

PFAS emissie rijksbaggerdepots

de rol van baggeren op het vrijkomen van PFAS



PFAS emissie rijksbaggerdepots
de rol van baggeren op het vrijkomen van PFAS

Auteur(s)

Arjan Wijdeveld
Marc Verheul

Partners

Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, DELFT

PFAS emissie rijksbaggerdepots

de rol van baggeren op het vrijkomen van PFAS

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer D. Bijstra
Referenties	
Trefwoorden	PFAS, baggerspecie, emissie, shear, precursors

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	07-12-2021
Projectnummer	11206062-000
Document ID	11206062-000-HYE-0001
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Arjan Wijdeveld	
	Marc Verheul	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0				
	Arjan Wijdeveld	Leonard Osté	Gerard Blom	
	Marc Verheul			

Samenvatting

In dit onderzoek is gekeken naar de emissie van PFAS verbindingen uit de rijksbaggerdepots IJsseloo, Slufter en Hollandsch Diep. Niet alleen de emissies zijn in kaart gebracht, ook de processen die deze emissies kunnen verklaren zijn onderzocht. Op basis van het hierdoor verkregen inzicht in het gedrag van PFAS verbindingen in de rijksbaggerdepots worden aanbevelingen gedaan om de emissies terug te dringen. Verder wordt vanuit het verkregen inzicht een inschatting gemaakt naar de toekomst toe (met name over de nog onbekende rol van precursors).

Naast de focus op de emissies vanuit de rijksbaggerdepots is ook gekeken naar de PFAS concentratietrends in de rijkswateren waarin de depots gelegen zijn, en naar de bijdrage die de depots en het baggerproces leveren aan de PFAS belasting van de rijkswateren. Hieruit blijkt dat voor het reduceren van de PFAS belasting beter op systeemniveau maatregelen kunnen worden genomen in plaats van op het inrichtingsniveau van de depots. Het onderzoek heeft hier ook handvatten voor opgeleverd door de rol van baggeren op de PFAS emissie in kaart te brengen.

Samengevat zijn er twee processen die de PFAS emissie uit baggerspecie bepalen:

- Direct bij stort: shear (roeren, schudden of op andere wijze mechanisch verstoren van het sediment) en werkwater.
- Op een tijdschaal van maanden tot jaren: de afbraak van precursors.

PFAS verbindingen gedragen zich hiermee anders dan andere verontreinigingen. De partiticoëfficiënt (K_d) is een minder geschikte parameter om de beschikbaarheid van PFAS verbindingen te voorspellen. Of correcter geformuleerd, de partiticoëfficiënt is van andere factoren afhankelijk dan de waterbodem- en waterconcentratie. Voor de acceptatie van baggerspecie in de rijksbaggerdepots kan dit gevolgen hebben. Om de emissie van PFAS verbindingen te voorspellen volstaat het niet om de PFAS concentratie “aan de poort” te bepalen.

Het onderzoek biedt een aantal oplossingen om de emissie te reduceren, zoals voor PFAS-houdende baggerspecie het met minder shear en een geringer volume werkwater plaatsen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots. Ook zuivering door fyto-remediatie is kansrijk als nabehandeling. De rol van de afbraak van precursors blijft echter nog onzeker. Om dit te onderzoeken wordt aanbevolen de huidige buitenexperimenten voort te zetten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Leeswijzer	7
2	Kennisdelen met lopende PFAS projecten	9
2.1	Workshop 2020	9
2.2	Workshop 2021	11
3	Poriewater concentraties en potentiële beschikbaarheid van PFAS verbindingen	14
3.1	Experimenten op locatie IJsseloog	14
3.1.1	Opzet	14
3.1.2	Fingerprint van PFAS verbindingen in de waterfase per locatie	17
3.1.3	Fingerprint van PFAS verbindingen in de vaste fase per locatie	19
3.1.4	Resultaten	21
3.1.4.1	PFOS	21
3.1.4.2	PFOA	27
3.1.4.3	EtFOSAA	28
3.1.4.4	MeFOSAA	29
3.1.4.5	PFBA	30
3.1.5	Discussie	31
3.1.5.1	De partiticoëfficiënt (K_d) als maat voor de emissie uit de waterbodem	31
3.1.5.2	Effect roeren (shear)	31
3.1.5.3	Precursors	32
3.1.5.4	Impact voor bergen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots:	33
3.2	Experimenten in het CASTEL laboratorium	33
3.2.1	Opzet	33
3.2.2	Fingerprint van PFAS verbindingen in de waterfase per locatie	34
3.2.3	Fingerprint van PFAS verbindingen in de vaste fase per locatie	38
3.2.4	Resultaten	39
3.2.5	Discussie	41
3.2.5.1	Vergelijking schudexperimenten met buitenexperimenten	41
3.2.5.2	Effect contacttijd op de nalevering naar de waterfase	41
3.2.5.3	Effect Liquid to Solid (L:S) ratio op nalevering naar de waterfase	41
3.2.5.4	Impact voor bergen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots:	43
4	De PFAS depotconcentratie versus de omgeving	44
4.1	Variatie in de PFAS concentraties oppervlaktewater	44
4.2	Emissiebalans baggeren versus depot emissies	47
4.3	Discussie	48
5	De beoordeling van maatregelen ter zuivering van PFAS in het retourwater	49
5.1	Proef met actieve kool filtratie	49

5.2	Alternatieven	49
6	Conclusies	50
6.1	Shear	50
6.2	Aanpassen storttechniek voor PFAS houdende baggerspecie	50
6.3	Fytoremediatie als mitigatie maatregel	50
6.4	Specifiek voor IJsseloo: de waterbalans	50
6.5	Systeembalans	50
6.6	Precursors	51
6.7	Aanbevelingen	51
7	Bijlage A: PowerPoint voorstel vervolg gegeven op 30-09-2021	52

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Poly- en perfluoralkylstoffen (PFAS) is een verzamelnaam voor meer dan 6000 stoffen waarin onder andere een combinatie van fluorverbindingen en alkylgroepen voorkomen. In oppervlaktewater staan een aantal PFAS stoffen (PFOS en PFOA) op de RIVM ZZS-lijst als Zeer Zorgwekkende stof (ZZS). De stoffen op de ZZS lijst vloeien voort uit Europese verplichtingen en internationale afspraken, zoals de GHS-Verordening, de POP-Verordening, de REACH-Verordening, de Kaderrichtlijn Water en het OSPAR-Verdrag.

PFOS en PFOA komen niet alleen voor in water, maar ook in bodem en waterbodems. RIVM en Deltares hebben achtergrondwaarden en risicogrenzen ten behoeve van onderbouwing Maximale Waarden PFAS voor toepassen van grond en baggerspecie afgeleid, die zijn overgenomen in het zogenaamde (tijdelijk) handelingskader PFAS (<https://www.-bodemplus.nl/onderwerpen/wet-regelgeving/bbk/grond-bagger/handelingskader-pfas/>).

Maar wat gebeurt er met de mobiliteit van PFAS als baggerspecie vanwege PFAS niet kan worden toegepast, zodat weghalen en bergen in de rijksbaggerdepots de voor Nederland enige optie is? Hoe wordt de emissie van PFAS uit de rijksbaggerdepots zo minimaal mogelijk gehouden, welke processen bepalen deze emissie en zijn er oplossingen om de emissie nog verder terug te dringen? Tijdens het in 2021 uitgevoerde onderzoek kwam daar ook de vraag bij wat de rol van precursors van de ZZS stoffen PFOS en PFOA (andere PFAS verbindingen die af kunnen breken tot PFOS en PFOA) is op de PFOS en PFOA emissies. Deze vragen staan centraal in dit onderzoek.

Kort samengevat, welke processen verklaren de emissie van PFAS verbindingen in het algemeen en PFOS en PFOA in het bijzonder uit waterbodems? Hierbij speelt niet alleen de korte termijn (tijdens het baggeren of het bergen in het depot), maar ook de emissie op een tijdschaal van dagen, weken, maanden en mogelijk zelfs jaren. Om deze reden loopt het onderzoek door in 2022.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2: Het onderzoek is voorafgegaan door een tweetal workshops. Hierbij stond het delen van kennis op het gebied van het PFAS gedrag in water, bodem en waterbodems centraal, evenals het delen van ervaring met het terugdringen van de PFAS emissie door zuiveren. Op basis van de workshops is de vraag voor welke processen de emissie van PFAS uit de rijksbaggerdepots bepaald verder aangescherpt en vertaald naar een proevenprogramma.

Hoofdstuk 3: Voor de vraag wat het effect van het bergen van baggerspecie in een rijksbaggerdepots is op de PFAS emissie uit de waterbodems zijn experimenten opgezet. Een groot deel van de experimenten heeft op semi-praktijkschaal buiten, op depot IJsseloo, plaatsgevonden. Aanvullend zijn lab proeven uitgevoerd om in meer detail te kijken welke processen de emissie van PFAS verbindingen beïnvloeden. In dit Hoofdstuk worden de proeven en de uitkomsten beschreven.

Hoofdstuk 4: Op basis van de resultaten van Hoofdstuk 3 wordt ingezoomd op de kritische processen die de emissie van PFAS verbindingen uit baggerspecie kan verklaren. Hierbij

komt onder andere de invloed van shear (door het met kracht bijmengen van werkwater), de variatie en trends in de PFAS waterkwaliteit van het ontvangend oppervlaktewater (zonder de emissie uit de depots), de invloed van de tijdschaal op de gemeten emissies van PFOS en PFOA (de afbraak van precursors) en de emissiebalans bij het weghalen en in de rijksbaggerdepots bergen van PFAS houdende baggerspecie versus de emissie zonder ingreep (waarbij ook gekeken wordt naar de rol die het baggeren zelf speelt in de emissie van PFAS verbindingen).

Hoofdstuk 5: Het streven is een minimale emissie van PFAS verbindingen vanuit de rijksbaggerdepots naar het oppervlaktewater. Hiertoe is door Arcadis in 2019 en 2020 een pilot gedaan met zuivering door filtratie van een deel van het retourwater. Op basis van de opgedane procesinzichten wordt gereflecteerd of er naast zuivering door filtratie andere kansrijke alternatieven zijn om de PFAS emissie uit de rijksbaggerdepots terug te dringen.

Hoofdstuk 6: Het onderzoek sluit af met de conclusies op basis van de proeven en de procesinzichten die zijn opgedaan.

Bijlage A: Lopende het onderzoek zijn er nieuwe inzichten en verdiepingsvragen bijgekomen. Een aantal van deze vragen, zoals naar de rol van de afbraak van precursors naar PFOS en PFOA, wordt op basis van de beschikbare data meegenomen in de onderzoek. Voor sommige verdiepingsvragen is meer onderzoek nodig. Bijlage A geeft toelichting op de achtergrond van dit verdiepend onderzoek.

2 Kennisdelen met lopende PFAS projecten

2.1 Workshop 2020

Op 29 oktober 2020 heeft de 1^e workshop plaatsgevonden. Deelnemers waren Arcadis, Deltares, RIVM en RWS. De onderwerpen waren:

Update onderzoek landelijke achtergrondwaarden

- De afleiding van de HVN waarden in de watersystemen (niet alleen de totaalconcentratie PFAS of PFOS als speerpuntstof, maar ook de fingerprint van PFAS verbindingen)
- De relatie tussen de gemeten oppervlaktewater concentraties en zwevend slib (en is er sprake van een indicatieve Kd of is er een relatie met het OC of misschien lutum/al gehalte?)

Ervaringen met zuivering van PFAS in eluaatwater

- De opzet van de proeven naar het effect van effluent zuivering
- De uitkomst van de proeven en de eerste aanbevelingen

Toelichting op opzet verdiepend onderzoek naar emissie en fixatie van PFAS

- Toelichting op opzet verdiepend onderzoek naar emissie en fixatie van PFAS
- PFAS in internationaal kader (SedNet werkgroep verslag)

Een belangrijke constatering is dat de standaardbodemtype correctie, zoals deze wordt toegepast voor metalen (op basis van lutum en organisch stof gehalte) en organische verontreinigingen (op basis van het organisch stof gehalte) voor PFAS verbindingen, ter discussie staat. In het uit te voeren onderzoek zal gekeken worden welke andere processen de PFAS verdeling tussen de waterbodem en water kunnen verklaren.

Een ander belangrijk punt van inzicht was dat de zuivering van PFAS verbindingen door filtratie in een actieve kool filter weliswaar effectief is, maar technisch complex door de aanwezigheid van veel organisch materiaal (algen), wat zorgt voor een moeilijke voorfiltratie. RWS gaf aan dat vanuit de KRW de normen in oppervlaktewater voor PFOS en PFOA waarschijnlijk aangescherpt gaan worden (zie <https://www.rivm.nl/pfas/nieuwe-twi>). Dit heeft consequenties voor de emissie die vanuit de rijksbaggerdepots naar oppervlaktewater (en grondwater) is toegestaan.

Hoewel geconstateerd wordt dat de toetskaders voor nuttig toepassen van bodem en baggerspecie in de vorm van verondiepen van diepe plassen en de toetskaders voor afvalstortlocaties zoals de rijksbaggerspeciedepots verschillen kan veel van de opgedane kennis over PFAS uitgewisseld worden. Zo heeft het HerVerontreinigingsNiveau (HVN) voor (water)bodem als (voorlopige) grens van toepasbaarheid van PFAS-houdende bagger invloed op het aanbod van baggerspecie aan de rijksbaggerdepots. De toepassing van baggerspecie boven de HVN waarde is ter discussie, wat het aanbod van te storten baggerspecie op basis van PFAS beïnvloed. Tabel 1 geeft de P50/80/95 percentielen weer voor PFOS voor bodem, uiterwaarden en waterbodem. De waterbodem wordt gesplitst in rijkswater en waterbodems in beheer bij waterschappen. Met name de waterbodems uit de rijkswateren zijn qua volume te storten baggerspecie gevoelig voor de HVN waarde.

Tabel 1 Onderzoek mobiliteit bodem en bagger, 50/80/95 percentiel voor PFOS ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

	bodem	uiterwaarde	waterbodem
P50	0,07	0,07	0,31
P80	0,07	0,10	1,26
P95	0,15	0,24	2,86

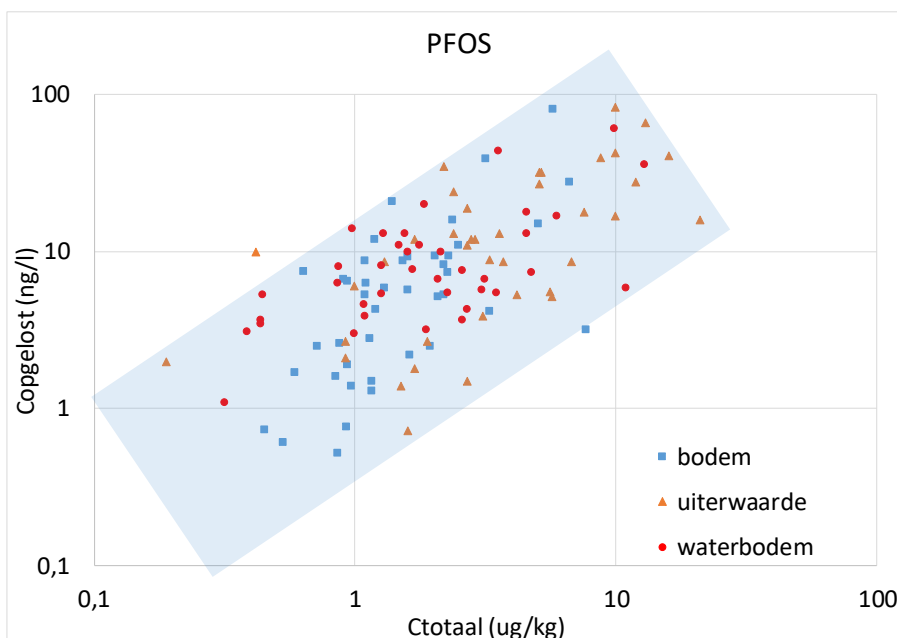
Data RWS

	Rijkswaterbodem
P50	<0,4
P80	1,1
P95	8,7

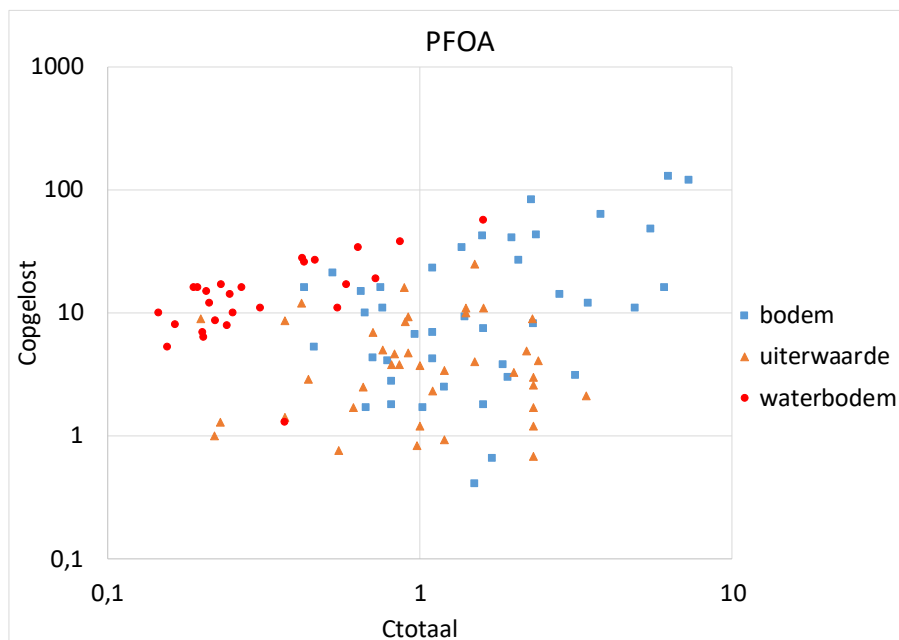
Data waterschappen

	Regionale waterbodem
P50	0,28
P80	0,56
P95	1,3

Ook de voor de HVN bepaalde verhouding tussen de vaste fase (het aan bodem of sediment gebonden deel) en de opgeloste fase van PFAS verbindingen (zie Figuur 1 voor PFOS en Figuur 2 voor PFOA) is nuttig voor dit onderzoek. Het geeft weer dat er verschillen zijn tussen land en waterbodems in de verhouding waarin PFAS verbindingen voorkomen, en dat de correlatie met standaard bodem parameters (lutum gehalte en organisch stof) niet eenduidig te maken is.



Figuur 1 Verhouding tussen vaste fase en opgelost voor PFOS, uit "PFAS Achtergrondwaarden bodem Uitloogonderzoek, Verschil in uitloging van PFAS uit grond en bagger", RIVM-briefrapport 2020-0102 (Wintersen et al., 2020).



Figuur 2 Verhouding tussen vaste fase en opgelost voor PFOA, uit "PFAS Achtergrondwaarden bodem Uitloogonderzoek, Verschil in uitloging van PFAS uit grond en bagger", RIVM-briefrapport 2020-0102 (Wintersen et al., 2020).

2.2 Workshop 2021

Tijdens de 2^e workshop op 20 mei 2021 is er langs drie thema's gekeken naar de emissie van PFAS:

- I. Beperkingen uitstoot PFAS uit depot (Arjan Wijdeveld; Deltares)
- II. Netto-effect baggeren versus effluent baggerdepot (Leonard Osté; Deltares)
- III. Zuiveringstechnieken (Wim Plaisier; Arcadis)

De sessie over het beperken van de PFAS uitstoot uit het depot ging in op de aanleiding voor het in dit rapport gepresenteerde onderzoek. Op basis van de empirisch bepaalde verdeling coëfficiënten (zie de workshop van 2020) tussen sediment en water kan een balans opgesteld worden in welke mate baggeren en het bergen van baggerspecie bijdraagt aan de emissie van PFAS verbindingen:

- De stortpluim (het percentage slib dat in contact komt met oppervlaktewater) bepaalt zowel bij baggeren als bij bergen in belangrijke mate de PFAS emissie.
- De hoeveelheid werkwater die aan de bagger toegevoegd wordt (zowel bij baggeren als bij bergen) bepaald in belangrijke mate de emissie.
- De voor depots gangbare maatregel om de emissie te reduceren door te sturen op de zwevend slib concentratie (< 20 mg/l in het retourwater) heeft nauwelijks invloed op de PFAS emissie.
- Daarentegen heeft het reduceren van het retourwatervolume (bij gelijke zwevend slib concentraties) een relatief gunstig PFAS emissie reducerend effect.

Op basis van de kentallen van de rijksbaggerdepots zoals volume, vulgraad en uitwisseloppervlak in de depots kan op basis van de gemeten effluent concentraties uit de depots en een geschat oppervlak van de waterbodem indien deze nog in het riviersysteem aanwezig zou zijn een indicatief rendement berekend worden voor het bergen van PFAS houdende baggerspecie in de rijksbaggerdepots (zie Tabel 2)

Tabel 2 Indicatief rendement bergen van PFAS houdende baggerspecie in de rijksbaggerdepots, uitgedrukt in de emissie reducerende factor per depot.

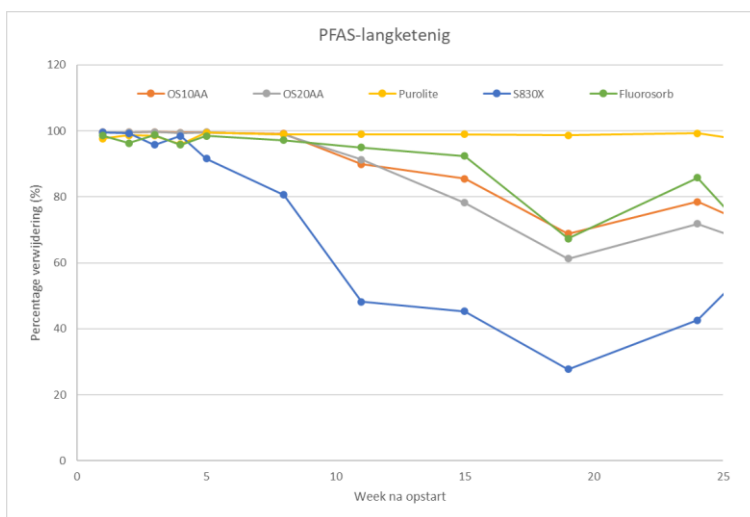
Geschatte PFOS emissie uit de rijksdepots

locatie	depot oppervlak (*) (m2)	effluent, debiet per jaar (m3)	gemiddelde PFOS effluent conc. (ng/l)	PFOS emissie ug/m2	PFOS effluent gram per jaar
IJSSELOOG	2,350,000	705,000	9.0	2.71	6.36
SLUFTER	2,600,000	780,000	2.5	0.76	1.97
HOLLANDS-DIEP	630,000	189,000	11.3	3.40	2.14
neerslagoverschri 300 mm/jaar (**)					
(*) https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/beheer-en-ontwikkeling-rijkswateren/bagieren/baggerdepots/index.aspx					
(**) http://www.grondwaterformules.nl/index.php/vuistregels/neerslag-en-verdamping/langjarige-grondwateraanvulling					

Geschatte PFOS emissie indien de in de depots aanwezige baggerspecie nog in het systeem aanwezig zou zijn

locatie	depot 50% vulling (m3)	laagdikte verontr. bagger (m)	uitwissel oppervlak (m2)	PFOS emissie ug/m2	PFOS emissie gram per jaar	emissie reductie factor	depot volume (*) (m3)
IJSSELOOG	11,500,000	0.55	20,909,091	2.71	56.58	8.90	23,000,000
SLUFTER	75,000,000	1.0	75,000,000	0.76	56.93	28.85	150,000,000
HOLLANDS-DIEP	5,000,000	1.0	5,000,000	3.40	17.00	7.94	10,000,000
(*) https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/beheer-en-ontwikkeling-rijkswateren/bagieren/baggerdepots/index.aspx							

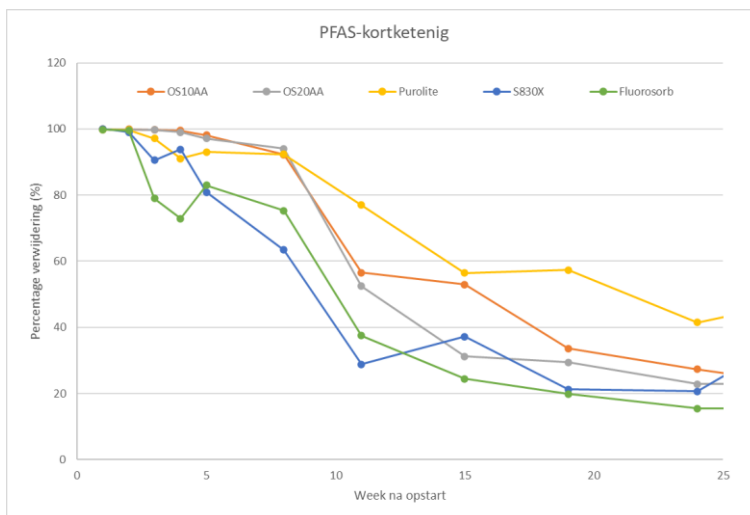
De resultaten voor de pilottest voor PFAS waterzuivering (Arcadis) na bijna 6 maanden zijn weergegeven in de onderstaande figuren. Figuur 3 betreft het gemiddelde rendement voor lange ($\geq C8$) keten PFAS verbindingen en Figuur 4 het gemiddelde voor korte keten (C4 – C6) PFAS verbindingen. De PFAS analyses zijn op het influent en effluent water uitgevoerd door het RWS-CIV laboratorium in Lelystad en omvat 31 PFAS verbindingen¹



Figuur 3 Effect PFAS verwijdering lange ketens, tijdschaal 0 – 25 weken

¹ Geanalyseerde PFAS verbindingen in de waterfase

11Cl_PFOuDs	4:2 FTS	6:2 FTS	8:2 FTS	8:2 FTUCA	9CI-PF3ONS	Br_PFHxS	Br_PFOS	DONA
FOSA	GenX	L_PFBs	L_PFDs	L_PFHpS	L_PFHxS	L_PFNs	L_PFOs	L_PFPeS
N-EtFOSAA	N-MeFOSAA	PFBA	PFDA	PFDoA	PFHpA	PFHxA	PFNA	PFOA
PFPeA	PFTDA	PFTeDA	PFUDa					



Figuur 4 Effect PFAS verwijdering korte ketens, tijdschaal 0 – 25 weken

De effectiviteit voor zuivering van lange ($\geq C8$) is relatief goed ($>50\%$) voor alle sorbents behalve S80X, al neemt de effectiviteit van alle sorbents behalve purolite na circa 10 dagen af. Voor korte keten ($C4 - C6$) PFAS verbindingen is dit effect sterker en zakt het rendement na circa 10 dagen naar minder dan 50% (uitgezonderd purolite). PFOS en PFOA, de ZZS stoffen, zijn lange keten ($C8$) PFAS verbindingen en worden relatief goed geabsorbeerd.

Er is in 25 weken bijna 10.000 m^3 effluentwater gereinigd op een totaal van 705.000 m^3 (zie Tabel 2). Bij een concentratie van circa 10 ng/l PFOS (gemeten voor IJsseloo – periode november 2019 tot en met mei 2020) is daarmee effectief $0,08 \text{ gram}$ (80% rendement – gemiddelde van sorbents) tot $0,1 \text{ gram}$ (100% rendement - purolite) PFOS verwijderd. De jaarlijkse emissie voor IJsseloo is op basis van dezelfde effluent concentraties op 6.4 gram geschat (zie Tabel 2), oftewel 3.1 gram in 25 weken. Daarmee is circa 3% van het effluentwater gezuiverd.

De PFAS waterzuivering met sorbents vraagt een forse (factor 31) opschaling van de pilot voor de lange ketens. Voor de korte ketens moeten de waterfilters vaker vervangen worden, of geaccepteerd worden dat het zuiveringsrendement ook bij 100% filtratie minder dan 50% bedraagt.



Figuur 5 Waterfiltratie opstelling Arcadis op IJsseloo

3 Poriewater concentraties en potentiële beschikbaarheid van PFAS verbindingen

3.1 Experimenten op locatie IJsseloo

3.1.1 Opzet

Het doel van de proeven is om onder natuurlijke condities de nalevering van PFAS uit baggerspecie naar het oppervlaktewater te volgen; dat wil zeggen: met de dag/nacht-variatie in temperatuur, de seizoensvariatie in temperatuur en variatie in perioden met een neerslag overschot of tekort. Hiertoe zijn in totaal 11 bakken met een volume van 1 m³ opgesteld op IJsseloo en gevuld met bagger van 5 verschillende herkomstlocaties. De herkomst is verdeeld naar de brongebieden voor de drie rijksbaggerdepots, met ter referentie de schone Ketelmeer waterbodembodem. Vanwege logistieke redenen is voor het Hollandsch Diep depot geen materiaal voor de buitenproef aangeleverd. Als alternatief is baggerspecie van een zoetwaterlocatie gebruikt die naar de Slufter is afgevoerd. Tabel 3 geeft een overzicht, inclusief de gehalten voor vijf PFAS verbindingen.

Tabel 3 Herkomst materiaal in m3 bakken IJsseloo met concentraties voor drie PFAS verbindingen (de rapportagegrens is als minimum concentratie aangehouden). Alleen bak 3 en 4 betreft een duplo, de overige bakken verschillen door het slib al dan niet te roeren.

slib	opmerking	PFOS µg/kg	PFOA µg/kg	EtFOSAA µg/kg	MeFOSAA µg/kg	PFBA µg/kg
1. - Beun A – geroerd	Baggerspecie te bergen in IJsseloo, materiaal direct uit beun (niet verpompt)	0.37	0.1	2.0	0.3	0.1
2. - Beun B - ongeroerd		0.37	0.1	2.0	0.3	0.1
doorlooptijd (dagen)						
3. - Depot A – geroerd	Baggerspecie uit depot IJsseloo, genomen nabij lospunt (recent gestort)	0.01	0.1	0.8	0.7	0.1
4. - Depot B – geroerd		0.01	0.1	0.8	0.7	0.1
5. - Depot C – ongeroerd		0.01	0.1	0.8	0.7	0.1
doorlooptijd (dagen)						
6. - Ketelmeer - geroerd	Baggerspecie uit geul tussen depot en natuureiland, top laag sediment	1.26	0.1	0.1	1.5	0.1
7. - Ketelmeer – ongeroerd		1.26	0.1	0.1	1.5	0.1
doorlooptijd (dagen)						
8. - Slufter zout A – geroerd	Baggerspecie van talud Slufter (drooggevallen deel), zout milieu	3.93	0.1	0.1	0.1	0.1
9. - Slufter zout B – ongeroerd		3.93	0.1	0.1	0.1	0.1
doorlooptijd (dagen)						
10. - Slufter zoet A - geroerd	Baggerspecie met zoetwater oorsprong, bemonsterd bij overslag	1.36	0.1	0.4	0.5	0.1
11. - Slufter zoet B - ongeroerd		1.36	0.1	0.4	0.5	0.1
doorlooptijd (dagen)						

Opvallend is dat de gemeten PFOS waarden nabij (Slufter zout) of ruim onder de HVN waarde ligt voor PFOS. Ook andere PFAS verbindingen komen niet of in relatief lage concentraties in de baggerspecie partijen voor.

De proeven zijn zowel geroerd als ongeroerd uitgevoerd. Reden van roeren is om het effect van verpompen bij het bergen in het depot te simuleren. Figuur 6 laat de opstelplek op IJsseloo zien. Figuur 7 geeft het roeren van de baggerspecie door middel van jetten met een opvoerpomp weer. Als werkwater wordt Ketelmeerwater gebruikt, hiervan is de samenstelling bepaald.



Figuur 6 Opstelling van de m³ bakken



Figuur 7 Het roeren van de baggerspecie door middel van jetten

De proeven zijn met een oplopende periode tussen de monsternames opgezet. De reden is dat de tijdschaal waarop processen die de nalevering beïnvloeden plaatsvinden verschilt:

- Effect van roeren (shear): instantaan
- Effect van consolidatie baggerspecie: dagen tot weken
- Effect van diffusie: weken tot maanden
- Effect van afbraak precursors: onbekend, vermoedelijk maanden tot jaren

Tabel 4 geeft de monsternamen tijdstippen weer.

Tabel 4 Datum monstername en doorlooptijd van de proef per monstername tijdstip

slib	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1. - Beun A – geroerd	30/03/2021	31/03/2021	01/04/2021	02/04/2021	06/04/2021	09/04/2021	13/04/2021	29/04/2021	25/06/2021	24/08/2021
2. - Beun B - ongeroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
doorlooptijd (dagen)	0	1	2	3	7	10	14	30	87	147
3. - Depot A – geroerd	30/03/2021	31/03/2021	01/04/2021	02/04/2021	06/04/2021	09/04/2021	13/04/2021	29/04/2021	25/06/2021	24/08/2021
4. - Depot B – geroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5. - Depot C – ongeroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
doorlooptijd (dagen)	0	1	2	3	7	10	14	30	87	147
6. - Ketelmeer - geroerd	30/03/2021	31/03/2021	01/04/2021	02/04/2021	06/04/2021	09/04/2021	13/04/2021	29/04/2021	25/06/2021	24/08/2021
7. - Ketelmeer – ongeroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
doorlooptijd (dagen)	0	1	2	3	7	10	14	30	87	147
8. - Slufter zout A – geroerd	13/04/2021	14/04/2021	15/04/2021	16/04/2021	20/04/2021	23/04/2021	26/04/2021	11/05/2021	13/07/2021	07/09/2021
9. - Slufter zout B – ongeroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
doorlooptijd (dagen)	0	1	2	3	7	10	13	28	91	147
10. - Slufter zoet A - geroerd	13/04/2021	14/04/2021	15/04/2021	16/04/2021	20/04/2021	23/04/2021	26/04/2021	11/05/2021	13/07/2021	07/09/2021
11. - Slufter zoet B - ongeroerd	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
doorlooptijd (dagen)	0	1	2	3	7	10	13	28	91	147

Tijdens de proeven is eenmalig het waterniveau bijgevuld ter compensatie van de verdamping. In de proefopzet is een criterium van 10% volumeverlies waterfase voor verdamping voorzien voordat bijgevuld zou worden. Echter door een onverwachte PFAS lozing op de Rijn is afgezien van bijvullen. Dit omdat de achtergrondconcentratie van sommige PFAS verbindingen (PFBA) met een factor 8 zou toenemen indien dit water dat ook door het Ketelmeer stroomt gebruikt zou worden. De concentraties in het oppervlaktewater gecorrigeerd voor bijvullen (zowel qua achtergrondgehalte als qua verdunning). Figuur 8 geeft het waterpeil per bak weer gedurende de proeven.



Figuur 8 Waterpeil per bak

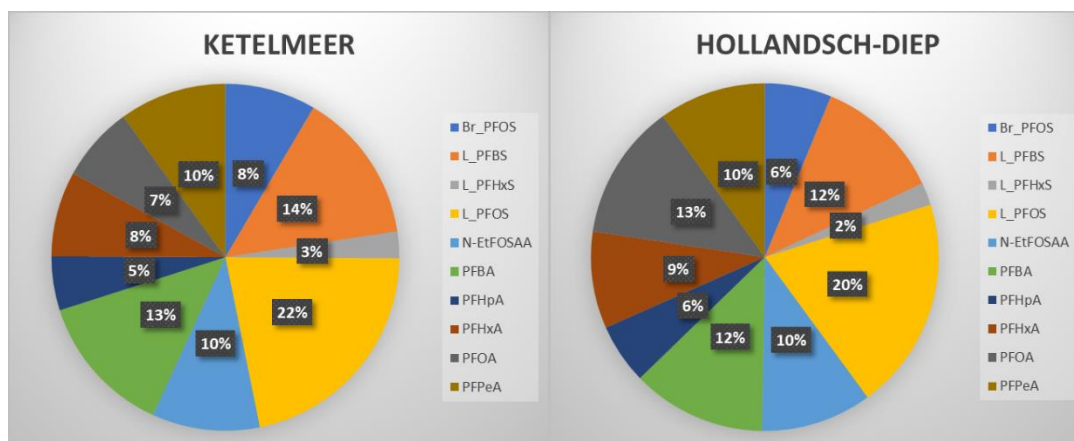
De verhouding sediment versus water is van belang om de relatieve emissie uit het sediment te kunnen bepalen. Daartoe is per partij de dichtheid van het slib bepaald, waarop het nat slib gewicht in de bakken is gebaseerd. De proeven zijn met een Liquid to Solid (L/S) ratio van 10 staat tot 1 uitgevoerd. Als toevoegwater is Ketelmeerwater gebruikt, locatie landelijk meetnet (vaargeul). Hiervan is zowel trendmatig als tijdens monsternamen de PFAS concentratie bepaald. Tabel 5 geeft de gebruikte hoeveelheden baggerspecie en toegevoegd water per bak weer. Het streven was 500 tot 700 liter per m³ vat. Van de Slufter zoet was minder slib materiaal, de proef is uitgevoerd met 230 liter.

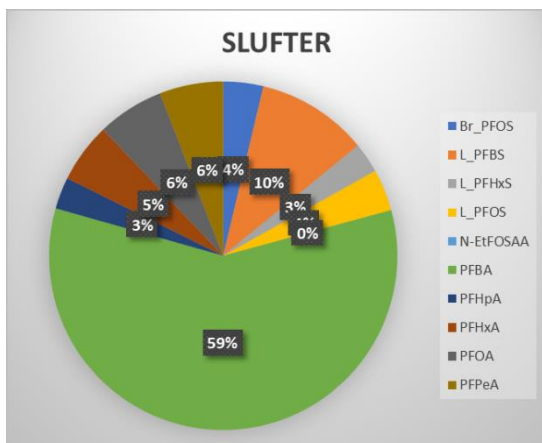
Tabel 5 Hoeveelheden nat slib, totaal drooggewicht slib en toegevoegd water (Ketelmeer)

Bak	ton			kg sed			totaal kg	totaal l	water toevoegen	totaal water
	1. - Beun A – geroerd	12	13	14	23.7	23.6	21.7	68.9	105.1	584.0
2. - Beun B - ongeroerd	15	16	17	16.6	22.1	22.0	60.6	92.5	513.9	606.4
3. – Depot A – geroerd	4			65.5			65.5	22.0	633.3	655.2
4. – Depot B – geroerd	5			66.3			66.3	22.2	640.5	662.7
5. – Depot C – ongeroerd	7			65.9			65.9	22.1	636.9	659.0
6. – Ketelmeer - geroerd	20	21		27.4	27.1		54.5	72.4	472.7	545.1
7. – Ketelmeer – ongeroerd	22	23		28.7	27.8		56.5	75.0	489.9	564.9
8. – Slufter zout A – geroerd	25	26		21.8	24.3		46.1	61.2	399.6	460.8
9. - Slufter zout B – ongeroerd	27	28		21.8	24.2		45.9	61.0	398.3	459.3
10. – Slufter zoet A - geroerd	29	30		11.5	11.5		23.0	30.6	199.6	230.2
11. – Slufter zoet B - ongeroerd	31	32		11.5	11.5		23.0	30.6	199.6	230.2

3.1.2 Fingerprint van PFAS verbindingen in de waterfase per locatie

RWS CIV heeft de waterfase bepalingen van PFAS uitgevoerd. De effluent concentraties (dus niet de proefbakken) voor de gemeten PFAS verbindingen van de drie rijksbaggerdepots in maart/april 2021 (start experiment) staan weergegeven in Figuur 9. De concentratie van de 10 hoogst gemeten PFAS verbindingen wordt weergegeven.

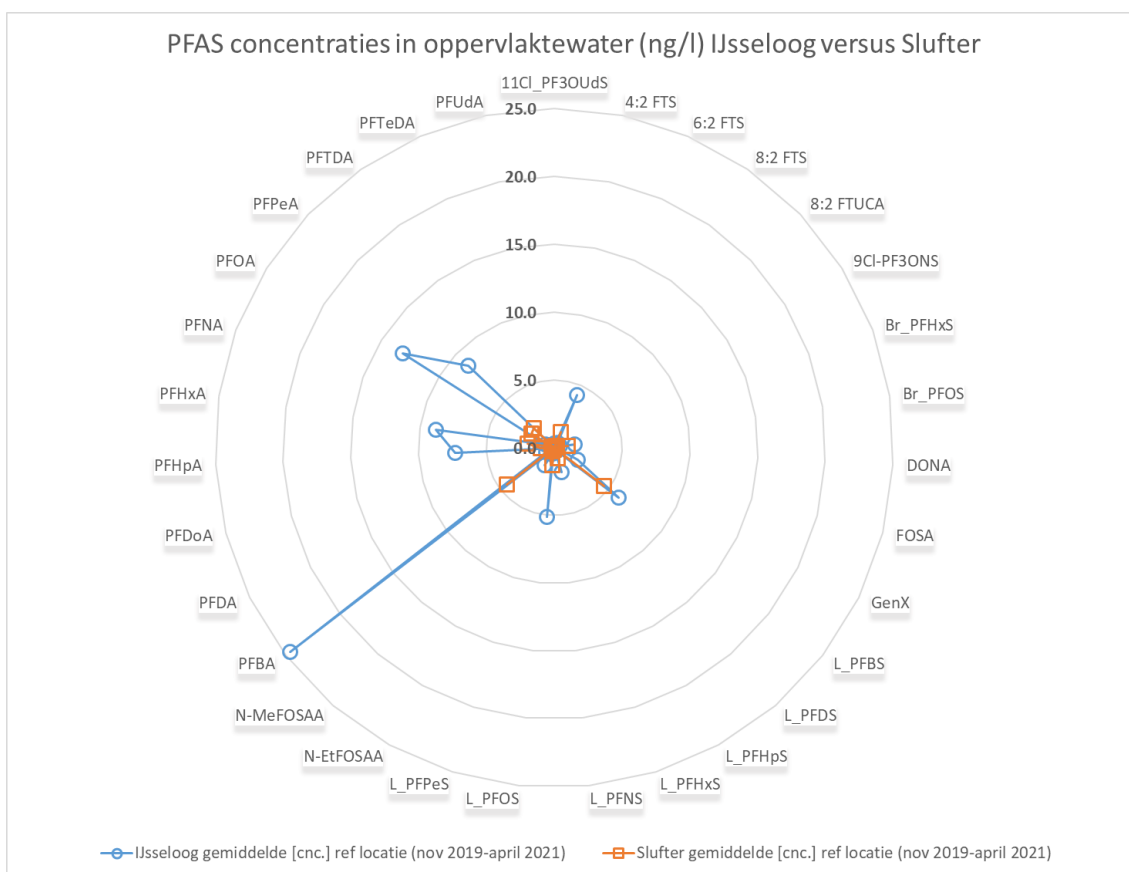




Figuur 9 Verhouding van de gemeten PFAS verbindingen in het effluent water van de rijksbaggerdepots, de bijdrage van de 10 hoogst gemeten PFAS verbindingen wordt weergegeven

Opvallend is dat de verhouding van de PFAS verbindingen (de fingerprint) voor IJsseloo en Hollandsch Diep overeenkomt, maar voor de Slufter sterk afwijkt.

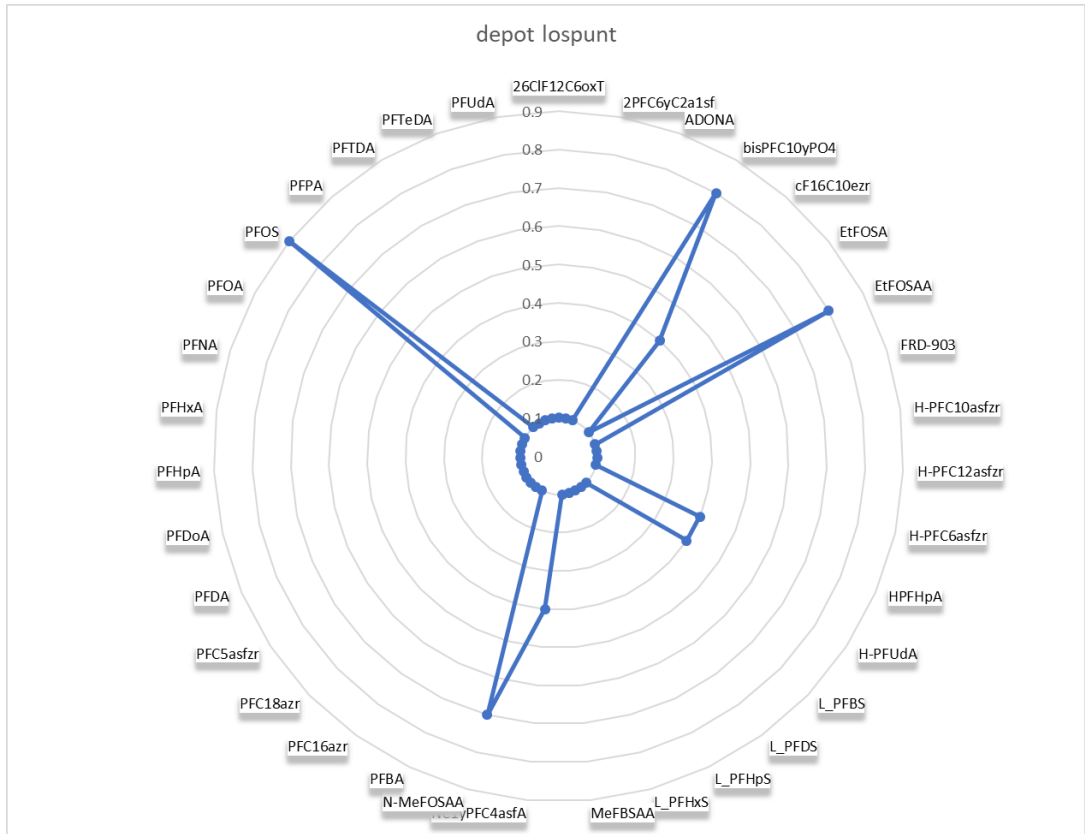
Figuur 10 geeft de gemiddelde concentratie voor IJsseloo en de Slufter in het oppervlaktewater van de depots weer voor de periode november 2019 – april 2021.



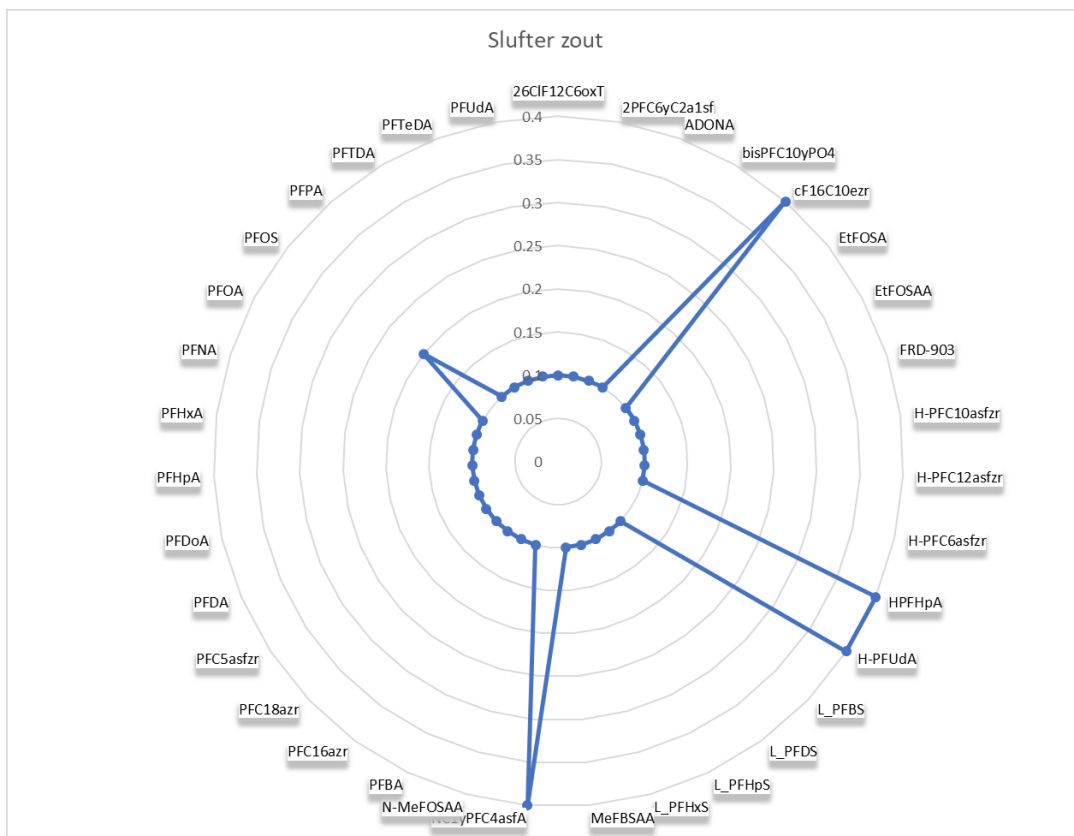
Figuur 10 Concentratie PFAS verbindingen (in ng/l) in IJsseloo en Slufter oppervlaktewater, periode november 2019 – april 2021

3.1.3 Fingerprint van PFAS verbindingen in de vaste fase per locatie

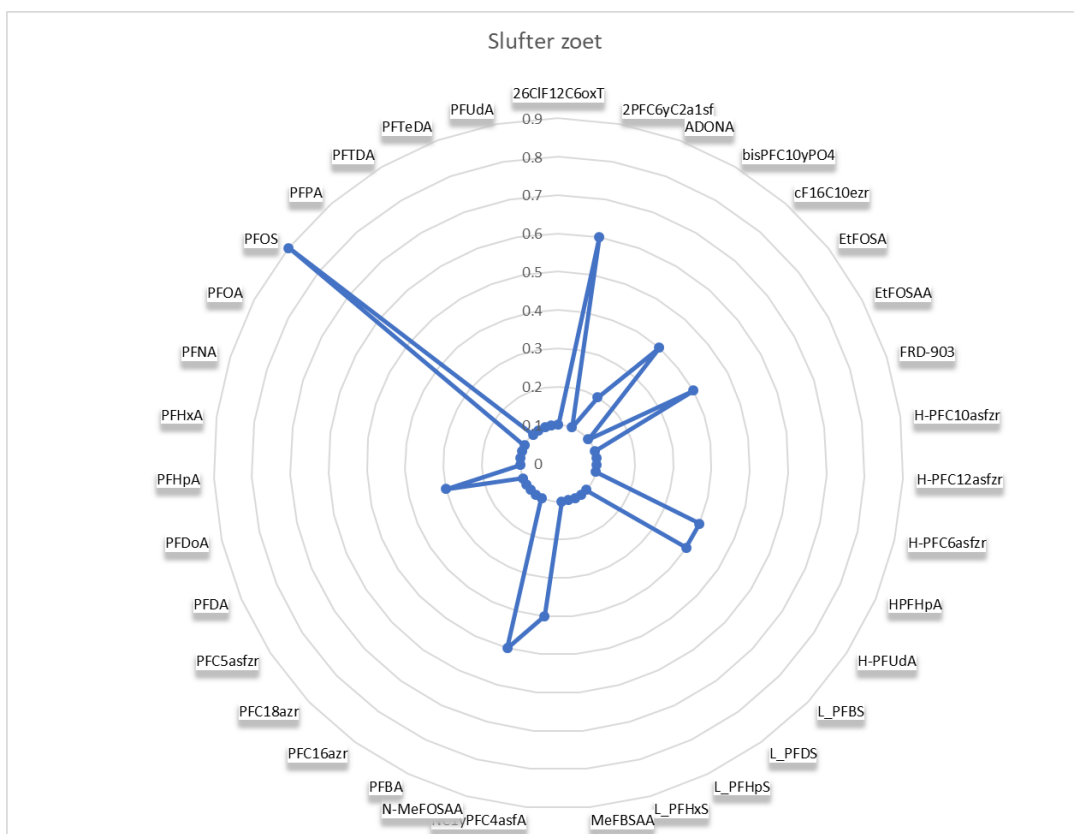
De concentraties voor de gemeten PFAS verbindingen van de drie rijksbaggerdepots, gemeten door RWS CIV, staan weergegeven in Figuur 11 - 14.



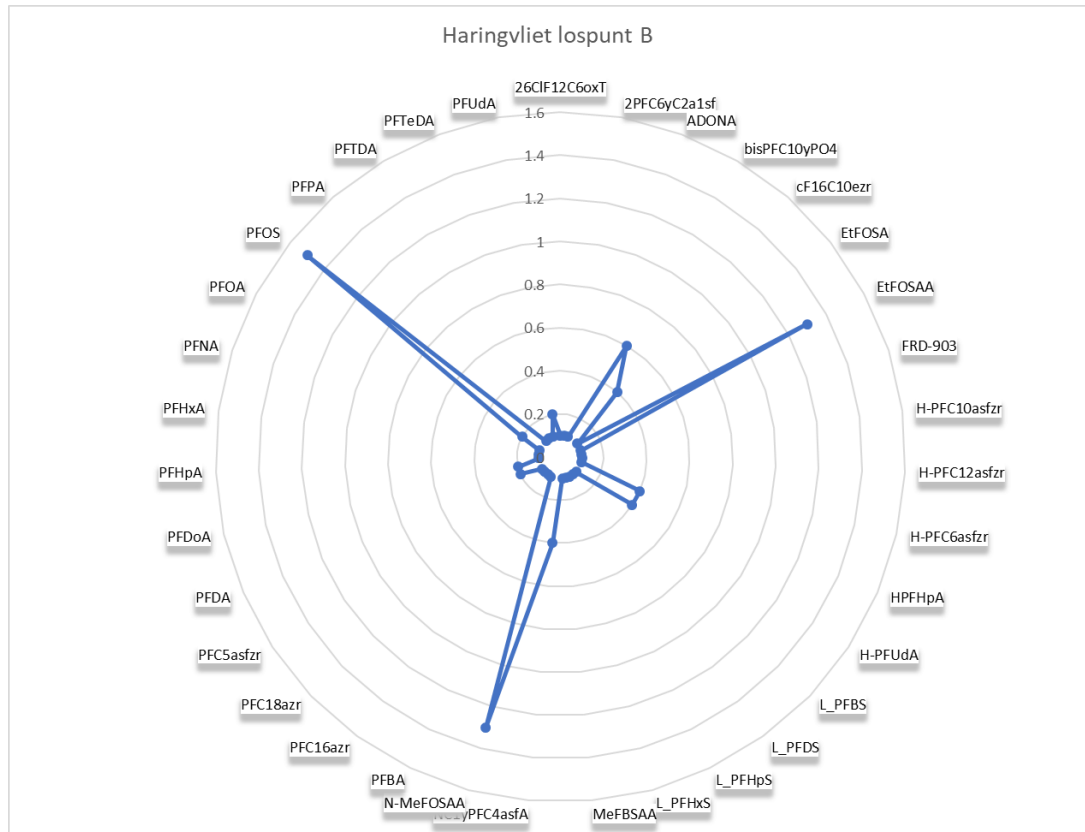
Figuur 11 Gemeten PFAS verbindingen in baggerspecie uit depot IJsseloo



Figuur 12 Gemeten PFAS verbindingen in baggerspecie uit depot Slufter (zout)



Figuur 13 Gemeten PFAS verbindingen in baggerspecie uit depot Slufter (zoet)



Figuur 14 Gemeten PFAS verbindingen in baggerspecie uit depot Hollandsch Diep

Ook in de vaste fase, de in de depots geborgen baggerspecie, valt op dat de verhouding in PFAS verbindingen redelijk vergelijkbaar is, met primair PFOS, EtFOSAA en MeFOSAA als belangrijkste PFAS componenten (PFBA wordt niet in de vaste fase gemeten). De zoute baggerspecie in de Slufter wijkt sterk af.

3.1.4 Resultaten

Er wordt ingezoomd op de resultaten voor:

- PFOS
- PFOA
- EtFOSAA
- MeFOSAA
- PFBA

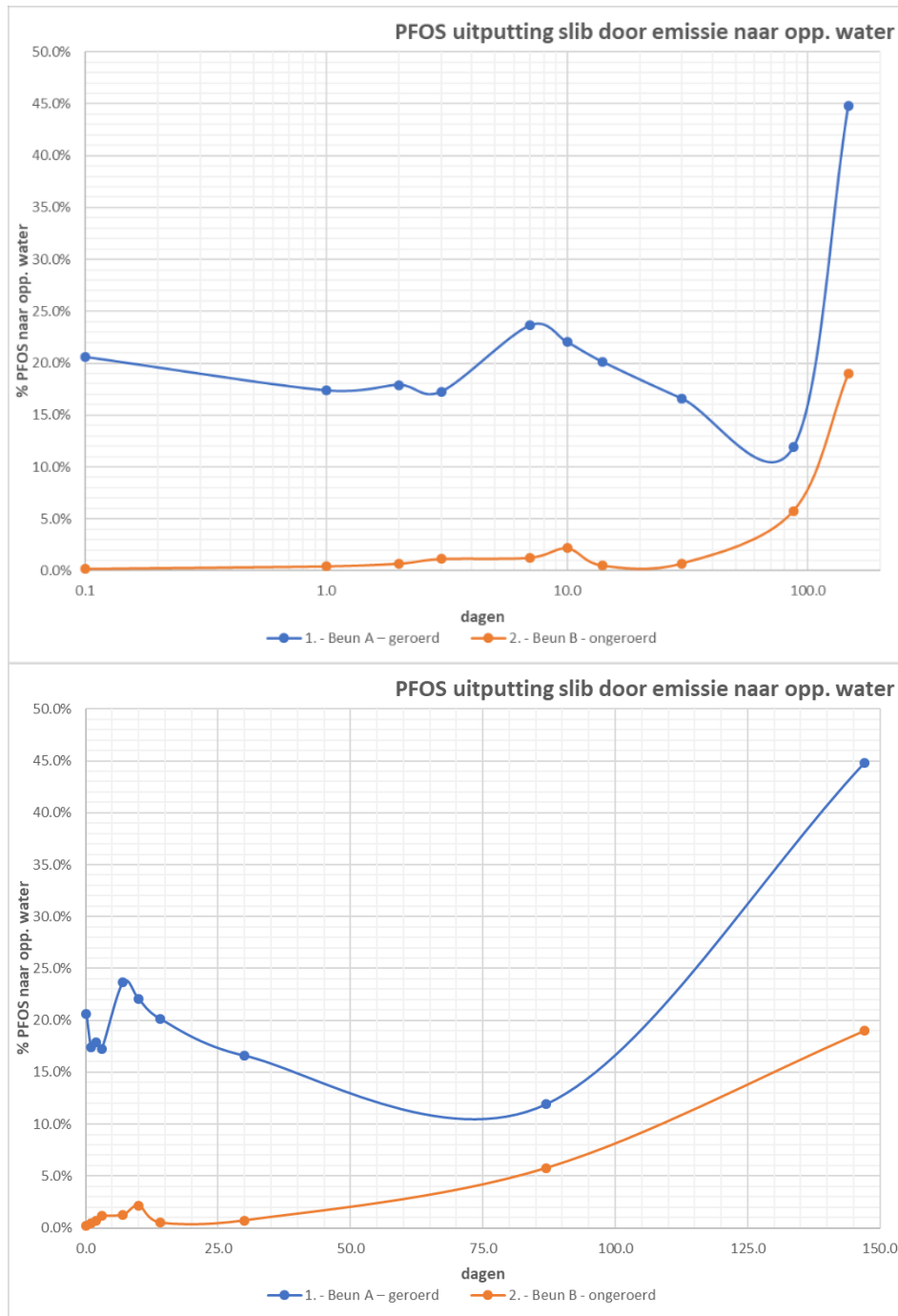
De PFAS verbindingen zijn gekozen op basis van:

- Normen (PFOS en PFOA)
- Rol als precursor voor PFOS (EtFOSAA en MeFOSAA)
- Relatieve bijdrage aan totale PFAS concentratie (PFBA)

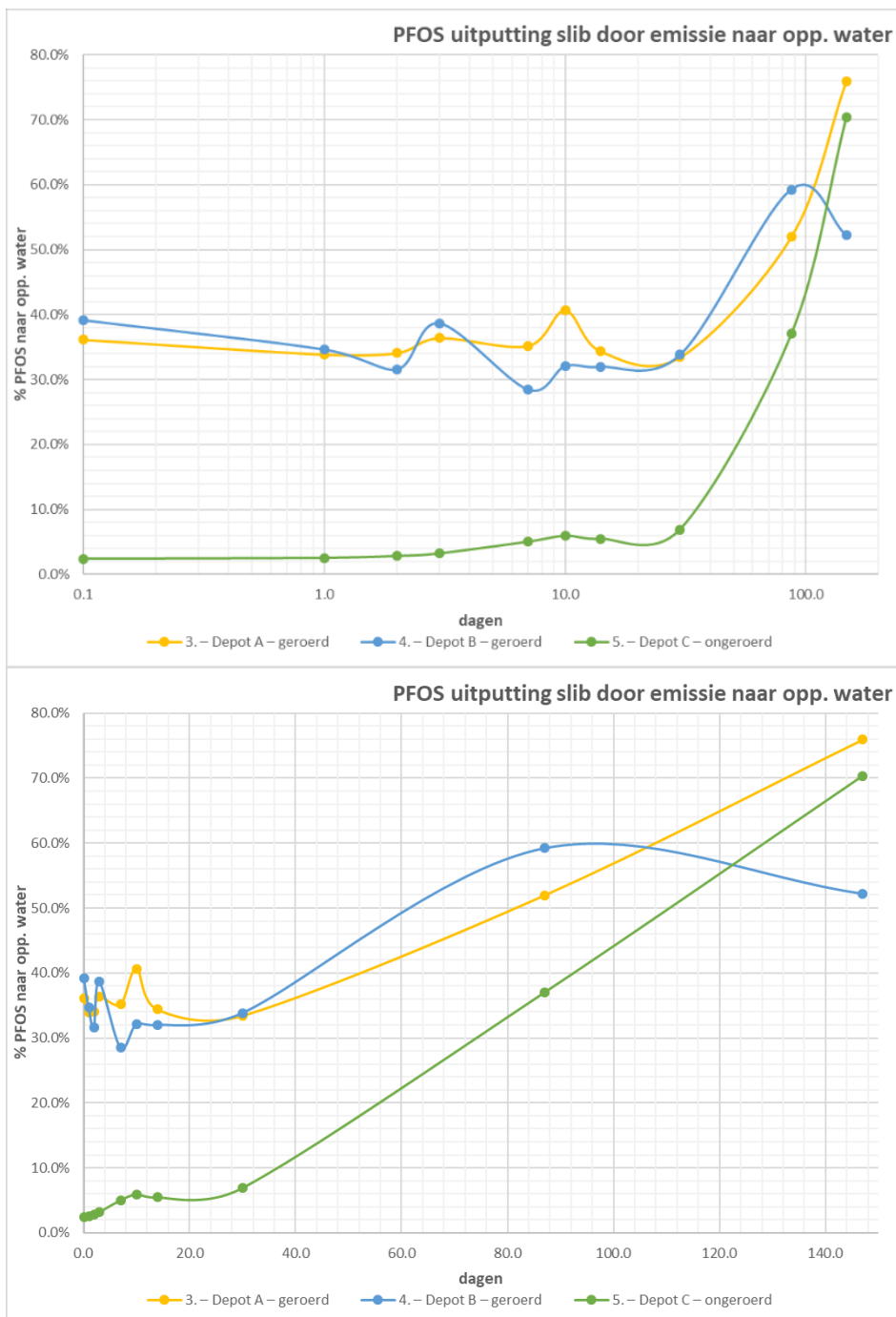
3.1.4.1 PFOS

Gezien het grote belang van PFOS worden de resultaten van de 11 bakken in vier figuren (Figuur 15 – 18) weergegeven. De figuren geven de mate van uitputting van het slib weer, gecorrigeerd voor de achtergrondconcentratie in het Ketelmeer water. De Figuren zijn zowel op logaritmische schaal als ook op lineaire schaal weergegeven. De reden voor de

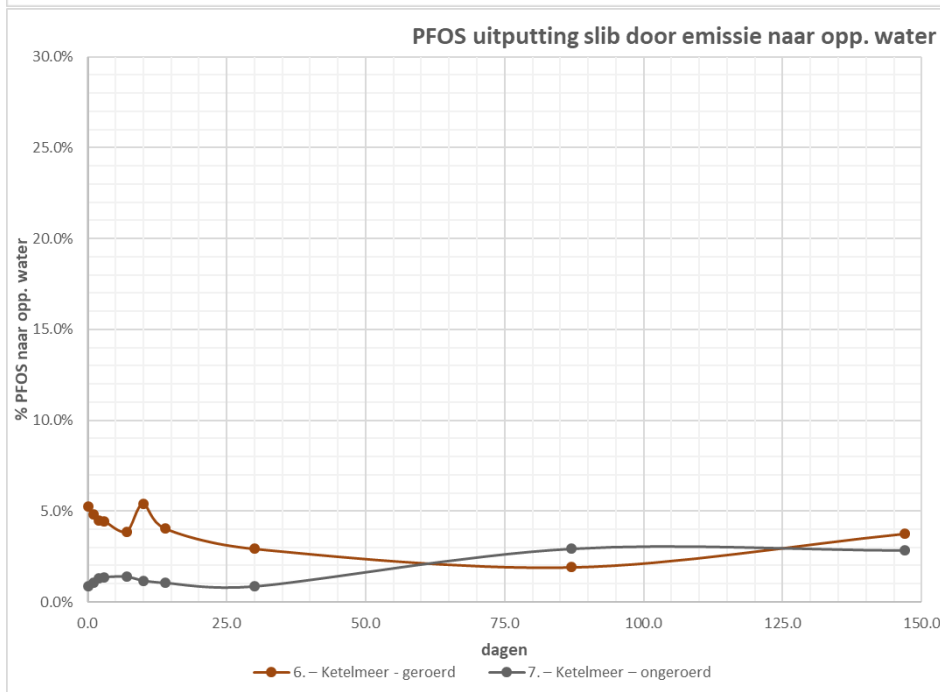
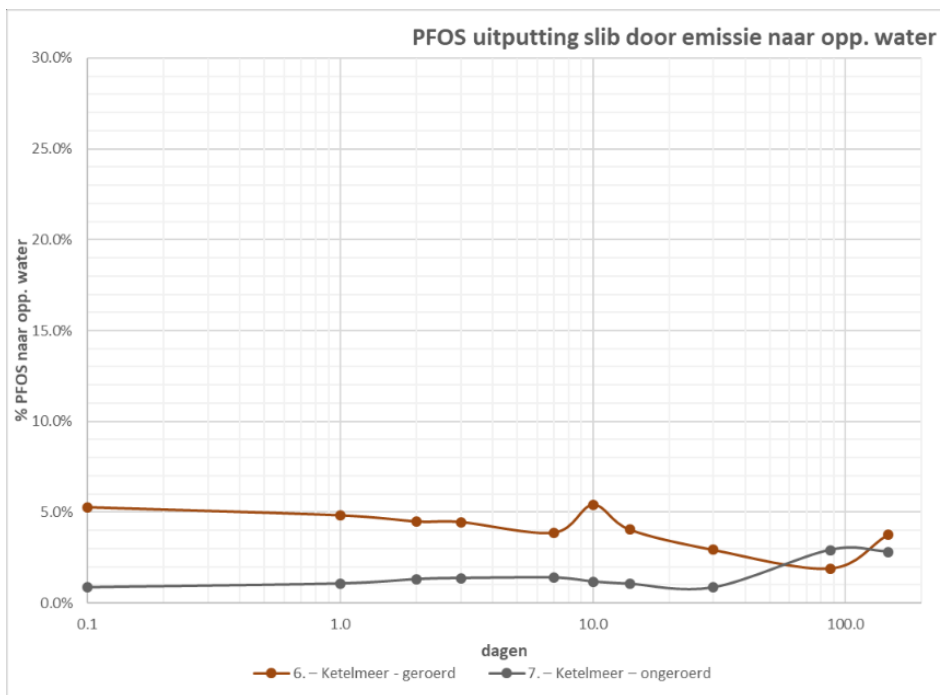
logaritmische schaal is dat de transitie van processen die de emissie beïnvloeden (instantane uitwisseling tijdens roeren, emissie door consolidatie en emissie door diffusie) op tijdschalen spelen oplopend van minuten tot maanden. De onzekere factor is de tijdschaal van de afbraak van precursors en de snelheid waarmee dit gebeurt (0^e orde, 1^e orde of 2^e of hogere orde reactie). Een 0^e of 1^e orde proces (met een niet uitgeputte precursor) laat zich het best visualiseren door een lineaire schaal.



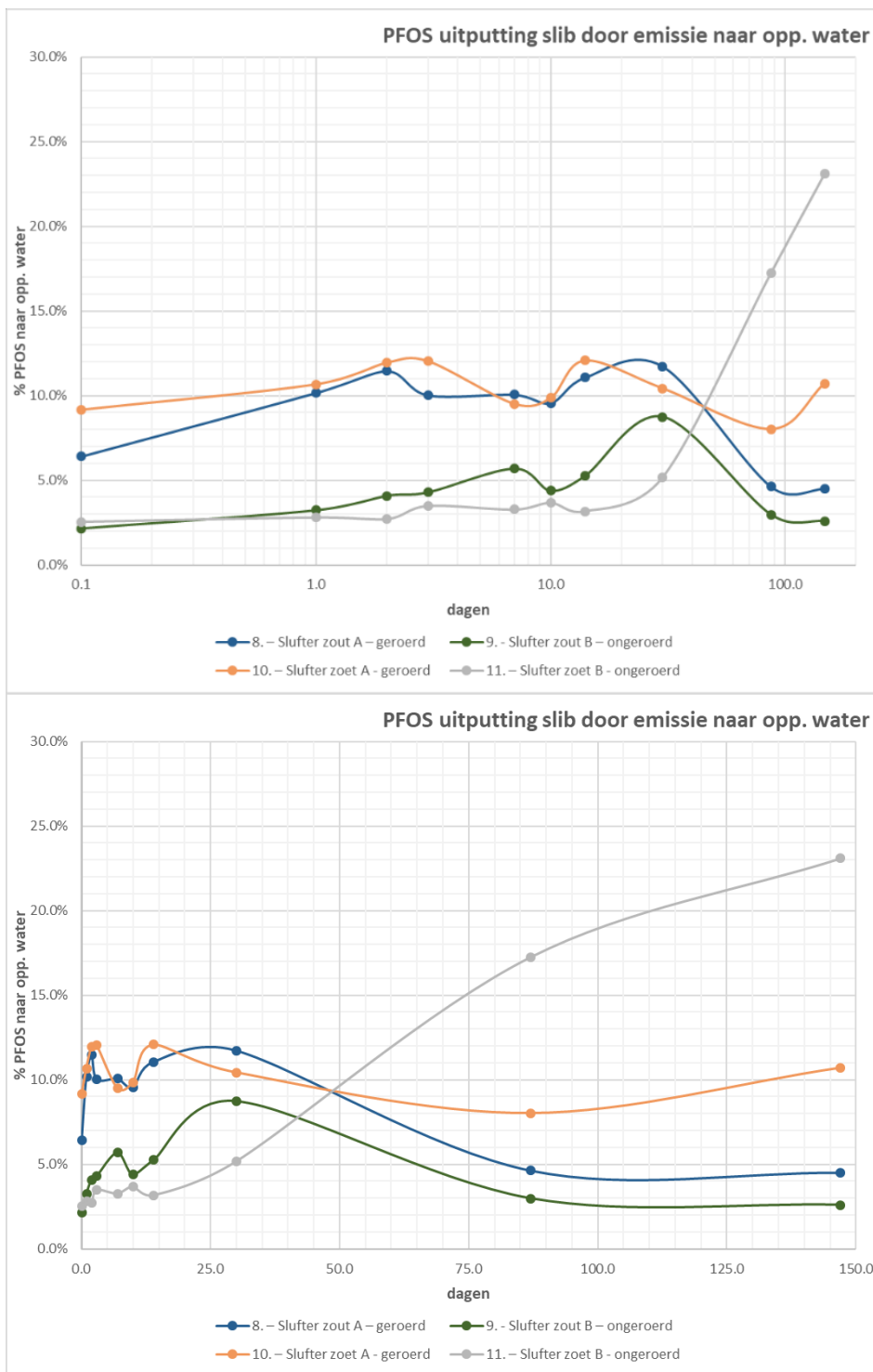
Figuur 15 PFOS uitputting voor bagger uit de beun, geroerd en ongeroerd



Figur 16 PFOS uitputting voor bagger uit IJsseloog, geroerd en ongeroerd



Figuur 17 PFOS uitputting voor bagger uit het Ketelmeer, geroerd en ongeroerd



Figuur 18 PFOS uitputting voor bagger uit de Slufter (zoet en zout), geroerd en ongeroerd

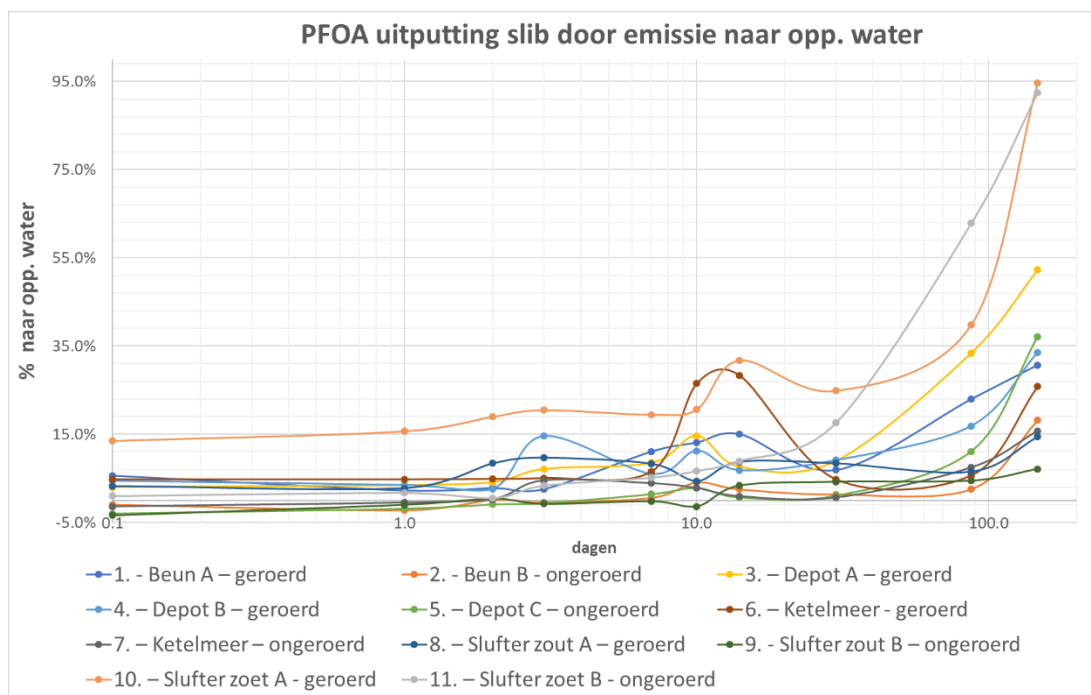
De nalevering van PFOS kan ook worden uitgedrukt in de partitie coëfficiënt (K_d), waarbij de het verschil in snelheid in nalevering tussen de baggerspecie en het oppervlaktewater bij roeren versus niet roeren tot uiting komt in de K_d . Tabel 6 geeft het verloop van de K_d weer.

Tabel 6 De gemeten partitie tussen oppervlaktewater en de baggerspecie – PFOS

PFOS Kd gecorr. voor uitputting	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	gem log(Kd)
1. - Beun A – geroerd	1.65	1.63	1.64	1.46	1.51	1.55	1.64	1.79	0.98	1.58
2. - Beun B - ongeroerd	3.34	3.13	2.91	2.86	2.62	3.24	3.08	2.13	1.47	2.98
3. – Depot A – geroerd	1.26	1.25	1.21	1.23	1.13	1.24	1.25	0.90	0.40	1.16
4. – Depot B – geroerd	1.25	1.31	1.17	1.36	1.28	1.28	1.23	0.78	0.84	1.20
5. – Depot C – ongeroerd	2.55	2.51	2.44	2.24	2.16	2.21	2.08	1.17	0.53	2.30
6. – Ketelmeer - geroerd	2.27	2.29	2.29	2.36	2.21	2.34	2.46	2.63	2.25	2.35
7. – Ketelmeer – ongeroerd	2.94	2.85	2.82	2.82	2.89	2.94	3.01	2.43	2.43	2.86
8. – Slufter zout A – geroerd	1.94	1.88	1.94	1.94	1.96	1.88	1.85	2.23	2.18	2.02
9. - Slufter zout B – ongeroerd	2.47	2.37	2.34	2.21	2.33	2.24	1.99	2.42	2.43	2.38
10. – Slufter zoet A - geroerd	1.92	1.87	1.86	1.97	1.94	1.83	1.87	1.89	1.54	1.88
11. – Slufter zoet B - ongeroerd	2.53	2.55	2.43	2.45	2.38	2.43	2.19	1.51	1.11	2.37
minimum (gemiddeld)	1.25	1.25	1.17	1.23	1.13	1.24	1.23	0.78	0.40	1.16
maximum (gemiddeld)	3.34	3.13	2.91	2.86	2.89	3.24	3.08	2.63	2.43	2.98
gemiddelde Kd proeven	2.61	2.49	2.39	2.35	2.30	2.52	2.45	2.13	1.94	2.40

3.1.4.2 PFOA

Het verloop van de PFOA uitputting is samengevat in één figuur, Figuur 19. Tabel 7 geeft het gemeten K_d verloop.



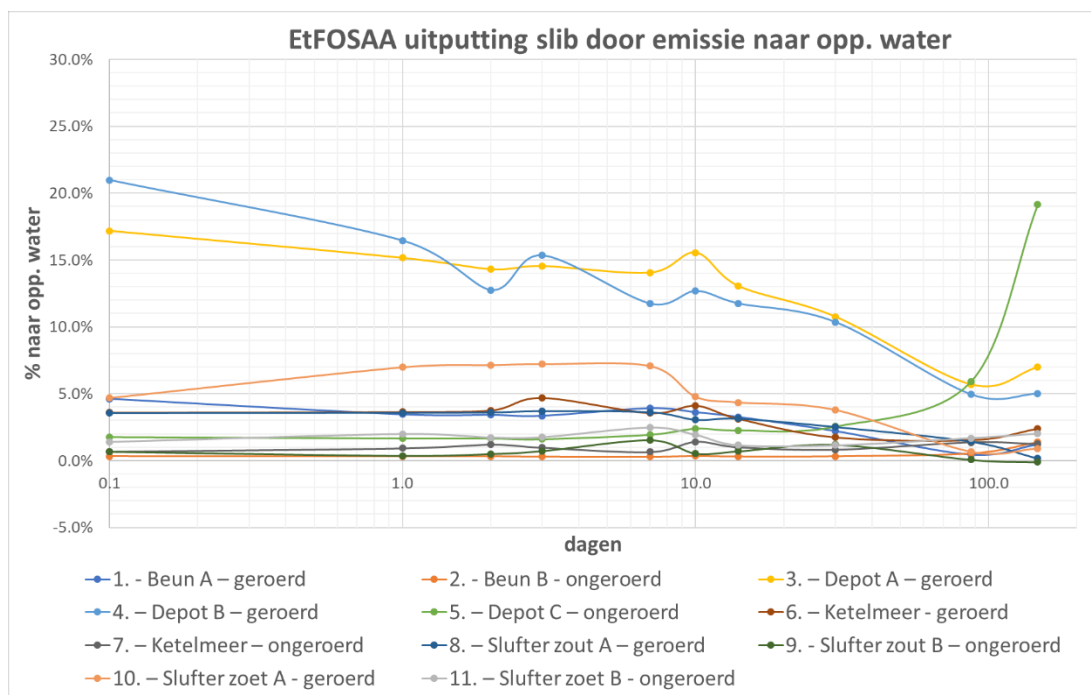
Figuur 19 PFOA uitputting

Tabel 7 De gemeten partitie tussen oppervlaktewater en de baggerspecie – PFOA

PFOA K_d gecorr. voor uitputting	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	gem $\log(K_d)$
1. - Beun A – geroerd	2.23	2.61	2.51	2.54	1.86	1.78	1.71	2.07	1.45	1.24	2.20
2. - Beun B - ongeroerd			4.00		3.22	2.34	2.54	2.82	2.50	1.49	3.28
3. - Depot A – geroerd	2.51	2.42	2.34	2.08	1.99	1.73	2.04	1.96	1.23	0.86	2.11
4. - Depot B – geroerd	2.34	2.43	2.54	1.74	2.16	1.85	2.09	1.94	1.63	1.17	2.14
5. - Depot C – ongeroerd					2.82	2.51	3.15	2.92	1.84	1.14	2.74
6. - Ketelmeer - geroerd	2.31	2.28	2.26	2.24	2.12	1.41	1.36	2.25	2.15	1.30	2.10
7. - Ketelmeer – ongeroerd			3.52	2.29	2.36	2.51	3.00	3.15	2.00	1.62	2.92
8. - Slufter zout A – geroerd	2.48	2.54	2.03	1.96	2.03	2.32	1.99	2.01	2.07	1.63	2.18
9. - Slufter zout B – ongeroerd			3.40				2.44	2.33	2.24	1.97	2.81
10. - Slufter zoet A - geroerd	1.81	1.73	1.63	1.59	1.61	1.57	1.30	1.42	1.01	-0.63	1.52
11. - Slufter zoet B - ongeroerd	3.00	2.76	3.30	2.45	2.24	2.11	1.96	1.60	0.60	-0.49	2.63
minimum	1.81	1.73	1.63	1.59	1.61	1.41	1.30	1.42	0.60	-0.63	1.52
maximum	3.00	2.76	4.00	2.54	3.22	2.51	3.15	3.15	2.50	1.97	3.28
gemiddeld	2.51	2.48	3.28	2.21	2.52	2.16	2.51	2.53	1.97	1.41	2.60

3.1.4.3 EtFOSAA

Het verloop van de EtFOSAA uitputting is samengevat in één figuur, Figuur 20. Tabel 8 geeft het gemeten K_d verloop.



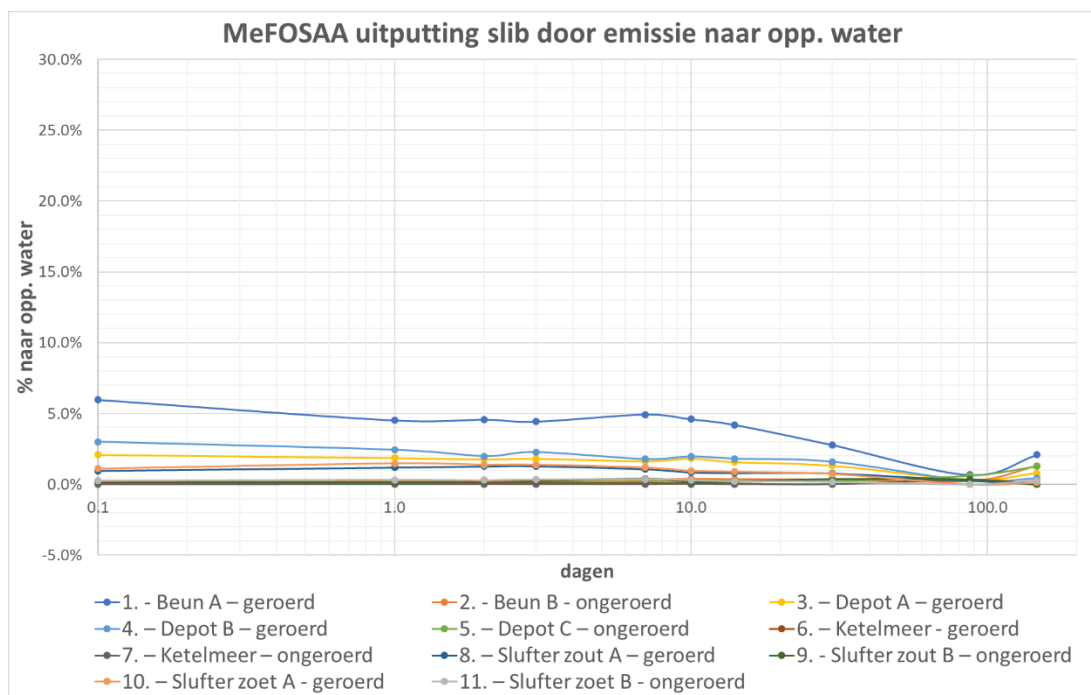
Figuur 20 EtFOSAA uitputting

Tabel 8 De gemeten partitie tussen oppervlaktewater en de baggerspecie – EtFOSAA

EtFOSAA K_d gecorr. voor uitputting	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	gem $\log(K_d)$
1. - Beun A – geroerd	2.32	2.41	2.42	2.42	2.34	2.38	2.43	2.59	3.26	2.79	2.66
2. - Beun B - ongeroerd	3.48	3.47	3.47	3.50	3.50	3.43	3.46	3.43	3.18	2.69	3.41
3. – Depot A – geroerd	1.68	1.72	1.75	1.73	1.75	1.70	1.78	1.87	2.15	2.02	1.84
4. – Depot B – geroerd	1.58	1.68	1.81	1.71	1.84	1.79	1.83	1.88	2.22	2.16	1.90
5. – Depot C – ongeroerd	2.74	2.75	2.75	2.75	2.67	2.58	2.61	2.53	2.14	1.54	2.60
6. – Ketelmeer - geroerd	2.43	2.40	2.38	2.27	2.40	2.33	2.45	2.69	2.73	2.45	2.48
7. – Ketelmeer – ongeroerd	3.17	3.01	2.89	2.97	3.15	2.81	2.96	3.03	2.76	2.79	2.97
8. – Slufter zout A – geroerd	2.43	2.42	2.42	2.40	2.41	2.48	2.46	2.56	2.76	3.65	2.86
9. - Slufter zout B – ongeroerd	3.17	3.43	3.29	3.12	2.80	3.26	3.13	2.89	4.06		3.42
10. – Slufter zoet A - geroerd	2.31	2.12	2.11	2.11	2.11	2.28	2.31	2.34	3.00	2.65	2.44
11. – Slufter zoet B - ongeroerd	2.83	2.68	2.74	2.74	2.58	2.67	2.88	2.86	2.59	2.28	2.71
minimum	1.58	1.68	1.75	1.71	1.75	1.70	1.78	1.87	2.14	1.54	1.84
maximum	3.48	3.47	3.47	3.50	3.50	3.43	3.46	3.43	4.06	3.65	3.42
gemiddeld	2.88	2.90	2.85	2.83	2.81	2.81	2.83	2.82	3.22	2.87	2.90

3.1.4.4 MeFOSAA

Het verloop van de MeFOSAA uitputting is samengevat in één figuur, Figuur 21. Tabel 9 geeft het gemeten K_d verloop.



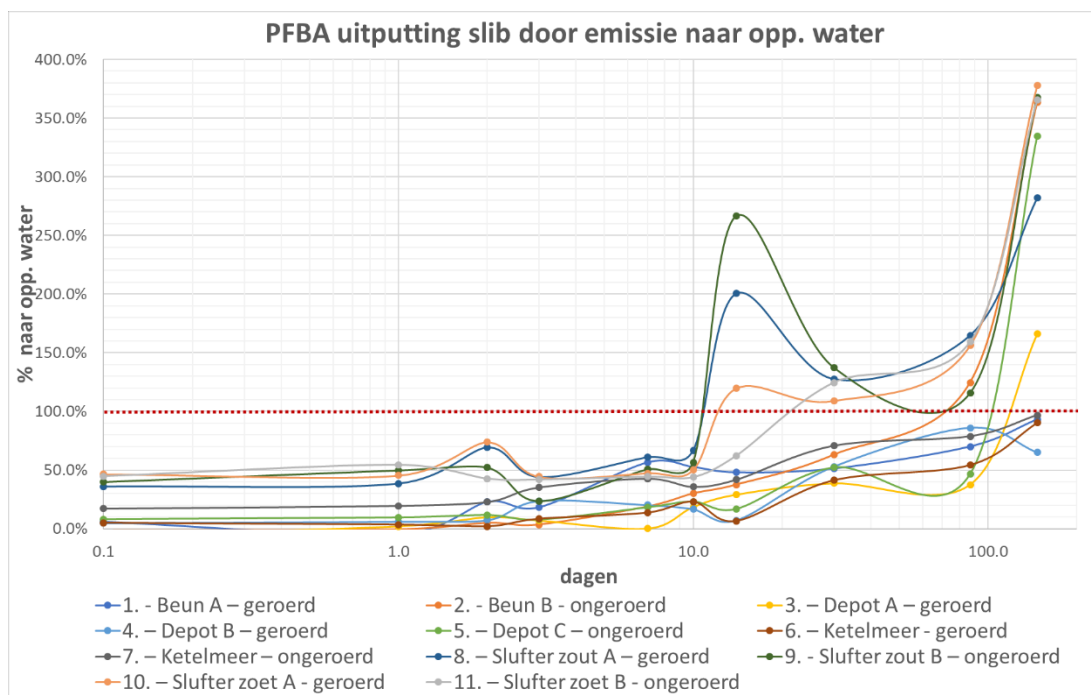
Figuur 21 uitputting MeFOSAA

Tabel 9 De gemeten partitie tussen oppervlaktewater en de baggerspecie – MeFOSAA

MeFOSAA K_d gecorr. voor uitputting	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	gem $\log(K_d)$
1. - Beun A – geroerd	2.20	2.29	2.28	2.29	2.24	2.27	2.31	2.48	3.10	2.56	2.51
2. - Beun B - ongeroerd	3.62	3.56	3.51	3.47	3.45	3.38	3.39	3.41	3.55	2.72	3.45
3. – Depot A – geroerd	2.67	2.69	2.71	2.70	2.74	2.69	2.75	2.82	3.44	3.00	2.90
4. – Depot B – geroerd	2.51	2.58	2.66	2.60	2.71	2.66	2.69	2.73	3.54	3.25	2.94
5. – Depot C – ongeroerd	3.79	3.75	3.72	3.68	3.64	3.55	3.54	3.53	3.14	2.80	3.59
6. – Ketelmeer - geroerd	4.07	4.03	4.00	3.99	4.07	4.00	4.12	4.37	3.43	4.21	4.08
7. – Ketelmeer – ongeroerd	5.61	5.02	4.78	4.85	4.78	4.66	4.80	4.75	3.48		4.99
8. – Slufter zout A – geroerd	3.01	2.91	2.88	2.87	2.95	3.05	3.06	3.08	3.49		3.08
9. - Slufter zout B – ongeroerd	3.70	3.78	3.65	3.59	3.39	3.71	3.68	3.40	3.38		3.61
10. – Slufter zoet A - geroerd	2.95	2.83	2.85	2.85	2.91	3.00	3.02	3.07	4.74	3.50	3.82
11. – Slufter zoet B - ongeroerd	3.56	3.48	3.53	3.46	3.42	3.48	3.62	3.67		3.14	3.51
minimum	2.20	2.29	2.28	2.29	2.24	2.27	2.31	2.48	3.10	2.56	2.51
maximum	5.61	5.02	4.78	4.85	4.78	4.66	4.80	4.75	4.74	4.21	4.99
gemiddeld	4.60	4.10	3.91	3.95	3.90	3.82	3.93	3.95	3.90	3.50	4.06

3.1.4.5 PFBA

Het verloop van de PFBA uitputting is samengevat in één figuur, Figuur 22. Tabel 10 geeft het gemeten K_d verloop.



Figuur 22 uitputting PFBA

Tabel 10 De gemeten partitie tussen oppervlaktewater en de baggerspecie – PFBA

PFBA K_d gecorr. voor uitputting	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	gem $\log(K_d)$
1. - Beun A – geroerd	2.21		1.49	1.61	0.84	0.91	0.99	0.92	0.56	-0.25	1.48
2. - Beun B - ongeroerd			2.26	2.41	1.60	1.33	1.17	0.71			1.94
3. - Depot A – geroerd		2.65	1.93	2.09	3.97	1.61	1.35	1.15	1.15		3.10
4. - Depot B – geroerd	2.29	2.17	2.07	1.48	1.56	1.66	2.06	0.89	0.15	0.61	1.84
5. - Depot C – ongeroerd					1.62	1.49	1.66	0.91	1.00		1.76
6. - Ketelmeer - geroerd	2.28	2.43	2.67	2.00	1.76	1.49	2.11	1.09	0.85	-0.13	2.10
7. - Ketelmeer – ongeroerd	1.68	1.59	1.50	1.23	1.09	1.22	1.11	0.57	0.34	-0.58	1.26
8. - Slufter zout A – geroerd	1.25	1.19	0.64	1.09	0.79	0.67					1.01
9. - Slufter zout B – ongeroerd	1.18	1.00	0.96	1.50	0.98	0.87					1.14
10. - Slufter zoet A - geroerd	1.06	1.08	0.55	1.10	1.03	0.98					1.00
11. - Slufter zoet B - ongeroerd	1.08	0.91	1.12	1.13	1.08	1.06	0.73				1.03
minimum	1.06	0.91	0.55	1.09	0.79	0.67	0.73	0.57	0.15	-0.58	1.00
maximum	2.29	2.65	2.67	2.41	3.97	1.66	2.11	1.15	1.15	0.61	3.10
gemiddeld	1.93	2.06	1.96	1.83	2.94	1.31	1.65	0.93	0.81	0.15	2.20

3.1.5 Discussie

3.1.5.1 De partiticoëfficiënt (K_d) als maat voor de emissie uit de waterbodem

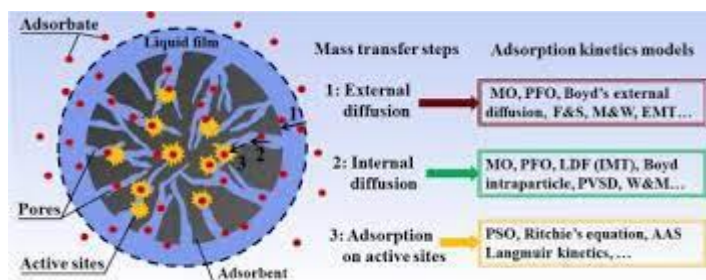
De gemeten partiticoëfficiënten voor PFOS, PFOA, EtFOSAA, MeFOSAA en PFBA (Tabel 6 – 10) zijn vaak sterk afhankelijk van wel of niet roeren en/of de tijdschaal van contact. Het verschil is meer dan een factor 100. Op deze twee oorzaken wordt nader ingegaan.

Reflecterend op het RIVM rapport “PFAS Achtergrondwaarden bodem Uitloogonderzoek, Verschil in uitloging van PFAS uit grond en bagger”, RIVM-briefrapport 2020-0102, A. Wintersen, 2020” (zoals ook weergegeven in Figuur 1 en Figuur 2) is het feit dat ook hier voor een aantal PFAS verbindingen een variatie met een factor 100 in de K_d wordt aangetroffen. In dit rapport wordt als mogelijke verklaring gekeken naar het organisch stof en lutum gehalte (de methodiek voor een standaard bodem correctie). In de in deze studie uitgevoerde proeven is echter vooral de contacttijd en het wel/niet roeren gevarieerd. Hierdoor treed een vergelijkbare mate van spreiding van de K_d waarden op. Een standaard bodem correctie op basis van het organisch stof of lutumgehalte alleen is niet voldoende. Andere processen zoals uitwisseling bij de storfase (shear) en de vorming van PFAS verbindingen uit precursors spelen een cruciale rol in de beschikbaarheid van PFAS in waterbodems.

3.1.5.2 Effect roeren (shear)

Naar het effect van roeren (shear) op sediment vlokvorming (aggregates) is veel onderzoek gedaan in relatie tot het beschrijven van sedimentatie/erosie processen. Over het effect van roeren op de bodem/water uitwisseling is minder bekend.

Weliswaar wordt bij het berekenen van het effect van baggeren en storten de uitwisseling met de pluim beschouwd, maar deze uitwisseling wordt beschreven op basis van de partitie (dit verondersteld evenwicht tussen de concentratie gebonden aan het sediment en de waterfase). Vanuit de theorie dat binding beschreven kan worden op basis van beschikbare bindingsplaatsen in het sediment (Langmuir isotherm) is dit correct (zie Figuur 23).

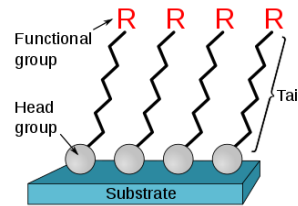


Figuur 23 Snelheids bepalende processen bij ad- en desorptie (Jianlong Wang, Xuan Guo: Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods, Journal of Hazardous Materials, Volume 390, 2020)

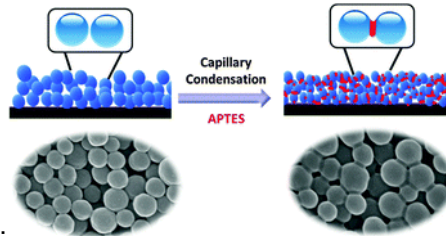
Echter, indien PFAS bindingen een afwijkende adsorptie vertoont waarbij b.v. de deeltjesvorm en porositeit een rol speelt kan het vrijkomen van PFAS beïnvloed worden door processen die de deeltjesvorm en porositeit beïnvloeden. Voorbeelden:

$$K_a c = \frac{\theta}{(1-\theta)} e^{-g'\theta}$$

1. Frumkin isotherm:



2. Self-assembled monolayers (SAM):

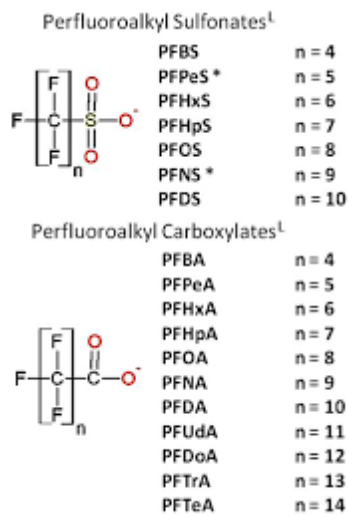


3. Capillaire condensatie:

De invloed van roeren (shear) verschilt per locatie en per PFAS verbinding. Voor PFOS en Et-FOSAA is het effect relatief sterk. Voor PFOA, MeFOSAA en PFBA is er relatief weinig effect door shear. Mogelijk heeft de functionele eindgroep van de PFAS verbinding, vaak een sulfonzuur of een carboxylzuur, invloed op de sterkte van de binding en de invloed van shear. Dit moet nader onderzocht worden.

3.1.5.3 Precursors

Precursors zijn bekende of onbekende PFAS verbindingen die af kunnen breken tot een andere PFAS component, meestal in de vorm van een stabiel eindproduct (een C-F ketenverbinding met alleen een sulfonzuur of carboxylzuur als functionele groep). Zo kan N-EtFOSAA afbreken tot PFOS, waarbij een deel van de niet gefluorideerde 'staart' van N-EtFOSAA (het carboxylzuur) afgebroken wordt en de gefluorideerde verbinding met sulfonzuurgroep (PFOS) overblijft (Figuur 24).



Figuur 24 Algemene structuurformule van sulfonzuur en carboxylzuur, n is het aantal C atomen in de CF verbinding (voor PFAS verbindingen met een carboxylzuur is het totaal aantal C atomen n+1).

De omzetting van precursors speelt vermoedelijk ook in de buiten proeven op een tijdschaal van meer dan 30 dagen. Indien de PFOS trend in Figuur 16 (bagger A-B uit depot IJsseloo) vergeleken wordt met de EtFOSAA trend in Figuur 20 (kijkend naar bagger A-B uit depot IJsseloo) dan valt op dat de PFOS concentratie in deze twee bakken na 30 dagen sterk oploopt terwijl de EtFOSAA concentratie daalt.

PFBA, een korte keten (C4) carboxylzuur PFAS, toont nog sterker aan dat de afbraak van precursors een rol speelt. Er wordt geen PFBA in de bagger gemeten (zie Tabel 3), maar indien uitgegaan wordt dat PFBA aanwezig is met een concentratie gelijk aan de rapportagegrens dan is de gemeten emissie van PFBA op basis van de concentratietoename in water tot 4x de PFBA hoeveelheid die in de bagger aanwezig had kunnen zijn. De grote vraag is welk precursor de bron is van PFBA. Vermoedelijk is dit een niet in het stoffenpakket van 31 PFAS verbindingen gemeten PFAS verbinding. Nieuwe analysetechnieken zoals de PFAS TOP analyse en de bepaling van de totale hoeveelheid organisch fluor kunnen helpen de oorsprong en mogelijke potentie tot naleveren op basis van precursor omzetting te duiden.

3.1.5.4 Impact voor bergen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots:

De invloed van shear op de emissie van de belangrijke PFAS verbinding PFOS laat zien dat voor baggerspecie met hoge PFOS concentraties een werkwijze met weinig shear en weinig contact met extra water de PFOS emissie tijdens baggeren en storten sterk (met een factor 15) kan reduceren. Deze partijen kunnen bijvoorbeeld met een kraan geplaatst worden.

Naast shear spelen ook precursors van PFOS en PFOA een belangrijke rol. De PFOS concentratie in het water van de proef met ongeroerd baggerspecie uit IJsseloo (depot C) na 150 dagen is een factor 35 hoger dan aan het begin van de proef. De emissie uit de waterbodem kan dit niet alleen verklaren, de waterbodem zou dan voor 80% uitgeput zijn aan PFOS. Voor de acceptatie van baggerspecie houdt dit in dat een PFAS bepaling op de aangeboden baggerspecie weinig zegt over de te verwachten emissie van PFOS (en andere stabiele PFAS eindproducten) naar oppervlakte- en grondwater.

Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen naar de condities waaronder deze omzetting plaatsvindt en eventueel voorkomen kan worden. Tevens wordt aanbevolen een analyse techniek te ontwikkelen om de potentieel te vormen hoeveelheid PFOS uit precursors te bepalen.

3.2 Experimenten in het CASTEL laboratorium

3.2.1 Opzet

De opzet is een verdiepingsslag van de buitenexperimenten. Hierbij staat de vraag centraal:

- Wat is de invloed van contacttijd op de nalevering van PFAS?
- Wat is de invloed van de verhouding tussen sediment en water op de nalevering van PFAS?

Hiertoe zijn twaalf sedimentmonsters genomen (zie Tabel 11), de vijf monsters voor de buitenexperimenten aangevuld met onderzoek naar de heterogeniteit binnen depot IJsseloo, materiaal uit depot Hollandsch Diep en een waterbodem uit een kleinschalig watersysteem. Voor deze twaalf monsters wordt;

- De contacttijd gevarieerd (1 uur – 24 uur – 72 uur).
- De Liquid to Solid ratio gevarieerd (L:S 2:1 – 10:1 – 50:1).

De proeven zijn uitgevoerd met HDPE flessen van 1 liter op een schudtafel. De kamertemperatuur bedroeg 20 °C. Bij de bepaling van de L:S ratio wordt het porievocht meegenomen. Er is met kraanwater aangevuld om een min of meer gelijke ion concentratie aan zouten te hebben als in oppervlaktewater. De monsters zijn voorafgaand aan filtratie over een 0,45 µm filter gecentrifugeerd op 4.500 rpm voor 10 minuten in 50 ml plastic centrifuge buizen. De gefiltreerde monsters zijn aangeleverd aan RWS CIV en daar geanalyseerd op PFAS.

Tabel 11 Locatie van de 12 monsters voor de schudproeven, depot = IJsseloog, de codes M13 – M24 worden gebruikt voor de rapportage van de resultaten.

Monster	Loc
1 depot lospunt	M13
2 depot oost	M14
3 depot west	M15
4 depot voor retoursloot	M16
5 depot bij loswal	M17
6 beun Franeker	M18
7 Ketelmeer, geul natuureiland	M19
8 Loosdrecht, vak 593	M20
9 Slufter zout	M21
10 Slufter zoet	M22
11 Haringvliet lospunt A	M23
12 Haringvliet lospunt B	M24

3.2.2 Fingerprint van PFAS verbindingen in de waterfase per locatie

Er wordt ingezoomd op:

- PFOS
- PFOA
- PFBA

De resultaten voor PFOS staan samengevat in Tabel 12.

Tabel 12 Resultaten schudproeven voor PFOS, variatie in schudtijd en Solid to Liquid ratio

1:2				
24				
MonstLoc	Opgelost			Vaste fase
	Br. PFOS	L. PFOS	PFOS (ng/l)	PFOS (µg/kg)
1 M01	8.56	33.14	41.71	0.90
2 M02	9.36	32.50	41.87	1.50
3 M03	6.59	20.35	26.94	1.20
4 M04	8.76	28.38	37.13	1.60
5 M05	8.44	30.74	39.18	1.00
6 M06	2.98	8.37	11.34	0.40
7 M07	2.26	7.13	9.38	1.00
8 M08	5.05	6.78	11.83	0.10
9 M09	2.58	4.77	7.36	0.20
10 M10	2.40	14.14	16.54	0.90
11 M11	0.98	4.09	5.06	0.10
12 M12	6.51	28.11	34.62	1.50

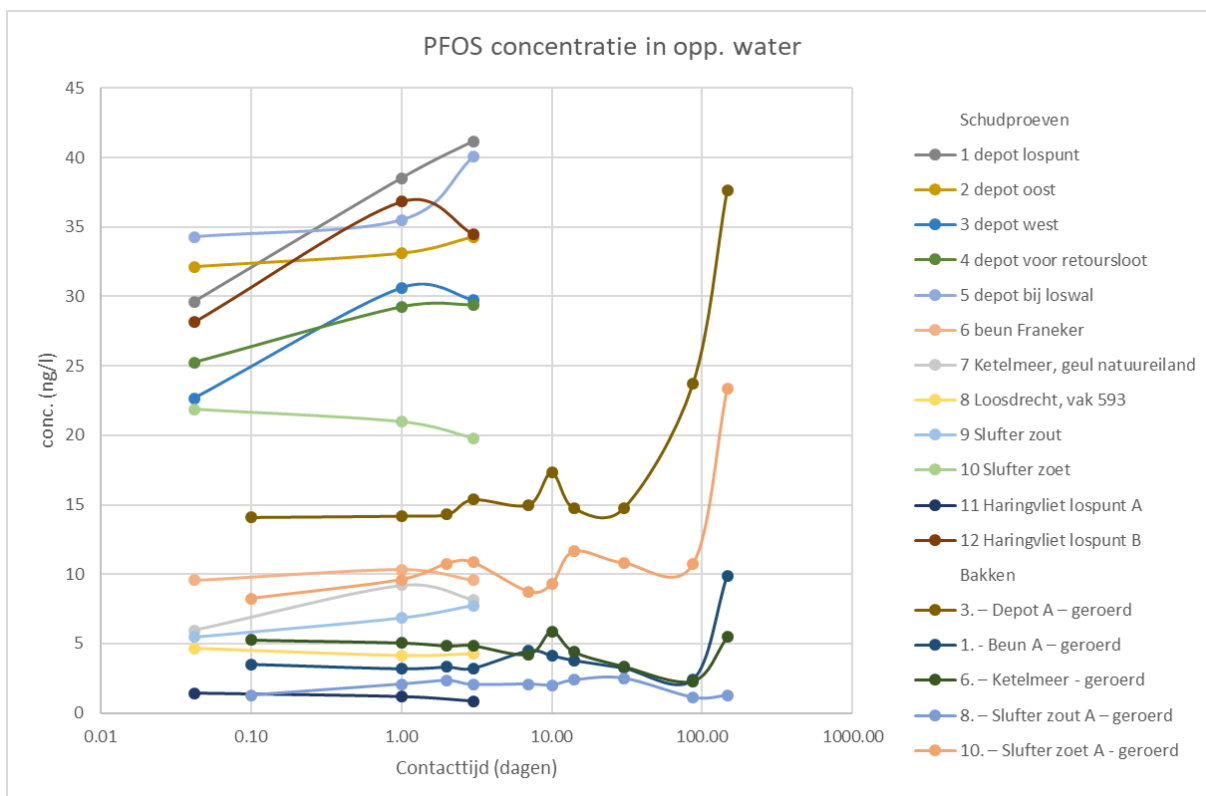
1:10				
1				
MonstLoc	Opgelost			Vaste fase
	Br. PFOS	L. PFOS	PFOS (ng/l)	PFOS (µg/kg)
1 M13	4.43	25.19	29.62	0.90
2 M14	9.22	22.92	32.13	1.50
3 M15	5.50	17.16	22.66	1.20
4 M16	7.86	17.37	25.23	1.60
5 M17	6.27	28.00	34.27	1.00
6 M18	2.46	7.10	9.56	0.40
7 M19	1.78	4.15	5.92	1.00
8 M20	1.33	3.33	4.65	0.10
9 M21	2.11	3.35	5.46	0.20
10 M22	2.77	19.09	21.85	0.90
11 M23	0.23	1.20	1.44	0.10
12 M24	3.68	24.46	28.14	1.50

1:10				
24				
MonstLoc	Opgelost			Vaste fase
	Br. PFOS	L. PFOS	PFOS (ng/l)	PFOS (µg/kg)
1 M25	5.95	32.56	38.51	0.90
2 M26	8.51	24.58	33.10	1.50
3 M27	6.81	23.80	30.61	1.20
4 M28	8.14	21.10	29.24	1.60
5 M29	7.12	28.38	35.50	1.00
6 M30	2.38	7.95	10.33	0.40
7 M31	2.49	6.72	9.21	1.00
8 M32	1.50	2.64	4.14	0.10
9 M33	3.21	3.64	6.84	0.20
10 M34	2.55	18.41	20.96	0.90
11 M35	0.21	0.97	1.18	0.10
12 M36	4.36	32.46	36.83	1.50

1:10				
72				
MonstLoc	Opgelost			Vaste fase
	Br. PFOS	L. PFOS	PFOS (ng/l)	PFOS (µg/kg)
1 M37	7.72	33.44	41.17	0.90
2 M38	8.22	26.05	34.27	1.50
3 M39	7.11	22.63	29.74	1.20
4 M40	8.26	21.13	29.39	1.60
5 M41	7.11	32.95	40.06	1.00
6 M42	2.25	7.32	9.58	0.40
7 M43	1.93	6.24	8.17	1.00
8 M44	2.20	2.07	4.27	0.10
9 M45	3.65	4.08	7.73	0.20
10 M46	2.56	17.23	19.78	0.90
11 M47	0.22	0.64	0.85	0.10
12 M48	4.53	29.98	34.51	1.50

1:50				
24				
MonstLoc	Opgelost			Vaste fase
	Br. PFOS	L. PFOS	PFOS (ng/l)	PFOS (µg/kg)
1 M49	1.00	7.67	8.67	0.90
2 M50	3.97	14.97	18.94	1.50
3 M51	2.43	10.50	12.93	1.20
4 M52	4.11	14.23	18.34	1.60
5 M53	1.62	15.14	16.76	1.00
6 M54	0.80	3.77	4.58	0.40
7 M55	0.71	3.65	4.36	1.00
8 M56	0.43	0.98	1.41	0.10
9 M57	0.84	0.64	1.48	0.20
10 M58	0.85	7.14	7.99	0.90
11 M59	0.04	0.27	0.31	0.10
12 M60	1.12	6.77	7.89	1.50

Voor een L:S ratio van 10:1 (gelijk aan de m³ bakken) zijn de resultaten in Figuur 25 vergeleken met de buitenexperimenten.



Figuur 25 PFOS concentratieverloop in de waterfase, schudproeven versus buitenexperimenten

De resultaten voor PFOA staan samengevat in Tabel 13.

Tabel 13 Resultaten schudproeven voor PFOA, variatie in schudtijd en Solid to Liquid ratio

1:2 24			
MonstLoc	Opgelost		Vaste fase
	PFOA	PFOA (ng/l)	PFOA (µg/kg)
1 M01	6.303302447	6.30	0.1
2 M02	9.795564324	9.80	0.1
3 M03	7.184379724	7.18	0.1
4 M04	8.049327192	8.05	0.1
5 M05	6.373605443	6.37	0.1
6 M06	5.133049382	5.12	0.1
7 M07	6.385872723	6.39	0.1
8 M08	13.67120746	13.67	0.1
9 M09	5.72142078	5.72	0.1
10 M10	8.28920577	8.29	0.1
11 M11	2.624158994	2.62	0.1
12 M12	12.54153917	12.54	0.2

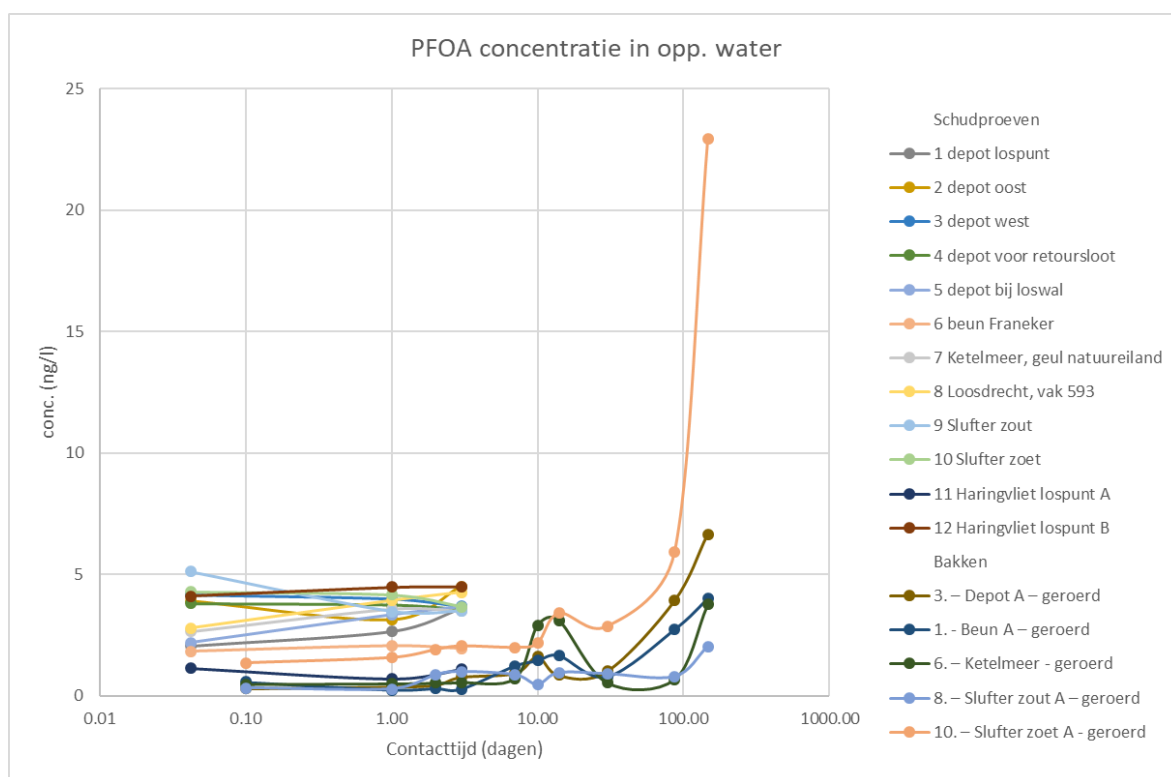
1:10 1			
MonstLoc	Opgelost		Vaste fase
	PFOA	PFOA (ng/l)	PFOA (µg/kg)
1 M13	2.051904023	2.05	0.1
2 M14	3.907697368	3.91	0.1
3 M15	4.149975246	4.15	0.1
4 M16	3.802864292	3.80	0.1
5 M17	2.186131235	2.19	0.1
6 M18	1.823060385	1.82	0.1
7 M19	2.651160708	2.65	0.1
8 M20	2.784644053	2.78	0.1
9 M21	5.118231787	5.12	0.1
10 M22	4.275213917	4.28	0.1
11 M23	1.135683746	1.14	0.1
12 M24	4.090536327	4.09	0.2

1:10 24			
MonstLoc	Opgelost		Vaste fase
	PFOA	PFOA (ng/l)	PFOA (µg/kg)
1 M25	2.648768774	2.65	0.1
2 M26	3.132980846	3.13	0.1
3 M27	3.982645707	3.98	0.1
4 M28	3.746319641	3.75	0.1
5 M29	3.338580766	3.34	0.1
6 M30	2.044006731	2.04	0.1
7 M31	3.569570054	3.57	0.1
8 M32	3.914698885	3.91	0.1
9 M33	3.460510698	3.46	0.1
10 M34	4.147808052	4.15	0.1
11 M35	0.682304346	0.68	0.1
12 M36	4.468398417	4.47	0.2

1:10 72			
MonsteLoc	Opgelost		Vaste fase
	PFOA	PFOA (ng/l)	PFOA (µg/kg)
1 M37	3.580509966	3.58	0.1
2 M38	4.50511966	4.51	0.1
3 M39	3.673844002	3.67	0.1
4 M40	3.558117658	3.56	0.1
5 M41	3.668301896	3.67	0.1
6 M42	1.937894924	1.94	0.1
7 M43	3.48937433	3.49	0.1
8 M44	4.251120512	4.25	0.1
9 M45	3.479810468	3.48	0.1
10 M46	3.661319814	3.66	0.1
11 M47	1.090417709	1.09	0.1
12 M48	4.488187091	4.49	0.2

1:50 24			
MonstLoc	Opgelost		Vaste fase
	PFOA	PFOA (ng/l)	PFOA (µg/kg)
1 M49	1.766807376	1.77	0.1
2 M50	1.415035585	1.42	0.1
3 M51	1.235048419	1.24	0.1
4 M52	1.660091239	1.66	0.1
5 M53	1.074395928	1.07	0.1
6 M54	0.648883605	0.65	0.1
7 M55	1.411638943	1.41	0.1
8 M56	1.446441384	1.45	0.1
9 M57	2.69407485	2.69	0.1
10 M58	1.677872974	1.68	0.1
11 M59	0.277599548	0.28	0.1
12 M60	1.654037845	1.65	0.2

Voor een L:S ratio van 10:1 (gelijk aan de m³ bakken) zijn de resultaten in Figuur 26 vergeleken met de buitenexperimenten.



Figuur 26 PFOA concentratieverloop in de waterfase, schudproeven versus buitenexperimenten

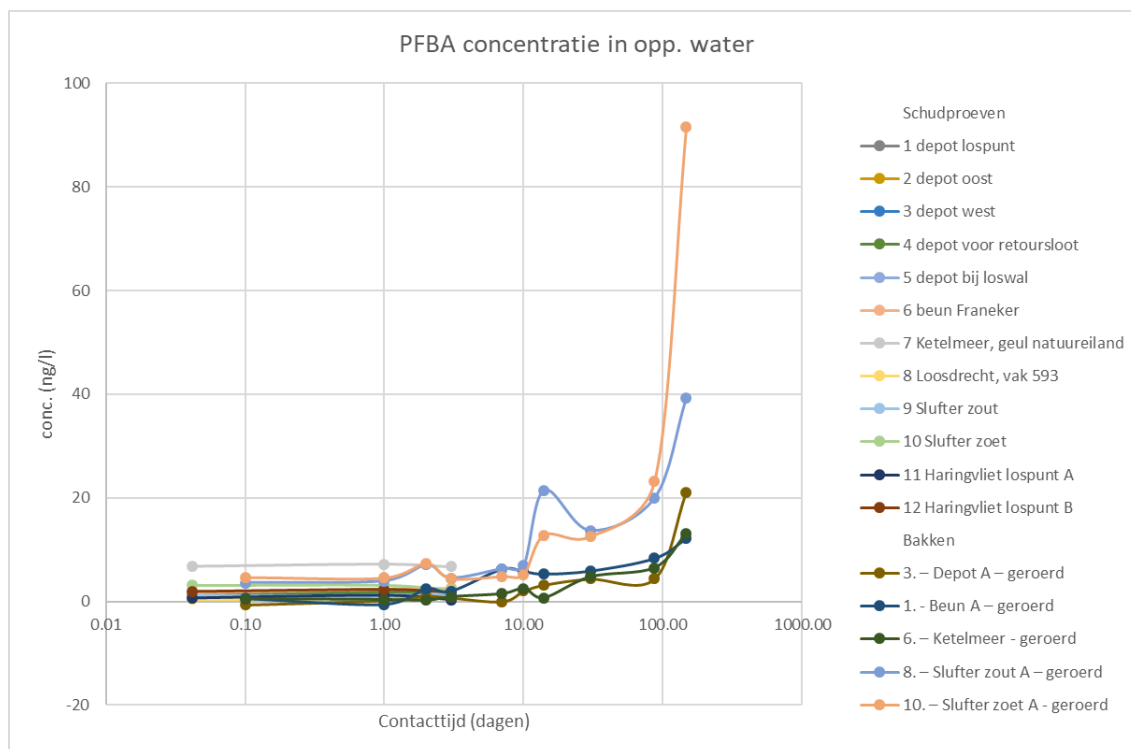
De resultaten voor PFBA staan samengevat in Tabel 14.

Tabel 14 Resultaten schudproeven voor PFBA, variatie in schudtijd en Solid to Liquid ratio

		1:2		1:10		1:10		1:10			
		24		24		72		72			
		Opgelost		Opgelost		Opgelost		Opgelost			
MonstLoc	PFBA	PFBA (ng/l)	PFBA (µg/kg)	MonstLoc	PFBA	PFBA (ng/l)	PFBA (µg/kg)	MonstLoc	PFBA		
1 M01	3.91	3.91	0.10	1 M25	0.89	0.89	0.10	1 M37	0.84	0.84	0.10
2 M02	7.43	7.43	0.10	2 M26	1.90	1.90	0.10	2 M38	1.72	1.72	0.10
3 M03	6.59	6.59	0.10	3 M27	1.88	1.88	0.10	3 M39	1.54	1.54	0.10
4 M04	7.72	7.72	0.10	4 M28	1.84	1.84	0.10	4 M40	1.64	1.64	0.10
5 M05	3.83	3.83	0.10	5 M29	1.09	1.09	0.10	5 M41	0.99	0.99	0.10
6 M06	25.61	25.61	0.10	6 M30	2.39	2.39	0.10	6 M42	2.57	2.57	0.10
7 M07	31.40	31.40	0.10	7 M31	7.20	7.20	0.10	7 M43	6.76	6.76	0.10
8 M08	3.38	3.38	0.10	8 M32	0.61	0.61	0.10	8 M44	0.87	0.87	0.10
9 M09	14.86	14.86	0.10	9 M33	0.91	0.91	0.10	9 M45	1.89	1.89	0.10
10 M10	11.16	11.16	0.10	10 M34	3.12	3.12	0.10	10 M46	2.23	2.23	0.10
11 M11	2.17	2.17	0.10	11 M35	1.20	1.20	0.10	11 M47	0.38	0.38	0.10
12 M12	7.21	7.21	0.10	12 M36	2.33	2.33	0.10	12 M48	1.88	1.88	0.10

		1:10		1:10		1:50	
		24		24		24	
		Opgelost		Opgelost		Opgelost	
MonstLoc	PFBA	PFBA (ng/l)	PFBA (µg/kg)	MonstLoc	PFBA	PFBA (ng/l)	PFBA (µg/kg)
1 M13	0.94	0.94	0.10	1 M49	0.50	0.50	0.10
2 M14	1.62	1.62	0.10	2 M50	0.49	0.49	0.10
3 M15	1.25	1.25	0.10	3 M51	0.36	0.36	0.10
4 M16	1.49	1.49	0.10	4 M52	0.43	0.43	0.10
5 M17	0.77	0.77	0.10	5 M53	0.59	0.59	0.10
6 M18	1.59	1.59	0.10	6 M54	1.17	1.17	0.10
7 M19	6.86	6.86	0.10	7 M55	1.59	1.59	0.10
8 M20	0.47	0.47	0.10	8 M56	0.19	0.19	0.10
9 M21	1.30	1.30	0.10	9 M57	0.35	0.35	0.10
10 M22	3.10	3.10	0.10	10 M58	0.93	0.93	0.10
11 M23	0.69	0.69	0.10	11 M59	0.11	0.11	0.10
12 M24	1.99	1.99	0.10	12 M60	0.53	0.53	0.10

Voor een L:S ratio van 10:1 (gelijk aan de m³ bakken) zijn de resultaten in Figuur 27 vergeleken met de buitenexperimenten.



Figuur 27 PFBA concentratieverloop in de waterfase, schudproeven versus buitenexperimenten

3.2.3 Fingerprint van PFAS verbindingen in de vaste fase per locatie

Voor de vaste fase wordt het percentage uitputting tijdens de schudexperimenten vergeleken met de uitputting tijdens de buitenexperimenten. Tabel 15 – 17 geven de resultaten voort PFOS, PFOA en PFBA.

Tabel 15 PFOS uitputting vaste fase tijdens de experimenten, schudproef en buiten (m³ bakken).

Monster	Bak	PFOS (µg/kg)	L/S 10, contacttijd in dagen		
			0.04	1.0	3.0
			% uitputting	% uitputting	% uitputting
1 depot lospunt	3. – Depot A – geroerd	0.90	25%	30%	31%
2 depot oost		1.50	18%	18%	19%
3 depot west		1.20	16%	20%	20%
4 depot voor retoursloot		1.60	14%	16%	16%
5 depot bij loswal		1.00	26%	26%	29%
6 beun Franeker	1. – Beun A – geroerd	0.40	19%	21%	19%
7 Ketelmeer, geul natuureiland	6. – Ketelmeer - geroerd	1.00	6%	8%	8%
8 Loosdrecht, vak 593		0.10	33%	29%	31%
9 Slufter zout	8. – Slufter zout A – geroerd	0.20	21%	26%	28%
10 Slufter zoet	10. – Slufter zoet A - geroerd	0.90	20%	19%	18%
11 Haringvliet lospunt A		0.10	13%	11%	8%
12 Haringvliet lospunt B		1.50	16%	20%	19%

Bak	Bakken, contacttijd in dagen									
	0.10	1.0	2.0	3.0	7.0	10	14	30	87	147
	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting
3. – Depot A – geroerd	36%	34%	34%	36%	35%	41%	34%	33%	52%	76%
1. – Beun A – geroerd	21%	17%	18%	17%	24%	22%	20%	17%	12%	45%
6. – Ketelmeer - geroerd	5%	5%	4%	4%	4%	5%	4%	3%	2%	4%
8. – Slufter zout A – geroerd	6%	10%	11%	10%	10%	10%	11%	12%	5%	5%
10. – Slufter zoet A - geroerd	9%	11%	12%	12%	10%	10%	12%	10%	8%	11%

Tabel 16 PFOA uitputting vaste fase tijdens de experimenten, schudproef en buiten (m³ bakken).

Monster	Bak	PFOA (µg/kg)	L/S 10, contacttijd in dagen		
			0.04	1.0	3.0
			% uitputting	% uitputting	% uitputting
1 depot lospunt	3. – Depot A – geroerd	0.1	21%	21%	36%
2 depot oost		0.1	39%	24%	45%
3 depot west		0.1	42%	28%	37%
4 depot voor retoursloot		0.1	38%	27%	36%
5 depot bij loswal		0.1	22%	25%	37%
6 beun Franeker	1. – Beun A – geroerd	0.1	18%	17%	19%
7 Ketelmeer, geul natuureiland	6. – Ketelmeer - geroerd	0.1	27%	26%	35%
8 Loosdrecht, vak 593		0.1	30%	28%	46%
9 Slufter zout	8. – Slufter zout A – geroerd	0.1	51%	26%	35%
10 Slufter zoet	10. – Slufter zoet A - geroerd	0.1	43%	29%	37%
11 Haringvliet lospunt A		0.1	11%	6%	11%
12 Haringvliet lospunt B		0.2	21%	19%	24%

Bak	PFOA (µg/kg)	Bakken, contacttijd in dagen									
		0.10	1.0	2.0	3.0	7.0	10	14	30	87	147
		% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	% uitputting	
3. – Depot A – geroerd	0.1	3%	3%	4%	7%	9%	15%	8%	9%	33%	52%
	0.1										
	0.1										
	0.1										
1. – Beun A – geroerd	0.1	6%	2%	3%	3%	11%	13%	15%	7%	23%	31%
6. – Ketelmeer - geroerd	0.1	5%	5%	5%	5%	7%	27%	28%	5%	6%	26%
	0.1										
8. – Slufter zout A – geroerd	0.1	3%	3%	8%	10%	8%	4%	9%	8%	7%	14%
10. – Slufter zoet A - geroerd	0.1	13%	16%	19%	20%	19%	21%	32%	25%	40%	95%
	0.1										
	0.2										

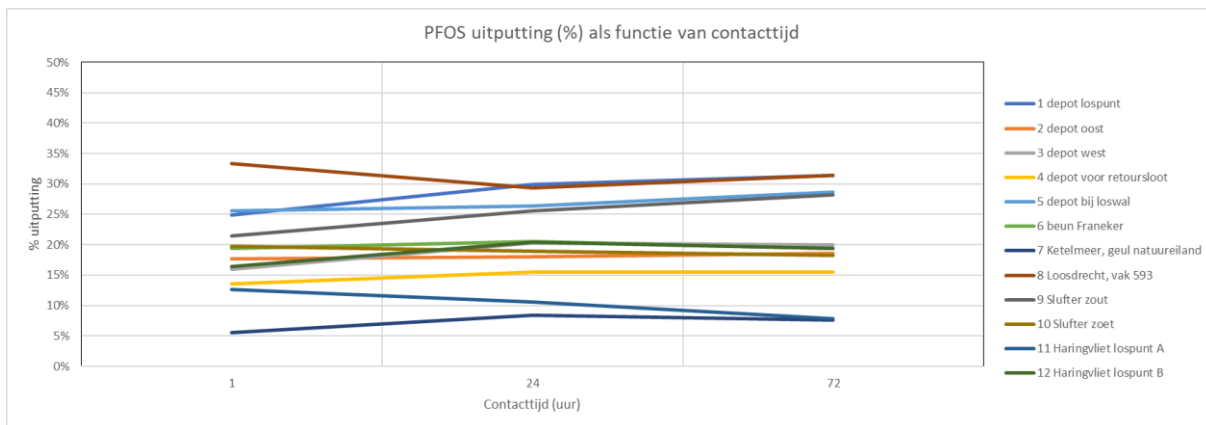
Tabel 17 PFBA uitputting vaste fase tijdens de experimenten, schudproef en buiten (m³ bakken).

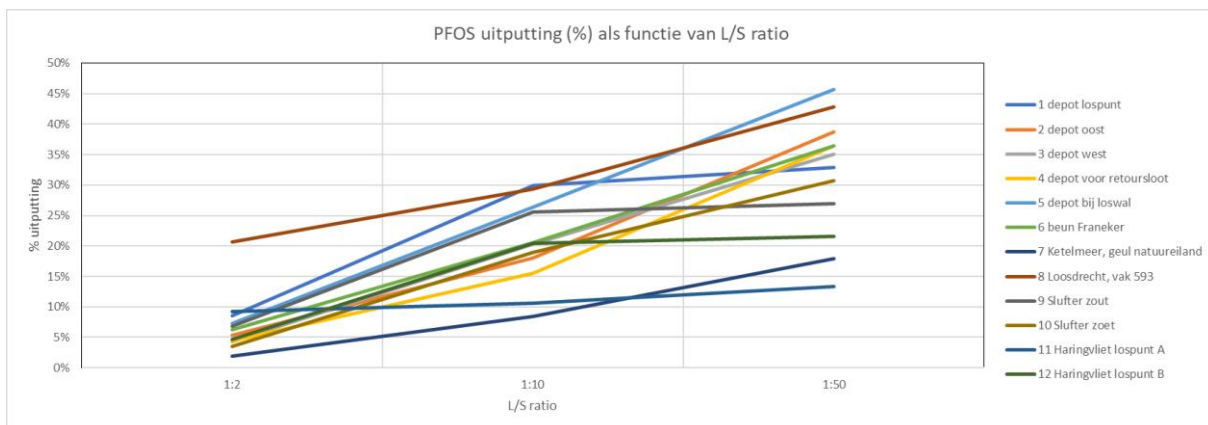
Monster	Bak	PFBA (µg/kg)	L/S 10, contacttijd in dagen		
			0.04	1.0	3.0
1 depot lospunt	3. – Depot A – geroerd	0.10	9%	8%	8%
2 depot oost		0.10	16%	16%	17%
3 depot west		0.10	12%	16%	15%
4 depot voor retoursloot		0.10	15%	16%	16%
5 depot bij loswal		0.10	8%	10%	10%
6 beun Franeker	1. – Beun A – geroerd	0.10	16%	19%	26%
7 Ketelmeer, geul natuureiland	6. – Ketelmeer - geroerd	0.10	69%	42%	68%
8 Loosdrecht, vak 593		0.10	5%	6%	9%
9 Slufter zout	8. – Slufter zout A – geroerd	0.10	13%	8%	19%
10 Slufter zoet	10. – Slufter zoet A - geroerd	0.10	31%	24%	23%
11 Haringvliet lospunt A		0.10	7%	11%	4%
12 Haringvliet lospunt B		0.10	21%	20%	20%

Bak	PFBA (µg/kg)	Bakken, contacttijd in dagen									
		0.10	1.0	2.0	3.0	7.0	10	14	30	87	147
3. – Depot A – geroerd	0.10	-6%	2%	10%	7%	0%	19%	29%	39%	38%	166%
	0.10										
	0.10										
	0.10										
1. – Beun A – geroerd	0.10	6%	-5%	23%	18%	56%	53%	48%	51%	70%	93%
6. – Ketelmeer - geroerd	0.10	5%	3%	2%	8%	14%	23%	7%	41%	54%	90%
	0.10										
8. – Slufter zout A – geroerd	0.10	36%	39%	69%	44%	61%	67%	200%	128%	165%	282%
10. – Slufter zoet A - geroerd	0.10	47%	45%	74%	44%	47%	50%	120%	109%	156%	378%
	0.10										
	0.10										

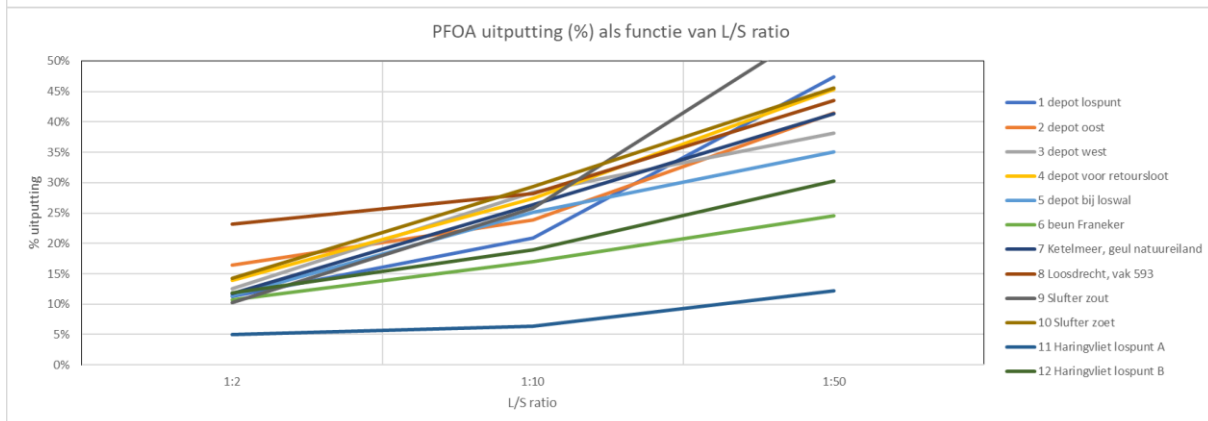
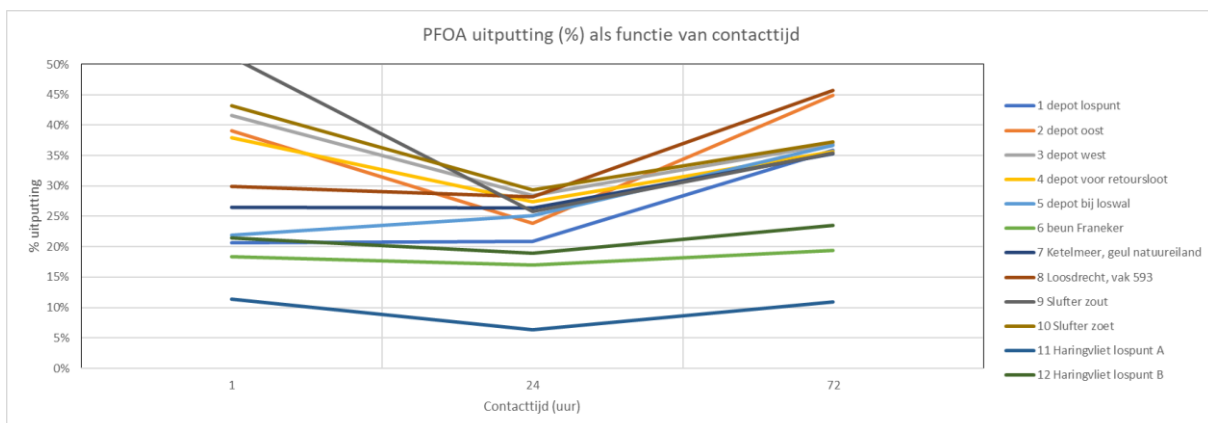
3.2.4 Resultaten

De resultaten van de waterfase c.q. vaste fase concentraties kunnen ook worden uitgedrukt in de verdeling coëfficiënt (K_d). Indien er evenwicht is maakt de contacttijd en de L:S ratio niet uit voor de verdeling coëfficiënt. Tabel 12 – 14 laat zien dat de K_d niet constant is. Figuur 28 – 30 voor PFOS, PFOA en PFBA drukt deze variatie in partitie uit in de mate van uitputting van de vaste fase.

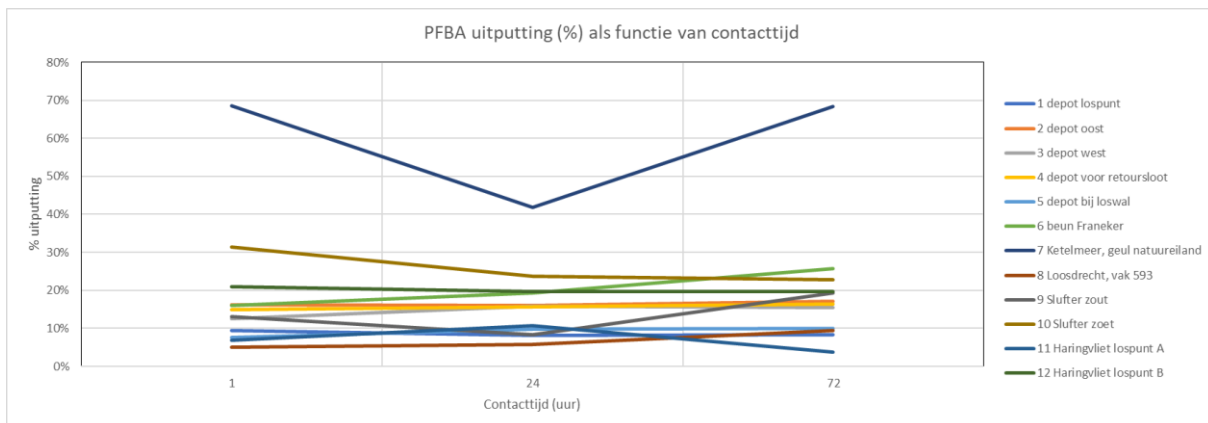


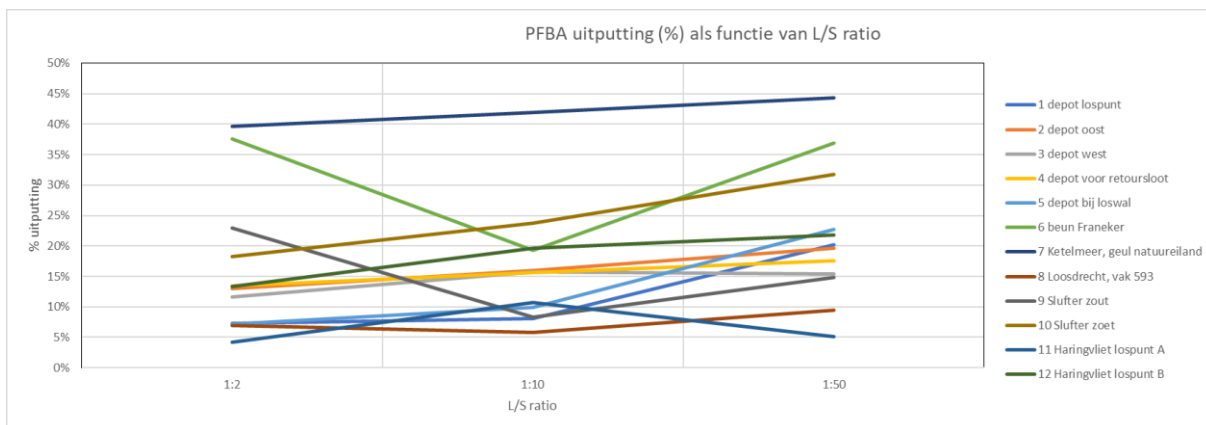


Figuur 28 Mate van PFOS uitputting als functie van contacttijd (L:S 10:1) en L:S ratio (contacttijd 24 uur)



Figuur 29 Mate van PFOA uitputting als functie van contacttijd (L:S 10:1) en L:S ratio (contacttijd 24 uur)





Figuur 30 Mate van PFBA uitputting als functie van contacttijd (L:S 10:1) en L:S ratio (contacttijd 24 uur)

3.2.5 Discussie

3.2.5.1 Vergelijking schudexperimenten met buitenexperimenten

De schudexperimenten laten zien dat de beschikbaarheid van PFOS, PFOA en PFBA hoger is dan voor de buitenexperimenten op een tijdschaal tot 10 dagen. Echter op een tijdschaal van meer dan 100 dagen piekt de concentratie in de buitenexperimenten tot boven de waarden in de schudproeven. Dit illustreert dat:

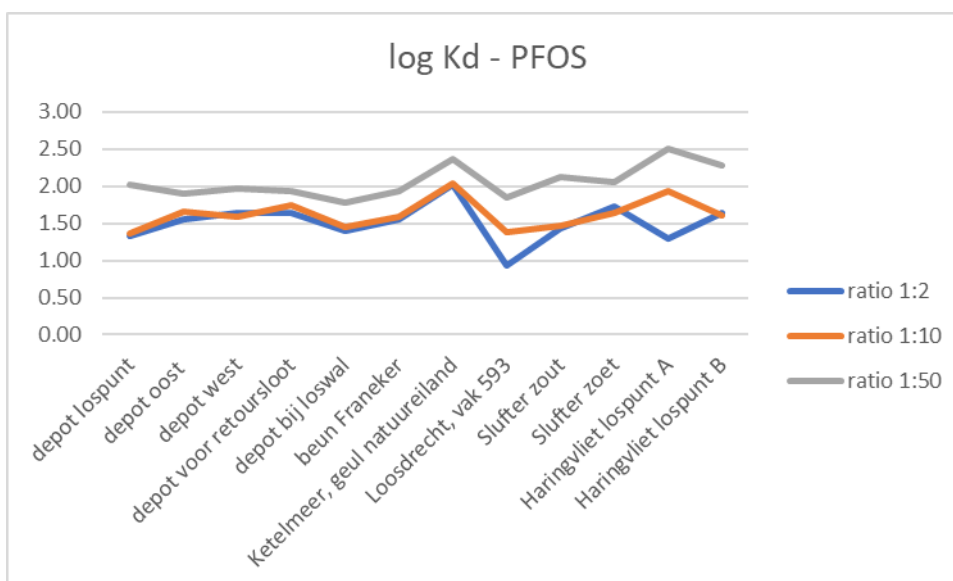
- Precursors nog geen rol spelen op de tijdschaal van de schudexperimenten (72 uur)
- Shear (schudden of roeren) voor een aantal PFAS verbindingen (PFOS en PFOA) het dominante proces is voor het vrijkomen naar de waterfase

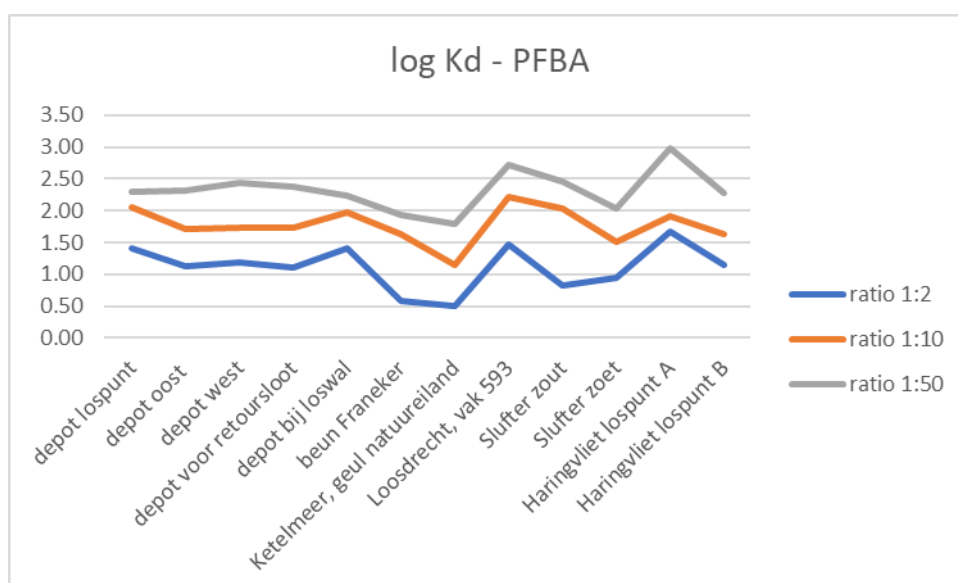
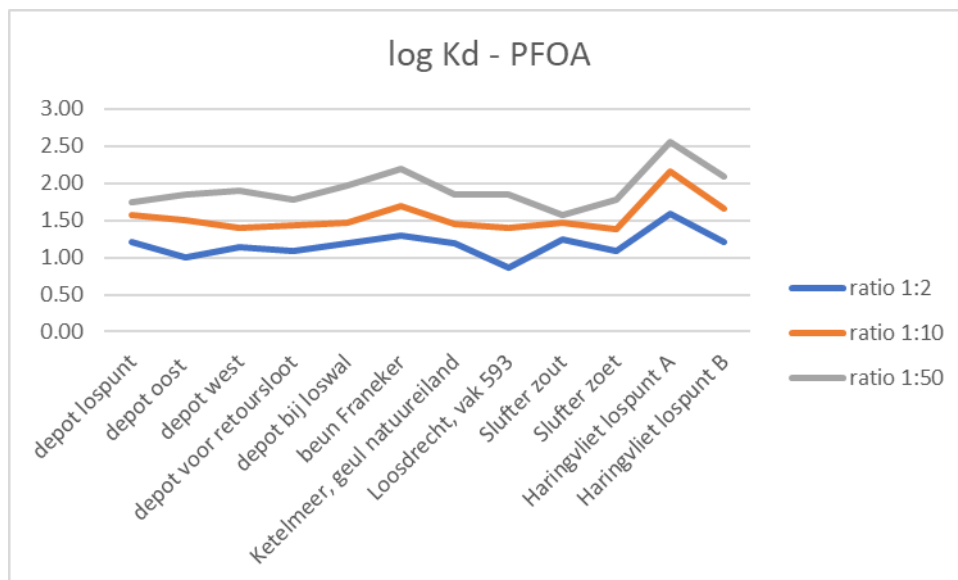
3.2.5.2 Effect contacttijd op de nalevering naar de waterfase

Voor PFOS, PFOA en PFBA is de variatie in uitputting als functie van de schudtijd (van 1 tot 72 uur, zie Figuur 28 - 30) relatief gering. Het effect van shear is instantaan.

3.2.5.3 Effect Liquid to Solid (L:S) ratio op nalevering naar de waterfase

Het effect van de L:S ratio op de K_d is weergegeven in Figuur 31.





Figuur 31 Effect L:S ratio op K_d voor PFOS, PFOA en PFBA

Uit Figuur 31 blijkt vooral bij een L:S ratio van 50:1 dat er uitputting van de vaste fase plaatsvindt (zie ook de Figuren 28-30, met uitputting tot 50% van de vaste fase). Het gebruik van meer werkwater leidt weliswaar niet tot een lineaire toename van de emissie, maar draagt wel bij aan een belangrijke massaoverdracht van PFAS verbindingen van de vaste fase naar de waterfase.

De relatieve afvlakking van de nalevering bij toenemende L:S ratio, uitgedrukt in de toename van de K_d zoals weergegeven in Figuur 31, kan als oorzaak een niet tot zeer moeilijk desorberende PFAS fractie gebonden aan sediment hebben. Dit naar analogie van de binding van organische microverontreinigingen zoals PAK's en PCB's aan de roetfractie in bodems (zie Gerard Cornelissen et al, Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation, 2005, Environmental science & technology Volume 39, Pages 6881-6895).

3.2.5.4 Impact voor bergen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots:

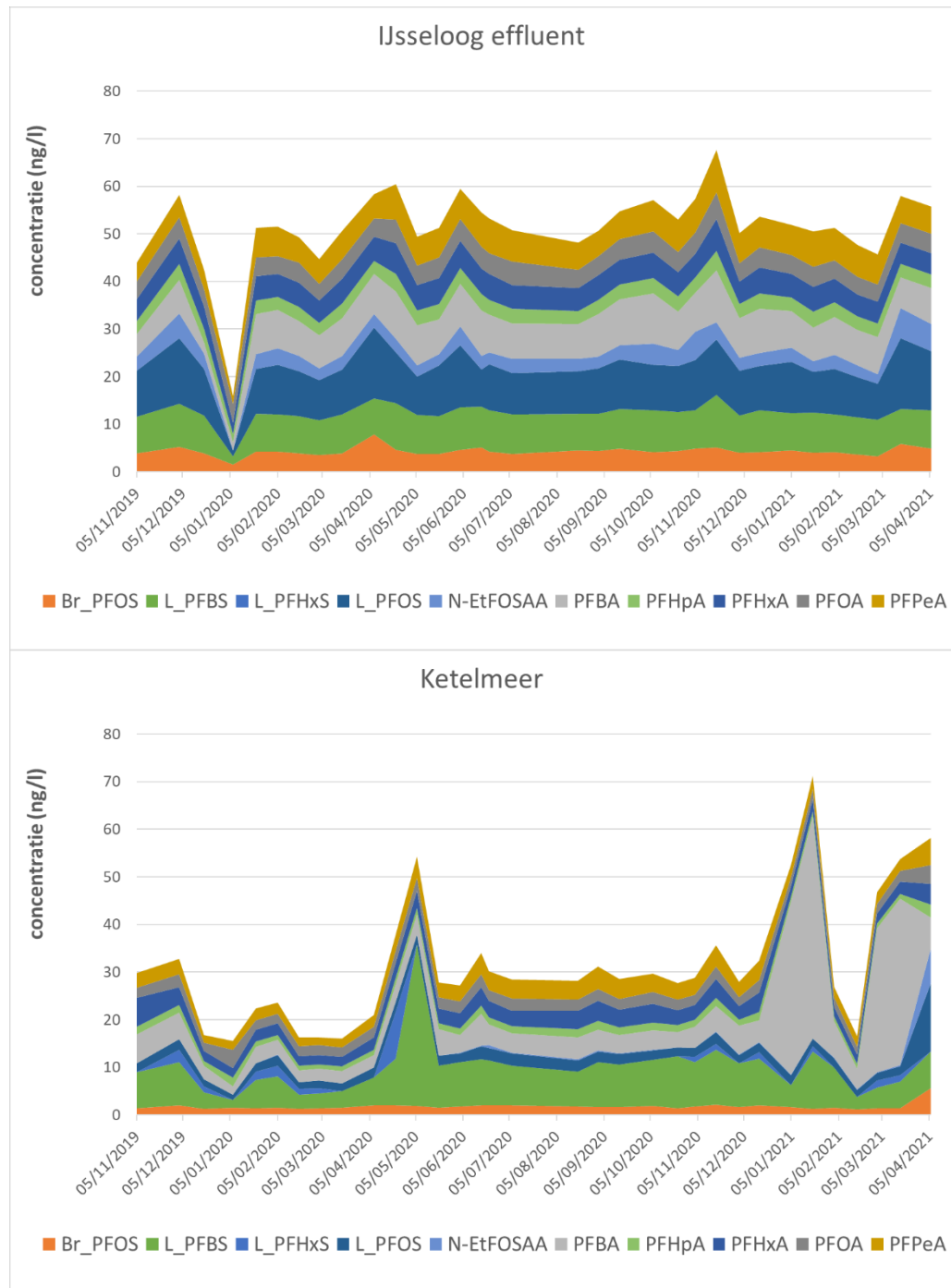
De schudexperimenten tonen, evenals de buitenexperimenten, aan dat shear een belangrijke rol speelt in de nalevering van PFAS verbindingen naar de waterfase. Daar waar bij veel organische microverontreinigingen kinetiek een rol speelt is de nalevering van PFAS verbindingen door schudden of roeren instantaan. Dit pleit om met PFAS verontreinigde baggerspecie bij baggeren en plaatsen zo min mogelijk te verstoren.

Ook het gebruik van werkwater dient zoveel mogelijk vermeden te worden. Weliswaar is er enige afvlakking van de nalevering bij het toevoegen van veel (verhouding 50 staat tot 1) water, er is dan al tot 50% van de PFAS verbindingen (gevalideerd voor PFOS, PFOA en PFBA) naar de waterfase uitgeloozd.

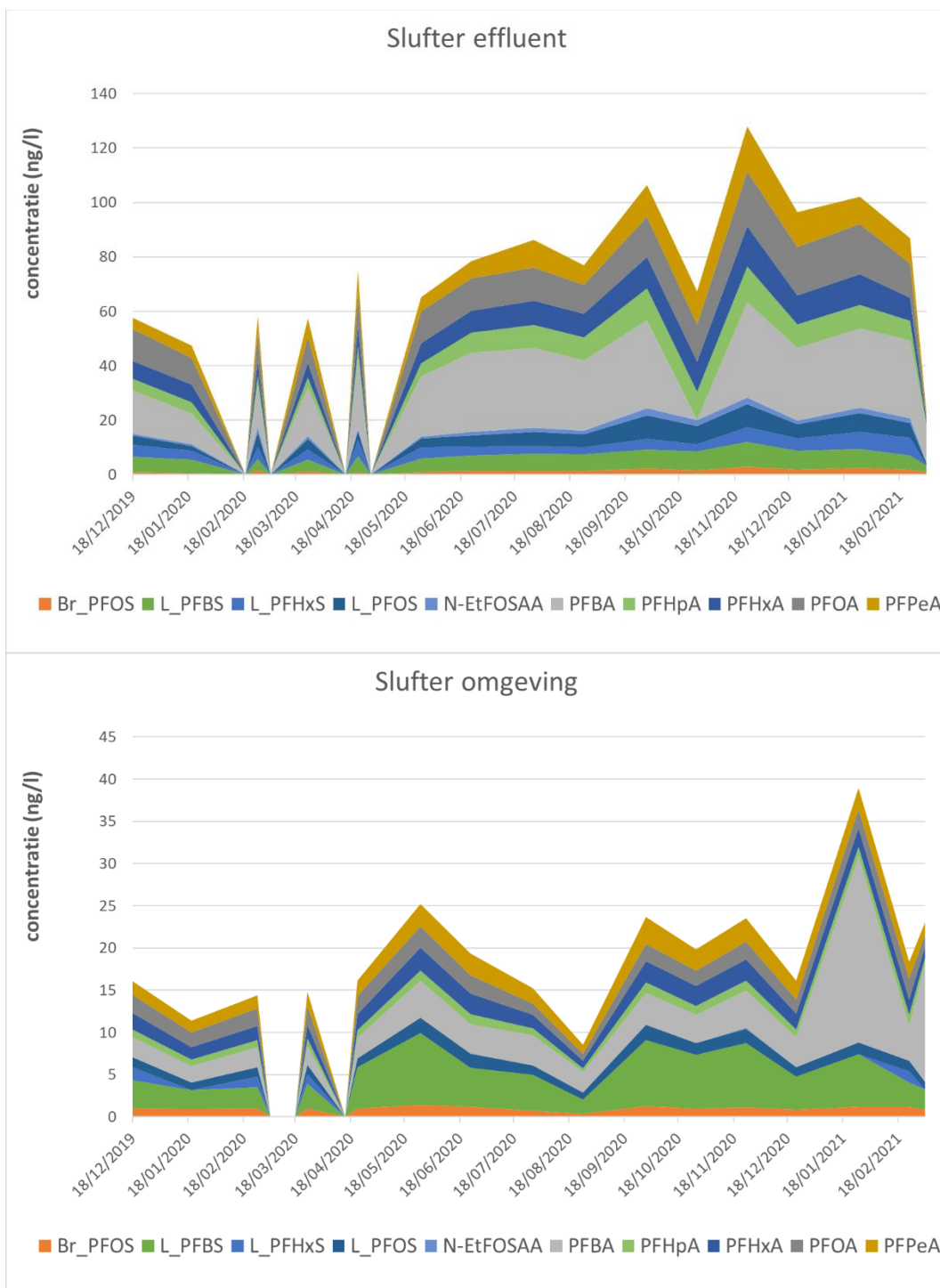
4 De PFAS depotconcentratie versus de omgeving

4.1 Variatie in de PFAS concentraties oppervlaktewater

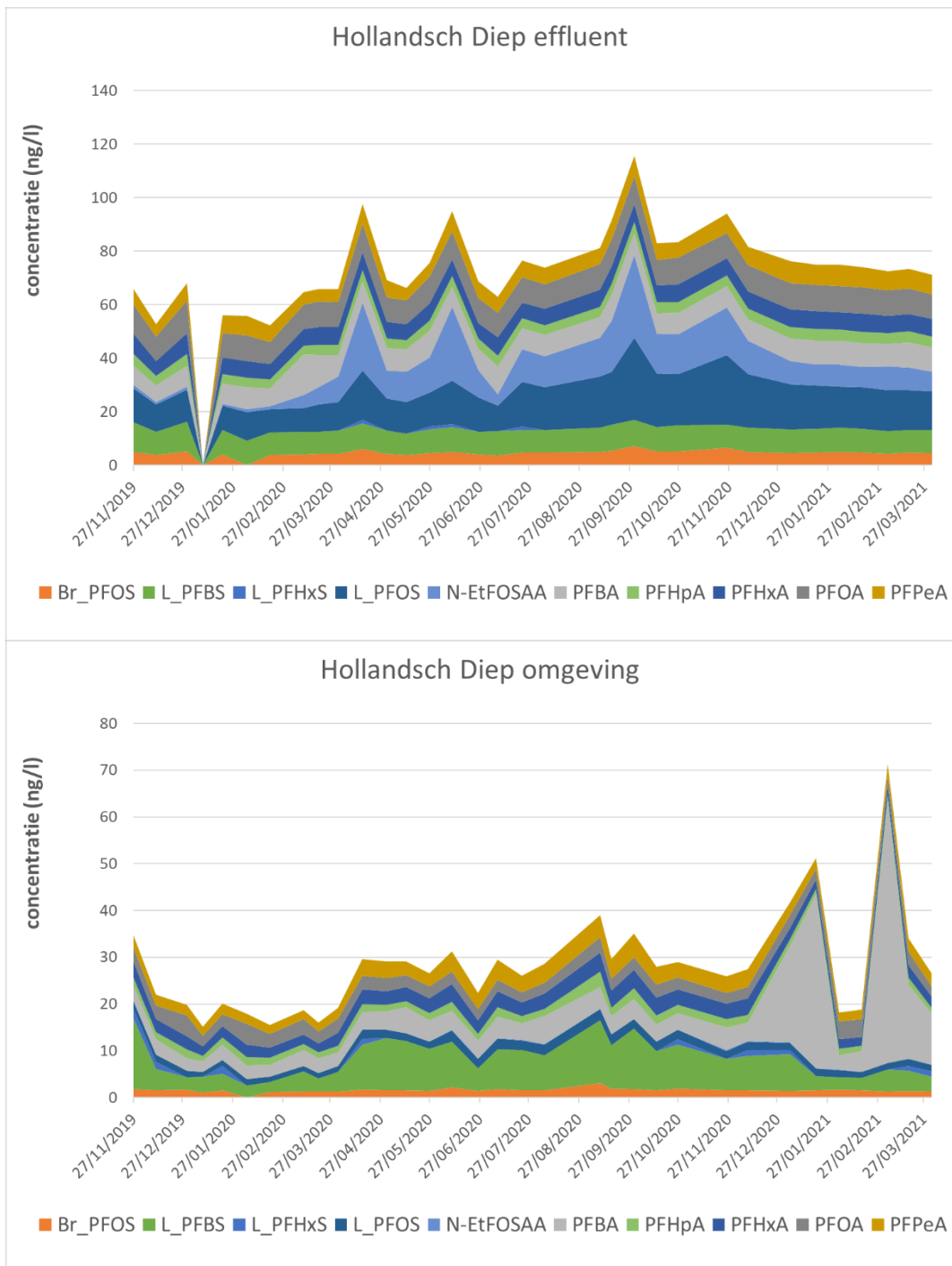
Gedurende de buitenexperimenten is ook de waterkwaliteit in (effluent) en buiten (referentie) het depot gemeten. Figuur 32 – 34 geeft de gemeten trends weer. Hierbij wordt gefocust op de 10 PFAS verbindingen met de hoogste concentratie.



Figuur 32 Effluentwater (boven) en referentie waterkwaliteit Ketelmeer (onder) depot IJsseloog



Figuur 33 Effluentwater (boven) en referentie waterkwaliteit (onder) depot Slufter



Figuur 34 Effluentwater (boven) en referentie waterkwaliteit (onder) depot Hollandsch Diep

Opvallend is de piek in PFBA in het referentie water voor zowel depot IJsselooog als ook depot Hollandsch Diep in december 2020 en doorlopend tot april 2021. De gemeten concentraties tot bijna 60 ng/l in de periode april 2021 laten zien dat er een PFAS bron met een grote impact (10x hogere PFBA concentratie in oppervlaktewater van de rijn en IJssel) is geweest. De rijksbaggerdepots beïnvloeden de oppervlaktewaterkwaliteit niet meetbaar (zie ook de PFOS massabalans in Hoofdstuk 5.1).

4.2 Emissiebalans baggeren versus depot emissies

De mobilisatie van PFAS door shear en het toevoegen van werkwater bij baggeren en bergen kan ter indicatie vergeleken worden met de jaarlijkse depot emissie. Voor PFOS wordt een balans opgesteld. Uitgangspunt voor de PFOS concentraties zijn de eerder gepresenteerde metingen, waarbij het gemiddelde wordt genomen, zie Tabel 18.

Tabel 18 Gemiddelde waarden gemeten PFOS concentraties IJsselooog tijdens schudproef, in het eluaatwater en in het Ketelmeer

Schudproef met L:S 10:1, 24 uur		Opgelost	Vaste fase	log Kd
Ijsselooog	ρ (kg/l)	PFOS (ng/l)	PFOS ($\mu\text{g/kg}$)	
depot Iospunt	1.66	38.51	0.90	1.37
depot oost	1.31	33.10	1.50	1.66
depot west	1.38	30.61	1.20	1.59
depot voor retourslot	1.33	29.24	1.60	1.74
depot bij Ioswal	1.51	35.50	1.00	1.45
gemiddelde schudproef	1.44	33.39	1.24	1.57
achtergrond Ketelmeer		4.11		
eluaatwater		14.21		

Om de balans op te kunnen stellen is nodig:

- Het jaarlijks gebaggerd volume aangeboden aan IJsselooog (in-situ volume).
- De verhouding mengwater versus sediment.
- De hoeveelheid eluaatwater.

Op basis van de gegevens van 2015 (Tabel 19) voor wat betreft het aanbod van baggerspecie en de hoeveelheid retourwater wordt een indicatieve jaarbalans voor PFOS opgesteld (Tabel 20).

Tabel 19 Gegevens gemiddeld aanbod baggerspecie en hoeveelheid eluaatwater IJsselooog,

Aanbod baggerspecie			
Hoeveelheid baggerspecie (in situ)	300000 m3		
met in situ dichtheid van	1.44 kg/l		
	430718 ton d.s.	$\rho =$	2.2 kg/l
		vaste fase =	195781 m3
Baggeren/storten			
volume verhouding water/sediment	1	staat tot	9
	1762030 m3		(dit is grotendeels recirculatiewater)
(hierbij wordt poriewater bij verhouding meegerekend)			
Eluaatwater			
Retourwater (waterbalans 2015)	2106509 m3		

Voor de ΔC_{PFOS} door baggeren wordt de gemiddelde toename van de PFOS concentratie in de schudproef genomen ten opzichte van het eluaatwater (Tabel 18). Door deze ΔC_{PFOS} te vermenigvuldigen met de hoeveelheid werkwater dat gebruikt wordt tijdens het baggeren (Tabel 19) kan de vrijgekomen hoeveelheid PFOS door baggeren ingeschat worden. Dit is indicatief en een best case scenario gebaseerd. De metingen zijn immers uitgevoerd op slib afkomstig uit het depot IJsselooog, waarbij al 2x (bij baggeren en bij storten in het depot) werkwater is toegevoegd waardoor een deel van de PFOS verwijderd is.

De depot emissie is gebaseerd op de ΔC_{PFOS} in het eluaatwater en het Ketelmeer water. De hoeveelheid retourwater is gebaseerd op de waterbalans van 2015.

Tabel 20 Emissie balans PFOS voor IJsseloo, effect baggeren versus depot emissie

Emissie PFOS door baggeren op basis van jaarlijks aanbod	
toename PFOS conc. t.o.v. achtergrond	29.28 ng/l
hoeveelheid contactwater	1762030 m3
	51.6 gram PFOS
Depot emissie PFOS eluaatwater	
verschil eluaat en Ketelmeer concentratie	10.10 ng/l
hoeveelheid eluaatwater	2106509 m3
	21.3 gram PFOS

4.3 Discussie

De emissiebalans laat zien dat de bagger/stort cyclus meer invloed heeft op de emissie van PFAS dan de depot emissie. Hierbij geldt dat voor het storten water uit depot IJsseloo bijgemengd en gerecirculeerd wordt. Op basis van het oppervlaktewater volume in het depot wordt zo'n 37% van het watervolume gebruikt voor het storten.

Waarom is dit van belang? De concentratie van het oppervlaktewater in depot IJsseloo en daarmee in het retourwater wordt in sterke mate beïnvloed door dit recirculatiewater dat intensief in contact is geweest met de baggerspecie.

Tabel 21 Bijdrage stort/recirculatiewater aan depot emissie via eluaatwater

bijdrage stort/recirculatiewater aan eluaat concentratie	
toename PFOS in recirculatiewater t.o.v. achtergr.	29.3 ng/l
verdunding in depot (op basis van jaarlijkbalans)	37%
bijdrage recirculatiewater aan depot concentratie	11.0 ng/l
achtergrond Ketelmeer	4.1 ng/l
depot/eluaat concentratie door stort	15.1 ng/l
gemeten eluaatconcentratie	14.2 ng/l
PFOS bijdrage andere processen dan stort	-0.9 ng/l

(Bijna) de gehele depotemissie van IJsseloo kan worden toegerekend aan het storten van baggerspecie, en niet aan processen die bij het bergen een rol spelen (consolidatie en diffusie). Uit de massabalansberekening voor de schudproeven (Hoofdstuk 3) bleek ook dat circa 30% van de PFOS uit het sediment verwijderd werd door schudden. Het baggeren en storten mobiliseert een aanzienlijk deel van de PFOS (en andere PFAS verbindingen).

5 De beoordeling van maatregelen ter zuivering van PFAS in het retourwater

5.1 Proef met actieve kool filtratie

De zuivering van effluentwater met actieve kool is in het verslag van de workshop van 2021 (zie Hoofdstuk 2.2) aan bod gekomen. Daarbij is ook een massabalans gepresenteerd. Om de PFOS emissie van IJsseloog van circa 6,4 gram per jaar te compenseren zou op jaarbasis de actieve kool installatie moeten worden uitgebreid met een factor 32 (0,1 gram PFOS verwijderd in ½ jaar).

Ter reflectie, het opschalen van de actieve kool filtratie brengt naast hoge kosten ook een hoog CO₂ gebruik (de pompen) en een afvalstroom (de actieve kool) met zich mee. Afgezet tegen de Rijnbelasting met PFOS bij Lobith van circa 138 kg per jaar (op basis van de concentratie in 2020 (PFOS = 2,0 ng/l -> discharge (6.923E+13 l) = 138 kg PFOS/year)) is het effect gering. Aangeraden wordt om bij de afweging tot opschalen een LCA uit te voeren en een systeemanalyse te doen of compensatie door maatregelen buiten het depot een vergelijkbaar of beter effect kunnen sorteren tegen geringere kosten en een milieu-impact.

5.2 Alternatieven

In **Bijlage A** wordt ingegaan op de mogelijke compensatie van de depotemissie door fyto-remediatie van PFAS. Literatuurstudies en pilots op locaties met over het algemeen veel hogere PFAS concentraties laten resultaten zien waarbij het compenseren van de jaarlijkse PFAS depotemissies door lokaal maaibeheer realistisch lijkt. Maaisel kan bijgestookt worden in energiecentrales, waarbij door de hoge verbrandingstemperatuur PFAS afgebroken wordt.

Ook marktpartijen (Tauw, Afvalzorg) zijn geïnteresseerd in deze oplossing. IJsseloog is met de aanwezige infrastructuur en ruimte een zeer goede proeflocatie. De reguliere werkzaamheden voor de pilot (het nemen van waterkwaliteit monsters en oogsten van vegetatie) kan door de depotbeheerder worden uitgevoerd.

De inzet van fyto-remediatie experimenten is om een aantal geselecteerde planten direct bloot te stellen aan het oppervlaktewater in het depot. Hierbij is het de bedoeling om de kleinere planten met drijvende constructies in het depot te werken. Deze drijvende constructies zouden vastgemaakt moeten worden aan reeds bestaande constructies, zoals de damwand van het effluentkanaal op IJsseloog. Op deze manier is het alleen mogelijk om de PFAS aanrijking in de vegetatie te beoordelen. Hierbij wordt aangenomen dat de maandelijkse PFAS concentratiemonitoring van het oppervlaktewater in het IJsseloog als enige waterbron voor de vegetatie dient.

Grotere planten, zoals bomen, zouden geplaatst kunnen worden in de zandscheidingsbasins, of op de hoek van de aanleg stijger in het depot (bij het kruis). Waarbij het de bedoeling is om de bomen continue met depotwater te irrigeren, waarna het depotwater vrijelijk terug het depot instroomt. Ook hierbij is het alleen mogelijk om de concentratie in planten te bepalen en verder gebruik te maken van de routinematige maandelijkse oppervlaktewater monitoring in het effluentkanaal

6 Conclusies

6.1 Shear

De buitenproeven en schudproeven in het lab hebben aangetoond dat het met kracht (shear) toevoegen van werkwater PFAS verbindingen in hoge mate (gemiddeld circa 30% van de aan het sediment gebonden fractie) mobiliseert. De emissiebalans voor depot IJsseloog leert dat dit proces (bijna) de volledige emissie van PFOS in het eluaatwater van het depot kan verklaren.

Om de PFAS mobilisatie in baggerspecie tijdens het storten in de rijksbaggerdepots zoveel mogelijk te voorkomen, en eventueel de effecten te mitigeren, zijn er diverse opties.

6.2 Aanpassen storttechniek voor PFAS houdende baggerspecie

Zo kan voor PFAS houdende baggerspecie een storttechniek met minder shear en minder werkwater gekozen worden. Hierbij kan gedacht worden aan het lossen en plaatsen met een grijper.

6.3 Fytoremediatie als mitigatie maatregel

Als mitigatie maatregel is de huidige pilot met actieve kool filtratie kostbaar. Opschalen is mogelijk, maar er zijn ook alternatieven. In de aanbevelingen voor 2022 wordt voorgesteld de mogelijkheden van fytoremediation te onderzoeken. Op basis van literatuurgegevens zijn de te mitigeren hoeveelheden PFAS per depot (in de grote orde van enkele grammen) realiseerbaar.

6.4 Specifiek voor IJsseloog: de waterbalans

Voor de emissiebalans in Hoofdstuk 5 is gebruik gemaakt van de waterbalans van IJsseloog van 2015. De waterbalans wordt ook nu (in 2021) in belangrijke mate beïnvloed door het peilbeheer van IJsseloog (onderbemaling). Indien het peilbeheer wordt ingesteld op het Ketelmeer peil zou de PFOS emissie met 70% afnemen (dit verklaart het verschil tussen Tabel 2, waar met een effluent debiet op basis van het neerslagoverschot gerekend is versus Tabel 20 waar de waterbalans op basis van onderbemaling gehanteerd is).

6.5 Systeembalans

Het effect van baggeren speelt ook buiten het depot. Bij het baggeren wordt een groot deel van de PFAS verbindingen gemobiliseerd. Uit Tabel 18 blijkt dat de PFOS concentraties in de baggerspecie uit IJsseloog (5 locaties bemonsterd) met een gemiddelde concentratie van 1,24 µg/kg PFOS onder de HVN ligt. Toch levert het storten van 300.000 m³ van dit sediment een PFOS emissie op van 51.6 gram PFOS (Tabel 20). Vertaald naar een jaarlijks gemiddeld baggervolume van 20 mln. m³ zou dit een PFOS belasting van 3.4 kg opleveren. Bij de HVN waarde voor PFOS in (water)bodem (HVN PFOS = 3 µg/kg) zou de belasting 10.3 kg PFOS per jaar zijn. Hiermee is baggeren ten opzichte van de achtergrondbelasting van PFOS in de Rijn (138 kg PFOS per jaar, zie Hoofdstuk 5.1) zo'n 7.5% aan de PFOS belasting toevoegen.

De PFAS emissies uit de Rijksbaggerdepots vallen het niet bij de PFAS belasting door baggeren (opgeteld <1%) en de PFAS achtergrondbelasting (opgeteld <0,1%). Dit biedt kansen indien op systeemniveau maatregelen genomen mogen worden om de PFAS emissie terug te dringen. De PFAS emissie uit de rijksbaggerdepots kan gecompenseerd worden door de inzet van minder waterbodembelastende baggertechnieken.

6.6 Precursors

Het onderzoek laat zien dat op tijdschalen langer dan 30 dagen de afbraak van PFAS precursors tot een verhoogde emissie van PFOS, PFOA en PFBA leidt. Indien de emissie van PFOS en PFOA leidend is voor het bergen van baggerspecie in de rijksbaggerdepots (en niet de concentratie in de baggerspecie) dan is de mogelijke bijdrage van precursors aan de emissie van met name PFOS en PFOA een onbekende en niet bij acceptatie van de baggerspecie in te schatten factor.

6.7 Aanbevelingen

Op basis van de emissie/immissie toets voor de toetsing van lozingen voor de KRW zal de combinatie van PFAS mobilisatie door shear (dit speelt op korte termijn, direct bij stort) en de rol van PFAS precursors op langere termijn (maanden tot jaren) tot norm overschrijdende emissie kunnen leiden.

In deze rapportage zijn mogelijke oplossingen genoemd en gekwantificeerd qua effect:

- Baggeren en storten met minder werkwater en shear
- Actieve kool en/of phyto-remediation voor het vastleggen van PFAS
- Systeemtoets emissies (betrekmaatregelen tijdens de baggerfase bij de beoordeling van de PFAS emissie)

Een nog te onderzoeken spoor is onderzoek naar de condities waaronder PFAS precursors afbreken. Ook een screeningstechniek die de potentiële om te zetten hoeveelheid kooldioxyde (CO₂) verbindingen analyseert en daarmee “het voorraadvat” in beeld brengt wordt aanbevolen.

7 Bijlage A: PowerPoint voorstel vervolg gegeven op 30-09-2021



Deltares

Vervolg/meerwerk voorstel PFAS emissie rijksdepots

Arjan Wijdeveld
Marc Verheul

30 september mei 2021

Aanleiding/doel onderzoek

Doel is om naar de daadwerkelijke emissie van PFAS vanuit de rijksbaggerdepots IJsseloog, Slufter en Hollandsch Diep te kijken.

Er gekeken naar de processen die bijdragen aan het inzicht in het beschikbaar komen (of juist binden) van PFAS. Hierbij ligt de nadruk op de invloed van het bergen van de baggerspecie in het depot.

Waarom vult dit onderzoek andere lopende projecten aan rond PFAS?

- Kritisch oog op de trends in de PFAS concentraties in de rijkswateren
- Specifiek aandacht voor het effect van baggeren op de emissie
 - Zowel bij de 1 m³ buiten experimenten
 - Als bij de lab experimenten met verschillende L/S ratio's en schud tijden
- Lange tijdschaal buiten experimenten, waardoor ook de rol van precursors inzichtelijker wordt

Deltares

De opdracht

- Afstemming en kennisdelen met lopende projecten op het gebied van PFAS
 - [Uitgevoerd](#)
- De referentie emissie voor PFAS verbindingen vanuit de rijksdepots op basis van de trendmatige monitoring van de waterkwaliteit in en rond het depot en het retourwater
 - [Wordt gerapporteerd, met als bijzonderheid de PFBA lozing vanuit Duitsland vanaf januari 2021 in de Rijn](#)
- De poriewater concentraties en potentiële beschikbaarheid van PFAS verbindingen van al in het depot aanwezig baggerspecie en nieuw aangeboden bagger
 - [Wordt gerapporteerd, sneek peak resultaten](#)
- Processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden, specifiek de uitwisseling tussen de baggerspecie en het (werk)water; in hoeverre speelt het verdunnen, verpompen en lossen van baggerspecie een rol in de mate waarin PFAS nageleverd wordt naar het oppervlaktewater.
 - [Wordt gerapporteerd, sneek peak resultaten](#)
- De beoordeling van maatregelen ter zuivering van PFAS in het retourwater
 - [Wordt gerapporteerd, voor eventueel alternatief actieve kool filtratie wordt TKI voorstel voorbereid](#)

Deltares

Voorstel vervolg/meerwerk

Kleine posten:

- Workshop 20-05-2021:
 - [Dit was niet begroot \(ook niet voor Leonard\)](#)
- Extra vervoerskosten en extra PFAS) analyse kosten:
 - [Betreft kleine aanpassingen aan het proevenprogramma \(snelle beoordeling geschiktheid sediment & oplossing voor probleem grootschalige monsternamen slib H' diep depot\)](#)

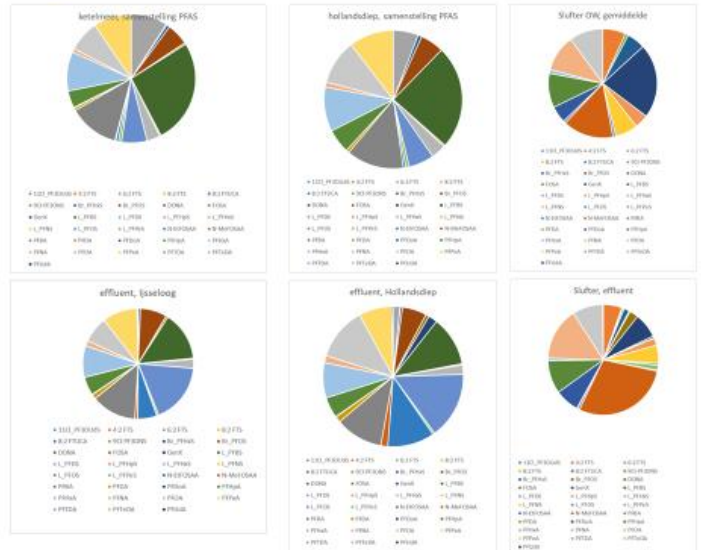
Nader toegelicht wordt:

- Extra schudexperimenten voor bepaling mate van uitputting PFAS sediment:
- Voorzetten van buitenproeven IJsseloo

Deltares

Trendmatige monitoring van de waterkwaliteit

Wat opvalt, de PFAS fingerprint voor de opp. water wijkt af voor de Slufter.



Deltares

De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

De schudproeven laten zien dat voor een aantal PFAS verbindingen de beschikbaarheid hoog is:

Uitputting vaste fase

nummer	locatie	toelichting	PFAS	concentratie
1	diode opvoet	M01	PFOS	20%
2	diode aan	M02	PFOS	20%
3	diode aan	M03	PFOS	20%
4	diode voor rectoriaat	M04	PFOS	20%
5	diode 30 liter	M05	PFOS	20%
6	diode 30 liter	M06	PFOS	20%
7	diode voor rectoriaat	M07	PFOS	20%
8	diode voor rectoriaat	M08	PFOS	20%
9	diode voor rectoriaat	M09	PFOS	20%
10	diode voor rectoriaat	M10	PFOS	20%
11	diode voor rectoriaat	M11	PFOS	20%
12	diode voor rectoriaat	M12	PFOS	20%

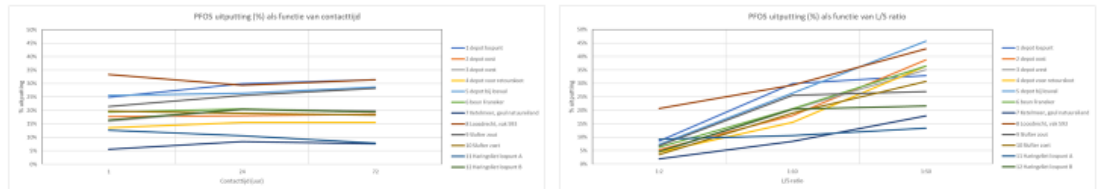
De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

Contacttijd lijkt daarbij niet kritisch, de mobilisatie is instantaan

- Dit wijst op de invloed van shear (schudden) op het beschikbaar zijn van PFAS

Wel is de L/S ratio van invloed, waarmee de uitputting niet bepaald lijkt te worden door partitie, maar door andere processen (zoals mate van contact met water).

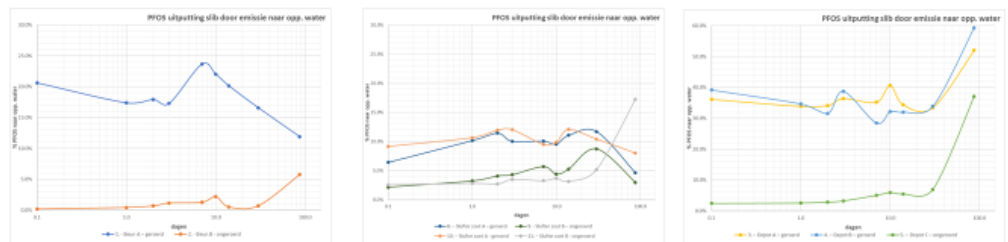
- Meer detaillering op dit punt is het 1^e deel van het vervolgonderzoek



Deltares

De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

Ook de buitenproeven laten zien dat shear (het verstoren baggeren) van invloed kan zijn op de nalevering.

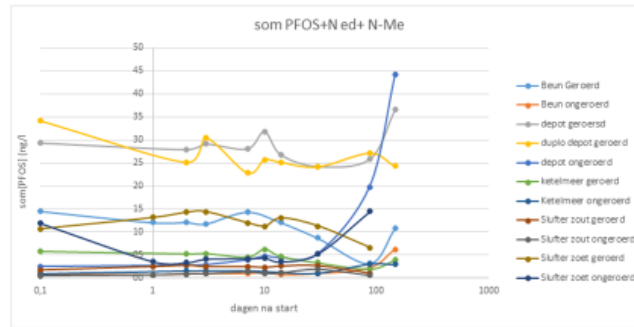


Maar hier is meer aan de hand, na 1 maand lopen de PFOS concentraties sterk op.

Deltares

De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

Als naar PFOS conc. in de bakken met de bekende precursors N-ed en N-Me gekeken wordt is voor de meeste bakken de som concentratie stabiel.



Maar er missen precursors in het meetpakket.

Deltares

De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

Er kan op basis van functionele groep meer informatie verkregen worden.



De rechter drie zijn precursors van PFOS, de 8.2's zijn precursors van PFOA en 6.2 is een precursor voor PFHxA (op basis van de chemische structuur).



Deltares

De poriewater concentraties / processen die de mate van binding van PFAS beïnvloeden

Voorzetting van de buiten experimenten (2^e deel vervolgonderzoek) levert meer inzicht op in de bijdrage van precursors aan de emissie van o.a. PFOS.

A scary thought, (on)bekende precursors kunnen de PFOS emissie met een factor 100 doen toenemen.

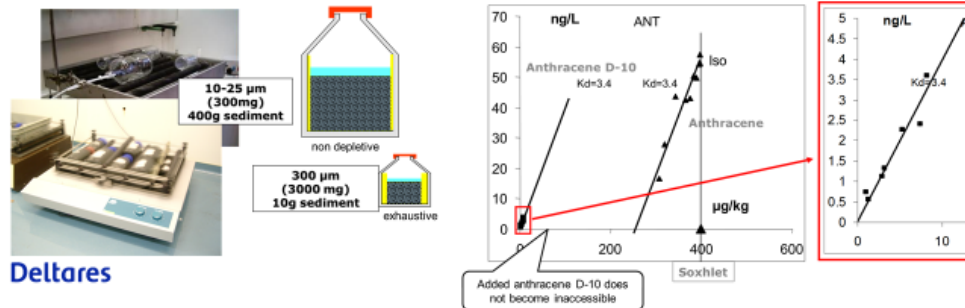


Deltares

Doelen van vervolgonderzoek/meerwerk

1) Meer inzicht in het verloop van de uitputting van PFAS verbindingen in sediment door meerdere stappen in de schudexperimenten.

- De systematiek lijkt sterk op de passieve sampling om naar de beschikbare fractie te kijken.
- ... Maar kan ook opleveren dat er geen sprake is van partitie (K_d):
 - PFAS nalevering wordt dan b.v. bepaald door de mate van shear en bijmenging met werkwater
 - Voor de emissie/immissiebeoordeling wordt het beoordelen van het effect van systeemingenrepen belangrijker.



Deltares

Doelen van vervolgonderzoek/meerwerk

2) De rol van precursors door voortzetting van de buiten experimenten

Meerwerk is voor precursors beperkt opgezet (voortzetting lopende experimenten), waardevol omdat onder veldcondities de nalevering van PFOS door omzetting van precursors op langere tijdschaal (6 tot 12 maanden) gevolgd wordt.

Daarnaast zou vervolgonderzoek met een bredere scope (de rol van de verschillende precursors, inclusief mogelijk niet geanalyseerde PFAS verbindingen) de rol van precursors in de risico's voor acceptatie van PFAS houdende baggerspecie in de rijksbaggerdepots vergroten.

- PFAS classificatie systeem voor precursors
- Check op % verklaarde PFAS verbindingen op basis van totaal organisch fluor

Deltares

Tot slot: Phytoremediatie PFAS

Als alternatief voor actieve kool filtratie is [phytoremediatie](#) een reële optie.

PFAS- componenten worden [10-100x aangereikt](#) in plantmateriaal t.o.v. bodemconcentratie.

Een natuurvriendelijke inrichting (bomen, grassen, waterplanten) rond het depot kan de PFAS emissie zodanig reduceren dat de netto bijdrage van depots nagenoeg nul wordt.

Er wordt een TKI voorstel met Tauw voorbereid. Deelname van RWS voor een pilot locatie, analyses, studenten plekken en financiering wordt op prijs gesteld.

Deltares

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