

Systeembalans van PFAS in de waterketen

De invloed van biota op de sediment/water massabalans



Systeembalans van PFAS in de waterketen

De invloed van biota op de sediment/water massabalans

Auteur(s)

Arjan Wijdeveld

Marc Verheul

Systeembalans van PFAS in de waterketen

De invloed van biota op de sediment/water massabalans

Opdrachtgever	DGWB Directie WOM - Afdeling Bodem en Ondergrond
Contactpersoon	Mw. T. van Wijnen
Referenties	-
Trefwoorden	PFAS, bioaccumulatie, watersysteembalans

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	28-03-2025
Projectnummer	11210343-003
Document ID	11210343-003-BGS-0001
Pagina's	45
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Dr. Arjan Wijdeveld	

Samenvatting

In dit rapport wordt ingegaan op de emissie en opname van PFOS en PFOA in een waterbodempol met schoon (kraanwater) en PFAS verontreinigd (Haringvliet depot water) in de aanwezigheid van verschillende soorten organismen (algen, waterplanten, mosselen en wormen). De groei van deze organismen is voor een periode van 6 weken gestimuleerd, waarbij de PFAS waterconcentratie, de waterbodempol concentratie en indien mogelijk de concentratie in de biota op meerdere momenten is bepaald. Na 6 weken zijn de organismen gedood en is gekeken of eventueel opgenomen PFAS vrijkomt. De focus in deze studie ligt op PFOS en PFOA, voor de andere PFAS verbindingen wordt de rapportage drempel niet in alle drie de media gehaald (of wordt de PFAS verbinding niet in alle drie de media bepaald).

Vooraf in ondiepe meren speelt biota een rol in de jaarlijkse fluctuatie van de PFOS concentratie, ruwweg door de PFOS oppervlaktewaterconcentratie tijdens de zomer (groei seizoen) te halveren ten opzichte van de winter concentratie (afsterven). Voor de waterbodempolconcentratie van PFOS is de rol van biota relatief gering. Een indicatieve berekening voor een ondiep meer met initieel een licht verontreinigde (<herverontreinigingsniveau (HVN)) waterbodempol en oppervlaktewater verontreinigd met PFOS toont aan dat de bijdrage van biota aan de waterbodempolconcentratie met circa 7% gering is, abiotische factoren (de zwevend slib concentratie en de bezinking van zwevend slib) domineren de PFOS accumulatie in het sediment.

Voor watersystemen met een korte verblijftijd zoals rivieren en estuaria met een hoge verversing speelt de interactie met biota geen directe rol voor de oppervlaktewaterconcentratie van PFOS (er kan een accumulatief bovenstrooms effect zijn, dit is niet beschouwd). Hoewel er sprake is van een positieve (>1) bioaccumulatiefactor (BSAF) voor PFOS voor alle vier de geteste organismen, is de BSAF relatief gering (met uitzondering van de algen gemiddeld een factor 12). Mede door de onzekerheid over het deel van het geproduceerde organisch materiaal dat mineraliseert in het sediment en het deel dat van elders komt is het niet mogelijk een bodemcorrectie factor voor organisch materiaal af te leiden voor PFOS. Een indicatieve berekening laat een 5% aanrijking zien (ten opzichte van de bulk sediment concentratie) op basis van 50% mineralisatie van de tijdens de experimenten geproduceerde biomassa.

Voor PFOA is de conclusie eenduidig. PFOA kent geen significante bioaccumulatie (de BSAF is in de regel <1) en wordt niet door biota aangereikt in de waterbodempol. Ook de PFOA oppervlaktewater concentratie wordt niet, of slechts in geringe mate, beïnvloed door de aanwezigheid van biota. Voor PFOA spelen biologische uitwisselingsprocessen tussen de waterbodempol en het oppervlaktewater (door algen, waterplanten, mosselen en wormen) geen significante rol. Dit heeft als voordeel dat PFOA niet accumuleert in biota, en daarmee in de voedselketen vooral door directe blootstelling een risico vormt (en minder door een voedselweb accumulatie).

Met deze inzichten kan een deel van de variatie in PFOS concentraties in oppervlaktewater en de resulterende bioaccumulatie in biota verklaard worden. Vooral algen zijn gevoelig voor bioaccumulatie van PFOS, al speelt hierbij een rol dat de biomassa van algen gering is (wat effecten kan uitvergroten). Voor meren met een lange waterverblijftijd kan oogsten van algen een effectieve manier zijn om PFOS (samen met fosfaat en stikstof) te verwijderen. Voor PFOA heeft een dergelijke maatregel geen zin.

Inhoud

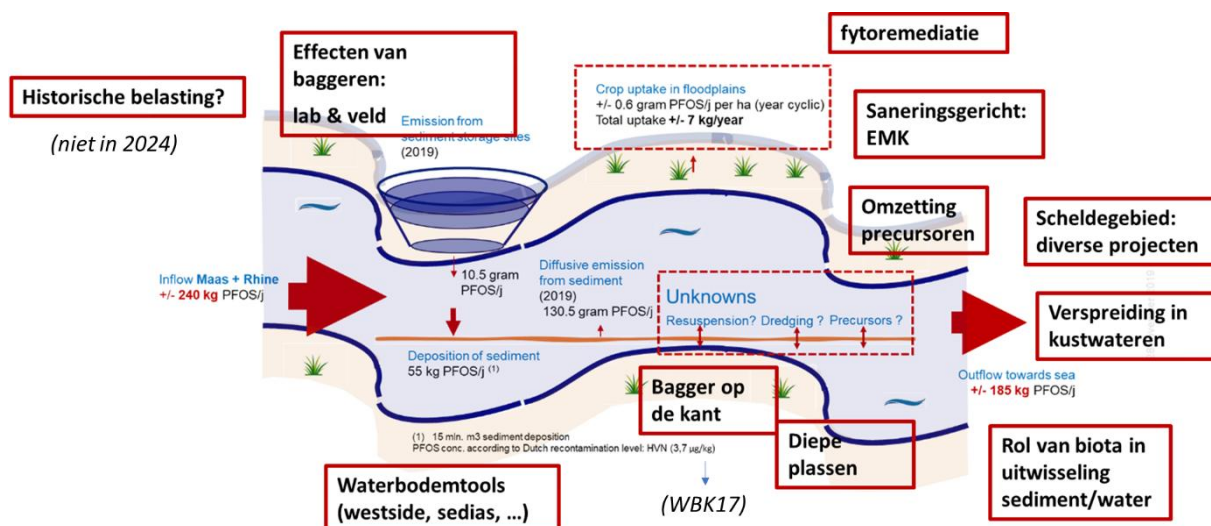
	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	SITO programma “Toepassen PFAS houdende grond en bagger”	7
1.2	De invloed van biota op de sediment/water massabalans	7
1.2.1	PFAS Aanrijking in de waterbodem	7
1.2.2	PFAS fluctuatie in de waterfase	7
1.3	Lab validatie invloed van biota op de sediment/water massabalans	9
2	Materiaal en Methode	12
2.1	Organismen	12
2.2	PFAS bron	12
2.3	Opzet proeven	13
2.4	Meetfrequentie en analyses	14
3	Resultaten	15
3.1	Overzicht PFAS concentraties in water, waterbodem en organismen	15
3.2	PFAS massabalans en emissies per soort	15
3.3	Opname en afgifte van PFAS - Algen	16
3.3.1	Bioaccumulation Factor voor PFOS	16
3.3.1.1	Groei	16
3.3.1.2	Afsterven	17
3.3.2	Bioaccumulation Factor voor PFOA	19
3.3.2.1	Groei	19
3.3.2.2	Afsterven	19
3.4	Opname en afgifte van PFAS - Waterplanten	21
3.4.1	Bioaccumulation Factor voor PFOS	21
3.4.1.1	Groei	21
3.4.1.2	Afsterven	22
3.4.2	Bioaccumulation Factor voor PFOA	22
3.4.2.1	Groei	22
3.4.2.2	Afsterven	23
3.5	Opname en afgifte van PFAS - Mosselen	23
3.5.1	Bioaccumulation Factor voor PFOS	23
3.5.1.1	Groei	23
3.5.1.2	Afsterven	24
3.5.2	Bioaccumulation Factor voor PFOA	25
3.5.2.1	Groei	25
3.5.2.2	Afsterven	25
3.6	Opname en afgifte van PFAS - Wormen	26
3.6.1	Bioaccumulation Factor voor PFOS	26
3.6.1.1	Groei	26
3.6.1.2	Afsterven	27

3.6.2	Bioaccumulation Factor voor PFOA	28
3.6.2.1	Groei	28
3.6.2.2	Afsterven	28
4	Discussie	29
4.1	PFAS-concentratie in water, waterbodern en organismen	29
4.2	PFAS massabalans en emissies per soort / Opname en afgifte van PFAS	29
4.2.1	PFOS-accumulatie bij groei	30
4.2.2	PFOA-accumulatie bij groei	30
4.2.3	PFOS vrijkomen bij afsterven	30
4.2.4	PFOA vrijkomen bij afsterven	32
5	Conclusies	34
5.1	PFOS	34
5.2	PFOA	34
6	Literatuurlijst	35
7	Bijlage	36

1 Inleiding

1.1 SITO programma “Toepassen PFAS houdende grond en bagger”

Het SITO programma WBK03 “Toepassen PFAS houdende grond en bagger” heeft tot doel te kijken naar de relatie tussen de waterbodem en waterkwaliteit. Hieronder vallen verschillende aspecten, zoals toegelicht in de “praatplaat” rond het WBK03 2024 programma (Figuur 1).



Figuur 1 Praatplaat bij SITO WBK03

1.2 De invloed van biota op de sediment/water massabalans

Dit rapport gaat in op de invloed van biota op de sediment/water uitwisseling. In voorafgaand onderzoek door Deltares en RIVM (RIVM, 2020, Deltares 2021) naar het gedrag van PFAS in waterbodems vielen een twee zaken in het bijzonder op. In dit rapport wordt hierop ingegaan.

1.2.1 PFAS Aanrijking in de waterbodem

Op basis van de huidige waterkwaliteit voor PFAS van de Rijn of de Maas blijkt dat de waterbodem vaak meer PFAS bevat dan op basis van de waterkwaliteit verwacht werd. Er lijkt sprake te zijn van een PFAS aanrijtingsproces in de waterbodem dat afwijkt van de gemeten verdeling tussen water en waterbodem (RIVM 2020).

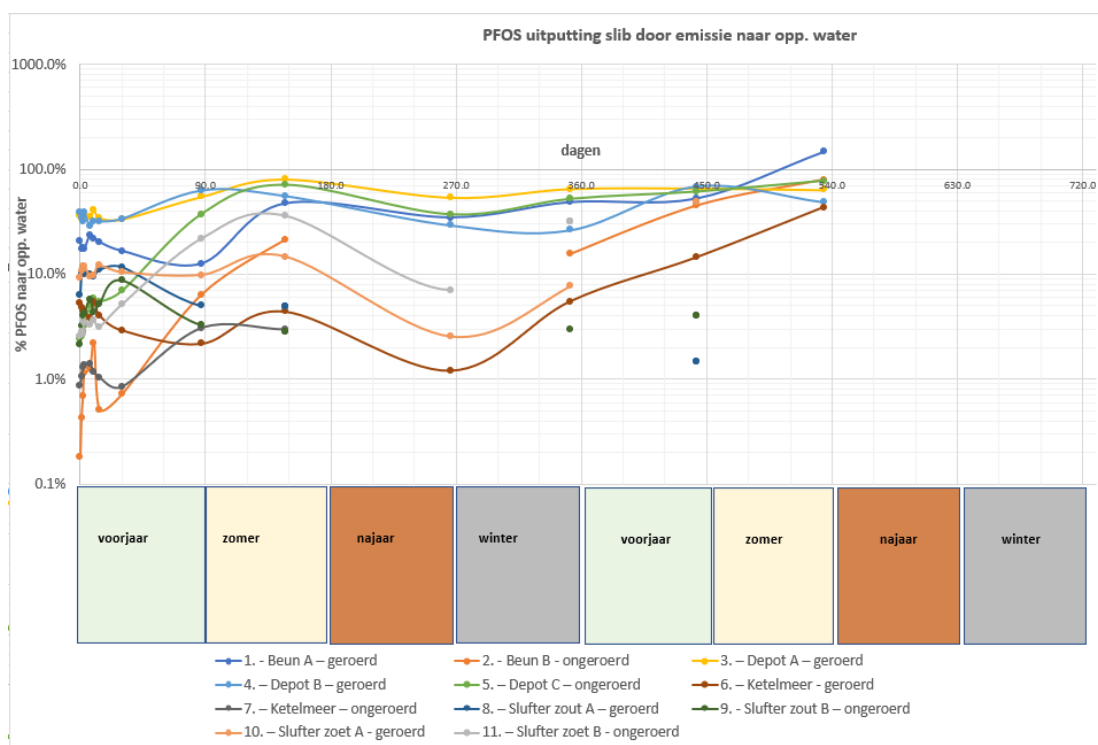
1.2.2 PFAS fluctuatie in de waterfase

Uit onderzoek in mesocosms (Figuur 2) naar de mobilisatie van PFAS, bleek een seizoensafhankelijke fluctuatie van de PFOS-concentratie (Deltares 2021, Figuur 3).



Figuur 2 Mesocosm experimenten voor 1½ jaar met verschillende type sediment, depot IJsseloog

In de PFAS trend monitoring gedurende 1½ jaar viel op dat de PFAS concentraties fluctueerden. (Figuur 3).



Figuur 3 Trends in PFOS concentratie in de mesocosm experimenten; groen is voorjaar, geel is zomer, bruin is herfst en grijs is winter – in de overgang herfst/winter (afsterven waterplanten en algen) dipt de PFOS concentratie in het water in de mesocosms.

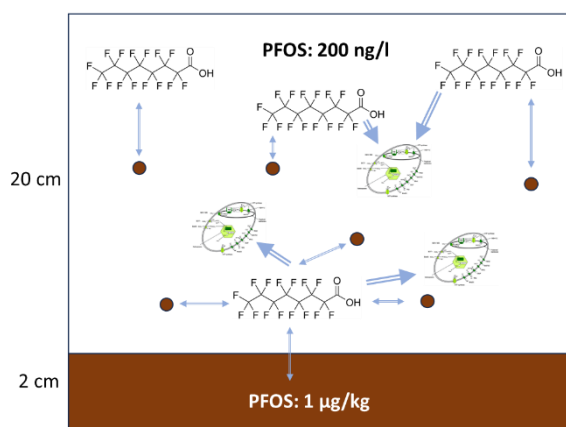
1.3 Lab validatie invloed van biota op de sediment/water massabalans

Om het effect van biota op de nalevering (of opname) van PFAS te valideren zijn in het lab experimenten met diverse organismen uitgevoerd. Doel was om vast te stellen wat de rol van biota is in de uitwisseling tussen water en de waterbodem. Er is gekeken naar verschillende mechanismen:

1. Opname in biomassa in de waterfase: algen
2. Opname in biomassa via wortelzone sediment: waterplanten
3. Opname in biomassa via filtratie zwevend stof: mosselen
4. Opname in biomassa via bioturbatie: wormen
5. Referentie (steriel)

De opname paden kunnen schematisch worden weergegeven. Als voorbeeld is PFOS genomen (Figuur 4).

1) Opname in algen



Uitwisselingen

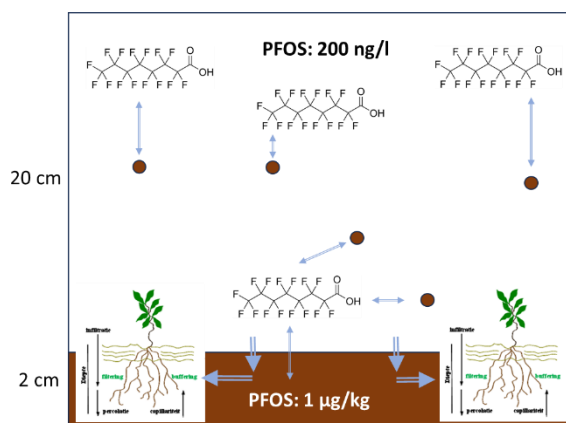
- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water) (*)
- **PFAS in opp. water met algen (opname)**

(*) KPP onderzoek 2022 nalevering PFAS

Het Ketelmeer sediment heeft een PFOS conc. van 1,0 µg/kg
De Kd bedroeg gemiddeld 96,8 (afgerond 100). De poriewater conc. is dan 10 ng/l

- De waterbodem neemt in principe PFOS op, en nevert niet na
- Op basis van schudproeven wordt bij 1% opwerveling van de waterbodem bij aanbrengen (dit is 10.000 mg/l zwevend stof) het opp. water met 0,4 ng/l gespikeed

2) Opname door wortelzone



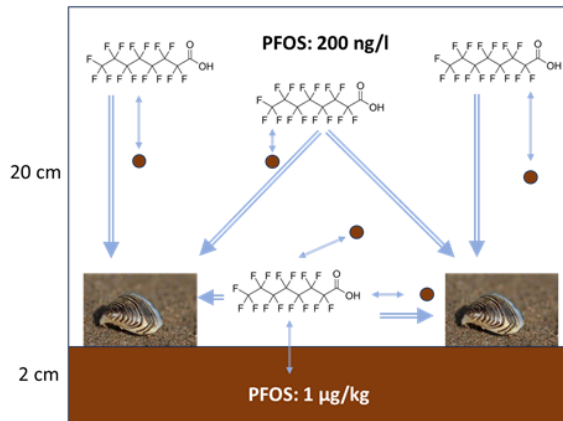
Uitwisselingen

- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water)
- **PFAS in poriewater naar root zone plant (opname)**
- **(PFAS in opp. water naar blad plant (opname))**

Bijzonderheden

De poriewater conc. PFOS is circa 10 ng/l, irrigatie via toplaag sediment (opp. water dominant: 200 ng/l)
Opname via blad verwaarloosbaar (*check lit.*)

3) Filtratie door bioturbatie



Uitwisselingen

- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water)
- [PFAS in opp. water naar mossel \(opname\)](#)

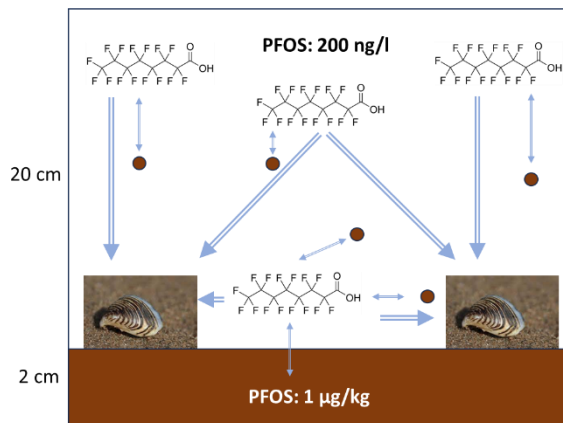
Bijzonderheden

Mosselen filteren ook zwevend slib mee. Op basis van geschatte zwevend slib conc. van 20 mg/l is deze bijdrage met 0,01% niet significant.

De filtersnelheid van mosselen is waarschijnlijk >20 l/dag (bij 1 gram C); oftewel >1x opp. volume. Daarmee is de efficiëntie voor PFOS opname kritisch.

Voorstel; water 2 wekelijks verversen, zodat blootstelling aan 3x 20 liter (6 weken) is.

3) Filtratie van opp. water incl. zwevend slib



Uitwisselingen

- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water)
- [PFAS in opp. water naar mossel \(opname\)](#)

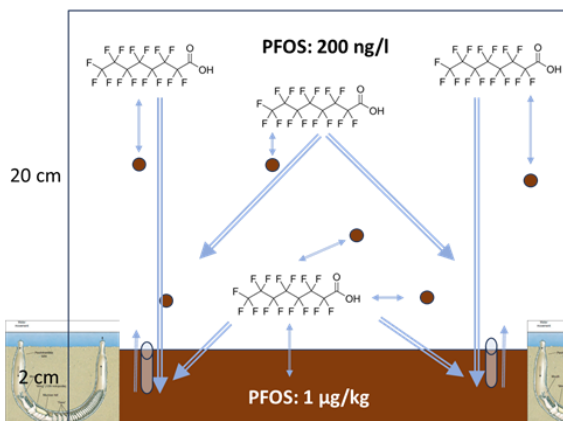
Bijzonderheden

Mosselen filteren ook zwevend slib mee. Op basis van geschatte zwevend slib conc. van 20 mg/l is deze bijdrage met 0,01% niet significant.

De filtersnelheid van mosselen is waarschijnlijk >20 l/dag (bij 1 gram C); oftewel >1x opp. volume. Daarmee is de efficiëntie voor PFOS opname kritisch.

Voorstel; water 2 wekelijks verversen, zodat blootstelling aan 3x 20 liter (6 weken) is.

4) Bioturbatie (graafgang) door wormen



Uitwisselingen

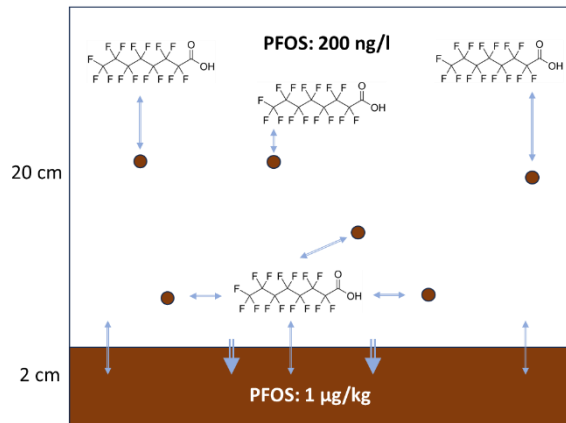
- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water)
- [PFAS in opp. water via graafgang naar worm \(opname\)](#)

Bijzonderheden

Eerder is als filtersnelheid van opp. water door de graafgang voor wormen een water volume van 1 m³/m²/dag berekend (SLIK, 2002). Dit houdt in dat bij een goed ontwikkelde wormpopulatie de filtercapaciteit 100 liter per dag bedraagt.

Voorstel; water 2 wekelijks verversen, zodat blootstelling aan 3x 20 liter (6 weken) is.

5) Referentie – met waterbodem



Figuur 4 Opname en uitwissel paden PFOS

Uitwisselingen

- PFAS in opp. water met zwevend slib (uitwisseling)
- PFAS in opp. water met waterbodem (uitwisseling)
- (PFAS in waterbodem met opp. water)

Bijzonderheden

In steady state zal er een netto transport zijn naar de waterbodem (diffusie).

Omdat de bodem niet steriel is wordt verwacht dat van nature voorkomen organismen (waterplanten, mosselen, wormen en bacteriën) in afgezwakte vorm van invloed zijn.

2 Materiaal en Methode

De proeven zijn uitgevoerd in het Deltares lab CASTEL. Er is gebruik gemaakt van glazen aquaria van 25 liter met een oppervlak van 40 x 25 cm (hoogte 25 cm), waarbij 2 cm waterbodem en 20 cm water is aangebracht.

2.1 Organismen

Er is gebruik gemaakt van:

- 4 doelsoorten (biota)
 - Quagga mosselen, 4 stuks per aquarium
 - Voeding: 2x per week 25 gram gedroogde garnalen
 - Wormen Tubificiden, 2x 25 gram per aquarium
 - Voeding: organisch stof sediment (geen substraat)
 - Lidsteng (*Hippuris vulgaris*), 2 trays (16 planten) per aquarium
 - Licht: 16 uur per dag daglichtlamp (timer)
 - Cyano bacterie, cultuur *Synechocystis* PC6803
 - Licht: 16 uur per dag daglichtlamp (timer)
 - Voeding: BG-11 zout oplossing (Williams,1988)
- 1 sediment
 - Licht verontreinigd Ketelmeer sediment
 - Referentie, alleen water en geen waterbodem (niet mogelijk voor waterplanten en tubificiden)
- 2 water typen
 - Haringvlietwater, en
 - Kraanwater

2.2 PFAS bron

Als bron voor PFAS is gebruikt:

- Haringvliet depotwater,
 - (PFOS concentratie van 63 ng/l)
- klasse licht verontreinigd Ketelmeer sediment
 - (PFOS concentratie < 1 µg/kg d.s.)

Er is geen gebruik gemaakt van een spike (alleen PFAS uit natuurlijk water en sediment).



Figuur 5 Aquaria opstelling

2.3 Opzet proeven

De proeven zijn verdeeld in twee perioden:

- Groei, gedurende 6 weken, wekelijkse meting
- Afsterven, gedurende 6 weken, wekelijkse meting

Groei: Doel was de opname van PFAS in de organismen vast te stellen (zie Figuur 4).

Tijdens de groei periode werden het zuurstofgehalte, EC, redox, temperatuur en de pH in het begin dagelijks en later wekelijks gemeten. Indien in de groeifase de zuurstofconcentratie beneden de 7,5 mg/l zakte (75% van de verzadigingsconcentratie van 10 mg/l) werd doorborreld met lucht. De Quagga mosselen en Cyano bacteriën kregen voeding. De planten kregen 16 uur per dag kunstlicht (daglicht frequentie).

Afsterven: Doel was het vrijkomen van PFAS uit de organismen vast te stellen. De organismen werden na 6 weken gedood.

- De waterplanten door het afdekken (geen licht) en het toevoegen van waterverzadigd diuron¹ (42 mg/l)
- De mosselen door vernalen,
- De wormen door een combinatie van 1 tablet met 100 mg 100mg anti-wormtabletten mebendazol en 1 tablet van 80 mg Simparica
- De algen door het afdekken (geen licht) en het toevoegen van waterverzadigd diuron (42 mg/l)

Bij het afsterven is niet met lucht doorborreld. Tabel 1 geeft het overzicht van de verschillende proeven weer.

Tabel 1 Overzicht proeven

bak	organisme	looptijd	type water	waterbodem	Soort	bak	groeï of afsterven	bijzonderheid	Toelichting
1	A: Algen	0 - 6 weken	H: H'vlet	B: bodem	algen	1	groeï	ML zone - niet borrelen	H'vletwater gedurende 6 weken (groeï), door oogsten biomassa niet geschikt voor
2	A: Algen	6 - 12 weken	H: H'vlet	B: bodem		2	afsterven	ML zone - niet borrelen	eerste 6 weken als duplo, door biomassa niet te oogsten geschikt voor afsterven
3	A: Algen	0 - 6 weken	K: Kraanwater	B: bodem		3	groeï	"	idem met kraanwater
4	A: Algen	6 - 12 weken	K: Kraanwater	B: bodem		4	afsterven	"	"
5	A: Algen	0 - 6 weken	H: H'vlet	W: alleen Water		5	groeï	"	idem zonder waterbodem
6	A: Algen	6 - 12 weken	H: H'vlet	W: alleen Water		6	afsterven	"	"
7	W: Waterplanten	0 - 6 weken	H: H'vlet	B: bodem	waterplanten	7	groeï	borrelen indien O2 <5 mg/l	H'vletwater gedurende 6 weken (groeï), door oogsten biomassa niet geschikt voor
8	W: Waterplanten	6 - 12 weken	H: H'vlet	B: bodem		8	afsterven	"	eerste 6 weken als duplo, door biomassa niet te oogsten geschikt voor afsterven
9	W: Waterplanten	0 - 6 weken	K: Kraanwater	B: bodem		9	groeï	"	idem met kraanwater
10	W: Waterplanten	6 - 12 weken	K: Kraanwater	B: bodem		10	afsterven	"	"
	W: Waterplanten		H: H'vlet	W: alleen Water			groeï	"	waterbodem is essentieel, alleen water kan niet
	W: Waterplanten		H: H'vlet	W: alleen Water			afsterven	"	waterbodem is essentieel, alleen water kan niet
11	M: Mosselen	0 - 6 weken	H: H'vlet	B: bodem	mosselen	11	groeï	borrelen indien O2 <5 mg/l	H'vletwater gedurende 6 weken (groeï), door oogsten biomassa niet geschikt voor
12	M: Mosselen	6 - 12 weken	H: H'vlet	B: bodem		12	afsterven	"	eerste 6 weken als duplo, door biomassa niet te oogsten geschikt voor afsterven
13	M: Mosselen	0 - 6 weken	K: Kraanwater	B: bodem		13	groeï	"	idem met kraanwater
14	M: Mosselen	6 - 12 weken	K: Kraanwater	B: bodem		14	afsterven	"	bij afsterven geen water verseren
15	M: Mosselen	0 - 6 weken	H: H'vlet	W: alleen Water		15	groeï	"	idem zonder waterbodem
16	M: Mosselen	6 - 12 weken	H: H'vlet	W: alleen Water		16	afsterven	"	"
17	T: Tubificidae	0 - 6 weken	H: H'vlet	B: bodem	wormen	17	groeï	borrelen indien O2 <5 mg/l	H'vletwater gedurende 6 weken (groeï), door oogsten biomassa niet geschikt voor
18	T: Tubificidae	6 - 12 weken	H: H'vlet	B: bodem		18	afsterven	"	eerste 6 weken als duplo, door biomassa niet te oogsten geschikt voor afsterven
19	T: Tubificidae	0 - 6 weken	K: Kraanwater	B: bodem		19	groeï	"	idem met kraanwater
20	T: Tubificidae	6 - 12 weken	K: Kraanwater	B: bodem		20	afsterven	"	bij afsterven geen water verseren
	T: Tubificidae		H: H'vlet	W: alleen Water			groeï	"	waterbodem is essentieel, alleen water kan niet
	T: Tubificidae		H: H'vlet	W: alleen Water			afsterven	"	waterbodem is essentieel, alleen water kan niet

Aanvullend zijn proeven uitgevoerd met een C13 gelabelde spike van PFOS en PFOA. In totaal is 19 µg PFOS en PFOA per aquarium toegevoegd (+1,0 µg/l). De opzet was identiek aan de proeven zoals omschreven in Tabel 1, met als verschil dat er geen PFAS gemeten werd in de waterfase, maar de C13 concentratie. Dit kan gebruikt worden om de opname in organismen af te leiden. Ter controle is de PFAS concentratie in de waterplanten (W) en mosselen (M) na 6 weken (T5) gemeten. Van de algen (A) en wormen (T) kon niet voldoende massa verzameld worden na 6 weken.

¹ Diuron (1,1-dimethyl, 3-(3',4'-dichlorophenyl) urea) is een breed-spectrum onkruidbestrijdingsmiddel en algicide.

2.4 Meetfrequentie en analyses

Er zijn op de volgende momenten monsters genomen

- T_0 ,
- Na 1 dag, daarna
- Wekelijks (1- 6 weken)

De PFAS watermonsters werden in een 500 ml HDPE wijdhalsfles voor de PFAS analyse naar RWS CIV opgestuurd.

Voor de bepaling van het zwevend stof gehalte, korrelgrootte verdeling van het zwevend stof, DOC gehalte en TGA (organisch stof gehalte zwevend stof) is een apart monster genomen, eveneens in een 500 ml HDPE wijdhalsfles.

3 Resultaten

3.1 Overzicht PFAS concentraties in water, waterbodem en organismen

De gemeten PFAS concentraties in de waterfase van de experimenten zijn opgenomen in de Bijlage (Tabel 14, Figuren 23 t/m 30). In de figuren wordt per soortgroep (algen, waterplanten, mosselen en wormen) de trend in PFOS en PFOA concentraties gegeven. In Tabel 15 staan de gemeten concentraties in de waterbodem en de organismen.

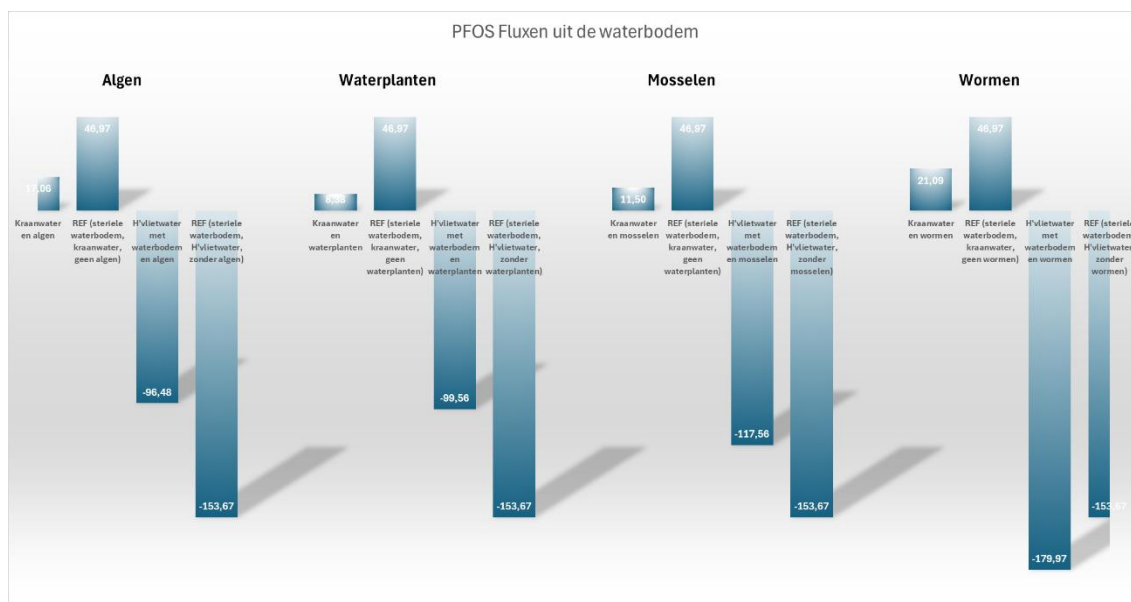
3.2 PFAS massabalans en emissies per soort

Als PFAS bron dienen:

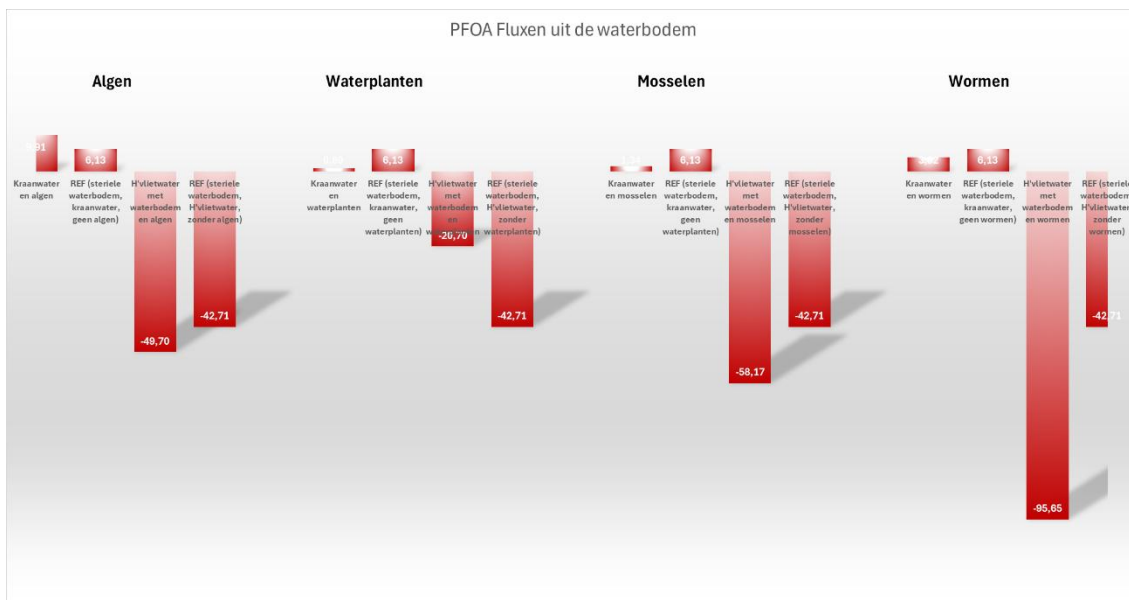
- Haringvliet depotwater, (PFAS verhoogd t.o.v. oppervlaktewater) en/of
- Ketelmeer sediment, (licht verontreinigd met PFAS)

Voor de proeven met kraanwater is alleen de waterbodem een emissiebron naar water, terwijl voor proeven met Haringvlietwater de oppervlaktewater concentratie dermate hoog is dat deze boven de evenwichtsconcentratie met de waterbodem ligt. In de Bijlage geeft Tabel 16 de verhoudingen weer voor de hoeveelheid PFOS en PFOA in het oppervlaktewater versus totaal (water en sediment). Voor de experimenten met Haringvlietwater geldt dat na 6 weken een aanzienlijk deel (20% tot bijna 80%) van de PFOS en PFOA zich in de waterfase bevindt, met kraanwater is dit percentage 1 – 20%.

De afgifte of opname van PFAS uit de waterbodem kan als emissie per m² per dag uitgedrukt worden. Op basis van de emissie/opname kan de verandering in waterbodemconcentratie tijdens de proeven berekend worden. In de bijlage is in Tabel 17 de flux uit de bodem (kraanwater) en naar de bodem (Haringvlietwater) opgenomen. De fluxen (in ng/(m².dag)) staan ook weergegeven in Figuur 6 (PFOS) en Figuur 7 (PFOA).



Figuur 6 Emissies (positief) en opname (negatief) PFOS fluxen voor de biota experimenten



Figuur 7 Emissies (positief) en opname (negatief) PFOA-fluxen voor de biota experimenten

3.3 Opname en afgifte van PFAS - Algen

Gezien de geringe hoeveelheid referentiedata (Deltares) en literatuur voor de Bioaccumulation Factor (BSAF) in biota wordt de vergelijking met BSAF factoren generiek uitgevoerd. Dat wil zeggen, er wordt gebruik gemaakt van data voor BSAF factoren in planten (Deltares, 2023) en wormen (Gkika, 2024), deze worden vergeleken met de BSAF voor de specifieke soortdata in dit rapport.

3.3.1 Bioaccumulation Factor voor PFOS

3.3.1.1 Groei

Het verschil in PFOS-emissie tussen een natuurlijk water(bodem)systeem met algen en met een gesteriliseerde waterbodem zonder algen is groot. Voor de proeven met algen is de gemeten emissie voor een steriele waterbodem bijna 3x zo hoog voor PFOS. Een oorzaak van de ogenschijnlijk hoge emissie uit een steriele bodem en een lage emissie in een natuurlijk waterbodemsysteem met algen is dat de PFOS wordt opgenomen in de algen. Bij de waterbemonstering worden de algen in geringe mate mee bemonsterd (de meeste algen zinken naar de bodem of drijven aan het oppervlak, deze worden niet bemonsterd).

De algenmassa in de 'bulk' van het water (het watermonster) is met <0,1 mg/l (bepaald door filtratie) te laag om te bemonsteren. Wel kan op basis van bovenstaande hypothese een indicatie gegeven worden van de concentratie in de algen.

Tabel 2 Inschatting PFOS concentratie in algen

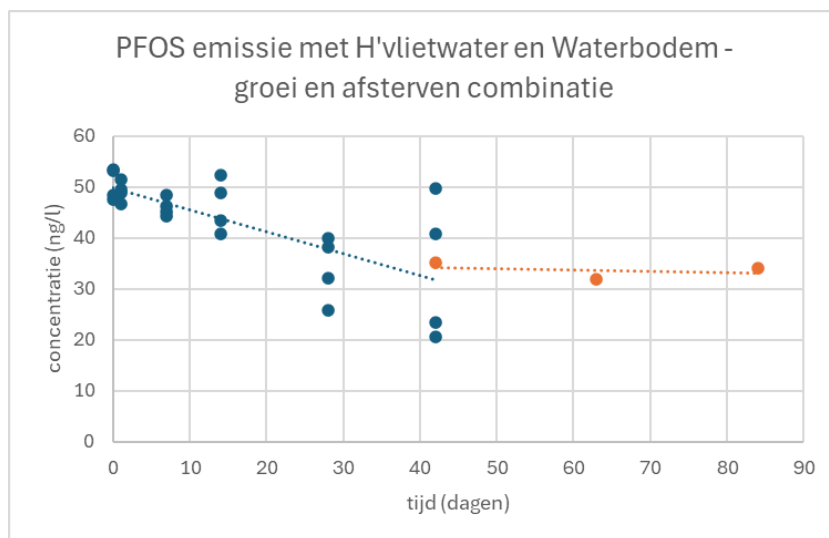
Algen	Kraanwater en algen	17,06	ng/(m2.dag)		
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen algen)	46,97	ng/(m2.dag)		
	Verschild = opname algen	29,90	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0,1	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOS door algen	0,126	µg		
	Biomassa algen	<0,1	mg/l ->	0,07	mg/l
	Schatting biomassa algen na 42 dagen	1,26	mg		
	Schatting PFOS concentratie in algen	99679	µg PFOS per kg algen		

Het Ketelmeer sediment heeft een PFOS-gehalte van 0,80 µg/kg d.s. De Bioaccumulation Factor (BSAF) voor algen zou op basis van de schattingen in Tabel 2 en de PFOS-concentratie in de waterbodem (Bijlage, Tabel 15), neerkomen op een $BSAF_{\text{algen, PFOS}}$ van 124.600, oftewel een $\text{Log}(BSAF_{\text{algen, PFOS}})$ PFOS van 5,1). Deze schatting is indicatief, er is onvoldoende algenmassa in het oppervlaktewater gemeten voor een nauwkeurige bepaling. De hoeveelheid algen op de bodem (biofilm) en drijvend kon niet bepaald worden, best guess is +/- 1 – 2 gram voor het gehele aquarium (er is een visuele biofilm en drijfslag aanwezig). Dat zou inhouden dat de $BSAF_{\text{algen, PFOS}}$ globaal een factor 1.000 lager uitkomt ($\text{Log}(BSAF_{\text{algen, PFOS}})$ van 2,1).

In het Deltares rapport “PFAS emissie Rijksbaggerdepots” (Deltares, 2023) is de aanrijking van planten gemeten op meerdere locaties langs de oever van rivieren en meren (Rijn - Lobith, Maas - Eijsden en Ketelmeer - depot IJsseloog). De aanname was dat planten op de oever grotendeels oppervlaktewater onttrekken. Door de jaargemiddelde concentratie in oppervlaktewater te vergelijken met de concentratie in de plant kan een indicatieve BSAF afgeleid worden (let wel, dit is voor de opname in planten uitgedrukt in µg PFOS per kg d.s. plant versus de concentratie in oppervlaktewater uitgedrukt in ng PFOS per liter; dit is een afwijkende eenheid). De op deze manier berekende $BSAF_{\text{vegetatie, PFOS}}$ varieerde tussen 10 en 528 ($\text{Log}(BSAF_{\text{vegetatie, PFOS}})$ is 1,0 – 2,7 voor oevervegetatie). (Gkika, 2024) heeft de concentratie van PFAS-verbindingen gemeten in sediment, water, de wortelzone van waterplanten, de bladeren van waterplanten en in wormen. De gemeten $\text{Log}(BSAF)_{\text{wormen, PFOS}}$ in de publicatie varieert tussen 2,0 en 2,5 (een factor 100 - 316). Een indicatieve $\text{Log}(BSAF)_{\text{algen, PFOS}}$ van 2,1 ligt in de lijn der verwachtingen.

3.3.1.2 Afsterven

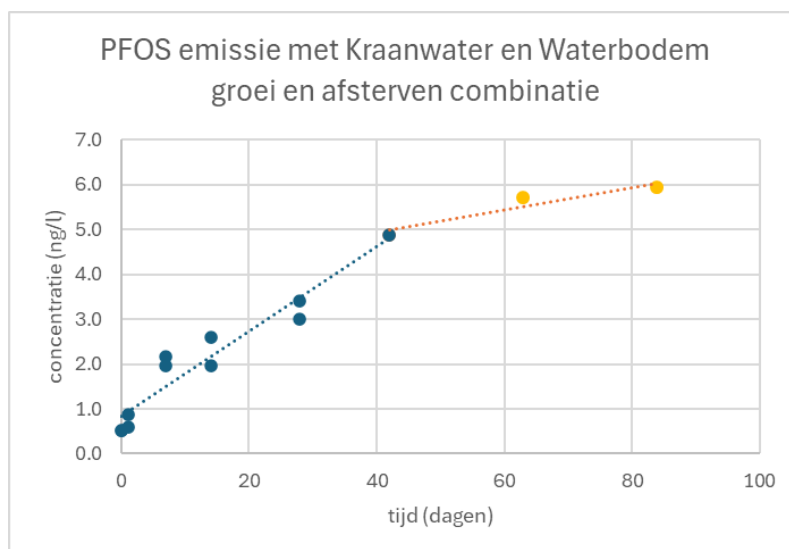
Er is gekeken naar de trend in waterconcentratie tijdens de groeifase van de algen en de fase waarin de algen gedood waren (met diuron) (Figuur 8).



Figuur 8 PFOS-concentratie tijdens de groeifase algen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aan- en afwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

Wat opvalt is dat de afname van de PFOS-concentratie in de waterfase gestopt is. Het is daarmee aannemelijk dat de algen een rol spelen in de opname van PFOS. Een andere mogelijke oorzaak van de afname (tijdens de groei periode) is de opname in de waterbodem. De waterbodemconcentratie (Ketelmeersediment) bedraagt 0,62 µg/kg d.s. De literatuurwaarde voor de $\text{log}(K_d)$ van PFOS bedraagt +/- 2,0 (RIVM, 2020, zie de Bijlage), wat neerkomt op een evenwichtconcentratie in de waterfase van 6,2 ng/l. De controle

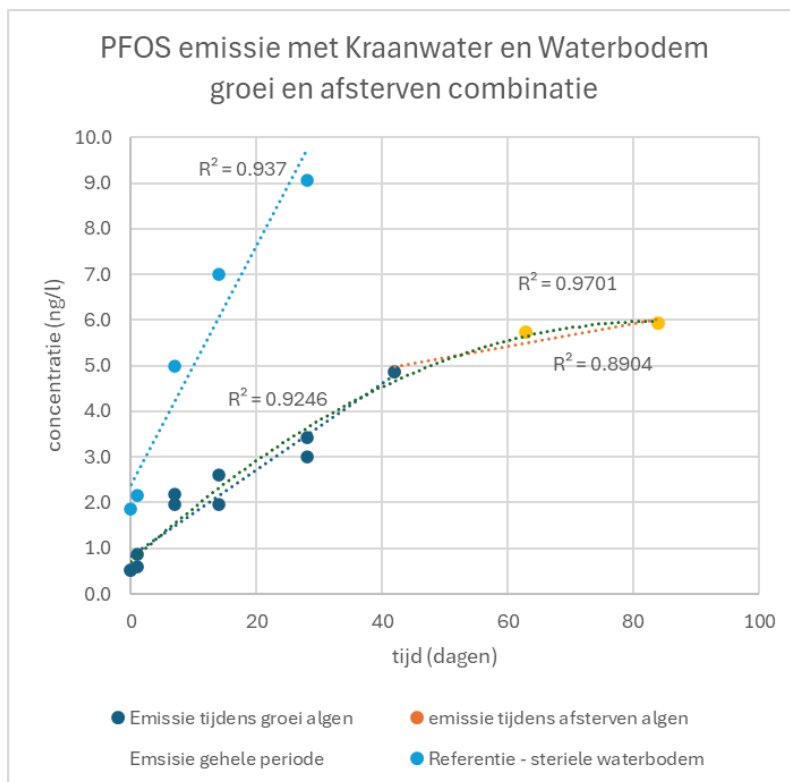
experimenten (duplo) met kraanwater (Figuur 9) laten zien dat de emissie uit de waterbodem inderdaad naar deze waarde oploopt (6,0 ng/l na 84 dagen), maar afzwakt in de afwezigheid van algen. Extrapolatie van de trend zou inhouden dat de evenwichtsconcentratie tussen waterbodem en oppervlaktewater na circa ½ jaar (6 maanden) bereikt wordt.



Figuur 9 PFOS-concentratie tijdens de groeifase (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met kraanwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

Figuur 9 suggereert een trendbreuk voor de emissie uit de waterbodem in de groei- en afsterf fase. Als ervan uitgegaan wordt dat de bodem/water uitwisseling een diffusie gedomineerd proces is (dat wil zeggen, de emissie neemt af met de afname van het concentratieverschil tussen het porie- en kraanwater) dan is de nalevering uit de waterbodem tijdens de groei- en afsterffase niet significant verschillend (Figuur 10).

Wat opvalt is dat de emissie uit de waterbodem in aanwezigheid van algen lager is dan de referentie (steriele waterbodem zonder algen), een duiding dat een deel van de PFOS-emissie opgenomen wordt door de algen.



Figuur 10 PFOS-concentratie tijdens de groeifase (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met kraanwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer), de regressie coëfficiënt voor referentie, groei en afsterven zijn lineair, voor de gehele periode is een 1e orde polymeerfit passend

3.3.2 Bioaccumulation Factor voor PFOA

3.3.2.1 Groei

Voor PFOA geldt dat er geen sprake is van een verhoogde emissie uit een steriele waterbodem. De emissie is 38% lager, wat gezien de onnauwkeurigheid in de metingen lager is dan de significantiegrens (de analytische onzekerheid in de PFAS-bepaling in het sediment is circa 30%, er worden twee waarden (T_0 en T_{42} dagen vergeleken, waardoor de onzekerheid 50% bedraagt). De $BSAF_{\text{algen, PFOA}}$ kan niet bepaald worden.

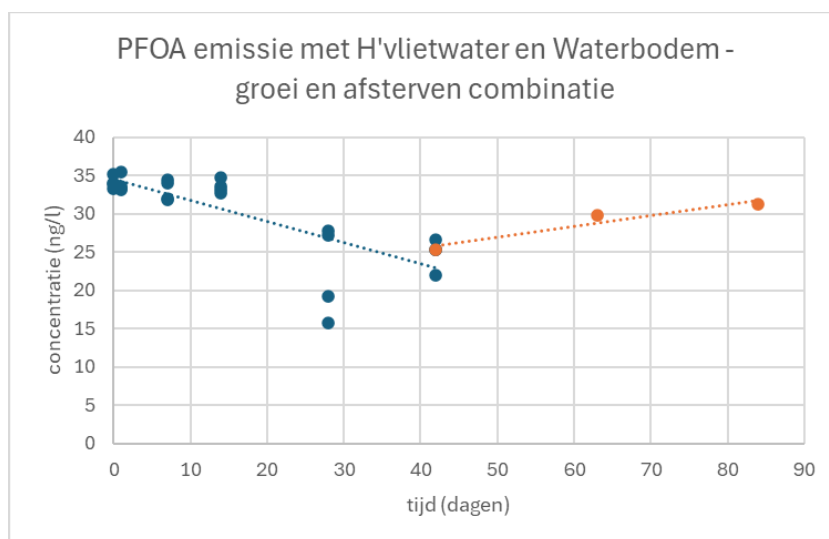
In het Deltares rapport “PFAS emissie Rijksbaggerdepots” (Deltares, 2023) bedraagt de $BSAF_{\text{vegetatie, PFAS}}$ voor PFOA tussen de 0 (niet in planten aangetroffen) en 29 ($\text{Log}(BSAF)_{\text{vegetatie, PFOA}}$ is 1,5). (Gkika, 2024) rapporteert voor wormen alleen indirecte $BSAF$ -waarden (niet gemeten in de worm, maar op basis van de massabalans van de waterbodem). De $\text{Log}(BSAF)_{\text{wormen, PFAS}}$ bedraagt 0,7 – 1,2.

Het niet kunnen aantonen van bioaccumulatie van PFOA in algen wijkt niet af van de eerdere resultaten en literatuurwaarden. Bioaccumulatie in algen beïnvloedt de bodem/water uitwisseling van PFOA in geringe mate.

3.3.2.2 Afsterven

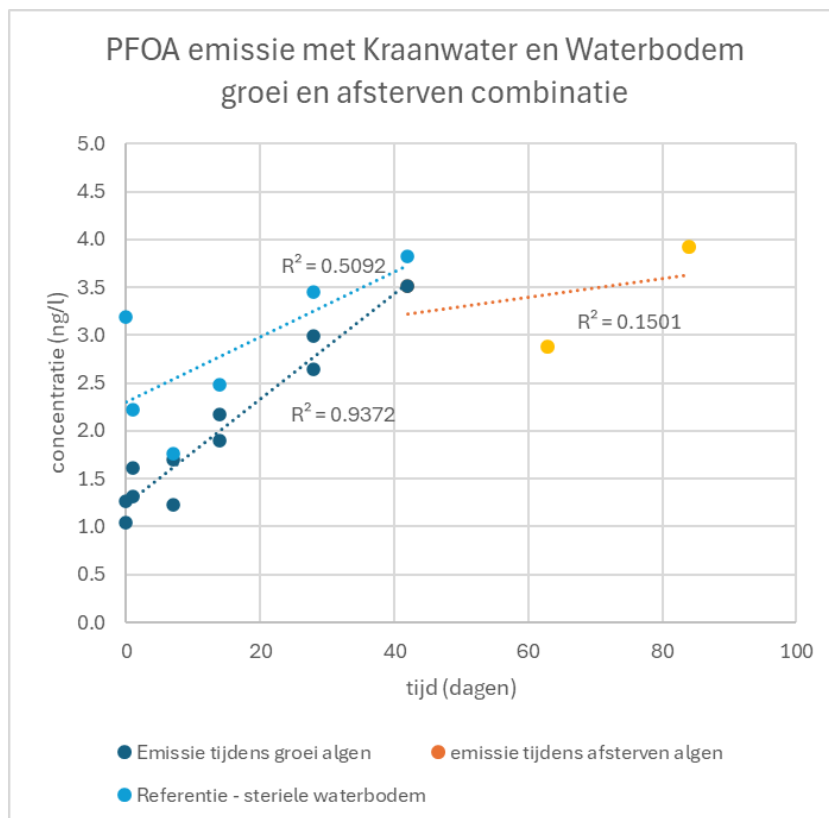
Hoewel de trend in PFOA-emissie uit een steriele waterbodem met en zonder algen niet significant afwijkt laten de proeven met Haringvlietwater en de Ketelmeer waterbodem zien dat er opname van PFOA is uit de waterfase tijdens de groeifase (Figuur 11). Deze opname is 64% lager dan voor PFOA. Op basis hiervan kan alsnog een $\text{Log}(BSAF)_{\text{algen}}$ voor PFOA geschat worden van 1,7, al is deze inschatting door het ontbreken van een correlatie met de waterbodemconcentratie sterk indicatief.

Bij het afsterven van de algen vindt er emissie plaats (Figuur 11). Een deel (52%) van de in de algen opgenomen PFOA komt vrij in de waterfase.



Figuur 11 PFOA-concentratie tijdens de groeifase (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) van de algen met Haringvlietwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

Als naar de emissie over de gehele periode gekeken wordt wanneer er initieel geen PFOA-bron in de waterfase aanwezig is (kraanwater) dan is het verschil in emissie tijdens de groeifase ten opzichte van de referentie (steriele waterbodem zonder algen) minder duidelijk aanwezig (Figuur 12). Tijdens het afsterven is de emissie lager, maar is ook de regressiecoëfficiënt laag.



Figuur 12 PFOA concentratie tijdens de groeifase algen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met kraanwater en in aanwezigheid van de waterbodemb (Ketelmeer), de regressie coëfficiënt voor referentie, groei en afsterven zijn lineair

3.4 Opname en afgifte van PFAS - Waterplanten

3.4.1 Bioaccumulation Factor voor PFOS

3.4.1.1 Groei

De opname in waterplanten is conform de methodiek voor algen berekend, met als verschil dat het natgewicht van de plant na afloop bekend is (+/- 5 gram per stuk, 16 stuks). Het drooggewicht is niet exact bepaald maar bedraagt circa 10% van het natgewicht.

Tabel 3 Inschatting PFOS concentratie in waterplanten

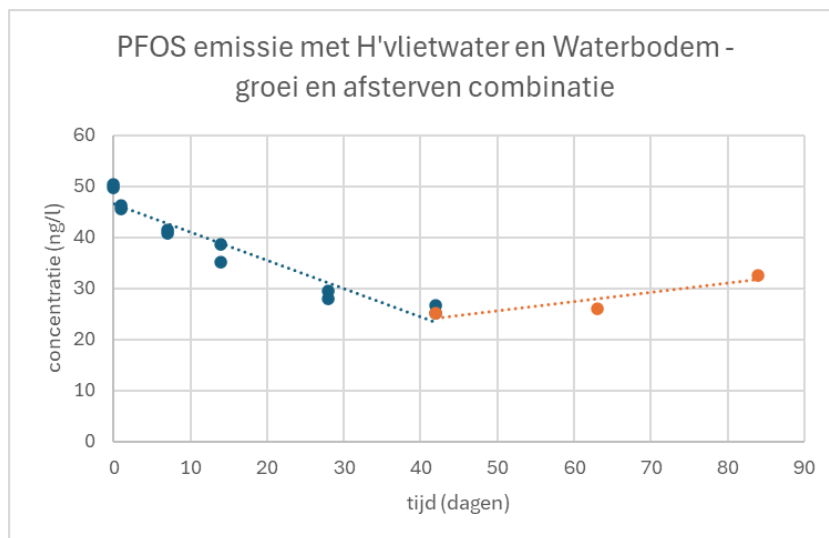
Waterplanten	Kraanwater en waterplanten	8.38	ng/(m2.dag)		
	REF (steriele waterbodemb, kraanwater, geen v	46.97	ng/(m2.dag)		
	Verschil = opname waterplanten	38.59	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.1	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOS door waterplanten	0.162	µg		
	Biomassa waterplanten (droog, +/- 10% van totaalgew.)	10	gram per plant	160000	mg
	Schatting biomassa planten na 42 dagen	160000	mg		
	Schatting PFOS concentratie in waterplanten	1.01	µg PFOS per kg plant		

De een $BSAF_{\text{waterplanten}}$ voor PFOS bedraagt 1,27, de $\text{Log}(BSAF_{\text{waterplanten}})$ PFOS is 0,1).

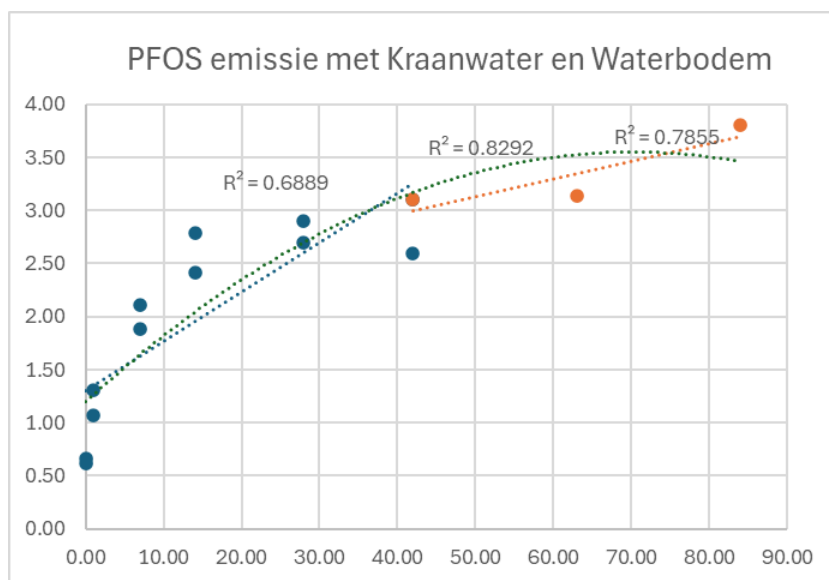
De biomassa waterplanten was voldoende voor een bepaling van de concentratie in de waterplant. Deze bedroeg bij blootstelling aan Haringvlietwater 0,12 µg/kg PFOS nat gewicht. De referentiewaarde was 0,10 µg/kg PFOS nat gewicht. Het verschil, 0,02 µg/kg PFOS, genormeerd op het drooggewicht (10%) levert een PFOS-concentratie van 0,2 µg/kg d.s. op. Dit is een factor 5 lager dan de via de emissie bepaalde waarde (Tabel 3).

3.4.1.2 Afsterven

Ook voor de waterplanten geldt dat de afname in de waterfase (door de opname in de waterplanten) stopt nadat de waterplanten gedood zijn (Figuur 13). Een deel (32%) van de in de waterplanten opgenomen PFOS komt vrij in de waterfase. Het afsterven van de waterplanten heeft geen invloed op de waterbodem (Figuur 14).



Figuur 13 PFOS-concentratie tijdens de groeifase waterplanten (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)



Figuur 14 PFOS-concentratie tijdens de groeifase waterplanten (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met kraanwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer), regressie coëfficiënt tijdens groei en afsterven (lineair) en over de gehele periode (1e orde)

3.4.2 Bioaccumulation Factor voor PFOA

3.4.2.1 Groei

De opname in waterplanten is conform de methodiek voor planten berekend, met als verschil dat het natgewicht van de plant na afloop bekend is (+/- 5 gram per stuk, 16 stuks). Het drooggewicht is niet exact bepaald maar bedraagt circa 10% van het natgewicht.

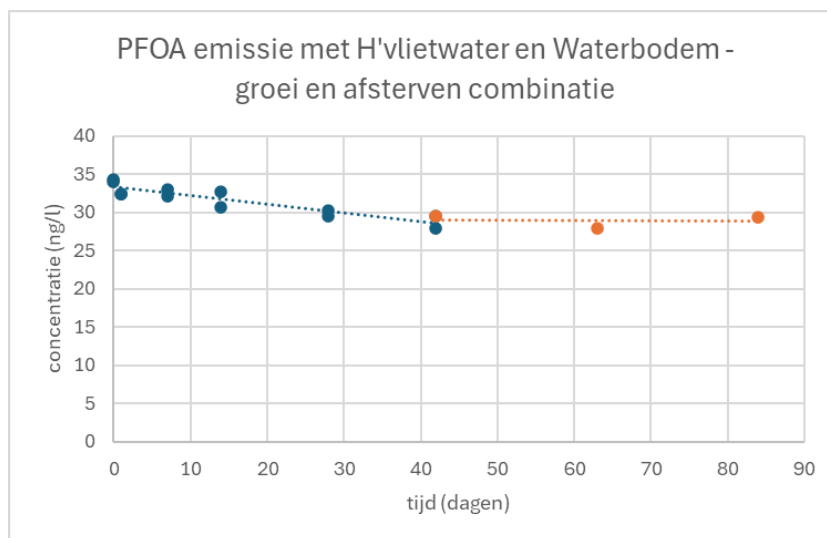
Tabel 4 Inschatting PFOA concentratie in waterplanten

Waterbodem	Kraanwater en waterplanten	0.80	ng/(m2.dag)		
REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen waterplanten)		6.13	ng/(m2.dag)		
	Verschil = opname waterplanten	5.33	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.10	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOA door waterplanten	0.022	µg		
	Biomassa waterplanten (droog, +/- 10% van totaalgew.)	10	gram per plant	160000	mg
	Schatting biomass planten na 42 dagen	2880000	mg		
	Schatting PFOA concentratie in waterplanten	0.008	µg PFOA per kg waterplanten		

De geschatte PFOA-concentratie in waterplanten is met 0,008 µg/kg d.s. (Tabel 4) lager dan de PFOA-concentratie in het sediment (0,10 µg/kg d.s.). Er is geen sprake van bioaccumulatie. De $BSAF_{\text{waterplanten}}$ voor PFOA is met 0,08 kleiner dan 1.

3.4.2.2 Afsterven

Dat bioaccumulatie in planten een geringe rol speelt blijkt ook uit de data tijdens afsterven (Figuur 15).



Figuur 15 PFOA-concentratie tijdens de groeifase (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) van de waterplanten met kraanwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

Na afsterven van de waterplanten stabiliseert de concentratie, er is echter geen sprake van nalevering door het afsterven.

3.5 Opname en afgifte van PFAS - Mosselen

3.5.1 Bioaccumulation Factor voor PFOS

3.5.1.1 Groei

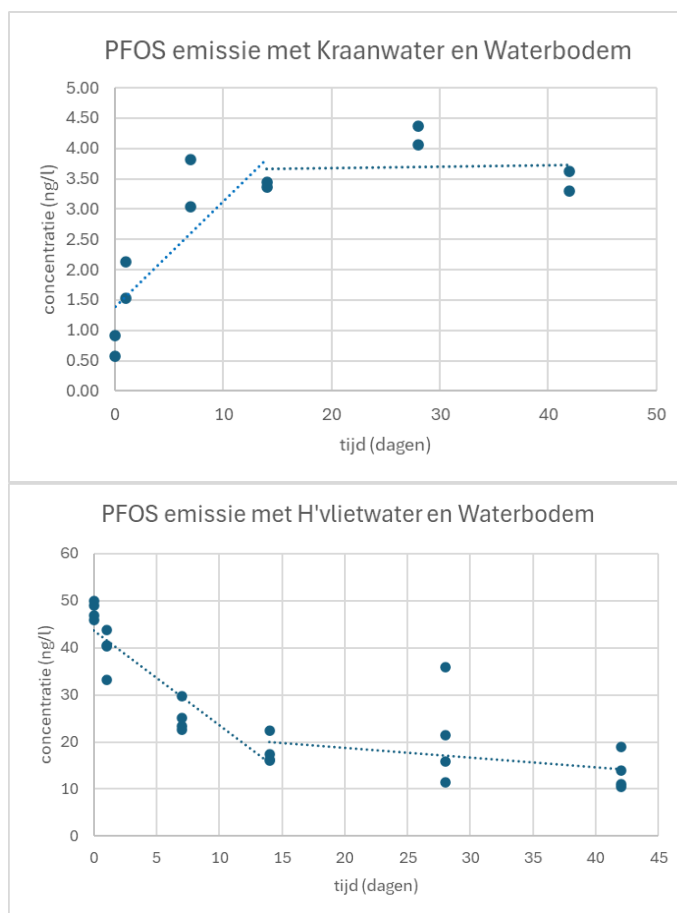
De Quagga mosselen (4 stuks), kennen een lichte mate van bioaccumulatie (Tabel 5).

Tabel 5 Inschatting PFOS concentratie in mosselen

Mosselen	Kraanwater en mosselen	11.50	ng/(m2.dag)		
REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen mosselen)		46.97	ng/(m2.dag)		
	Verschil = opname mosselen	35.47	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.1	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOS door mosselen	0.149	µg		
	Biomassa mosselen (droog,+/- 10% van totaalgew.)	5	gram per mossel	20000	mg
	Schatting biomassa mosselen na 42 dagen	20000	mg		
	Schatting PFOS concentratie in mosselen	7.45	µg PFOS per kg mossel		

De Bioaccumulation Factor voor mosselen ($BSAF_{\text{mosselen, PFOS}}$) op basis van de schattingen in Tabel 5 en de PFOS-concentratie in de waterbodem (Bijlage, Tabel 15), bedraagt 9,31, de $\text{Log}(BSAF_{\text{mosselen, PFOS}})$ is 1,0).

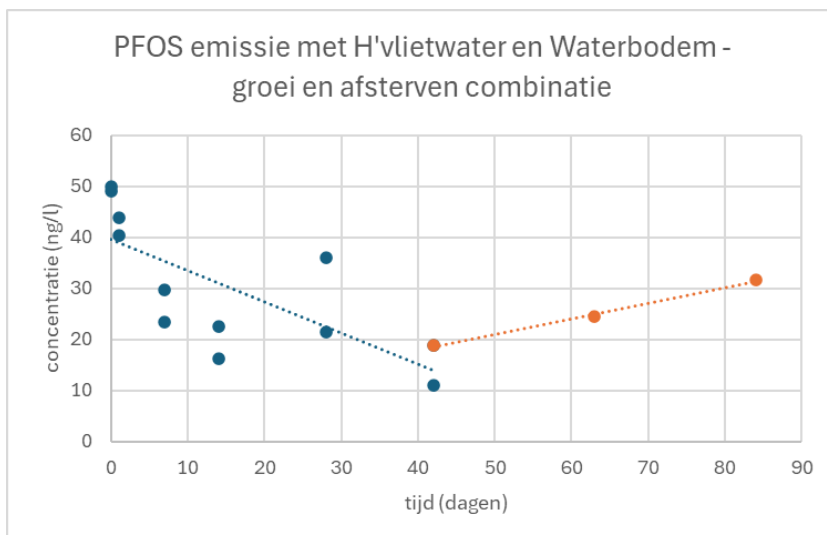
Hoewel de mosselen geen sterke bioaccumulatie kennen valt op dat de evenwichts-concentratie in water sneller wordt bereikt dan voor algen of waterplanten. Dit geldt zowel voor de nalevering (emissie met kraanwater) als de opname (Haringvlietwater), zie Figuur 16.



Figuur 16 PFOS-concentratie tijdens de groeifase van de mosselen voor kraanwater (boven) en Haringvlietwater (onder)

3.5.1.2 Afsterven

Tijdens het afsterven van de mosselen (vermalen en teruggeplaatst in de bak) wordt een deel van de opgenomen PFOS naar de waterfase terug geleverd (Figuur 17).



Figuur 17 PFOS-concentratie tijdens de groeifase mosselen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aan- en afwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

3.5.2 Bioaccumulation Factor voor PFOA

3.5.2.1 Groei

De mosselen kennen een zeer geringe mate van bioaccumulatie (Tabel 6).

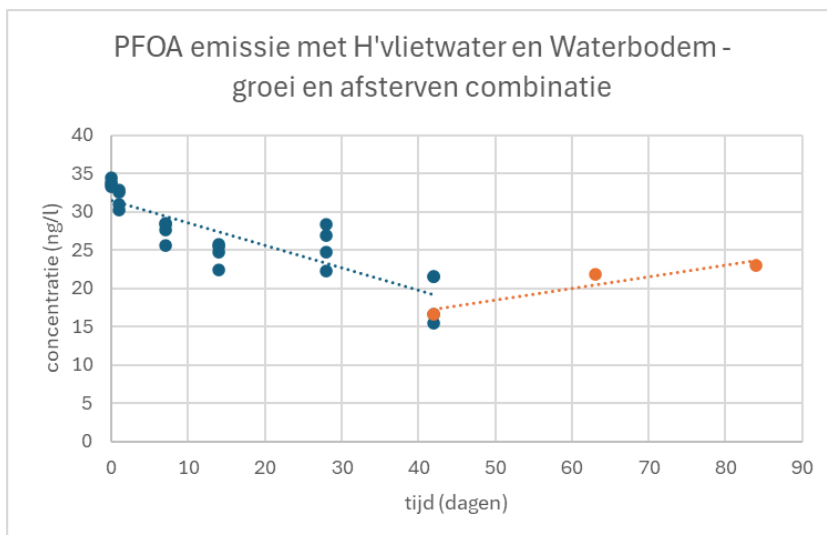
Tabel 6 Inschatting PFOA concentratie in mosselen

Mosselen	Kraanwater en mosselen	1.34	ng/(m2.dag)		
REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen mosselen)		6.13	ng/(m2.dag)		
	Verschil = opname mosselen	4.79	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.10	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOA door mosselen	0.020	µg		
	Biomassa mosselen	5	mg/l ->	20000	mg/l
	Schatting biomassa mosselen na 42 dagen	360000	mg		
	Schatting PFOA concentratie in mosselen	0.056	µg PFOA per kg mosselen		

De Bioaccumulation Factor voor mosselen ($BSAF_{\text{mosselen, PFOA}}$) op basis van de schattingen in Tabel 6 en de PFOA-concentratie in de waterbodem (Bijlage, Tabel 15), bedraagt 0,56, de $\text{Log}(BSAF_{\text{mosselen, PFOA}})$ is -0,25).

3.5.2.2 Afsterven

Het patroon van PFOA-opname bij groei en afgifte bij afsterven door mosselen lijkt sterk op dat van PFOS (Figuur 18).



Figuur 18 PFOA-concentratie tijdens de groeifase mosselen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aan- en afwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

PFOA kent een +/- 2x zo flauwe gradiënt ($\frac{dC}{dt}$) voor zowel de opname bij groei als

afgifte bij afsterven van de mosselen. Omdat ook de originele concentratie in de waterfase globaal een factor 1½ verschilt (PFOS = 48 ng/l / PFOA = 34 ng/l) is het verschil in opname en afgifte tussen PFOS en PFOA niet significant (het concentratieverschil werkt door in de opname/afgifte snelheid).

3.6 Opname en afgifte van PFAS - Wormen

3.6.1 Bioaccumulation Factor voor PFOS

3.6.1.1 Groei

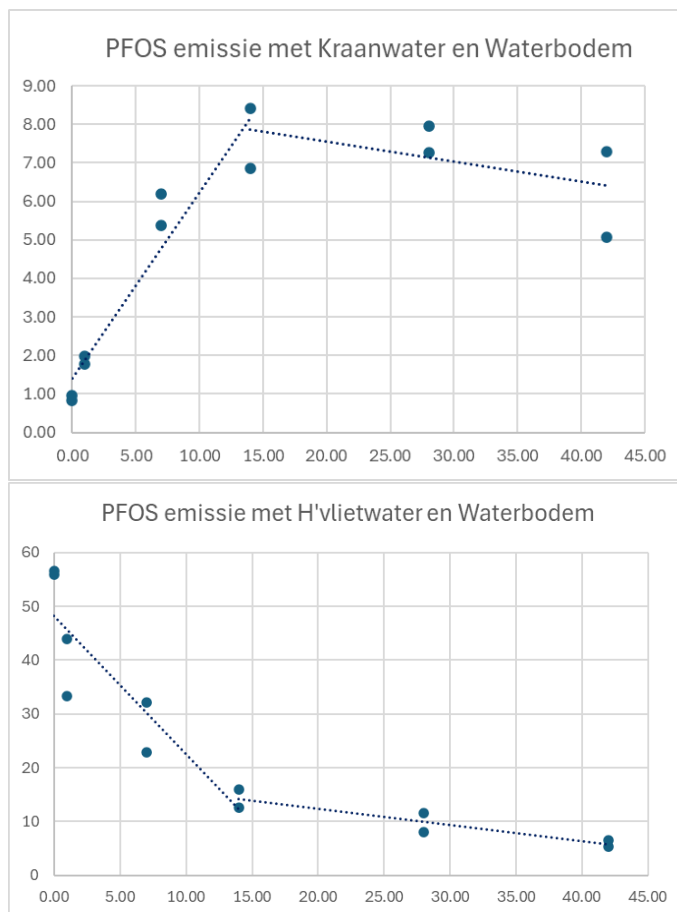
De opname in wormen is conform de methodiek voor algen berekend, met als verschil dat het natgewicht van de wormen vooraf bekend is (2 tubes van 25 gram natgewicht). Het drooggewicht is niet exact bepaald maar bedraagt circa 10% van het natgewicht.

Tabel 7 Inschatting PFOS concentratie in wormen

Wormen	Kraanwater en waterplanten	21.09	ng/(m2.dag)		
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen water)	46.97	ng/(m2.dag)		
	Vershil = opname wormen	25.88	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.1	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOS door wormen	0.109	µg		
	Biomassa wormen, 50 gram natgew. per bak, 10% drooggewicht	2.5	am per tuk	5000	mg
	Schatting biomass wormen na 42 dagen	5000	mg		
	Schatting PFOS concentratie in wormen	21.74	µg PFOS per kg wormen		

De BSAF_{wormen, PFOS} bedraagt 27,17, de Log(BSAF_{wormen, PFOS}) is 1,43.

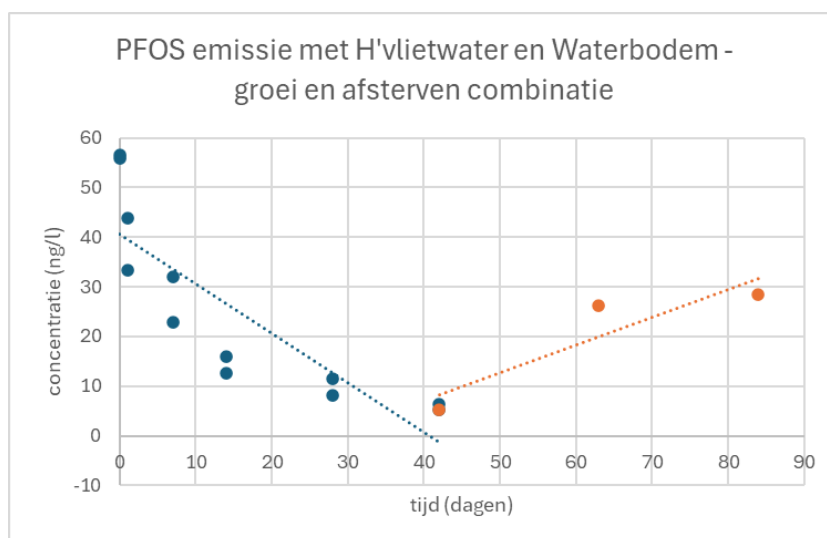
Voor de wormen valt, evenals voor de mosselen, op dat de uitwisseling in de 1^e 2 weken sneller verloopt dan zonder organismen, en dan afzwakt.



Figuur 19 PFOS-concentratie tijdens de groeifase van de wormen voor kraanwater (boven) en Haringvlietwater (onder)

3.6.1.2 Afsterven

De wormen zijn gedood met 100mg anti-wormtabletten mebendazol en 1 tablet van 80 mg Simparica. De opname van PFOS uit de waterfase tijdens de groeiperiode wordt grotendeels tenietgedaan door de emissie ten gevolge van het afsterven van de wormen (Figuur 20).



Figuur 20 PFOS-concentratie tijdens de groeifase wormen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

3.6.2 Bioaccumulation Factor voor PFOA

3.6.2.1 Groei

De wormen kennen enige bioaccumulatie, maar ten opzichte van de sedimentconcentratie is er geen sprake van aanreiking.

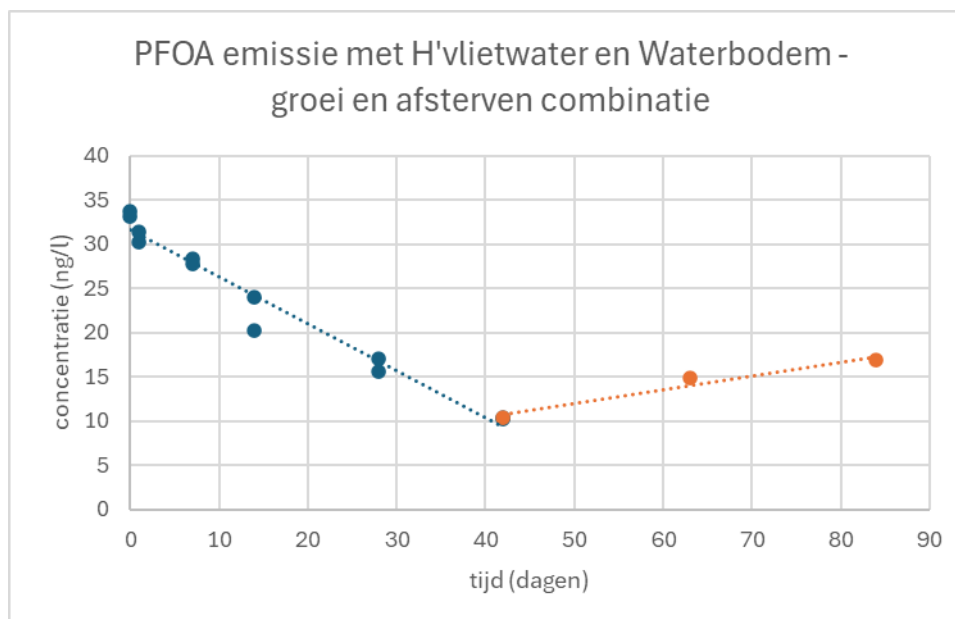
Tabel 8 Inschatting PFOA-concentratie in wormen

Waterbodem	Kraanwater en wormen	3.82	ng/(m2.dag)		
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen wormen)	6.13	ng/(m2.dag)		
	Verschil = opname wormen	2.31	ng/(m2.dag)		
	aantal m2	0.10	m2		
	aantal dagen proef	42	dagen		
	totaal opgenomen PFOA door wormen	0.010	µg		
Biomassa wormen, 50 gram natgew. per bak, 10% drooggewicht		2.5	gram per tube	5000	mg
	Schatting biomassa wormen na 42 dagen	90000	mg		
	Schatting PFOA concentratie in wormen	0.108	µg PFOA per kg wormen		

De Bioaccumulation Factor voor wormen ($BSAF_{wormen, PFOA}$) op basis van de schattingen in Tabel 8 en de PFOA-concentratie in de waterbodem (Bijlage, Tabel 15), bedraagt o 1,08, de $Log(BSAF_{wormen, PFOS})$ is 0,03).

3.6.2.2 Afsterven

Het patroon van PFOA opname bij groei en afgifte bij afsterven voor wormen (Figuur 21) lijkt sterk op dat van PFOS (Figuur 20). Ook PFOA wordt tijdens de groeifase uit de waterfase opgenomen en komt deels vrij bij het afsterven van de wormen.



Figuur 21 PFOA-concentratie tijdens de groeifase wormen (dag 0 – 42) en afsterven (dag 42 – 84) met Haringvlietwater en in aanwezigheid van de waterbodem (Ketelmeer)

4 Discussie

Doel van dit onderzoek is een trendmatige analyse van de concentratie ontwikkeling in het oppervlaktewater, het sediment en biota. Het aantal PFAS-verbindingen waarvoor dit voor alle drie de compartimenten kan worden uitgevoerd is beperkt. Met name in biota kon alleen PFOS en PFOA in een beperkt aantal samples aangetoond worden (PFOS in 2 van de 6 samples, PFOA in 1 van de 6 samples). Ook voor sediment was het aantal detecteerbare PFAS-verbindingen beperkt, voor PFOS en PFOA lag het percentage waterbodems met een aantoonbare concentratie op 100% (PFOS) en 30% (PFOA). Om deze reden wordt de focus op PFOS en PFOA gelegd.

4.1 PFAS-concentratie in water, waterbodem en organismen

Als basis voor de experimenten is licht verontreinigd (< HVN) Ketelmeer sediment gebruikt. Op basis van de aanname dat de gepubliceerde K_d correct is voor deze waterbodem (RIVM, 2020 – zie de Bijlage) is de poriewaterconcentratie berekend en vergeleken met de oppervlaktewaterconcentraties (kraanwater en Haringvliet depotwater). Tabel 9 geeft de gemeten (en berekende porie)water en sediment concentraties.

Tabel 9 Gemeten (en berekende porie)water en sediment concentraties

		Sediment som (L+Br) ($\mu\text{g/kg Ds}$)	K_d (l/kg)	Water		
				poriewater (ng/l)	kraan (ng/l)	H'vliet (ng/l)
PFOS	Ketelmeer sediment (op basis van REF; steriele bodem + water)	0.62	100	6.21	0.00	50.65
PFOA	Ketelmeer sediment (op basis van REF; steriele bodem + water)	0.13	10	13.38	0.00	34.05

Tabel 9 illustreert dat de emissie voor de experimenten met kraanwater (waarin geen PFAS aanwezig is) van de waterbodem naar het oppervlaktewater plaatsvindt, en voor de experimenten met Haringvlietwater (waarin al PFAS aanwezig is) van het oppervlaktewater naar het sediment. Dit sluit aan bij de resultaten in paragraaf 3.2 voor PFOS en PFOA (Figuur 6 en Figuur 7). Een voorbeeld waarin het verband verduidelijkt wordt is Figuur 8 voor de afname in de PFOS waterconcentratie (en opname in de waterbodem) bij gebruik van Haringvlietwater. En Figuur 9 waarin de toename in de PFOS waterconcentratie (en afname in de waterbodem) bij gebruik van kraanwater wordt geïllustreerd.

4.2 PFAS massabalans en emissies per soort / Opname en afgifte van PFAS

Opvallend is dat de emissies uit de waterbodem bij het gebruik van kraanwater (of de opname in de waterbodem bij het gebruik van Haringvlietwater voor zowel PFOS als PFOA sneller verloopt in de afwezigheid van organismen (de steriele referentie). Dit duidt erop dat organismen PFOS (en in minder mate PFOA) opnemen. De mate van opname kan worden uitgedrukt in de Bioaccumulatie factor (BSAF). Naast de BSAF speelt echter ook de totale biomassa een rol. In Tabel 10 staat de BSAF en het % opname in de organismen afgezet tegen de waterconcentratie op T_0 (Haringvliet water), de sediment-concentratie en ten opzichte van de totale hoeveelheid PFOS en PFOA in het aquarium.

Tabel 10 BSAF per organisme en PFAS opname als % van de hoeveelheid PFAS

Bioaccumulatie factor (BSAF)	PFOS	PFOA
Algen	124599	-125905
Waterplanten	1.27	0.08
Mosselen	9.31	0.56
Wormen	27.17	1.08

% PFAS opgenomen in organisme	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA
	t.o.v. H'vliet w %	t.o.v. H'vliet w %	t.o.v. waterbodem %	t.o.v. waterbodem %	t.o.v. totaal water en waterbodem %	t.o.v. totaal water en waterbodem %
Algen	13.78%	-2.59%	10.11%	-5.93%	5.83%	-1.80%
Waterplanten	17.78%	3.65%	13.05%	8.37%	7.53%	2.54%
Mosselen	16.34%	3.29%	12.00%	7.53%	6.92%	2.29%
Wormen	11.92%	1.59%	8.75%	3.63%	5.05%	1.10%
som organismen	59.82%	5.94%	43.91%	13.60%	25.32%	4.13%

4.2.1 PFOS-accumulatie bij groei

Tabel 10 laat zien dat de BSAF alleen niet alles zegt maar dat ook de biomassa van belang is. Met name waterplanten en mosselen hebben invloed op de PFOS-concentratie. In een systeem waar deze organismen gezamenlijk zouden voorkomen, en elkaar niet hinderen in hun groei, zou 60% van de PFOS in de waterfase opgenomen worden in de organismen. Dit is over een tijdsperiode van 6 weken. Het actieve groeiseizoen varieert per organisme, maar uitgaande van de periode mei – september (5 maanden of 21 weken) zou circa 50% van de PFOS accumuleren (Tabel 11).

Tabel 11 PFAS-opname als % van de hoeveelheid PFAS in H'vliet water over groeiseizoen mei - september

% PFAS opgenomen in organisme over groeiseizoen (mei tot en met september)	PFOS t.o.v. H'vliet w %	PFOA t.o.v. H'vliet w %
Algen	41.62%	-9.72%
Waterplanten	50.87%	12.64%
Mosselen	47.68%	11.42%
Wormen	36.93%	5.64%
som organismen	96.35%	19.92%

In praktische zin zou dit kunnen betekenen dat de PFOS-concentratie in oppervlaktewater met een lange verblijftijd in de zomer (verblijftijd water 6 maanden of langer; zoals veel vennen, meren en sloten) sterk (>50%) daalt door opname in organismen. Voor systemen met een hoge waterverversing (verblijftijd korter dan 6 weken; zoals rivieren, vaarten en estuaria) zal de invloed van organismen gering (<10%) zijn.

4.2.2 PFOA-accumulatie bij groei

Tabel 10 en Tabel 11 laten zien dat bioaccumulatie niet relevant is voor PFOA. De BSAF is voor veel organismen <1 en de invloed op de waterconcentratie tijdens het groeiseizoen is nihil (algen) tot iets meer dan 10% (waterplanten en mosselen). Voor PFOA in oppervlaktewater speelt de groei van organismen geen relevante rol. Vertaald naar risico's voor het organisme en in de voedselketen, is er geen sprake van een significante (BSAF >1) accumulatie van PFOA in organismen (wormen vormen met een BSAF van 1,08 een grensgeval).

4.2.3 PFOS vrijkomen bij afsterven

Tabel 12 geeft de Δ concentratie (in ng/l) in de waterfase voor PFOS en PFOA weer voor de opname (groei) en afgifte (afsterven) over de periode van 42 dagen.

Tabel 12 opname (groei) en afgifte (afsterven) per liter water

PFOS	PFOS cyclus		Teruggave groei en afsterven	Verwijderd groei en afsterven
	totaal opname	totaal teruggave		
	0-42 dagen (ng/l)	0-42 dagen (ng/l)	% teruggave	% verwijderd
Algen	18.153	-1.145	-6%	106%
Waterplanten	23.230	7.460	32%	68%
Mosselen	33.914	12.780	38%	62%
Wormen	44.338	23.300	53%	47%
PFOA	PFOA cyclus		Teruggave groei en afsterven	Verwijderd groei en afsterven
	totaal opname	totaal teruggave		
	0-42 dagen (ng/l)	0-42 dagen (ng/l)	% teruggave	% verwijderd
Algen	11.596	6.000	52%	48%
Waterplanten	4.831	-0.200	-4%	104%
Mosselen	13.572	6.400	47%	53%
Wormen	22.318	6.500	29%	71%

Wat opvalt is dat de algen de gedurende 42 dagen opgenomen PFOS niet afgeven bij afsterven (42 dagen). Voor de overige organismen geldt dat circa 30 - 50% van de PFOS terugggegeven wordt aan de waterfase, en 70 - 50% in de waterbodem achterblijft. De tijdschaal van 2x 42 dagen (6 weken) is korter dan een seizoen, zowel voor groei als voor afsterven. Maar indien de PFOS teruggave versus verwijderingspercentages gecombineerd worden met Tabel 11 (extrapolatie over het groeiseizoen) dan wordt circa de helft van de PFOS opgenomen tijdens het groeiseizoen, en wordt de helft van de opgenomen PFOS tijdens het afsterven weer terug geleverd naar de waterfase. Het groeiseizoen kan ruwweg een schommeling van 25% van de PFOS concentratie in de waterfase tussen zomer (lager) en winter (hoger) verklaren, uitgaande van een verder gesloten massabalans.

Op basis van de niet terug geleverde PFOS fractie kan een *zeer speculatieve* toename van PFOS in de waterbodemconcentratie voorspeld worden indien de Ketelmeer waterbodem langjarig blootgesteld zou worden aan Haringvliet water, rekening houdend met de sedimentatie van zwevend slib (in evenwicht met het opp. water) en de biomassa (op basis van gemiddelde van de vier organismen, waterkolom van 1 meter).

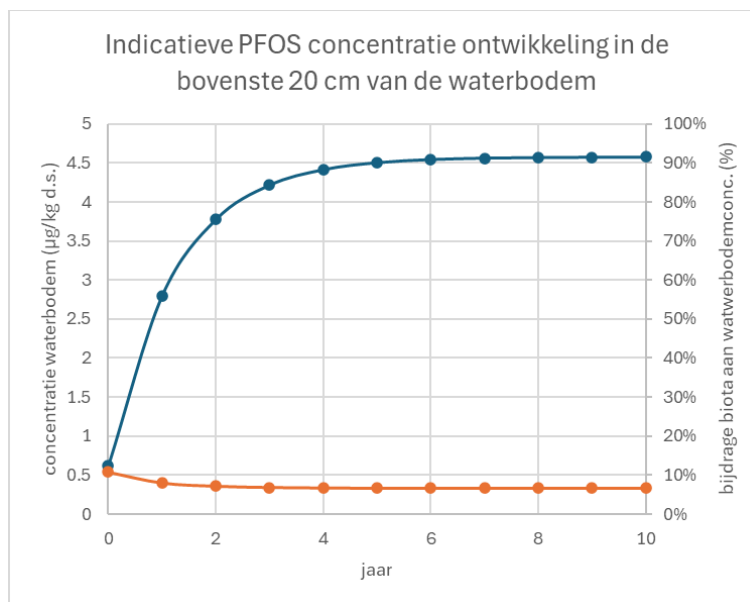
Uitgangspunten:

- De gemeten PFOS Ketelmeer sedimentconcentratie van 0,62 µg/kg d.s.
- Een verhoogde PFOS concentratie in het H'vliet oppervlaktewater van 50,65 ng/l
- Een opname van 50% van de PFOS in de waterkolom
 - Waterdiepte 1 meter
- Een totaal organisch stof (OM) gehalte in de waterbodem van 10 massa %, afkomstig van de biomassa (som algen, wormen, waterplanten en mosselen) van dat jaar

Biomassa per m3	PFOS (ug/kg biota)	biota m3 massa (gram)	PFOS (ng)	
algen	99679	0.007	698	62%
waterplanten	1.01	160	162	15%
mosselen	7.45	20	149	13%
wormen	21.74	5	109	10%
som		185.0	1118	
gemiddeld	6.04	(ug/kg biota)		

- Een teruggave van 50% van de opgenomen PFOS uit de biomassa.
- Aangroeiensnelheid waterbodem 1,0 cm sediment per jaar
 - Bulkdichtheid waterbodem = 1.600 kg/m3
 - Dichtheid sediment = 2.500 kg/m3
 - 10 massa % OM is bij aangroeiensnelheid 1,0 cm/jaar: 1,0 kg OM/m2
- Verblijftijd water 1 jaar (d.w.z. dat er 1x per jaar het water wordt verversd met een concentratie van 50,65 ng/l)

Figuur 22 geeft het indicatief verloop van de waterbodemconcentratie, aannemende dat de waterbodem in de bovenste 20 cm gemengd wordt (bioturbatie).



Figuur 22 Indicatieve concentratie ontwikkeling waterbodem onder invloed van Haringvliet oppervlaktewater concentratie, 1 cm sedimentatie per jaar (zw.slib in evenwicht met opp. water, K_d PFOS = 100) en netto opname in biota (biota = OM = 10% van sedimentrend zw. slib)

Figuur 22 is indicatief bedoeld, het is een modelmatige benadering voor een meer met een waterdiepte van circa 1 meter en een geringe (1x per jaar) verversing. Wat Figuur 22 illustreert is dat in een watersysteem waarin er een onbalans is tussen de oppervlakte-waterkwaliteit en de waterbodem de abiotische uitwisseling 90 – 95% van de concentratieontwikkeling in de waterbodem bepaald. De bijdrage van biota in de vorm van algen, waterplanten, mosselen of wormen is dus gering (max. 5-10 % bijdrage).

Het is onbekend welk deel van het OM in het sediment het resultaat is van begraven van lokaal organisch materiaal, en welk deel refractair organisch materiaal is (met een andere herkomst en andere PFOS opname). Kijkend naar de som biomassa van alle organismen in de experimenten van 185 gram per m^2 (voor afsterven) op een geschatte OM begraving van 1.00 kg per jaar per m^2 , wordt verwacht dat bij 50% verlies van biomassa door afsterven de bijdrage van lokaal geproduceerd OM minder dan 10% van het totale OM bedraagt. De OM aanrijking bedraagt dan nog 5%. Of een bodemcorrectie voor PFOS op basis van het OM gehalte in sediment in de regel zinvol is kan op basis van deze data niet geconcludeerd worden

4.2.4 PFOA vrijkomen bij afsterven

Voor PFOA geldt dat de bioaccumulatie gering is. Aangezien de rol van PFOA met betrekking tot de bioaccumulatie +/- een 20 factor geringer is dan voor PFOS (Tabel 13) speelt de jaarcyclus van groei en afsterven nauwelijks een rol voor de oppervlaktewaterconcentratie, en zal de bioaccumulatie van PFOA ook geen significante invloed hebben op de waterbodemconcentratie.

Tabel 13 Bioaccumulatie factoren voor PFOS en PFOA voor de vier verschillende organismen

Bioaccumulatie factoren	PFOS	PFOA	Verskil bioaccumulatie PFOSvs PFOA
Algen	124599	-125905	-
Waterplanten	1.27	0.08	16.29
Mosselen	9.31	0.56	16.65
Wormen	27.17	1.08	25.17

5 Conclusies

Organismen (biota) spelen een rol in de opname en uitwisseling van PFAS tussen de waterbodem en het oppervlaktewater waarbij bioaccumulatie op kan treden. In deze studie is de focus gelegd op twee PFAS verbindingen, PFOS en PFOA.

5.1 PFOS

De PFOS oppervlaktewaterconcentratie in het groeiseizoen kan *ruwweg halveren* door opname in biota (algen, waterplanten, mosselen of wormen). Jaargemiddeld is het effect van biota geringer omdat een deel (circa 50%) van de opgenomen PFOS weer vrijkomt als de biota na het groeiseizoen afsterft.

- Voor watersystemen met een lange waterverblijftijd en veel biologische activiteit zoals meren (met voldoende licht voor bodemleven) kan opname (groei) en afgifte (afsterven) van PFOS in biota van invloed zijn op de PFOS waterkwaliteit.
- Voor watersystemen met een korte waterverblijftijd (zoals rivieren en estuaria) is de rol van biota op de waterkwaliteit niet significant.

De aanwezigheid van biota dempt de PFOS water/bodem uitwisseling.

Voor de PFOS-concentratie in de waterbodem domineren de abiotische factoren, waaronder de zwevend slib concentratie en bezinksnelheid van zwevend slib. Door de opname in biota varieert weliswaar de oppervlaktewater concentratie (meren), maar dit heeft een relatief geringe invloed op de accumulatie van PFOS in de waterbodem. De bijdrage van PFOS in biota op de waterbodemconcentratie wordt op 5 – 10% geschat. Dit is voor een systeem met lange waterverblijftijd en een actief bodemleven (een ondiep meer).

Met uitzondering van algen (welke door een geringe massa een mogelijk uitvergroot effect hebben) is de bioaccumulatiefactor (BSAF) tussen de 1 en 30, met een gemiddelde van 12.

Bij afsterven wordt circa de helft van de PFOS opgenomen in biota terug afgegeven aan de waterkolom, het wordt niet begraven en gemineraliseerd in het sediment.

5.2 PFOA

PFOA kent een gemiddeld 20x minder sterke bioaccumulatie dan PFOS, wat in de praktijk neerkomt op concentraties gelijk of lager dan in de bulk van het sediment. Er is geen sprake van een seizoen afhankelijk effect van de waterconcentratie. De aanwezigheid van biota kan de uitwisseling tussen het sediment en het oppervlaktewater beïnvloeden, al is het dempend effect van biota op de emissie of immissie minder sterk aanwezig.

Het gebrek aan interactie tussen biota en PFOA heeft als impact dat er geen accumulatie in biota plaatsvindt, en daarmee ook de accumulatie in de voedselketen minder sterk is dan voor PFOS. Het grotendeels ontbreken van bioaccumulatiefactoren >1 houdt in dat een bodemcorrectie voor PFOA voor organisch materiaal in sediment geen toegevoegde waarde heeft.

6 Literatuurlijst

Deltares, 2021, PFAS emissie rijksbaggerdepots de rol van baggeren op het vrijkomen van PFAS, project 11206062, <https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/pfas-emissie-rijksbaggerdepots-de-rol-van-baggeren-op-het-vrijkomen-van-pfas>

Deltares, 2023, PFAS emissie Rijksbaggerdepots, project 11208088, https://publications.deltares.nl/11208088_000_0002.pdf

Gkika, Ioanna S., Kraak, Michiel H. S., van Gestel, Cornelis A. M., ter Laak, Thomas L., van Wezel, Annemarie P., Hardy, Robert, Sadia, Mohammad, Vonk, J. Arie, 2024, Bioturbation Affects Bioaccumulation: PFAS Uptake from Sediments by a Rooting Macrophyte and a Benthic Invertebrate, Environmental Science & Technology, volume 58, number 46, page 20607 – 20618, doi: 10.1021/acs.est.4c03868

RIVM, 2020, Verschil in uitloging van PFAS uit grond en bagger, RIVM-briefrapport 2020-0102, <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0102.pdf>

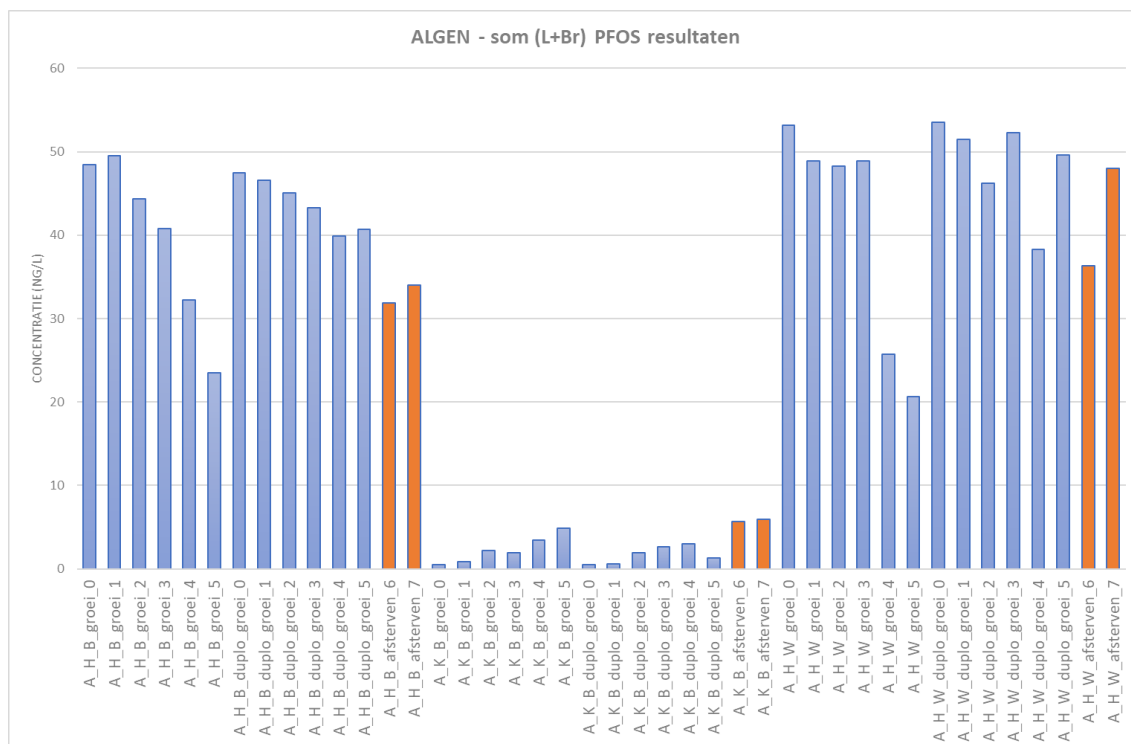
Williams, J.G., 1988, Construction of specific mutations in photosystem II photosynthetic reaction center by genetic engineering methods in *Synechocystis* 6803 Cyanobacteria, Methods in Enzymology, Vol. 167, pp. 766–778, doi:10.1016/0076-6879(88)67088-1.

De gemeten concentraties in de waterfase staan in Tabel 14.

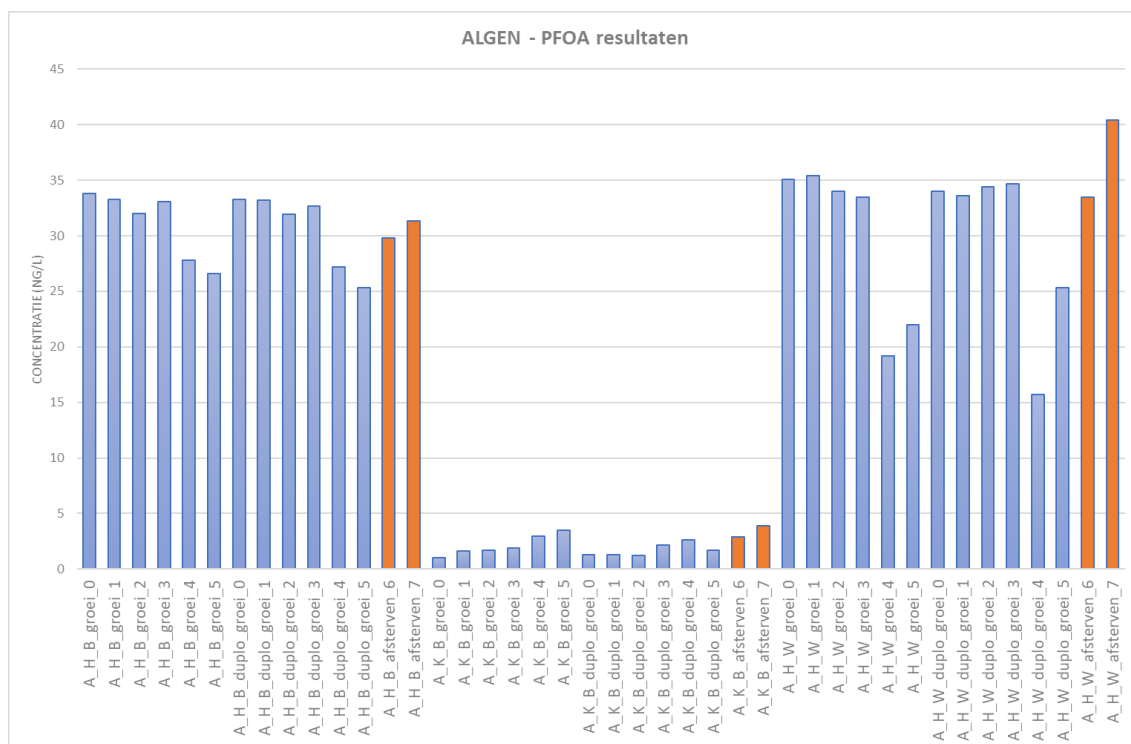
Tabel 14 Gemeten PFAS concentraties

Experiment	CI_PFSFOU	G2/FTS	G2/FTS	B2/FTS	B2/FTSUACI-PF30N-B_PPhDs	B_PPhDs	PFOS	DONA	FOSA	GenX	L_PFBs	L_PFDs	L_PHPBs	L_PPHFs	L_PFNs	L_PFGs	L_PPFes	e-ETOSAs-MeFOAs	PfBA	PfDA	PfDOA	PHFA	PFHAs	PFNA	PFOA	PFPeA	PFTA	PFTeDA	PFUDA	
A_H_B_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.737	18.8	0.07	0.192	1.84	41.9	0.07	0.818	4.34	0.07	29.6	0.612	0.377	0.07	1.6	1.73	0.07	11.1	17.5	3.23	33.80	14.9	0.07	0.255
A_H_B_duplo_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.774	17.9	0.07	0.153	1.09	0.07	0.842	4.43	0.07	30.5	0.584	0.375	0.07	16	1.63	0.07	11.2	17	3.46	33.30	12	0.07	0.305	
A_H_B_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.728	19.5	0.07	0.294	1.16	0.07	0.729	4.06	0.07	24.8	0.593	0.515	0.07	16.8	1.31	0.07	11.1	18.4	2.99	32.00	14.9	0.07	0.27	
A_H_B_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.712	18	0.07	0.23	1.07	0.07	0.824	4.13	0.07	22.4	0.554	0.377	0.07	16.8	1.31	0.07	11.2	18.4	2.99	32.00	14.9	0.07	0.115	
A_H_B_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.649	21.4	0.07	0.236	1.22	0.07	0.688	4.01	0.07	10.8	0.573	0.11	0.07	67	0.314	0.07	12.1	20.7	1.51	27.80	18.5	0.07	0.07	
A_H_B_groi_5	0.07	0.07	73.8	0.07	0.07	0.07	0.731	14.9	0.07	0.139	1.56	0.07	0.661	4.19	0.07	8.6	0.623	0.07	0.0605	196	0.357	0.07	13.3	27.2	1.24	26.60	23.3	0.07	0.07	
A_H_B_duplo_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.744	17.7	0.07	0.354	1.77	0.07	0.771	4.42	0.07	29.8	0.556	0.54	0.07	16.7	1.62	0.07	11.5	16.3	3.27	33.30	14.6	0.07	0.267	
A_H_B_duplo_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.722	18.6	0.07	0.159	2.44	14	0.07	0.805	4.32	0.07	28	0.556	0.673	0.07	16.9	1.56	0.07	11.4	16.6	3.33	33.20	15	0.07	0.269
A_H_B_duplo_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_B_duplo_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.728	21.9	0.07	0.607	1.51	13.9	0.07	0.754	4.22	0.07	21.4	0.514	0.07	0.07	29.4	0.07	11.5	18.4	2.99	32.70	15.4	0.07	0.109	
A_H_B_duplo_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.627	19.9	0.07	0.261	1.99	11.3	0.07	0.781	3.8	0.07	22.5	0.521	0.321	0.07	15.8	1.32	0.07	11.2	18.4	2.99	32.70	15.4	0.07	0.146
A_H_B_duplo_groi_5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.618	35.9	0.07	0.07	1.29	13	0.07	0.632	3.97	0.07	48.3	0.566	0.07	0.07	52.9	0.07	12.1	22	1.12	25.30	21.4	0.07	0.07	
A_H_B_asterven_6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.885	21.2	0.07	0.7	12	16.8	0.07	0.689	4.9	0.07	10.7	0.659	0.07	0.07	55	0.394	0.07	14.4	23.6	1.92	29.80	24.1	0.07	0.07
A_H_B_asterven_7	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.806	18.7	0.07	0.123	1.71	17.4	0.07	0.685	4.36	0.07	15.3	0.613	0.07	0.07	59	0.497	0.0718	13.7	23.3	2.35	31.30	22.9	0.07	0.07
A_K_B_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.16	0.07	0.07	5.87	0.07	0.106	0.7	0.07	0.355	0.07	0.07	0.909	0.07	0.07	0.13	0.138	0.07	1.04	0.248	0.07	0.07	0.07	
A_K_B_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.414	0.07	0.07	0.07	0.07	0.15	0.07	0.07	0.462	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.247	1.14	0.07	1.61	0.868	0.07	0.07	
A_K_B_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.895	0.07	0.07	0.07	5.54	0.07	0.352	0.07	0.07	1.28	0.07	0.07	0.07	0.121	0.07	0.07	0.688	2	0.115	1.70	0.72	0.07	0.07	
A_K_B_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.67	0.07	0.07	0.07	11	0.07	0.26	0.07	0.07	1.28	0.07	0.07	0.07	0.121	0.07	0.07	0.686	2.4	0.64	1.90	2.28	0.07	0.07	
A_K_B_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.0741	14.7	0.07	0.165	0.07	0.07	0.291	0.07	0.07	0.31	0.247	0.07	0.07	0.31	0.247	0.07	1.04	4.24	2.54	5.62	0.07	0.07		
A_K_B_groi_5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.0938	2.15	0.07	0.07	9.38	0.07	0.139	0.537	0.07	0.273	0.07	0.07	0.293	51.2	0.244	0.122	1.29	6.15	0.19	3.51	8.71	0.07	0.07	
A_K_B_duplo_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.182	0.07	0.07	0.29	0.07	0.07	0.078	0.07	0.344	0.07	0.07	0.07	1.09	0.07	0.07	0.219	0.605	0.07	1.27	0.82	0.07	0.07	
A_K_B_duplo_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.204	0.07	0.07	0.7	0.07	0.07	0.0929	0.07	0.383	0.07	0.07	0.07	0.887	0.07	0.07	0.131	0.688	0.07	1.31	0.95	0.07	0.07	
A_K_B_duplo_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.444	0.07	0.07	0.7	0.07	0.07	0.0296	0.07	0.351	0.07	0.07	0.07	1.79	0.874	0.07	0.355	1.98	0.164	1.23	1.97	0.07	0.07	
A_K_B_duplo_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	0.216	0.07	0.07	1.59	0.07	0.07	0.07	0.07	0.752	0.07	0.07	0.07	0.216	0.07	0.07	0.355	2.67	0.139	2.67	0.07	0.07		
A_K_B_duplo_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.0682	2.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.339	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.115	0.114	2.54	5.84	0.07	0.07	
A_K_B_duplo_groi_5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.101	1.11	0.07	0.07	0.289	0.07	0.07	0.4	0.07	0.241	0.07	0.07	0.07	0.341	0.07	0.07	1.48	5.88	0.07	1.68	9.46	0.07	0.07	
A_K_B_asterven_6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	5.09	0.07	0.199	0.07	0.37	0.07	0.157	0.642	0.07	0.626	0.07	0.07	0.361	0.07	0.07	0.315	6.99	0.181	2.87	10.4	0.07	0.07	
A_K_B_asterven_7	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.113	4.7	0.07	0.07	3.45	0.07	0.103	0.753	0.07	1.22	0.101	0.07	0.07	0.351	0.11	0.07	3.34	7.69	0.35	3.92	11.7	0.07	0.07	
A_H_W_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.768	21	0.07	0.265	1.52	11.8	0.07	0.904	4.55	0.07	32.2	0.61	0.449	0.07	17.7	1.75	0.07	12.4	17.3	3.51	35.10	14.6	0.07	0.304
A_H_W_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.707	19	0.07	0.26	1.45	12.9	0.07	0.885	4.5	0.07	29.9	0.587	0.795	0.07	17	1.59	0.07	12.7	17	3.27	35.40	14.3	0.07	0.255
A_H_W_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_groi_5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_duplo_groi_5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_asterven_6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
A_H_W_asterven_7	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.7	19.8	0.07	0.272	1.9	13.4	0.07	0.4	0.07	25.3	0.587	0.408	0.07	16	1.33	0.07	11.4	18.4	3.03	31.90	15.6	0.07	0.184	
W_H_B_groi_0	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.739	18.4	0.07	0.499	1.56	10	0.07	0.868	4.49	0.07	32	0.612	0.307	0.07	16.8	1.69	0.07	12.2	16.7	3.47	34.10	14.8	0.07	0.237
W_H_B_groi_1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07</																									

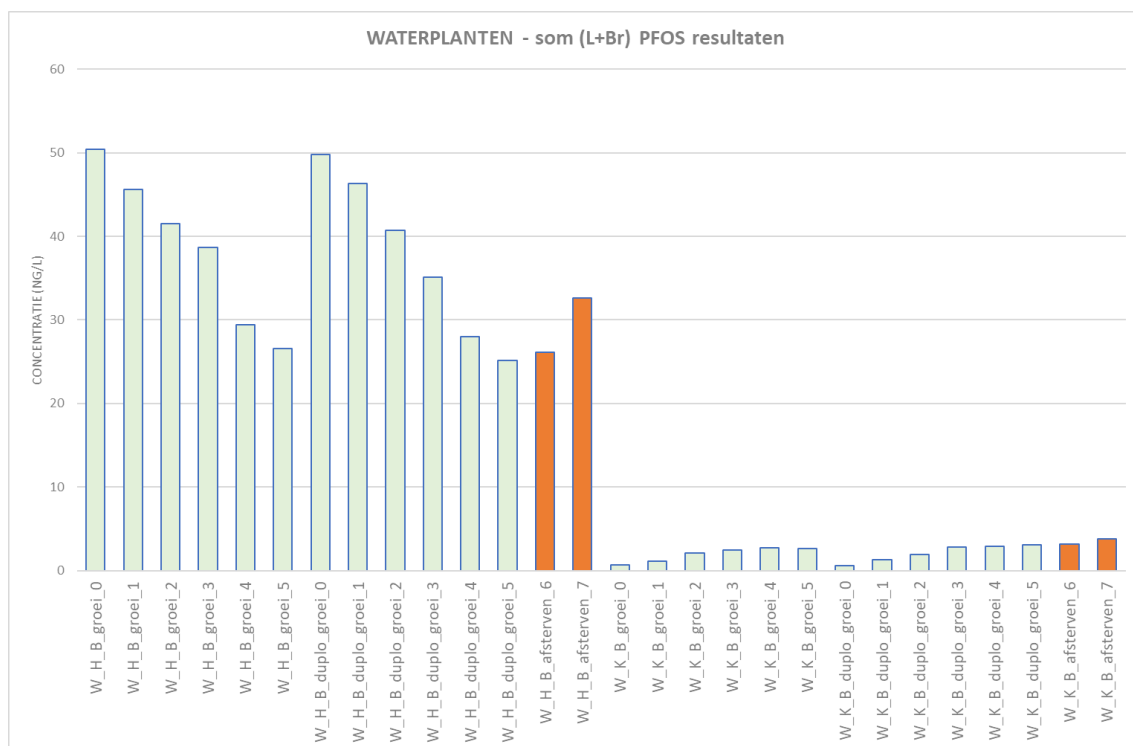
In Figuur 23 tot en met Figuur 29 wordt een overzicht gegeven van de PFOS concentraties.



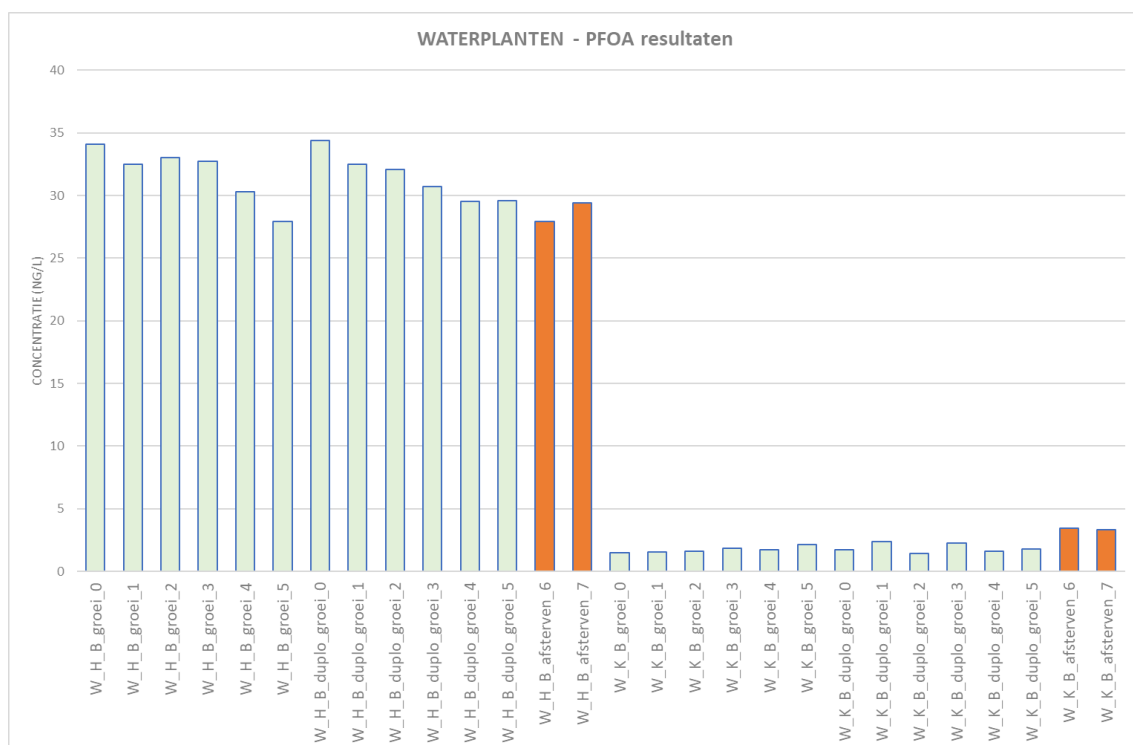
Figuur 23 PFOS concentraties in water in experiment met algen (A) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met en zonder waterbodem (B/W)



Figuur 24 PFOA concentraties in water in experiment met algen (A) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met en zonder waterbodem (B/W)



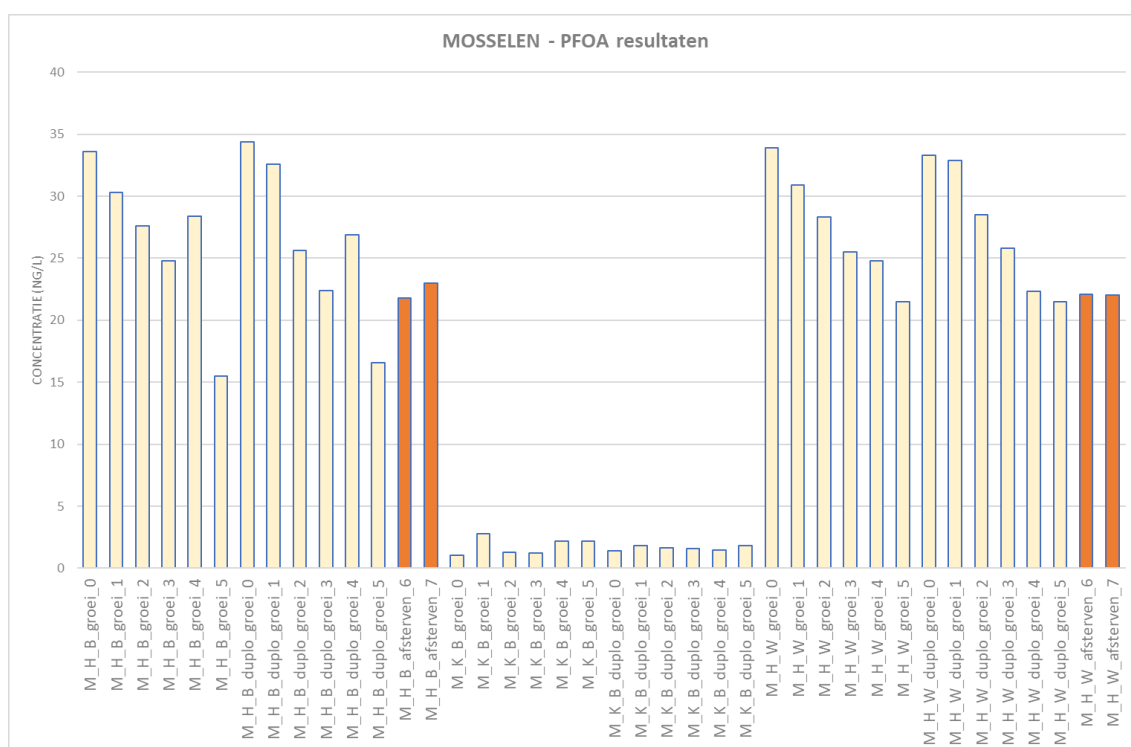
Figuur 25 PFOS concentraties in water in experiment met waterplanten (W) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met waterbodembodem (B)



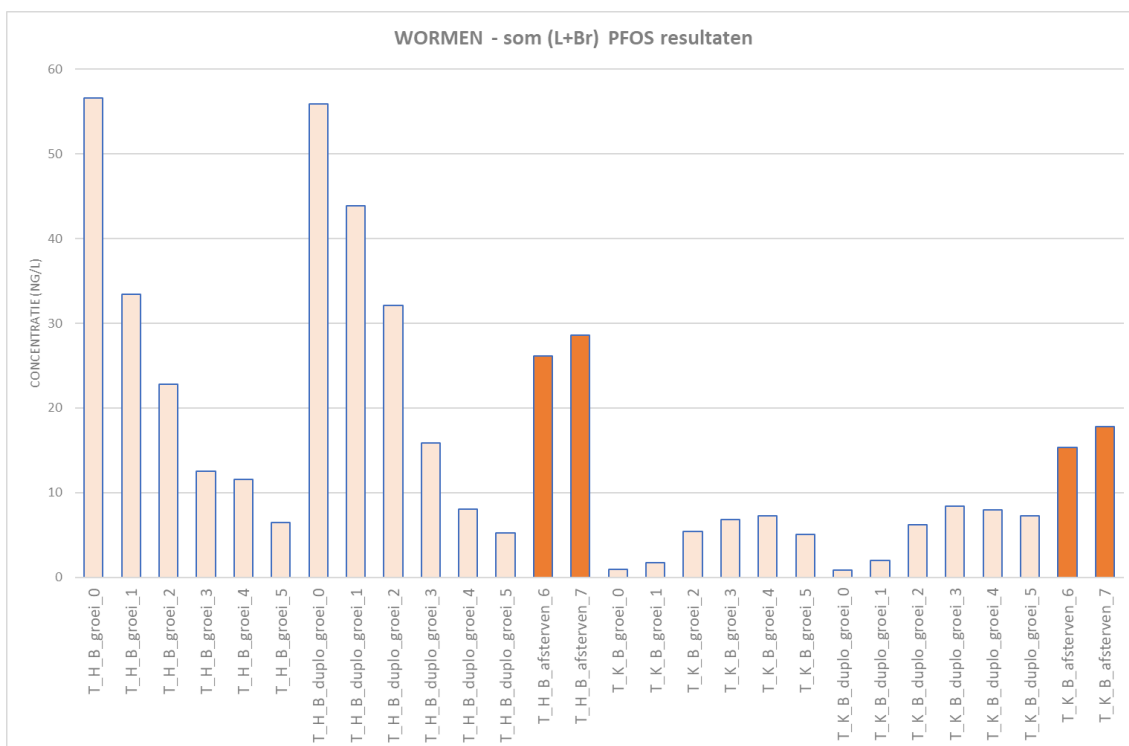
Figuur 26 PFOA concentraties in water in experiment met waterplanten (W) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met waterbodembodem (B)



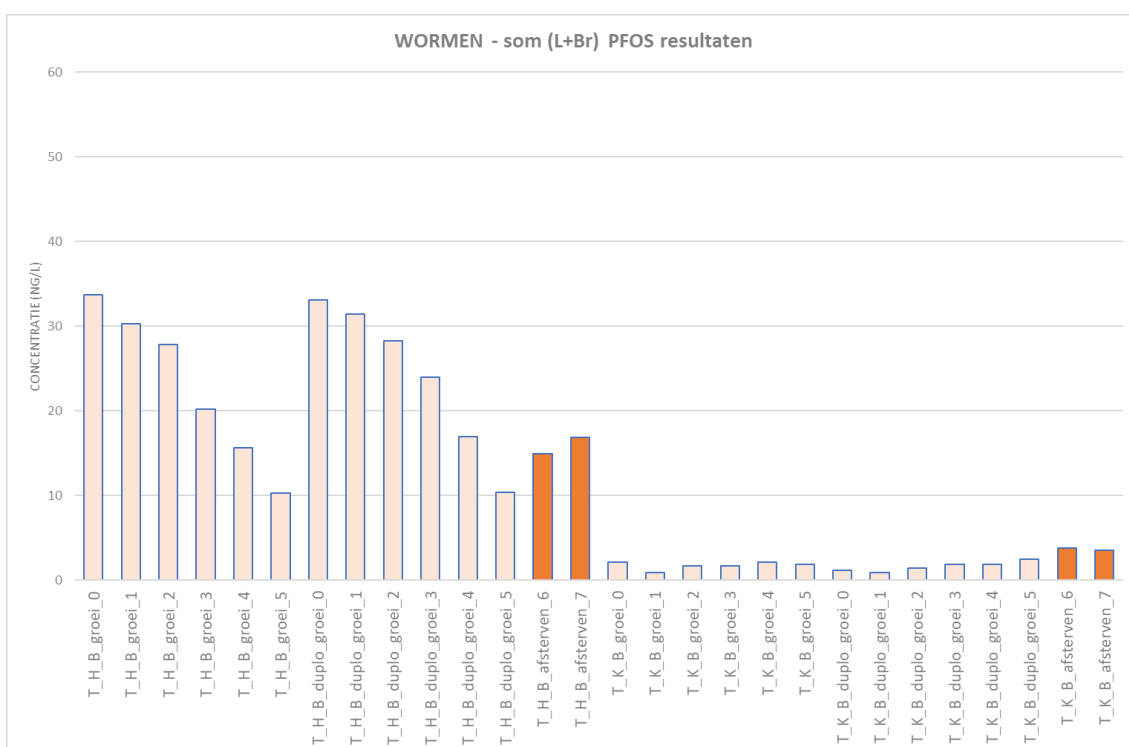
Figuur 27 PFOS concentraties in water in experiment met mosselen (M) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met en zonder waterbodem (B/W)



Figuur 28 PFOA concentraties in water in experiment met mosselen (M) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met en zonder waterbodem (B/W)



Figuur 29 PFOS concentratie in water in worm (T) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met waterbodtem (B)



Figuur 30 PFOA concentratie in water in worm (T) proeven tijdens groei (duplo), Haringvliet en Kraanwater (H/K), met waterbodtem (B)

De waterbodem en biota concentraties zijn weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15 Gemeten PFOS en PFOA concentraties in de waterbodem en in biota in µg/kg, voorafgaand aan proef (steriel) en na 6 weken groei (5). Waarden in groen zijn gemeten boven de rapportagegrens, waarden in wit zijn rapportagegrenzen.

BODEM (drooggewicht)	DS (%)	som PFOA (µg/kg Ds)	som PFOS (µg/kg Ds)
Ketelmeer_sed_steriel_H'vliet	59,1	0,10	0,80
A_H_B_groei_5	62,2	0,20	0,80
W_H_B_groei_5	55,0	0,20	0,70
M_H_B_groei_5	56,8	0,10	0,40
T_H_B_groei_5	59,9	0,10	1,00
Ketelmeer_sed_steriel_kraan	60,6	0,10	0,50
A_K_B_groei_5	53,0	0,60	1,20
W_K_B_groei_5	57,6	0,10	0,30
M_K_B_groei_5	57,9	0,10	0,30
T_K_B_groei_5	62,0	0,10	0,50
BIOTA (nat gewicht)		PFOA µg/kg	PFOS µg/kg
REF_Waterplanten		0,10	0,10
W_H_B_groei_5		0,12	0,52
W_K_B_groei_5		0,10	0,29
M_H_B_groei_5		0,10	0,10
M_K_B_groei_5		0,10	0,10
M_H_W_groei_5		0,10	0,10

Tabel 16 PFOS en PFAS fractie in water – Haringvliet en kraanwater proeven op T5 (6 weken)

	som PFOS	Waterconc. GROEI PFOS MIN	GROEI PFOS MAX	DUPLO PFOS MIN	DUPLO PFOS MAX	PFOS fractie in water - Haringvliet water			
Proef met Haringvlietwater	(µg/kg Ds)	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	GROEI MIN	GROEI MAX	DUPLO GROEI MIN	DUPLO GROEI MAX
Ketelmeer_sed_steriel_Hvliet	0,80	25,20	63,20			21,9%	41,3%		
A_H_B_groei_5	0,80	23,50	49,50	39,90	47,50	21,3%	36,3%	31,4%	35,3%
W_H_B_groei_5	0,70	26,60	50,40	25,14	49,80	24,5%	38,1%	23,5%	37,8%
M_H_B_groei_5	0,40	11,08	49,00	16,24	50,00	19,4%	51,6%	26,1%	52,1%
T_H_B_groei_5	1,00	6,46	56,60	5,27	55,90	5,5%	33,7%	4,5%	33,4%
	som PFOS	Waterconc. GROEI PFOS MIN	GROEI PFOS MAX	DUPLO PFOS MIN	DUPLO PFOS MAX	PFOS fractie in water - kraanwater			
Proef met kraanwater	(µg/kg Ds)	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	GROEI MIN	GROEI MAX	DUPLO GROEI MIN	DUPLO GROEI MAX
Ketelmeer_sed_steriel_kraan	0,50	1,85	9,07			3,2%	14,1%		
A_K_B_groei_5	1,20	0,52	4,88	0,53	3,01	0,4%	3,3%	0,4%	2,1%
W_K_B_groei_5	0,30	0,67	2,70	0,62	3,10	1,9%	7,3%	1,8%	8,3%
M_K_B_groei_5	0,30	0,57	4,36	0,92	4,07	1,7%	11,4%	2,6%	10,7%
T_K_B_groei_5	0,50	0,97	7,26	0,82	8,42	1,7%	11,8%	1,5%	13,4%
	som PFOA	Waterconc. GROEI PFOA MIN	GROEI PFOA MAX	DUPLO PFOA MIN	DUPLO PFOA MAX	PFOA fractie in water - Haringvliet water			
Proef met Haringvlietwater	(µg/kg Ds)	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	GROEI MIN	GROEI MAX	DUPLO GROEI MIN	DUPLO GROEI MAX
Ketelmeer_sed_steriel_Hvliet	0,10	25,00	37,90			69,0%	77,2%		
A_H_B_groei_5	0,20	26,60	33,80	25,30	33,30	55,0%	60,9%	53,8%	60,5%
W_H_B_groei_5	0,20	27,90	34,10	29,50	34,40	54,4%	59,3%	55,8%	59,5%
M_H_B_groei_5	0,10	15,50	33,60	16,60	34,40	57,5%	74,5%	59,1%	75,0%
T_H_B_groei_5	0,10	10,30	33,70	10,40	33,10	48,1%	75,2%	48,3%	74,8%
	som PFOA	Waterconc. GROEI PFOA MIN	GROEI PFOA MAX	DUPLO PFOA MIN	DUPLO PFOA MAX	PFOA fractie in water - kraanwater			
Proef met kraanwater	(µg/kg Ds)	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	GROEI MIN	GROEI MAX	DUPLO GROEI MIN	DUPLO GROEI MAX
Ketelmeer_sed_steriel_kraan	0,10	1,76	3,83			13,7%	25,7%		
A_K_B_groei_5	0,60	1,04	3,51	1,23	2,64	1,4%	4,7%	1,7%	3,6%
W_K_B_groei_5	0,10	1,47	2,14	1,41	2,35	11,4%	15,8%	11,0%	17,1%
M_K_B_groei_5	0,10	1,03	2,79	1,42	1,83	8,3%	19,7%	11,1%	13,9%
T_K_B_groei_5	0,10	0,92	2,13	0,89	2,46	7,8%	16,4%	7,6%	18,4%

Tabel 17 Emissie/opname PFOS uit de waterbodem

PFOS emissie/opname waterbodem Ketelmeer sediment		Waterbodem		flux	emissie	opname
Proef		T0 µg/kg Ds	T42 dagen µg/kg Ds	ng/(m2.dag)	% T0 sed	% T0 sed
Algen	Kraanwater en algen	1,24	1,20	17,06	3,2%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen algen)	0,62	0,50	46,97	19,5%	
	H'vlietwater met waterbodem en algen	0,60	0,80	-96,48		33,5%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder algen)	0,48	0,80	-153,67		66,6%
Waterplanten	Kraanwater en waterplanten	1,23	1,20	8,38	2,2%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen waterplanten)	0,62	0,50	46,97	19,5%	
	H'vlietwater met waterbodem en waterplanten	0,59	0,80	-99,56		35,0%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder waterplanten)	0,48	0,80	-153,67		66,6%
Mosselen	Kraanwater en mosselen	1,24	1,20	11,50	3,1%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen waterplanten)	0,62	0,50	46,97	19,5%	
	H'vlietwater met waterbodem en mosselen	0,56	0,80	-117,56		44,1%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder mosselen)	0,48	0,80	-153,67		66,6%
Wormen	Kraanwater en wormen	1,27	1,20	21,09	5,4%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen wormen)	0,62	0,50	46,97	19,5%	
	H'vlietwater met waterbodem en wormen	0,43	0,80	-179,97		88,0%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder wormen)	0,48	0,80	-153,67		66,6%

Tabel 18 Emissie/opname PFOA uit de waterbodem

PFOA emissie/opname waterbodem		looptijd (dagen)		flux	emissie	opname
Proef		0 µg/kg Ds	42 0	ng/(m2.dag)	% T0 sed	% T0 sed
Algen	Kraanwater en algen	0,63	0,60	9,91	4,7%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen algen)	0,13	0,10	6,13	25,2%	
	H'vlietwater met waterbodem en algen	0,00	0,10	-49,70		-3023,4%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder algen)	0,01	0,10	-42,71		799,6%
Waterplanten	Kraanwater en waterplanten	0,62	0,60	0,80	2,6%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen waterplanten)	0,13	0,10	6,13	25,2%	
	H'vlietwater met waterbodem en waterplanten	0,06	0,10	-20,70		75,7%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder waterplanten)	0,01	0,10	-42,71		799,6%
Mosselen	Kraanwater en mosselen	0,62	0,60	1,34	2,6%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen waterplanten)	0,13	0,10	6,13	25,2%	
	H'vlietwater met waterbodem en mosselen	-0,02	0,10	-58,17		-575,1%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder mosselen)	0,01	0,10	-42,71		799,6%
Wormen	Kraanwater en wormen	0,62	0,60	3,82	3,0%	
	REF (steriele waterbodem, kraanwater, geen wormen)	0,13	0,10	6,13	25,2%	
	H'vlietwater met waterbodem en wormen	-0,10	0,10	-95,65		-201,0%
	REF (steriele waterbodem, H'vlietwater, zonder wormen)	0,01	0,10	-42,71		799,6%

Tabel 19 RIVM, 2020, Verschil in uitloging van PFAS uit grond en bagger, RIVM-briefrapport 2020-0102

Bijlage 1. Sorptie van PFAS

In milieuchemische context worden PFAS als mobiele stoffen beschouwd. Onderstaand een kort (indicatief én incompleet) overzicht van verdelingscoëfficiënten die in de literatuur worden gevonden voor PFOS en PFAS:

Stof	matrix	n	K _d range L/kg	K _f range L/kg	K _{oc} range L/kg	Referentie
PFOA	bodem	10	1.6-8.9		143-308	Maio et al., 2017
PFOA	bodem	6		2-40	26-2000	Milinic et al. 2015
PFOA	sediment	9	3-15		190-49000	Ahrens et al 2011
PFOA	sediment	19	15-708		427 (mean)	Kwadijk et al 2010
PFOA	sediment	2	4.7-85		115 (mean)	Higgins and Luthy 2006
PFOS	bodem	4	2.8-35		400-1260	Johnson et al. 2007
PFOS	bodem	6		17-389	1000-8500	Milinic et al. 2015
PFOS	sediment	29		3.8-92	502-78000	Ahrens et al 2011
PFOS	sediment	19	50	1096	1445 (mean)	Kwadijk et al 2010
PFOS	sediment	4	6-224		372 (mean)	Higgins and Luthy 2006

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