dit is eerste gemengd met natronloog, waardoor een suspensie van aluminiumhydroxide ontstond met een neutrale pH die in de plas is gedoseerd. Begin april 2011 is gestart met het aanbrengen van de toeslagstof en het zand daar bovenop.

Met de toenmalige kennis werd verondersteld dat een groot deel van de Bergse Plassen een lichte wegzijging kende, behalve langs de Rotte, waar dijkse kwel optrad (Bakker et al., 2011). De toeslagstof is in het kwelgevoelige deel (ca. 1/3 deel) van de Bergse Voorplas (langs de Rotte) toegepast met een dosering van $1,78 \text{ kg/m}^2$ (Figuur 1.2, blauw) en daarnaast met een dosering van $0,89 \text{ kg/m}^2$ (Figuur 1.2, rood) in het vak in het zuidwesten van de plas. Na aanbrengen van de toeslagstof is de gehele plas afgezaand met een laag zand van 20 cm.



Figuur 1.2 De vakken waar de mix van polyaluminiumchloride en NaOH is toegepast. In het blauwe vak bedraagt de polyaluminiumchloride (PAC)-dosering 1,78 kg /m² en in het rode vak 0,89 kg /m²

1.3 Monitoring de Bodem Bedekt – Ontwikkeling van de waterbodem in de Bergse Plassen op lange termijn

De toestand van de waterbodem is gemonitord in 2009 (T0), 2011 en 2012 (Bakker et al, 2011; Osté en Roskam, 2013). In 2021 is de waterbodem voor het eerst daarna weer gemonitord. In dit rapport zijn deze activiteiten en de resultaten gerapporteerd en worden de resultaten gepresenteerd in samenhang met de data van 2009, 2010, 2011 en 2012.

Uit berekeningen en experimenten volgde dat de toeslagstof PAX-14 naar verwachting 10 jaar zou werken. Aangezien het in 2021 tien jaar geleden is dat het aluminium is toegediend, wordt in dit onderzoek ook ingegaan op de mogelijke restcapaciteit het aluminium. Er wordt gekeken hoeveel in de afgelopen jaren fosfaat gebonden is, en hoeveel extra fosfaat gebonden nog gebonden kan worden bij toevoeging van fosfaat.

De monitoring heeft als doel om de volgende vragen te beantwoorden:

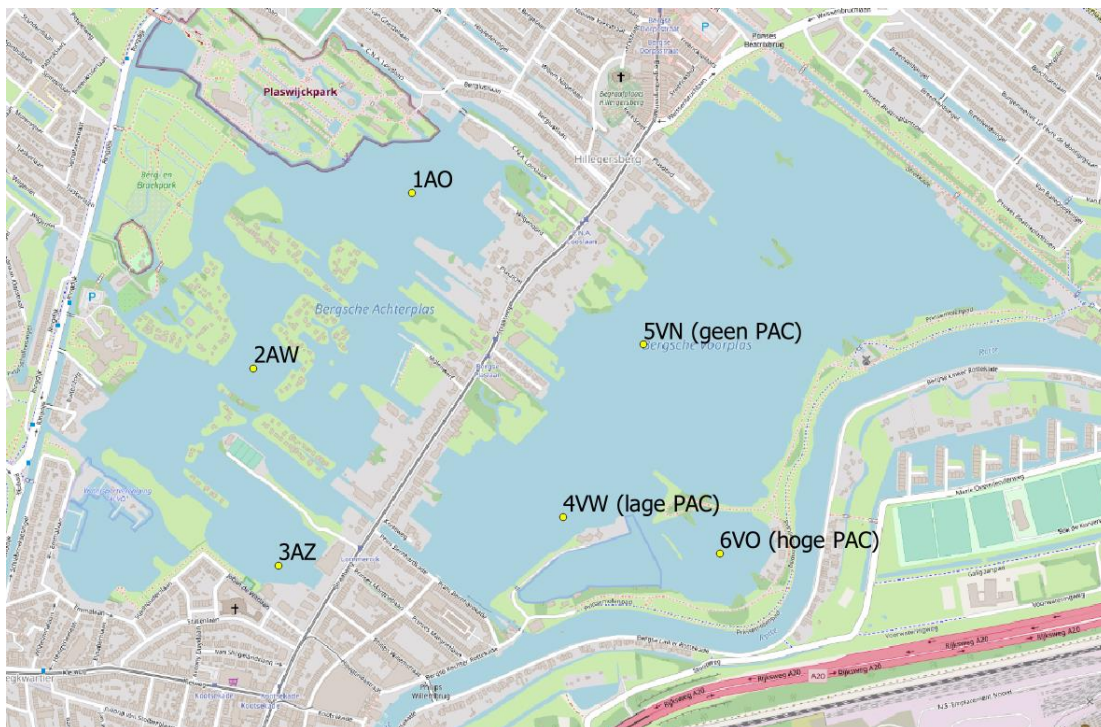
- Zijn er veranderingen te zien in de vastestof- en poriewaterprofielen ten opzichte van de monitoring in 2009, 2011 en 2012?
- Werkt de zandlaag, met of zonder aluminium er onder, nog steeds als buffer tussen het oude eutrofe slib en het bovenstaande water in de Bergse Plassen?
- Wat is de huidige bijdrage aan het afdekken aan de interne eutrofiering?
- Wat mag er in de toekomst verwacht worden van de afgedekte bodem?

2 Materiaal en methoden werkzaamheden 2021

Het veld- en laboratoriumwerk is net zo uitgevoerd als in het eerdere project 'De bodem bedekt'. In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven meer informatie is te vinden in Bakker et al. (2011).

2.1 Veldwerk

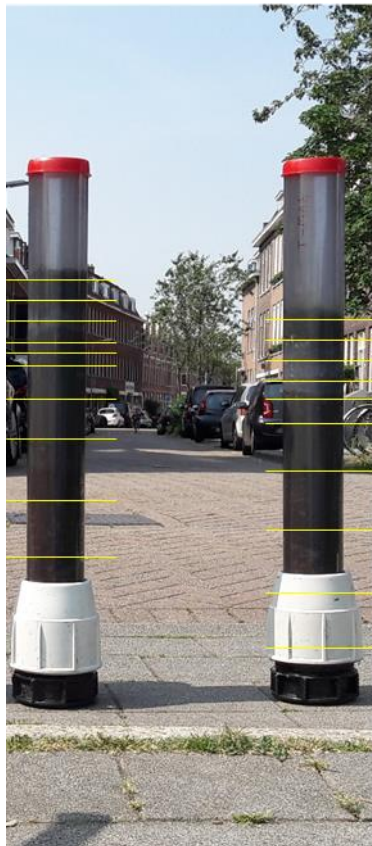
Op 8 en 9 juni 2021 is er veldwerk verricht op 6 locaties; 3 locaties in de Achterplas en 3 locaties in de Voorplas op ongeveer dezelfde plekken als in 2011. Alle locaties zijn in Figuur 2.1 weergegeven.



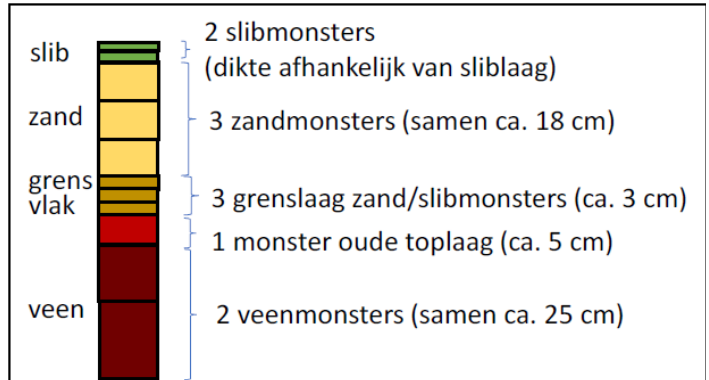
Figuur 2.1 Bemonsterde locaties 2021 (A staat voor Achterplas en V voor voorplas, Z-W-N-O voor zuid-west-noord-oost). In de voorplas staat ook de dosering polyaluminiumchloride die is toegediend.

Op elke locatie zijn 3 kernen gestoken (in totaal 18 kernen) tot ongeveer 20 cm onder de zandlaag. Dat vraagt kolommen van ca. 45-55 cm (afhankelijk van de zandlaag) plus ca. 15 cm die niet bemonsterd kan worden met Rhizons vanwege de voet, dus 60-70 cm sediment. Bij de meeste kolommen verliep de bemonstering zonder problemen. De kolommen zijn vervolgens visueel geïnspecteerd en beschreven. De twee meest intacte kolommen van iedere locatie zijn bemonsterd en hierop zijn alle analyses voor zowel vaste stof als poriewater uitgevoerd.

In sommige delen van de plas veerde de veenbodem zover in, dat er slechts 50-60 cm sediment bemonsterd kon worden in de 120 cm lange buis. Als echter dieper werd gestoken verdween de bovenkant van de buis in het sediment en stroomde vanaf boven vol met sediment. Op locatie 5VN, waarbij twee kolommen die 20 cm onder de zandlaag niet haalden, hebben we een derde kern gestoken met een verstoorde toplaag. Die derde kern is gebruikt voor het onderste deel van het profiel op locatie 5VN.



Figuur 2.2 Voorbeeld van 2 buizen en indeling van monsters: Links poriewater wat bemonsterd is op de gele strepen en rechts vaste stof, wat bemonsterd is tussen de gele strepen voor vaste stof kan door het wegnemen van de witte sluiting 20 cm dieper bemonsterd worden.



Figuur 2.3 Verdeling monsters over verschillende sedimenttypen. De Rhizons zijn steeds in het midden van de laag geïnstalleerd.

2.2 Verwerken boorkernen

Van 10-15 juni 2021 zijn poriewatermonsters genomen, waarna de kolommen in plakjes worden gesneden het sediment is gedroogd op 105 °C. Het poriewater is bemonsterd door middel van Rhizon poriewatersamplers (Rhizosphere, Rhizon CSS, gemiddelde poriegrootte 0,15 µm). In elke kern zijn gemiddeld 10 poriewatermonsters en 10 plakken sediment (zie Figuur 2.2) bemonsterd. Dit is gebeurd op dezelfde manier als tijdens de monitoring in november 2011: de dikte van de bemonsterde sedimentlaagjes wordt met de diepte gevarieerd. De toplaag is nauwkeuriger bemonsterd (ca. 1 cm), omdat er sinds november 2011 weer een dun sliblaagje is ontstaan. Daaronder worden lagen zand van ca. 5 cm bemonsterd. Rondom het grensvlak zand/(aluminiumhydroxide)/slib worden laagjes van ca. 2 cm bemonsterd. Onder het grensvlak worden lagen van 5-15 cm bemonsterd.

2.3 Analyses

Uit de 13 bemonsterde kolommen zijn in totaal 136 sedimentmonsters en 129 poriewatermonsters genomen. Deze zijn geanalyseerd op:

Sediment:

- Totaal elementgehalten inclusief Al, P, S, Fe (met ICP-OES na ontsluiting met HF).
- Vochtgehalte, totaal C en S en organisch/anorganisch koolstof (met CS en TGA).

Poriewatermonsters:

- pH (middels electrode).
- Concentraties elementen (waaronder tot-Fe, tot-S, tot-P en tot-Al, met ICP-OES).
- Anionen en nutriënten (waaronder F, Cl, Br, NH₄, NO₃, SO₄, PO₄ met ionchromatograaf en auto-analyzer).
- Anorganisch (DIC) en organisch koolstof (DOC) (met TOC-analyzer).

In een HF-ontsluiting worden zowel de toegevoegde aluminium(hydroxides) als van nature aanwezige aluminium(silicaten) gemeten. De natuurlijk aanwezige aluminium bleek eerder een goede relatie te geven met barium (Bakker et al., 2011). Op basis van de bariumgehalten kan daar door een schatting worden gemaakt voor het aandeel natuurlijk aanwezig aluminium. De rest wordt dan beschouwd als toegevoegd aluminium.

3 Resultaten 2021

3.1 Beschrijving van de kolommen

In de verschillende kolommen waren de volgende sedimenttypen te onderscheiden op basis van kleur en structuur:

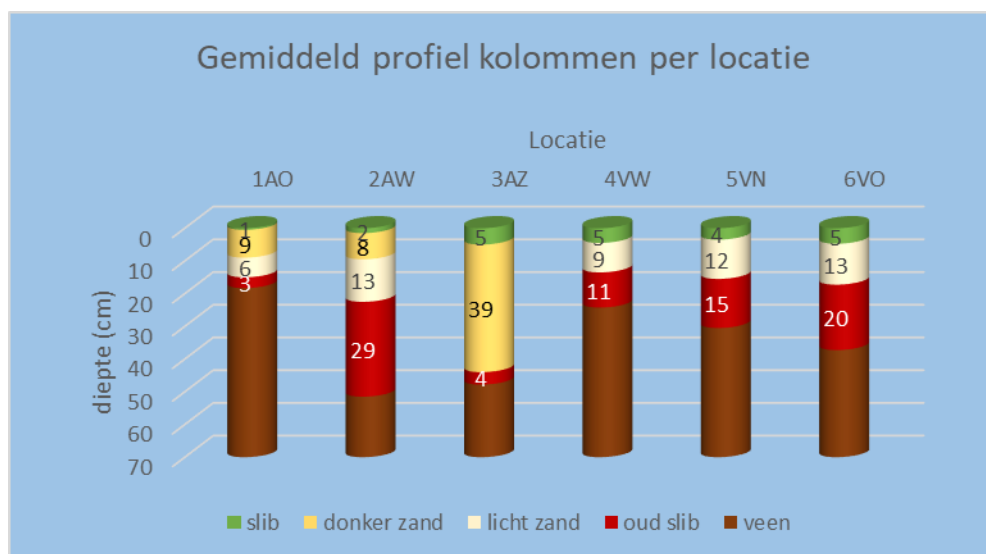
- Slib op het zand (recent/nieuw);
- Donker zand;;
- Licht zand
- slib onder het zand (oud);
- Veen.

De lagen waren soms vermengd, een duidelijk onderscheid is dan gemaakt op basis van vochtgehalte.

$$\text{Vochtgehalte (\%)} = \frac{\text{natgewicht} - \text{drooggewicht}}{\text{natgewicht}} * 100\%$$

Een vochtgehalte tussen 80 % en 90 % duidt op veen en een vochtgehalte van 15-45 % duidt op zand. Slib heeft een vochtgehalte van 70-80 %, als slib en zand mengen kan ook een vochtgehalte tussen 45 en 70 % voorkomen. Op deze manier waren alle samples in te delen in een structuur.

De dieptes en diktes van deze lagen zijn voor elke kolom opgemeten en staan weergegeven in Bijlage A. Een samenvatting van deze resultaten staat in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Gemiddeld profiel van de kolommen per locatie. Hiervoor zijn laagdieptes van duplo/triplo-kolommen per locatie gemiddeld. In Bijlage 1 staan gedetailleerde beschrijvingen per kolom. De dikte van de veenlaag is nergens bepaald en ter vergelijking aangevuld tot 70 cm. Locatie 4VW: lage PAC; Locatie 6VO: hoge PAC; PAC laag niet zichtbaar in nat sediment en daarom niet getoond.

3.2 Analyses

De analyses zijn in twee hoofdgroepen te verdelen: 1) sedimentkarakteristieken en totaalgehalten in sediment, 2) poriewaterconcentraties. In hoofdstuk 3 worden de metingen van 2021 gerapporteerd. In hoofdstuk 4 worden de metingen van 2021 vergeleken met de resultaten van eerdere jaren. In het kader hieronder staat hoe de grafieken zijn opgebouwd.

Weergave van de figuren

De variatie in de dikte van de zandlaag stoort bij het vergelijken van de resultaten van verschillende kolommen. Voor het vergelijk van de verschillende kolommen in de figuren is een dikte van de zandlaag van 20 cm aangenomen, deze wordt in de figuren dan weergegeven tussen + 20 cm en 0 cm (gele achtergrond). In kolommen met een dikkere zandlaag zijn de monsterpunten in de zandlaag naar elkaar toegeschoven, als de zandlaag dunner was zijn ze verder uit elkaar weergegeven dan in ze in werkelijkheid waren, zodat zowel voor dikke als dunne zandlagen de dikte in figuur 20 cm is. De dikte van de zandlaag is terug te vinden in Bijlage A.

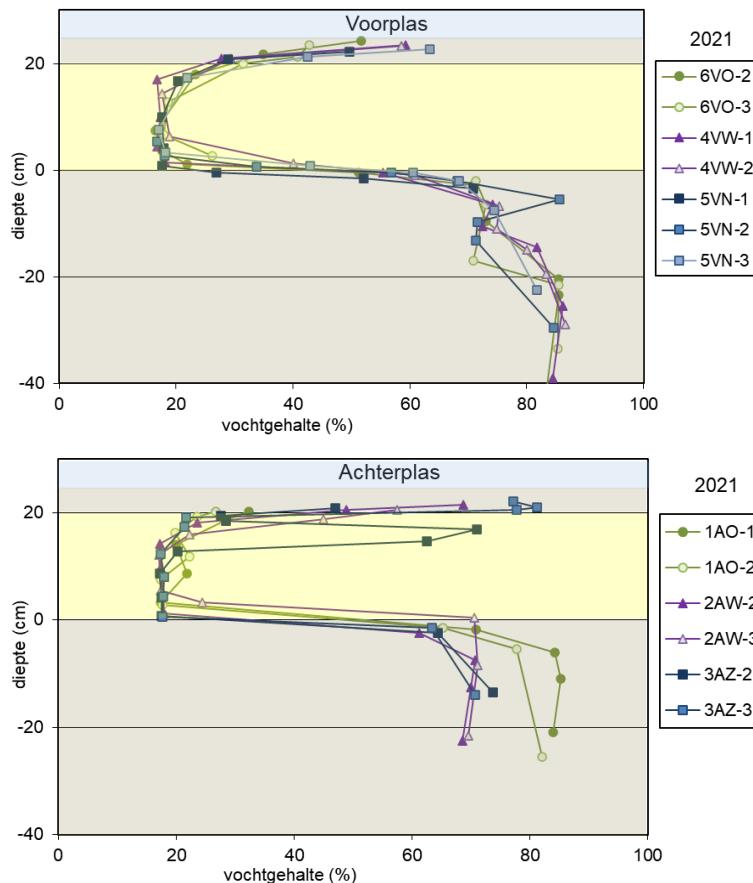
De oorspronkelijke slib en veenlagen zijn dan geplot vanaf 0 cm naar beneden, op deze manier zijn de kolommen voor afdekking eenvoudig te vergelijken met de kolommen na afdekking (grijze achtergrond). Het grensvlak zand // oud slib, met de eventuele aluminiumlaag, is dus geplot op 0 cm en het oude slib en veen daaronder. Het oude slib is niet genormaliseerd op een bepaalde dikte en daardoor kan in de figuren geen onderscheid gemaakt worden tussen oud slib en veen.

Het eventueel nieuw gevormde sediment wat bovenop de zandlaag is gevormd is geplot boven op de zandlaag (tussen 20 en 25 cm) en niet genormaliseerd, met uitzondering van kolom 3AZ3, waar de sliblaag van 10 cm bovengemiddeld dik was en is genormaliseerd naar een dikte van 2 cm (grijze achtergrond).

De dieptes van de meetpunten tonen de locatie waar de Rhizon is geplaatst bij de poriewaterprofielen of de gemiddelde diepte van het schijfje materiaal wat is geanalyseerd voor de sedimentprofielen. In de poriewaterprofielen is het monster van het bovenstaande water met open symbolen boven de zandlaag weergegeven (blauwe achtergrond).

Een belangrijke verklarende variabele voor de verschillende parameters is het sedimenttype, wat gekarakteriseerd wordt door het vochtpercentage (zie paragraaf 3.1). In Figuur 3.2 is het vochtpercentage geplot met een genormaliseerde zandlaag zoals hiervoor beschreven. Dit toont de algemene trend van lagere waarden in de zandlaag en hogere in de slib- en veenlagen.

Er is een afwijking zichtbaar in kolom 3AZ-2. In de zandlaag is een piek zichtbaar, die meer past bij vochtgehalten die in slib thuishoren. De oorzaak is dat de opbouw van deze core afwijkend is van wat verwacht mag worden. Naast 1,5 cm slib bovenop, zit er ook een 10 cm dikke sliblaag in het zandpakket. (bijlage A). Vermoedelijk is hier een verstoring van de waterbodem geweest. Dit effect komt terug in andere grafieken, maar moet dus als niet-representatief worden gezien voor de standaard-opbouw van de bodem.

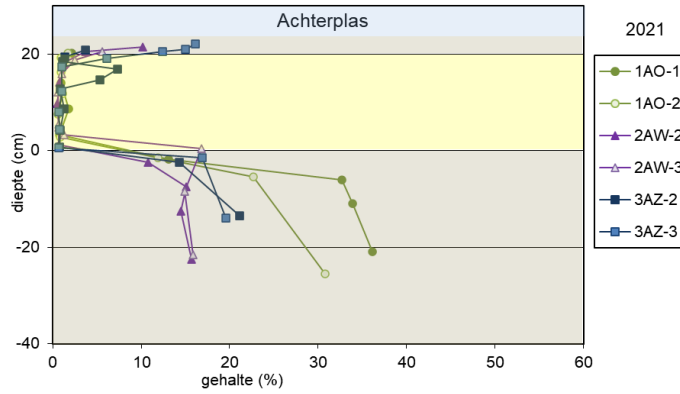
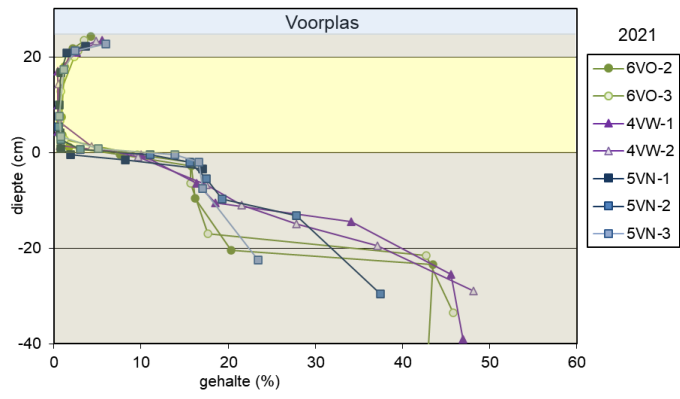


Figuur 3.2 Vochtpercentages profielen Bergse Plassen De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering.

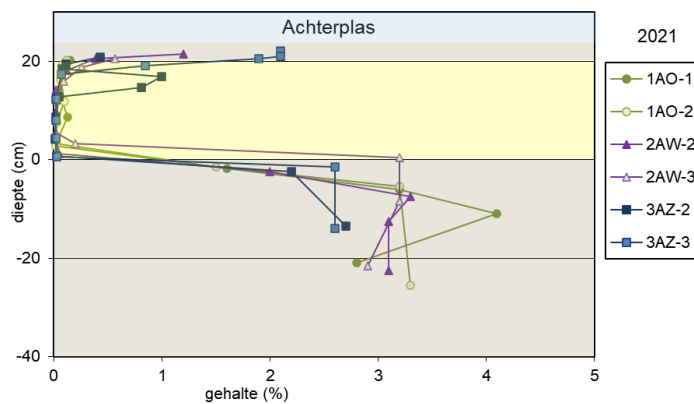
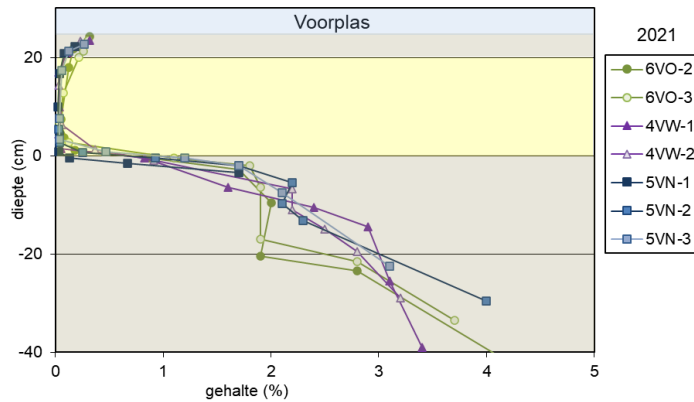
3.2.1 Sedimentprofielen

Basisparameters

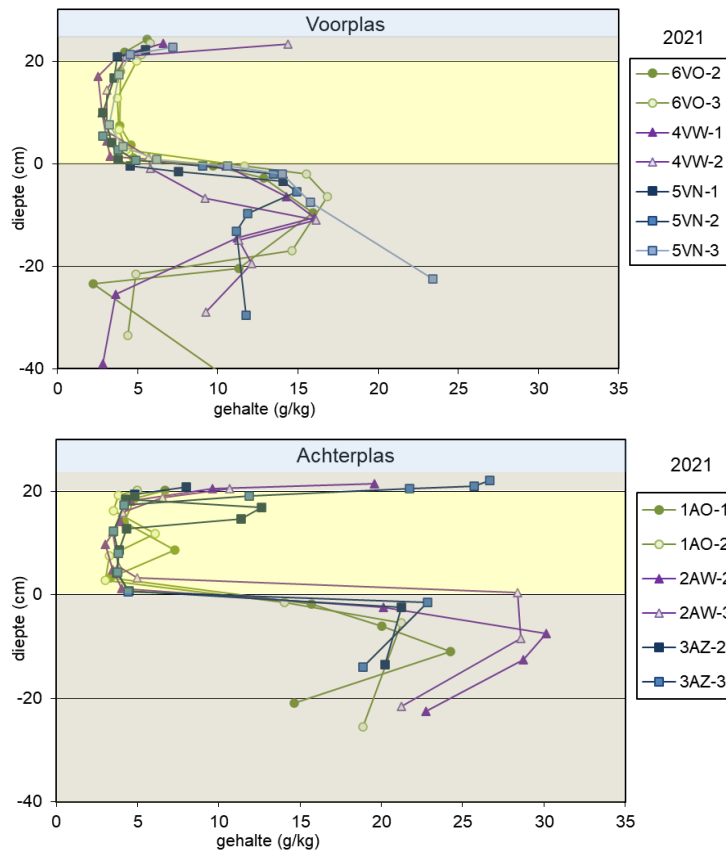
Figuur 3.5 tot en met Figuur 3.5 tonen de koolstof- (C), zwavel- (S), en ijzer(Fe)gehalten van de bemonsterde kolommen voor 3 stoffen. De gehalten vertonen een gelijke trend. De bovenste monsters van het nieuwe slib vertonen verhoogde gehalten ten opzichte van de daaronder gelegen zandlaag. In het oude slib en veenlagen zijn vervolgens weer hogere gehalten gemeten. Verder is te zien dat de gehalten in de nieuwe sliblaag van de Achterplas hoger zijn dan die van de Voorplas. De PAC-dosering heeft geen invloed op de totaalgehalten. De gehalten van de andere elementen volgen een vergelijkbare trend. Alle data is opgenomen in Bijlage 2.



Figuur 3.3 C-gehalten in de profielen van de Bergse Plassen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering



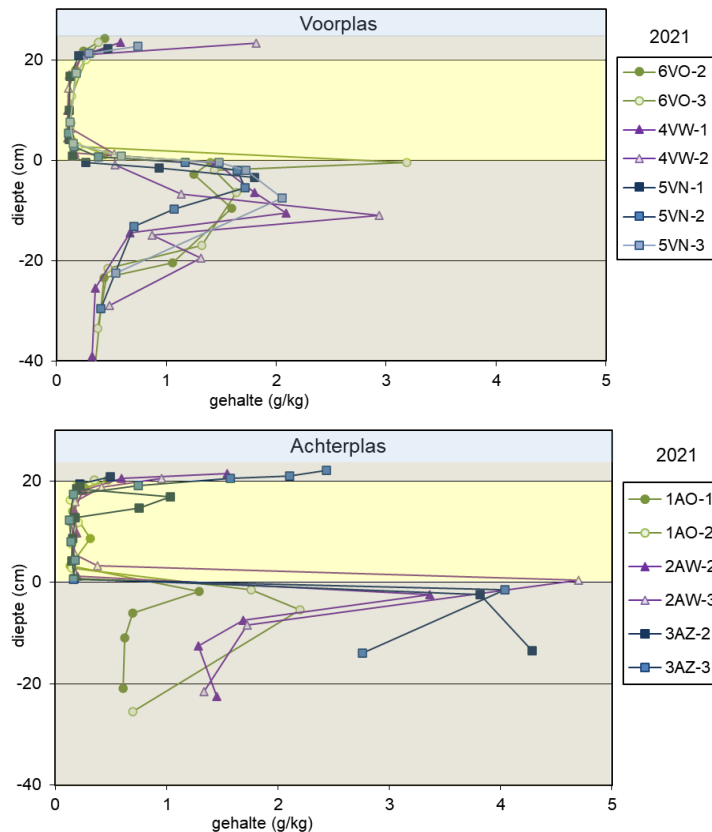
Figuur 3.4 S-gehalten in de profielen van de Bergse Plassen. Legenda zie Figuur 3.3



Figuur 3.5 Fe-gehalten in de profielen van de Bergse Plassen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

Fosfor

De sedimentprofielen voor P (Figuur 3.6) volgen dezelfde trends als de andere stoffen. Bij locatie 6VO-2 is een sterk verhoogd P-gehalte gemeten op het grensvlak, wat duidt op aan het aluminium gebonden fosfaat, zie ook Figuur 3.7 met vergelijkbare aluminium trend. De waarden in het oude slib zijn lager in de Voorplas dan in de Achterplas. Dit past in het beeld dat de Achterplas in het verleden meer eutrofiëringsproblemen had dan de Voorplas. In tegenstelling tot de andere gehalten (Figuur 3.5), zijn er in de veenlaag voor P lage waarden van 0.3 g/kg gemeten en is er nauwelijks variatie tussen de metingen.

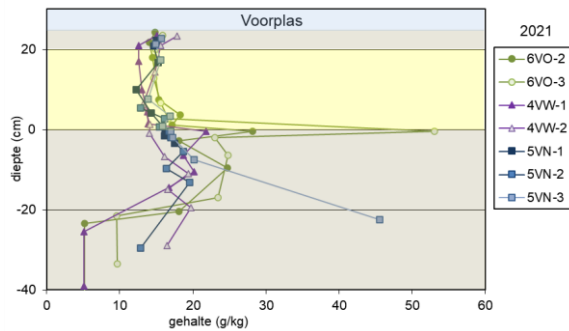


Figuur 3.6 P-gehaltes in de profielen van de Bergse Plassen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

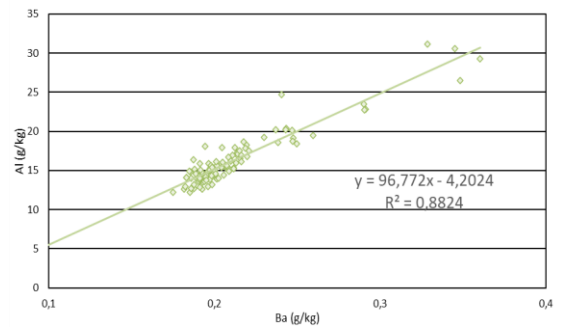
Aluminium in de Voorplas

De totaalgehalten Al in het sediment tonen over het algemeen minder variatie in de zand en sliblaag (Figuur 3.7a). De gehalten in het veen (hogere en lagere waarden) en rondom de aluminiumlaag (hogere waarden locatie 4 en 6) zijn echter sterk afwijkend. In het veen kan dit het gevolg zijn van zeer lokale verschillen door het aanwezige plantmateriaal.

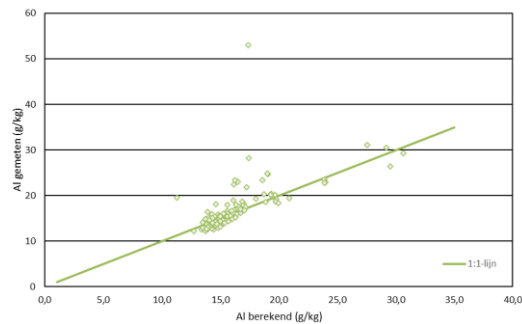
Rondom de aluminiumlaag zijn de gehalten verhoogd door het toegevoegde aluminium. Op basis van alle monsters die niet zijn beïnvloed door de aluminium toevoeging en de relatief hogere ratio in het veen wordt de relatie tussen Ba en Al vastgesteld (Figuur 3.7b). Vervolgens wordt voor alle metingen in zand en slib het gehalte aluminium berekend op basis van deze relatie. In Figuur 3.8a zijn de gemeten Al-gehalten uitgezet tegen de berekende gehalten. De punten boven de 1:1-lijn bevatten meer aluminium dan je zou verwachten op basis van het verband met barium, dit is het aluminium dat op locatie 4VW en 6VO is toegediend. In een profiel plot (Figuur 3.8b) wordt het toegevoegd aluminium geplotted. Hierbij is bij drie van de vier locaties een piek zichtbaar rondom het zand- oud slib grensvlak (4VW-1, 6VO-2 en 6VO-3). In de daaronder gelegen sliblaag zijn voor locatie 6VO de gehalten ook verhoogd, terwijl dit in de andere profielen pas wordt waargenomen in de veenlaag.



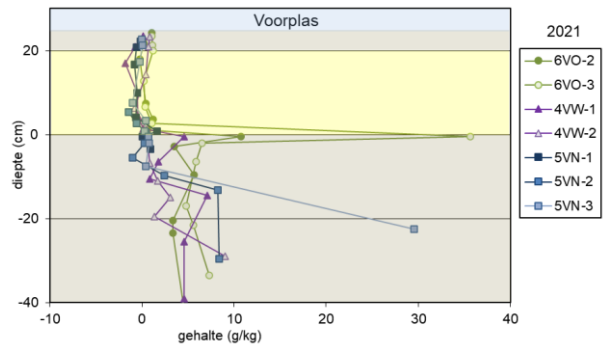
Figuur 3.7 a) Al gehalten Voorplas. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering



b) Aluminium gehalten zand en slib uitgezet tegen barium gehalten



Figuur 3.8 a) gemeten Al gehalten ten opzichte van berekend Al, verwacht op basis van Ba gehalte. Een significant verhoogde meting ten opzichte van de 1:1 lijn duidt op toegevoegd aluminium



b) profielen toegevoegd Aluminium (AI gemeten – AI berekend). De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

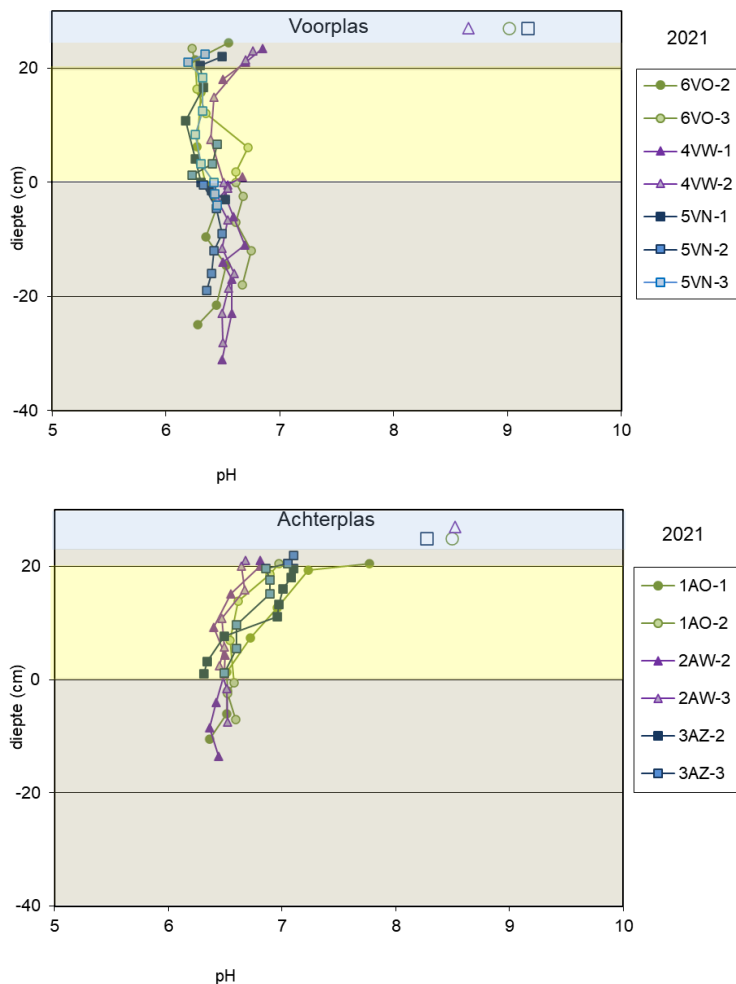
3.2.2 Poriewaterconcentraties

In deze paragraaf worden de poriewaterconcentraties beschreven. Een algemene beschrijving van de figuren wordt gegeven in het kader aan het begin van deze paragraaf.

Basisparameters

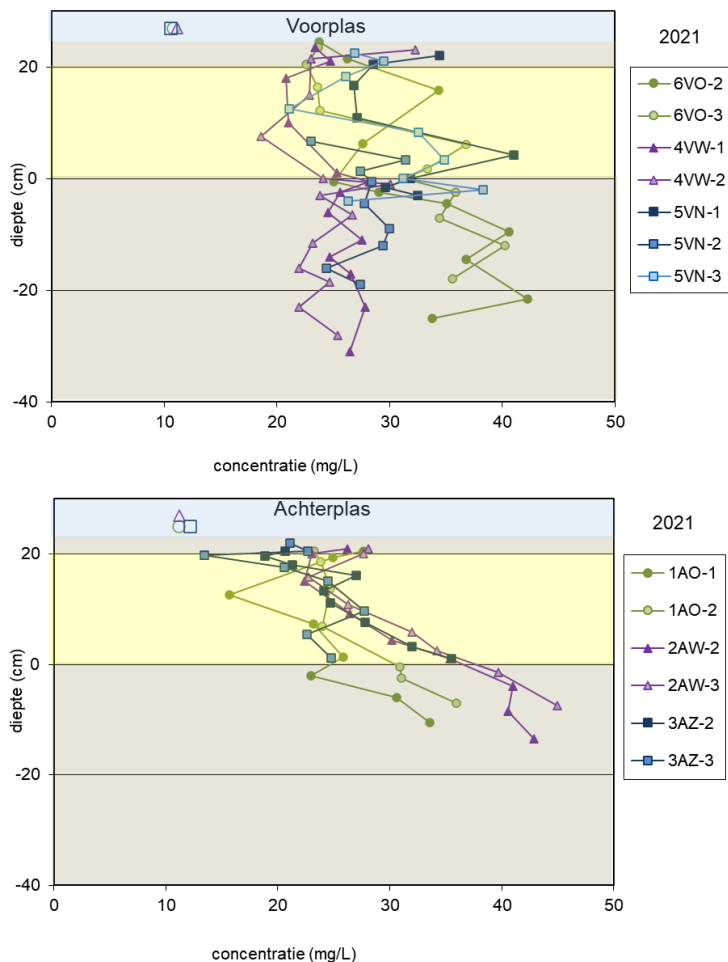
In het poriewater is een aantal basisparameters gemeten, namelijk de zuurgraad (pH), de concentratie opgelost organisch koolstof (DOC) en de concentratie opgelost anorganisch koolstof (DIC).

De gemeten pH vertoont normale waarden en ligt in het hele profiel tussen 6,2 en 7,8 (Figuur 3.9). Het bovenstaande water heeft een pH van 8,5-9,2 en is daarmee beduidend hoger dan in het sediment. Een dergelijke pH is ook waargenomen in 2016, 2018 en 2019 en wordt gelinkt aan CO₂-opname als het gevolg van een grote productiviteit van algen/waterplanten (Witteveen + Bos, 2020). In de Achterplas en op locatie 4 toont het verloop een dalende gradiënt vanuit de toplaag, mogelijk als gevolg van dan de hogere pH in het oppervlaktewater.



Figuur 3.9 pH poriewaterprofielen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

DOC in de Voorplas toont sterke variatie in de profielen. Voor locatie 4 en 5 zijn de waarden hoger in de sliblaag en in de onderste helft van de zandlaag. Bij locatie 6 zijn de waarden niet hoger in de sliblaag, de geringe dikte van de sliblaag is hier de waarschijnlijke verklaring. In de oude lagen is DOC veel hoger bij locatie 6 ten opzichte van locatie 4 en 5. DOC in de Achterplas toont een profiel met hogere waarden bij diepere monsters (Figuur 3.10). Anorganisch koolstof (DIC; dat betreft CO₂ en (bi)carbonaten) volgt dit verloop maar dan met waarden oplopend tot 300 mg/L, zowel voor de Voor- als de Achterplas.

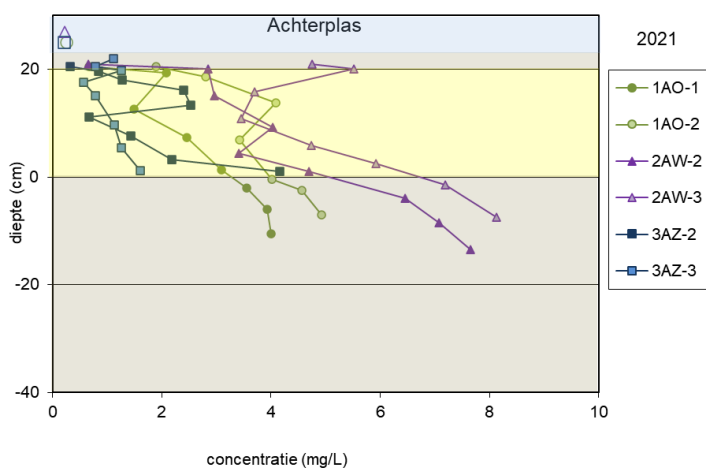
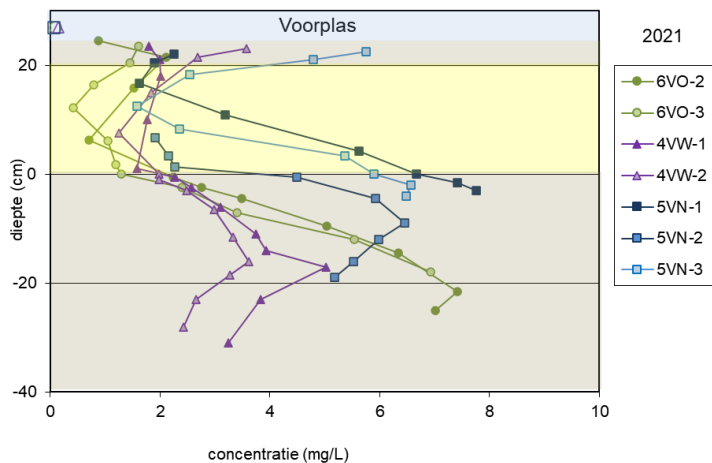


Figuur 3.10 DOC poriewaterprofielen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering.

Fosfor

Figuur 3.11 toont de poriewaterprofielen voor fosfor, gemeten met ICP-OES. Midden in de zandlaag zijn over het algemeen de laagste P concentraties gemeten. In de toplaag zijn hogere waarden gemeten, de hoogste waarden zijn echter gemeten in het oude slib. In de Voorplas is ook een daling zichtbaar in de veenlaag.

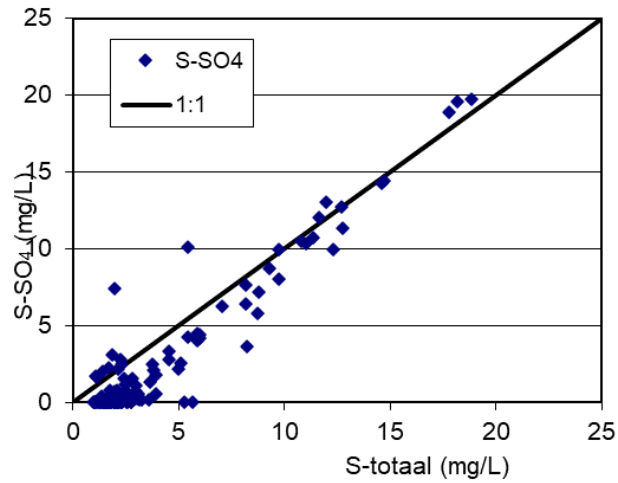
Locaties 1, 2 en 5 vertonen hogere P concentraties in de zandlaag, terwijl bij locatie 3, 4 en 6 de P concentraties lager blijven in de zandlaag. Dit duidt erop dat op locatie 3, 4 en 6 minder P wordt nageleverd aan de plassen. Op locatie 3 zit tot op grotere diepte veel slib en is de zandlaag dikker dan op de andere locaties, wat mogelijk een verklaring geeft voor de lagere P concentraties. Voor locatie 4 en 6 is dit te verklaren op basis van de aluminium toevoeging, die leidt tot P opname en dus lagere P concentraties rond het grensvlak (<3 mg P /L, terwijl locatie 1, 2 en 5 concentraties van 3-8 mg P /L hebben rond het grensvlak). De lagere concentraties rond het grensvlak leiden dan, door de opwaartse stroming als gevolg van kwel, tot lagere poriewaterconcentraties in de zandlaag. Doordat de P-concentraties in de plas (Figuur 3.11, blauwe achtergrond) lager zijn dan in het poriewater, kan door kwel een significante bijdrage aan de P-concentraties in de plas geleverd worden.



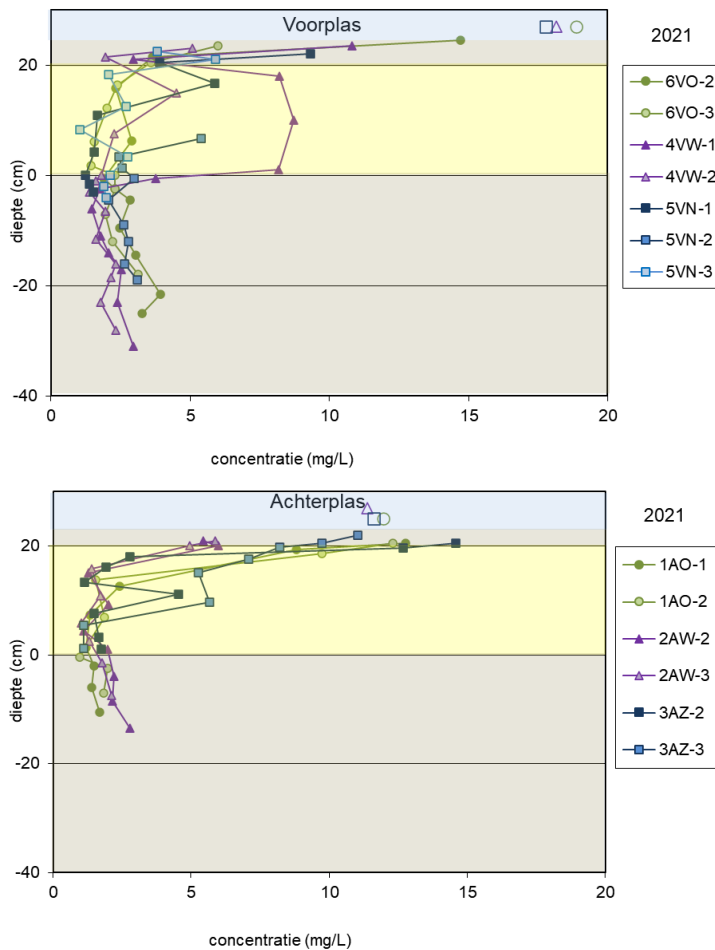
Figuur 3.11 totaal-P poriewaterprofielen (met ICP-OES). De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

Zwavel en ijzer

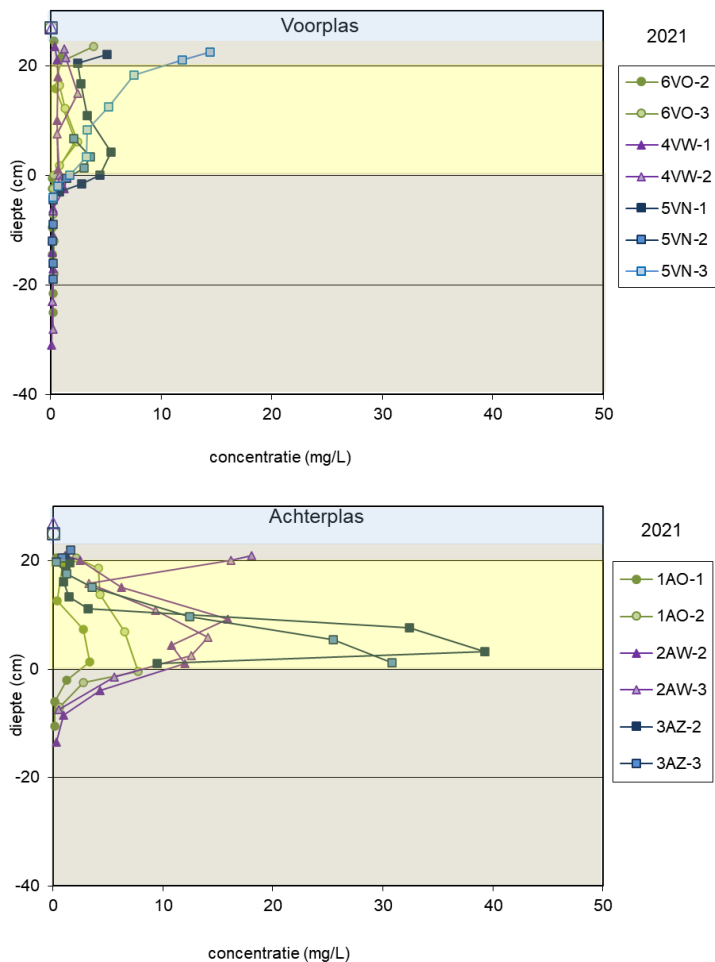
Het gemeten zwavel in het poriewater bestaat voornamelijk uit sulfaat en bijna alle data ligt dicht bij de 1:1-lijn voor SO_4 versus totaal S (Figuur 3.12). De hoogste concentraties zijn gemeten in de nieuwe sliblaag. Verder valt op dat de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater van de Voorplas duidelijk hoger zijn (wordt ook bevestigd door meerjarige monitoring data), maar dat de poriewaterprofielen gelijk zijn. Onder de sliblaag daalt de zwavelconcentratie snel in het poriewater van de zandlaag voor alle profielen behalve kolom 4VW-1 (Figuur 3.13). In kolom 4VW-1 is er in de zandlaag juist een piek in de zwavelconcentratie. Dit gaat ook gepaard met een lagere ijzerconcentratie (Figuur 3.14), terwijl de andere kolommen hogere ijzerconcentraties hebben in het onderste gedeelte van de zandlaag, wat duidt op sterk aerobe omstandigheden. De omstandigheden in de zandlaag van kolom 4VW-1 zijn blijkbaar aerob.



Figuur 3.12 S-totaal middels ICP-OES uitgezet tegen S-SO₄ middels ionchromatograaf



Figuur 3.13 Totaal-S (voornamelijk SO₄, zie Figuur 3.12) met ICP-OES. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering.



Figuur 3.14 Totaal-Fe poriewaterprofielen (met ICP-OES). De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering.

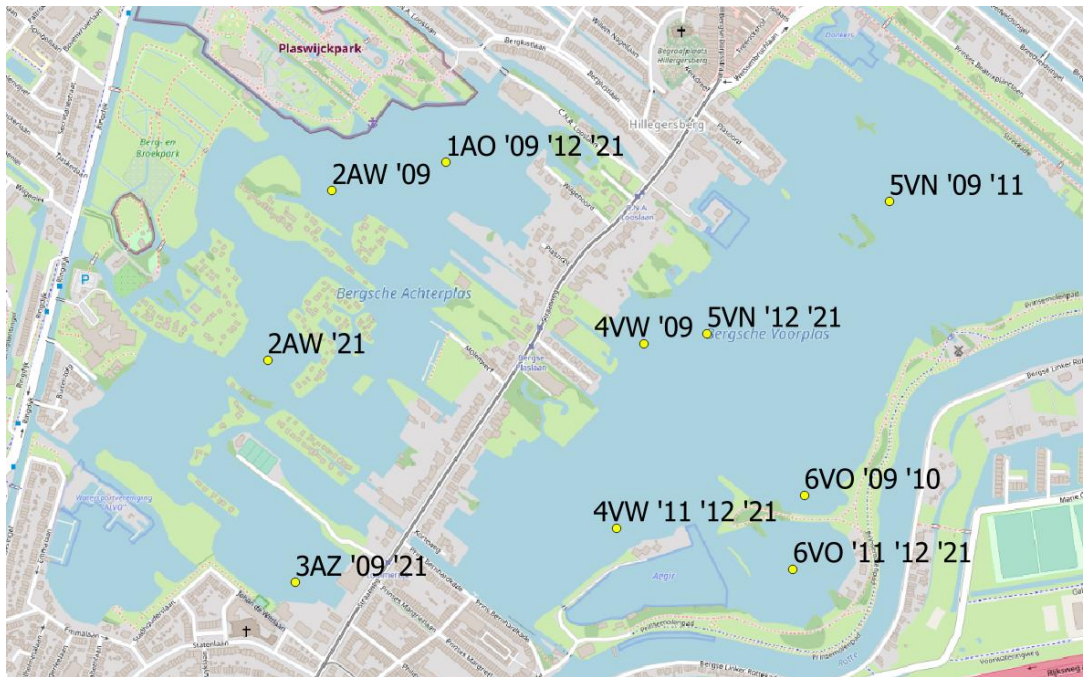
Aluminium

De aluminiumconcentraties in het poriewater liggen rond de detectielimiet van de ICP-OES. Het toegevoegde aluminium blijkt een stabiele vaste stof: de concentraties op de locaties waar PAC is toegediend liggen op gelijk niveau met de locaties waar alleen zand is aangebracht. Er is geen aluminium in oplossing aanwezig.

4 De data van 2021 in de tijd bekeken

4.1 De beschikbare data voor de verschillende locaties

Er is in de afgelopen jaren op verschillende tijdstippen in het jaar, maar ook op verschillende locaties gemeten (Figuur 4.1). Bovendien zijn er in de Voorplas metingen van voor het afdekken en na het afdekken. De meetpunten zijn in de tijd verlegd, bij locatie 2 om geen dikke sliblaag te steken bijvoorbeeld. Het interpreteren van trends vraagt daarom enige voorzichtigheid.



Figuur 4.1 Alle meetlocaties in de Bergse Plassen over de verschillende jaren. Het jaar 2009 in de Voorplas betreft de bemonstering voor afdekken.

Sommige jaren zijn twee kolommen volledig bemonsterd, soms slechts één kolom of een beperkt aantal analyses op het poriewater op de tweede kolom. Een overzicht van de beschikbare data per locatie is weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Beschikbare data per locatie. PW = poriewater, VS = vaste stof, cijfers geven aantal bemonsterde kolommen per locatie aan

locatie ^a	nov '09	sept '10 ^b	okt '11	juni '12 ^b	Juni '21
1AO	PW ^c			2x PW VS	2x PW 2x VS
2AW	PW ^c VS				2x PW 2x VS
3AZ	PW ^c				2x PW 2x VS
4VW	PW VS		2x PW 2x VS	2x PW VS	2x PW 2x VS
5VN	PW ^d VS		2x PW 2x VS	2x PW VS	2x PW 2x VS
6VO	PW VS	2x PW VS	2x PW 2x VS	2x PW VS	2x PW 2x VS

^a Locatiecodes zijn te herleiden tot: A=Achterplas, V=Voorplas, O=oost, W=west, N=noord.

^b September 2010 en juni 2012 zijn op de betreffende locaties twee kolommen bemonsterd. De eerste kolom is volledig geanalyseerd (zowel poriewater als vaste stof), van de tweede kolom is alleen de pH, Eh en de elementen van de ICP-OES in het poriewater beschikbaar.

^c Van locatie 1AO zijn in 2009 ICP-OES analyses op het poriewater beschikbaar, de overige elementen en de vaste stof gehalten zijn afkomstig van locatie 2AW. Locatie 3AZ, 2AW en 1AO hebben dezelfde behandeling gehad: eerst een dunne laag baggeren en daarna met zand afdekken.

^d Op de monsters van locatie 5VN is in 2009 alleen een ICP-OES analyse op het poriewater uitgevoerd. In de figuren zijn de data van 5VN aangevuld met de gegevens van 4VW in 2009. De karakteristieken van kolom 4VW en 5VN leken erg op elkaar, de locaties zijn gescheiden vanwege de PAC-toediening

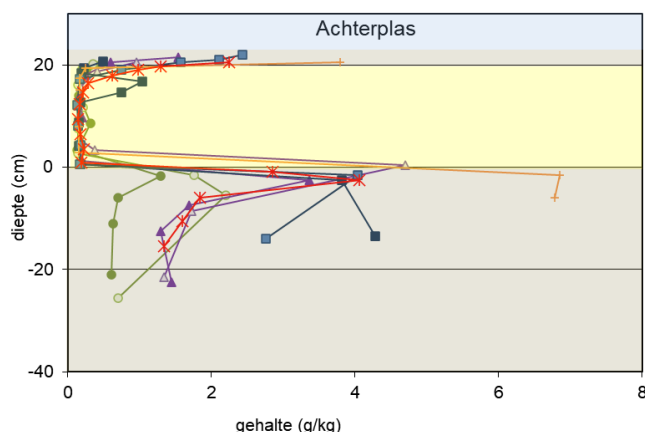
In de hierna volgende figuren zijn de gegevens per locatie weergegeven, hiervoor is een gemiddelde berekend uit beide beschikbare profielen indien nodig. Voor de weergave van de figuren is wederom gekozen voor een zandlaag van 20 cm. Nadere informatie over de weergave van de figuren staat in het kader in §3.2.

4.2 Achterplas – verloop in de tijd

4.2.1 Sedimentprofielen

In de Achterplas zijn de totaalgehalten in de kolommen in de tijd nagenoeg gelijk voor alle stoffen (ook stoffen zoals C, S en Mn). In de toplaag heeft de stijging van de P-gehalten te maken met de nieuwe sliblaag. De P-gehalten in het nieuwe slib geven geen indicatie dat ze in de loop van de tijd stijgen. Hooguit wordt de sliblaag dikker. Voor locatie 3AZ-2 is er in de zandlaag een piek te zien. Zoals eerder gemeld, komt dit door een sliblaagje in het zandpakket door verstoring van de waterbodembodem. In de diepere lagen varieert in de tijd, maar ook tussen de kolommen. Daardoor lijkt dit meer afhankelijk van zeer lokale verschillen dan van de tijd. Mogelijk is de mate waarin de oude toplaag is weggebaggerd een oorzaak van deze lokale verschillen.

Sedimentprofiel P

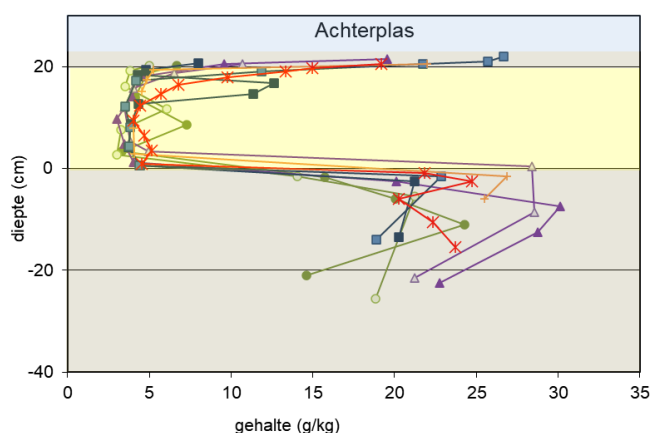


Dikte

zandlaag

1AO-1 '21	16,5 cm
1AO-2 '21	15,5 cm
2AW-2 '21	20,5 cm
2AW-3 '21	24 cm
3AZ-2 '21	48 cm
3AZ-3 '21	43 cm
1AO '12	31,5 cm
2AW '09	34 cm

Sedimentprofiel Fe



Dikte

zandlaag

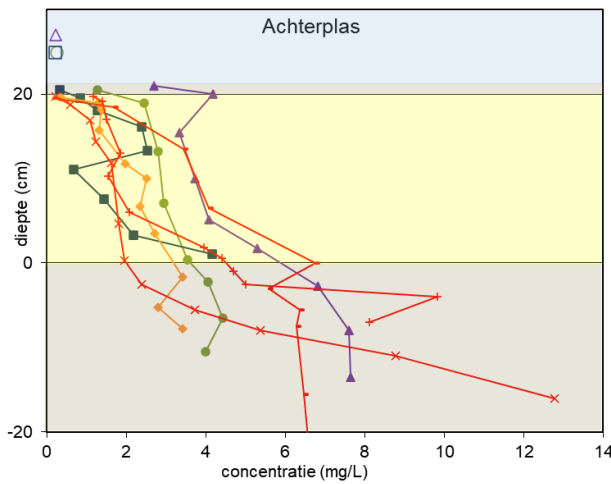
1AO-1 '21	16,5 cm
1AO-2 '21	15,5 cm
2AW-2 '21	20,5 cm
2AW-3 '21	24 cm
3AZ-2 '21	48 cm
3AZ-3 '21	43 cm
1AO '12	31,5 cm
2AW '09	34 cm

Figuur 4.2 P- en Fe-gehalten (g/kg) in de profielen van de Bergse Plassen. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte.

4.2.2 Poriewaterprofielen

De P-poriewaterprofielen in de Achterplas tonen weinig verandering in de tijd (Figuur 4.3). Voor locatie 1 en 2 zijn de P-concentraties licht verhoogd in 2021 ten opzichte van de eerder gemeten waarden. Voor locatie 3, zijn de waarden vergelijkbaar, maar dieper in de zandlaag is er juist sprake van een daling. Dit gaat ook gepaard met verhoogde ijzerconcentraties, die bij locatie 1 en 2 niet werden waargenomen, maar wel in de kolommen van 2009 en 2012 (Figuur 4.4). Het lijkt er op dat die verhoogde ijzerconcentraties in de zandlaag vooral optreden als de zandlaag dik genoeg is (ca. 20 cm). Of de relatief hoge concentraties in 1AO en 2AW (maar nog wel vergelijkbaar met 3AZ-2009) nu gerelateerd kunnen worden aan het ontbreken van de verhoogde ijzerconcentraties in het zand, is lastig vast te stellen.

P poriewater profielen

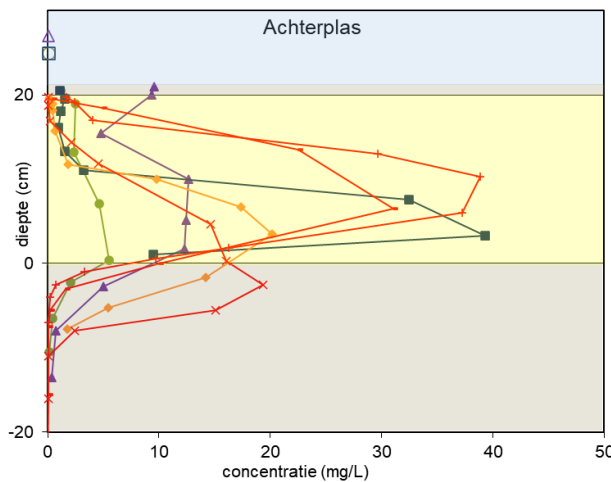


dikte

zandlaag

	16 cm
1AO '21	23 cm
2AW '21	45,5 cm
3AZ '21	28 cm
2012-1AO	33 cm
2009-1AO	32 cm
2009-2AW	30 cm
2009-3AZ	

Figuur 4.3 P concentraties in de profielen van de Bergse Achterplas. De data uit 2021 is voor de twee bemonsterde per kolommen steeds vergelijkbaar en daarom gemiddeld. Voor de kolommen uit 2009 en 2012, zie ook Figuur 4.1 voor de locaties. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte



dikte

zandlaag

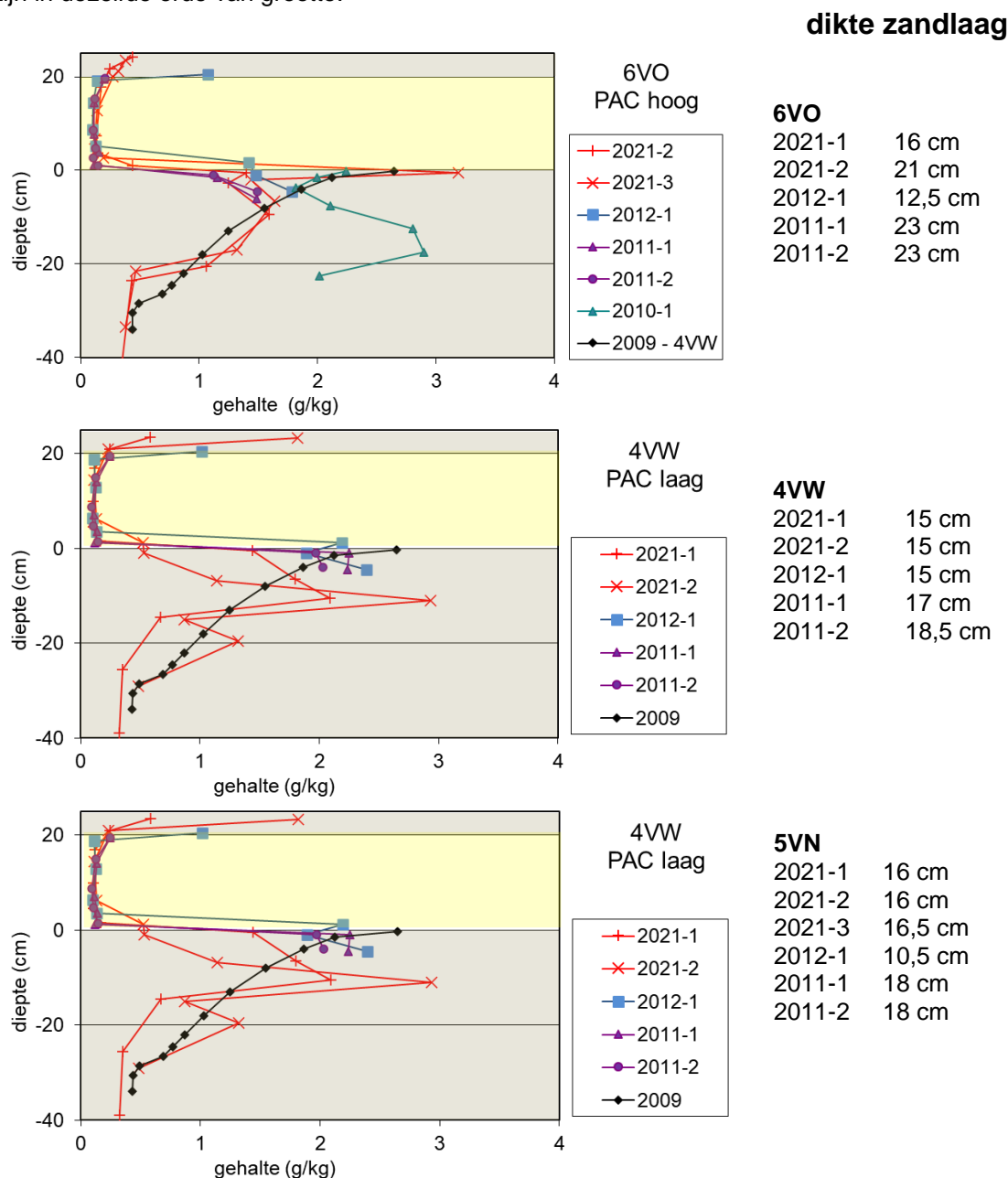
	16 cm
1AO '21	23 cm
2AW '21	45,5 cm
3AZ '21	28 cm
2012-1AO	33 cm
2009-1AO	32 cm
2009-2AW	30 cm
2009-3AZ	

Figuur 4.4 Fe-concentraties in de profielen van de Bergse Achterplas. De data uit 2021 is voor de twee bemonsterde per kolommen steeds vergelijkbaar en daarom gemiddeld. Voor de kolommen uit 2009 en 2012, zie ook Figuur 4.1 voor de locaties. De dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte.

4.3 Voorplas – verloop in de tijd

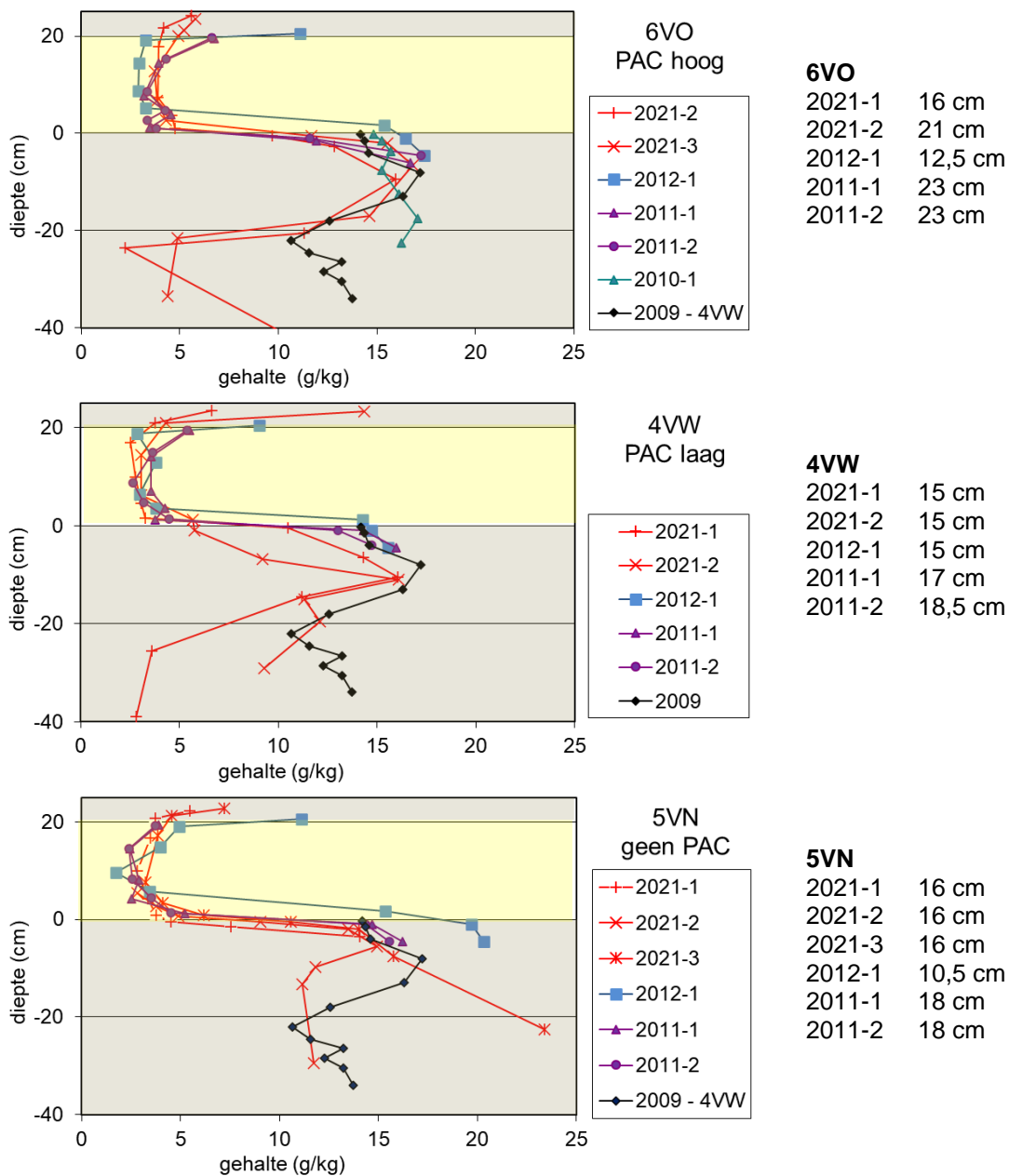
4.3.1 Sedimentprofielen

De sedimentgehalten voor totaal-P en totaal Fe geven overall dezelfde trend: hoger in de oude en nieuwe sliblaag en lager in de zand en veenlaag (Figuur 4.5). In de tijd worden er geen veranderde patronen waargenomen. De nieuwe sliblaag is dikker, maar de gehalten zijn in dezelfde orde van grootte.



Figuur 4.5 P-gehalten in de profielen van de Bergse Voorplas. De dikte van de zandlaag van de verschillende kolommen is aan de rechterzijde weergegeven (in 2009 en 2010 geen zandlaag aanwezig). In de plot is de dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

dikte zandlaag

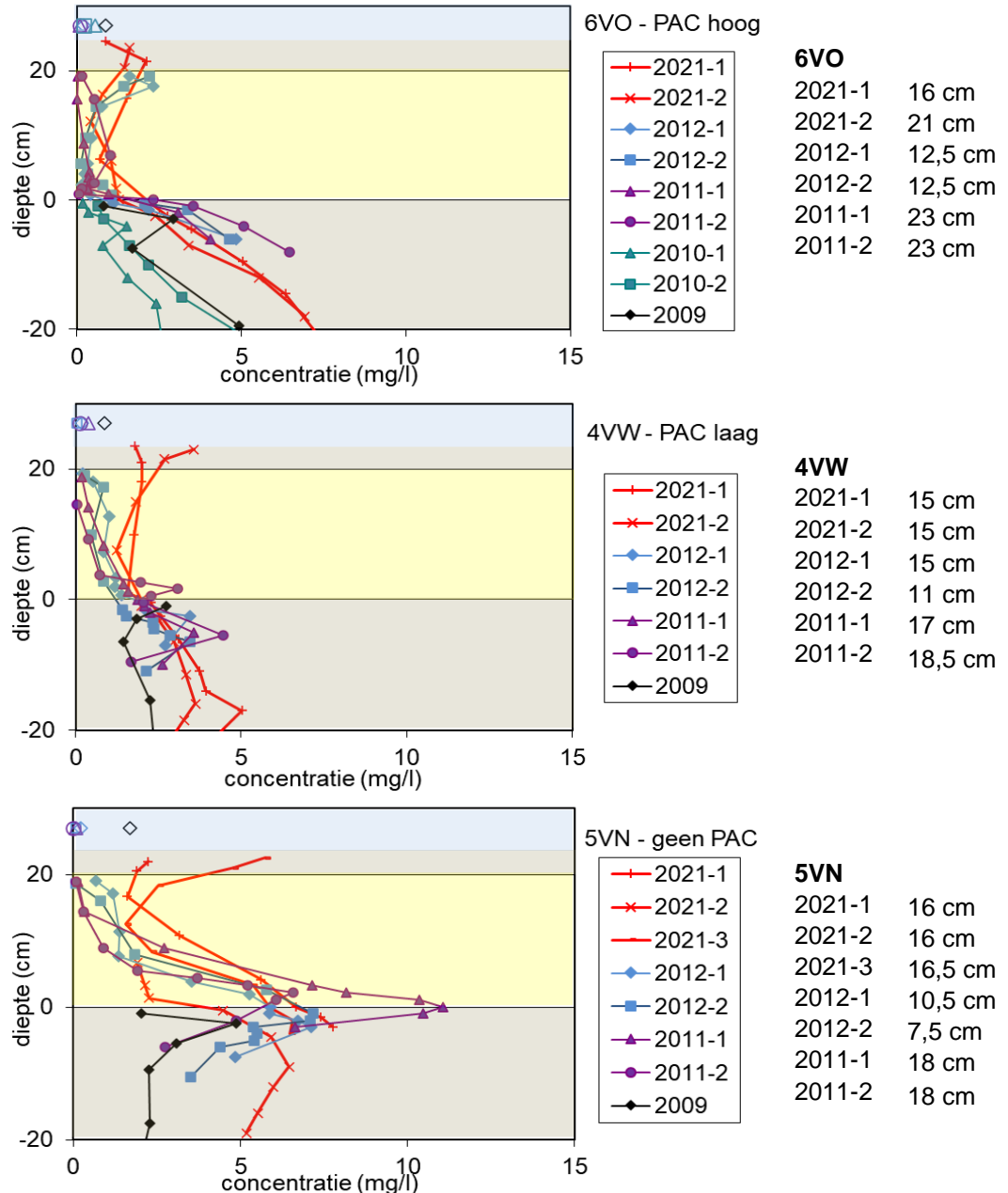


Figuur 4.6 Fe gehalten in de profielen van de Bergse Voorplas. De dikte van de zandlaag van de verschillende kolommen is aan de rechterzijde weergegeven (in 2009 en 2010 geen zandlaag aanwezig). In de plot is de dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

4.3.2 Poriewaterprofielen

Hoewel er weinig verschillen in de tijd zijn waargenomen voor totaalgehalten, zijn er wel degelijk verschillen in het poriewater. Het valt op dat voor de P concentraties zowel boven in de zandlaag, als rondom het grensvlak zand-oud slib een verhoging heeft plaatsgevonden tussen 2012 en 2021. In 6VO (hoge PAC-toevoeging) zijn de concentraties gestegen van gemiddeld minder dan 1 mg/l naar ca. 1,5 mg/l in 2021. Voor 4VW (lage PAC) en 5VN (geen PAC) zijn de concentraties vooral hoger in het bovenste deel van de zandlaag. Verder valt op dat de P-concentraties op het grensvlak zand-oud slib nog steeds aanzienlijk hoger zijn op de locatie zonder PAC: ca. 5 mg/l op 5VN vs 3 mg/l in 4VW en 2 mg/l in 6VO.

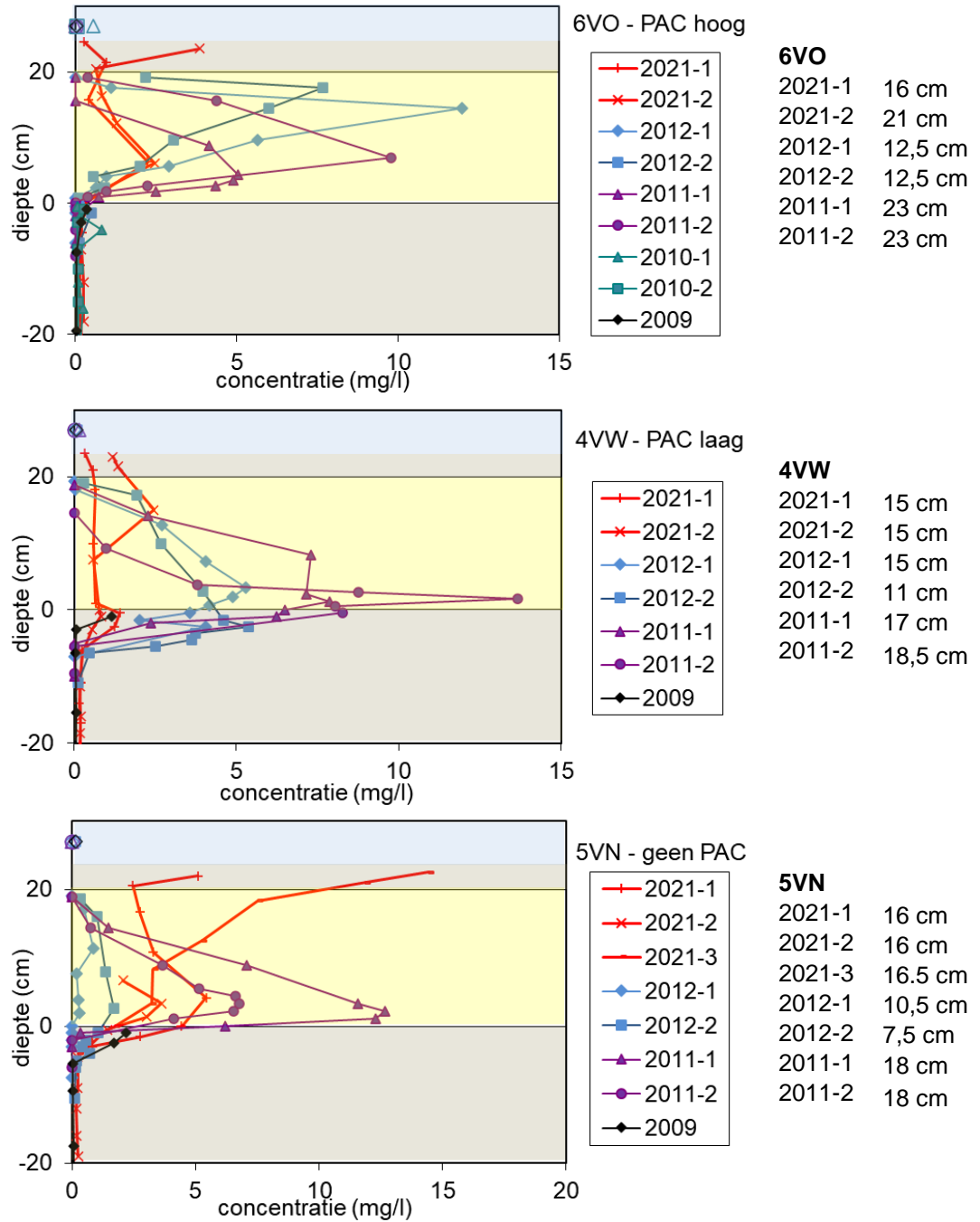
dikte zandlaag



Figuur 4.7 P concentraties in de profielen van de Bergse Voorplas. De dikte van de zandlaag van de verschillende kolommen is aan de rechterzijde weergegeven (in 2009 en 2010 geen zandlaag aanwezig). In de plot is de dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand// oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

IJzer toont lagere concentraties in 2021 dan in eerdere metingen (Figuur 4.8). Het kenmerkende profiel met hoge opgeloste Fe-concentraties in de zandlaag is in 2021 nauwelijks terug te zien.

dikte zandlaag



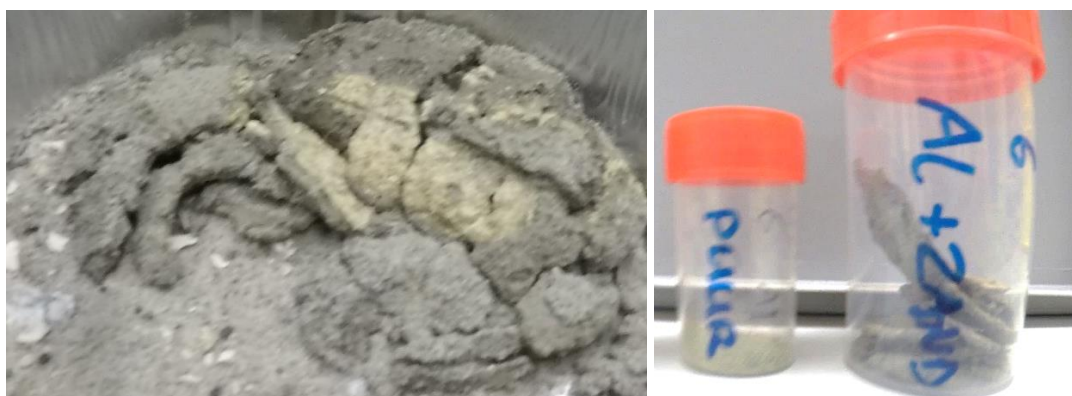
Figuur 4.8 Fe-concentraties in de profielen van de Bergse Voorplas. De dikte van de zandlaag van de verschillende kolommen is aan de rechterzijde weergegeven (in 2009 en 2010 geen zandlaag aanwezig). In de plot is de dikte van de zandlaag is genormaliseerd op 20 cm (0-20 cm), de grens zand // oud slib bevindt zich op 0 cm diepte. Locatie 6VO – hoge PAC dosering; 4VW – lage PAC dosering

5 Restcapaciteit toeslagstof aluminium

Naast de reguliere monitoring is in deze studie ook gekeken naar de restcapaciteit. Bij het kiezen van de hoeveelheid toeslagstof (Bakker et al., 2011) was beoogd dat de binding minstens 10 jaar tot sterk gereduceerde concentraties in de zandlaag zou moeten leiden. Hoofdstuk 4 laat zien dat er na 10 jaar inderdaad nog verlaagde concentraties in de zandlaag zijn, maar dat er wel een stijging is ten opzichte van 2012. De vraag die overblijft is hoeveel fosfaat er in die 10 jaar is geadsorbeerd en hoeveel er nog geadsorbeerd wordt als er nieuw fosfaat 'langskomt'. Deze aspecten zijn onderzocht in twee proeven.

5.1 Materiaal en methoden adsorptie aluminium

Op locatie 6VO, de locatie met hoge PAC, zijn 3 extra kolommen gestoken, waarvan de grenslagen gedroogd zijn op 40°C. Het drogen was nodig omdat in het vochtige materiaal het aluminiumhydroxide niet zichtbaar was. Na droging krijgt het aluminiumhydroxide een licht gele kleur. Om zo min mogelijk verstoring te veroorzaken is bij relatief lage temperatuur gedroogd. Hierna is de geel uitgeslagen aluminium laag afgeschraapt van het grensvlak (hierna aangeduid als 'puur') en zijn de plakkaten met aluminium en zand (verder aangeduid als 'Al+zand') bewaard (Figuur 5.1). Dit materiaal is handgemalen om het te homogeniseren. Daarna is het gebruikt voor twee experimenten.



Figuur 5.1 links: uiterlijk grensvlak na drogen, het geel gekleurde materiaal is de aluminiumlaag; rechts: afgeschraapt geel materiaal (puur) en plakkaten aluminium met zand (Al + zand).

5.1.1 Experiment 1 – bepalen gehalte aluminium en gebonden fosfaat

In het eerste experiment wordt door middel van een sequentiële extractie bepaald in welke vormen aluminium aanwezig is in de samples en hoeveel fosfor hieraan gebonden is. Middels ammoniumoxalaat (57% 0.2 M ammonium oxalaat en 43% 0.2M oxaalzuur, pH ~ 3.0) wordt aluminium of ijzer gebonden fosfor geëxtraheerd (Uusitalo en Tuhkanen, 2000). Hiervoor is 15 mL ammoniumoxalaatoplossing toegevoegd aan ongeveer 200 mg gemalen sediment, dit wordt vervolgens 2 uur geschud op 200 rpm en middels aluminiumfolie afgeschermd van licht om extra extractie te voorkomen. Na de extractie worden de samples 8 minuten gecentrifugeerd op 2800 rpm. De vloeistof wordt gedecanteerd in een spuit, gefilterd op 0,45 µm en geanalyseerd middels ICP-OES.

Om het overige P/Al/Fe te analyseren, wordt het sediment dat is achtergebleven in de centrifugebuis vervolgens gedroogd op 40 °C en geanalyseerd middels ICP-OES na ontsluiting met HF. De filters werden gedroogd, maar bij terugwegen bleek de massa hiervan verwaarloosbaar en daarom is alleen het sediment in de centrifugebuis geanalyseerd.

Ter controle worden ook totaalanalyses uitgevoerd waarbij het gedroogde sediment zonder extractiestap wordt geanalyseerd middels ICP-OES na ontsluiting met HF.

5.1.2 Experiment 2 – sediment blootstellen aan oplopende fosfor concentraties

Het doel van dit experiment is om te achterhalen hoeveel fosfor er nog binden kan aan aluminium. In dit experiment is gekozen voor een aanpak waarin we met behulp van schudproeven een 'batch' aluminiumhydroxide blootstellen aan steeds hogere concentratie fosfor. Daarmee voorkomen we dat we voor elk punt op de een adsorptie-isotherm een andere batch moeten gebruiken, waardoor variatie niet alleen door de hoeveelheid fosfaat, maar ook door het materiaal zelf wordt veroorzaakt.

Als achtergrond water wordt 10 mM HEPES buffer gebruikt zodat er geen grote variatie in pH tijdens het experiment zal plaatsvinden. De HEPES buffer is vervolgens op pH 8 gebracht, vergelijkbaar met de eerdere experimenten in 2010 (Bakker et al., 2010). Om het poriewater van de Bergse Plassen te imiteren is gekozen voor een ionsterkte van 4 mM door middel van 4 mM NaHCO₃, aangezien dit niet reactief is wel ionen zijn die van nature hoge concentraties hebben in de Bergse Plassen. Van de HEPES en NaHCO₃ oplossing wordt 10 mL toegevoegd aan ongeveer 200 mg sediment. Dit wordt vervolgens 48-72 uur geschud op 400 rpm en daarna 8 min gecentrifugeerd op 2800 rpm. Hierna wordt 1 mL gepipetteerd en hierop de pH gemeten en middels een spectrofotometer wordt de fosforconcentratie bepaald volgens de methode van Koroleff (1983). Daarna wordt een Na₂HPO₄-oplossing gemaakt in dezelfde HEPES en NaHCO₃ oplossing, waarvan 1 mL toegevoegd aan de waterfase en wordt de procedure herhaald vanaf het schudden. Deze procedure wordt herhaald tot de concentraties in de waterfase zijn toegenomen tot ongeveer 8 mg P/L, zodat de fosfor binding in de range van fosforconcentratie die in de Bergse Plassen voorkomen in kaart gebracht wordt.

Omdat de pH van de standaard-adsorptieproef (7,5-8) die voor het afdekken is uitgevoerd (Bakker et al., 2011), afwijkt van de pH op het grensvlak zand-oud slib (6,5-7) zijn de proeven doorgezet bij een lagere pH. De verwachting is dat bij een lagere pH meer fosfaat wordt gebonden. De pH is verlaagd met 0,5-1,0 pH punt middels toevoeging van 100 µL 0,43M HNO₃. Hierna wordt opnieuw gemeten, hoeveel opgelost P er aanwezig is en daarna wordt opnieuw verschillende keren P toegevoegd.

5.2 Resultaten bepalingen restcapaciteit

Voor de resultaten van de restcapaciteit wordt de term 'puur' gebruikt om te verwijzen naar het afgeschraapte materiaal en de term 'Al + zand' voor het de plakaten (zie § 5.1).

5.2.1 Experiment 1 – bepalen gehalte aluminium en gebonden fosfaat

Tabel 5.1 aluminiumgehalten in de twee extractiestappen. Al-oxalaat is het extraheerbaar aluminium met oxalaat en Al-overig is het resterende aluminium met een HF-destructie. De kolom 'Al op basis van Ba' toont de hoeveelheid aluminium die verklaard kan worden op basis van de fractie barium (Zie ook § 3.2.1)

monster	type	Al - oxalaat (mg Al/kg ds)	Al - overig (mg Al/kg ds)	Al op basis van Ba (mg Al/kg ds)
1	Al+zand	20315,4	41780,4	23833,2
2	Al+zand	21326,0	41258,9	22352,7
3	Al+zand	19691,7	42527,0	22949,3
5	puur	40644,0	67288,9	23862,7
6	puur	41555,1	62074,1	24396,0

De pH bleef tijdens de extractie met oxalaat ongeveer 3,5 en extraheerde 30-40% van het aanwezige aluminium (Tabel 5.1). De complete data van de extractie staat in bijlage 3. Tabel 5.1 toont de hoeveelheid aluminium die in de twee stappen is geëxtraheerd. De gecontroleerde totaalgehalten (dus zonder eerste een oxalaatextractie uit te voeren; niet in de tabel) tonen een gemiddelde afwijking van 5 % ten opzichte van de som van twee extracties voor de Al+zand behandeling. Dit wordt veroorzaakt door inweegfouten. Als in de oxalaat stap al het toegevoegde aluminium zou worden geëxtraheerd, dan zou al het aluminium in Al-overig verklaard kunnen worden aan de hand van het bariumgehalte. Echter, de waarden voor Al-overig zijn groter dan de hoeveelheid aluminium die op basis van bariumgehalten wordt geschat. De conclusie is dus dat niet alle toegevoegde aluminiumhydroxiden worden geëxtraheerd met oxalaat.

Tabel 5.2 toont een samenvatting van de extractiedata met oxalaat. Van het gebruikte sediment blijkt 7-16,5% van de massa aluminiumhydroxiden en aluminium-gebonden fosfor. Ongeveer 20% van de extractie waren andere elementen (voornamelijk Si, in mindere mate S en Fe). Bij het pure materiaal werd twee keer zo veel materiaal geëxtraheerd met oxalaat als bij de zandplakaten. Voor de fosfor/aluminium-verhoudingen was er geen verschil tussen puur en Al + zand. In het geëxtraheerde deel (de aluminiumhydroxiden) werd 115 ± 5 g P / kg Al gevonden. Voor het overige deel (deels aluminiumsilicaten, deels toegevoegd aluminiumhydroxide, dat niet werd geëxtraheerd met de oxalaatextractie) werd ongeveer 24 g P / kg Al gevonden

Tabel 5.2 data aluminium gebonden fosfor in sediment Bergse Voorplas

monster	type	Geëxtraheerde massa (inweeg)	extractie g P/ kg Al	Overig g P/ kg Al
1	Al+zand	7,0%	116,8	25,4
2	Al+zand	7,5%	114,7	23,5
3	Al+zand	7,6%	118,1	24,1
5	Puur	14,7%	114,9	25,9
6	Puur	16,5%	111,8	24,0

5.2.2 Experiment 2 – sediment blootstellen aan oplopende fosfor concentraties

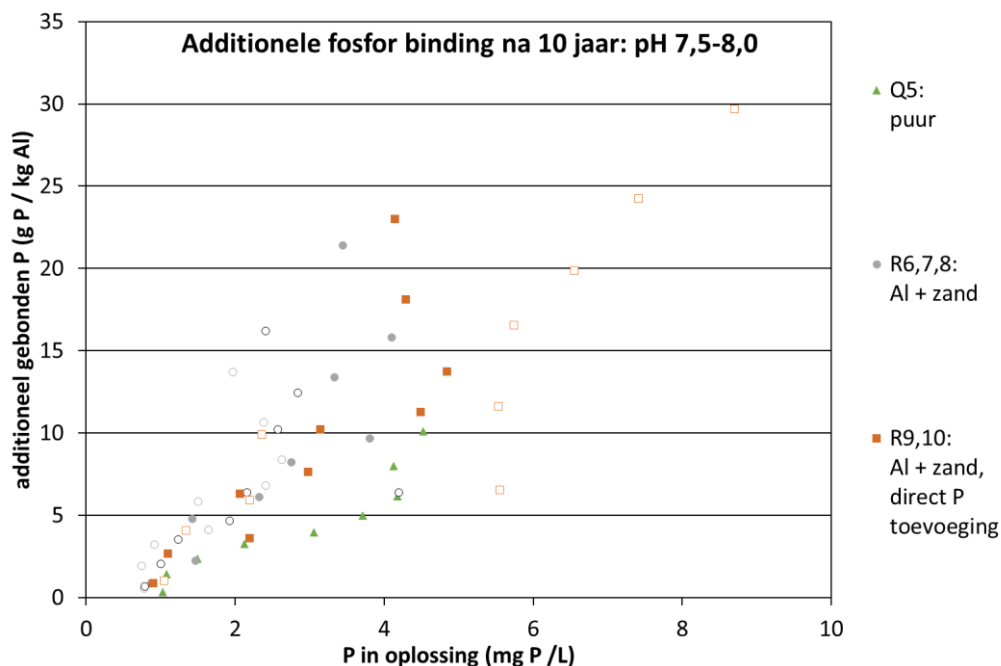
Vervolgens is het materiaal, waar dus ongeveer 115 g P / (kg extraheerbaar Al) (zie Tabel 5.2) reeds aan gebonden is, blootgesteld aan in concentratie oplopende fosfaatoplossingen. Hierbij zijn de volgende behandelingen gebruikt:

- Q5: puur materiaal, eerste oplossing bevat geen fosfaat;
- R6, R7, R8: triplo “Al + zand”, eerste oplossing bevat geen fosfaat;
- R9, R10: duplo “Al + zand”, eerste oplossing bevat wel fosfaat.

In de behandelingen die starten zonder fosfaat zal dus in de eerste batch desorptie plaatsvinden.

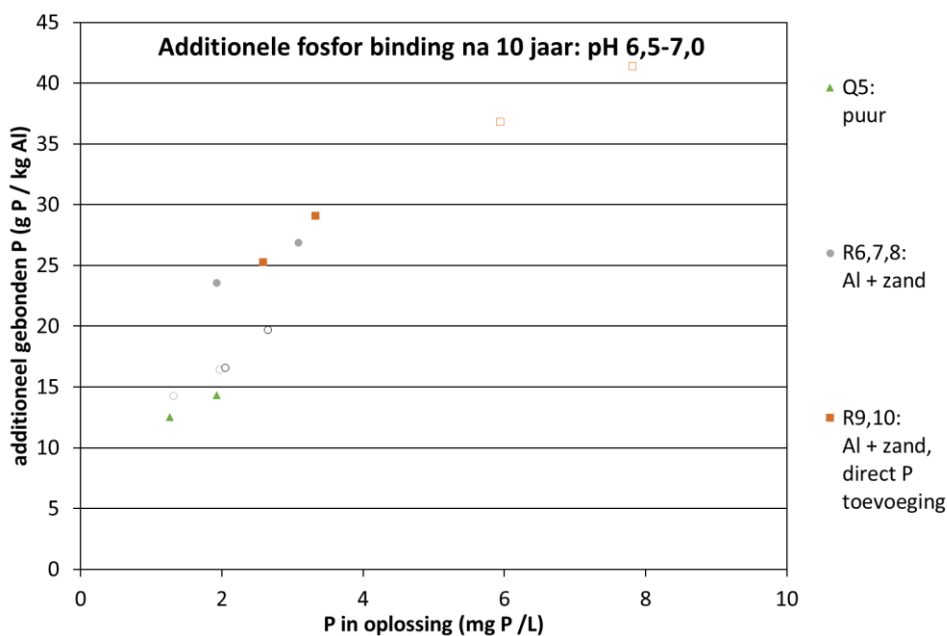
Elke keer voordat een dosis fosfaat werd toegevoegd, is de fosfaat concentratie in oplossing gemeten. Deze concentratie was dan lager dan toegevoegde hoeveelheid fosfaat en op basis hiervan is bepaald hoeveel fosfaat aan het sediment werd gebonden. Uit het verschil tussen het toegevoegde fosfaat en het gemeten fosfaat in oplossing is het gebonden fosfaat bepaald. Dit gebonden fosfaat is uitgedrukt in mg P en gecompenseerd voor de hoeveelheid extraheerbaar aluminium die in het sample aanwezig is (op basis van Tabel 5.2). De resultaten van deze experimenten staan in Figuur 5.2.

De resultaten laten zien dat er nog steeds fosfor gebonden wordt door dit sediment in het concentratiegebied voor fosfaat wat ook in de Bergse Plassen wordt gemeten (0-10 mg P/L). De hoeveelheid fosfor die in dit realistische concentratiegebied additioneel wordt gebonden bedraagt 0-25 g P / kg Al.



Figuur 5.2 Additionele fosfor binding in Bergse Plassen sediment (aluminium laag) bij oplopende fosfaatconcentraties bij pH 7,5-8,0.

Vervolgens is met hetzelfde materiaal bij een lagere pH opnieuw het experiment uitgevoerd. De resultaten staan in Figuur 5.3 en tonen een hogere P-binding dan bij de hogere pH.



Figuur 5.3 Additionele fosfor binding in Bergse Plassen sediment (aluminium laag) bij oplopende fosfaatconcentraties bij pH 6,5-7,0.

6 Discussie

Tien jaar de bodem bedekt met zand en aluminium als toeslagstof in de Bergse Voorplas en twintig jaar de bodem bedekt met zand in de Bergse Achterplas. In dit hoofdstuk wordt hierop geëvalueerd aan de hand van twee vragen:

- Werkt de zandlaag (met of zonder PAC) nog als buffer tussen het oude slib en de waterkolom en is er verloop in de tijd zichtbaar?
- Draagt de zandlaag (met of zonder PAC) bij aan beperking van interne belasting van het oppervlaktewater?

Voordat we deze twee centrale vragen kunnen beantwoorden, zullen we eerst een aantal methodische discussiepunten bespreken.

6.1 Methodische discussiepunten

6.1.1 Is de hoeveelheid aluminium in de kolommen representatief?

Op basis van de Al/Ba ratio is berekend hoeveel van het totaal aluminium rondom de grenslaag toegevoegd aluminium is. Wanneer van de verschillende monsters een optelling wordt gedaan hoeveel aluminium is toegevoegd en dit wordt omgezet naar een dosering per m², kan dit worden vergeleken met de oorspronkelijke dosering van aluminium. In Tabel 6.1 staan de resultaten van deze berekening. Voor locatie 4.2 was het niet mogelijk de berekening uit te voeren, er werd te weinig aluminium terug gevonden. Voor locatie 4.1 werd 0.034 kg Al/m² terug gevonden, terwijl hier in theorie 0.066 kg Al/m² is toegevoegd. Op locatie 6 werd voor kolom 6.2 en 6.3 respectievelijk 0.130 en 0.158 kg Al/m² teruggevonden, terwijl hier 0.133 kg Al/m² is toegediend. In 2011 en 2012 worden vergelijkbare gehalten toegevoegd aluminium gevonden. Locatie 6 ligt in een afgeschermd kom; mogelijk is er tussen doseren en afzanden enig transport geweest van de aluminiumvlokken of kent de dosering wat variaties. Het effect van aluminium in de lage PAC-behandeling is mogelijk iets groter dan kolommen 4VW tonen.

Tabel 6.1 Teruggevonden aluminium in kolommen met Hoge PAC in Voorplas berekend op basis van het toegevoegde aluminium berekend met de Al/Ba ratio. Bij kolom 4.2 werd geen significante hoeveelheid aluminium teruggevonden.

	monster	g Al toegevoegd /kg ds	g droge stof (g ds)	g Al/m ²
6.2	228	10,70	64,16	87
	229	3,48	95,00	42 +
totaal op basis van kolom 6.2				130
6.3	262	6,50	100,29	83
	267	35,60	16,57	75 +
totaal op basis van kolom 6.3				158
4.1	248	0,13	177,86	3
	249	4,58	54,08	32 +
totaal op basis van kolom 4.1				34

6.1.2 Restcapaciteit toeslagstof aluminium

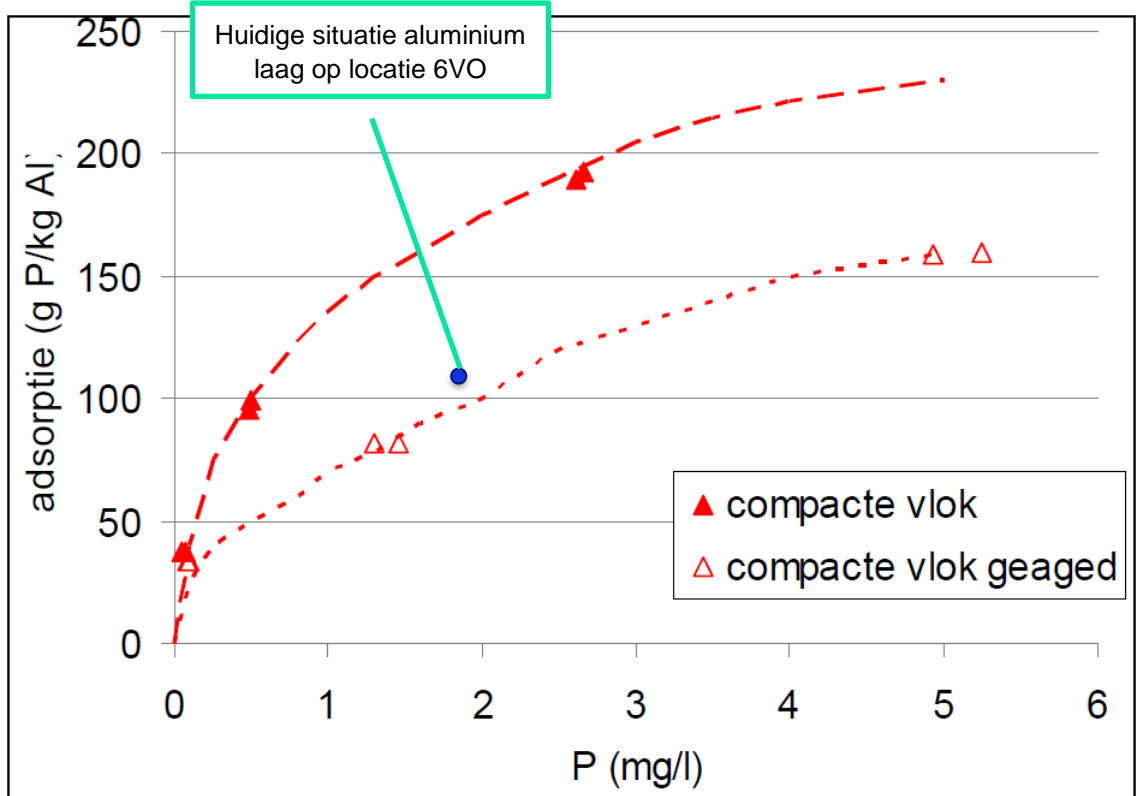
Nadere analyse van de aluminiumlaag in de Bergse Voorplas op locatie 6VO toont dat de aluminiumhydroxiden ongeveer 115 g P / kg Al hebben gebonden. Echter, in de extractie zijn niet alle aluminiumhydroxiden geëxtraheerd. Ook in de overige fractie wordt aluminium en fosfor gevonden. In de overige fractie heeft dit relatief minder fosfor, namelijk 25 g P / kg Al (Tabel 5.2). Dit heeft allereerst te maken met het natuurlijk aluminium in het zand. Dat zijn aluminiumsilicaten waaraan nauwelijks fosfaat adsorbeert. Op basis van bariumgehalten wordt er geschat dat 23 g Al/kg ds verklaard kan worden door van nature aanwezig aluminium (Tabel 5.1). Dan blijft er in de overige fractie toch nog zo'n 20 g Al/kg (Al+zand) en 40 g Al/kg (puur) over die niet natuurlijk is, maar die toch niet met de oxalaatextractie wordt vrijgemaakt. Als je er vanuit zou gaan dat alle P in de overige fractie is geadsorbeerd aan het toegevoegde aluminium kom je uit op een P/Al-ratio van ongeveer 50 g P / kg Al (Al+zand) en 40 g P/kg Al (puur). Dat is meer dan de eerder genoemde 25 g P/kg Al als je het totaalgehalte aluminium gebruikt, maar nog steeds veel minder dan wat in de oxalaatextractie wordt gemeten, namelijk 115 g P / kg Al.

Hiervoor zijn verschillende oorzaken denkbaar:

- in de extractie is meer fosfor geëxtraheerd dan aluminiumhydroxiden. Ofwel: fosfaten werden geëxtraheerd door het oxalaat, maar de aluminiumhydroxiden waaraan ze waren gebonden niet. De oxalaatextractie wordt uitgevoerd bij pH=3, dat zou invloed kunnen hebben op de mobiliteit van fosfaat al neemt het aantal bindingsplaatsen op aluminiumhydroxiden toe bij een lagere pH (tot ze niet meer stabiel zijn, maar dan vormen ze geen vaste fase meer).
- alleen de meest reactieve aluminiumhydroxiden, die het meeste fosfaat binden, zijn geëxtraheerd met oxalaat. De meer kristallijne vormen zijn beter bestand tegen de oxalaat extractie, maar ze zijn ook minder reactief voor binding van fosfaat.

Als er vanuit gegaan wordt dat al het fosfor in deze samples gebonden is aan aluminiumhydroxiden, oftewel de hoeveelheid die aan zand en ijzer gebonden is verwaarloosbaar is, dan zou de hoeveelheid fosfor ongeveer 76 g P / kg Al zijn voor het pure materiaal en 87 g P / kg Al voor het 'Al + zand'.

Op locatie 6VO werd rond de aluminiumlaag een gemiddelde poriewaterconcentratie van 1,8 mg P/L gemeten. Deze data kan dan vergeleken worden met de adsorptie-isotherm, zoals die in 2010 is gemaakt voor PAX-14 (een merk polyaluminiumchloride), voorafgaand aan toediening van het materiaal. De vlokken in 2010 waren een half jaar geaged bij 4°C. In Figuur 6.1 staat dit punt ingetekend in de adsorptie isotherm. Als de gevonden bindingscapaciteit zou dalen naar ca. 80 g P / kg Al, komt het punt net iets onder de adsorptie isotherm (geaged) uit. Overigens is het intekenen van dit punt afhankelijk van de geadsorbeerde hoeveelheid (115 g/kg), maar ook van de poriewaterconcentratie. De veldconcentratie is 1,8 mg/l, maar de initiële concentraties in de adsorptieproef liggen op ca. 0,9 mg/l (Figuur 5.2). dat zou het punt meer naar links verschuiven, waardoor het tussen de curves van wel en niet geagede vlokken in komt te liggen.



Figuur 6.1 Adsorptie isotherm voor toeslagstof PAX-14, welke is toegepast in Bergse Voorplas (Bakker et al., 2011). De blauwe punt markeert de metingen van dit jaar, met op de x-as de gemeten fosforporiewaterconcentratie en op de y-as de P-adsorptie.

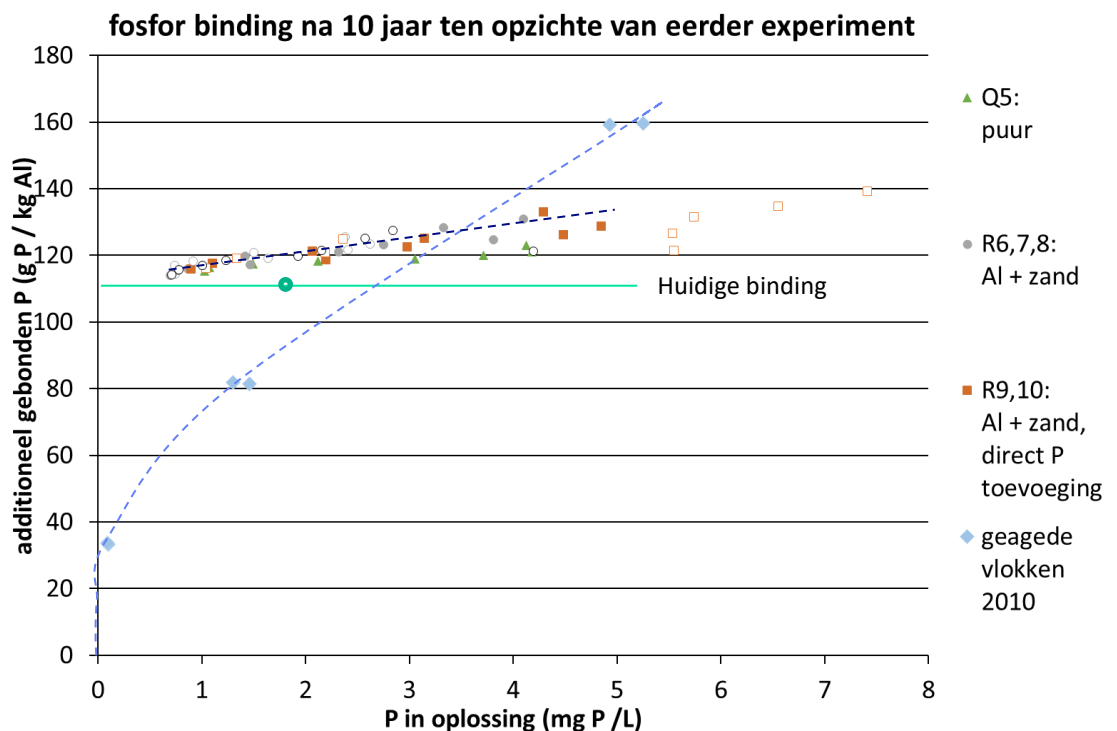
Het ingetekende punt in Figuur 6.1 ligt lager dan de oorspronkelijke adsorptie-isotherm voor de compacte vlok. Ten opzichte van de oorspronkelijke isotherm was er dus meer adsorptie van fosfor mogelijk op locatie 6VO. Het is goed denkbaar dat door ageing de capaciteit van het aluminium is afgenomen en er hierdoor minder fosfor wordt gebonden, het gemeten punt in 2021 ligt namelijk dicht bij de adsorptie isotherm die gemeten is voor geagede vlokken (in Figuur 6.1). Dit zou er dan op duiden dat als de het aluminium in de Bergse Plassen zich zo gedraagt als de gemeten vlokken in het experiment in 2010. Het punt ligt hoger dan stippellijn in Figuur 6.1, wat in lijn is met de hierboven beschreven overschatting van de adsorptie van fosfor aan aluminium in de extractie. Het aluminium lijkt dichtbij evenwicht of reeds in evenwicht met de fosforconcentratie in het poriewater. Er kan meer fosfor gebonden worden aan het aluminium, maar dat gaat onlosmakelijk samen met een behoorlijke stijging van de poriewaterconcentraties. Vanuit de theorie mag worden verwacht dat dit gebeurt conform de gestippelde curve in Figuur 6.1.

In Figuur 6.2 zijn de eerder bepaalde adsorptie-isothermen voor verouderde vlokken en de adsorptiedata van deze studie in één figuur geplot. Voor de adsorptie-isothermen voor het uit de Bergse Plassen geïsoleerde materiaal, wordt een additionele binding van 4-25 g P / kg Al gemeten. In de adsorptie-isothermen van 2010 loopt dit op van 50-100 g P / kg Al, wat dus fors meer is. Het lijkt er dus op dat het aluminiumhydroxide na 10 jaar een stuk minder reactief is geworden om nog extra P te kunnen binden mits het experiment een betrouwbaar resultaat geeft.

Daar zijn enkele kanttekeningen bij te plaatsen:

- de methode (bijvoorbeeld door tussentijds drogen, stapsgewijs toevoegen etc.) kan leiden tot gewijzigd adsorptiegedrag;
- de pH in dit experiment (7,5-8,2) ten opzichte van de pH in de Bergse Voorplas (deze is 6,2-6,7 rond het grensvlak). Bij een lagere pH wordt meer binding verwacht (Reitzel et al., 2013). Dit laatste gaan we nog onderzoeken in een aanvullend experiment;
- er wordt gemeten na 48 uur, terwijl in het veld veel meer tijd beschikbaar is. Mogelijk kan 'langzame' binding, vanwege transport naar het binnenste van een deeltje leiden tot meer binding dan in deze experimenten wordt aangetoond;
- de veldprofielen laten nog steeds een effect van toegevoegd aluminium zien op de P-poriewaterconcentraties ten opzichte van de profielen zonder aluminium. Ook dat duidt er op dat in die laag nog steeds poriewater wordt 'onttrokken' aan het poriewater.

Ondanks bovenstaande kanttekeningen lijkt het er toch op dat de resterende bindingscapaciteit van de aluminiumlaag zeer beperkt is.



Figuur 6.2 Adsorptie isotherm voor additionele binding, waarbij de data is geplot boven op de huidige binding (115 g P/kg Al) en in vergelijking met de oorspronkelijke toeslagstof PAX-14, welke is toegepast in Bergse Voorplas (Bakker et al., 2011). De blauwe punt markeert de metingen van dit jaar, met op de x-as de gemeten fosfor-concentraties en op de y-as de P-adsorptie.

6.2 Werkt de zandlaag met of zonder aluminium als buffer?

6.2.1 Totaalgehalten

In alle figuren is te zien dat de P-gehalten in de zandlaag zeer laag zijn (Figuur 3.6). Er is dus geen accumulatie van P opgetreden. Dit zou vooral mogelijk zijn als er ijzer oxideert in de zandlaag waaraan vervolgens fosfaat bindt. Als dit al plaatsvindt, gaat het niet om gehalten die tot meetbare stijging van totaal ijzer en fosfaat in het zand leiden.

Er is geen direct contact meer tussen het oude slib en de toplaag en ook na 20 jaar afzanden is geen indicatie dat de zandlaag niet meer intact is. Wel is er nieuw slib ontstaan bovenop het zand. Dit wordt gevormd door de primaire productie in de plas en meegevoerd slib in het inlaatwater. Ook nalevering vanuit het oude slib zou een factor kunnen zijn die zorgt voor accumulatie in het slib (zie 6.3). In de nieuwe sliblaag zijn de P-gehalten wel aanzienlijk hoger dan in de zandlaag en benaderen ze, zeker in de Achterplas, de gehalten van de oude slib, al is de spreiding groot in de Achterplas. In de Voorplas zijn, op kolom 4VW-2 na, de P-gehalten in de nieuwe sliblaag ongeveer een factor 2-3 lager dan in het oude slib.

De experimenten t.a.v. de restcapaciteit geven aan dat het oxalaat extraheerbare aluminium ca. 100 g P / kg Al bevat (zie 6.1.2 voor gedetailleerde discussie over de restcapaciteit). Bij een (porie)waterconcentratie van 1,8 mg/l ligt dat punt iets boven de adsorptie-isotherm van geagide (verouderde) aluminiumhydroxide. Als niet alleen naar het oxalaat-extraheerbaar aluminium wordt gekeken, maar naar totaal toegevoegd (dus alleen correctie voor het aluminium op basis van barium) komt de adsorptie op de lijn uit. Het aluminiumhydroxide heeft volgens verwachting gefunctioneerd

6.2.2 Poriewaterconcentraties

Ten aanzien van de poriewaterconcentraties kan worden gesteld dat de concentraties in het oude slib hoger zijn dan in de zandlaag (Figuur 3.11). In de Achterplas is de spreiding groot, maar inschatting van het verschil tussen concentraties in slib en zand levert een factor 1,5-2 op. In de voorplas is het verschil een factor 2-3, waarbij moet worden opgemerkt lagere concentraties in de zandlaag hebben. De concentraties in het nieuwe slib kennen ook een flinke variatie. Dit wordt mede veroorzaakt door de lage concentraties in het bovenstaande water maar ook door lagere concentraties in het zand. Als met een sampler vocht wordt opgezogen in de bovenste sliblaag is de kans groot dat er wat oppervlaktewater mee komt. Deze redenering suggereert dat de hoogst gemeten concentraties wellicht het meest 'waar' zijn.

6.2.3 Effect in de tijd?

In de Achterplas is het beeld onveranderd: de P-concentraties in de kolommen van 2021 wijken niet af van eerdere jaren. Wel lijkt de dikte van de zandlaag lijkt wel enig effect te hebben: hoe dikker de zandlaag hoe lager de concentraties. De concentratie in de zandlaag in de Achterplas is 2-4 mg/l. In de Voorplas lopen de concentraties in de zandlaag licht op in de profielen die ook met aluminium zijn behandeld.

Anders dan in 2011 en 2012 is er in 2021 nauwelijks een verhoogde Fe-concentratie in het poriewater van de zandlaag te zien. Alleen in 3AZ is nog wel een piek te zien in het onderste deel van zandlaag (Figuur 4.4). Voor de hoge PAC-behandeling (locaties 6VO) van ca. 0,5 naar 1 mg/l, voor de lage PAC-behandeling van ca. 0,8 naar 1,5 mg/l (Figuur 3.7).

6.2.4 Naar de toekomst?

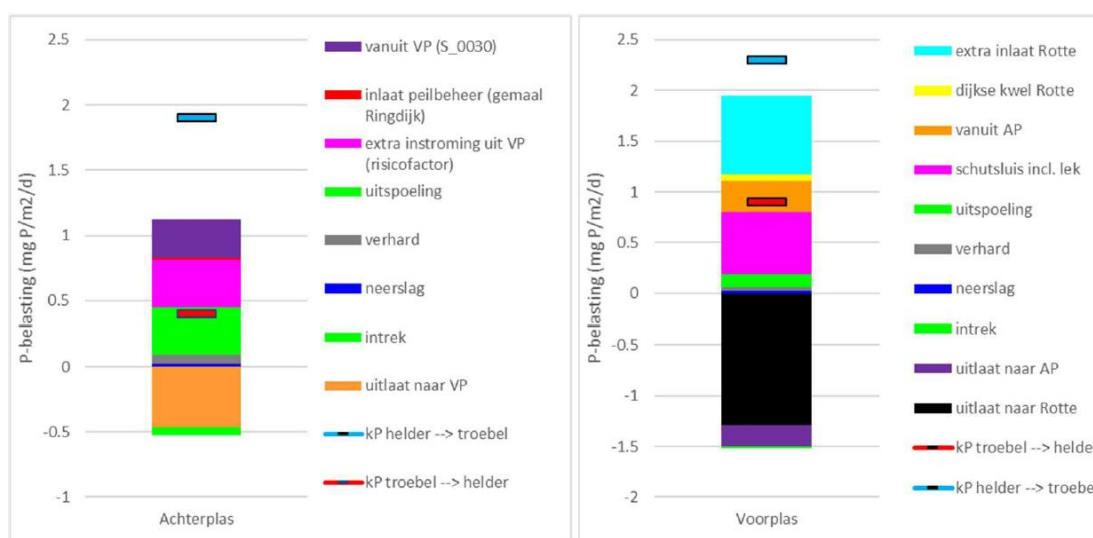
De adsorptie-experimenten met het teruggevonden aluminiumhydroxide tonen aan, dat er een beperkt vermogen is om nog aanvullend fosfaat te binden. Als de concentratie in het poriewater beperkt mag stijgen – stel met 1mg/l – dan wordt er slechts tot 10 g P / kg Al extra gebonden versus de ca.100 g P/ kg Al die nu gebonden is (Figuur 6.2). Volgens de adsorptie-isotherm mag worden ongeveer 40 g P/kg Al extra binding worden verwacht (Figuur 6.1). In het veld is de pH-waarde iets gunstiger voor de binding van fosfaat, dus wellicht is de restcapaciteit in de praktijk wat groter. De verminderde bindingscapaciteit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verdergaande ageing.

6.2.5 Concluderend

Fysisch werkt de zandlaag goed; er is nauwelijks sprake van menging. Wel zien we in 1 kolom duidelijke verstoring (slib/klei in de zandlaag). De goed fysische werking is ook terug te zien in totaalgehalten. Er is een groot verschil tussen zand en het oude slib en dat verandert niet in de tijd. Ook de poriewaterconcentraties in de zandlaag zijn structureel lager dan in het slib. In de kolommen met aluminium zijn de P-concentraties in de zandlaag verlaagd ten opzicht van kolommen zonder aluminiumtoevoeging. Deze concentraties lijken licht toe te nemen, maar zijn 10 jaar na afdekking nog altijd lager dan in de kolommen zonder aluminium. De experimenten over de restcapaciteit suggereren dat er nog wel enige bindingscapaciteit is, maar dat dit beperkter is dan op basis van de adsorptie-isotherm verwacht mag worden. Dit heeft mogelijk te maken met verdergaande ageing. Het gebonden P blijkt stabiel in het sediment gebonden te blijven en daarmee duurzaam verwijderd te zijn.

6.3 Reduceert de zandlaag met of zonder aluminium de interne belasting?

Voor de bredere interpretatie van de effectiviteit van de afdekking met zand en aluminiumhydroxide is het zinvol om de bijdrage van interne belasting te vergelijken met de externe belasting. In deze paragraaf wordt de informatie uit dit rapport integraal bekeken met de data uit het rapport van Witteveen+Bos (Mandemakers et al., 2020) waarin een watersysteemanalyse is gemaakt met een bijbehorende stoffenbalans (Figuur 6.3). In deze balans is de bijdrage van kwel klein (lichtgele balkje in de rechterfiguur). Het directe effect van fosfaatrijke kwel is op basis van deze schatting zeer beperkt. Kwel kan echter een tweede effect hebben, namelijk dat de nieuwe sliblaag wordt belast van onderaf. De vraag is of daar aanwijzingen voor zijn.



Figuur 6.3 Gemiddelde externe P-belasting in de Achterplas (links) en Voorplas (rechts) berekend over juli 2016 tot en met september 2019. Eveneens is de kritische fosforbelasting weergegeven voor een omslag van helder naar troebel (bovenste kritische grens; blauwe balk) en voor een omslag van troebel naar helder (onderste kritische grens; rode balk). De negatieve belasting is de afvoer van fosfor. Uit Mandemakers et al. (2020).

De oplading van het sediment zou ongeveer gelijk moeten zijn aan het nutriëntensurplus in de stoffenbalans (0,4 mg P/m²/dag; Figuur 6.3). Dit kan worden vergeleken met de gemeten hoeveelheden slib en P-gehalten in de kolommen. Voor alle kolommen is bekend hoeveel slib er is geaccumuleerd in de 10 jaar na afdekking. Hierbij is er vanuit gegaan dat geen slib aanwezig was direct na de afdekking met zand.

Aan de hand van het P-gehalte en het drooggewicht, als maat voor de hoeveelheid slib, is vervolgens bepaald hoeveel fosfor geaccumuleerd is per m² per dag (zie Tabel 6.2).

De waarden die hier uit volgen liggen tussen 1,3 en 4,7 mg P/m²/dag en zijn daarmee fors hoger dan de het surplus van 0,4 mg P/m²/dag. Dit is een indicatie dat er mogelijk meer belasting (of minder afvoer) is in het systeem dan berekend.

Tabel 6.2 P-gehalten in bovenste slibmonster voor Bergse Voorplas. Aannemende dat alle P-accumulatie plaatsvindt in deze laag, is berekend hoeveel P hier terecht is gekomen per m² per dag.

Locatie/kolom	P-gehalte (mg P/ g slib)	Drooggewicht sliblaag (g/buis)	Berekende P accumulatie in slib (mg P/m ² /dag)
5VN1	470,32	88,63	1,45
5VN3	743,89	51,20	1,33
4VW1	584,33	112,06	2,28
4VW2	1819,65	74,07	4,70
6VO2	438,83	92,40	1,41
6VO3	380,05	132,38	1,76

Uiteindelijk wordt de interne eutrofiering vooral bepaald door de toplaag en de snelle fosfaatdynamiek door sedimentatie en mineralisatie van organisch materiaal. Als de toplaag echter wordt opgeladen door fosfaat dat vanuit de onderlaag naar boven transporteert, kan dat op termijn ook leiden tot een hogere interne belasting. Tabel 6.2 toont dat de P-gehalten in het slib op locatie 6 (hoge PAC-behandeling) lager zijn dan op de andere locaties, maar het aantal meetdata is te laag om een statistisch significant verband vast te stellen.

6.4 Hoeveel effect heeft afdekken in de toekomst?

De fysische barrière blijft, maar als de sliblaag dikker wordt, is het de vraag of de onderliggende bodem (oud slib en veen) nog heel veel invloed heeft op de interne eutrofiering. Het lijkt er op dat de P-concentraties in de zandlaag iets oplopen, zeker in de kolommen met aluminiumbehandeling. Ook de restcapaciteit om nog meer fosfaat te binden lijkt beperkt (zie 6.1.2), maar is nog wel aanwezig.

7 Conclusies

7.1 Werkt de zandlaag (al of niet met aluminium) als buffer?

Ja, zowel fysisch als chemisch. De fysisch en chemische buffer is af te leiden uit de volgende bevindingen:

- De zandlaag heeft duidelijk lagere gehalten ten opzichte van het oude slib onder het zand en het nieuwe slib op het zand.
- De gehalten in de sedimenten wijken in 2021 weinig af van de profielen in eerdere jaren. Er is geen sprake van accumulatie van P, bijvoorbeeld door ijzeroxidatie in het zand waaraan P wordt geadsorbeerd.
- er heeft permanente fosforaccumulatie plaatsgevonden in de laag waar aluminium is toegevoegd.
- In de Voorplas worden nabij het grensvlak waar het aluminium is toegediend, ook na 10 jaar, lagere P-concentraties gemeten. Over het algemeen zetten deze lagere P poriewaterconcentraties ook door in de zandlaag erboven.

Verder is een aantal trends in de tijd te zien:

- Bij de dunnere zandlagen van locatie 1 en 2 (Achterplas, hier is geen aluminium toegevoegd) zijn in de loop van de tijd de P concentraties gestegen. Op locatie 3 is de zandlaag dikker en waren de poriewaterconcentraties lager dan de vorige keer. Het lijkt er op dat de dikte van de zandlaag meer bepalend is voor de poriewaterconcentraties dan dat er een trend in de tijd is.
- In de Voorplas lopen de concentraties in de zandlaag licht op in de profielen die met aluminium zijn behandeld.

7.2 Reduceert de zandlaag, met of zonder aluminium, de interne belasting?

De zandlaag moet er primair voor zorgen dat fosfor in het oude slib niet in contact komt met het oppervlaktewater. De belangrijkste vraag is daarom of er transport door het zand plaatsvindt waardoor het nieuwe slib eutrofer wordt. Op het eerste zicht is het fosfaatgehalte in het slib niet volledig te verklaren uit het surplus dat is berekenend in de stoffenbalans. Dat zou betekenen dat het surplus is onderschat of dat interne belasting het nieuwe slib beïnvloedt.

7.3 De toekomst?

De fysische barrière blijft, dus er is geen direct contact mogelijk tussen het oude slib en het oppervlaktewater. In de gebieden zonder aluminium onder het zand, is er weinig verschil te zien met de vorige monitoring. Als de sliblaag dikker wordt, is het de vraag of de onderliggende bodem nog veel invloed heeft op de interne eutrofiering. Het lijkt er op dat de P-concentraties in de zandlaag in de kolommen met aluminiumbehandeling iets oplopen in de tijd. De experimenten naar de restcapaciteit geven aan dat er nog wel restcapaciteit aanwezig is, maar minder dan op basis van experimenten in 2010 werd geschat. De komt vermoedelijk door verdergaande ageing van de aluminiumhydroxides.

8 Literatuur

- Bakker, D.J., Osté, L., Roskam, G., Weert, J. de, Hemelraad J.. 2011. De Bodem Bedekt. Het onderzoeken en aanbrengen van een fosfaatbindende afdeklaag in de Bergse Voorplas. Deltares-rapport 1201913.
- Koroleff, F. (1983). Determination of phosphorus. *Methods of seawater analysis*, 125-133.
- Hemelraad, J. (2019). Evaluatie Waterkwaliteit Bergse Plassen (1997-2018). Rapport Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard.
- Mandemakers, J.J., Deelen, E.E. van, Klinge, M.. 2020. Nadere systeemanalyse Bergse Plassen. Witteveen+Bos 114985/20-003.460.
- Osté, L. en G. Roskam (2013). Monitoring De Bodem Bedekt. Ontwikkeling van de waterbodem in de Bergse Plassen. Deltares-rapport 1206286.
- Reitzel, K., Jensen, H. S., & Egemose, S. (2013). pH dependent dissolution of sediment aluminum in six Danish lakes treated with aluminum. *Water research*, 47(3), 1409-1420.
- Smits, J. en J. van Beek (2009). Ontwikkeling screeningmodel eutrofiëring. Fase 1: Formulering en kalibratie. Deltares rapport 1200235-008-ZWS-0001.
- Uusitalo, R., & Tuhkanen, H. R. (2000). Phosphorus saturation of Finnish soils: evaluating an easy oxalate extraction method.

A Beschrijving van de kolommen

Tabel 8.1: Beschrijving kolommen

Een pijltje ('->') geeft aan dat de laag dieper doorloopt dan dat de kolom is gestoken

Locatie + kolom	grafiek label	Diepte slib	Diepte zand	Diepte oud slib	Diepte veen
1AO-2	2021-2	0-0.5cm	0.5-15.5 cm onderste 5 cm kleurt lichter	15.5-19 cm	19->39 cm
1AO-3	2021-3	0-0.5 cm	0.5-15 cm onderste 7 cm kleurt lichter	15-18 cm	18->43 cm bovenste 15 cm veen vermengd met slib
2AW-2	2021-2	0-2 cm	2-22.5 cm onderste 12.5 cm kleurt lichter	22->47.5 cm	-
2AW-3	2021-3	0-1 cm	1-22 cm onderste 14 cm kleurt lichter	22-51 cm	->51 cm niet bemonsterd
3AZ-2	2021-2	0-1.5 cm	1.5-47.5 cm tevens sliblaag op 6-16.5 cm	47.5-52.5 cm	52.5->63.5 cm
3AZ-3	2021-3	0-10 cm	10-43.5 cm	43.5-46 cm	46->60.5 cm
4VW-1	2021-1	0-5 cm	5-15 cm	15-27 cm	27-63 cm
4VW-2	2021-2	0-4 cm	4-12 cm	12-21.5 cm	21.5->56.5 cm
5VN-1	2021-1	0-3 cm	3-15 cm	15->20 cm	niet bemonsterd
5VN-2	2021-2	niet bemonsterd	<12-17 cm	17-32 cm	32->58 cm
5VN-3	2021-3	0-4 cm	4-16 cm	16-31 cm	31->41 cm
6VO-2	2021-2	0-5 cm	5-14.5 cm	14.5-34 cm	34->59 cm
6VO-3	2021-3	0-4.5 cm	4.5-19.5 cm	19.5-40 cm	40->57 cm

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl