

Til
Afreportering af VUDP- og Rambøll Fonden projekt

Dokumenttype
Teknisk rapport

Dato
September 2024

Teknisk rapport

Test af teknologier til rensning af PFAS
fra hotspots – Odense Nord Miljøcenter



Teknisk rapport

Test af teknologier til rensning af PFAS fra hotspots –
Odense Nord Miljøcenter

Projekt navn **Test af teknologier til rensning af PFAS fra hotspots – Odense Nord
Miljøcenter**
Projektnr. **1100055461**
Dokumenttype **Hovedrapport**
Version **1**
Dato **26. september 2024**
Udarbejdet af **Anita Rye Ottosen, Sylvie Breakevelt, Jakob Fink og Anna Wermuth**
Kontrolleret af **Dorte Harrekilde**
Ekstern kontrol **Per Henrik Nielsen (VandCenter Syd), Rasmus Olsen (Odense Renovation)
og Tore Svendsen (ECT2)**
Godkendt af **Anita Rye Ottosen**

Rambøll
Sverigesgade 3 TV
5000 Odense C

T +45 5161 1000
<https://dk.ramboll.com>



Bright ideas. Sustainable change.



Montrose Environmental Group



Rambøll Danmark A/S
CVR NR. 35128417

Medlem af FRI

Indhold

1.	Indledning og baggrund	2
2.	Sammenfatning	4
3.	PFAS	7
3.1	Kvalitetskriterier for vandmiljøet	8
3.2	Lovgivning i Danmark	9
4.	Odense Nord Miljøcenter	11
5.	PFAS-analysekampagne	15
5.1	Perkolatets bidrag til PFAS til Odense NV Renseanlæg	19
5.2	Perkolat karakterisering	21
6.	Skumfraktionering	23
6.1	Labforsøg Envytech Solution AB	23
6.2	Labforsøg ECT2 (Vandrensning.com)	27
6.3	Håndtering af skum	28
6.3.1	Labforsøg Enspired Solution (fotokatalytisk reduktiv defluorering)	28
7.	Flokkulering med FluorFlok og resinrensning	33
7.1	Pilotforsøg med flokkulering med FluorFlok (ECT2)	33
7.1.1	Resultater for PFAS	35
7.1.2	Resultater for nitrifikationshæmning og miljøfremmede stoffer	38
7.2	Resinrensning	40
7.3	Håndtering af slam	43
7.4	ECT2 – Slamforsøg	44
8.	Overordnet økonomi (TOTEX)	45
8.1	Økonomiske forudsætninger	46
8.2	Anlægsøkonomi (CAPEX)	46
8.3	Driftsøkonomi (OPEX)	47
8.4	Totaløkonomi (TOTEX)	47
9.	Sammenfatning og anbefalinger	48
10.	Referencer	52

Bilagsoversigt

Bilag 1

Resultater fra analysekampagne (PFAS28 og TOP PFAS22)

Bilag 2

Envytech Solution AB – SAFF® bench-scale laboratorieforsøg

Bilag 3

Enspired Solution - PRD-laboratorieforsøg

Bilag 4

ECT2 - Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter august 2023

Bilag 5

ECT2 - Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter marts-maj 2024

Bilag 6

ECT2 - Slamforsøg

1. Indledning og baggrund

Odense Renovation, som driver Odense Nord Miljøcenter (ONM), fik i 2022 gennemført en kortlægning af PFAS og andre miljøfremmede stoffer i perkolatet fra deponiet. Kortlægningen viste, at der findes høje koncentrationer af PFAS22 i perkolat fra alle etaper, hvor de største koncentrationer, på op til 51.194 ng/l PFAS22, blev fundet i perkolat fra etape med shredderaffald. I det samlede perkolat blev der fundet op til 6.500 ng/l PFAS22, hvor størstedelen var kortkædede PFAS.

Ved Odense NV Renseanlæg (ONVR), som modtager perkolat fra ONM, er der i én enkelt analyse fundet 150 ng/l PFAS22 og 1,7 ng/l PFOS, hvilket var over miljøkvalitetskrav for PFOS på 0,65 ng/l i ferskvand. I dag er der også miljøkvalitetskrav for indholdet af PFAS24 baseret på PFOA-ækvivalenter, hvor kravet også overskrides.

På baggrund af kortlægningen, og erfaringstal fra andre deponier, blev der udarbejdet CAPEX, OPEX og TOTEX med 50% usikkerhed for forskellige renseløsninger, der kunne bringe PFOS/PFAS under forskellige koncentrationsniveauer. En af løsningerne var flokkulering med Fluorlok, hvor PFOS blev nedbragt til under miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l på hele perkolatet. Denne løsning viste en TOTEX (totaløkonomi over 20 år i nutidskroner) på 47 kr./m³. Dette er uden medtagning af driftsudgifter til det eksisterende forrenseanlæg. Anlægsudgifterne var inkl. indkøb af PFAS-anlæg, bygningsanlæg, design, projektering, opstart, indkøring samt uforudsete udgifter på 15%. Driftsudgifterne var inkl. energiforbrug, kemikalier, slanhåndtering, service af anlæg samt vedligeholdelsesudgifter (3,5% af anlægspris). Med en årlig perkolatmængde på 229.250 m³ (3 seneste års gennemsnit) vil der medføre en driftsudgift på 12,1 mio. kr.

Ovenstående beregning er lavet med udgangspunkt i pilotforsøg på andre deponier og er derfor forbundet med stor usikkerhed. For at få mere sikkerhed omkring hvilke rensemetoder der er bedst egnede til perkolatet fra ONM, samt hvilke reduktioner der er mulige, var der interesse i at få testet forskellige teknologier på perkolatet fra ONM. VandCenter Syd, Odense Renovation, Rambøll, ECT2, Envytech Solution og Enspired Solution ansøgte derfor VUDP-fonden om midler til at kunne gennemføre lab- og pilotforsøg på perkolat fra ONM. Der blev i projektperioden ansøgt om yderligere midler til projektet igennem Rambøll Fonden.

Projektet var delt op i følgende arbejdsopgaver:

Arbejdsopgave 1: Der udføres en analysekampagne med PFAS- og TOP-analyser på det samlede perkolat fra ONM (inkl. Stige Ø), samt ind- og udløbsspildevand fra Odense NV Renseanlæg. Resultater skal belyse perkolaternes påvirkning på PFAS-koncentrationen i ind- og udløbet på Odense NV Renseanlæg. Resultater skal også give et indblik i den overordnede PFAS-sammensætning i perkolaterne, således, at man kan identificere hvilken typer PFAS der bidrager mest til forureningen.

Arbejdsopgave 2: Der vil igennem laboratorie- og pilotforsøg blive testet flere forskellige teknologier på 4 forskellige perkolatprøver – en for det samlede spildevand fra ONM inkl. Stige Ø samt fra 3 enkelte etaper (shredderaffald, blandet affald og Stige Ø). De testede teknologier vil blandt andet være flokkulering og skumfraktionering. Der vil i forbindelse med forsøgene blive analyseret for almindelige spildevandsparametre og PFAS22 i urensset og rensset perkolat, for at kunne fastsætte rensseffekterne.

Arbejdsopgave 3: Der gennemføres pilotforsøg med resinrensning af mindst én perkolatstrøm (forventelig hele perkolatstrømmen fra ONM inkl. Stige Ø). Der laves løbende analyser for at evaluere rensningseffekterne, hvor fokus vil være på de vigtige spildevandsparametre og PFAS22.

Ekstra arbejdsopgave: Der gennemføres forsøg for vurdering af rensningseffekten for udvalgte miljøfremmede stoffer herunder tungmetaller.

I nærværende rapport er resultater fra de enkelte arbejdsopgaver i projektet samlet. Rapporten er opdelt i følgende kapitler:

- Kapitel 5 - PFAS-analysekampagne: Der er gennemført en analysekampagne, hvor der er lavet PFAS28 og TOP22 analyser i udløbet fra ONM samt ind- og udløb fra Odense NV Renseanlæg for vurdering af ONM's bidrag til PFAS i Odense NV Renseanlæg. Derudover laves en perkolat karakterisering for vurdering af, hvilke PFAS-forbindelser der er relevante vurderet ud fra PFOA-ækvivalenter.
- Kapitel 6 - Skumfraktionering: Der er på forskellige perkolatprøver fra ONM gennemført labforsøg til skumfraktionering. Derudover er opkoncentreret skum fra et af forsøgene anvendt i labforsøg med en ny UV baseret – Avanceret oxidations proces for destruktions af det opkoncentrerede PFAS i skummet.
- Kapitel 6 - Flokkulering og resinrensning: Der er på forskellige perkolatprøver fra ONM gennemført pilotforsøg med flokkulering med FluorFlok. To af de flokkulerede perkolatprøver er efterfølgende anvendt til resinrensning i pilotforsøg. Derudover er slammet analyseret for vurdering af destruktionsmuligheder.
- Kapitel 8- Økonomi: Der er beregnet CAPEX, OPEX og TOTEX for rensning af hele perkolatet fra forrenseanlægget med flokkulering. Der er regnet på to scenarier hvor slammet i scenarie 1 opkoncentreres til 20% tørstof med skruepresse, mens det i scenarie 2 behandles yderligere med tørring til tørstof på 85%.

Den regulatoriske status for PFAS er fortsat under udvikling, og det videnskabelige samfund skaber yderligere data vedrørende PFAS' egenskaber og potentielle påvirkning. Konklusionerne af denne rapport er derfor underlagt den nyvurdering og regulering, som der var på det tidspunkt rapporten er skrevet.

2. Sammenfatning

Den regulatoriske status for PFAS er fortsat under udvikling, og det videnskabelige samfund skaber yderligere data vedrørende PFAS' egenskaber og potentielle påvirkning. Konklusionerne af denne rapport er derfor underlagt den nyvurdering og regulering, som der var på det tidspunkt rapporten er skrevet. Derudover er det vigtigt at pointere, at der er 30% analyseusikkerhed på alle PFAS-analyserne.

Er ONM primær PFAS-kilde til Odense NV Renseanlæg?

Der er gennemført en analysekampagne, hvor der er lavet PFAS28 og TOP22 analyser i udløbet fra ONM samt ind- og udløb fra Odense NV Renseanlæg for vurdering af ONM's bidrag til PFAS i Odense NV Renseanlæg. Derudover er der lavet en perkolat karakterisering for vurdering af, hvilke PFAS-forbindelser der er relevante vurderet ud fra PFOA-ækvivalenter.

Det fremgår fra analysekampagnen, at:

- De beregnede PFOA-ækvivalenter (730-1.860 ng/l i udløb fra ONM, 34-160 ng/l i indløbet til Odense NV Renseanlæg og 32-49 ng/l i udløbet fra Odense NV Renseanlæg) ligger over miljøkvalitetskravet på 4,4 ng/l i alle prøverne.
- Der er 5 PFAS som samlet set bidrager med over 80% af PFOA-ækvivalenterne. Det drejer sig om PFOA (33-41%), PFHpA (8-19%), PFOS (7-17%), PFNA (6-16%) og PFDA (5-15%).
- TOP-analyserne indikerer ikke mange ukendte PFAS iblandt precursors i prøverne.
- De kortkædede PFAS-forbindelser er de dominerende i både perkolatet og indløbsspildevandet. For perkolatet udgør de kortkædede PFAS-forbindelser mellem ca. 63-86%, mens det i indløbsspildevandet udgør mellem ca. 70-90%. På baggrund af spildevandets PFAS-fingeraftryk, tyder det på, at perkolat fra ONM er en primær bidragsyder til PFAS i indløbsspildevandet til Odense NV Renseanlæg.

Skumfraktionering vs. flokkulering

Der er i projektet lavet forsøg med både skumfraktionering og flokkulering:

- Skumfraktionering: Overordnet viser Envytech Solutions' SAFF-forsøg en samlet reduktion af PFAS28 på mellem 39,2% (Prøve 4, indløb til forrenseanlæg) og 70% (Stige Ø). Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS og PFHpA). Det ses derudover, at den kortkædede PFBS kun fjernes med 29-42%. Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter vises en samlet reduktion på mellem 72-97%. Der er i projektet også lavet forsøg af Enspired Solution med fotokatalytisk reaktiv defluorerung på det opkoncentrerede SAFF-skum, som viste at de detekterbare PFAS; PFHxA, PFHA, PFOA og PFBS kunne reduceres med over 96%. Dog skal man være obs på strømforbruget, da det hurtigt kan blive dyrere i strømforbrug (og andet CAPEX/OPEX) end at sende prøverne til destruktion ved Fortum.
- Flokkulering: Overordnet viser ECT2's flokkuleringsforsøgene en samlet reduktion af PFAS22 på mellem 56,1% (Prøve 2, blandet affald) og 76,3% (prøve 5, udløb fra forrenseanlæg). Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS. Derudover blev den kortkædede PFBS, modsat i skumfraktioneringsforsøgene, fjernet med 73-85%. Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter vises en samlet reduktion på mellem 79-93%. Der er ikke lavet forsøg med destruktion af slammet, men udelukkende antaget, at det skal forbrændes ved Fortum.

Der er for flokkulering også lavet forsøg for vurdering af reduktion af tungmetaller og andre miljøfremmede stoffer. De forventede nye vejledende grænseværdier for tilledning af perkolat til offentlig kloak er overholdt for alle stoffer der er analyseret for med undtagelse af nikkel. I tabellen er vist en sammenligning af de to teknologier. Under sammenligningen er der taget hensyn til, at der anvendes PFAS22 analyser for begge forsøg, så de sammenlignes på et ens grundlag. Da skumfraktionering ikke er testet på udløb fra forrenseanlægget, sammenlignes resultaterne for forsøg med indløbsperkolat til forrenseanlægget.

	Skumfraktionering			Flokkulering		
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	2.800	1.900	32,1	3.400	520	84,7
PFOA	320	<10	>96,9	480	24	95,0
PFHpA	150	<10	>93,3	190	31	83,7
PFOS	64	<10	>84,4	62	<1	>98,4
PFNA	<10	<10	-	<10	<0,3	-
PFDA	<10	<10	-	<10	<0,3	-
PFAS4	430	<0,4	>99,9	580	24	95,9
PFAS22	4.590	2.790	39,2	5.400	1.400	74,1
PFOA-ækv.	835	232	72,2	1.030	96	90,7

Det ses, at skumfraktionering nedbringer PFOS til <10 ng/l og PFOA-ækv. til 232 ng/l, mens flokkulering nedbringer PFOS til <1 ng/l og PFOA-ækv. til 96 ng/l. Der opnås derfor en bedre rensning ved flokkulering end ved skumfraktionering, hertil kommer, at der under flokkuleringen også fjernes andre miljøfremmede stoffer som tungmetaller. Begge teknologier indikerer, at de kan reducere PFOS til under den forventede nye vejledende grænseværdi på 0,65 ng/l, men høje detektionsgrænser "skjuler" den reelle rensegrad.

Omkostninger

Der er i projektet udarbejdet anlægs- og driftsøkonomi på et flokkuleringsanlæg inkl. 2.300 m³ udligningstank og slamhåndtering, da et sådan anlæg er realistiske af bygge i fuldskala, selv om miljøkvalitetskravene ikke kan opnås.

Der er regnet på to scenarier, hvor det ene scenarie afvander slammet til 30% tørstof, mens slammet i det andet scenarie tørres til 85% tørstof. Der er i begge scenarier taget udgangspunkt i at slammet sendes til destruktion ved Fortum.

Der er udarbejdet TOTEX for de samlede omkostninger for anlæg og drift, udtrykt som nutidskroner for perioden 2025-2045. Resultatet fremgår af nedenstående tabel. Priserne er ekskl. moms.

Nutidsværdi	Scenarie 1	Scenarie 2
Anlægsudgifter (DKK)	16.447.115	19.831.731
Driftsudgifter total (DKK)	205.420.470	165.191.992
Total for anlæg og drift (DKK)	221.867.585	185.023.723
Total for anlæg og drift (DKK/år)	11.093.379	9.251.186
Total for anlæg og drift (DKK/m³)	48,4	40,4

Det ses, at der er beregnet en samlet pris for håndtering af perkolatet på henholdsvis 48,4 kr./m³ i scenarie 1, hvor slammet ikke tørres og 40,4 kr./m³ i scenarie 2, hvor slammet tørres. Det skal dog pointeres, at der er stor usikkerhed på mængderne af slam og dermed også udgiften til at håndtere slammet, både hvad angår forventet slammængden samt tørstof efter skruepressen.

Der er i projektet ikke prissat anlægs- og driftsudgifter til et skumfraktioneringsanlæg, men erfaringsmæssigt vil anlægsudgifterne være meget højere (3-4 gange højere) end ved et flokkuleringsanlæg, mens driftsudgifterne vil være lavere (forventelig under 10 kr./m³ svarende til under 2,3 mio. kr. årligt for ONM, hvor der ved flokkulering er årlige driftsudgifter på forventeligt 9,4-11,7 mio. kr.). Da driftsudgifterne har størst indvirkning på de samlede anlægs- og driftsudgifter (TOTEX), vil et skumfraktioneringsanlæg være billigere end et flokkuleringsanlæg i en TOTEX-beregning - men som nævnt ovenover, så vil der også kunne opnås en bedre rensning med et flokkuleringsanlæg.

Efterpolering og opfyldelse af miljøkvalitetskravet

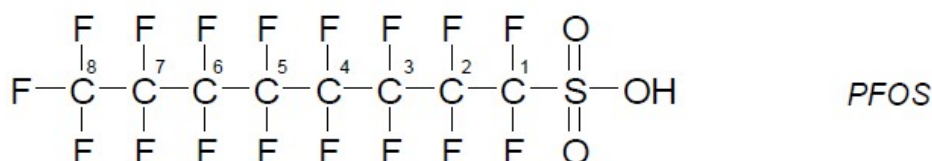
Rensning med skumfraktionering eller flokkulering kan reducere PFAS betydeligt (op til 90%), men det er ikke tilstrækkeligt til at opfylde miljøkvalitetskravet for PFOS (0,65 ng/l) og PFOA-ækv. (4,4 ng/l). Der er ingen forventning til at hverken skumfraktionering eller flokkulering alene kan opnå opfyldelse af miljøkvalitetskravene selvom der udvikles på teknologierne, udvikles ny hjælpeoffer til at øge rensningseffekten af skumfraktionering eller bedre polymerer til flokkulering. Det vil derfor på sigt være nødvendigt med yderligere efterpolering for at opfylde miljøkvalitetskravene.

Der er i dette projekt lavet test med efterpolering med resinrensning af flokkuleret perkolat, som viser over 99,7% reduktion af PFAS22 og over 84,5% PFOA-ækvivalentreduktion. Der er observeret en meget kort tid til gennembrud af PFAS igennem resinerne, da andre urenheder i perkolatet mætter resinerne. Grundet det hurtige gennembrug vil det være nødvendigt med et resinskifte med 5-9 dages mellemrum, hvilket alene vil give en forventet driftsudgift på mellem 18 og 36 mio. kr. årligt til udskift af resin. Det forventes, at investering i et sandfilter eller andet mekanisk forrensning forud for resinerne kan reducere disse driftsomkostninger markant.

3. PFAS

PFAS er en forkortelse for et stort antal fluorerede stoffer, der betegnes som per- og polyfluorerede alkylforbindelser. Der er i dag identificeret mere end 4.700 forskellige PFAS. Stofgruppen har specielle kemisk-fysiske egenskaber, der gør, at de skyer både fedt og vand. De fleste PFAS er overfladeaktive stoffer. Netop disse egenskaber gør, at PFAS har været anvendt i et bredt spektrum af produkter.

Et af de mest kendte PFAS er PFOS, hvis kemiske struktur er vist nedenfor. Strukturen viser kulstof-fluorbindinger (C-F), som er nogle af de stærkeste kemiske bindinger, der findes.



Generelt inddeles PFAS i langkædede og kortkædede PFAS. De langkædede PFAS defineres typisk som stoffer med mere end 6/7 fluorkulstofenheder. PFOS er et eksempel på en langkædet PFAS. PFBA med 3 fluorkulstofenheder er et eksempel på en kortkædet PFAS.

Stofferne er ikke fremstillet i Danmark, men anvendelsen af stofgruppen i produkter er påbegyndt i slutningen af 1940'erne. PFAS er anvendt i brandslukningsskum, til forkromning, tæpper, tekstiler, maling, gummi, plast, træbehandling, møbler, plastprodukter, jern- og metalproduktion, elektronik, kosmetik mm. Listen over anvendelser er lang. Når produkter med PFAS skal bortskaffes, ender de typisk på affaldsdeponier, og af den grund kan man forvente at finde PFAS udbredt i perkolat fra deponier.

PFAS er generelt antaget at indvirke skadeligt i forbindelse med fertilitet samt mental og fysisk udvikling af fostre, samt mistænkt for at være hormonforstyrrende og nogle PFAS er mistænkt for at være kræftfremkaldende i mennesker (Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer, 2022). Viden om farlighed for mennesker er baseret på data om ganske få PFAS, især de langkædede, og der hersker forsat en del usikkerhed om effekten af størstedelen af stofferne. Der er tegn på, at hvor de langkædede PFAS som PFOS og PFOA bliver mange år i kroppen, så udskilles de kortkædede indenfor dage-måneder.

PFAS omfatter som nævnt mange forskellige stoffer og har derfor et bredt spektrum af kemisk-fysiske egenskaber. Viden om de kemisk-fysiske egenskaber er generelt begrænset især til de mest kendte PFAS. Stofgruppen er dog vandopløselige og vandopløseligheden falder med stigende antal fluorkulstofenheder dvs. med kædelængden. PFAS er typisk stærke syrer og fuldt dissocierede ved normale pH-værdier (5-9). PFAS er generelt ikke flygtige. De sorberer i meget varierende grad til organisk materiale. Overordnet set er sorptionen højest for de langkædede PFAS og lavest for de kortkædede.

PFAS nedbrydes ikke i miljøet (de er persistente) og kan bioakkumulere i dyr, planter og vandlevende organismer, hvor de især opkoncentreres i proteiner. Der findes en lang række PFAS-precursorer (moderstoffer der kan omdannes til PFAS), som kan omdannes til dead-end

PFAS (PFAS som ikke nedbrydes yderligere) som f.eks. PFOS. Omdannelsen af precursorer medfører generelt dannelse af mere vandopløselige PFAS med lidt kortere fluorkulstofkæder end moderstoffet. De fleste renseteknologier er mest effektive overfor de langkædede PFAS, og kun få teknologier er effektive overfor de kortkædede PFAS. Derudover sker der ved brug af nogle af teknologierne omdannelse af precursorer til fx PFOS, PFHxS, PFNA og PFOA.

Analysemetoder for stofferne omfatter pt. op til ca. 35 PFAS. Der er således en stor mængde PFAS, som i dag ikke kan analyseres. Især precursorerne er udfordrende at bestemme, og de vil pga. deres omdannelse til andre PFAS, hvoraf nogle er analyserbare, ofte drille ved nogle renseteknologier, hvor der netop kan ske omdannelse af precursorer til dead-end PFAS (massebalancen ind og ud af systemet kommer ikke til at stemme).

Dansk og europæisk lovgivning regulerer løbende anvendelsen af PFAS. Således er PFOS udfaset i 2006, og i EU har det siden 2011 været ulovligt at anvende PFOS i brandskum. Siden 2020 har PFOS og PFOA-relaterede produkter ligeledes været forbudt (Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer, 2022). I Danmark har det siden 2020 desuden været ulovligt at anvende PFAS i fødevareremballage af papir og pap. PFOA og PFOS er begge langkædede forbindelser, som langt hen ad vejen er erstattet af nye kortkædede forbindelser. På et deponi hvor der på nogle etaper ligger affald fra nyere tid, mens der på andre etaper ligger affald fra gammel tid, vil sammensætningen af PFAS være forskellige i perkolat fra etaperne.

3.1 Kvalitetskriterier for vandmiljøet

Tidligere har der været et miljøkvalitetskrav for PFOS på 0,65 ng/l i ferskvand, dette blev den 23. november 2023 suppleret med nye PFAS-kvalitetskriterier for vandmiljøet (MST, 2023). Kriterierne er med undtagelse af sedimentkvalitetskriteriet, sat på baggrund af PFOA-ækvivalenter (Relative Potency Factor (RPF)), ligesom vi kender for CO₂-ækvivalenter. Kvalitetskriterierne fremgår af Figur 1, hvor det relevante for dette projekt er miljøkvalitetskravet for ferskvand på 0,0044 µg/l PFOS-ækvivalenter (svarende til 4,4 ng/l).

Vandkvalitetskriterium	VKK _{ferskvand}	0,0044 µg/l**
Vandkvalitetskriterium	VKK _{saltvand}	0,0044 µg/l**
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{ferskvand}	Ikke bestemt
Korttidsvandkvalitetskriterium	KVKK _{saltvand}	Ikke bestemt
Sedimentkvalitetskriterium	SKK _{ferskvand}	13,5 µg/kg tørvægt (5% OC) (PFOS) 270 µg/kg tørvægt x f _{OC} (PFOS)
Sedimentkvalitetskriterium	SKK _{saltvand}	Ikke bestemt
Biotakvalitetskriterium, sekundær forgiftning, ferskvand	BKK _{sek.forgiftn., ferskvand}	22,3 µg/kg vådvægt (fisk) 6,2 µg/kg vådvægt (musling)
Biotakvalitetskriterium, sekundær forgiftning, saltvand	BKK _{sek.forgiftn., saltvand}	6,99 µg/kg vådvægt (fisk) 2 µg/kg vådvægt (musling)
Biotakvalitetskriterium, human konsum	HKK	0,077 µg/kg vådvægt

Figur 1 – Oversigt over de nye PFOA-ækvivalenter kvalitetskriterier (MST, 2023) **Værdierne er fastsat på baggrund af humant konsum af drikkevand

PFOA-ækvivalenter tager højde for den potentielle skadevirkning for menneskers sundhed af hvert individuelt PFAS-stof. Dertil er der udarbejdet såkaldte RPF vægtfaktorer for 24 PFAS (Tabel 1),

som angiver hvor skadeligt hvert stof er sammenlignet med PFOA (RPF = 1). Ved at gange koncentrationen med den henholdsvis RPF kan skadeligheden af prøvens PFAS-indhold vurderes.

Tabel 1 – Beregning af PFOA-ækvivalenter (MST, 2023)

	Relative Potency Factor (RPF)		Relative Potency Factor (RPF)
PFOA	1	PFHpA	$0,01 \leq RPF \leq 1^*$
PFOS	2	PFTTrDA	$0,3 \leq RPF \leq 3^*$
PFHxS	0,6	PFHpS	$0,6 \leq RPF \leq 2^*$
PFNA	10	PFDS	2^*
PFBS	0,001	PFTeDA	0,3
PFHxA	0,01	PFHxDA	0,02
PFBA	0,05	PFODA	0,02
PFPeA	$0,01 \leq RPF \leq 0,05^*$	HFPO-DA eller Gen X	0,06
PFPeS	$0,001 \leq RPF \leq 0,6^*$	ADONA	0,03
PFDA	$4 \leq RPF \leq 10^*$	6:2 FTOH	0,02
PFDoDA eller PFDoA	3	8:2 FTOH	0,04
PFUnDA eller PFUnA	4	C6O4	0,06

* Faktor etableret ved read-across

Til beregning af PFOA-ækvivalenter, i dette projekt, er der for PFHpA, PFTTrDA, PFHpS, PFPeA, PFPeS og PFDA anvendt den højeste RPF-værdi. For analyseresultater under detektionsgrænsen, er der antaget en værdi på 50% af detektionsgrænsen.

3.2 Lovgivning i Danmark

Der er på nuværende tidspunkt grænseværdier for PFAS i jord ($\Sigma 4$ og $\Sigma 22$ PFAS), slam ($\Sigma 4$ og $\Sigma 22$ PFAS), drikkevand/grundvand ($\Sigma 4$ og $\Sigma 12/\Sigma 22$ PFAS) samt miljøkvalitetskrav (se afsnit 3.1).

Der er endnu ikke grænseværdier for perkolat (eller andet industrispildevand) der ledes til offentlig kloak, men Miljøstyrelsens vejledning "Tilslutning af industrispildevand til offentlige spildevandsanlæg" fra 2006 (MST, 2006) forventes erstattet af en ny udgave, som forventes i høring efteråret 2024.

Miljøstyrelsen har løbende vist forslag til nye grænseværdier, som indikerer at de skærpes markant samt at der kommer nye krav herunder krav til PFAS. Der har både været vist krav til PFOA-ækvivalenter på 4,4 ng/l og PFOS på 0,65 ng/l. I den nyeste version, som også ligger tilgængeligt online (MST, 2023c), er der kun vist krav til PFOS (se Tabel 2). For ONM vil der være udfordringer med at overholde PFOS, nikkel og Bisphenol A.

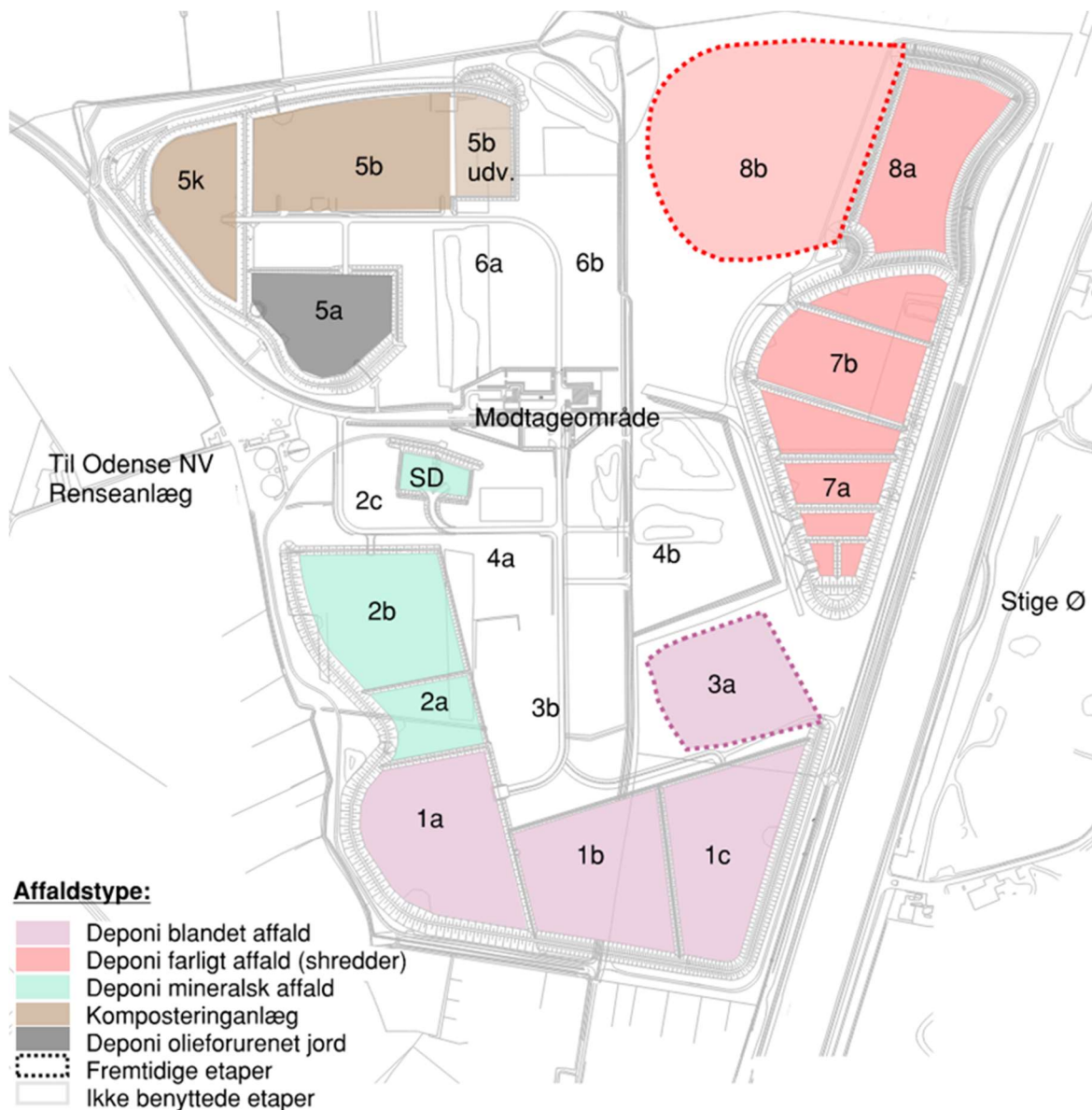
Tabel 2 – Miljøstyrelsens forslag til nye vejledende grænseværdier (MST, 2023c)

Parameter	Ny vejledende grænseværdi (µg/l)		Eksisterende grænseværdier (µg/l)
	Ferskvand	Hav	Alle vandmatricer
Arsen	9,8	13	13
Bly	7,3	37	100
Cadmium	0,15	0,45	3
Chrom	10	38	300
Kobber	45	100	100
Nikkel	7,8	15	250
Zink	77	660	3.000
Antimon	150	150	
Barium	32	1.400	
Bor	170	5.100	
Molybdæn	30	30	30
Tin	4,7	4,7	60
Vanadium	11	140	
Dimethylnaphthalener	1,2	12	
Naphthalen	11	110	21.000
Toluen	740	740	22.000
DEHP	7	7	7
Dibutylphthalat	5,2	5,2	
Bisphenol A	0,38	0,38	20
Nonylphenoler	2,1	6,3	
Phenol	770	770	
2,4,6-trichlorphenol	1,3	13	
2,4-dichlorphenol	0,42	4,2	
Chloroform	10	100	
TCCP	1.400	1.400	
Tributylphosphat	680	680	
Triphenylphosphat	3,1	3,1	
Salicylsyre	1.700	1.700	
PFOS	0,00065	0,0013	
LAS	700	700	700

4. Odense Nord Miljøcenter

ONM er en kontrolleret losseplads med perkolatopsamling, overvågning og perkolatrensning i et forrenseanlæg. Forrenseanlægget modtager også perkolat fra den gamle ukontrollerede losseplads "Stige Ø".

Affaldsdeponering på ONM er delt op i etaper afhængig af, hvilke affaldstyper der deponeres.



Figur 2 – Oversigtskort over aktive, fremtidige og ikke benyttede etaper på ONM

Forrenseanlægget, som ligger i den vestlige del af deponiet, består af to nitrifikationsprocestanke, hvor ammonium omdannes til nitrat. Herefter ledes spildevandet til udligningstanke, hvorfra det pumpes i en særskilt ledning til Odense NV Renseanlæg. Forrenseanlægget ejes af Odense Renovation, men driftes af VandCenter Syd, som også driver Odense NV Renseanlæg.



Figur 3 – De to nitrifikationsprocestanke samt udligningstank ved forrenseanlægget

Perkolatindhold

Perkolatets indhold (gennemsnit for 2018-2022) af almindelige spildevandsparametre samt tungmetaller og udvalgte miljøfremmede stoffer fremgår af Tabel 3 for det samlede perkolat til og fra forrenseanlægget.

Tabel 3 – Indholdet i perkolat der ledes til og fra forrenseanlægget baseret på gennemsnitstal for 2018-2022

	Enhed	Indløb til forrenseanlæg	Udløb fra forrenseanlæg
Suspenderet stof	mg/l	102	81
COD	mg/l	668	339
Total-N	mg/l	227	155
NH ₄ -N	mg/l	218	9,7
Nitrat-N	mg/l	1,4	191
Total-P	mg/l	3,9	2,3
Bly	µg/l	5,2	2,6
Cadmium	µg/l	0,17	0,13
Zink	µg/l	51	51
Kobber	µg/l	10	14
Chrom	µg/l	12	10
Kviksølv	µg/l	0,016	0,015
Nikkel	µg/l	63	61
Phenol	µg/l	-	1,8
BTEXN	µg/l	-	3,8
Kulbrinter	µg/l	-	100

Det ses, at den største forskel på de to perkolater er indholdet af ammonium og nitrat, da forrenseanlægget omdanner ammonium til nitrat.

I forbindelse med kortlægningen, som blev gennemført i 2022, er der analyseret for PFAS22 i alle etaper. Resultatet af kortlægningen fremgår af Tabel 4. Der er for de enkelte etaper beregnet årlig masseflux samt den %-vise andel af kort- og langkædede PFAS.

Tabel 4 – Masseflux og gennemsnitlige koncentrationer af PFAS22, samt den %-vise fordeling af kort- og langkædede PFAS (baseret på analyse fra 2022)

Etape	PFAS22		% af PFAS22	
	g/år	ng/l	Langkædet	Kortkædet
1a	18	1.200	25	75
1b	40	5.900	15	85
1c	40	4.400	26	74
2a	0,39	360	72	28
2b	2,1	370	42	58
5a	0,51	59	41	59
5b	17	870	27	73
5k	6,3	920	31	69
7a	237	51.193	5	95
7b	258	40.000	4	96
8a	106	16.000	7	93
SD	0,29	270	25	75
Stige Ø	78	1.200	45	55
Sum	804	595	12	88

Det ses af tabellen, at der er en vis sammenhæng mellem høje koncentrationer af PFAS og høj masseflux med undtagelse af Stige Ø, som har en meget høj masseflux til trods for, at koncentrationen ikke er på højde med de andre etaper med høj masseflux.

På baggrund af kortlægningen er der besluttet at arbejde videre med perkolat fra etape 1c (blandet affald), 7a (shredderaffald) og Stige Ø (Se afsnit om prøveudtagning senere i dette kapitel).

Perkolatmængder

I Tabel 5 er der vist de seneste 3 års flowdata for perkolat ledt fra ONM til Odense NV Renseanlæg i perioden juni 2021 til juni 2024. Det ses tydeligt, at flowet af perkolat er væsentligt højere i perioden juni 2023 til juni 2024 grundet den ekstraordinært store regnmængde, der faldt især i foråret 2024.

Tabel 5 - Flowdata for perkolat udledt fra ONM til Odense NV Renseanlæg i perioden juni 2021 til juni 2024

	2021-2022	2022-2023	2023-2024	2021-2024
Sum (m ³)	183.149	168.322	336.279	687.750
Gns. døgnflow (m ³)	502	460	917	627
50% fraktil døgnflow (m ³)	446	378	954	488
80% fraktil døgnflow (m ³)	625	606	1.296	961
95% fraktil døgnflow (m ³)	993	983	1.560	1.422

Prøveudtagning

Der er til lab- og pilotforsøg i dette projekt (som er beskrevet i Kapitel 4 og 5) arbejdet med perkolat fra udvalgte etaper samt fra før og efter forrenseanlægget:

- Prøve 1: Etape for shredderaffald (D7A-PB-03)
- Prøve 2: Etape for blandet affald (DIC-PB-01)
- Prøve 3: Etape Stige Ø (D3B)
- Prøve 4: Indløb til forrenseanlæg (indløbstank)
- Prøve 5: Udløb fra forrenseanlæg (udligningstank)

Da perkolat fra deponier erfaringsmæssigt holder sig stabil over tid er der kun udtaget perkolat 2 gange i projektperioden. Den 5. juli 2023 er der udtaget 1 m³ af hver af de 5 perkolater til hver sin palletank. Dette er anvendt til alle labforsøg samt første runde pilotforsøg. Den 14. marts 2024 er der udtaget yderligere 1 m³ perkolat af prøve 4 og 5, som er anvendt til anden runde pilotforsøg og de efterfølgende resinforsøg.



Figur 4 – Fem palletanke blev udtaget i starten af juli 2023 og fordelt mellem projektparterne



Figur 5 – To nye palletanke blev udtaget den 14. marts 2024 med prøve 4 og 5 (ind- og udløb fra forrenseanlæg)

5. PFAS-analysekampagne

Der er udført en analysekampagne med PFAS28 og TOP-analyser (ved en TOP-analyse, Total Oxidizable Perfluoralkyl Precursors, oxideres precursor PFAS-forbindelser til andre dead-end PFAS) på perkolat fra ONM, samt ind- og udløbsspildevand fra Odense NV Renseanlæg for at belyse perkolatets påvirkning på PFAS-koncentrationen i ind- og udløbet på Odense NV Renseanlæg. Resultater skal give et indblik i den overordnede PFAS-sammensætning i perkolatet, således, at der kan identificeres hvilke typer PFAS, der bidrager mest til forureningen.

Tidligere er der lavet PFAS22-analyser fra udløbet ved ONM (stikprøver samt tids- og mængdeproportionale prøver) samt ind- og udløbet ved Odense NV Renseanlæg (flowproportionale prøver). Af Tabel 7 fremgår resultatet inkl. en beregning af PFOA-ækvivalenterne. Det ses, at både PFOS og PFOA-ækvivalenterne ligger over miljøkvalitetskravene på henholdsvis 0,65 og 4,4 ng/l for både perkolatet fra ONM samt ind- og udløbsspildevandet fra ONVR.

Tabel 6 – Oversigt over tidligere PFAS-analyser

	PFAS22 (ng/l)	PFOS (ng/l)	PFOA-ækv. (ng/l)	Dato	Dagsflow (m³)	Prøvetype
ONM udløb	5.800	85	1.260	8/6-2022	395	Tidsproportional
ONM udløb	6.500	60	930	5/10-2022	405	Mængdeproportional
ONM udløb	5.900	50	890	7/11-2022	?	Stikprøve
ONM udløb	6.200	60	1.030	5/12-2022	?	Mængdeproportional
ONVR indløb	220	3,1	55	7-8/6-2022	17.220*	Flowproportional
ONVR udløb	150	1,7	39	7-8/6-2022	16.516*	Flowproportional

*Fra kl. 7 den 7/6 til kl. 7 den 8/6

I dette projekt er der lavet tre nye analyserunder, hvor der i hver analyserunde er udtaget prøve ved udløbet af forrenseanlægget ved ONM, samt ved Odense NV Renseanlægs ind- og udløb. Alle prøver er taget som stikprøver, modsat tidligere PFAS-analyser, som primært er taget som flow-, mængde- eller tids-proportionale døgnprøver. Der er fordele og ulemper ved om prøverne er taget som stikprøver eller som flow-/mængde-/tidsproportionale prøver. Stikprøver giver et nu og her billede, modsat flow-/mængde-/tidsproportionale prøver, som ofte giver et jævnt billede af døgnets udledning. Stikprøver er dog forbundet med en større usikkerhed på resultatet end flow-/mængde-/tidsproportionale prøver. Der er i dette projekt valgt stikprøver af flere årsager. For det første er udledningen af PFAS fra ONM ikke meget varierende over døgnnet, da der er stor udledning i forrenseanlægget. Derudover sker udledningen ikke jævnt over døgnnet, men i et vist antal timer. Der var derfor et ønske om at se den faktiske udledning fra ONM og den efterfølgende faktiske tilledning til Odense NV Renseanlæg ca. 80 minutter senere (den vurderede transporttid for perkolatet fra ONM til Odense NV Renseanlæg). Alle prøverne er udtaget af VandCenter Syd.

Transporttiden igennem Odense NV Renseanlæg varierer efter fx vejrforholdene, og der er blot lavet en tidsforskydelse på 1-2 dage for prøverne udtaget ved ind- og udløb. En oversigt over analyserunderne og prøveudtagelsestidspunkter fremgår af Tabel 7.

Mængden af perkolat, der produceres fra ONM og ledes til Odense NV Renseanlæg, afhænger af vejrforholdene (regn / fordampning) og affaldets sugeevne.

Der er forsøgt at ramme 3 forskellige regnvejrperioder i analyserunderne:

- Analyserunde 1: En tørvejsdag (0 mm) efter en 14-dages periode med regn (45,4 mm).
- Analyserunde 2: En regnvejrsgang (1,8 mm) efter en 14-dages periode med regn (93,4 mm).
- Analyserunde 3: En regnvejrsgang (9,2 mm) efter en 14-dages periode med regn (14,8 mm).

Tabel 7 – Oversigt over nye analyserunder

Analyse- runde	Prøvetagningstidspunkt			Beskrivelse af flow på første analyседag samt vejrforhold
	Udløb ONM	Indløb ONVR	Udløb ONVR	
1	16/10-23 kl. 8:45	16/10-23 kl. 10:05	18/10-23 kl. 13:55	0 mm regn den 16/10-23. 45,4 mm regn 2 uger optil. 211 m ³ perkolat til ONVR fra kl. 8-24. 11.212 m ³ indløbsflow ONVR.
2	22/11-23 kl. 8:45	22/11-23 kl. 10:05	23/11-23 kl. 7:45	1,8 mm regn den 22/11-23. 93,4 mm regn 2 uger optil. 839 m ³ perkolat til ONVR fra kl. 8-24. 36.588 m ³ indløbsflow ONVR.
3	22/01-24 kl. 8:50	22/01-24 kl. 10:10	23/01-24 kl. 7:40	9,2 mm regn den 22/1-24. 14,8 mm 2 uger optil. 805 m ³ perkolat til ONVR fra kl. 8-24. 38.964 m ³ indløbsflow ONVR.

Tabel 8 – Udløbsflow fra ONM til ONVR

Tidspunkt	Udløbsflow ONM (m ³)		
	16/10-23	22/11-23	22/1-24
8-9	29	6	35
9-10	102	39	105
10-11	80	0	94
11-12	0	0	0
12-13	0	34	30
13-14	0	101	102
14-15	0	99	48
15-16	0	31	0
16-17	0	38	30
17-18	0	102	103
18-19	0	102	66
19-20	0	50	0
20-21	0	33	35
21-22	0	102	104
22-23	0	96	53
23-24	0	6	0
Sum	211	839	805

Udledningen fra ONM sker ikke altid jævnt fordelt over døgnet, men over et vist antal timer, som afhænger af mængden af perkolat. Udledningen fra ONM fra morgen til midnat for de 3 prøvedage fremgår af Tabel 8.

Det ses, at udledningen kan variere fra få til mange timer dagligt, samt at udledningen er størst i perioder med regn. Fra 2016-2022 er der udledt mellem 0 og 2.163 m³ dagligt, med et gennemsnit på omkring 500 m³ dagligt.

Alle 9 prøver er sendt til analyse ved Eurofins for PFAS28 og PFAS TOP. Der er valgt PFAS28 og TOP PFAS22. Der er omkring 30% analyseusikkerhed på PFAS-analyserne. En opsummering af resultaterne fremgår af Tabel 6.

PFAS-resultater

PFOS, PFAS4, PFAS22, PFAS28 og PFOA-ækvivalenter er vist i Tabel 9. Det fremgår, at der ikke er nævneværdig forskel på, om der vælges analysepakke PFAS28 eller PFAS22 for alle 3 analysetidspunkter. Derudover er de beregnede PFOA-ækvivalenter (730-1.860 ng/l i udløb fra ONM, 34-160 ng/l i indløbet til Odense NV Renseanlæg og 32-49 ng/l fra udløbet af Odense NV Renseanlæg) over miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l PFOS og 4,4 ng/l PFOA-ækvivalenter i alle prøverne.

Tabel 9 – Opsummering af analyseresultater

		Analyserunde (ng/l)		
		1	2	3
Udløb ONM	PFOS	35	61	200
	PFAS4	510	330	910
	PFAS22	6.600	2.400	3.700
	PFAS28	6.600	2.400	3.700
	PFOA-ækv.	1.020	730	1.860
Indløb ONVR	PFOS	7,3	3,9	2,1
	PFAS4	87	26	14
	PFAS22	930	220	79
	PFAS28	940	220	80
	PFOA-ækv.	160	51	34
Udløb ONVR	PFOS	1,6	3,0	3,7
	PFAS4	17	14	22
	PFAS22	220	100	150
	PFAS28	220	100	150
	PFOA-ækv.	37	32	49

TOP-analyse

Ved en TOP-analyse oxideres precursor PFAS-forbindelser i prøven til andre dead-end PFAS, hvoraf nogle/mange er omfattet af PFAS-analysepakkerne. En TOP-analyse giver dermed en indikation af tilstedeværelsen af precursors ved at sammenligne mængden af PFAS fundet før en TOP-analyse med mængden af PFAS fundet efter TOP-analysen. TOP-analysen anvendes til at få en indikation af, om der forefindes PFAS-forbindelser i spildevandet som ikke er en del af standardanalysepakken. En opsummering af resultatet er vist i Tabel 10, mens alle TOP-analyseresultater kan ses under Bilag 1.

Ved vurdering af TOP-analysens brugbarhed ses der som udgangspunkt på enkeltstoffer, og her kan det være godt at se på, om 6:2FTS og PFOSA er helt omdannet til andre PFAS primært PFOS og PFCA'erne som PFPeA og PFHxA ved oxidation. Det fremgår af Tabel 10, at 6:2FTS og PFOSA generelt ligger lavt og under detektionsgrænsen i alle prøverne. Specielt i indløbsprøven til

Odense NV Renseanlæg ses der en fin omdannelse af de to stoffer. Resultatet for alle PFAS kan ses under Bilag 1, mens der i Tabel 10 også er medtaget PFPeA, PFHxA, PFOS og PFAS22.

Tabel 10 – PFAS TOP-analyseresultater for 6:2FTS, PFOSA og PFAS22

		Analyserunde (ng/l)		
		1	2	3
Udløb ONM	PFPeA	470	65	17
	PFPeA (TOP)	400	81	19
	PFHxA	620	86	23
	PFHxA (TOP)	520	94	24
	PFOS	35	61	200
	PFOS (TOP)	46	43	190
	6:2FTS	<10	26	84
	6:2FTS (TOP)	<10	<10	<100
	PFOSA	<10	<10	<10
	PFOSA (TOP)	<10	<10	<100
	PFAS22	6.600	2.400	3.700
	PFAS22 (TOP)	5.200	2.300	3.300
Indløb ONVR	PFPeA	170	15	7,7
	PFPeA (TOP)	170	24	10
	PFHxA	260	19	9,2
	PFHxA (TOP)	260	38	16
	PFOS	7,3	3,9	2,1
	PFOS (TOP)	7,5	4,2	2,4
	6:2FTS	9,8	1,7	1,2
	6:2FTS (TOP)	<0,3	<0,3	<0,3
	PFOSA	<0,3	<0,3	0,38
	PFOSA (TOP)	<0,3	<0,3	<0,3
	PFAS22	930	220	79
	PFAS22 (TOP)	1.000	280	94
Udløb ONVR	PFPeA	250	5,2	11
	PFPeA (TOP)	390	9,9	14
	PFHxA	320	9,1	17
	PFHxA (TOP)	470	9,8	17
	PFOS	1,6	3	3,7
	PFOS (TOP)	1,6	3	3,8
	6:2FTS	<0,3	<0,3	3,8
	6:2FTS (TOP)	<0,3	<0,3	0,97
	PFOSA	<0,3	<0,3	<0,3
	PFOSA (TOP)	<0,3	<0,3	<0,3
	PFAS22	220	100	150
	PFAS22 (TOP)	230	120	160

Der er ikke noget der tyder på, at der er mange ukendte PFAS i prøverne ved udløb fra ONM, da PFAS22 i perkolat fra ONM ofte viser et lavere resultat efter TOP-analysen. Dette formodes at skyldes analyseusikkerhed. PFAS22 i ind- og udløbsspildevand fra Odense NV Renseanlæg måles generelt højere efter TOP analysen, hvilket kan indikere, at der er en mindre andel af PFAS-

forbindelser i spildevand, som ikke findes med de almindelige PFAS-analysepakker og som ikke stammer fra perkolatet fra ONM, men igen kan forskellene også skyldes analyseusikkerheden.

5.1 Perkolatets bidrag til PFAS til Odense NV Renseanlæg

Flowdata og PFAS-analyser fra udløbet af ONM har vist, at ONM udledte følgende masseflow til Odense NV Renseanlæg:

- 2,2 g/dag PFAS22 den 5. oktober 2022
- 2,8 g/dag PFAS22 den 8. juni 2022
- 1,4 g/dag PFAS22 den 16. oktober 2023
- 2,0 g/dag PFAS22 den 22. november 2023
- 3,0 g/dag PFAS22 den 22. januar 2024

Sammenlignes masseflowene fra ONM med den flowproportionale PFAS-analyse fra indløbet til Odense NV Renseanlæg (3,78 g/dag PFAS22), indikeres det, at ONM bidrager med op til 80% af PFAS-tilledningen til Odense NV Renseanlæg.

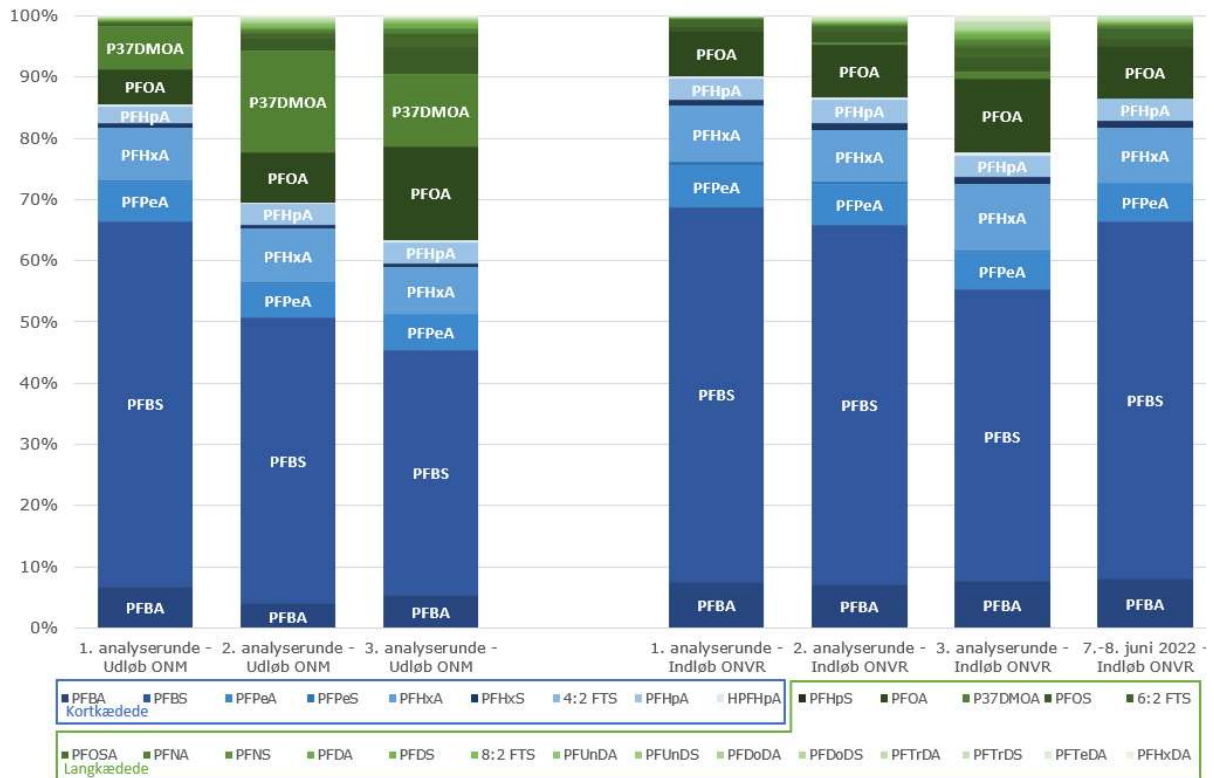
Ses der i stedet udelukkende på analysekampagnes stikprøver fra udløbet fra ONM og indløbet til Odense NV Renseanlæg, kan der laves en masseflowberegning der viser et "her og nu" billede i timerne omkring prøvetagning. Resultatet fremgår af Tabel 11, hvor PFAS28 masseflowet er beregnet time for time fra udløbet ved ONM samt i indløbet ved Odense NV Renseanlæg. Da der er en transporttid på omkring 80 min, skal prøverne tidsforskydes ca. 1 time når de sammenlignes (dette er illustreret ved farvekoder, hvor de to lyserøde hører sammen, de to blå osv.).

Tabel 11 – Oversigt over PFAS28 masseflow i tidsrummet kl. 8-11 på de 3 analysedage

	Analyserunde 1			Analyserunde 2			Analyserunde 3		
	8-9	9-10	10-11	8-9	9-10	10-11	8-9	9-10	10-11
Klokken									
ONM udløb									
Flow (m ³ /time)	29	102	80	6	39	0	35	105	94
PFAS28 (g/time)	0,19	0,67	0,53	0,014	0,094	0	0,13	0,39	0,35
ONVR indløb									
Flow (m ³ /time)	468	604	568	1.440	1.516	1.488	2.232	2.228	2.176
PFAS28 (g/time)	0,44	0,57	0,53	0,32	0,33	0,33	0,18	0,18	0,17
ONMs bidrag (%)	-	33	~100	-	4,2	28	-	72	~100

Det fremgår af Tabel 11, at når ONM bidrager med et højt perkolatflow (>100 m³/time), så står de for omkring 100% af det samlede PFAS masseflow i indløbet ved Odense NV Renseanlæg. Ved et lavere perkolatflow (29-39 m³/time), så står de for 28-72% af PFAS masseflowet i indløbet. Ovenstående beregning er forbundet med en vis usikkerhed, da der i beregningen er anvendt 60 min forskydelse, hvad angår flow, samtidigt med, at stikprøverne er taget med 80 min forskydelser. Hertil kommer, at det ikke vides med sikkerhed hvilken transporttid perkolatet har haft, samt at der er 30% usikkerhed på analyserne. Beregningen kan dog anvendes til at synliggøre, at ONM er en primær bidragsyder til PFAS i indløbsspildevandet til Odense NV Renseanlæg.

For at underbygge ovenstående påstand, er det også muligt at se på PFAS-fingeraftrykket i ONM perkolat sammenlignet med indløbsspildevand ved Odense NV Renseanlæg. Hvis ONM er den primære bidragsyder, så bør fingeraftrykket være ens. På Figur 6 er PFAS-fingeraftrykket vist som den %-vise fordeling af de enkelte PFAS-forbindelser i henholdsvis perkolat (de tre søjler til venstre) og indløbsspildevand ved Odense NV Renseanlæg (de 4 søjler til højre). Ved koncentration under detektionsgrænsen, er anvendt 50% af detektionsgrænsen.



Figur 6 – %-vise fordeling af de enkelte PFAS-forbindelser i perkolat (udløb ONM) og indløb ved ONVR (ved stofmålinger under detektionsgrænsen er der regnet med 50% af detektionsgrænsen)

Det ses, at de kortkædede PFAS-forbindelser er de dominerende i både perkolatet og indløbsspildevandet. For perkolatet udgør de kortkædede PFAS-forbindelser mellem ca. 63-86%, mens de i indløbsspildevandet udgør mellem ca. 70-90%.

De langkædede PFAS-forbindelser (som fx PFOS og PFOA), som i dag i vid udstrækning er udfaset og erstattet med kortkædede PFAS-forbindelser, er karakteristiske for perkolat fra deponier, som har affald liggende fra dengang man fortsat anvendte kemikalierne. Det fremgår af Figur 6, at fingeraftryk for perkolatet kan genfindes i indløbsspildevandet – både i stikprøverne fra de 3 analyserunder og i den flowproportionale prøve fra 7-8. juni 2022. Det ses, at fingeraftrykket i indløbsspildevandsprøverne er "fortyndet" lidt med kortkædede PFAS-forbindelser i forhold til i perkolatprøverne, dette kan skyldes flere forskellige ting som analyseusikkerhed, diffust bidrag fra husholdninger og andre industrier i oplandet til Odense NV Renseanlæg eller at de langkædede PFAS-forbindelser i perkolatet udgør en mindre andel end resultaterne i Figur 6 viser grundet høje detektionsgrænse. P37DMOA har eksempelvis en detektionsgrænse på 1.000 ng/l i perkolatet mod 2 ng/l i indløbsspildevandet, og det faktiske indhold af P37DMOA er ikke kendt i perkolatet, da den blot er oplyst som <1.000 ng/l.

På baggrund af spildevandets PFAS-fingeraftryk, tyder det på, at perkolat fra ONM er en primær bidragsyder til PFAS i indløbsspildevandet til Odense NV Renseanlæg. Det kunne være interessant i fremtiden at tage en stikprøve fra indløbet til Odense NV Renseanlæg i et tidsrum, hvor der ikke ledes perkolat fra ONM, for at se om fingeraftrykket fra denne prøve, ville være afvigende fra fingeraftrykket på Figur 6.

Den %-vise fordeling af TOP-analyserne af de enkelte PFAS-forbindelser giver samme PFAS-fingeraftryk som Figur 6, hvor kortkædede PFAS-forbindelser er dominerende.

Overensstemmelsen mellem PFAS-fingeraftryk udefra PFAS28-analyseresultater og TOP-analyseresultater bekræfter, at andelen af PFAS-forbindelser, som ikke findes i PFAS28 pakken, er meget lille.

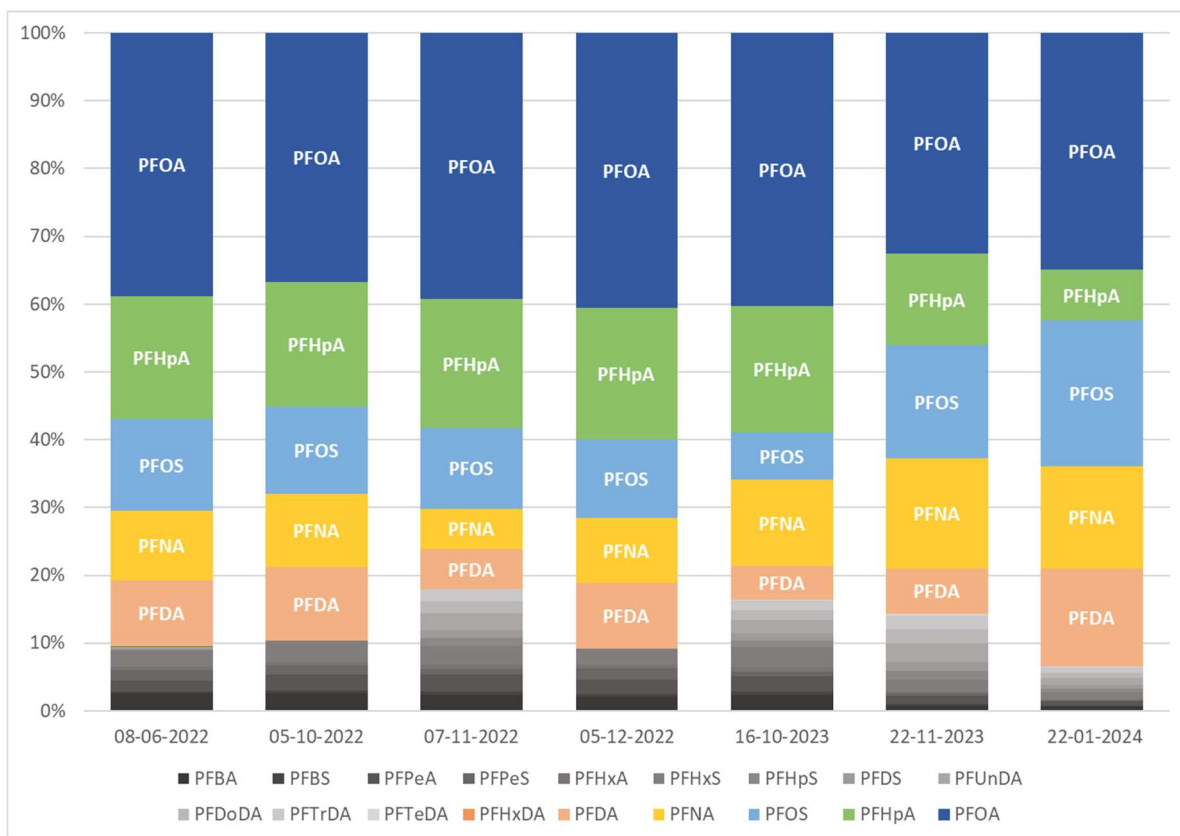
5.2 Perkolat karakterisering

Når man ser på Figur 6 fremgår det, at den kortkædede PFBS er altdominerende i perkolat fra ONM og udgør mellem 46-65%. Tidligere har der ud over PFOS (hvor der var miljøkvalitetskrav) været et stort fokus på at kunne fjerne PFBS for at opnå høj rensegrad, når der er vurderet på renseteknologier. Efter de nye miljøkvalitetskrav for PFOA-ækvivalenter er kommet ændres dette billede, da PFBS har en meget lav Relative Potency Factor på 0,001 ved beregning af PFOA-ækvivalenter, og man derfor ikke reducerer PFOA-ækvivalenterne nævneværdigt ved at fjerne PFBS fra perkolatet. Med fokus på PFOA-ækvivalenterne, er det specielt fjernelse af PFOA og fire andre PFAS-forbindelser (PFHpA, PFOS, PFNA og PFDA) som er vigtigt, for at få reduceret perkolatets PFOA-ækvivalenter (se Figur 7).

Figur 7 er udarbejdet på baggrund af de 7 eksisterende PFAS-analyser der er lavet på perkolat fra udløbet ved ONM. På baggrund af PFAS-koncentrationerne er PFOA-ækvivalenterne beregnet og procentfordelingen af de enkelte PFOA-ækvivalenter er afbilledet i tabellen. Der er 5 PFAS som samlet set bidrager med over 80% af PFOA-ækvivalenterne. Det drejer sig om PFOA (33-41%), PFHpA (8-19%), PFOS (7-17%), PFNA (6-16%) og PFDA (5-15%).

I afrapportering af lab- og pilotforsøg, vil der ud over PFAS og PFOA-ækvivalenter også blive taget udgangspunkt i de fem PFAS, som udgør over 80% af PFOA-ækvivalenterne i perkolatet fra ONM (jf. Figur 7) samt PFBS (jf. Figur 6).

Igennem rapporten er der anvendt de samme perkolatprøver til henholdsvis skumfraktioneringsforsøg og flokkuleringsforsøg, men der er ikke beregnet samme PFOA-ækvivalent for de samme prøver igennem rapporten. Dette skyldes, at prøverne er sendt til analyse på forskelligt tidspunkt og der er derfor modtaget forskellige resultater for de samme prøver. Der er anvendt samme analyselaboratorium og den primære årsag til forskellen tilskrives analyseusikkerheden på 30%.



Figur 7 – Procentfordeling af PFAS's bidrag til de samlede PFOA-ækvivalenter i 7 udløbsprøver fra ONM

6. Skumfraktionering

Skumfraktionering er en teknologi, hvori man udnytter at PFAS er et overfladeaktivt stof (en surfaktant). Under skumfraktionering blæses luft op igennem perkolatet, hvorved PFAS'ernes hydrophobe ende bliver fanget i luftboblerne og PFAS opkoncentreres i skummet.

For at reducere mængden af skum, kan man lade det opkoncentrerede skum blive til vand og gennemgå en ny skumfraktionering. I 1. trin opkoncentreres PFAS ca. 10 gange. I 2. trin opnås en opkoncentrering på ca. 1.500 gange, hvilket betyder, at den samlede opkoncentrering efter 2. trin er på omkring 10.000 gange i forhold til det ubehandlede vand. I 3. trin opnås en opkoncentrering på mellem 50-200 gange, hvilket betyder, at den samlede opkoncentrering efter 3-trin er på 50.000-2.000.000 gange i forhold til det ubehandlede vand.

Mængden af skum afhænger af vandtypen, men Envytech solutions AB oplyser (Bilag 2), at de erfaringsmæssigt får 1.000L skum ved behandling af 40.000 m³ perkolat og ca. 10L skum ved behandling af 40.000 m³ grundvand. Ved en årlig perkolatmængde på 229.250 m³, som ved ONM, forventes derved en skummængde på ca. 6 m³.

Generelt ses det, at renseeffekten er højere for de langkædede end de kortkædede PFAS, da langkædede PFAS typisk har stærkere overfladeaktive egenskaber end kortkædede PFAS, hvilket kan gøre dem lettere at fjerne ved skumfraktionering.

I det efterfølgende præsenteres resultater fra labforsøg med skumfraktionering lavet af Envytech Solution AB (afsnit 6.1) og ECT2 (afsnit 6.2). Efterfølgende beskrives håndtering af det opsamlede skum (afsnit 6.3).

6.1 Labforsøg Envytech Solution AB

Det svenske firma Envytech Solutions AB arbejder med en australsk skumfraktioneringsteknologi SAFF® (Surface Active Foam Fractionation) udviklet og produceret af EPOC Enviro. Deres SAFF er en robust teknologi, der kun anvender luft og elektricitet, og den er som påvirket af andre forureningskilder såsom metaller, partikler, pH, næringsstoffer eller andet vandkemi.

Envytech har til laboratorieforsøgene anvendt en mini-SAFF, som er en stationær "bench scale" SAFF. Forsøget er kørt som en 1-trins SAFF med anvendelse af 100L vand pr. prøve. De har kørt forsøg med fire prøver; prøve 1 (shredderaffald), prøve 2 (blandet affald), prøve 3 (Stige ø) og prøve 4 (indløb til forrenseanlæg). Testene blev udført mellem den 12-14. september 2023. Rapporten fra forsøget kan ses under Bilag 2.

Selve testene blev startet med at overføre vandet fra den plastikbeholder det blev leveret i, til "bench scale" SAFF-systemet. Dette blev gjort med en ubrugt silikone slange certificeret til ikke at indeholde PFAS. SAFF-beholderen blev fyldt til omkring 90% med det ubehandlede vand, som vist på Figur 8. Behandlingen af vandet foregik ved at behandle vandet med mikro-bobler i 30 min. Efterhånden som boblerne stiger gennem vandet binder PFAS molekylerne sig til boblerne og stiger med op gennem kolonnen, hvor skummet bliver separeret fra vandet ved overløbet i røret, Figur 8. Alle prøver havde en høj skumningskapacitet (producerede meget skum) ved tilsætning af bobler.

Efter 25 min behandling med bobler påbegyndes "push-trinnet", der varer omkring 5 min. Dette udføres ved at pumpe luft ind i en luftballon i bunden af forsøgsbeholderen. Når ballonen fyldes med luft, stiger volumen og dermed vandstanden, hvilket tvinger skummet i toppen af beholderen samt det øverste vand til at komme igennem overløbet. Det øverste vand medtages, da det typisk er her de kortkædede PFAS samles pga. deres overfladeaktive egenskaber.

Efter 30 min er behandlingen færdig, og man står tilbage med det behandlede vand og en PFAS-holdig skumfase.



Figur 8 - Påfyldning af skumfraktioneringstank med perkolatprøve og ophobning af skum i "SAFF-keglen"

Da labforsøgene har fokus på renses effekter, er der kun gennemført et renses trin undtagen på prøve 4 (indløb til forrens anlæg), hvor der også er gennemført 2. og 3. renses trin for at opkoncentrere skum til yderligere test igennem UV-AOP (se Kapitel 6.3.1). Vandprøver, både før og efter skumfraktionering, blev sendt til Eurofins Danmark til akkrediteret analyse for PFAS28.

Resultater

Resultaterne for de ubehandlede samt behandlede prøver ud fra udvalgte parametre ses af Tabel 12 - Tabel 15. Alle resultater forefindes i Bilag 2.

Overordnet viser forsøgene en samlet reduktion af PFAS28 på mellem 39,1% (Prøve 4, indløb til forrens anlæg) og 70% (Stige Ø). Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS og PFHpA). Det ses derudover, at den kortkædede PFBS kun fjernes med 29-42%. PFOS reduceres med 84-99,7%.

Tabel 12 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS28, PFOA-ækv. og rensegrad for Prøve 1

Prøve 1 – Etape for shredderaffald, D7A-PB-03				
	Enhed	Ubehandlet	Behandlet	Rensegrad (%)
PFBS	ng/l	51.000	32.000	37,3
PFOA	ng/l	1.400	<10	>99,3
PFHpA	ng/l	650	<10	>98,5
PFOS	ng/l	62	<10	>83,9
PFNA	ng/l	14	<10	>28,6
PFDA	ng/l	<10	<10	-
PFAS4	ng/l	1.600	<40	>97,5
PFAS28	ng/l	61.000	37.000	39,3
PFOA-ækv.	ng/l	2.903	449	84,5

Tabel 13 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS28, PFOA-ækv. og rensegrad for Prøve 2

Prøve 2 – Etape for blandet affald, DIC-PB-01				
	Enhed	Ubehandlet	Behandlet	Rensegrad (%)
PFBS	ng/l	1.200	850	29,2
PFOA	ng/l	610	0,35	99,9
PFHpA	ng/l	340	<0,30	>99,9
PFOS	ng/l	18	<0,20	>98,9
PFNA	ng/l	<10	<0,30	-
PFDA	ng/l	<10	<0,30	-
PFAS4	ng/l	780	0,35	99,95
PFAS28	ng/l	4.400	2.100	52,3
PFOA-ækv.	ng/l	1.314	58	95,6

Tabel 14 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS28, PFOA-ækv. og rensegrad for Prøve 3

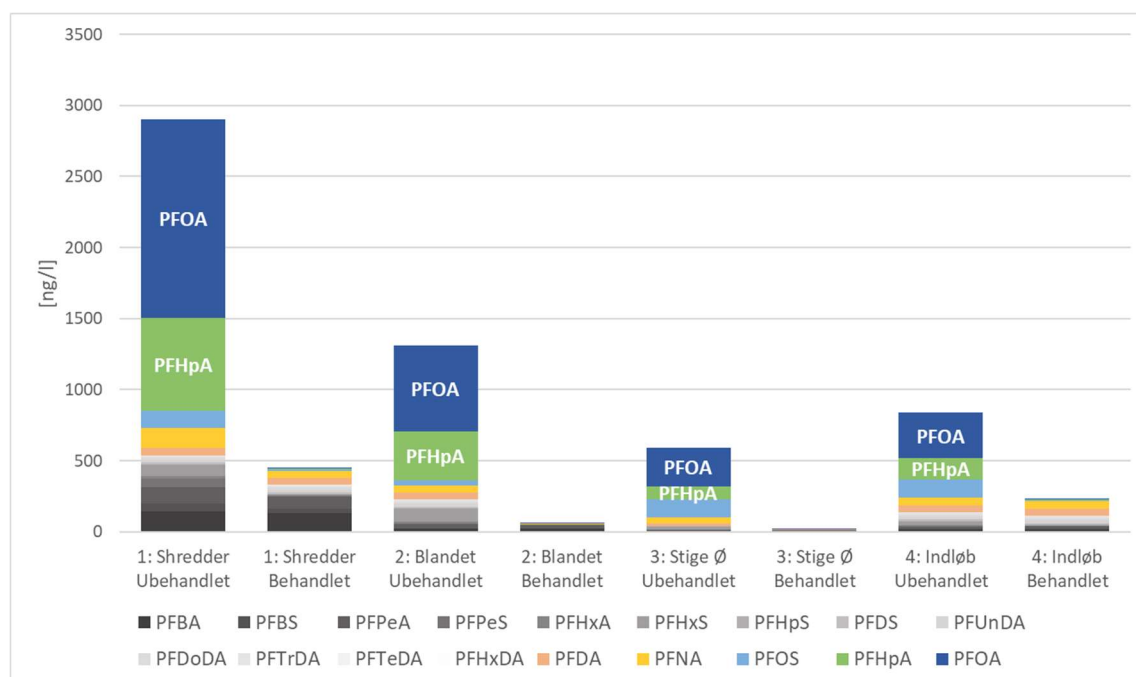
Prøve 3 – Etape Stige Ø, Stige Ø D3B				
	Enhed	Ubehandlet	Behandlet	Rensegrad (%)
PFBS	ng/l	60	35	41,7
PFOA	ng/l	270	<0,30	>99,9
PFHpA	ng/l	91	<0,30	>99,7
PFOS	ng/l	64	<0,20	>99,7
PFNA	ng/l	4,4	<0,30	>93,2
PFDA	ng/l	1,4	<0,30	>78,6
PFAS4	ng/l	370	<1,1	>99,7
PFAS28	ng/l	1.000	300	70,0
PFOA-ækv.	ng/l	589	17	97,1

Tabel 15 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS28, PFOA-ækv. og rensegrad for Prøve 4

Prøve 4 – Indløb til forrenseanlæg, Indløbstank				
	Enhed	Ubehandlet	Behandlet	Rensegrad (%)
PFBS	ng/l	2.800	1.900	32,1
PFOA	ng/l	320	<10	>96,9
PFHpA	ng/l	150	<10	>93,3
PFOS	ng/l	64	<10	>84,4
PFNA	ng/l	<10	<10	-
PFDA	ng/l	<10	<10	-
PFAS4	ng/l	430	<40	>90,7
PFAS28	ng/l	4.590	2.790	39,2
PFOA-ækv.	ng/l	835	232	72,2

Envytech har oplyst, at man kan forvente 10-20% forbedring af resultaterne i fuldskala frem for lab skala. Hertil kommer, at det er muligt at tilsætte et additiv, som de erfaringsmæssigt har gode resultater for specielt ved PFBS, hvor de i forsøg med lignende perkolat har opnået rensegrader på mellem 75-99% alt efter mængden af additiv. Ud fra erfaringstal kan PFAS28 reduceres til omkring 650 ng/l mens PFOA-ækv. kan reduceres til omkring 217.

Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter ses det af Figur 9, at der forekommer store reduktioner efter skumfraktioneringen. Den samlede reduktion af PFOA-ækvivalenter, selv om reduktionen af PFBS er begrænset, er på mellem 72-97%.



Figur 9 - PFOA-ækvivalenter før og efter skumfraktionering

Det er ikke muligt, alene ved skumfraktionering at overholde miljøkvalitetskravet på 4,4 ng/l PFOA-ækvivalenter. I prøve 4 (indløb til forrenseanlæg) nedbringes PFOA-ækvivalenter fra 837 til 234 ng/l. Den bedste reduktion opnås for prøve 3 (Stige Ø), hvor PFOA-ækvivalenterne kunne reduceres fra 589 til 17 ng/l. Der er dog sandsynlighed for at det forventede nye vejledende krav

for PFOS på 0,65 ng/l kan overholdes, men grundet høj detektionsgrænse i en del af prøverne, vides det ikke hvor lavt ned det har været muligt at rense.

6.2 Labforsøg ECT2 (Vandrensning.com)

ECT2 (tidligere Vandrensning.com) har gennemført et enkelt skumfraktioneringsforsøg med perkolat prøve 1 (shredderaffald). Vandet fik lov til at afskumme i 30 minutter indtil der ikke længere blev dannet yderligere skum (se Figur 10). Ved påfyldning af 12L perkolat i afskummeren blev der dannet cirka 0,5L koncentrat af skummet, svarende til en opkoncentrering på cirka 24 gange. Der kan læses mere om forsøget i Bilag 3.

Perkolat før og efter skumfraktionering samt skum blev sendt til analyse ved Eurofins for PFAS28.



Figur 10 – Billede af skumfraktioneringsforsøget

Resultater

Resultatet for udvalgte parametre ses af Tabel 16. Alle resultater forefindes i Bilag 3.

Tabel 16 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS28, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 1

Prøve 1 – Etape for shredderaffald, D7A-PB-03					
	Enhed	Ubehandlet	Behandlet	Rensegrad (%)	Skum
PFBS	ng/l	52.000	45.000	13,5	73.000
PFOA	ng/l	2.700	50	98,1	7.100
PFHpA	ng/l	750	<10	>98,7	2.700
PFOS	ng/l	280	65	76,8	3.800
PFNA	ng/l	32	<10	>68,8	87
PFDA	ng/l	25	<10	>60,0	56
PFAS4	ng/l	3.200	120	96,3	12.000
PFAS22	ng/l	69.000	53.000	23,2	100.000
PFOA-ækv.	ng/l	5.150	711	86,2	20.460

6.3 Håndtering af skum

Skum fra skumfraktionering er en væske som er koncentreret til et relativt lille volumen, hvormed det er egnet til PFAS-destruktion via kostelige teknologier.

En af de velkendte og kommercielle teknologier er termisk forbrænding ved høj temperatur fx ved Fortum, hvor behandlingsprisen i dag ligger på 6,05 kr./kg for vand/skum håndteret i palletanke (Kilde: Fortum, Nyborg). Prisen er billigere end ved behandling af slam (se afsnit 7.3), dette skyldes blandt andet at der ikke er noget i vandet som genererer slagge og aske, samt at det kan indfyres i efterforbrændingskammeret og dermed ikke tager plads fra roterovnen.

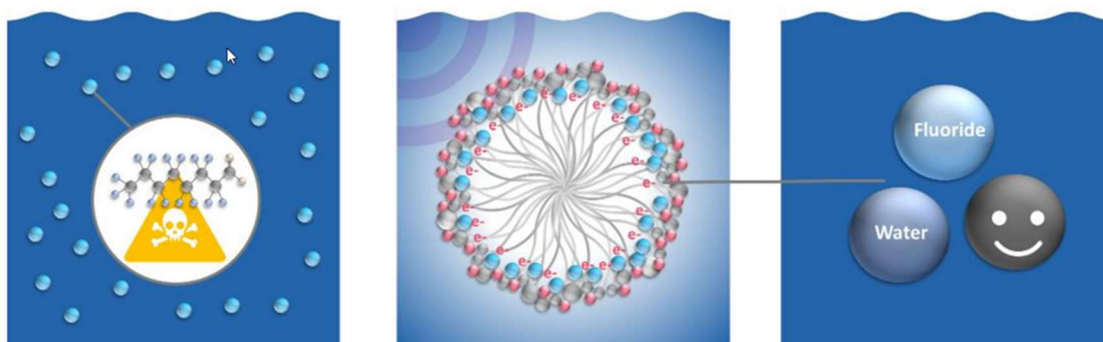
Andre nyere og mindre kommercielle teknologier er blandt andet superkritisk vandoxidation (SCWO), elektrokemisk oxidation (EO) og fotokatalytisk reduktiv defluorering (PRD).

Der er utallige udfordringer for fuldskala implementering af nye PFAS-destruktionsteknologier, såsom højt energibehov og lav behandlingseffektivitet for kortkædede fluorede forbindelser. Yderligere udfordringer omfatter fremstilling af nyt udstyr, sundhedsfare for personale ved højt temperatur- og højtryksudstyr, generering af uønskede biprodukter såsom perfluorede carboxylsyrer fra oxiderbare precursors, perchlorat og hydrogenfluoridgas.

Den ufarlige "fotokatalytisk reduktiv defluorering (PRD)" destruktionsteknologi bliver i øjeblikket udviklet af firmaet Enspired Solutions (USA), som har udført labforsøg på SAFF-skum (prøve 4) fra Envytech Solutions' labforsøg beskrevet i Afsnit 6.1.

6.3.1 Labforsøg Enspired Solution (fotokatalytisk reduktiv defluorering)

Enspired Solution er en amerikansk virksomhed som arbejder med fotoaktiveret reduktiv defluorinerings (PRD). PRD-processen er baseret på en patenteret kemisk reaktion, der bryder fluor-kulstofbindinger og adskiller PFAS-molekyler på en lineær måde, hvor de begynder med de hydrofile funktionelle grupper og fortsætter gennem kortere molekyler, for at fuldføre mineralisering til fluoratomer. Figur 11 viser virkningsmekanismen bag PRD-processen, hvor et overfladeaktivt hjælpestof (med akvatisk toxicitet) tilføjes og danner PFAS-miceller. Derefter tilsættes et ikke giftigt hjælpestof (elektron donor) til vandet, som hæfter sig ved PFAS-micelleoverfladen og producerer hydrerede elektroner, når de stimuleres med UV-lys. Disse meget reaktive hydratiserede elektroner har den energi, der kræves for at spalte fluor-kulstof og andre molekyllære bindinger i PFAS, der resulterer i slutprodukterne af fluor, vand og simple kulstofmolekyler (fx syre og eddikesyre).



Figur 11 - Virkningsprincip bag PRD-processen

Til labforsøgene, som er gennemført i Enspired Solutions' laboratorium i USA, er anvendt en stationær PRD-reaktor (Figur 12) bestående af 3 kolonner med 300 ml volumen hver, samt en 36 W lavtryksskviksøvlampe, der producerer monokromatisk stråling ved 254 nm i midten af hver kolonne for at give UV-bestråling. Forsøgets temperatur blev reguleret mellem 35°C og 40°C af en udvendig, ikke-cirkulerende vandkappe omkring kolonnen. Følgende hjælpestoffer blev anvendt under forsøget:

- Kationisk overfladeaktivt stof
- Ukendt ikke-giftigt hjælpestof, brugt som elektrondoner
- Natriumhydroxidopløsning



Figur 12 - Labskala forsøg med stationær PRD-reaktor

Til forsøget blev anvendt en opkoncentreret SAFF-skumprøve fra Envytech Solutions, med udgangspunkt i prøve 4 (indløb til forrenseanlæg), som blev sendt til Enspired Solutions og opbevaret ved 4°C op til forsøget. Under hele PRD-reaktionen blev koncentrationen af fluorid målt online og indsamlet prøver ved bestemte UV-doseringer til analyse af PFAS28. PFAS28 analyserne blev udført hos Eurofins, USA, Sacramento, Californien, i henhold til EPA-metode 537 (justeret). Prøverne har været transporteret til Eurofins på is.

Enspired Solutions rapport kan ses under Bilag 3.

Resultater

SAFF-skumprøven blev analyseret hos Enspired Solutions for pH, fluoridkoncentration, totalt opløst stof (TDS) og UVT (UV-transmission). Resultatet fremgår af Tabel 17. Da selve PRD-rentseprocessen udføres ved pH 10 – 11, måles pH for at estimere behovet for pH-justering. Start fluoridkoncentration måles for at bestemme baggrunds fluoridniveauet i prøven. TDS og UVT blev målt, fordi disse parametre historisk set har været stærke indikatorer for PRD-rentseeffekten.

Både TDS og UV-transmissivitetsværdierne for SAFF-skumprøven lå inden for grænsen til anvendelse af PRD-reseprocessen.

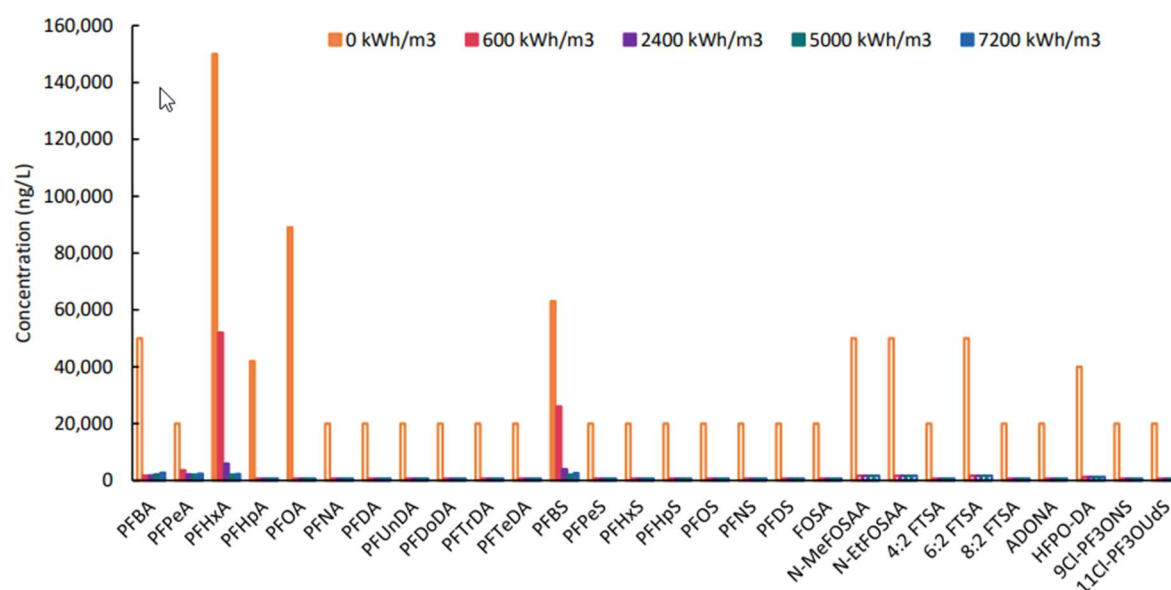
Tabel 17 – Fysisk-kemisk karakterisering af SAFF-skum inden forsøget

Parameter	Enhed	Værdi
pH	-	8,14
Fluorid	µg/l	597
Total opløst stof (TDS)	mg/l	4.423
UVT (UV-transmissivitet)	%	3,4

PFAS-resegrader

Forsøget er gennemført med fire efter hinanden følgende UV-doseringer, hvor UV-doseringen er trinvist øget fra 0 til 600, 2.400, 5.000 og til sidst 7.200 kWh/m³. Doseringen svarer til den anvendte UV-lampeeffekt for en fast tid pr. volumenenhed (kWh/m³).

Der blev udtaget prøver til PFAS28-analyse ved start samt ved hver af de 4 UV-doseringer. Resultaterne er vist i Figur 13. Der er høje detektionsgrænser, da det har været nødvendigt at fortynde SAFF-skumprøven meget, grundet det høje PFAS-indhold, dertil henvises til Bilag 3. Der blev påvist 4 PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen i den ubehandlede SAFF-skumprøve: PFBS, PFHxA, PFOA og PFHpA. De bidrager samlet set med 100% af den samlede PFAS i prøven svarende til 18% PFBS, 44% PFHxA, 26% PFOA og 12% PFHpA. Derudover er PFBA og PFPeA påvist i de UV-behandlede prøver. Koncentrationer af PFAS-forbindelser er vist ved hver UV-dosis i Figur 13.



Figur 13 - PFAS-koncentrationer ved hver UV-dosering. Kolonner uden farve repræsenterer koncentrationer under detektionsgrænsen, hvor kolonnens højde repræsenterer detektionsgrænsen

For de 4 PFAS påvist i den ubehandlede SAFF-skumprøve er resultater og rensegrad vist i Tabel 18. Alle resultater kan ses i Bilag 3.

Tabel 18 – Koncentrationen af PFAS under PRD-forsøg, samt rensegrader i parentes

	Koncentration i ng/l (rensegrad %)				
	0 kWh/m ³	600 kWh/m ³	2.400 kWh/m ³	5.000 kWh/m ³	7.200 kWh/m ³
PFBS	63.000	26.000 (59%)	3.900 (94%)	2.100 (97%)	2.600 (96%)
PFHxA	150.000	52.000 (65%)	5.900 (96%)	2.100 (99%)	2.300 (98%)
PFOA	89.000	<670 (>99%)	<670 (>99%)	<670 (>99%)	<670 (>99%)
PFHpA	42.000	<670 (>98%)	<670 (>98%)	<670 (>98%)	<670 (>98%)
Total	344.000	<83.300 (>89%)	<13.800 (>96%)	<8.400 (98%)	<10.000 (97%)

Det fremgår af Tabel 18, at alle 4 PFAS opnår reduktioner på over 96% igennem forsøget. PFOA og PFHpA er allerede mere eller mindre nedbrudt ved 600 kWh/m³, mens PFBS og PFHxA skal op på 5.000 kWh/m³ før de opnår bedste reduktion, dog sker der minimal yderligere reduktion fra 2.400 til 5.000 kWh/m³. Det skal dog pointeres, at ved en strømforbrug på 5.000 kWh/m³, vil det uden tvivl være billigere at sende skummet til destruktion ved Fortum, da strømforbruget alene er ca. samme pris som forbrændingsprisen.

Selv om der opnås høj rensning af de 4 PFAS i forhold til koncentrationen i det opkoncentrerede skum, så er koncentrationen af de 4 PFAS i det PRD-rensede skum på niveau med eller lidt højere end i perkolatet (Prøve 4). Specielt PFHxA, som i det opkoncentrerede skum i PRD-processen reduceres fra 150.000 ng/l til 2.100 ng/l, er fortsat over de 470 ng/l, som der var i perkolatet før skumfraktionering. Dette vurderes dog ikke at have nogen betydning, når det behandlede vand ledes retur til skumfraktioneringstrinnet, da denne delstrøm (renset skum) udgør en lille andel af indløbet til skumfraktioneringen.

Det fremgår af Tabel 19, at startkoncentrationen af PFBA og PFPeA ikke var kendt grundet høje detektionsgrænser, som var forårsaget af fortynding af prøverne under analyse. Det ses dog, at de to PFAS udviser relativt stabile koncentrationer under forsøget. Dette stemmer overens med Enspired Solutions' forståelse af, at de længere PFAS-kæder først omdannes til kortere PFAS-kæder. PFBA og PFPeA formodes at være mellemprodukter, som er blevet dannet under dosering af UV eller under omdannelse af PFAS-precursorer ved fjernelse af stoffernes hydrofile grupper.

TOP-analyser af de rensede prøver kunne i fremtiden give et indblik i omfanget af precursorer og PFAS-relaterede mellemprodukter, der dannes under destruktionen. En indirekte mulighed for at kvantificere PFAS-destruktionen er at måle fluoriddannelse i et forsøg for at lukke massebalancen.

Tabel 19 – Koncentrationen af PFAS under PRD-forsøg

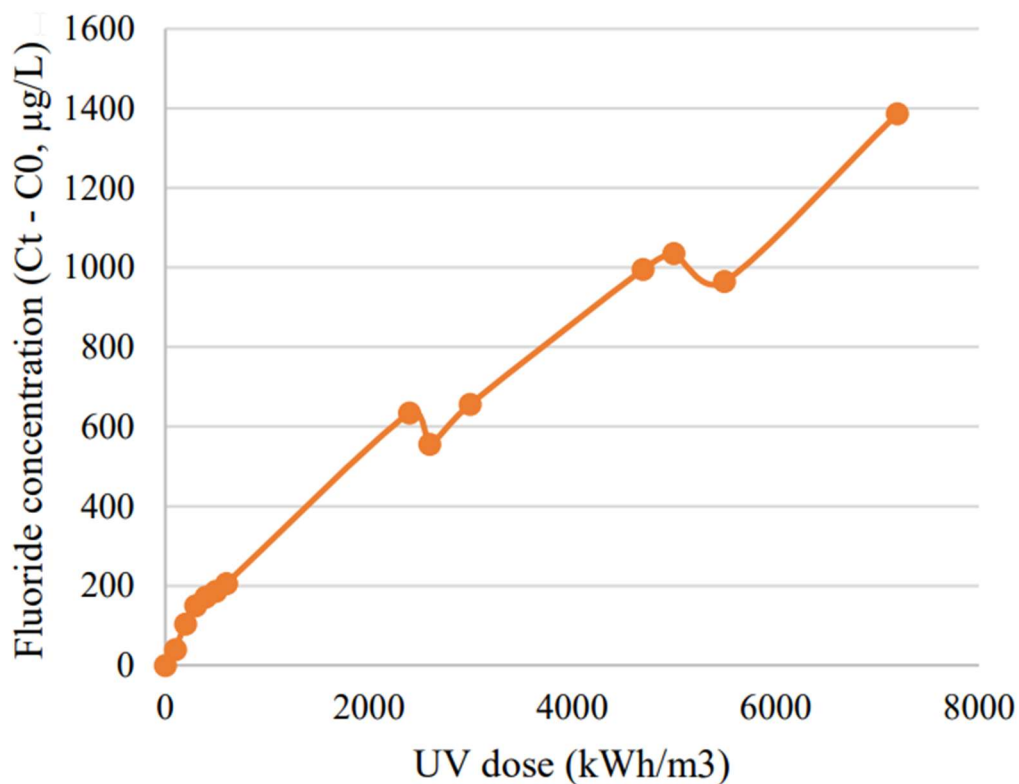
	Koncentration i ng/l (rensegrad %)				
	0 kWh/m ³	600 kWh/m ³	2.400 kWh/m ³	5.000 kWh/m ³	7.200 kWh/m ³
PFBA	<50.000	1.700	1.800	2.200	2.700
PFPeA	<20.000	3.600	2.200	2.000	2.400

Dannelse af fluorid

I takt med at PFAS-destrueres produceres der fluorid. Der er under forsøget målt fluorid online i det rensede SAFF-skum. Produktionen af fluorid kan bruges som indikator for PFAS-defluorering/destruktion. I Figur 14 ses fluoriddannelsen som en funktion af UV-dosis.

Mængden af frigivet fluorid nåede ca. 1.400 µg/l ved forsøgets slutning, hvilket oversteg det beregnede fald i organisk fluor baseret på de målte PFAS-forbindelser med ca. 2,3x. Dette kan

skyldes forekomst af upåviste og ukendte fluorholdige forbindelser (PFAS- eller PFAS-precursors) i den oprindelige prøve.



Figur 14 - Fluoridkoncentration under PRD-forsøget, minus baggrundskoncentration af fluorid i startprøven (597 µg/l)

Mulige biprodukter

Der kan forekomme PFAS med kortere kæder som biprodukter, som det er påvist i dette forsøg med PFBA og PFPeA. Enhver PFAS tilbageværende på det tidspunkt, hvor reaktionen bliver stoppet, herunder kortkædede PFAS'er, kan koncentreres yderligere ved at føre det rensede SAFF-skum tilbage til SAFF-enheden, inden det cirkuleres til PRD-processen igen.

Det tilsatte overfladeaktive stof har en akvatisk giftighed, hvor det forventes, at UV-oxidation er tilstrækkeligt forud for udledning, hvis dette kræves.

Perspektivering

Enspired Solutions' PRD-proces findes endnu ikke i kommerciel skala, men er klar til brug i pilotforsøg on site, som forberedelse til fremtidig implementering i fuldskala. Pilotopstillingen består af en SAFF-enhed med PRD-reaktor i recirkulation på SAFF-skummet inden udledning. Det fuldautomatiske udstyr kaldes PFASigator og er blevet testet med et PFAS-forurenset spildevand (ikke til nærværende projekt), og har vist sig at fungere i overensstemmelse med labforsøgene. Længevarende forsøg med PFASigator skal blandt andet afsløre hvorvidt ikke-destruerede PFAS og PFAS-biprodukter akkumulerer i rensesystemet og/eller begynder at blive udledt i det afskummede perkolat. Der kan læses mere om dette samt overordnet CAPEX og OPEX i Bilag 3.

7. Flokkulering med FluorFlok og resinrensning

Flokkulering, også kaldet kemisk udfældning, er en metode hvor man tilsætter et koaguleringsmiddel, typisk i form af et metalsalt. Dette medfører at den negative ladning på overfladen af colloiderne i vandet neutraliseres, herefter tilsættes en flokkulant (typisk en polymer) der binder de dannede partikler sammen til større flokke, som kan fjernes med simpel teknik. Ved traditionel kemisk fældning bliver der først tilsat jern- eller aluminiumchlorid som koagulant, og herefter almindelig polymer. Denne proces binder kun i meget lille grad PFAS og der er derfor udviklet et specielt PFAS-flokkuleringsmiddel, der sikrer at PFAS bindes til de dannede flokke. PFAS-flokkuleringsmidler er dog relativt nye på markedet.

Der anvendes efterfølgende en separationsproces til adskillelse af væskefasen og slammet. Slammet, som indeholder det opsamlede PFAS, skal efterfølgende destrueres. Høje omkostninger til destruktion medfører et behov for maksimal afvanding af slammet.

Hvis det rensede vand ikke er tilstrækkeligt rent, kan det være nødvendigt med yderligere efterpolering igennem fx aktiv kul, resiner eller membraner.

Ionbytning med resiner baseres på ionbytning og adsorption, hvor ladede molekyler eller ioner bindes til resinene. Overordnet findes der to typer resiner, kation- og anion-resiner, hvor kation-resiner sorberer positivt ladede ioner, mens anion-resiner sorberer negativt ladede ioner. Selvom PFAS-molekyler ikke er ioner, har resiner vist sig effektive ift. tilbageholdelse af disse. En ulempe ved anvendelse af resiner er, at resinene over tid vil få nedsat renseseffekt grundet mætning. Derfor vil der være brug for regenerering af de mættede resiner eller udskiftning og destruktion.

Man skal desuden være opmærksom på, at perkolatet også kan indeholde andre stoffer eller suspenderet stof, der kan mætte resinene.

I det efterfølgende præsenteres resultater fra pilotforsøg med flokkulering med FluorFlok (afsnit 7.1) og resinrensning (afsnit 0) udført af ECT2. Efterfølgende beskrives håndtering af det opsamlede slam (afsnit 7.3).

7.1 Pilotforsøg med flokkulering med FluorFlok (ECT2)

Den danske virksomhed Vandrensning.com blev i projektperioden en del af den amerikanske virksomhed ECT2, som har specialiseret sig i rensning af PFAS ligesom Vandrensning.com. Omdrejningspunktet i den danske del af ECT2's teknologi er FluorFlok, som er et effektivt PFAS-flokkuleringsmiddel.

Vandrensning.com, og senere ECT2, har udført vandrensningsprojekter på bl.a. brandskoler og deponier både i Sverige og Danmark. De har udført testforsøg på blandt andet perkolat og grundvand og anvendt FluorFlok med efterfølgende rensning i kolonner med aktivt kul og ionbytning.

Der er i projektperioden gennemført pilotforsøg med flokkulering af to omgange:

- Forsøg august 2023: Der blev gennemført forsøg med alle fem perkolatprøver i pilotskala (ca. 1 palletank pr. prøve).
- Forsøg marts-maj 2024: Der blev den 14. marts 2024 gennemført pilotforsøg på prøve 1 (shredderaffald) samt prøve 4 og 5 (ind- og udløb fra forrenseanlæg). Test med prøve 1 (bægerglasforsøg) var udelukkende for at forsøge at lave en bedre flokkulering end under testforsøg august 2023. Der blev her anvendt en anden polymer (polymer 1587). Test med prøve 4 og 5 (ca. 1 palletank p. prøve) blev gennemført for at producere rensed perkolat til efterpoleringsforsøg i resinkolonner (Kapitel 0).

ECT2's delrapporter er vedlagt under Bilag 4 og 5.

Forsøg august 2023

I forbindelse med første runde pilotforsøg blev der også lavet flokkulering i bægerglas, da det visuelt giver et bedre billede af perkolatet før og efter fældning (se Figur 15). Forud for udtagning af perkolat til bægerglassene blev palletankene grundigt omrørt. Der blev anvendt ens dosering til alle flokkuleringerne for at kunne sammenligne på tværs; 500 ml/m³ af PAX (aluminiumchlorid), 500 ml/m³ af FluorFlok (PFAS-flokkuleringsmiddel) og 30 ml/m³ af polymer CC FLOC 1330A (almindelig kationisk polymer).



Figur 15 – Viser perkolatprøverne før og efter fældning med FluorFlok

Efterfølgende blev bægerglasforsøgene gennemført i pilotskala, som er vist på Figur 16. Pilotanlægget bestod af palletanke, hvori flokkuleringen foregik, samt en lamelseparator til adskillelse af det rensede perkolat og slam.



Figur 16 – Illustration af pilotforsøg

Perkolatet før og efter flokkulering blev analyseret for PFAS22 af Eurofins.

Forsøg marts-april 2024

Der blev den 14. marts 2024 gennemført to nye pilotforsøg med flokkulering af henholdsvis prøve 4 (indløb til forrenseanlæg) og prøve 5 (udløb fra forrenseanlæg) med samme dosering af PAX, FluorFlok og polymer som tilbage i august 2023. Efter lamelseoperatoren blev det rensede vand og slam overført til rene palletanke. Der er undervejs taget prøver af perkolat før og efter flokkulering for analyse af PFAS22, nitrifikationshæmning, tungmetaller og udvalgte miljøfremmede stoffer af Eurofins.

Det rensede vand er anvendt i resinkolonneforsøg (Kapitel 0) og slammet er analyseret for nærmere vurdering af håndtering (Kapitel 7.3).

7.1.1 Resultater for PFAS

Resultaterne for de ubehandlede samt behandlede prøver ud fra udvalgte parametre ses af Tabel 20 - Tabel 24. Alle resultater forefindes i Bilag 4 og 5.

Overordnet viser forsøgene en samlet reduktion af PFAS22 på mellem 78,8% og 92,2%, med undtagelse af det første forsøg med prøve 1 (shredderaffald), som kun viste 51,4% i første forsøg og 82,9% i det efterfølgende forsøg. Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS og PFHpA).

Derudover blev den kortkædede PFBS, modsat i skumfraktioneringsforsøgene, fjernet med 73-85%, dog med undtagelse af det første forsøg med prøve 1 (shredderaffald), samt prøven for Stige Ø. Prøven for Stige Ø havde et meget lavt indhold af PFBS sammenlignet med de andre prøver. PFOS reduceres med 82-98,5%.

Tabel 20 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 1

Prøve 1 – Etape for shredderaffald, D7A-PB-03						
	August 2023 (polymer 1330A)			Marts-maj 2024 (polymer 1587)		
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	52.000	35.000	32,7	56.000	14.000	75,0
PFOA	2.300	1.100	52,2	2.700	270	90,0
PFHpA	860	550	36,0	750	200	73,3
PFOS	230	41	82,2	280	<10	>96,4
PFNA	36	12	66,7	32	<10	>68,8
PFDA	24	<10	58,3	25	<10	>60
PFAS4	2.700	1.200	55,6	3.200	270	91,6
PFAS22	64.000	45.000	29,7	69.000	20.000	71,0
PFOA-ækv.	4.790	2.300	51,4	5.150	880	82,9

Tabel 21 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 2

Prøve 2 – Etape for blandet affald, DIC-PB-01			
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	1.400	380	72,9
PFOA	980	120	87,8
PFHpA	440	160	63,6
PFOS	110	1,6	98,5
PFNA	19	0,78	95,9
PFDA	<10	<0,3	-
PFAS4	1.300	130	90
PFAS22	5.700	2.500	56,1
PFOA-ækv.	2.160	360	83,3

Tabel 22 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 3

Prøve 3 – Etape Stige Ø, Stige Ø D3B			
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	69	61	11,6
PFOA	280	30	89,3
PFHpA	100	18	82,0
PFOS	41	17	58,5
PFNA	5	0,63	87,4
PFDA	1,4	1,2	14,3
PFAS4	350	48	86,3
PFAS22	1	0,43	57,0
PFOA-ækv.	570	120	78,9

Tabel 23 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 4

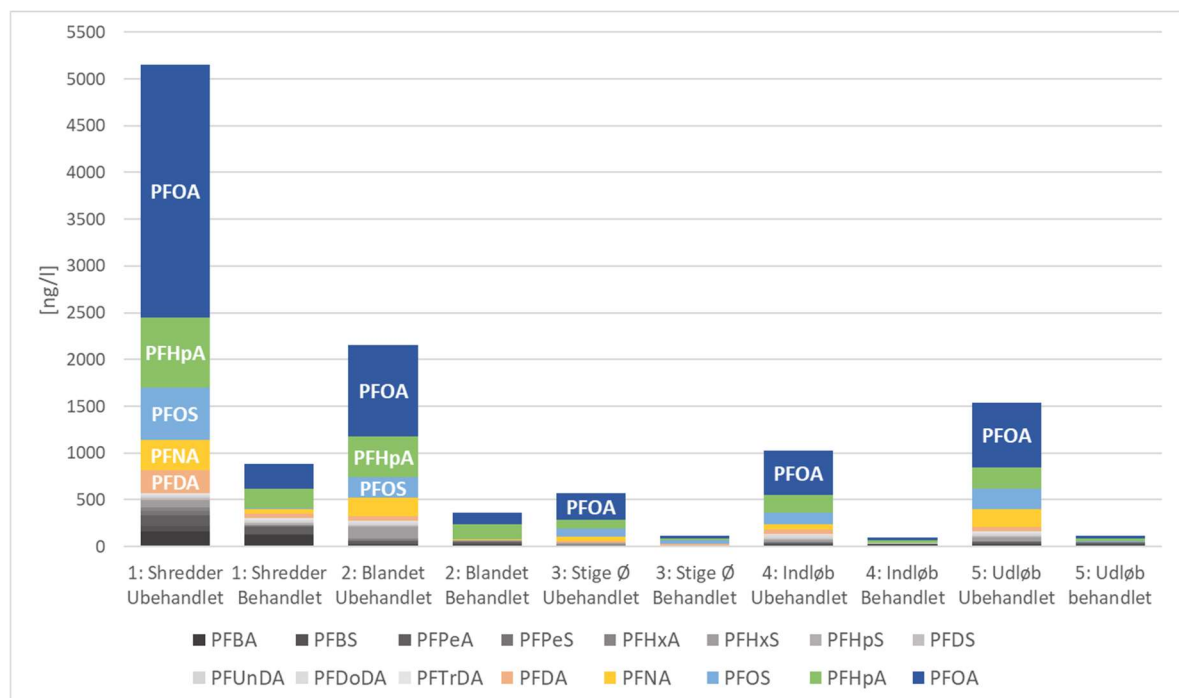
Prøve 4 – Indløb til forrenseanlæg, Indløbstank						
	August 2023			Marts-maj 2024		
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	3.100	730	76,5	3.400	520	84,7
PFOA	380	52	86,3	480	24	95,0
PFHpA	170	41	75,9	190	31	83,7
PFOS	43	10	76,7	62	<1	>98,4
PFNA	<10	0,62	-	<10	<0,3	-
PFDA	<10	<0,3	-	<10	<0,3	-
PFAS4	460	65	85,9	580	24	95,9
PFAS22	5.000	1.700	66,6	5.400	1.400	74,1
PFOA-ækv.	880	160	81,8	1.030	96	90,7

Tabel 24 - Koncentrationer af udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22, PFOA-ækv. og rensegrad for prøve 5

Prøve 5 – Udløb fra forrenseanlæg, Udligningstank efter rens						
	August 2023			Marts-maj 2024		
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	2.700	530	80,4	5.400	640	88,2
PFOA	260	39	85,0	700	27	96,1
PFHpA	110	31	71,8	220	34	84,5
PFOS	34	10	70,6	110	2	98,2
PFNA	<10	1,1	-	19	<0,3	98,4
PFDA	<10	1	-	<10	<0,3	-
PFAS4	330	53	83,9	890	29	96,7
PFAS22	4.000	1.200	70,0	8.000	1.900	76,3
PFOA-ækv.	660	140	78,8	1.540	116	92,5

Det bemærkes, at de nye perkolatprøver som er udtaget marts 2024 fra ind- og udløbet ved forrenseanlægget viser højere PFAS-indhold i udløbsperkolat end i indløbsperkolat. Dette kan skyldes, at der er en vis opholdstid i gennem forrenseanlægget og dens udligningstank eller blot analyseusikkerhed.

Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter ses det, af Figur 17, at der forekommer store reduktioner efter flokkulering. Den samlede reduktion af PFOA-ækvivalenter er på mellem 79-92%. Det er ikke muligt, alene ved flokkulering at overholde miljøkvalitetskravet på 4,4 ng/l PFOA-ækvivalenter. Der er dog sandsynlighed for, at det forventede nye vejledende krav for PFOS på 0,65 ng/l kan overholdes, specielt i prøve 4 fra marts-maj 2024, men grundet høj detektionsgrænse i en del af prøverne, vides det ikke hvor lavt ned det har været muligt at rense.



Figur 17 - PFOA-ækvivalenter før og efter flokkulering i prøve 1-5

7.1.2 Resultater for nitrifikationshæmning og miljøfremmede stoffer

Den 25. marts 2024 blev der udtaget prøver af det ubehandlede samt behandlede perkolat for analyse af nitrifikationshæmning samt udvalgte tungmetaller og miljøfremmede stoffer.

Nitrifikationshæmning

Der er ikke registreret nitrifikationshæmning i perkolat fra ind- og udløbet af forrenseanlægget (<20% nitrifikationshæmning) og dermed heller ikke nogen forskel efter flokkulering.

Tabel 25 – Nitrifikationshæmning før og efter flokkulering af prøve 4 og 5

	Prøve 4 (indløb)		Prøve 5 (udløb)	
	Ubehandlet	Behandlet	Ubehandlet	Behandlet
Nitrifikationshæmning*	<20%	<20%	<20%	<20%

*Fortynding 200 ml/l med anvendelse af standard slam fra Esbjerg Renseanlæg

Tungmetaller

Resultaterne for tungmetaller fremgår af Tabel 26 og viser, at der blev opnået relativt høje fjernelsesgrader (over 50%) for bly, chrom og zink. Der kan også påvises en vis fjernelse for cadmium, nikkel og kobber, mens kviksølv viste en lille stigning, hvilket kan tilskrives den lave koncentration af kviksølv sammen med analyseusikkerheden.

Resultaterne for fældning af tungmetaller er opnået uden tilsætning af speciel kemi i forhold til metallerne og alene med flokkulering for PFAS. I betragtning af, at yderligere koaguleringsmidler som Metalsorb og TMT kan bruges til målrettet fjernelse af tungmetaller, indikerer disse resultater at det er muligt at opnå en god fjernelse af tungmetaller ved flokkulering.

Tabel 26 – Koncentrationer af udvalgte tungmetaller i perkolat før og efter flokkuleringsforsøg for prøve 4

	Prøve 4			Prøve 5		
	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)
Bly	2,7	<0,5	>81,5	1,5	<0,5	>66,7
Cadmium	0,065	<0,05	>23,1	0,075	<0,05	>33,3
Chrom	9,3	4,2	54,8	14	3,5	75,0
Kobber	9,7	5	48,5	9,0	4,8	46,7
Kviksølv	0,11	0,16	-45,5	0,13	0,16	-23,1
Nikkel	59	42	28,8	63	41	34,9
Zink	24	10	58,3	36	12	66,7

I forhold til de forventede ny vejledende grænseværdier (Tabel 2) er der udfordringer med nikkel, hvor den eksisterende vejledende grænseværdi på 250 µg/l forventes ændret til 7,8 µg/l. Dette kan dog evt. løses med tilsætning af speciel fældningskemi der binder nikkel mere effektivt.

Andre miljøfremmede stoffer

Resultaterne for aromatiske kulbrinter (BTEXN) og kulbrinter (C6H6-C40) fremgår af Tabel 28. Kulbrinterne er steget efter flokkulering, hvilket skyldes tilsætning af koagulerings- og flokkuleringsmidler. Optimering af dosering kan hjælpe med at reducere stigningen. Det viser også stigning i aromatiske kulbrinter, men koncentrationerne af disse er lave, og ændringerne i dem skyldes sandsynligvis analysens usikkerhed.

Tabel 27 – Koncentrationer af kulbrinter i perkolat før og efter flokkulering for prøve 4 og 5

	Prøve 4			Prøve 5		
	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)
Benzen	0,3	1,2	-300	<0,02	0,021	-
Toluen	0,13	0,21	-62	<0,02	0,025	-
Ethylbenzen	0,074	0,081	-9	<0,02	<0,02	-
o-Xylen	0,43	0,32	26	<0,02	<0,02	-
m+p-Xylen	0,49	0,49	0	<0,02	0,024	-
Naphthalen	0,37	0,47	-27	<0,02	0,028	-
Sum (BTEXN)	1,79	2,77	-55	<0,12	<0,14	-
C6H6-C10	19	16	16	<2	<2	-
C10-C15	68	1.300	-1.812	21	1.800	-8.471
C15-C20	47	180	-283	31	210	-577
C20-C25	38	97	-155	19	85	-347
C25-C35	25	77	-208	18	85	-372
C35-C40	<10	<10	-	<10	14	-
Sum (C6H6-C40)	200	1.700	-750	89	2.200	-2.372

Der forventes ny grænseværdi for toluen på 740 µg/l (Tabel 2), som uden problemer kan overholdes i både ubehandlet og behandletperkolat.

Resultater for PAH (16 stk.), detergent LAS, blødgøreren DEHP, alkylphenoler og -ethoxylater (NPE), phenoler og chlorphenoler (7 stk.) fremgår af Tabel 28.

Tabel 28 – Koncentrationer af miljøfremmede stoffer i perkolat før og efter flokkulering for prøve 4 og 5

	Prøve 4			Prøve 5		
	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (µg/l)	Behandlet (µg/l)	Rensegrad (%)
PAH (16 stk.)	1,3	0,07	95	0,019	0,021	-11
LAS	<100	<100	-	<100	<100	-
DEHP	<0,2	<0,1	-	0,26	<0,1	>61,5
NPE	1,1	0,56	49	0,10	0,07	30
Phenol	4,2	<4	>4,8	<0,61	0,62	-
Cresoler	1	0,66	34	0,31	<0,11	>64,5
Xylenoler	1,8	2	-11	<0,05	<0,06	-
Chlorphenoler (7 stk.)	<0,93	<0,95	-	<0,35	<0,41	-

Koncentrationen af PAH'erne er højere i indløbsperkolat end i udløbsperkolat, hvilket viser en effektiv fjernelse af disse ved den biologiske behandling i forrenseanlægget. I indløbsperkolatet blev der opnået en reduktion af PAH på 95% ved flokkulering. Der forventes ny vejledende grænseværdi (Tabel 2) for den PAH, som hedder naphthalen, på 11 µg/l. Grænseværdien er overholdt både i ubehandlet og behandlet perkolat (se Bilag 5).

For de resterende miljøfremmede stoffer, er mange af resultaterne tæt på eller ved detektionsgrænsen, hvorfor det er vanskeligt at konkludere den reelle effektivitet af flokkulering for disse forurenende stoffer.

Der forventes nye grænseværdier (Tabel 3) for LAS på 700 µg/l, DEHP på 7 µg/l, phenol på 770 µg/l, samt to af chlorphenolerne (2,4,6-trichlorphenol på 1,3 µg/l og 2,4-dichlorphenol på 0,42 µg/l). Alle grænseværdier er overholdt i både ubehandlet og behandlet spildevand (Tabel 28 og Bilag 5).

7.2 Resinrensning

Fra den 14. marts 2024 blev der igangsat to kolonne pilotforsøg med resinrensning. I kolonne 1 blev anvendt flokkuleret perkolat fra indløb til forrenseanlægget, mens der i kolonne 2 blev anvendt flokkuleret perkolat fra udløbet af forrenseanlægget. Begge perkolater var flokkuleret med FluorFlok, PAX og polymer (se afsnit 7.1).

Den anvendte resin var Purolite 694E med 300 ml bed volumen og 1,5 L/time flowhastighed gennem kolonnen, hvilket svarer til 5 bedvolumen (BV) pr. time og med 12 minutters opholdstid.

Den 22. marts 2024 blev pumpen til kolonne 1 stoppet på grund af tilstopning fra partikler i kolonnen fra palletanken. Det var ikke muligt at udtage en optimal mængde prøve, men da der var 600 liter rensat perkolat tilbage i palletanken, blev første forsøg stoppet og der blev igangsat et nyt kolonneforsøg den 27. marts 2024.



Figur 18 – Resinkolonnerne hvor kolonne nr. 1 og 2 (de to til venstre) er anvendt i pilotforsøget

Efter resinrensningen blev der udtaget prøver for PFAS22-analyse efter 60 min resinrensning, og derefter ca. hver 2. dag i 2 uger. Altså opnås et øjebliksbillede af renseseffekten af kolonnen på de pågældende tidspunkter.

Tabel 29 – Oversigt over prøvetagningstidspunkter samt mængde af flokkuleret perkolat tilbage i palletanken

Kolonne	Dato	Tid	Tilbageværende perkolat i palletank
1	27. marts 2024	15:00	600L
	29. marts 2024	18:45	440L
	1. april 2024	07:00	250L
	3. april 2024	08:20	50L
	4. april 2024	07:10	0-50L
2	14. marts 2024	18:15	900L
	18. marts 2024	09:10	600L
	20. marts 2024	09:55	450L
	22. marts 2024	13:00	270L
	25. marts 2024	07:10	50L

Resultater for PFAS

Resultaterne for de to kolonneforsøg er forskellige, som det ses i Tabel 30 og Tabel 31 samt Figur 19 og Figur 20 (bemærk at der er forskellige værdier på x-aksen).

Da der efter flokkulering ikke længere er PFOA, PFHpA, PFOS, PFNA og PFDA der er de største bidragsydere til PFOA-ækvivalenter, men i stedet PFBA, PFOA, PFHpA og PFPeA, som til sammen står for 86,5% af PFOA-ækvivalenterne i den flokkulerede prøve 4 (marts-maj 2024) og 84,6% i den flokkulerede prøve 5 (marts-maj 2024). I det efterfølgende vil fokus derfor være på de 4 PFAS samt PFAS4, PFAS22 og PFOA-ækvivalenter.

Tabel 30 – Koncentration af PFAS efter kolonne 1 ved forskelligt tidspunkt samt fjernelsesgrad vist i parentes

Kolonne 1 – Prøve 4 (indløb til forrenseanlæg) efter behandling							
	Enhed	Tid (timer)					
		0	1,00	52,75	113,00	162,33	185,17
BV	-	0	5	263,75	565	811	925
PFBA	ng/l	340	<0,6 (>99,8%)	8,2	11	130	280
PFOA	ng/l	24	0,37 (98,5%)	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
PFHpA	ng/l	31	<0,3 (>99,0%)	<10	<0,3	<0,3	<0,3
PFPeA	ng/l	290	0,59 (99,8%)	1	<0,3	20	110
PFAS4	ng/l	24	1,0 (95,8%)	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1
PFAS22	ng/l	1.400	3,4 (99,8%)	9,2	11	150	420
PFOA-ækv.	ng/l	96	8 (91,7%)	12	7	14	27

Tabel 31 – Koncentrationen af PFAS efter kolonne 2 ved forskelligt tidspunkt samt fjernelsesgrad vist i parentes

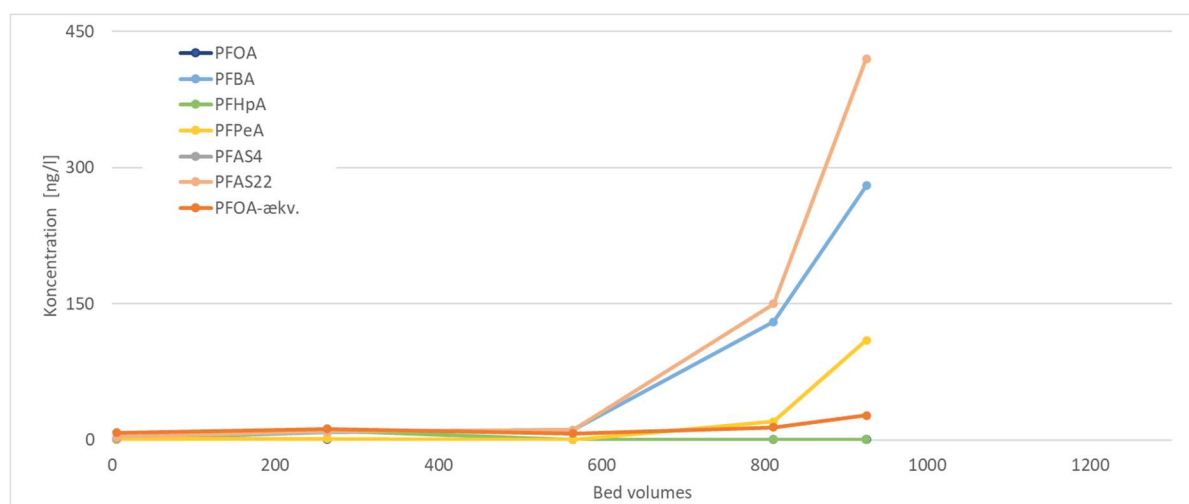
Kolonne 2 – Prøve 5 (udløb fra forrenseanlæg) efter behandling							
	Enhed	Tid (timer)					
		0	1,00	87,92	136,67	187,75	253,92
BV	-	0	5	439	683	938	1.269
PFBA	ng/l	440	<0,6 (>99,9)	490	450	390	460
PFOA	ng/l	27	1,5 (94,5%)	6,6	16	11	8,4
PFHpA	ng/l	34	<0,3 (>99,1%)	12	27	20	14
PFPeA	ng/l	370	<0,3 (>99,9%)	330	410	400	340
PFAS4	ng/l	29	4,6 (84,1%)	6,6	16	11	8,4
PFAS22	ng/l	1.900	5,7 (99,7%)	1.000	1.100	1.000	1.000
PFOA-ækv.	ng/l	116	18 (84,5%)	68	95	79	71

Kolonne 1 viser et begyndende gennembrug ved 264 bed volumener og total gennembrug mellem 5656 og 811 bed volumener. Kolonne 2 vist et total gennembrud af PFAS mellem 5 og 439 bed volumener.

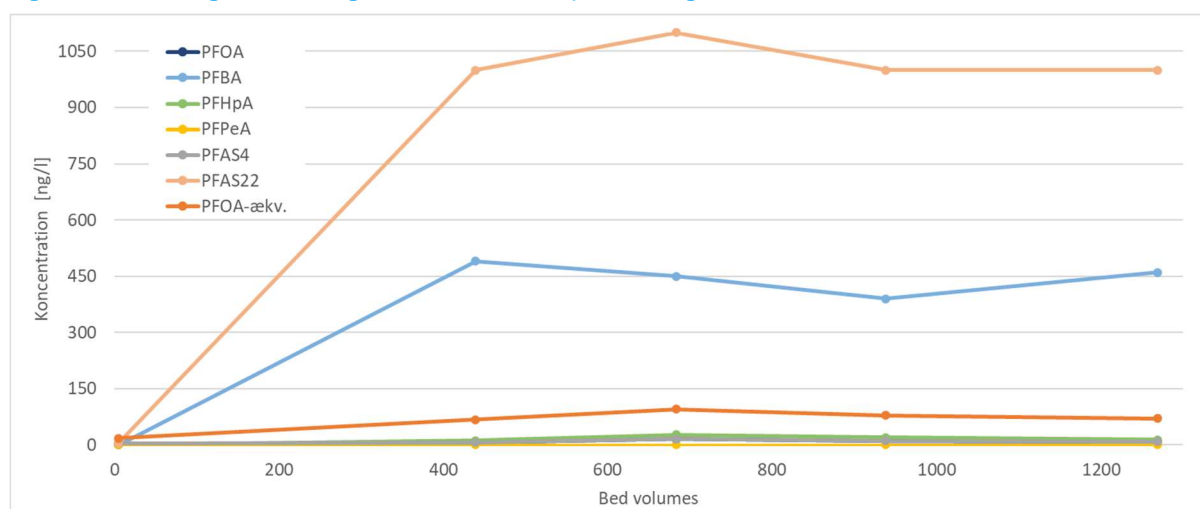
Ses der udelukkende på PFOA-ækvivalenter så kan kolonne 1 tilbageholde 91,7% i starten hvorefter det falder til 72%, mens kolonne 2 i starten tilbageholder 84,5%, hvorefter det falder til 18% igennem forsøget.

En af grundene til at kolonne 2 viser dårligere resultat end kolonne 1, kan skyldes, at perkolatprøven der er anvendt i kolonne 2 (se Tabel 24) var mere forurenset (PFAS22 på 1.900 ng/l) end perkolatprøven (PFAS22 på 1.400), der er anvendt i kolonne 1 (se Tabel 23). Højere indhold af PFAS, kan også betyde højere indhold af andre stoffer som COD og SS, hvilket kan være forklaringen på de forskellige resultater.

PFBS fjernes fuldstændigt i både kolonne 1 og 2 ved alle testede bed volumes, selv når andre PFAS er ved eller begynder at bryde igennem.



Figur 19 – Udviklingen for udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22 og PFOA-ækv. i kolonne 1



Figur 20 – Udviklingen for udvalgte PFAS samt PFAS4, PFAS22 og PFOA-ækv. i kolonne 2

Konklusionen efter resinforsøg er, at ionbytning med resiner ikke er egnet til rensning af perkolat fra ONM, da det vil blive urealistisk dyrt (der skal mange udskiftninger af resiner til at sikre en optimal rensning). Med udgangspunkt i de to kolonneforsøg, så vil udgiften til udskiftning af resin alene give en årlig driftsudgift på mellem ca. 18 og 36 mio. kr. Dette er en teoretisk beregning baseret på et lignende tilbud fra Vandrensning.com i 2022, hvor 66% er til indkøb af resiner, 29% til selve udskiftningen og 5% til bortskaffelse af brugt resin. De høje driftsomkostninger skyldes meget lave bed volumener målt under forsøgene (ca. 500 – 1.000 BV), som ville kræve et resinskifte efter hhv. hver 9. og 5. dag.

7.3 Håndtering af slam

Slammet fra flokkuleringen har et tørstofindhold på omkring 1-2% og indeholder det opkoncentrerede PFAS. Slammet kan opkoncentreres yderligere i en skruepresse hvormed tørstof forventes at kunne øges til omkring 30%. Skal tørstof øges yderligere skal slammet tørres.

Termisk behandling er en etableret metode til destruktion af PFAS i slam. Jo højere temperatur, jo større sandsynlighed for at PFAS destrueres.

Studier viser, at PFAS kan destrueres ved en forbrænding på op til 1.400 °C. Der er stadig mange ukendte faktorer omkring effektiviteten af forbrændingen, men hvis temperaturen og opholdstiden ikke er tilstrækkelig, kan der opstå ufuldstændig forbrænding hvilket betyder, at det ikke er alle kulstof-fluor-bindingerne der brydes. Dette kan medføre fluorerede og halogenerede drivhusgasser, kortkædede PFAS og PIC'er (produkter af ufuldstændig forbrænding) (U.S. EPA, 2019).

Ved pyrolyse, hvor der anvendes lavere temperatur, ses at lavere temperaturer kan opnå samme nedbrydning af PFAS som ved forbrænding.

Der er 4 relevante muligheder i Danmark:

- Forbrænding på affaldsforbrændingsanlæg: Der findes mange affaldsforbrændingsanlæg i Danmark. I konventionelle affaldsforbrændingsanlæg vil temperaturen i ristlaget normalt komme helt op på ca. 1.000-1.200 °C. Der hvor temperaturen er højest, er der som regel tale om reduceret atmosfære (dvs. der ikke er ilt nok til stede til en fuldstændig forbrænding). Efter risten udtages slagge (bundaske) og aske, mens røggassen ledes videre til røggasrensning. For at sikre fuldstændig udbrænding af forbrændingsgasserne skal røggassen i efterforbrændingskammeret efter sidste indblæsning af forbrændingsluft have en temperatur, der i 2 sekunder er på minimum 850 °C målt nær den indre væg eller et andet repræsentativt punkt i forbrændingskammeret (MST, 2023b).
- Forbrænding ved Fortum (farligt affald): Ved Fortum kommer affald i roterovnen op på 1.200-1.300 °C. I efterforbrændingskammeret holdes temperaturen på 870-1.120 °C afhængigt af affaldssammensætningen. Hvis affaldet indeholder mere end 1% halogenerede organiske forbindelser, udtrykt som klor, skal temperaturen op på mindst 1.100 °C i mindst 2 sekunder (Fortum, 2005).
- Pyrolyse: Der er i dag to pyrolyseanlæg som pyrolyserer spildevandsslam (Fårevejle Rensningsanlæg, Odsherred forsyning og Søndersø renseanlæg, VandCenter Syd), og

adskillige nye anlæg under opførelse. Tørret slam pyrolyseres ved omkring 650 °C i en iltfattig atmosfære (MST, 2023b).

- Monoforbrændingsanlæg: Der er i dag 3 anlæg der monoforbrænder spildevandsslam i Danmark (Avedøre- og Lynetten Renseanlæg, BIOFOS og Renseanlæg Mølleåværket, Lyngby-Tårnbæk Forsyning) i fluidbed-reaktor. Afvandet slam forbrændes i reaktorens sandlag ved 750 – 850 °C under tilstedeværelse af ilt. Herefter hæves temperaturen til ca. 860 – 900 °C, hvor krav til opholdstid på minimum 2 sekunder opnås (MST, 2023b).

Der pågår mange studier og undersøgelser på destruktion af PFAS under forbrænding og pyrolyse, som viser god fjernelse af PFAS i restprodukterne (biokul, slagge, aske), men der er fortsat usikkerhed om den totale destruktion af PFAS i andre strømme som spildevand og røggas.

Af sikkerhedsmæssige årsager er der, i dette projekt, udelukkende taget udgangspunkt i destruktion ved Fortum under økonomaifsnittet. Dette er den klart dyreste behandlingsmetode med en pris på 6,5 kr./kg slam ved aflevering i containere (2024 priser). Det er derudover et krav, at slammet har et indhold af halogener på under 1% (Kilde: Fortum Nyborg).

Grundet den høje behandlingspris vil tørring af slammet, forud for destruktion ved Fortum, være at fortrække.

7.4 ECT2 – Slamforsøg

Der er gennemført en jar test (en laboratorieanalyse til bestemmelse af passende kemiske doseringer for koagulation og flokkulering i spildevand) med 500 ml perkolat (prøve 4 og prøve 5) for fastsættelse af den totale mængde tørstof. På baggrund af tørstofmængden, samt ECT2s erfaringsmæssige værdier for tørstof i slam efter flokkulering samt efter evt. skruepresse, er slammængderne pr. m³ perkolat beregnet (se Tabel 32).

Tabel 32 – Tørstofmængde i perkolat samt beregnede slammængder før og efter skruepresse

	Tørstofmængde (g/m ³ perkolat)	Slammængde	
		Efter flokkulering ~5% tørstof* (kg/m ³ perkolat)	Efter skruepresse ~30% tørstof (kg/m ³ perkolat)
Prøve 4	660	13,3	2,2
Prøve 5	768	15,4	2,6

*) Slammet/tørstof udgør omkring 1-2%v/v af det samlede våde slamvolumen. Det svarer til ca. 10-20L slam/m³ perkolat, hvormed vandindholdet er omkring 95%

Slamprøverne er efterfølgende sendt til analyse for PFAS22. PFAS4 og PFAS22 fremgår af Tabel 33, mens alle PFAS-analyserne findes i Bilag 6.

Tabel 33 – PFAS i slam fra prøve 4 og 5

	Enhed	Prøve 4	Prøve 5
PFAS4	ng/l	16.000	20.000
PFAS22	ng/l	180.000	190.000

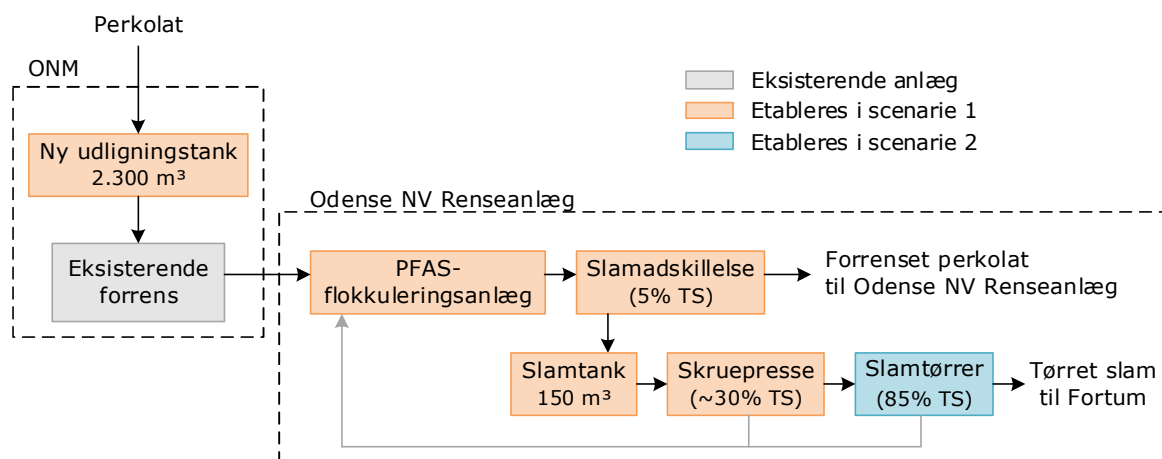
8. Overordnet økonomi (TOTEX)

I dette afsnit præsenteres anlægs- og driftsøkonomi for en fuldskala løsning til PFAS-rensning af hele perkolatet (229.250 m³/år) fra ONM med flokkulering med FluorFlok. Det har fra projektets start kun været mening der skulle laves anlægs- og driftsøkonomi på flokkuleringsteknologien.

Der vises økonomi for to forskellige scenarier som er med og uden tørring af det afvandede slam:

Scenarie 1: Ny 2.300 m³ udligningstank ved ONM foran eksisterende forrenseanlæg. PFAS-flokkuleringsanlæg til 40 m³/h, slamadskillelse i et DAF-anlæg (5% tørstof) og yderligere opkoncentrering af slammet igennem en skruepresse (~30% tørstof). Derudover en bygning af 175 m² til PFAS-anlæg og skruepresse.

Scenarie 2: Identisk med Scenarie 1 men med yderligere opkoncentrering af slammet i et tørreanlæg (tørstof 85%) og udvidelse af bygningens størrelse til 215 m² til PFAS-anlæg, skruepresse og tørreanlæg.



Figur 21 – Flowdiagram over eksisterende forrenseanlæg og nye anlægsdele medtaget i scenarie 1 og 2

Driftsudgifter for og afskrivning af det eksisterende forrenseanlæg er ikke medtaget i den økonomiske vurdering.

Efterpolering med resiner er ligeledes heller ikke medtaget i den økonomiske beregning, da løsningen er vurderet at være uforholdsmæssig dyr. Der anbefales i stedet at undersøge alternative efterpoleringsteknologier såsom filtrering med aktivt kul, membranfiltrering osv.

Datagrundlag

Som grundlag for anlægsøkonomiberegningerne er der dimensioneret med en hydraulisk kapacitet på 40 m³/h svarende til 80% fraktilen for døgnflow af perkolat ledt fra ONM til Odense NV Renseanlæg i perioden juni 2021 til juni 2024 (se Tabel 5). 80%-fraktildata blev valgt frem for gennemsnitsflow, fordi 80%-fraktilet giver tilstrækkelig vægt til hydrauliske peakbelastninger.

Til beregninger af driftsøkonomi er der anvendt gennemsnitsflow af 3 års flowdata fra juni 2021 til juni 2024 (se Tabel 5).

Tabel 34 - Dimensioneringsgrundlag for TOTEX-beregninger (juni 2021 – juni 2024)

Flow	Perkolat fra ONM
3. årsgennemsnit (m ³ /år)	229.250
Månedsgennemsnit (m ³ /måned)	19.104
Døgngennemsnit (m ³ /døgn)	627
Døgn 80% fraktil (m ³ /døgn)	961
Døgn 80% fraktil (m ³ /h)	40

8.1 Økonomiske forudsætninger

En totaløkonomisk vurdering af de to scenarier bygger på en nutidsværdibetragtning af både anlægs- og driftsudgifter.

De samlede udgifter for anlæg og drift for en 20-årig periode, fra 2025-2045, danner baggrund for vurderingen. I beregningerne er der anvendt en kalkulationsrate på 4% årligt. Derudover er der på driftsudgifter regnet med en årlig inflation på 3%.

8.2 Anlægsøkonomi (CAPEX)

Anlægsudgifterne for et fuldskalaanlæg er præsenteret i Tabel 35. Priserne er ekskl. moms. Anlægsprisen er størst for Scenarie 2, da det også involverer indkøb af tørreanlæg.

Tabel 35 - Anlægsudgifter for 2025-2045, samt oplyst som nutidsværdi (2024)

Anlægsudgifter	Scenarie 1	Scenarie 2
Udligningstank (2.300 m ³)	5.600.000	5.600.000
PFAS-anlæg inkl. slamhåndtering	6.950.000	9.450.000
Frostfri bygning (175 m ² /215 m ²)	3.000.000	3.700.000
Uforudsete udgifter (10%)	1.555.000	1.875.000
Samlet anlægsudgift (DKK)	17.105.000	20.625.000
Samlet anlægsudgift - nutidsværdi (DKK)	16.447.115	19.831.731

Udligningstank: Der er taget udgangspunkt i en 2.300 m³ udligningstank. Der anbefales dog nærmere tests for at fastslå endelig størrelse af denne.

PFAS-anlæg inkl. slamhåndtering: ECT2 har givet pris på flokkuleringsanlægget som er inkl. fuldt flokkuleringssetup, slampresse, slampumpe, indtagpumpe, flotationsanlæg, skruepresse og PLC-styring. Rambøll har derudover indhentet tilbud på tørreanlæg fra leverandør, men der skal køres tests på det specifikke slam for at præcisere tallene.

Prisen er desuden inkl. en 150 m³ slam buffertank med omrøring inden skruepressen. Prisen er estimeret ud fra erfaringstal. Tanken skal dimensioneres mere præcist.

Derudover indeholder anlægsprisen udgift til rådgivning, design, projektering, anlægsopstart og indkøring samt ekstern operatørtræning. Der er estimeret udgift til ledningsanlæg ud fra erfaringstal.

Frostfri bygning: Der er estimeret størrelse og pris på en 175 m² frostfri bygning til Scenarie 1 og på en 215 m² frostfri bygning til Scenarie 2, da der her yderligere skal være plads til et

tørreanlæg. Det anbefales at der med leverandørerne vurderes, hvor stor en bygning der er nødvendig.

Uforudsete udgifter: Der er tillagt 10% af anlægsprisen til uforudsete udgifter.

8.3 Driftsøkonomi (OPEX)

Driftsudgifterne for et fuldskalaanlæg er præsenteret i Tabel 36. Priserne er ekskl. moms. De årlige driftsudgifter i 2025 er for Scenarie 1 på 11,7 mio. kr., mens det for Scenarie 2 er på 9,4 mio. kr. Med en nettoprisstigning på 3% årligt vil det over en 20-årige periode blive til henholdsvis 205 mio. kr. og 165 mio. kr. udtrykt i nutidsværdi.

Driftsomkostninger er inklusive:

- Udgifter til kemikalier (aluminiumklorid, polymer og FluorFlok)
- El-udgifter til drift af procesudstyr
- Destruktion af slam ved Fortum inkl. transport og CO₂-afgift
- Servicering af anlæg (udført af leverandør)
- Vedligeholdelsesomkostninger (3,5% af anlægsomkostningen)

Tabel 36 – Driftsudgifter for 2025-2045, samt oplyst som nutidsværdi (2024)

Driftsudgifter	Scenarie 1	Scenarie 2
Energiforbrug	110.040	270.040
Kemikalier	6.897.359	6.897.359
Vedligeholdelsesomkostninger	560.175	683.375
Service	150.000	150.000
Slamhåndtering	3.973.014	1.400.390
Samlet driftsudgift (DKK/år 2025)	11.690.588	9.401.164
Samlet driftsudgift (DKK/20 år)	314.130.468	252.612.789
Samlet driftsudgift - nutidsværdi (DKK/20 år)	205.420.470	165.191.992

8.4 Totaløkonomi (TOTEX)

De samlede omkostninger for anlæg og drift, udtrykt som nutidskroner for perioden 2025-2045, er sammenstillet i Tabel 37. Priserne er ekskl. moms. Anlægsudgifterne er højest for Scenarie 2, mens driftsudgifterne er højest i Scenarie 1. Omregnes udgifterne, i nutidskroner, vil det koste mellem 40,4 og 48,4 DKK/m³ afhængig af hvilket scenarie, der vælges for slamhåndtering. Derudover vil det kræve efterpolering at opnå tilstrækkeligt lave koncentrationer, men det kræver yderligere viden om krav og teknologi.

Tabel 37 - Samlede omkostninger til anlæg og drift af PFAS-renselanlæg i nutidsværdi (2024)

Nutidsværdi	Scenarie 1	Scenarie 2
Anlægsudgifter (DKK)	16.447.115	19.831.731
Driftsudgifter total (DKK)	205.420.470	165.191.992
Total for anlæg og drift (DKK)	221.867.585	185.023.723
Total for anlæg og drift (DKK/år)	11.093.379	9.251.186
Total for anlæg og drift (DKK/m³)	48,4	40,4

9. Sammenfatning og anbefalinger

Den regulatoriske status for PFAS er fortsat under udvikling, og det videnskabelige samfund skaber yderligere data vedrørende PFAS' egenskaber og potentielle påvirkning. Konklusionerne af denne rapport er derfor underlagt den nyvurdering og regulering, som der var på det tidspunkt rapporten er skrevet. Derudover er det vigtigt at pointere, at der er 30% analyseusikkerhed på alle PFAS-analyserne.

Er ONM primær PFAS-kilde til Odense NV Renseanlæg?

Der er gennemført en analysekampagne, hvor der er lavet PFAS28 og TOP22 analyser i udløbet fra ONM samt ind- og udløb fra Odense NV Renseanlæg for vurdering af ONM's bidrag til PFAS i Odense NV Renseanlæg. Derudover er der lavet en perkolat karakterisering for vurdering af, hvilke PFAS-forbindelser der er relevante vurderet ud fra PFOA-ækvivalenter.

Det fremgår fra analysekampagnen, at:

- De beregnede PFOA-ækvivalenter (730-1.860 ng/l i udløb fra ONM, 34-160 ng/l i indløbet til Odense NV Renseanlæg og 32-49 ng/l i udløbet fra Odense NV Renseanlæg) ligger over miljøkvalitetskrav på 4,4 ng/l i alle prøverne.
- Der er 5 PFAS som samlet set bidrager med over 80% af PFOA-ækvivalenterne. Det drejer sig om PFOA (33-41%), PFHpA (8-19%), PFOS (7-17%), PFNA (6-16%) og PFDA (5-15%).
- TOP-analyserne indikerer ikke mange ukendte PFAS iblandt precursors i prøverne.
- De kortkædede PFAS-forbindelser er de dominerende i både perkolatet og indløbsspildevandet. For perkolatet udgør de kortkædede PFAS-forbindelser mellem ca. 63-86%, mens det i indløbsspildevandet udgør mellem ca. 70-90%. På baggrund af spildevandets PFAS-fingeraftryk, tyder det på, at perkolat fra ONM er en primær bidragsyder til PFAS i indløbsspildevandet til Odense NV Renseanlæg.

Skumfraktionering vs. flokkulering

Der er i projektet lavet forsøg med både skumfraktionering og flokkulering:

- Skumfraktionering: Overordnet viser Envytech Solutions' SAFF-forsøg en samlet reduktion af PFAS28 på mellem 39,2% (Prøve 4, indløb til forrenseanlæg) og 70% (Stige Ø). Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS og PFHpA). Det ses derudover, at den kortkædede PFBS kun fjernes med 29-42%. Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter vises en samlet reduktion på mellem 72-97%. Erfaringer fra andre projekter viser, at man ved anvendelse af et additiv kan opnå forbedret rensning, specielt for PFBS. Med additiv forventes den samlede PFAS28 at kunne reduceres til 650 ng/l, mens PFOA-ækv. forventes reduceret til 217 ng/l.
Der er i projektet også lavet forsøg af Enspired Solution med fotokatalytisk reaktiv defluorering på det opkoncentrerede SAFF-skum, som viste at de detekterbare PFAS; PFHxA, PFHA, PFOA og PFBS kunne reduceres med over 96%. Dog skal man være obs på strømforbruget, da det hurtigt kan blive dyrere i strømforbrug (og andet CAPEX/OPEX) end at sende prøverne til destruktion ved Fortum.
- Flokkulering: Overordnet viser ECT2's flokkuleringsforsøgene en samlet reduktion af PFAS22 på mellem 56,1% (Prøve 2, blandet affald) og 76,3% (prøve 5, udløb fra forrenseanlæg). Alle forsøg fjernede med succes >99,9% af de langkædede PFAS. Derudover blev den kortkædede

PFBS, modsat i skumfraktioneringsforsøgene, fjernet med 73-85%. Med udgangspunkt i PFOA-ækvivalenter vises en samlet reduktion på mellem 79-93%.

Der er ikke lavet forsøg med destruktion af slammet, men udelukkende antaget at det skal forbrændes ved Fortum.

Der er for flokkulering også lavet forsøg for vurdering af reduktion af tungmetaller og andre miljøfremmede stoffer. De forventede nye vejledende grænseværdier for tilladning af perkolat til offentlig kloak er overholdt for alle stoffer der er analyseret for med undtagelse af nikkel. Det anbefales, at det undersøges om nikkel kan overholdes, hvis der anvendes specielt fældningskemi under flokkuleringen. Derudover vil der forventeligt også være udfordringer med at overholde det nye vejledende krav til bisphenol A, men dette er der ikke analyseret for i denne rapport. Det anbefales ligeledes, at der undersøges om PFAS-teknologierne kan reducere bisphenol A.

I Tabel 38 er vist en sammenligning af de to teknologier. Under sammenligningen er der taget hensyn til, at der anvendes PFAS22 analyser for begge forsøg, så de sammenlignes på et ens grundlag. Da skumfraktionering ikke er testet på udløb fra forrenseanlægget, sammenlignes resultaterne for forsøg med indløbsperkolat til forrenseanlægget.

Tabel 38 – Sammenligning af resultater fra skumfraktionering og flokkulering af prøve 4 (indløb til forrenseanlæg)

	Skumfraktionering			Flokkulering		
	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)	Ubehandlet (ng/l)	Behandlet (ng/l)	Rensegrad (%)
PFBS	2.800	1.900	32,1	3.400	520	84,7
PFOA	320	<10	>96,9	480	24	95,0
PFHpA	150	<10	>93,3	190	31	83,7
PFOS	64	<10	>84,4	62	<1	>98,4
PFNA	<10	<10	-	<10	<0,3	-
PFDA	<10	<10	-	<10	<0,3	-
PFAS4	430	<0,4	>99,9	580	24	95,9
PFAS22	4.590	2.790	39,2	5.400	1.400	74,1
PFOA-ækv.	835	232	72,2	1.030	96	90,7

Det ses, at skumfraktionering nedbringer PFOS til <10 ng/l og PFOA-ækv. til 232 ng/l, mens flokkulering nedbringer PFOS til <1 ng/l og PFOA-ækv. til 96 ng/l. Der opnås derfor en bedre rensning ved flokkulering end ved skumfraktionering, hertil kommer, at der under flokkuleringen også fjernes andre miljøfremmede stoffer som tungmetaller. Tilsættes der derimod et additiv under skumfraktioneringen, forventes yderligere reduktion, specielt PFBS, som kan fjernes med op til 96%. Begge teknologier indikerer, at de kan reducere PFOS til under den forventede nye vejledende grænseværdi på 0,65 ng/l, men høje detektionsgrænser "skjuler" den reelle rensning.

Omkostninger

Der er i projektet udarbejdet anlægs- og driftsøkonomi på et flokkuleringsanlæg inkl. 2.300 m³ udligningstank og slamhåndtering, da et sådan anlæg er realistiske af bygge i fuldskala, selv om miljøkvalitetskravene ikke kan opnås.

Der er regnet på to scenarier, hvor det ene scenarie afvander slammet til 30% tørstof, mens slammet i det andet scenarie tørres til 85% tørstof. Der er i begge scenarier taget udgangspunkt i at slammet sendes til destruktion ved Fortum.

Der er udarbejdet TOTEX for de samlede omkostninger for anlæg og drift, udtrykt som nutidskroner for perioden 2025-2045. Resultatet fremgår af Tabel 39. Priserne er ekskl. moms.

Tabel 39 - Samlede omkostninger til anlæg og drift af PFAS-renselanlæg i nutidsværdi (2024)

Nutidsværdi	Scenarie 1	Scenarie 2
Anlægsudgifter (DKK)	16.447.115	19.831.731
Driftsudgifter total (DKK)	205.420.470	165.191.992
Total for anlæg og drift (DKK)	221.867.585	185.023.723
Total for anlæg og drift (DKK/år)	11.093.379	9.251.186
Total for anlæg og drift (DKK/m³)	48,4	40,4

Det ses, at der er beregnet en samlet pris for håndtering af perkolatet på henholdsvis 48,4 kr./m³ i scenarie 1, hvor slammet ikke tørres og 40,4 kr./m³ i scenarie 2, hvor slammet tørres. Tidligere (den forrige rapport udarbejdet i 2022) er beregnet 47 kr./m³ for scenarie 1, så det er ikke blevet nævneværdigt dyrere efter der er laveret pilotforsøg med det konkrete perkolat fra ONM i stedet for erfaringstal fra andre deponier. Det skal dog pointeres, at der er stor usikkerhed på mængderne af slam og dermed også udgiften til at håndtere slammet, både hvad angår forventet slammængden samt tørstof efter skruetpressen. Det anbefales derfor, at der laves forsøg med dette, for at kunne vurdere om det reelt er scenarie 1 eller 2 der er bedst.

Der er i dette projekt taget udgangspunkt i destruktion af slam ved Fortum. Behandlingsprisen ved Fortum er høj (6.500 kr./ton), og der kan med fordel overvejes om der er alternativer. Fynsværket kan være et alternativ, da deres behandlingspris er lavere (forventeligt under 1.500 kr./ton). Før det kan besluttes, skal der være bedre klarhed over PFAS's skæbne i et affaldsforbrændingsanlæg og Fynsværket skal have det rette indføringsudstyr til slam på deres anlæg – da de ikke kan det på nuværende tidspunkt, og derfor ikke kan håndtere slam, uanset om det er med 30 eller 85% tørstof.

Et andet alternativ til forbrænding kan være et pyrolyseanlæg, ligesom der i dag er ved Sønder sø Renseanlæg, evt. placeres samme sted som PFAS-renselanlægget.

Der er i projektet ikke prissat anlægs- og driftsudgifter til et skumfraktioneringsanlæg, men erfaringsmæssigt vil anlægsudgifterne være meget højere (3-4 gange højere) end ved et flokkuleringsanlæg, mens driftsudgifterne vil være lavere (forventelig under 10 kr./m³ svarende til under 2,3 mio. kr. årligt for ONM, hvor der ved flokkulering er årlige driftsudgifter på forventeligt 9,4-11,7 mio. kr.). Da driftsudgifterne har størst indvirkning på de samlede anlægs- og driftsudgifter (TOTEX), vil et skumfraktioneringsanlæg være billigere end et flokkuleringsanlæg i en TOTEX-beregning - men som nævnt ovenover, så vil der også kunne opnås en bedre rensning med et flokkuleringsanlæg.

Efterpolering og opfyldelse af miljøkvalitetskravet

Rensning med skumfraktionering eller flokkulering kan reducere PFAS betydeligt (op til 90%), men det er ikke tilstrækkeligt til at opfylde miljøkvalitetskravet for PFOS (0,65 ng/l) og PFOA-ækv. (4,4 ng/l). Der er ingen forventning til at hverken skumfraktionering eller flokkulering alene kan opnå opfyldelse af miljøkvalitetskravene selvom der udvikles på teknologierne, udvikles ny hjælpestoffer til at øge rensningseffekten af skumfraktionering eller bedre polymerer til flokkulering. Det vil derfor på sigt være nødvendigt med yderligere efterpolering for at opfylde miljøkvalitetskravene.

Der er i dette projekt lavet test med efterpolering med resinrensning af flokkuleret perkolat, som viser over 99,7% reduktion af PFAS22 og over 84,5% PFOA-ækvivalentreduktion. Der er observeret en meget kort tid til gennembrud af PFAS igennem resinerne, da andre urenheder i perkolatet mætter resinerne. Grundet det hurtige gennembrug vil det være nødvendigt med et resinskifte med 5-9 dages mellemrum, hvilket alene vil give en forventet driftsudgift på mellem 18 og 36 mio. kr. årligt til udskift af resin. Det forventes, at investering i et sandfilter eller andet mekanisk forrensning forud for resinerne kan reducere disse driftsomkostninger markant.

Det anbefales, at der undersøges forrensning forud for resiner, brugen af andre PFAS-resintyper eller en anden type efterpolering som er mere egnet til perkolat fra ONM. Der kan blandt andet nævnes ozonering i kombination med skumfraktionering eller keramiske membraner i kombination med aktiv kul (PAC).

Ved vurdering af efterpoleringsteknologier bør der også overvejes, om der skal være direkte udledning af det rensede perkolat, og i så fald skal der også være fokus på tungmetaller, næringssalte og organisk stof. For at imødekomme de krav, skal der optimeres på den biologiske kvælstofreduktion, så en direkte udledning muliggøres.

Er resultaterne relevante for andre deponier / forsyninger

Nærværende resultater og konklusioner angående renseteknologier er relevante, især til nedlagte deponier og gamle deponier. Deponier med store mængder perkolat fra nyere type affald vil have en afvigende PFAS-fingerprint fra ONM's og der vil konklusionerne være mindre relevante. Dog kan det være at projektets resultater fra nogle af de enkelte etaper fx blande affald, er mere brugbare end resultaterne fra hele perkolatet.

Fremtidige skærpelse af PFAS og andre miljøkvalitetskrav til deponiernes perkolattilslutninger kan gøre det mere attraktivt at rense perkolatet til direkte udledning på deponiet. For mange mindre og mange nedlagte deponier vil det være interessant, at etablere et avanceret renseanlæg.

10. Referencer

(Fortum, 2005)

Revision af miljøgodkendelse – Forbrændingsanlæg FI, FIII og FIV af december 2005

(MST, 2024)

Rapport "Screening af restprodukter fra affaldsforbrænding for indhold og udvaskning af PFAS", miljøprojekt nr. 2256, januar 2024

(MST, 2023)

Rapport "Fastsættelse af kvalitetskriterier for vandmiljøet Per- og Polyfluoralkylstoffer (PFAS)", 23. november 2023

(MST, 2023b)

Rapport "Litteraturstudie om PFAS fra affaldsforbrænding", miljørapport nr. 2246, september 2023

(MST, 2023c)

Præsentation "Revision af tilslutningsvejledningen" af 15. september 2023 - <https://danskmiljoteknologi.dk/interessentmode-om-ny-tilslutningsvejledning-for-industrispildevand-til-rensningsanlaeg/>

(MST, 2006)

Miljøstyrelsens vejledning "Tilslutning af industrispildevand til offentlige spildevandsanlæg", nr. 2 af 2006

(Regionernes Videnscenter for Miljø og Ressourcer, 2022)

Regionernes Videnscenter for Miljø og Ressourcer. Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS-forbindelser, nr. 1 af 2022

(U.S. EPA, 2019)

Teknisk notat fra den amerikanske miljøstyrelse fra 2019:

Per- and polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Incineration to manage PFAS waste streams

Bilag 1

1.Resultater fra analysekampagne (PFAS28 og TOP PFAS22)

		1. analyserunde		
		Udløb ONM	Indløb ONVR	Udløb ONVR
		16-10-2023	16-10-2023	18-10-2023
PFBA (Perfluorbutansyre)	ng/l	490	72	17
PFBA (TOP)	ng/l	440	97	25
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	ng/l	4.300	580	140
PFBS (TOP)	ng/l	3.200	630	140
PFPeA (Perfluorpentansyre)	ng/l	470	65	17
PFPeA (TOP)	ng/l	400	81	19
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	ng/l	11	6	0,68
PFHxA (Perfluorhexansyre)	ng/l	620	86	23
PFHxA (TOP)	ng/l	520	94	24
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	ng/l	51	9,8	2
PFHxS (TOP)	ng/l	49	6,6	1,8
4:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<10	0,34	<0,30
4:2 FTS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpA (Perfluorheptansyre)	ng/l	190	32	7,3
PFHpA (TOP)	ng/l	150	31	7,1
HPFHpA (7H-perfluorheptansyre)	ng/l	30	4,5	0,9
HPFHpA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	ng/l	<10	0,41	<0,30
PFHpS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOA (Perfluoroktansyre)	ng/l	410	69	13
PFOA (TOP)	ng/l	420	67	14
P37DMOA (Perfluor-3,7-dimethyloktansyre)	ng/l	<1.000	<2,0	<2,0
P37DMOA (TOP)	ng/l	<10	<2,0	<2,0
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	ng/l	35	7,3	1,6
PFOS (TOP)	ng/l	46	7,5	1,6
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<10	9,8	<0,30
6:2 FTS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOSA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFNA (Perfluornonansyre)	ng/l	13	1,3	0,45
PFNA (TOP)	ng/l	11	2,1	0,38
PFNS (Perfluornonansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDA (Perfluordekansyre)	ng/l	<10	1	<0,30
PFDA (TOP)	ng/l	<10	0,99	<0,30
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
8:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<20	<0,30	<0,30
8:2 FTS (TOP)	ng/l	<20	<0,30	<0,30
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFUnDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFUnDS (Perfluorundekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDS (Perfluordodekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDA (Perfluortridekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFTeDA (Perfluortetradekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTeDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHxDA (Perfluorhexadekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHxDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	510	87	17
Sum af PFAS28	ng/l	6.600	940	220
Sum PFAS (TOP)	ng/l	5.200	1.000	230

		2. analyserunde		
		Udløb ONM	Indløb ONVR	Udløb ONVR
		22-11-2023	22-11-2023	23-11-2023
PFBA (Perfluorbutansyre)	ng/l	120	16	8,9
PFBA (TOP)	ng/l	220	32	17
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	ng/l	1.400	130	58
PFBS (TOP)	ng/l	1.300	130	55
PFPeA (Perfluorpentansyre)	ng/l	170	15	7,7
PFPeA (TOP)	ng/l	170	24	10
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	ng/l	<10	0,56	<0,30
PFHxA (Perfluorhexansyre)	ng/l	260	19	9,2
PFHxA (TOP)	ng/l	260	38	16
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	ng/l	20	2,6	1,1
PFHxS (TOP)	ng/l	22	2,1	1,3
4:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
4:2 FTS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpA (Perfluorheptansyre)	ng/l	100	8	4,3
PFHpA (TOP)	ng/l	85	13	5,8
HPFHpA (7H-perfluorheptansyre)	ng/l	<10	0,95	0,31
HPFHpA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOA (Perfluoroktansyre)	ng/l	240	19	9,8
PFOA (TOP)	ng/l	230	31	14
P37DMOA (Perfluor-3,7-dimethyloktansyre)	ng/l	<1.000	<2,0	<2,0
P37DMOA (TOP)	ng/l	<1.000	<2,0	<2,0
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	ng/l	61	3,9	3
PFOS (TOP)	ng/l	43	4,2	3
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	26	1,7	<0,30
6:2 FTS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFOSA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFNA (Perfluornonansyre)	ng/l	12	0,57	0,56
PFNA (TOP)	ng/l	<10	1,3	0,51
PFNS (Perfluornonansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDA (Perfluordekansyre)	ng/l	<10	0,36	<0,30
PFDA (TOP)	ng/l	<10	1,6	0,32
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDS (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
8:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<20	<0,30	<0,30
8:2 FTS (TOP)	ng/l	<20	<0,30	<0,30
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFUnDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFUnDS (Perfluorundekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (TOP)	ng/l	<10	0,4	<0,30
PFDoDS (Perfluordodekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDA (Perfluortridekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFTeDA (Perfluortetradekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTeDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHxDA (Perfluorhexadekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHxDA (TOP)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	330	26	14
Sum af PFAS28	ng/l	2.400	220	100
Sum af 22 PFAS (beregnet af Rambøll)	ng/l	2.400	220	100
Sum PFAS22 (TOP)	ng/l	2.300	280	120

		3. analyserunde		
		Udløb ONM	Indløb ONVR	Udløb ONVR
		22-01-2024	22-01-2024	23-01-2024
PFBA (Perfluorbutansyre)	ng/l	230	6,4	13
PFBA (TOP)	ng/l	150	14	21
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	ng/l	1.700	40	79
PFBS (TOP)	ng/l	1.400	40	82
PFPeA (Perfluorpentansyre)	ng/l	250	5,2	11
PFPeA (TOP)	ng/l	390	9,9	14
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	0,43
PFHxA (Perfluorhexansyre)	ng/l	320	9,1	17
PFHxA (TOP)	ng/l	470	9,8	17
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	ng/l	30	0,96	1,5
PFHxS (TOP)	ng/l	<100	0,86	1,6
4:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
4:2 FTS (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFHpA (Perfluorheptansyre)	ng/l	140	2,8	6,2
PFHpA (TOP)	ng/l	140	5	6,3
HPFHpA (7H-perfluorheptansyre)	ng/l	12	0,43	0,53
HPFHpA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHpS (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFOA (Perfluoroktansyre)	ng/l	650	10	16
PFOA (TOP)	ng/l	510	11	17
P37DMOA (Perfluor-3,7-dimethyloktansyre)	ng/l	<1.000	<2,0	<2,0
P37DMOA (TOP)	ng/l	<10.000	<2,0	<2,0
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	ng/l	200	2,1	3,7
PFOS (TOP)	ng/l	190	2,4	3,8
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	84	1,2	0,97
6:2 FTS (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	0,38	<0,30
PFOSA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFNA (Perfluornonansyre)	ng/l	28	0,6	0,96
PFNA (TOP)	ng/l	<100	0,85	0,76
PFNS (Perfluornonansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDA (Perfluordekansyre)	ng/l	27	0,59	0,43
PFDA (TOP)	ng/l	<100	0,6	<0,30
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDS (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
8:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<20	<0,30	<0,30
8:2 FTS (TOP)	ng/l	<200	<0,30	<0,30
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFUnDA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFUnDS (Perfluorundekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFDoDA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFDoDS (Perfluordodekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDA (Perfluortridekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFTeDA (Perfluortetradekansyre)	ng/l	<10	<1,0	<1,0
PFTeDA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
PFHxDA (Perfluorhexadekansyre)	ng/l	<10	<0,30	<0,30
PFHxDA (TOP)	ng/l	<100	<0,30	<0,30
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	910	14	22
Sum af PFAS28	ng/l	3.700	80	150
Sum af 22 PFAS (beregnet af Rambøll)	ng/l	3.700	79	150
Sum PFAS22 (TOP)	ng/l	3.300	94	160

Bilag 2

2.Envytech Solution AB – SAFF® bench-scale laboratorieforsøg

Laboratory Bench-Scale Treatability/Feasibility Report



SAFF® Removal Efficiency of PFAS from 4 x 100L water

Report Date: 2023-11-13

Prepared by: Robin Axelson, Envytech Solutions AB

Prepared for: Sylvie Braekevelt, Ramboll

Summary

Envytech Solutions AB have conduct a bench-scale treatability/feasibility trial to evaluate removal of target PFAS compounds from 4 x 100 L of effluent, supplied by Ramboll Denmark. The water originates from a landfill and represent different streams of leachate. The waters are labelled by client as *D3B*, *D1C-PB-01*, *D7A-PB-03* and *Indlobstank*. The four trials have been carried out in a bench scale SAFF system supplied by EPOC Enviro.

The treatability/feasibility trial involved sampling of untreated water as well as sampling of water after treatment in the bench scale SAFF. As the treatability study focus on removal rates, a secondary treatment to concentrate the waste was not performed.

Water both pre and post treatment with SAFF bench scale unit were sent to Eurofins Sweden for accredited analysing using the PFAS 21 and PFAS 28 package. The samples were analysed by both Eurofins Sweden and Denmark.

Results from this trial demonstrate the effectiveness of SAFF treatment in efficiently removing long-chain PFAS molecules from the tested effluent water.

Table of Content

1.0	Introduction	4
1.1	Expected results	5
2.0	Bench scale testing	6
3.0	Limitations	7
3.1	Reported faults during trial	7
4.0	Task Responsibilities & Methodology	8
4.1	Task Responsibilities	8
5.0	Ongoing research and development of additives for enhanced PFAS removal	10
6.0	Results	11
7.0	Discussion	18
8.0	Conclusion	19

1.0 Introduction

Envytech Solutions AB offers, as exclusive European distributor for EPOC Enviro, the SAFF – Surface Active Foam Fractionation – treatment method. A robust, sustainable, water treatment solution for PFAS contaminated waters. SAFF does not use any filter materials or consumables, only air and electricity, and is completely unaffected by other pollutants such as metals or organic substances, particles, pH, nutrients, or other water chemistry.

The SAFF process utilizes the physio-chemical properties of PFAS compounds to attach to fine air bubbles because of its hydrophobic and hydrophilic properties. When accurately controlled bubbles are introduced and allowed to rise in a narrow column of water, the bubbles become exceptionally effective in collecting PFAS compounds that are loosely bound to the water molecules. Once at the surface, PFAS can easily be removed by separation and concentration through a passive “spill over weir” system, and an active vacuum system. Treated (aerated) water can then be released to the recipient. The collected PFAS concentrate is passed on to further fractionation steps to become a high concentration liquid of relatively small volume suitable for destruction via permanent destruction techniques such as high temperature thermal combustion, Super Critical Water Oxidation (SCWO) or Electrochemical Oxidation (EO).

The system has significant advantages compared to all other technologies on the market as the process is very robust. SAFF works without reduced effect, regardless of if the water contains large amounts of suspended solids and contaminants of various kinds, including oil and biological substances. The system is not sensitive to high concentrations and is not pH sensitive. The system is not in need of any pre-treatment systems, but to minimize service work, water comprising larger suspended particles can advantageously pass via some form of separation e.g., a lamella separator.

The SAFF system works by accumulating the PFAS compounds at the top of the first treatment column where the first fractionation step takes place. When air is injected at the bottom of the column and rises in a created vortex, the PFASs attach to the bubbles and flow with them to the surface. Foam and water flow over a “weir design” at the top of the column (see figure 1) and therefore called “the wet cut”, as both the created foam and the underlying water are removed. This underlying water is removed as PFAS stratifies at the top of the column as the shorter chain PFAS do not have the same foam potential as the longer chains.



Figure 1 Photo taken during the execution of the first fractionation step in a full-scale plant. We see how in the first step you let foam “flow” over the edge of the centred inner tube in the column. You can also see the foam that accumulates during the separation and the top water where the less foam prone PFAS substances accumulate.

Before the end of the first fractionation step, the water level in the column is raised, forcing the water in the top of the column to be collected, so that as much of the stratified PFAS substances as possible are included in step two. The first fractionation step increases the PFAS concentrations by about 10-fold.

In the second fractionation step, the same process takes place as in step 1, but as concentrations of PFAS are now around 10 times higher, a drier foam is obtained which is removed with vacuum. The vessel where the second

fractionation step is performed is equipped with carefully calibrated sensors that control a vacuum pump and its distance to actual process foam levels. The hyper concentrate generated by this process is led to a collection container where it is stored pending step 3. In this second fractionation step, the concentration is further increased by up to 1,500 times, which means that the total concentration increase is now around 10,000 times initial levels.



Figure 2 Photo taken during the second fractionation step in a full-scale plant. The dry foam can be seen being removed by vacuum.

In the third fractionation step, which is performed in the same way as step 2, further concentration increases are obtained. The total increase in concentration obtained over the three steps is between 50,000 – 2,000,000 times initial concentrations in the untreated water. The hyper concentrate waste volumes are therefore this same factor less than the processed feed water volume. Expected amounts of waste depend on the type of water that is treated, but from projects carried out we see that the expected amount of waste for landfill leachate are less than 1m³ per 40,000m³ of treated water, and for groundwater about 10 litres per 40,000m³ of treated water.

The table (below) summarizes the concentration increases at each stage:

First stage:	10 x initial concentration
Second stage:	1 500 x initial concentration
Third stage:	50–200 x initial concentration
Possible total concentration:	50 000–2 000 000 x initial concentration

1.1 Expected results

To date (November 2023), over 30 full-scale projects comprising PFAS have been carried out, treating over 1 500 000 m³ of PFAS contaminated water. All projects have been carried out without pre-treatment systems or filter materials. Treatment results using SAFF are similar regardless of which water is put through the system.

Table 1 Table summarizing SAFF treatability of groundwater for PFAS substances included in the Swedish SLV Total PFAS-11. The table shows the maximum reduction obtained for each substance.

Substance (ng/l)	Carbon chain length	Removal % Max
PFDA (Perflourdekansyra)	C10	100%
PFNA (Perflournonansyra)	C9	100%
6:2 FTS (Flourtelomer sulfonat)	C8	100%
PFOA (Perflouroktansyra)	C8	100%
PFOS (Perflouroktansulfonsyra)	C8	100%
PFHpA (Perflourheptansyra)	C7	67%
PFHxS (Perflourhexansulfonsyra)	C6	97%
PFHxA (Perflourhexansyra)	C6	20%
PFPeA (Perflourpentansyra)	C5	24%
PFBA (Perflourbutansyra)	C4	21%
PFBS (Perflourbutansulfonsyra)	C4	22%

The capacity of a 40-foot SAFF40, with the possibility of three fractionation steps and internal storage of hyper concentrate, depends on the type of water you want to and treat and PFAS concentration blend. This is because different PFAS require different cycle times, and the water's potential to foam determines how much energy the pumps need to provide. From experience we see that a SAFF40 can treat leachate with a capacity of 20-30m³/h subject to the water's tendency to foam. From experience with groundwater, it is possible to treat up to 35m³/h with the same equipment and a focus only on PFAS substances with 6 carbon atoms or more (<C6). When treatment of shorter chain substances is required, longer batch treatment times may be needed, which results in reduced flow capacity. Envytech also offers SAFF20 systems with a maximum capacity of 8-15 m³/h depending on the water.

2.0 Bench scale testing

To evaluate the SAFF treatment capability and efficiency for different, specific waters, we offer the possibility to perform benchtop trials, mimicking the SAFF full scale treatment process.



Figure 3 Picture showing the mini-SAFF bench scale unit, Primary, Secondary, and tertiary vessel and tanks.

The desktop bench scale SAFF apparatus has been shown by both Envytech and EPOC Enviro scientists to produce comparable PFAS removal rates to EPOC Enviros developed and patented full-scale mobile SAFF systems. However, after performing treatment several waters in both full scale and bench top unit, we see that the bench scale unit is less effective with a few percentages, and we believe the reason to be the manual handling that comes with the bench top. In the full-scale treatment units, all processes are automated and controlled via an HMI, providing fine tuning possibilities for water levels, hertz settings for every pump including venturi pumps, and treatment time intervals.

This report outlines the results achieved by the bench scale SAFF unit on water from three different effluent waters from the Fortum's waste facility in Kumla. For laboratory reports, See appendix 3.

3.0 Limitations

PFAS are known to include some of the hardest substances to perform mass balance calculations for. This due to several reasons, where one is the PFAS molecule structure – PFAS are in the form called supra molecules, and another being the many unknown substances including the PFAS molecules, so called precursors.

Substances with supra molecular structures differs from other substances in the way the spread and attach to surfaces. Instead of adsorbing to surfaces, the supra molecule collapses when it hits a surface, and creates crystal layers, instead of micelles, like for example petroleum products. As the molecules keep collapsing, millions of layers – or more - of PFAS crystals are formed. This being the reason why washing a PFAS contaminated surface, which has been in contact with PFAS for a long time, is impossible without applying specially designed liquids, and letting them dissolve the PFAS crystals during enough time for the solution to reach the inner layers.

Precursors are a collective name for substances / molecules that incorporates PFAS molecules, as well as other molecules. All precursor shares the potential, that when exposed to oxidizing environments, bacterial breakdown or other external processes causing molecule breakdown, the PFAS molecule, not being prone to degradation, becomes a standalone substance, visible when analysing for PFAS. Something that is not possible, when the PFAS is covered/disguised in other molecule structures. This can lead to misleading information about the actual PFAS amounts in a sample, as only the “alone” or “bare” PFAS molecules are detected with a PFAS analysis. The reason being that when analysing a sample with for ex a PFAS28 analysis package, the concentration of PFAS detected by the analysis only contains the chosen 28 PFAS substances, and not the PFAS hidden in precursor substances/molecules. When treating a sample with a treatment technology like SAFF, where the water sample is oxidized, many precursors will degrade, losing the molecules ones attached to the PFAS molecule, and as the sample is taken for the treated sample, additional amounts of PFAS will now be able to be seen, that was not included in the total concentration earlier, hence making it seem like none or very little of some / several PFAS species have been removed. When in reality, up to all amounts of some or several initial PFAS concentrations can have been removed, but as new amounts now are made visible – the treatment is shown not to perform.

The solution to this, has been shown to include the performance of a so called TOPA – Total Oxidizable Precursor Analysis. This is a special way of analysing for PFAS, where a sample, prior to PFAS analysing, is heavily oxidized, forcing all but the non-degradable PFAS to break down, bringing out all the “bare” PFAS molecules, making them visible to the following PFAS analysing. By performing a TOP analysis on a sample both prior to and after treatment, a much truer picture of actual PFAS concentration and the removal efficiency of a treatment can be presented.

The analysing cost for these types of analysis are often quite expensive, but they also have limited effect in complex medias like cross contaminated or highly contaminated soils and waters, for ex. leachates and water from firefighting activities. In these types of waters, a TOPA can give you some information, but we have found that many analyses in these types of samples don’t add any information, showing lower TOPA concentrations then when performing a standard PFAS analysis. These samples are referred to by the labs as “black box samples”, with no possibility of retrieving more accurate PFAS total mass concentrations.

For waters that we have treated with SAFF, we see the oxidizing process in complex waters often leading to increasing levels of PFBA, PFOA, PFPeA and PFHxA, even though this off course varies. In a full-scale unit, we have the possibility of combating this problem by trialling different treatment times in combination with different frequencies on the pumps. We see this especially for PFHxA, a PFAS substance that often is seen to prevail after a SAFF treatment, but when applying extended treatment times, we see levels decrease. As we have performed TOPAs, on waters where possible, we have had the increase of amount of PFHxA as well as the other PFAS mentioned proven, but as we often work in complex or highly contaminated waters, using a TOPA isn’t always possible, as the analyses for TOP can’t be done correctly in complex waters.

3.1 Reported faults during trial

The preformed trial yielded no unexpected faults of the equipment.

4.0 Task Responsibilities & Methodology

4.1 Task Responsibilities

Ramboll has supplied 100 L of water from four different side streams that they want to have evaluated in a bench-scale trial using the technology of surface-active foam fractionation. The waters were expected to exhibit a high foaming character and contain a mixed chemistry of co-contaminants. PFAS concentrations in the waters had not been shared prior to the trial.

Envytech responsibilities involved the following:

- i. Conduct treatability test on supplied effluent water 4 x 100-liter samples, from different side streams of leachate. Primary treatment step only to be performed.
- ii. Sampling and sample handling, packaging, and sending samples for accredited PFAS28 Analysis.
- iii. Producing a treatability report from conducted tests with photos and films.
- iv. Methodology

The tests were carried out from 2023-09-12 to 2023-09-14 by Envytech staff Robin Axelson, Project Manager and PFAS treatability expert with extensive experience of both treatability studies such as the one performed, as well as project managing and operation of full-scale SAFF systems.

Water was transferred from the plastic containers supplied by the client using a pump fitted with an unused silicon hose certified to contain no PFAS, into the bench scale SAFF unit. The SAFF vessel was filled to about 90% of the full volume, as shown in figure 4 below.



Figure 4 Photo of the bench scale SAFF filled to approx. 90% with untreated groundwater supplied by the client.

The treatment was carried out by letting the venturitis and micro bubble generating pumps work for 30 minutes. This is a treatment time that we use as standard performing bench scale trials, as we have achieved expected results with the treatment time for many different waters. We could perform several tests using shorter treatment times to see if greater flow capacity can be achieved than the one given at a treatment time of 30 minutes, but as this trial stage is mainly for the purpose of trialling the SAFF methods possible efficiency for a specific water, this is how the test is designed. For more site-specific capacity data, a full-scale trial / pilot is recommended.

As the pumps are turned on, bubbles start to rise through the column, expanding the water volume with the volume of the bubbles. As the bubble's travels to the surface, surface active PFAS molecules attach to the surface of the bubbles, bringing them up to the surface, and up into the SAFF cone where the foam is separated from the water by spilling over the weir of the pipe. removing the PFAS, see figure 5 below.



Figure 5 Separation of foam, spilling over the cone.

After 25 minutes of bubbling, the “push step” was initiated. This is performed by pumping air into an air balloon at the bottom of the treatment vessel. As the balloon is filled with air, increasing in volume, the water level in the vessel rises, forcing the foam situated at the top of the water level, as well as the water right underneath, to spill over the weir at the top of the funnel. By doing this, we achieve complete removal of the foam as well as the “top section” water. This technique is performed, as short chain PFAS are collected in the upper water body due to them being less surface active and therefore less eager to stick to the bubbles generated, and not naturally following the foam up over the weir. This is also made to further remove the foam left on the water surface to achieve better removal rates.

The foam and top water that has spilled over the weir separating them from the water body is collected in a separate vessel. After a treatment time of 25 min + 5 min top up phase, the total treatment time of 30 min is achieved, and the pumps are shut off and the water is left still in the primary vessel. The water is then sampled through appointed sample ports into by Eurofins supplied PFAS waster sampling bottles.

5.0 Ongoing research and development of additives for enhanced PFAS removal

SAFF - Surface active foam fractionation removes PFAS by using the physiochemistry of the surface of bubbles, and the surface-active nature of the PFAS molecules. It has been proven that the ability of PFAS molecules to be removed by foam fractionation is depending on the specific adsorption coefficient of each PFAS. Long chained PFAS has been shown to have greater surface activeness then shorter chain PFAS, which can be seen by the removal rates for long versus short chain PFAS in the trials that has been performed and reported in this report, as well as for all full-scale projects that has been carried out using SAFF.

Table 2 Predictive removal efficiency using the SAFF technology on different waters.

PFAS substance	Predicted removal rate Ground water	Predicted removal rate Leachate	Predictive removal rate Surface runoff
PFDA (Perfluordekansyra)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
PFNA (Perfluornonansyra)	>99,9%	>99,9%	82-99%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
PFOA (Perfluoroktansyra)	>99,9%	>99,9%	95-99%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	>99,9%	>99,9%	>99,9%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	>99,9%	>99,9%	80-99%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	70%	>99,9%	90-99%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	30-60%	30-60%	30-60%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	0-25%	0-25%	0-25%
PFBA (Perfluorbutansyra)	0-20%	0-20%	0-20%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	0-20%	0-40%	0-20%

6.0 Results

Desktop Predictability Analysis

A desktop predictability analysis has been put together by Envytech from data achieved at full scale SAFF treatment results achieved in projects in both Sweden, US, and Australia. Table 2 summarises the treatment results made up of various feedwater sources. As most results are from our Swedish projects, PFAS analysis are presented as the sum of the Swedish PFAS 11, including 11 targeted PFAS substances. The table is used to compare achieved data for specific waters with other waters to offer an expected level of treatment efficiency to clients, and to be used as a comparison to site specific results.


Treatability/Feasibility Treatment Results.

D3B

Results for untreated and treated effluent obtained from Eurofins are presented in Table 3 and 4.


Analytical testing targeted 28 PFAS compounds of which seventeen (17) detectable compounds were found to be present in the supplied feedwater test sample. Aeration time was set at 30 minutes.

Table 3 Summary of concentrations analysed by Eurofins Sweden in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates. Expected removal rates in full scale SAFF are showing results from full scale treatment projects for similar waters.

Report ID		177-2023-09120719	177-2023-09120720	Removal % Bench scale test	Expected Removal % using Full scale SAFF
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF		
Sample point		D3B Untreated	D3B Treated		
Site					
Date					
Compund	Unit				
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	1,6	<0,30	Up to 100%	>99,9%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	3,8	<0,30	Up to 100%	>99,9%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<1,0	<1,0	ND	>99,9%
PFNA (Perfluoronansyra)	ng/l	5,5	<0,30	Up to 100%	>99,9%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	26	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	320	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	77	<0,20	Up to 100%	>99,9%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	5,3	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	1,3	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	20	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	100	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	260	69	73%	30-60%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	94	54	43%	0-25%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	120	120	0%	0-20%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	47	27	43%	0-20%
Summa PFAS 4	ng/l	420	ND	Up to 100%	>99,9%
Summa PFAS 28	ng/l	1100	270	75%	

*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

Table 4 Summary of concentrations analysed by Eurofins Denmark in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates.

Report ID		835-2023-08280101	835-2023-08280102	Removal % Bench scale test
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF	
Sample point		D3B Untreated	D3B Treated	
Site				
Date				
Compound	Unit			
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	1,4	<0,30	Up to 100%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	2,8	<0,30	Up to 100%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	1,4	0,36	ND
PFNA (Perfluornonansyra)	ng/l	4,4	<0,30	Up to 100%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	37	<0,30	Up to 100%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	270	<0,30	Up to 100%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	64	<0,20	Up to 100%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	4,4	<0,30	Up to 100%
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	1,5	<0,30	Up to 100%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	33	<0,30	Up to 100%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	91	<0,30	Up to 100%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	230	80	65%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	77	80	-4%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	120	100	17%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	60	35	42%
Summa af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	370	ND	Up to 100%
Summa PFAS21	ng/l	1000	300	70%


*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

D1C-PB-01

Results for untreated and treated effluent obtained from Eurofins are presented in Table 5 and 6.


Analytical testing targeted 28 PFAS compounds of which nine (9) detectable compounds were found to be present in the supplied feedwater test sample. Aeration time was set at 30 minutes.

Table 5 Summary of concentrations analysed by Eurofins Sweden in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates. Expected removal rates in full scale SAFF are showing results from full scale treatment projects for similar waters.

Report ID		177-2023-09120722	177-2023-09120723	Removal % Bench scale test	Expected Removal % using Full scale SAFF
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF		
Sample point		D1C-PB-01 Untreated	D1C-PB-01 Treated		
Site					
Date					
Compund	Unit				
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<0,30	ND	>99,9%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<0,30	ND	>99,9%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<1,0	ND	>99,9%
PFNA (Perfluornonansyra)	ng/l	<10	<0,30	ND	>99,9%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	75	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	460	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	<10	<0,20	ND	>99,9%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<0,30	ND	>99,9%
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<0,30	ND	>99,9%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	130	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	300	<0,30	Up to 100%	>99,9%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	900	360	60%	30-60%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	500	440	12%	0-25%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	450	440	2%	0-20%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	1200	820	32%	0-20%
Summa PFAS 4	ng/l	590	ND	Up to 100%	>99,9%
Summa PFAS 28	ng/l	4000	2100	48%	

*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

Table 6 Summary of concentrations analysed by Eurofins Denmark in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates.

Report ID		835-2023-08287101	835-2023-08287102	Removal % Bench scale test
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF	
Sample point		D1C-PB-01 Untreated	D1C-PB-01 Treated	
Site				
Date				
Compund	Unit			
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<0,30	ND
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<0,30	ND
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<10	ND
PFNA (Perfluornonansyra)	ng/l	<10	<0,30	ND
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	92	<0,30	Up to 100%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	610	0,35	Up to 100%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	18	<0,20	ND
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<0,30	ND
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<0,30	ND
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	150	<0,30	Up to 100%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	340	<0,30	Up to 100%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	940	360	62%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	530	440	17%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	480	430	10%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	1200	850	29%
Summa af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	780	0,35	Up to 100%
Summa PFAS21	ng/l	4400	2100	52%


*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

D7A-PB-03

Results for untreated and treated effluent obtained from Eurofins are presented in Table 7 and 8.


Analytical testing targeted 28 PFAS compounds of which twelve (12) detectable compounds were found to be present in the supplied feedwater test sample. Aeration time was set at 30 minutes.

Table 7 Summary of concentrations analysed by Eurofins in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates. Expected removal rates in full scale SAFF are showing results from full scale treatment projects for similar waters.

Report ID		177-2023-09120725	177-2023-09120726	Removal % Bench scale test	Expected Removal % using Full scale SAFF
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF		
		D7A-PB-03 Untreated	D7A-PB-03 Treated		
Sample point					
Site					
Date					
Compound	Unit				
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<20	Up to 100%	>99,9%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
PFNA (Perfluoronansyra)	ng/l	16	<10	ND	>99,9%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	140	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	1700	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	66	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	150	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	640	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	2300	990	57%	30-60%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	2300	1800	22%	0-25%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	2900	3000	-3%	0-20%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	51000	35000	31%	0-20%
Summa PFAS 4	ng/l	1900	ND	Up to 100%	>99,9%
Summa PFAS 28	ng/l	64000	41000	36%	

*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

Table 8 Summary of concentrations analysed by Eurofins Denmark in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates.

Report ID		835-2023-08279201	835-2023-08279202	Removal % Bench scale test
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF	
Sample point		D7A-PB-03 Untreated	D7A-PB-03 Treated	
Site				
Date				
Compund	Unit			
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<10	ND
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<20	Up to 100%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<10	ND
PFNA (Perfluornonansyra)	ng/l	14	<10	Up to 100%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	120	<10	Up to 100%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	1400	<10	Up to 100%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	62	<10	Up to 100%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<10	ND
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<10	ND
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	130	<10	Up to 100%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	650	<10	Up to 100%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	2300	980	57%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	2300	1700	26%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	2900	2600	10%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	51000	32000	37%
Summa af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	1600	ND	Up to 100%
Summa PFAS21	ng/l	61000	37000	39%


*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

Indløbstank

Results for untreated and treated effluent obtained from Eurofins are presented in Table 9 and 10.


Analytical testing targeted 28 PFAS compounds of which ten (10) detectable compounds were found to be present in the supplied feedwater test sample. Aeration time was set at 30 minutes.

Table 9 Summary of concentrations analysed by Eurofins in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates. Expected removal rates in full scale SAFF are showing results from full scale treatment projects for similar waters.

Report ID		177-2023-09120728	177-2023-09120729		
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF		
Sample point		Indløbstank Untreated	Indløbstank Treated	Removal % Bench scale test	Expected Removal % using Full scale SAFF
Site					
Date					
Compound	Unit				
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<20	ND	>99,9%
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
PFNA (Perfluoronansyra)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	73	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	310	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	69	<10	Up to 100%	>99,9%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<10	ND	>99,9%
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	54	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	140	<10	Up to 100%	>99,9%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	440	200	55%	30-60%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	330	330	0%	0-25%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	320	350	-9%	0-20%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	2800	1900	32%	0-20%
Summa PFAS 4	ng/l	430	ND	Up to 100%	>99,9%
Summa PFAS 28	ng/l	4600	2800	39%	

*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

Table 10 Summary of concentrations analysed by Eurofins Denmark in the untreated sample and the treated sample. Removal rates in performed test are calculated to show treatment efficiency rates.

Report ID		835-2023-08284001	835-2023-08284002	Removal % Bench scale test
Name		Mini-SAFF	Mini-SAFF	
Sample point		Indløbstank Unreated	Indløbstank Treated	
Site				
Date				
Compund	Unit			
PFDA (Perfluordekansyra)	ng/l	<10	<10	ND
8:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<20	<20	ND
4:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	<10	<10	ND
PFNA (Perfluornonansyra)	ng/l	<10	<10	ND
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	ng/l	74	<10	Up to 100%
PFOA (Perfluoroktansyra)	ng/l	320	<10	Up to 100%
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	ng/l	64	<10	Up to 100%
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	<10	<10	ND
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyra)	ng/l	<10	<10	ND
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	ng/l	47	<10	Up to 100%
PFHpA (Perfluorheptansyra)	ng/l	150	<10	Up to 100%
PFHxA (Perfluorhexansyra)	ng/l	470	170	64%
PFPeA (Perfluorpentansyra)	ng/l	330	370	-12%
PFBA (Perfluorbutansyra)	ng/l	350	380	-9%
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	ng/l	2800	1900	32%
Summa af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	430	ND	Up to 100%
Summa PFAS21	ng/l	4600	2800	39%

*ND Non-Detect – levels are recorded below detection levels

7.0 Discussion

The bench-scale SAFF primary fractionation apparatus was used to reduce PFAS concentrations, ranging from approximately 1100 to 64000 ng/L, in water sourced from four different effluent streams provided by Ramboll. All four water samples contained a mixture of both long and short-chained PFAS. The overall observation indicated a significant presence of suspended material, TOC/DOC, and a diverse range of co-contaminants in the waters. Moreover, all samples exhibited a high capacity to foam when aerated (adding bubbles).

The water labelled *D3B* exhibited concentrations of various PFAS compounds with a total of (sum PFAS 28) 1100 ng/l and a total of 1000 ng/l (sum PFAS 21), and PFOA, PFHxA, PFBA and PFHpA being the predominant ones.

The water labelled *D1C-PB-01* exhibited concentrations of various PFAS compounds with a total of (sum PFAS 28) 4000 ng/l and a total of 4400 ng/l (sum PFAS 21), and PFBS, PFHxA, PFPeA, PFOA and PFBA being the predominant ones.

The water labelled *D7A-PB-03* exhibited concentrations of various PFAS compounds with a total of (sum PFAS 28) 64000 ng/l and a total of 61000 ng/l (sum PFAS 21), and PFBS, PFBA, PFPeA, PFHxA and PFOA being the predominant ones.

The water labelled *Inlobstank* exhibited concentrations of various PFAS compounds with a total of (sum PFAS 28 and sum PFAS 21) 4600 ng/l, and PFBS, PFHxA, PFBA, PFPeA, and PFOA being the predominant ones.

All the experiments successfully removed >99,9% of the long-chain PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS and PFHpA).

These results align with our overall experience and predictive results from previous bench-scale SAFF tests. In a full-scale SAFF unit, the results are expected to align with the data presented here, with a removal rate of >99,9% of long-chained PFAS.

For PFAS, such as PFHxA, PFPeA, PFBS, and PFBA, low to no removal efficiencies were expected. However, removal efficiencies have been observed, even in the case of complex water. This observation may indicate that either the composition of the water affects the adsorption coefficient for these PFAS, or that only a limited number of precursors breaking down into these PFAS are present.

A removal rate of 55% to 70% was achieved for PFHxA, suggesting that this specific PFAS molecule exhibits a higher tendency to become surface-active in these particular water conditions. Significant removal rates have also been observed for PFBS, this includes all samples, ranging from 31% to 43%. Regarding PFPeA a removal efficiency of 12% to 43% was observed for all samples, except sample *Inlobstank* where no removal was achieved.

In contrast, PFPeA and PFBA show little to no expected removal rates. For some waters we noticed an increase in concentration for PFPeA and PFBS in the treated water compared to the concentrations in the untreated sample. This may be a measuring fault at lab, or the fact that these PFAS is believed to be made visible by biological degradation happening as we oxidise the water in the same way nature does, breaking the precursor compounds and revealing the hidden PFAS molecules. In this water, a larger number of precursors are believed to be present. The process for precursor that biodegrade in the SAFF process is described in section 3.0 “*Limitations*” in detail.

8.0 Conclusion

The performed bench scale treatment tests using the mini-SAFF apparatus show treatment efficiencies with SAFF as expected. Both when compared to previous performed bench scale tests, as well as full-scale SAFF projects. We are therefore confident, that a full-scale treatment with SAFF for the supplied waters will be successful. Most probably, even higher treatment efficiencies will be achieved in full-scale, as the full-scale units have been proven to be more efficient due to the automated processes as well as fine tuning of pump frequencies and treatment times can be applied.

Bilag 3

3.Enspired Solution - PRD-laboratorieforsøg



ENSPIRED
SOLUTIONS™

FINAL REPORT

Photoactivated Reductive Defluorination PFAS Destruction in
Landfill Leachate Concentrated by SAFF

PREPARED BY

Prepared by Dr. Trisha Dubie, Dr. Meng Wang, Dr. Suzanne Witt

Enspired Solutions

3610 Forest Rd

Lansing, MI 48910

June 12, 2024

ACRONYMS

Acronym	Definition
4:2FTSA	1H,1H, 2H, 2H-Perfluorohexane sulfonic acid
6:2FTSA	1H,1H, 2H, 2H-Perfluorooctane sulfonic acid
8:2FTSA	1H,1H, 2H, 2H-Perfluorodecane sulfonic acid
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonane-1-sulfonic acid
11Cl-PF3OUdS	11-Chloroeicosafluoro-3-oxaundecane-1-sulfonic acid
ADONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid
CAPEX	Capital expenditure
eDonor	Electron donor
EEO	Electrical energy per order
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
FOSA	Perfluorooctanesulfonamide
h	hour
HFPO-DA	Hexafluoropropylene oxide dimer acid
ISE	Ion-selective electrode
<i>k</i>	PRD rate constant
kW	Kilowatt
kWh	kilowatt-hour
L	Liters
LPD	Liters per day
LC-MS/MS	Liquid chromatography with tandem mass spectrometry
m ³	Cubic meters
MCL	Maximum contaminant limit
mg/L	Milligrams per liter
mL	Milliliter
N/A	Not applicable
NEtFOSAA	N-ethyl perfluorooctanesulfonamidoacetic acid
ng/L	Nanograms per liter
nm	Nanometers
NMeFOSAA	N-methyl perfluorooctanesulfonamidoacetic acid
OPEX	Operating expenditure
PFAS	Per and polyfluoroalkyl substances
PFBA	Perfluorobutanoic acid
PFBS	Perfluorobutanesulfonic acid
PFCA	Perfluorocarboxylic acid
PFDA	Perfluorodecanoic acid
PFDoDA	Perfluorododecanoic acid
PFDS	Perfluorodecanesulfonic acid
PFHpA	Perfluoroheptanoic acid
PFHpS	Perfluoroheptanesulfonic acid
PFHxA	Perfluorohexanoic acid
PFHxS	Perfluorohexanesulfonic acid
PFNA	Perfluorononanoic acid
PFNS	Perfluorononanesulfonic acid

PFOA	Perfluorooctanoic acid
PFOS	Perfluorooctanesulfonic acid
PFPeA	Perfluoropentanoic acid
PFPeS	Perfluoropentansulfonic acid
PFTeDA	Perfluorotetradecanoic acid
PFTrDA	Perfluorotridecanoic acid
PFUnDA	Perfluoroundecanoic acid
ppb	parts-per-billion
ppm	parts-per-million
ppt	parts-per-trillion
PRD	Photoactivated reductive defluorination
RL	Reporting limit
SAFF	Surface active foam fractionation
TDS	Total dissolved solids
U	Non-detect
UV	Ultraviolet
µg/L	Micrograms per liter
µS/cm	Microsiemens per centimeter
V	Volume

Table of Contents

Figures.....	i
Tables.....	i
Appendices.....	i
1 Introduction.....	1
1.1 Background	1
1.2 Objectives of the Demonstration.....	1
2 Technology	1
3 Destructive Test Procedure.....	2
3.1 Design and Layout of Technology Components.....	2
3.2 Sampling Methods.....	2
4 Results.....	3
4.1 PFAS destruction efficiencies	3
4.2 Other Sample Analyses	5
4.3 Potential Byproduct Formation	6
4.4 Energy Consumption and Treatment Cost Projections	7
4.4.1 Energy Consumption	7
4.4.2 Treatment Cost Projections.....	8
5 Commercial Readiness of PFASigator	10
6 References.....	11

FIGURES

Figure 2-1. Mechanism schematic.	1
Figure 3-1. Benchtop test reactor set up for small scale treatability studies.....	2
Figure 4-1. Concentrations of PFAS compounds at each UV dose. Hollow bars represent non-detected values, with the bar height indicating the reporting limit.....	3
Figure 4-2. Fluoride ion release based on real-time ISE data as a function of PRD UV dose.	6
Figure 4-3. Process scenario for full-scale PFAS destruction in water.	7
Figure 5-1. Commercial-scale PFASigator photo.....	10

TABLES

Table 4-1. Percent destruction of PFAS compounds by PRD at increasing UV dosages for SAFF-concentrated landfill leachate.	4
Table 4-2. Physiochemical properties of the SAFF-concentrated landfill leachate sample.	6
Table 4-3. Model fitting for benchtop test data	8
Table 4-4. Cost estimate for SAFF-concentrated landfill leachate PFAS destruction scenario	9

APPENDICES

APPENDIX A – FULL PFAS ANALYTICAL DATA TABLE

APPENDIX B – PFAS DATA MODEL FITTING

APPENDIX C – ANALYTICAL LABORATORY REPORT

1 INTRODUCTION

1.1 BACKGROUND

Addressing and managing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in contaminated water resources is a pressing issue facing the entire world. Full destruction of PFAS molecules is a preferred solution over PFAS capture because it mitigates lingering risks to human health and the environment. Progress has been made and challenges remain for PFAS destruction technologies, such as high energy requirement and low treatment efficiencies for short-chain fluorinated compounds. Additional challenges include fabrication of novel equipment, safety of high temperature and high-pressure equipment, functionality limitations due to strict reaction conditions, and generation of undesirable byproducts such as perfluorinated carboxylic acids from oxidizable precursors, perchlorate, hydrofluoric acid, and hydrogen fluoride gas. Enspired Solutions™ has developed a PFAS destruction technology, photoactivated reductive defluorination (PRD), that surmounts these limitations.

1.2 OBJECTIVES OF THE DEMONSTRATION

The objectives of this project were to perform benchtop testing of applying PRD to a landfill leachate concentrate sample processed by SAFF (Surface Active Foam Fractionation), provided by Ramboll, Denmark Division, to demonstrate the effectiveness of PFAS destruction by PRD technology, and to provide preliminary cost estimate of applying PRD in full-scale implementation. The SAFF-concentrated landfill leachate sample was collected as part of Ramboll's VUDP funded project.

2 TECHNOLOGY

The PRD process is based on a patented chemical reaction that breaks fluorine-carbon bonds and disassembles PFAS molecules in a linear fashion beginning with the hydrophilic functional groups and proceeds through shorter molecules to complete mineralization. **Figure 2-1** shows how PRD is facilitated by adding surfactant to form a reactive micelle cage that traps PFAS. A non-toxic proprietary chemical (i.e. electron donor or eDonor) is added to solution which associates with the micelle surface and produces hydrated electrons when stimulated with UV light. These highly-reactive hydrated electrons have the energy required to cleave fluorine-carbon and other molecular bonds resulting in the final products of fluoride, water, and simple carbon molecules (e.g., formic acid and acetic acid). The chemical reaction does not require further validation. The methods, mechanisms, theory, and reactions described herein have been published.¹⁻³

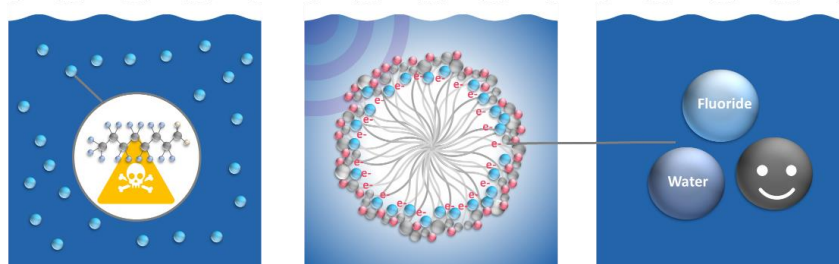


Figure 2-1. Mechanism schematic.

3 DESTRUCTIVE TEST PROCEDURE

3.1 DESIGN AND LAYOUT OF TECHNOLOGY COMPONENTS

All samples were treated at Enspired Solutions' laboratory in a laboratory-built benchtop reactor (**Figure 3-1**). The benchtop tests conducted in columns containing 300 mL of reaction mixture each. A 36 W low-pressure mercury lamp that produces monochromatic radiation at 254 nm wavelength is inserted at the center of the column to provide *in-situ* UV irradiation. The reaction temperature was controlled between 35 °C to 40 °C by an external, non-circulating water jacket surrounding the column.

The liquid reagents added to the reaction included a cationic surfactant and the environmentally benign electron donor (proprietary knowledge). Sodium hydroxide solution was used for pH adjustments. All chemicals were used without any further purification.



Figure 3-1. Benchtop test reactor set up for small scale treatability studies.

3.2 SAMPLING METHODS

The SAFF-concentrated landfill leachate sample was shipped to Enspired Solutions and stored at 4 °C when not in use. Throughout the PRD reaction, the fluoride end-product concentration was measured in real-time in 2 mL sample aliquots using an ion selective electrode (ISE) according to EPA method 9214. The Thermo Scientific (Waltham, MA, USA) Orion 9609BNWP fluoride ISE was calibrated daily per the manufacturer's instructions. Meanwhile, samples were collected in polypropylene or high-density polyethylene containers at pre-determined UV doses during the reaction for third-party analysis of PFAS. Analysis of PFAS was conducted at Eurofins Laboratories in Sacramento, CA. Samples were kept on ice during transit to the third-party laboratory. In brief, the analytical chemistry analysis included using EPA method 537 (modified) for analysis of 28 analytes.

4 RESULTS

4.1 PFAS DESTRUCTION EFFICIENCIES

Results are discussed in terms of applied UV dose, which is the UV lamp wattage applied for a fixed time per unit volume (kWh/m^3). This can be a more informative parameter to report than reaction time since the UV dose may be modified by employing a higher or lower wattage lamp, as is the case when transitioning from bench-scale to commercial-scale systems. Samples were collected for PFAS analysis at UV dosages of 0 kWh/m^3 , 600 kWh/m^3 , $2,400 \text{ kWh/m}^3$, $5,000 \text{ kWh/m}^3$, and $7,200 \text{ kWh/m}^3$. Concentrations of PFAS compounds are shown at each UV dose in **Figure 4-1**, and **Table 4-1** shows detections and degradation percentages for PFAS detected in at least one sample and analytes on the US Environmental Protection Agency (EPA) Maximum Contaminant Level (MCL) list. For the purpose of results discussion, non-detect values are treated as either zero or reporting limits for the calculation of PFAS group concentrations. Using the reporting limits as the non-detect values has a significant impact on the PFAS concentrations, but less so on the calculated percent degradations (see **Table 4-1**). For a full list of PFAS analytical results, see **Appendix A**.

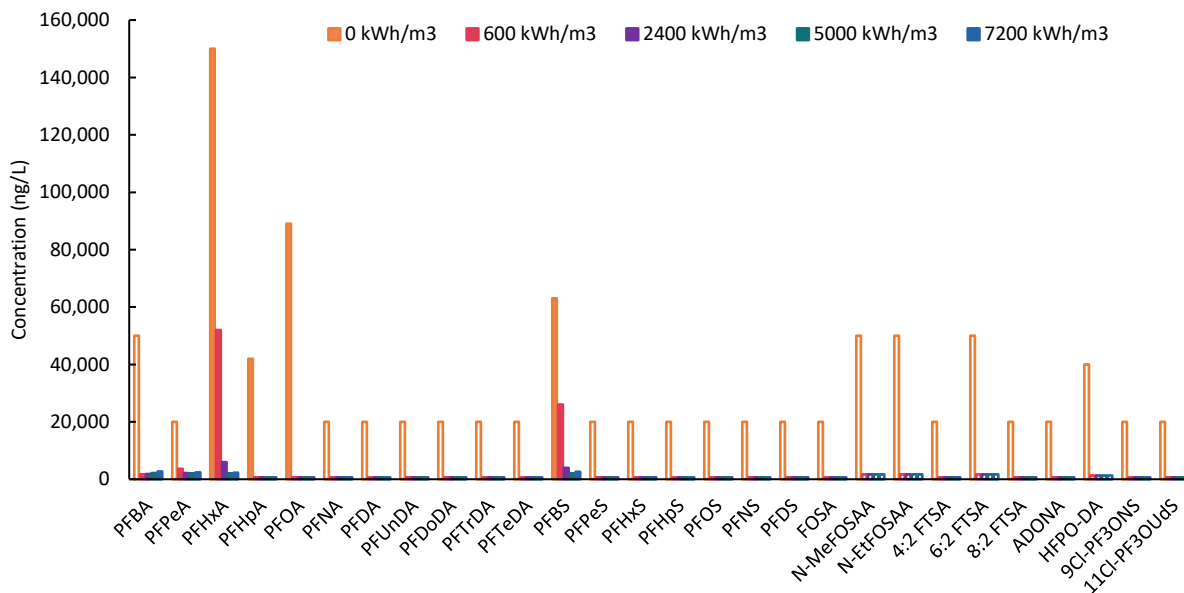


Figure 4-1. Concentrations of PFAS compounds at each UV dose. Hollow bars represent non-detected values, with the bar height indicating the reporting limit.

Table 4-1. Percent destruction of PFAS compounds by PRD at increasing UV dosages for SAFF-concentrated landfill leachate.

PFAS	UV Dose								
	0 kWh/m ³ (untreated)	600 kWh/m ³		2,400 kWh/m ³		5,000 kWh/m ³		7,200 kWh/m ³	
	ng/L	ng/L	% decrease from untreated	ng/L	% decrease from untreated	ng/L	% decrease from untreated	ng/L	% decrease from untreated
PFNA	20,000 U	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a
PFOA	89,000	670 U	>99%	670 U	>99%	670 U	>99%	670 U	>99%
PFOS	20,000 U	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a
PFHxS	20,000 U	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a	670 U	n/a
PFBS	63,000	26,000	59%	3,900	94%	2,100	97%	2,600	96%
HFPO-DA	40,000 U	1,300 U	n/a	1,300 U	n/a	1,300 U	n/a	1,300 U	n/a
Sum EPA MCL list PFAS (ND = 0)	152,000	26,000	83%	3,900	97%	2,100	99%	2,600	98%
Sum EPA MCL list PFAS (ND = RL)	252,000	29,980	88%	7,880	97%	6,080	98%	6,580	97%
PFBA	50,000 U	1,700	n/a	1,800	n/a	2,200	n/a	2,700	n/a
PFPeA	20,000 U	3,600	n/a	2,200	n/a	2,000	n/a	2,400	n/a
PFHxA	150,000	52,000	65%	5,900	96%	2,100	99%	2,300	98%
PFHpA	42,000	670 U	>98%	670 U	>98%	670 U	>98%	670 U	>98%
Total PFAS (ND = 0)	344,000	83,300	76%	13,800	96%	8,400	98%	10,000	97%
Total PFAS (ND = RL)	964,000	103,100	89%	33,600	97%	28,200	97%	29,800	97%

U = non-detected

ND = non-detected

RL = Reporting Limit

Total PFAS = sum of all 28 PFAS analytes

EPA MCL list PFAS = PFNA, PFOA, PFOS, PFHxS, PFBS, HFPO-DA

Of the 28 PFAS compounds analyzed in treated and untreated samples of SAFF-concentrated landfill leachate, six compounds were detected above the reporting limit in at least one sample: perfluorobutanoic acid (PFBA), perfluoropentanoic acid (PFPeA), perfluorohexanoic acid (PFHxA), perfluoroheptanoic acid (PFHpA), perfluorooctanoic acid (PFOA), and perfluorobutanesulfonic acid (PFBS). The major contributors to the total PFAS in the untreated sample were PFOA, PFHpA, PFHxA, and PFBS, which accounted for 26%, 12%, 44%, and 18% of total PFAS detected above the reporting limits, respectively. The results of cumulative PFAS degradation success at each sample point and applied UV dose are discussed below.

- 600 kWh/m³ Applied Dose** – Degradation was detected for four compounds during this period, PFOA, PFHpA, PFHxA, and PFBS. The degradation rates were >99% for PFOA (degraded to non-detect), >98% for PFHpA (degraded to non-detect), 65% for PFHxA, and 59% for PFBS. The sum of Environmental Protection Agency’s (EPA’s) Maximum Contaminant Level (MCL) list of six PFAS (perfluorononanoic acid [PFNA], PFOA, perfluorooctanesulfonic acid [PFOS], perfluorohexanesulfonic acid [PFHxS], PFBS, and hexafluoropropylene oxide dimer acid [HFPO-DA]) was decreased by 83% (when non-detects were accounted as zero), or from 152,000 ng/L to 26,000 ng/L. Total PFAS was decreased by 76% (when non-detects were accounted as zero), or from 344,000 ng/L to 83,300 ng/L.
- 2,400 kWh/m³ Applied Dose** – Continued degradation was detected for the remaining PFAS during this period, PFBS (94% degradation), and PFHxA (96% degradation). The sum of EPA’s MCL list of six PFAS was decreased by 97% (when non-detects were accounted as zero), or from 152,000 ng/L to 3,900 ng/L. Total PFAS was decreased by 96% (when non-detects were accounted as zero), or from 344,000 ng/L to 13,800 ng/L.

- **5,000 kWh/m³ Applied Dose** - PFBS and PFHxA were degraded by a greater extent, to 97% and 99%, respectively. The sum of EPA's MCL list of six PFAS was decreased by 99% (when non-detects were accounted as zero), or from 152,000 ng/L to 2,100 ng/L. Total PFAS was decreased by 98% (when non-detects were accounted as zero), or from 344,000 ng/L to 8,400 ng/L.
- **7,200 kWh/m³ Applied Dose** - At 7,200 kWh/m³ cumulative UV dose, the UV lamp was turned off and the reaction stopped. The total concentration of PFAS compounds detected above the reporting limits decreased by greater than 97% (when non-detects were accounted as zero), during the full reaction period. The sum of EPA's MCL list of six PFAS was decreased by 98% (when non-detects were accounted as zero), or from 152,000 ng/L to 2,600 ng/L. It should be noted that between 2,400 kWh/m³ and 7,200 kWh/m³ UV dose, the amount of additional known PFAS destroyed was minimal. This indicates that the majority of known PFAS destruction occurred within a UV dose of ~2,400 kWh/m³, and additional dose beyond this point was used to destroy a very small amount of remaining PFAS concentration.

Degradation percentages could not be determined for PFPeA and PFBA, because these compounds were not detected in the untreated (0 kWh/m³) sample. Due to the high concentrations of PFAS in the untreated sample, detection limits for individual compounds were high (thousands of ng/L). Over the course of the reaction, as the PFAS concentration decreased, detection limits also decreased, which allowed for the quantification of additional compounds. Therefore, changes in concentration of the PFAS listed above that were present at relatively low concentrations could not be determined. Also, given the high reporting limits for non-detected PFAS compounds, we also used reporting limits to represent non-detects in calculating the sum of EPA's MCL list and the total PFAS (**Table 4-1**).

PFPeA and PFBA exhibited a relatively stagnant concentrations over the course of the reaction (**Figure 4-1**). This aligns with our understanding of the PRD mechanism, in that longer chain perfluorocarboxylic acids (PFCA) and perfluorosulfonic acids (PFSA) are first converted to shorter chain PFCA. PFPeA and PFBA are intermediate products, which would demonstrate higher degradation rates if more UV dose is applied.

4.2 OTHER SAMPLE ANALYSES

The initial sample was analyzed at Enspired Solutions for the following parameters summarized in **Table 4-2**: pH, fluoride ion concentration, total dissolved solids (TDS), and UV transmissivity. The reaction is conducted at pH 10 – 11, thus the initial sample pH is measured when performing the pH adjustment. Initial fluoride ion concentration is measured to determine the background fluoride level in the sample. The TDS and UV transmissivity were measured because these parameters have historically been strong indicators of PRD reaction success. Both TDS and UV transmissivity values for the SAFF-concentrated landfill leachate sample were within the limit of applying PRD reaction.

Table 4-2. Physiochemical properties of the SAFF-concentrated landfill leachate sample.

Parameter	Unit	Value
pH	-	8.14
Fluoride	µg/L	597
Total dissolved solids (TDS)	mg/L	4,423
UV transmissivity	-	3.4%

A useful feature of the PRD technology is the ability to measure the increase in fluoride ion concentration in real time as PFAS destruction proceeds. During the PRD reaction, fluorine-carbon bonds of PFAS molecules are cleaved, therefore release of fluoride ion in solution during the reaction is an indicator of PFAS defluorination/destruction. To illustrate this feature, throughout the experiment, samples were collected for real-time measurement of fluoride ion concentration using an ISE. In **Figure 4-2**, the fluoride ion release is plotted as a function of UV Dose. The amount of fluoride ion release to solution reached ~1,400 µg/L, which exceeded the calculated decrease in organic fluorine based on the measured PFAS compounds by ~2.3x. This may be due to the presence of undetected and unreported fluorinated compounds (PFAS or PFAS precursors) in the original sample.

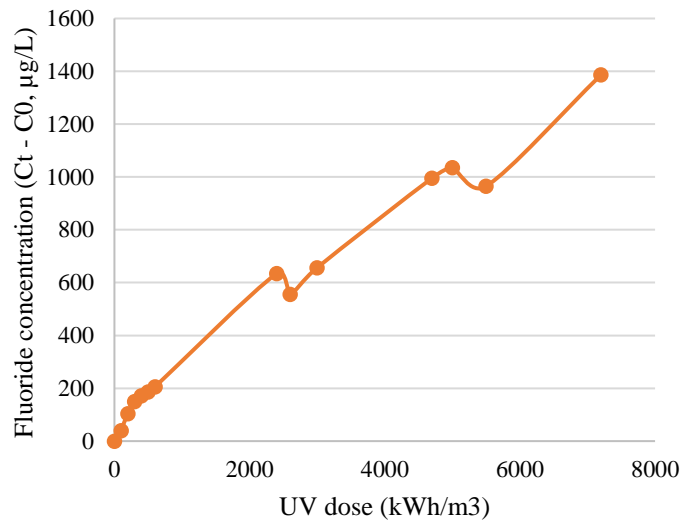


Figure 4-2. Fluoride ion release based on real-time ISE data as a function of PRD UV dose.

4.3 POTENTIAL BYPRODUCT FORMATION

As individual fluorine-carbon bonds are broken by the PRD technology, PFAS molecules are disassembled in a linear fashion beginning with the hydrophilic functional groups and proceeding through shorter molecules to complete mineralization. Therefore, shorter chain PFAS can appear as transient products, as seen in this treatability study with PFBA and PFPeA. Any PFAS remaining at the time the reaction was stopped, including these short chain PFAS, could be reconcentrated by looping the PRD effluent back to the SAFF unit prior to initiating a subsequent destruction batch.

Another constituent remaining at the end of treatment is the added surfactant, which has aquatic toxicity. If this is a discharge concern, the surfactant can be broken down to non-detect levels at the end of the reaction using a UV oxidation process prior to discharging the water from the reactor. The surfactant would also be reconcentrated by the SAFF unit in the loop back scenario for next batch usage shown in Figure 4-3, in which the SAFF unit controls the final discharge.

The eDonor used in the PRD reaction is proprietary, however it is a completely non-toxic chemical and does not form toxic byproducts during the reaction.

4.4 ENERGY CONSUMPTION AND TREATMENT COST PROJECTIONS

4.4.1 Energy Consumption

Figure 4-3 depicts a scaled-up process that is applicable for high flow rate landfill leachate and analogous to the bench-scale testing conducted within this project. In this scenario, the PFASigator is paired with the SAFF unit that brings lower-concentration, higher volume waters into concentrated PFAS wastes with a significantly reduced volume. The PFASigator then destroys the PFAS in the concentrate by one to two orders of magnitude. After PFAS is destroyed in the PFASigator, the PFASigator effluent is looped back to the SAFF unit to be re-concentrated along with additional system influent. Using this method, PFASigator energy efficiency can be optimized by destructing the majority of PFAS at high concentrations, where the ratio of PFAS mass destroyed per UV dose is high and discharging small amounts of PFAS back to the SAFF for re-concentration. In this model, the SAFF unit is the compliance stage that controls final discharge of treated water from the combined treatment system. Enspired Solutions launched a commercial-scale pilot test of our equipment, the PFASigator™, in November 2023, at an industrial facility site to treat approximately 50,000 gallons of PFAS-contaminated water during one-month duration. The study provided evidence on the technology effectiveness of this proposed process for PFAS destruction and proven that lower destruction percentages, i.e. post-treatment PFAS concentrations that are one order of magnitude (90%) lower than in the SAFF concentrate, are sufficient for effective PFAS destruction in a recirculating process flow.

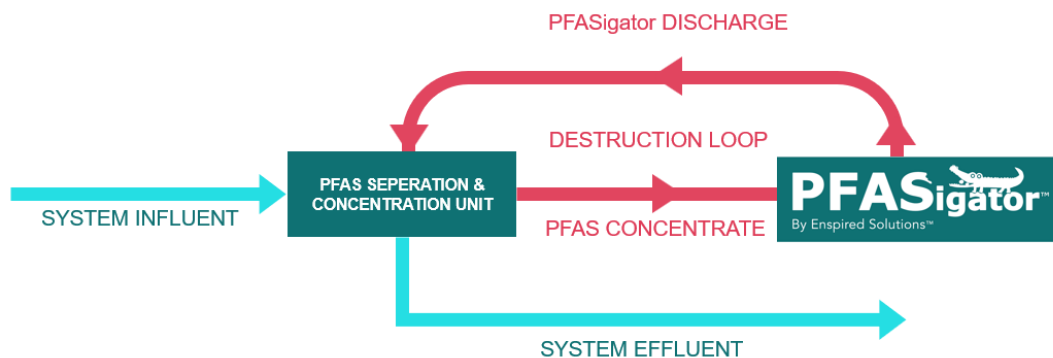


Figure 4-3. Process scenario for full-scale PFAS destruction in water.

The energy costs associated with PFAS destruction in this scenario were determined by plotting PFAS concentrations, as determined by LC-MS/MS analysis, as a function of UV dose to generate

best-fit curves and then using those modeled curves to calculate the electrical energy per order of magnitude PFAS destruction (EEO) for different remediation targets. EEO values were calculated for individual and groups of PFAS compounds by models written in programming language R.⁴ The results are shown in **Table 4-3**. Individual fitted curves are included in **Appendix B**. Please note that the UV doses used in model fitting were direct electricity usages recorded from the lamp systems. Therefore, the EEOs calculated from the test data were direct indicators of the electrical demand to destruct PFAS in SAFF-concentrated landfill leachate using a commercial UV system.

Table 4-3. Model fitting for benchtop test data

PFAS Degradation Model Fitting			
Analyte	k (m³/kWh)	p-value	EEO (Wh/L-order)
PFOA	-0.0033	0.061	698
EPA MCL PFAS ^a	-0.0016	0.02*	1431
Total PFAS ^b	-0.0014	0.01*	1644

* p-value ≤ 0.05

^aEPA MCL PFAS = PFNA, PFOA, PFOS, PFHxS, PFBS, HFPO-DA

^bTotal PFAS = Sum of 28 measured compounds

k = rate constant

4.4.2 Treatment Cost Projections

Developing cost estimates for PFAS treatment by PRD are highly dependent on PFASigator influent flow rate, PFASigator influent PFAS concentration, and target PFASigator effluent PFAS concentration (or order of magnitude destruction targets). For this project, we made the following assumptions to provide a range of site-specific cost estimate scenarios that illustrate the capability of PRD to destroy PFAS:

- SAFF concentrate (i.e. PFASigator influent) flow rate is 190 liters per day (LPD)
- SAFF concentrate (i.e. PFASigator influent) PFAS concentrations are those in the sample provided
- Post treatment (i.e. PFASigator effluent) concentration objective for multiple targets of individual PFAS and PFAS groups is at least one order of magnitude lower than in the SAFF concentrate. This objective was selected because previous field study proved that this objective was sufficient to ensure performance success for a recirculating system paired with foam fractionation.

Note that all cost calculations presented are directly related to the treated volumes of SAFF concentrate and not raw landfill leachate.

As shown in **Table 4-3**, the EEO value is heavily dependent on the analyte or group of analytes for which it was calculated. With this in mind, cost projections were calculated for destruction of a variety of groups of target compounds (Targets 1, 2 and 3 in **Table 4-4**).

In addition, **Table 4-4** presents the capital cost of purchasing a field-ready PFAS destruction system, the cost of daily operation for field-scale application, the associated electricity cost and equipment maintenance cost:

- Capital Expenditure (CAPEX): Given that PFASigator is commercial-scale equipment designed and manufactured for field application, the bench-scale testing results are used to estimate the number of PFASigator needed and the associated capital cost of purchase and installation.
- Operating Expenditure (OPEX): The estimated operation cost includes itemized costs in energy, chemical reagents, analytical chemistry, safety protection, and labor. The energy, chemical reagents, and materials usage rates are estimated by the quantified reaction rates shown in the previous discussion.

Table 4-4. Cost estimate for SAFF-concentrated landfill leachate PFAS destruction scenario

Target	Target 1: PFOA	Target 2: EPA MCL List PFAS	Target 3: Total PFAS
\$/L ¹ concentrate	\$0.94	\$1.88	\$1.91
\$/L CAPEX ²	\$0.46	\$0.92	\$0.92
\$/L reagents	\$0.26	\$0.52	\$0.52
\$/L energy use	\$0.09	\$0.19	\$0.21
\$/L machine maintenance	\$0.13	\$0.26	\$0.26
\$/L OPEX ³	\$0.48	\$0.97	\$1.00

¹Cost includes both CAPEX and OPEX.

²CAPEX and OPEX per liter calculations assumes machine runs 24 hr, 7 days a week, for 15 years.

³OPEX is the sum of reagents, energy use, and machine maintenance.

Under this process scenario for SAFF-concentrated landfill leachate, the PFAS destruction cost is within a range of \$0.94/L to \$1.91/L. Not surprisingly, with more stringent requirements (i.e. more target compounds as in Targets 2 and 3), the PFAS destruction cost increases.

5 COMMERCIAL READINESS OF PFASIGATOR



Figure 5-1. Commercial-scale PFASigator photo.

Note: The footprint of the equipment is 9' (Length) x 7' (Height) x 4' (Width). Co-founders of Enspired Solutions™, Dr. Meng Wang (left) and Dr. Denise Kay (right) stand in front of the equipment.

With successful field pilot experience, and long duration of equipment testing and operation, Enspired Solutions' commercial-scale PFAS treatment equipment is ready to use for any potential field pilot tests and full-scale implementation. (**Figure 5-1**). The fully automated equipment that executes our PRD chemistry is called the PFASigator. The PFASigator has been tested on operational parameters and PRD efficiency, and key metrics were proven to be consistent with benchtop studies. PFASigator has multiple usage and design advantages, including:

- A small footprint with a modular design, which makes it easy to plug into existing water treatment systems and scaleup.
- No special health and safety concerns given that it operates at atmospheric pressure and temperature and has multiple sensors for leakage, temperature, water levels, and others.
- Minimum labor required given its fully automated design and safe operating environment. The equipment generates real-time fluoride data fed to a cloud-based web portal which enables remote monitoring and control.
- Tunable reaction by changing the reaction duration, therefore treatment processes can be adjusted with remediation target changes.
- Robust water treatment equipment with low long-term maintenance cost given that there are no concerns over equipment corrosion during the reaction and a long history of UV equipment usage in the water industry.

6 REFERENCES

- (1) Tian, H.; Gao, J.; Li, H.; Boyd, S. A.; Gu, C. Complete Defluorination of Perfluorinated Compounds by Hydrated Electrons Generated from 3-Indole-Acetic-Acid in Organomodified Montmorillonite. *Sci Rep* **2016**, *6*. <https://doi.org/10.1038/srep32949>.
- (2) Chen, Z.; Tian, H.; Li, H.; Li, J. S.; Hong, R.; Sheng, F.; Wang, C.; Gu, C. Application of Surfactant Modified Montmorillonite with Different Conformation for Photo-Treatment of Perfluorooctanoic Acid by Hydrated Electrons. *Chemosphere* **2019**, *235*, 1180–1188. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.032>.
- (3) Chen, Z.; Li, C.; Gao, J.; Dong, H.; Chen, Y.; Wu, B.; Gu, C. Efficient Reductive Destruction of Perfluoroalkyl Substances under Self-Assembled Micelle Confinement. *Environ Sci Technol* **2020**, *54* (8), 5178–5185. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06599>.
- (4) R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria 2022. <https://www.R-project.org/> (accessed 2023-08-10).

APPENDIX A – FULL PFAS ANALYTICAL DATA TABLE

Category	Acronym	020A04P01	020A04P02	020A04P03	020A04P04	020A04P05
PFCA	PFBA	50000 U	1700	1800	2200	2700
PFCA	PFPeA	20000 U	3600	2200	2000	2400
PFCA	PFHxA	150000	52000	5900	2100	2300
PFCA	PFHpA	42000	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFOA	89000	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFNA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFDA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFUnA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFDoA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFTTrDA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA	PFTeA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFBS	63000	26000	3900	2100	2600
PFSA	PFPeS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFHxS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFHpS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFOS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFNS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFSA	PFDS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA Precursor	FOSA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA Precursor	NMeFOSAA	50000 U	1700 U	1700 U	1700 U	1700 U
PFCA Precursor	NEtFOSAA	50000 U	1700 U	1700 U	1700 U	1700 U
PFCA Precursor	4:2 FTS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
PFCA Precursor	6:2 FTS	50000 U	1700 U	1700 U	1700 U	1700 U
PFCA Precursor	8:2 FTS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
Other	ADONA	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
Other	HFPO-DA	40000 U	1300 U	1300 U	1300 U	1300 U
Other	9Cl-PF3ONS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U
Other	11Cl-PF3OUdS	20000 U	670 U	670 U	670 U	670 U

Unit: ng/L

U: non-detects

APPENDIX B – PFAS DATA MODEL FITTING

240522 - Photoactivated Reductive Defluorination PFAS Destruction in Landfill Concentrate - Time Series Analysis

Meng Wang

May 22rd, 2024

Goal: Fit PFAS degradation by $PFAS = PFAS_0 \exp(-BT)$

Packages

```
library(data.table)
library(lfe)
library(ggplot2)
library(ggrepel)
library(aomisc)
library("cowplot")
```

Prepare the data for the analysis

First, load the input data

```
setwd("C://Users/wangm/Enspired/Client - General/020 Ramboll/020A2023 Danish
VUDP TS/Deliverables/Draft Presentations/Analysis")
#here is a directory to the code
#Load the data
#all non-detects use the value of report limit
DT_PFAS = data.table(read.csv("PFAS_Organized_Data.csv"))
Compound_ID = data.table(read.csv("Compound_ID.csv"))

#Convert Crosstab data into flat; add compound ID
DT_PFAS = melt (DT_PFAS, id="UV.Dose")
#DT_PFAS_Bench_0 = melt (DT_PFAS_Bench_0, id="UV.Dose")
setkey(Compound_ID, "variable")
setkey(DT_PFAS, "variable")
#setkey(DT_PFAS_Bench_0, "variable")
DT_PFAS=merge(DT_PFAS, Compound_ID)
#DT_PFAS_Bench_0=merge(DT_PFAS_Bench_0, Compound_ID)
DT_PFAS_save=DT_PFAS
#DT_PFAS_Bench_0_save=DT_PFAS_Bench_0
```

second, create table to export fitted data

```
#Table for fitted parameters
fit_Paras_PFAS=unique(DT_PFAS[, .(ID, variable)])
```

```

N=nrow(fit_Paras_PFAS)
fit_Paras_PFAS = data.table(ID=fit_Paras_PFAS$ID,Compound=fit_Paras_PFAS$variable, Para_k = rep(0, each = N), Para_k_pvalue = rep(0, each = N))

fit_Paras_PFAS = fit_Paras_PFAS[order(ID)]

#Table for simulated data
Simulated_PFAS=data.table(UV.Dose = seq(from=min(DT_PFAS_save$UV.Dose),to=max(DT_PFAS_save$UV.Dose),length.out=1000), S_PFOA = rep(0, each=1000), S_PFHxS = rep(0, each=1000), S_PFHpA = rep(0, each=1000), S_PFHxA = rep(0, each=1000) , S_EPA_PFAS = rep(0, each=1000), S_Total_PFAS = rep(0, each=1000) )

```

Third, fit PFAS data by $PFAS = PFAS_0 \cdot \exp(-BT)$

```

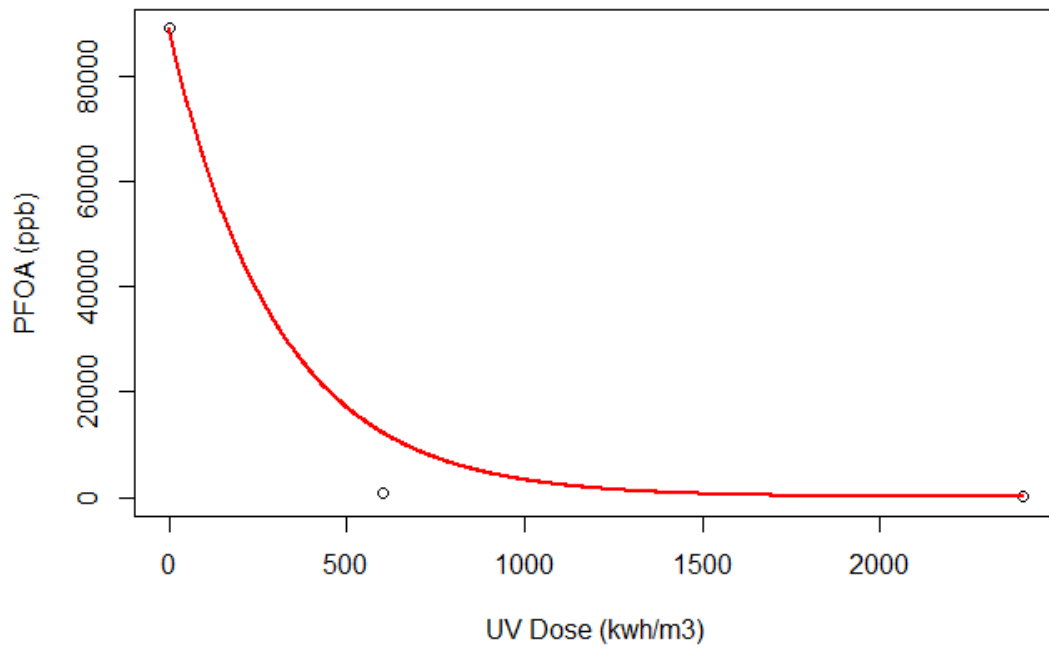
Force the line goes through the initial point
min_UV.Dose = min(DT_PFAS$UV.Dose)
max_UV.Dose = max(DT_PFAS$UV.Dose)
for (i in 1:N) {
data = DT_PFAS[ID==(i)]
x=data$UV.Dose
y=data$value
Name = data$variable[1]
model <- lm(log(y)-log(y[1]) ~ 0+x)

#plot the fitted model with the
#define x-values to use for regression line
x_fit=seq(from=min_UV.Dose,to=max_UV.Dose,length.out=1000)
#use the model to predict the y-values based on the x-values
y_fit=y[1]*exp(predict(model,newdata=list(x=seq(from=min_UV.Dose,to=max_UV.Dose,length.out=1000)), interval="confidence"))

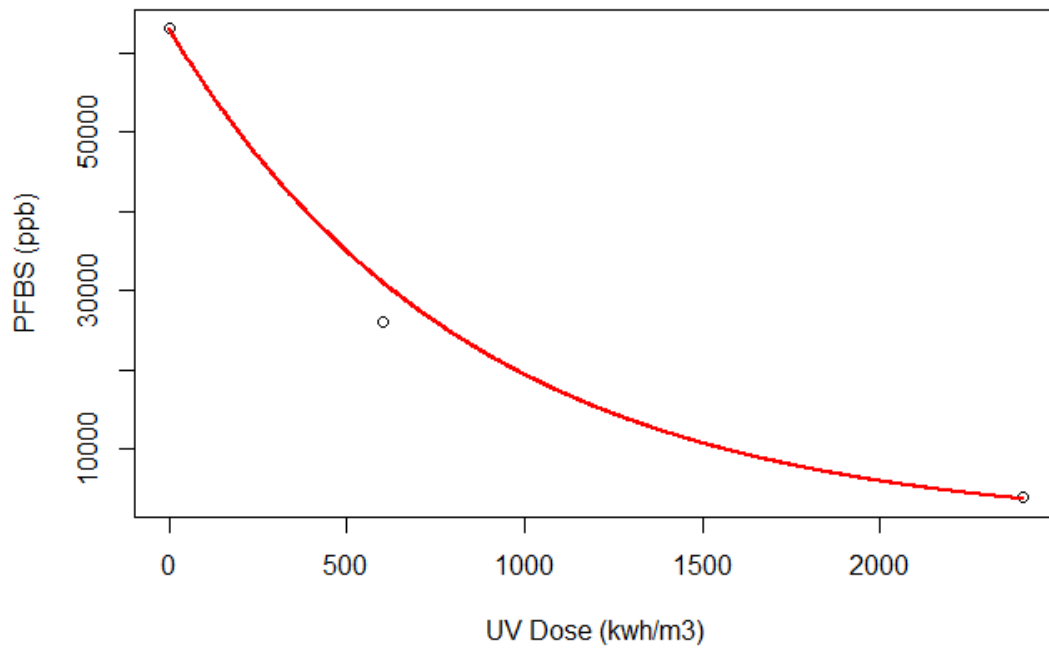
plot(x,y, xlab="UV Dose (kwh/m3)", ylab=paste(Name, " (ppb)", sep = ""))
lines(x_fit, y_fit[,1], col="red", lwd=2)
title(main = paste("Ramboll Denmark ", Name, sep = ""))
fit_Paras_PFAS$Para_k[i]=summary(model)$coefficients[1,1]
fit_Paras_PFAS$Para_k_pvalue[i]=summary(model)$coefficients[1,4]
Simulated_PFAS[, i+1]=y_fit[,1]
}

```

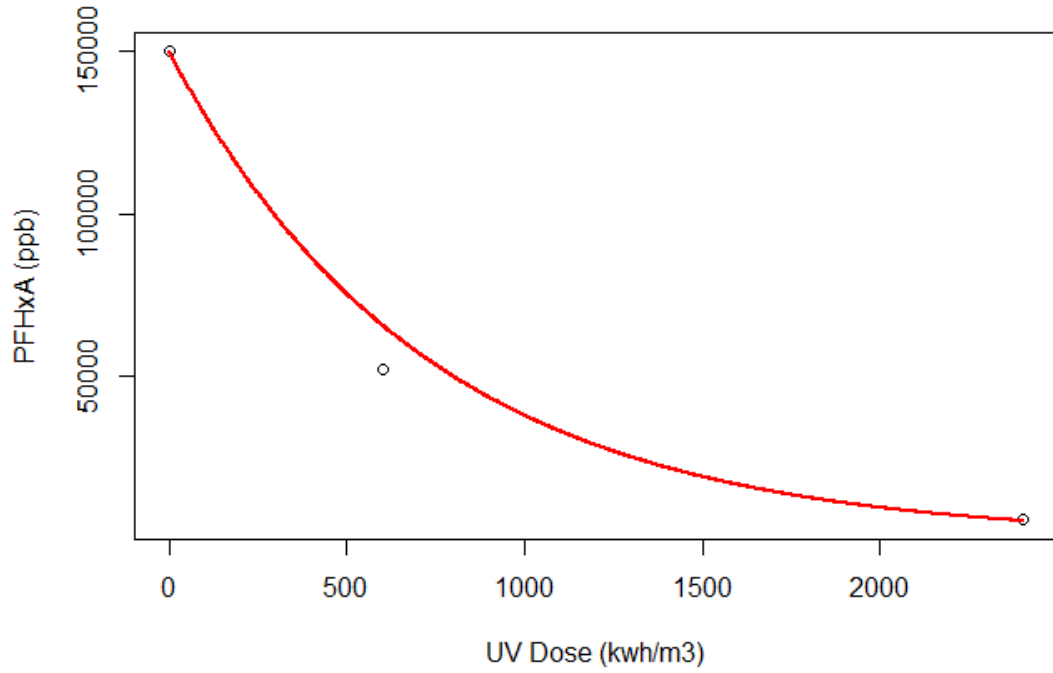
Ramboll Denmark PFOA



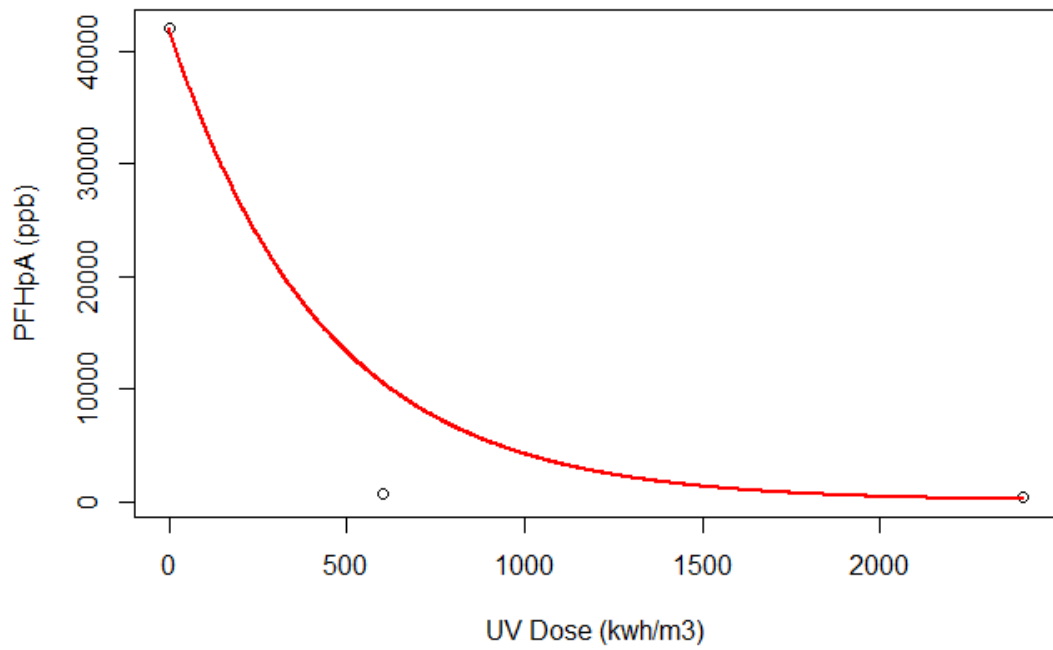
Ramboll Denmark PFBS



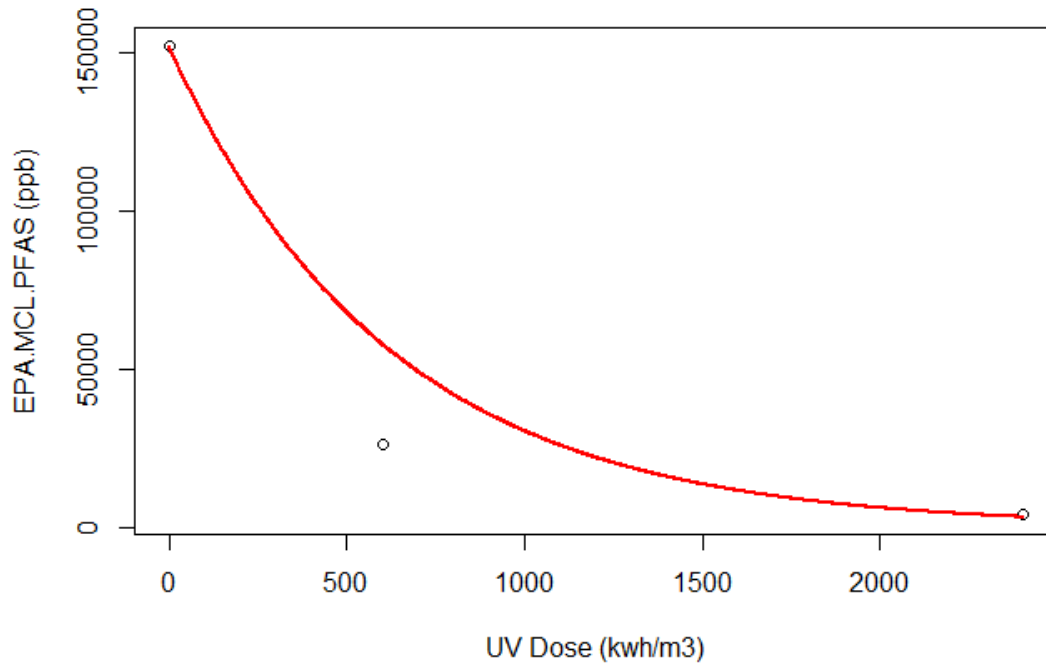
Ramboll Denmark PFHxA



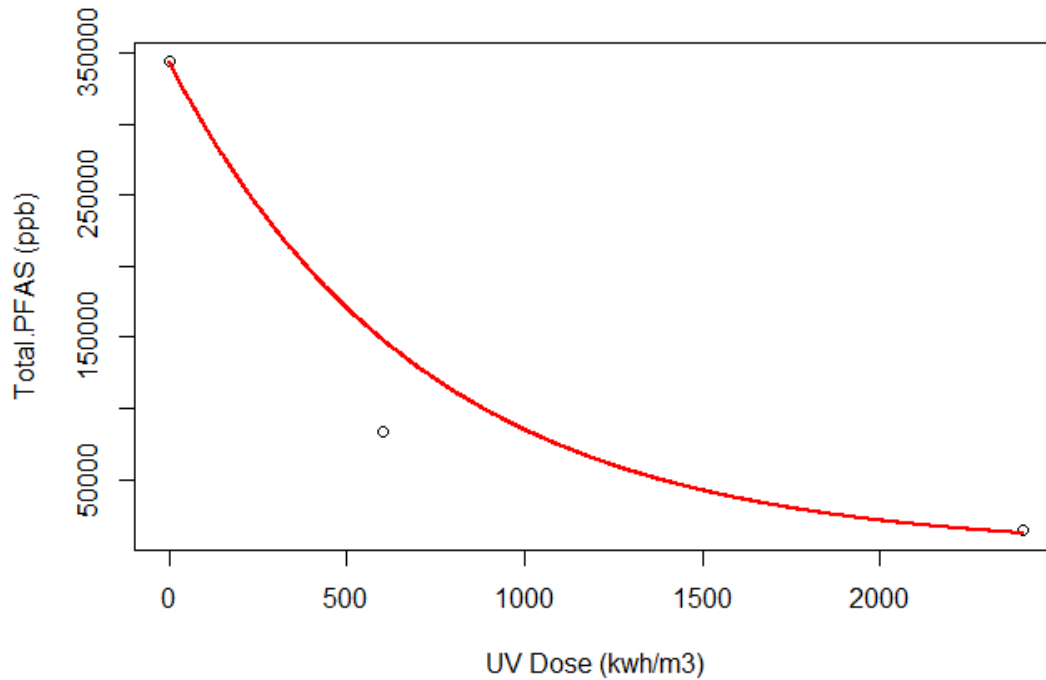
Ramboll Denmark PFHpA



Ramboll Denmark EPA.MCL.PFAS



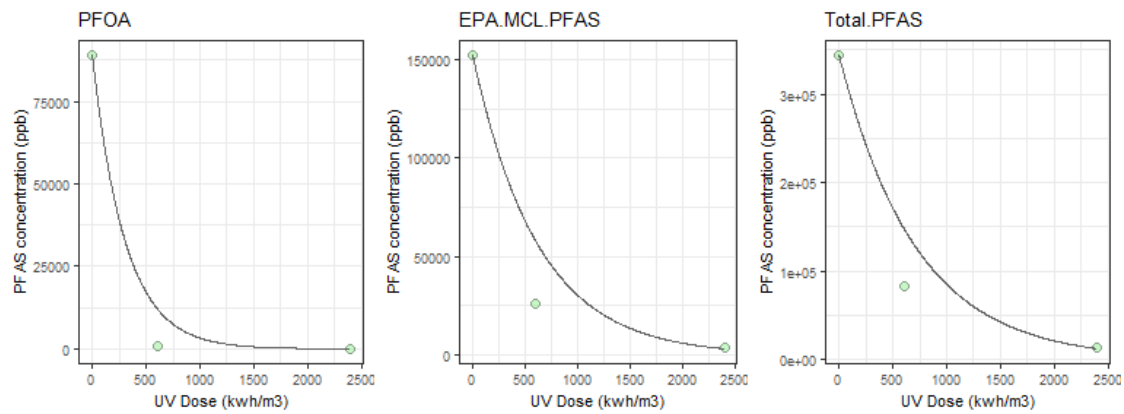
Ramboll Denmark Total.PFAS



```
fit_Paras_PFAS[, EE0:=-log(10)/Para_k]  
fit_Paras_PFAS
```

```
write.csv(fit_Paras_PFAS, "C://Users/wangm/Enspired/Client - General/020 Ramboll/020A2023 Danish VUDP TS/Deliverables/Draft Presentations/Analysis\\Output_fit_Paras_PFAS_over0.csv", row.names=FALSE)
```

Fourth, formally plot the data



APPENDIX C – ANALYTICAL LABORATORY REPORT



ANALYTICAL REPORT

PREPARED FOR

Attn: Suzanne Witt
Enspired Solutions
9047 West Scenic Lake Dr
Laingsburg, Michigan 48848

Generated 5/17/2024 10:31:00 AM

JOB DESCRIPTION

PFAS, Foam Fractionate

JOB NUMBER

320-110781-1

Eurofins Sacramento

Job Notes

This report may not be reproduced except in full, and with written approval from the laboratory. The results relate only to the samples tested. For questions please contact the Project Manager at the e-mail address or telephone number listed on this page.

The test results in this report relate only to the samples as received by the laboratory and will meet all requirements of the methodology, with any exceptions noted. This report shall not be reproduced except in full, without the express written approval of the laboratory. All questions should be directed to the Eurofins Environment Testing Northern California, LLC Project Manager.

Authorization



Generated
5/17/2024 10:31:00 AM

Authorized for release by
Laura Turpen, Project Manager I
Laura.Turpen@et.eurofinsus.com
(916)374-4414



Table of Contents

Cover Page	1
Table of Contents	3
Definitions/Glossary	4
Case Narrative	5
Detection Summary	6
Client Sample Results	7
Isotope Dilution Summary	13
QC Sample Results	15
QC Association Summary	19
Lab Chronicle	20
Certification Summary	21
Method Summary	22
Sample Summary	23
Chain of Custody	24
Receipt Checklists	26

Definitions/Glossary

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Qualifiers

LCMS

Qualifier	Qualifier Description
*5+	Isotope dilution analyte is outside acceptance limits, high biased.
H	Sample was prepped or analyzed beyond the specified holding time. This does not meet regulatory requirements.

Glossary

Abbreviation	These commonly used abbreviations may or may not be present in this report.
α	Listed under the "D" column to designate that the result is reported on a dry weight basis
%R	Percent Recovery
CFL	Contains Free Liquid
CFU	Colony Forming Unit
CNF	Contains No Free Liquid
DER	Duplicate Error Ratio (normalized absolute difference)
Dil Fac	Dilution Factor
DL	Detection Limit (DoD/DOE)
DL, RA, RE, IN	Indicates a Dilution, Re-analysis, Re-extraction, or additional Initial metals/anion analysis of the sample
DLC	Decision Level Concentration (Radiochemistry)
EDL	Estimated Detection Limit (Dioxin)
LOD	Limit of Detection (DoD/DOE)
LOQ	Limit of Quantitation (DoD/DOE)
MCL	EPA recommended "Maximum Contaminant Level"
MDA	Minimum Detectable Activity (Radiochemistry)
MDC	Minimum Detectable Concentration (Radiochemistry)
MDL	Method Detection Limit
ML	Minimum Level (Dioxin)
MPN	Most Probable Number
MQL	Method Quantitation Limit
NC	Not Calculated
ND	Not Detected at the reporting limit (or MDL or EDL if shown)
NEG	Negative / Absent
POS	Positive / Present
PQL	Practical Quantitation Limit
PRES	Presumptive
QC	Quality Control
RER	Relative Error Ratio (Radiochemistry)
RL	Reporting Limit or Requested Limit (Radiochemistry)
RPD	Relative Percent Difference, a measure of the relative difference between two points
TEF	Toxicity Equivalent Factor (Dioxin)
TEQ	Toxicity Equivalent Quotient (Dioxin)
TNTC	Too Numerous To Count

Case Narrative

Client: Enspired Solutions
Project: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Job ID: 320-110781-1

Eurofins Sacramento

Job Narrative 320-110781-1

Receipt

The samples were received on 3/23/2024 8:45 AM. Unless otherwise noted below, the samples arrived in good condition, and where required, properly preserved and on ice. The temperature of the cooler at receipt was 0.2° C.

LCMS

Method 537 (modified): Isotope Dilution Analyte (IDA) recovery is above the method recommended limit for the following samples: 020A04P01 (320-110781-1), 020A04P04 (320-110781-4) and 020A04P05 (320-110781-5). Quantitation by isotope dilution generally precludes any adverse effect on data quality due to elevated IDA recoveries.

Method 537 (modified): All samples were re-extracted (RE) outside of the laboratory's default sample preparation holding time to incorporate project-specific procedures that were not performed in the original extraction. The results from the original extraction and RE are in close agreement, and the RE results are reported.

No additional analytical or quality issues were noted, other than those described above or in the Definitions/Glossary page.

Organic Prep

Method 3535: All samples in preparation batch 320-320-759537 were prepared using project-specific procedures intended to mitigate micelle formation due to the presence of CTAB or CTAC, per client request.

Method 3535: Insufficient sample volume was available to perform a matrix spike/matrix spike duplicate (MS/MSD) associated with preparation batch 320-759537.

No additional analytical or quality issues were noted, other than those described above or in the Definitions/Glossary page.

Eurofins Sacramento

Detection Summary

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P01

Lab Sample ID: 320-110781-1

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	Dil Fac	D	Method	Prep Type
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	150000	H	20000		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	42000	H	20000		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	89000	H	20000		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	63000	H	20000		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA

Client Sample ID: 020A04P02

Lab Sample ID: 320-110781-2

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	Dil Fac	D	Method	Prep Type
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	1700	H	1700		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	3600	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	52000	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	26000	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA

Client Sample ID: 020A04P03

Lab Sample ID: 320-110781-3

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	Dil Fac	D	Method	Prep Type
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	1800	H	1700		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2200	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	5900	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	3900	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA

Client Sample ID: 020A04P04

Lab Sample ID: 320-110781-4

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	Dil Fac	D	Method	Prep Type
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	2200	H	1700		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2000	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	2100	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	2100	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA

Client Sample ID: 020A04P05

Lab Sample ID: 320-110781-5

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	Dil Fac	D	Method	Prep Type
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	2700	H	1700		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2400	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	2300	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	2600	H	670		ng/L	1		537 (modified)	Total/NA

This Detection Summary does not include radiochemical test results.

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P01

Lab Sample ID: 320-110781-1

Date Collected: 03/18/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	ND	H	50000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	150000	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	42000	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	89000	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	63000	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluoronanesulfonic acid (PFNS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
NMeFOSAA	ND	H	50000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
NEtFOSAA	ND	H	50000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
4:2 FTS	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
6:2 FTS	ND	H	50000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
8:2 FTS	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
HFPO-DA (GenX)	ND	H	40000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
9CI-PF3ONS	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
11CI-PF3OUdS	ND	H	20000		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1

Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C4 PFBA	99		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C5 PFPeA	114		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C2 PFHxA	133		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C4 PFHpA	108		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C4 PFOA	106		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C5 PFNA	130		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C2 PFDA	135		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C2 PFUnA	159	*5+	25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C2 PFDoA	135		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C2 PFTeDA	111		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C3 PFBS	119		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
18O2 PFHxS	117		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C4 PFOS	139		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C8 FOSA	146		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
d3-NMeFOSAA	135		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
d5-NEtFOSAA	143		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
M2-6:2 FTS	121		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P01

Lab Sample ID: 320-110781-1

Date Collected: 03/18/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
M2-8:2 FTS	135		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
M2-4:2 FTS	111		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1
13C3 HFPO-DA	129		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:33	1

Client Sample ID: 020A04P02

Lab Sample ID: 320-110781-2

Date Collected: 03/18/24 14:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	1700	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	3600	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	52000	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTTrDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	26000	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHxS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluoronanesulfonic acid (PFNS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
NMeFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
NEtFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
4:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
6:2 FTS	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
8:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
HFPO-DA (GenX)	ND	H	1300		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
9Cl-PF3ONS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
11Cl-PF3OUdS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits				Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C4 PFBA	103		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C5 PFPeA	88		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C2 PFHxA	121		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C4 PFHpA	103		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C4 PFOA	105		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C5 PFNA	117		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C2 PFDA	132		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C2 PFUnA	139		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P02

Lab Sample ID: 320-110781-2

Date Collected: 03/18/24 14:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C2 PFDoA	137		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C2 PFTeDA	116		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C3 PFBS	95		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
18O2 PFHxS	106		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C4 PFOS	142		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C8 FOSA	137		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
d3-NMeFOSAA	129		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
d5-NEtFOSAA	132		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
M2-6:2 FTS	125		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
M2-8:2 FTS	141		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
M2-4:2 FTS	144		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1
13C3 HFPO-DA	105		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:43	1

Client Sample ID: 020A04P03

Lab Sample ID: 320-110781-3

Date Collected: 03/19/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	1800	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2200	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	5900	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTriDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	3900	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
NMeFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
NEtFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
4:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
6:2 FTS	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
8:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
HFPO-DA (GenX)	ND	H	1300		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
9Cl-PF3ONS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
11Cl-PF3OUdS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P03

Lab Sample ID: 320-110781-3

Date Collected: 03/19/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C4 PFBA	103		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C5 PFPeA	88		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C2 PFHxA	108		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C4 PFHpA	121		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C4 PFOA	104		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C5 PFNA	125		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C2 PFDA	117		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C2 PFUnA	140		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C2 PFDoA	131		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C2 PFTeDA	112		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C3 PFBS	104		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
18O2 PFHxS	112		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C4 PFOS	124		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C8 FOSA	126		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
d3-NMeFOSAA	120		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
d5-NEtFOSAA	147		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
M2-6:2 FTS	100		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
M2-8:2 FTS	114		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
M2-4:2 FTS	142		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1
13C3 HFPO-DA	111		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:53	1

Client Sample ID: 020A04P04

Lab Sample ID: 320-110781-4

Date Collected: 03/20/24 10:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	2200	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2000	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	2100	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTTrDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	2100	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
NMeFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
NEtFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
4:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P04

Lab Sample ID: 320-110781-4

Date Collected: 03/20/24 10:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
6:2 FTS	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
8:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
HFPO-DA (GenX)	ND	H	1300		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
9Cl-PF3ONS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
11Cl-PF3OUdS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits				Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C4 PFBA	108		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C5 PFPeA	92		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C2 PFHxA	138		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C4 PFHpA	119		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C4 PFOA	108		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C5 PFNA	126		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C2 PFDA	130		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C2 PFUnA	146		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C2 PFDoA	134		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C2 PFTeDA	125		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C3 PFBS	100		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
18O2 PFHxS	113		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C4 PFOS	131		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C8 FOSA	133		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
d3-NMeFOSAA	119		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
d5-NEtFOSAA	151	*5+	25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
M2-6:2 FTS	103		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
M2-8:2 FTS	119		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
M2-4:2 FTS	121		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1
13C3 HFPO-DA	113		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:03	1

Client Sample ID: 020A04P05

Lab Sample ID: 320-110781-5

Date Collected: 03/21/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	2700	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	2400	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	2300	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	2600	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1

Eurofins Sacramento

Client Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P05

Lab Sample ID: 320-110781-5

Date Collected: 03/21/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Method: EPA 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Analyte	Result	Qualifier	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
NMeFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
NEtFOSAA	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
4:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
6:2 FTS	ND	H	1700		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
8:2 FTS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
HFPO-DA (GenX)	ND	H	1300		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
9Cl-PF3ONS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
11Cl-PF3OUdS	ND	H	670		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
Isotope Dilution	%Recovery	Qualifier	Limits				Prepared	Analyzed	Dil Fac
13C4 PFBA	103		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C5 PFPeA	102		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C2 PFHxA	119		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C4 PFHpA	122		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C4 PFOA	109		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C5 PFNA	125		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C2 PFDA	126		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C2 PFUnA	154	*5+	25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C2 PFDoA	140		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C2 PFTeDA	120		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C3 PFBS	104		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
18O2 PFHxS	118		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C4 PFOS	144		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C8 FOSA	134		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
d3-NMeFOSAA	122		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
d5-NEtFOSAA	142		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
M2-6:2 FTS	93		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
M2-8:2 FTS	101		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
M2-4:2 FTS	94		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1
13C3 HFPO-DA	123		25 - 150				05/03/24 05:14	05/12/24 11:13	1

Isotope Dilution Summary

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method: 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Matrix: Water

Prep Type: Total/NA

Percent Isotope Dilution Recovery (Acceptance Limits)

Lab Sample ID	Client Sample ID	PFBA (25-150)	PFPeA (25-150)	PFHxA (25-150)	C4PFHA (25-150)	PFOA (25-150)	PFNA (25-150)	PFDA (25-150)	PFUnA (25-150)
320-110781-1	020A04P01	99	114	133	108	106	130	135	159 *5+
320-110781-2	020A04P02	103	88	121	103	105	117	132	139
320-110781-3	020A04P03	103	88	108	121	104	125	117	140
320-110781-4	020A04P04	108	92	138	119	108	126	130	146
320-110781-5	020A04P05	103	102	119	122	109	125	126	154 *5+
LCS 320-759537/2-A	Lab Control Sample	92	85	107	93	100	112	119	129
LCS 320-759537/3-A	Lab Control Sample Dup	92	86	115	100	102	124	121	136
MB 320-759537/1-A	Method Blank	102	83	107	97	97	115	123	134

Percent Isotope Dilution Recovery (Acceptance Limits)

Lab Sample ID	Client Sample ID	PFDoA (25-150)	PFTDA (25-150)	C3PFBS (25-150)	PFHxS (25-150)	PFOS (25-150)	PFOSA (25-150)	d3NMFOS (25-150)	d5NEFOS (25-150)
320-110781-1	020A04P01	135	111	119	117	139	146	135	143
320-110781-2	020A04P02	137	116	95	106	142	137	129	132
320-110781-3	020A04P03	131	112	104	112	124	126	120	147
320-110781-4	020A04P04	134	125	100	113	131	133	119	151 *5+
320-110781-5	020A04P05	140	120	104	118	144	134	122	142
LCS 320-759537/2-A	Lab Control Sample	137	130	87	99	133	122	126	138
LCS 320-759537/3-A	Lab Control Sample Dup	122	125	95	97	127	128	129	141
MB 320-759537/1-A	Method Blank	122	126	87	97	127	126	120	127

Percent Isotope Dilution Recovery (Acceptance Limits)

Lab Sample ID	Client Sample ID	M262FTS (25-150)	M282FTS (25-150)	M242FTS (25-150)	HFPODA (25-150)
320-110781-1	020A04P01	121	135	111	129
320-110781-2	020A04P02	125	141	144	105
320-110781-3	020A04P03	100	114	142	111
320-110781-4	020A04P04	103	119	121	113
320-110781-5	020A04P05	93	101	94	123
LCS 320-759537/2-A	Lab Control Sample	105	138	98	112
LCS 320-759537/3-A	Lab Control Sample Dup	96	131	108	109
MB 320-759537/1-A	Method Blank	89	125	102	104

Surrogate Legend

- PFBA = 13C4 PFBA
- PFPeA = 13C5 PFPeA
- PFHxA = 13C2 PFHxA
- C4PFHA = 13C4 PFHpA
- PFOA = 13C4 PFOA
- PFNA = 13C5 PFNA
- PFDA = 13C2 PFDA
- PFUnA = 13C2 PFUnA
- PFDoA = 13C2 PFDoA
- PFTDA = 13C2 PFTeDA
- C3PFBS = 13C3 PFBS
- PFHxS = 18O2 PFHxS
- PFOS = 13C4 PFOS
- PFOSA = 13C8 FOSA
- d3NMFOS = d3-NMeFOSAA
- d5NEFOS = d5-NEtFOSAA
- M262FTS = M2-6:2 FTS

Isotope Dilution Summary

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate
M282FTS = M2-8:2 FTS
M242FTS = M2-4:2 FTS
HFPODA = 13C3 HFPO-DA

Job ID: 320-110781-1

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

QC Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method: 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances

Lab Sample ID: MB 320-759537/1-A
Matrix: Water
Analysis Batch: 762631

Client Sample ID: Method Blank
Prep Type: Total/NA
Prep Batch: 759537

Analyte	MB	MB	RL	MDL	Unit	D	Prepared	Analyzed	Dil Fac
	Result	Qualifier							
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	ND		630		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
NMeFOSAA	ND		630		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
NEtFOSAA	ND		630		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
4:2 FTS	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
6:2 FTS	ND		630		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
8:2 FTS	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
HFPO-DA (GenX)	ND		500		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
9Cl-PF3ONS	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
11Cl-PF3OUdS	ND		250		ng/L		05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1

Isotope Dilution	MB	MB	Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
	%Recovery	Qualifier				
13C4 PFBA	102		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C5 PFPeA	83		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C2 PFHxA	107		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C4 PFHpA	97		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C4 PFOA	97		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C5 PFNA	115		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C2 PFDA	123		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C2 PFUnA	134		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C2 PFDoA	122		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C2 PFTeDA	126		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C3 PFBS	87		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
18O2 PFHxS	97		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C4 PFOS	127		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C8 FOSA	126		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
d3-NMeFOSAA	120		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
d5-NEtFOSAA	127		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1

Eurofins Sacramento

QC Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method: 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Lab Sample ID: MB 320-759537/1-A

Matrix: Water

Analysis Batch: 762631

Client Sample ID: Method Blank

Prep Type: Total/NA

Prep Batch: 759537

Isotope Dilution	MB MB		Limits	Prepared	Analyzed	Dil Fac
	%Recovery	Qualifier				
M2-6:2 FTS	89		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
M2-8:2 FTS	125		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
M2-4:2 FTS	102		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1
13C3 HFPO-DA	104		25 - 150	05/03/24 05:14	05/12/24 10:03	1

Lab Sample ID: LCS 320-759537/2-A

Matrix: Water

Analysis Batch: 762631

Client Sample ID: Lab Control Sample

Prep Type: Total/NA

Prep Batch: 759537

Analyte	Spike Added	LCS Result	LCS Qualifier	Unit	D	%Rec	%Rec
							Limits
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	5000	4600		ng/L		92	76 - 136
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	5000	4590		ng/L		92	71 - 131
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	5000	5160		ng/L		103	73 - 133
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	5000	5330		ng/L		107	72 - 132
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	5000	5230		ng/L		105	70 - 130
Perfluorononanoic acid (PFNA)	5000	5030		ng/L		101	75 - 135
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	5000	5570		ng/L		111	76 - 136
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	5000	4950		ng/L		99	68 - 128
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	5000	4870		ng/L		97	71 - 131
Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	5000	4560		ng/L		91	71 - 131
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	5000	5140		ng/L		103	70 - 130
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	4440	4450		ng/L		100	67 - 127
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	4700	5760		ng/L		123	66 - 126
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	4560	4140		ng/L		91	59 - 119
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	4770	4180		ng/L		88	76 - 136
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	4650	4280		ng/L		92	70 - 130
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	4810	4340		ng/L		90	75 - 135
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	4820	4800		ng/L		100	71 - 131
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	5000	5140		ng/L		103	73 - 133
NMeFOSAA	5000	5620		ng/L		112	76 - 136
NEtFOSAA	5000	5180		ng/L		104	76 - 136
4:2 FTS	4690	5440		ng/L		116	79 - 139
6:2 FTS	4760	4860		ng/L		102	59 - 175
8:2 FTS	4800	4480		ng/L		93	75 - 135
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	4730	3810		ng/L		81	79 - 139
HFPO-DA (GenX)	5000	4740		ng/L		95	51 - 173
9Cl-PF3ONS	4670	4340		ng/L		93	75 - 135
11Cl-PF3OUdS	4720	4790		ng/L		101	54 - 114

Eurofins Sacramento

QC Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method: 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Isotope Dilution	LCS LCS		Limits
	%Recovery	Qualifier	
13C4 PFBA	92		25 - 150
13C5 PFPeA	85		25 - 150
13C2 PFHxA	107		25 - 150
13C4 PFHpA	93		25 - 150
13C4 PFOA	100		25 - 150
13C5 PFNA	112		25 - 150
13C2 PFDA	119		25 - 150
13C2 PFUnA	129		25 - 150
13C2 PFDoA	137		25 - 150
13C2 PFTeDA	130		25 - 150
13C3 PFBS	87		25 - 150
18O2 PFHxS	99		25 - 150
13C4 PFOS	133		25 - 150
13C8 FOSA	122		25 - 150
d3-NMeFOSAA	126		25 - 150
d5-NEtFOSAA	138		25 - 150
M2-6:2 FTS	105		25 - 150
M2-8:2 FTS	138		25 - 150
M2-4:2 FTS	98		25 - 150
13C3 HFPO-DA	112		25 - 150

Lab Sample ID: LCSD 320-759537/3-A

Matrix: Water

Analysis Batch: 762631

Client Sample ID: Lab Control Sample Dup

Prep Type: Total/NA

Prep Batch: 759537

Analyte	Spike Added	LCSD Result	LCSD Qualifier	Unit	D	%Rec	%Rec Limits	RPD	
								RPD	Limit
Perfluorobutanoic acid (PFBA)	5000	4660		ng/L		93	76 - 136	1	30
Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	5000	4790		ng/L		96	71 - 131	4	30
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	5000	4500		ng/L		90	73 - 133	14	30
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	5000	4980		ng/L		100	72 - 132	7	30
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	5000	4870		ng/L		97	70 - 130	7	30
Perfluorononanoic acid (PFNA)	5000	4690		ng/L		94	75 - 135	7	30
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	5000	5710		ng/L		114	76 - 136	2	30
Perfluoroundecanoic acid (PFUnA)	5000	4990		ng/L		100	68 - 128	1	30
Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	5000	5320		ng/L		106	71 - 131	9	30
Perfluorotridecanoic acid (PFTTrDA)	5000	5400		ng/L		108	71 - 131	17	30
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeA)	5000	4990		ng/L		100	70 - 130	3	30
Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS)	4440	4210		ng/L		95	67 - 127	5	30
Perfluoropentanesulfonic acid (PFPeS)	4700	5410		ng/L		115	66 - 126	6	30
Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS)	4560	4880		ng/L		107	59 - 119	16	30
Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS)	4770	4130		ng/L		87	76 - 136	1	30
Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)	4650	4710		ng/L		101	70 - 130	10	30
Perfluorononanesulfonic acid (PFNS)	4810	4680		ng/L		97	75 - 135	8	30
Perfluorodecanesulfonic acid (PFDS)	4820	5100		ng/L		106	71 - 131	6	30

Eurofins Sacramento

QC Sample Results

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method: 537 (modified) - Fluorinated Alkyl Substances (Continued)

Lab Sample ID: LCSD 320-759537/3-A

Matrix: Water

Analysis Batch: 762631

Client Sample ID: Lab Control Sample Dup

Prep Type: Total/NA

Prep Batch: 759537

Analyte	Spike Added	LCSD Result	LCSD Qualifier	Unit	D	%Rec	%Rec Limits	RPD	RPD Limit
Perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	5000	5050		ng/L		101	73 - 133	2	30
NMeFOSAA	5000	5160		ng/L		103	76 - 136	8	30
NEtFOSAA	5000	5380		ng/L		108	76 - 136	4	30
4:2 FTS	4690	5890		ng/L		126	79 - 139	8	30
6:2 FTS	4760	5550		ng/L		117	59 - 175	13	30
8:2 FTS	4800	4900		ng/L		102	75 - 135	9	30
4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoic acid (ADONA)	4730	3850		ng/L		81	79 - 139	1	30
HFPO-DA (GenX)	5000	5430		ng/L		109	51 - 173	14	30
9Cl-PF3ONS	4670	4880		ng/L		104	75 - 135	12	30
11Cl-PF3OUdS	4720	4910		ng/L		104	54 - 114	3	30

Isotope Dilution	LCSD		Limits
	%Recovery	Qualifier	
13C4 PFBA	92		25 - 150
13C5 PFPeA	86		25 - 150
13C2 PFHxA	115		25 - 150
13C4 PFHpA	100		25 - 150
13C4 PFOA	102		25 - 150
13C5 PFNA	124		25 - 150
13C2 PFDA	121		25 - 150
13C2 PFUnA	136		25 - 150
13C2 PFDoA	122		25 - 150
13C2 PFTeDA	125		25 - 150
13C3 PFBS	95		25 - 150
18O2 PFHxS	97		25 - 150
13C4 PFOS	127		25 - 150
13C8 FOSA	128		25 - 150
d3-NMeFOSAA	129		25 - 150
d5-NEtFOSAA	141		25 - 150
M2-6:2 FTS	96		25 - 150
M2-8:2 FTS	131		25 - 150
M2-4:2 FTS	108		25 - 150
13C3 HFPO-DA	109		25 - 150

QC Association Summary

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

LCMS

Prep Batch: 759537

Lab Sample ID	Client Sample ID	Prep Type	Matrix	Method	Prep Batch
320-110781-1	020A04P01	Total/NA	Water	3535	
320-110781-2	020A04P02	Total/NA	Water	3535	
320-110781-3	020A04P03	Total/NA	Water	3535	
320-110781-4	020A04P04	Total/NA	Water	3535	
320-110781-5	020A04P05	Total/NA	Water	3535	
MB 320-759537/1-A	Method Blank	Total/NA	Water	3535	
LCS 320-759537/2-A	Lab Control Sample	Total/NA	Water	3535	
LCSD 320-759537/3-A	Lab Control Sample Dup	Total/NA	Water	3535	

Analysis Batch: 762631

Lab Sample ID	Client Sample ID	Prep Type	Matrix	Method	Prep Batch
320-110781-1	020A04P01	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
320-110781-2	020A04P02	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
320-110781-3	020A04P03	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
320-110781-4	020A04P04	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
320-110781-5	020A04P05	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
MB 320-759537/1-A	Method Blank	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
LCS 320-759537/2-A	Lab Control Sample	Total/NA	Water	537 (modified)	759537
LCSD 320-759537/3-A	Lab Control Sample Dup	Total/NA	Water	537 (modified)	759537

Lab Chronicle

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Client Sample ID: 020A04P01

Lab Sample ID: 320-110781-1

Date Collected: 03/18/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Prep Type	Batch Type	Batch Method	Run	Dil Factor	Initial Amount	Final Amount	Batch Number	Prepared or Analyzed	Analyst	Lab
Total/NA	Prep	3535			0.025 mL	10.0 mL	759537	05/03/24 05:14	H1K	EET SAC
Total/NA	Analysis	537 (modified)		1	1 mL	1 mL	762631	05/12/24 10:33	S1C	EET SAC

Client Sample ID: 020A04P02

Lab Sample ID: 320-110781-2

Date Collected: 03/18/24 14:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Prep Type	Batch Type	Batch Method	Run	Dil Factor	Initial Amount	Final Amount	Batch Number	Prepared or Analyzed	Analyst	Lab
Total/NA	Prep	3535			0.75 mL	10.0 mL	759537	05/03/24 05:14	H1K	EET SAC
Total/NA	Analysis	537 (modified)		1	1 mL	1 mL	762631	05/12/24 10:43	S1C	EET SAC

Client Sample ID: 020A04P03

Lab Sample ID: 320-110781-3

Date Collected: 03/19/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Prep Type	Batch Type	Batch Method	Run	Dil Factor	Initial Amount	Final Amount	Batch Number	Prepared or Analyzed	Analyst	Lab
Total/NA	Prep	3535			0.75 mL	10.0 mL	759537	05/03/24 05:14	H1K	EET SAC
Total/NA	Analysis	537 (modified)		1	1 mL	1 mL	762631	05/12/24 10:53	S1C	EET SAC

Client Sample ID: 020A04P04

Lab Sample ID: 320-110781-4

Date Collected: 03/20/24 10:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Prep Type	Batch Type	Batch Method	Run	Dil Factor	Initial Amount	Final Amount	Batch Number	Prepared or Analyzed	Analyst	Lab
Total/NA	Prep	3535			0.75 mL	10.0 mL	759537	05/03/24 05:14	H1K	EET SAC
Total/NA	Analysis	537 (modified)		1	1 mL	1 mL	762631	05/12/24 11:03	S1C	EET SAC

Client Sample ID: 020A04P05

Lab Sample ID: 320-110781-5

Date Collected: 03/21/24 08:43

Matrix: Water

Date Received: 03/23/24 08:45

Prep Type	Batch Type	Batch Method	Run	Dil Factor	Initial Amount	Final Amount	Batch Number	Prepared or Analyzed	Analyst	Lab
Total/NA	Prep	3535			0.75 mL	10.0 mL	759537	05/03/24 05:14	H1K	EET SAC
Total/NA	Analysis	537 (modified)		1	1 mL	1 mL	762631	05/12/24 11:13	S1C	EET SAC

Laboratory References:

EET SAC = Eurofins Sacramento, 880 Riverside Parkway, West Sacramento, CA 95605, TEL (916)373-5600

Accreditation/Certification Summary

Client: Enspired Solutions
 Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Laboratory: Eurofins Sacramento

All accreditations/certifications held by this laboratory are listed. Not all accreditations/certifications are applicable to this report.

Authority	Program	Identification Number	Expiration Date
Alaska (UST)	State	17-020	02-20-27
ANAB	Dept. of Defense ELAP	L2468	01-20-27
ANAB	Dept. of Energy	L2468.01	01-20-27
ANAB	ISO/IEC 17025	L2468	01-20-27
Arizona	State	AZ0708	08-11-24
Arkansas DEQ	State	88-0691	05-18-24
California	State	2897	01-31-26
Colorado	State	CA00044	08-31-24
Florida	NELAP	E87570	06-30-24
Georgia	State	4040	01-29-25
Hawaii	State	Eurofins Sacramento	01-29-25
Illinois	NELAP	200060	03-31-25
Kansas	NELAP	E-10375	10-31-24
Louisiana	NELAP	01944	06-30-24
Louisiana (All)	NELAP	01944	06-30-24
Maine	State	CA00004	04-14-26
Michigan	State	9947	01-29-25
Nevada	State	CA00044	07-31-24
New Hampshire	NELAP	2997	04-19-25
New Jersey	NELAP	CA005	07-02-24
New York	NELAP	11666	04-01-25
Ohio	State	41252	01-29-25
Oregon	NELAP	4040	01-29-25
Texas	NELAP	T104704399-23-17	05-31-24
US Fish & Wildlife	US Federal Programs	A22139	04-30-25
USDA	US Federal Programs	P330-18-00239	02-28-26
Utah	NELAP	CA000442023-16	02-28-25
Virginia	NELAP	460278	03-14-25
Washington	State	C581	05-05-24 *
West Virginia (DW)	State	9930C	01-31-25
Wisconsin	State	998204680	08-31-25
Wyoming	State Program	8TMS-L	01-28-19 *

* Accreditation/Certification renewal pending - accreditation/certification considered valid.

Method Summary

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Method	Method Description	Protocol	Laboratory
537 (modified)	Fluorinated Alkyl Substances	EPA	EET SAC
3535	Solid-Phase Extraction (SPE)	SW846	EET SAC

Protocol References:

EPA = US Environmental Protection Agency

SW846 = "Test Methods For Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods", Third Edition, November 1986 And Its Updates.

Laboratory References:

EET SAC = Eurofins Sacramento, 880 Riverside Parkway, West Sacramento, CA 95605, TEL (916)373-5600



Sample Summary

Client: Enspired Solutions
Project/Site: PFAS, Foam Fractionate

Job ID: 320-110781-1

Lab Sample ID	Client Sample ID	Matrix	Collected	Received
320-110781-1	020A04P01	Water	03/18/24 08:43	03/23/24 08:45
320-110781-2	020A04P02	Water	03/18/24 14:43	03/23/24 08:45
320-110781-3	020A04P03	Water	03/19/24 08:43	03/23/24 08:45
320-110781-4	020A04P04	Water	03/20/24 10:43	03/23/24 08:45
320-110781-5	020A04P05	Water	03/21/24 08:43	03/23/24 08:45

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

West Sacramento, CA 95605-1500
phone 916 373 5600 fax 303 467 7248

Regulatory Program: RCRA Other NPDES DW

Project Manager:
Email: erin.hoffman@enspiredsolutions.com
Tel: (517) - 730 - 1345

Analysis Turnaround Time
 CALENDAR DAYS WORKING DAYS

TAT if different from Below _____
 2 weeks
 1 week
 2 days
 1 day

Client Contact
Enspired Solutions
3610 Forest Road, Suite 136
Lansing, MI 48910 Phone _____
N/A FAX _____
Project Name 020A
Site Enspired Solutions
P O # _____

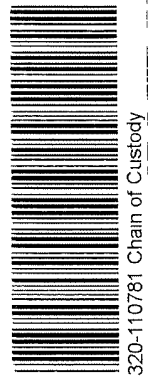
Site Contact: Erin Hoffman
Lab Contact: Erin Hoffman

Date: 03/22/2024
Carrier: _____

COC No: 1 of 1 COCs
TALS Project #: _____
Sampler: Erin Hoffman

For Lab Use Only:
Walk-in Client: _____
Lab Sampling: _____
Job / SDG No: _____

Sample Date	Sample Time	Sample Type (C=Comp, G=Grab)	Matrix	# of Cont.	Filtered Sample (Y/N)	Perform MS/MSD (Y/N)	PFAS - 28 Analytes
3/18/2024	8:43	G	W	1	N	N	X
3/18/2024	14:43	G	W	1	N	N	X
3/19/2024	8:43	G	W	1	N	N	X
3/20/2024	10:43	G	W	1	N	N	X
3/21/2024	8:43	G	W	1	N	N	X



Preservation Used: 1= Ice, 2= HCl; 3= H2SO4; 4=HNO3; 5=NaOH; 6= Other _____

Possible Hazard Identification:
Are any samples from a listed EPA Hazardous Waste? Please List any EPA Waste Codes for the sample in the Comments Section if the lab is to dispose of the sample
 Non-Hazard Flammable Infectious Unknown

Special Instructions/QC Requirements & Comments: All samples contains surfactants (total concentration unknown, but at least 50 ppm CTAC).
All samples are foam fractionation concentrates of landfill leachate.

Custody Seals Intact: Yes No Study Seal No W22785 Return to Client Disposal by Lab Archive for _____ Months

Relinquished by: Erin Hoffman Date/Time: 3/22/24 14:30
 Relinquished by: _____ Date/Time: _____
 Relinquished by: _____ Date/Time: _____

Sample Disposal (A fee may be assessed if samples are retained longer than 1 month)

Received by: [Signature] Date/Time: 3/23/24 08:15
 Received by: _____ Date/Time: _____
 Received in Laboratory by: _____ Date/Time: _____





Environment Testing

Sacramento Sample Receiving Notes (SSRN)

Loc 320
110781

Tracking # 2125 1624 2891

Job _____

SO / PO / FO / SAT 2-Day / Ground / UPS / CDO / Courier
GSL / OnTrac / Goldstreak / USPS / Other _____

Use this form to record Sample Custody Seal, Cooler Custody Seal, Temperature & corrected Temperature & other observations.
File in the job folder with the COC

Therm. ID <u>U2</u> Corr. Factor (+/-) _____ °C	Notes: _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____
Ice <input checked="" type="checkbox"/> Wet <input checked="" type="checkbox"/> Gel _____ Other _____	
Cooler Custody Seal: <u>2022984 / 2022785</u>	
Cooler ID: _____	
Temp Observed: <u>0.2</u> °C Corrected <u>0.2</u> °C From Temp Blank <input type="checkbox"/> Sample <input checked="" type="checkbox"/>	
Opening/Processing The Shipment <u>Yes</u> <u>No</u> <u>NA</u>	
Cooler compromised/tampered with? <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Cooler Temperature is acceptable? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Frozen samples show signs of thaw? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Initials <u>DM</u> Date <u>3/23/24</u>	
Unpacking/Labeling The Samples <u>Yes</u> <u>No</u> <u>NA</u>	Trizma Lot #(s) _____ _____ _____ Ammonium Acetate Lot #(s) _____ _____ _____
Containers are not broken or leaking? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Samples compromised/tampered with? <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
COC is complete w/o discrepancies <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sample custody seal? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Sample containers have legible labels? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sample date/times are provided? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Appropriate containers are used? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sample bottles are completely filled? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sample preservatives verified? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Is the Field Sampler's name on COC? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Login Completion <u>Yes</u> <u>No</u> <u>NA</u> Receipt Temperature on COC? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> NCM Filed? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Samples received within hold time? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Log Release checked in TALS? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Samples w/o discrepancies? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Zero headspace?* <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Alkalinity has no headspace? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Perchlorate has headspace? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> (Methods 314, 331, 6850)	
Multiphasic samples are not present? <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Initials <u>DM</u> Date <u>03/23/24</u>

*Containers requiring zero headspace have no headspace, or bubble < 6 mm (1/4")

Login Sample Receipt Checklist

Client: Ensired Solutions

Job Number: 320-110781-1

Login Number: 110781

List Source: Eurofins Sacramento

List Number: 1

Creator: Medeiros, Ryan M

Question	Answer	Comment
Radioactivity wasn't checked or is <=/ background as measured by a survey meter.	True	REFER TO SSRN
The cooler's custody seal, if present, is intact.	N/A	
Sample custody seals, if present, are intact.	N/A	
The cooler or samples do not appear to have been compromised or tampered with.	N/A	
Samples were received on ice.	N/A	
Cooler Temperature is acceptable.	N/A	
Cooler Temperature is recorded.	N/A	
COC is present.	N/A	
COC is filled out in ink and legible.	N/A	
COC is filled out with all pertinent information.	N/A	
Is the Field Sampler's name present on COC?	N/A	
There are no discrepancies between the containers received and the COC.	N/A	
Samples are received within Holding Time (excluding tests with immediate HTs)	N/A	
Sample containers have legible labels.	N/A	
Containers are not broken or leaking.	N/A	
Sample collection date/times are provided.	N/A	
Appropriate sample containers are used.	N/A	
Sample bottles are completely filled.	N/A	
Sample Preservation Verified.	N/A	
There is sufficient vol. for all requested analyses, incl. any requested MS/MSDs	N/A	
Containers requiring zero headspace have no headspace or bubble is <6mm (1/4").	N/A	
Multiphasic samples are not present.	N/A	
Samples do not require splitting or compositing.	N/A	
Residual Chlorine Checked.	N/A	



Bilag 4

4.ECT2 - Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter august 2023

Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter

Delrapport AP2

Indledning

I dette dokument beskrives pilotforsøget ved Odense Nord Miljøcenter, udført af ECT2 i august 2023, dokumentet indeholder beskrivelser af selve forsøget og dets formål samt en gennemgang af data fra de analyser, der blev udført

Dokumentet udgør en delrapport og er derfor ikke den endelige version. Det betyder, at eventuelle vurderinger og konklusioner i forbindelse med forsøget kan ændre sig i løbet af den videre proces i projektet.

Protokol

- Ved ankomsten den 09/08 var der placeret 5 palletanke på lokationen, hver indeholdende 1000L perkolat. Hver palletank var fyldt med perkolat fra en specifik celle. Her er navnene på cellerne og dermed også navnene på palletankene og de indsendte prøver.

- 1. Indløb**
- 2. DIC-PB-01**
- 3. D7A-PB-03**
- 4. Udligningstank efter rens**
- 5. Stige Ø D3B**

- Ved hver palletank blev der taget 2 bægerglas, hver på 0,5L, hvorefter forsøg med flokkulering blev igangsat. Ved flokkuleringen blev der anvendt Flourflok som er et specielt PFAS flokkuleringsmiddel, som binder PFAS til de dannede slamflokke. Inden udtagelse af prøverne blev tankene grundigt omrørt, for at sikre en repræsentativ prøve. Dannelsen af flokke og dermed dannelse af en slamfraktion varierede betydeligt mellem de forskellige prøver. Der var forskel i størrelsen på flokkene samt forskel i vandets klarhed efter flokkuleringen. Se billede på næste side.



1, billede af flokkulering

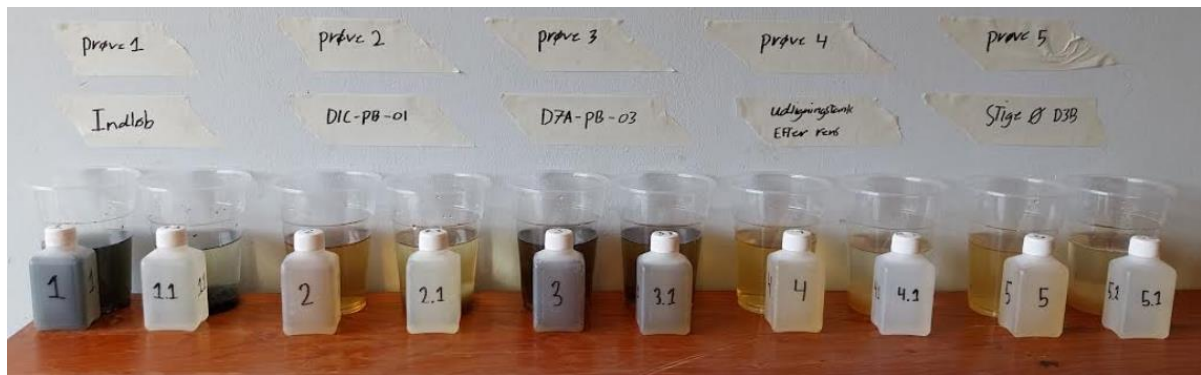
- Efter afsluttet forsøg med flokkulering blev der udført forsøg med afskumning. Vandet, som blev afskummet, stammede som aftalt fra celle D7A-PB-03. Vandet fik lov til at afskumme indtil der ikke længere blev dannet yderligere skum. Ved påfyldning af 12L perkolat i afskummeren blev der dannet cirka 0,5L koncentrat, svarende til en opkoncentrering på cirka 24 X.



2, billede af afskumning

- Efter afslutningen af pilotforsøget med flokkulering og afskumning blev der udtaget i alt 12 prøver, som blev sendt ind til analyse via Eurofins. Prøver fra alle udførte flokkuleringer blev tappet i prøveflasker af 100 ml efter filtrering. Navnene på prøverne ses herunder.

1. Indløb: Råvand	1.1: Indløb renset
2. DIC-PB-01: Råvand	2.1: DIC-PB-01 renset
3. D7A-PB-03: Råvand	3.1: D7A-PB-03 renset
4. Udligningstrank efter rens: Råvand	4.1: Udligningstank efter rens renset
5. Stige Ø D3B: Råvand	5.1: Stige Ø D3B renset
6. Efter afskumning D7A: Råvand	6.1: Koncentrat af afskumning fra D7A renset



3, billede af proevetagning

Kemikalier og dosering anvendt ved forsøg

Der blev anvendt ens dosering til alle flokkuleringerne, for at kunne sammenligne på tværs. Vandets farve og indhold af øvrige komponenter indikerer at der for nogen vandtyper kunne været anvendt mindre mængder PAX og Fluorfloc, uden at det havde påvirket reduktionen.

- PAX (Polyaluminiumchlorid)
 - Dosering: 500ml / m³
- FF (Fluorflok)
 - 500ml / m³
- Polymer 1330A
 - 30ml / m³

Opdateret d. 12/08-2024



I forsøget blev den samme dosering af kemikalier anvendt til alle prøverne. I kommende laboratorieforsøg vil der blive arbejdet med andre doseringer for at opnå en bedre klarhed i vandet og identificere den mest effektive fjernelse af PFAS-forbindelserne. Tilsvarende vil der blive arbejdet med at optimere flokkuleringerne så de både fjerner mest muligt PFAS, men også sikrer god fjernelse for tungmetaller.

Resultater

Alle resultater kan ses i

Table 3, Table 4, Table 5, Table 6, Table 7 i Bilag 1.

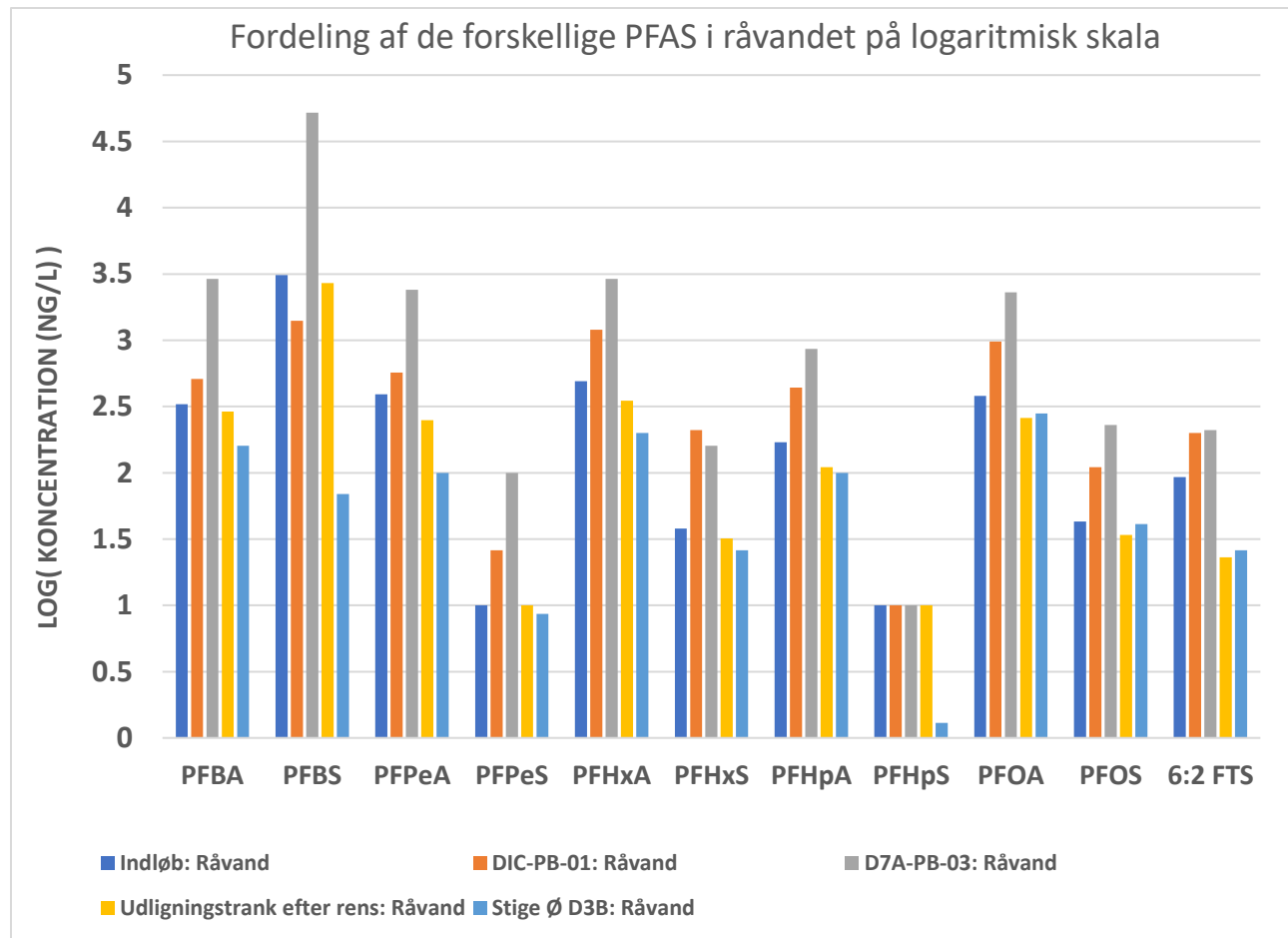


Figure 1

Figure 1 viser, at udover Stige Ø D3B indeholdt alle celler PFBS mest, ofte mindst 10 gange koncentrationen som den næsthøjeste PFAS-koncentration. I Stige Ø D3B var PFBA meget lavere end de andre celler, og i samme område som PFBA, PFPeA, PFHxA og PFHpA. Denne celle havde også generelt de laveste PFAS-koncentrationer.

D7A-PB-03 viser sig at have de højeste koncentrationer for alle udvalgte PFAS-molekyler. PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA og PFOA ligger i området 100-1000 ng/L for alle celler undtagen D7A-PB-03, mens PFPeS, PFHxS, PFOS og 6:2 FTS har vist sig at have et interval mere mellem 10-100 ng/L.

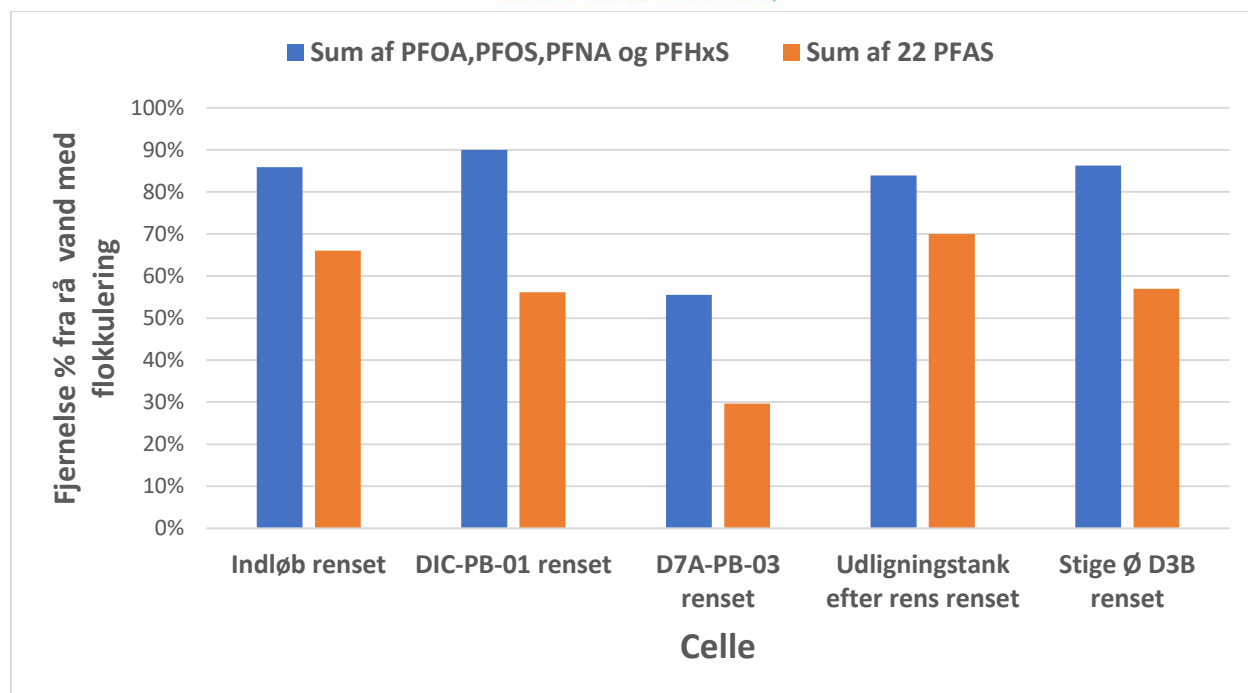


Figure 2

At Figure 2 fremgår det, at den mest effektive fjernelse af alle PFAS blev opnået i det til- og udgående vand i Odense Nord Vest Renseanlæg (ONVR). 66 % og 70 % af alle PFAS og 86 % og 84 % af PFAS 4 blev fjernet fra henholdsvis indgående og udgående vand. Til sammenligning viste D7A-PB-03-cellen den mindst effektive PFAS-fjernelse, hvor kun 30% af alle PFAS og 56% af PFAA 4 blev fjernet. Denne celle indeholdt dog også mest PFAS til at begynde med med en koncentration på 64000 ng/L PFAS 22. Det indgående og udgående vand indeholdt henholdsvis 5000 og 4000 ng/L, mere end 10 gange mindre i koncentrationen.

Når man ser på de mest udbredte PFAS og deres specifikke fjernelse i Figure 3, skiller PFHxS sig ud som den lettest fjernede PFAS for alle vandprøver, herunder for D7A-PB-03, hvor al anden PFAS-fjernelse er meget mindre sammenlignet med de andre celler. Desuden har PFOA, PFOS, 6:2 FTS også vist sig at blive effektivt fjernet ved flokkuleringer. PFBS fjernes effektivt fra den indgående til ONVR, DIC-PB-01 og den udgående fra ONVR, men ikke så meget fra Stige Ø D3B, hvor det også var til stede i de mindste mængder sammenlignet med andre PFAS i denne celle og niveauer af PFBS i andre celler. PFBA og PFPeA var de mindst effektive at fjerne, næsten ubetydelige i betragtning af usikkerheden på 31% i analysen.

Data passer godt overens med hvad vi har set andre steder, flokkulering er mere effektiv overfor sulfonsyrer end for carboxylsyrerne, et tydeligt eksempel er PFBA mod PFBS. Når carboxylsyrerne bliver tilstrækkeligt store molekyler fjernes de også.

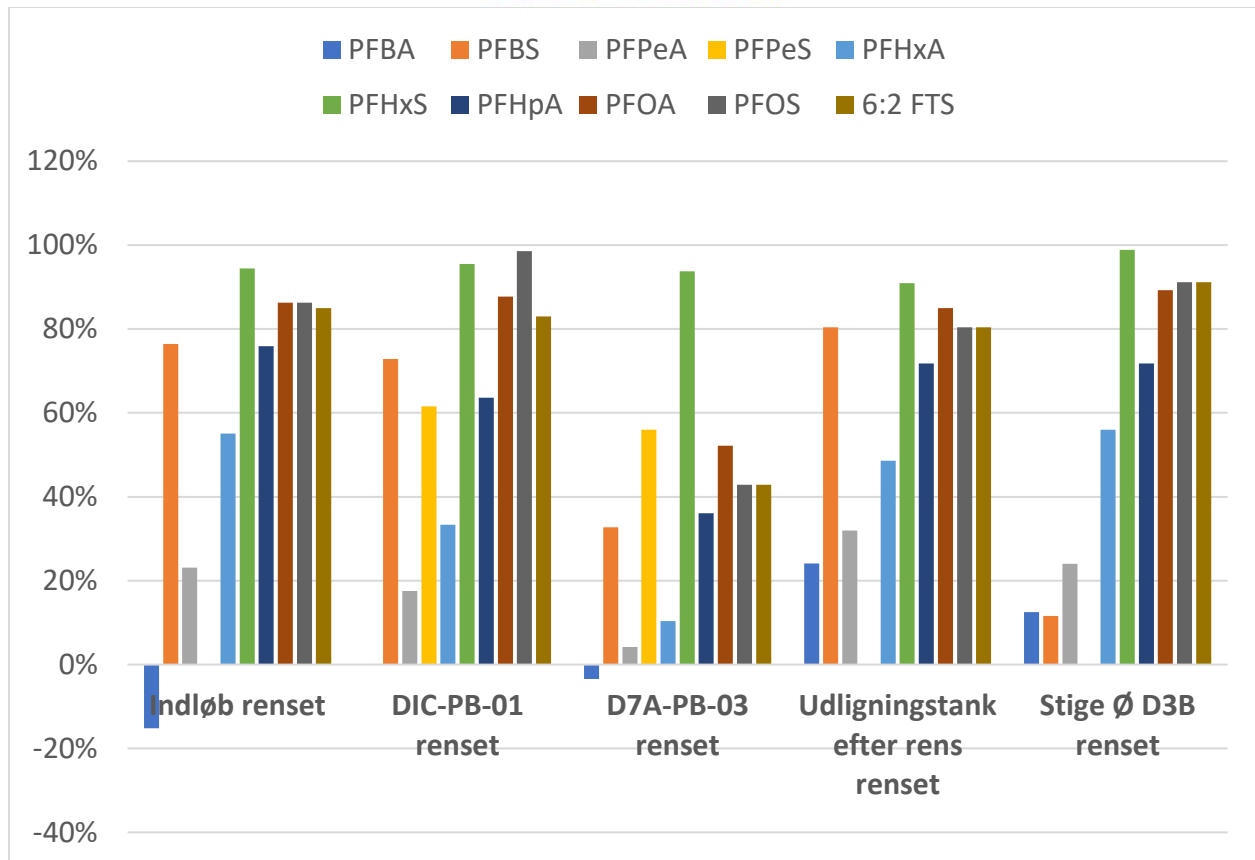


Figure 3

Table 1 viser resultaterne af skumfraktioneringen, at de kortkædede PFAS fjernes meget effektivt fra vandet, hvor PFAS 4 resulterer i en fjernelsesprocent på 96%. Når man ser på alle resultater i Flokkulering viser sig effektivt at fjerne en stor mængde PFAS direkte fra perkolat. Der blev opnået fjernelsesprocenter på op til 70 % for PFAS 22, hvor de langkædede PFAS kan opnå optag mellem 80-90 %. Blandt de kortkædede PFAS-molekyler blev dem med sulfonsyreerne fjernet effektivt som PFBS og PFPeS, mens carboxylsyreerne PFBA og PFPeA er dem, der er mest tilbage efter flokkulering.

Skumfraktionering viste sig at fjerne højere kædede PFAS-molekyler effektivt i en superkoncentreret fraktion.

Bilag 1

Table 2 i Bilag 1, kan det ses, at PFPeS og PFHxS fra den længere kæde PFAS også fjernes effektivt, mens PFBA, PFBS og PFHxA stort set forbliver i vandet. Alle andre PFAS kan fjernes effektivt, ofte under detektionsgrænserne, og det resulterende koncentrat fra skumfraktioneringen kan indeholde meget store mængder af alle PFAS.

Table 1 Resultat fra afskumning af vandet fra celle D7A-PB-03

	D7A-PB-03: Råvand (ng/L)	Efter afskumning D7A (ng/L)	Fjernet %	Koncentrat af afskumning fra D7A (ng/L)	Opkoncereret fra råvand %
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	2700	120	96%	12000	78%
Sum af 22 PFAS	64000	53000	17%	100000	36%

Konklusioner

Flokkulering viser sig effektivt at fjerne en stor mængde PFAS direkte fra perkolat. Der blev opnået fjernelsesprocenter på op til 70 % for PFAS 22, hvor de langkædede PFAS kan opnå optag mellem 80-90 %. Blandt de kortkædede PFAS-molekyler blev dem med sulfonsyreerne fjernet effektivt som PFBS og PFPeS, mens carboxylsyreerne PFBA og PFPeA er dem, der er mest tilbage efter flokkulering.

Skumfraktionering viste sig at fjerne højere kædede PFAS-molekyler effektivt i en superkoncentreret fraktion.

Bilag 1

Table 2

	D7A-PB-03: Råvand (ng/L)	Efter afskumning D7A (ng/L)	Fjernet %	Koncentrat af afskumning fra D7A (ng/L)
PFBA	2900	3100	-7%	2800
PFBS	52000	45000	13%	73000
PFPeA	2400	2400	0%	2600
PFPeS	100	22	78%	340
PFHxA	2900	2000	31%	5800
PFHxS	160	<10		1300
PFHpA	860	<10		2700
PFHpS	10	<10		94
PFOA	2300	50	98%	7100
PFOS	230	65	72%	3800
6:2 FTS	210	<10		750
PFOSA	12	<10		44
PFNA	36	<10		87
PFNS	<10	<10		<10
PFDA	24	<10		56
PFDS	<10	<10		<10
PFUnDA	<10	<10		<10
PFUnDS	<10	<10		<10
PFDoDA	<10	<10		<10
PFDoDS	<10	<10		<10
PFTTrDA	<10	<10		<10
PFTTrDS	<10	<10		<10
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	2700	120	96%	12000
Sum af 22 PFAS	64000	53000	17%	100000

Table 3 Results for Indløb til ONVR

	Indløb: Råvand (ng/L)	Indløb rensset (ng/L)	Fjernet %
PFBA	330	380	-15%
PFBS	3100	730	76%
PFPeA	390	300	23%
PFPeS	<10	<2,0	
PFHxA	490	220	55%
PFHxS	38	2.1	94%
PFHpA	170	41	76%
PFHpS	<10	<0,30	
PFOA	380	52	86%
PFOS	43	10	77%
6:2 FTS	93	14	85%
PFOSA	<10	<0,30	
PFNA	<10	0.62	
PFNS	<10	<0,30	
PFDA	<10	<0,30	
PFDS	<10	<0,30	
PFUnDA	<10	<0,30	
PFUnDS	<10	<0,30	
PFDoDA	<10	<0,30	
PFDoDS	<10	<1,0	
PFTTrDA	<10	<1,0	
PFTTrDS	<10	<0,30	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	460	65	86%
Sum af 22 PFAS	5000	1700	66%

Table 4 Results for DIC-PB-01

	DIC-PB-01: Råvand (ng/L)	DIC-PB-01 renset (ng/L)	Fjernet %
PFBA	510	510	0%
PFBS	1400	380	73%
PFPeA	570	470	18%
PFPeS	26	<10	
PFHxA	1200	800	33%
PFHxS	210	9.5	95%
PFHpA	440	160	64%
PFHpS	<10	<0,30	
PFOA	980	120	88%
PFOS	110	1.6	99%
6:2 FTS	200	34	83%
PFOSA	<10	<0,30	
PFNA	19	0.78	96%
PFNS	<10	<0,30	
PFDA	<10	<0,30	
PFDS	<10	<0,30	
PFUnDA	<10	<0,30	
PFUnDS	<10	<0,30	
PFDoDA	<10	<0,30	
PFDoDS	<10	<1,0	
PFTTrDA	<10	<1,0	
PFTTrDS	<10	<0,30	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	1300	130	90%
Sum af 22 PFAS	5700	2500	56%

Table 5 Results for D7A-PB-03

	D7A-PB-03: Råvand (ng/L)	D7A-PB-03 renset (ng/L)	Fjernet %
PFBA	2900	3000	-3%
PFBS	52000	35000	33%
PFPeA	2400	2300	4%
PFPeS	100	44	56%
PFHxA	2900	2600	10%
PFHxS	160	<10	
PFHpA	860	550	36%
PFHpS	<10	<10	
PFOA	2300	1100	52%
PFOS	230	41	82%
6:2 FTS	210	120	43%
PFOSA	12	<10	
PFNA	36	12	67%
PFNS	<10	<10	
PFDA	24	<10	
PFDS	<10	<10	
PFUnDA	<10	<10	
PFUnDS	<10	<10	
PFDoDA	<10	<10	
PFDoDS	<10	<10	
PFTTrDA	<10	<10	
PFTTrDS	<10	<10	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	2700	1200	56%
Sum af 22 PFAS	64000	45000	30%

Table 6 Results for udløb fra ONVR

	Udligningstrank efter rens: Råvand (ng/L)	Udligningstank efter rens renset (ng/L)	Fjernet %
PFBA	290	220	24%
PFBS	2700	530	80%
PFPeA	250	170	32%
PFPeS	<10	1.6	
PFHxA	350	180	49%
PFHxS	32	2.9	91%
PFHpA	110	31	72%
PFHpS	<10	<0,30	
PFOA	260	39	85%
PFOS	34	10	71%
6:2 FTS	23	4.5	80%
PFOSA	<10	<0,30	
PFNA	<10	1.1	
PFNS	<10	<0,30	
PFDA	<10	1	
PFDS	<10	<0,30	
PFUnDA	<10	<0,30	
PFUnDS	<10	<0,30	
PFDoDA	<10	<0,30	
PFDoDS	<10	<1,0	
PFTTrDA	<10	<1,0	
PFTTrDS	<10	<0,30	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	330	53	84%
Sum af 22 PFAS	4000	1200	70%

Table 7 Results for Stige Ø D3B

	Stige Ø D3B: Råvand (ng/L)	Stige Ø D3B renset (ng/L)	Fjernet %
PFBA	160	140	13%
PFBS	69	61	12%
PFPeA	100	76	24%
PFPeS	8.6	<2,0	
PFHxA	200	88	56%
PFHxS	26	<0,30	
PFHpA	100	18	82%
PFHpS	1.3	<0,30	
PFOA	280	30	89%
PFOS	41	17	59%
6:2 FTS	26	2.3	91%
PFOSA	1.4	0.33	76%
PFNA	5	0.63	87%
PFNS	<0,30	<0,30	
PFDA	1.4	1.2	14%
PFDS	<0,30	<0,30	
PFUnDA	<0,30	<0,30	
PFUnDS	<0,30	<0,30	
PFDoDA	<0,30	<0,30	
PFDoDS	<1,0	<1,0	
PFTTrDA	<1,0	<1,0	
PFTTrDS	<0,30	<0,30	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	350	48	86%
Sum af 22 PFAS	1000	430	57%

Bilag 5
5.ECT2 - Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter marts-maj
2024

Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter *Delrapport AP3*

Indledning

I dette dokument beskrives pilotforsøgene udført ved Odense Nord Miljøcenter, udført af ECT2 i marts-maj 2024. Dokumentet indeholder beskrivelser af selve forsøgene og deres formål samt en gennemgang af data fra de analyser, der blev udført

Dokumentet udgør en delrapport og er derfor ikke den endelige version. Det betyder, at eventuelle vurderinger og konklusioner i forbindelse med forsøget kan ændre sig i løbet af den videre proces i projektet.

Protokol

- Ved ankomsten den 14/03 var der placeret 2 palletanke på lokationen, indeholdende henholdsvis 1000L ind- og udløbsperkolat fra forrenseanlægget ved ONM (disse vil blive omtalt som ind- og udgående vand efterfølgende). Prøverne blev taget fra både ind- og udgående vand, som 0-prøve.



- Flokkulering blev efterfølgende udført i de to palletanke, for at fjerne så meget som muligt direkte fra perkolatet. Dosering var den samme som i Arbejdspakke 1, da dette havde godt effekt:
 - PAX (Polyaluminiumchlorid)
 - Dosering: 500ml / m³
 - FF (Fluorflok)
 - 500ml / m³
 - Polymer 1330A
 - 30ml / m³

Den klare vandfase blev efterfølgende filtreret til to andre palletanker og koblet til hver sin resinkolonne til rensning af PFAS rester. Den anvendte resin var med 300 ml bed volume, 1,5 L / time flowrate, hvilket svarer til 5 bedvolume (BV) / time og 12 minutters opholdstid.

- Prøver blev udtaget før start af pumpningen gennem resinkolonnerne og også 60 minutter efter starten af kolonnerne, for at se den optimale fjernelse med kolonnerne. Derudover blev der forberedt en prøvetagningsplan til sikring at der blev udtaget en prøve cirka hver 2. dag i ca. 2 uger for at vurdering af resinets kapacitet og dermed kunne vurdere hvor ofte det forventes at skulle skiftes på et senere fuldskala-anlæg.
- Der blev også udført en ekstra flokkulering for cellen D7A-PB-03 for at se, om der kan opnås bedre resultater. Doseringen af PAX og FF forblev den samme som beskrevet ovenfor, mens polymeren blev ændret til Polymer 1587 med samme dosering.
- Den 22/03 blev pumpen til kolonne 1 stoppet på grund af tilstopning fra partikler i kolonnen fra palletanken. Da der ikke kunne udtages den optimale mængde af prøve og der var 600 L vand tilbage i palletanken, blev en ny kolonne blev tilkoblet til det resterende vand og et nyt forsøg for kolonne 1 blev udført. Denne tilkobling blev udført den 27/03.
- Den 25/03 var også udtaget prøver til analyse for miljøfarlige forurenede stoffer, nitrifikationshæmning og tungmetaller i perkolatet. Prøverne inkludere
 - Indgående Råvand: (MFS + metaller + Nitrifikationshæmning)
 - Indgående Behandlet (*med flokkulering*): (MFS + metaller + Nitrifikationshæmning)
 - Udgående Råvand: (MFS + metaller + Nitrifikationshæmning)
 - Udgående Behandlet (*med flokkulering*): (MFS + metaller + Nitrifikationshæmning)De blev sendt ind til analyse via Eurofins for ABK Perkolat – MFS + Metaller og PCAS1 Nitrifikationshæmning analyseprogramer.



- Efter afslutningen af pilotforsøget med flokkulering og kolonneforsøg var der udtaget i alt 16 prøver (ud over de prøver, der er beskrevet i det foregående punkt til metalanalyser), som blev sendt ind til PFAS analyse hos Eurofins. Prøver blev tappet i prøveflasker af 100mL. Navnene på prøverne ses herunder.

Kolonne nr.	Dato	Tid	Vandmængde i IBC	Prøve ID
-	14/03-2024		-	D7A – Råvand
-	14/03-2024		-	D7A - Behandlet
-	14/03-2024		-	Indgående Råvand
-	14/03-2024		-	Udgående Råvand
	14/03-2024		-	Indgående Behandlet
	14/03-2024		-	Udgående Behandlet
1	27/03-2024	15:00	600 L	1 (60 min)
1	29/03-2024	18:45	440 L	2
1	01/04-2024	07:00	250 L	3
1	03/04-2024	08:20	50 L	4
1	04/04-2024	07:10	0-50 L	5
2	14/03-2024	18:15	900 L	60 min
2	18/03-2024	09:10	600 L	6
2	20/03-2024	09:55	450 L	7
2	22/03-2024	13:00	270 L	8
2	25/03-2024	07:10	50 L	9

Resultater

Evaluering af flokkulering (Celle D7A-PB-03)

Visuelt var det svært at se en forskel for flokkuleringens effektivitet ved brug af Polymer 1587 i stedet for Polymer 1330A. Resultaterne viser dog en bedre fjernelse som det fremgår af tabel 1 nedenfor. Cellen, som diskuteret i Delrapport AP2, indeholder de højeste koncentrationer af PFAS og blev mindst fjernet ved flokkuleringen. Ved hjælp af den anden polymer kunne der opnås en PFAS-fjernelse, der minder meget om de andre celler, hvilket viser, at selv høje koncentrationer kan reduceres, når man justerer kemien, når det er nødvendigt.

Table 1 Resultater fra den nye flokkulering af celle D7A-PB-03

	D7A Råvand Polymer 1330A (ng/L)	D7A Behandlet Polymer 1330A (ng/L)	Fjernet %	D7A Råvand Polymer 1587 (ng/L)	D7A Behandlet Polymer 1587 (ng/L)	Fjernet %
Sum af PFOA,PFOS, PFNA og PFHxS	2700	1200	56%	3200	270	92%
Sum af 22 PFAS	64000	45000	30%	69000	20000	71%

Evaluering af flokkulering (Indgående og Udgående)

I Den viser også, at de samlede koncentrationer af PFAS er højere i det udgående vand sammenlignet med det indgående. Resultaterne indikerer også en mere effektiv fjernelse fra de højere koncentrationer, men her skal der også tages højde for analyseusikkerheden på 31% for alle PFAS-resultater i Eurofins-analysere.

Table 1 oversigten over den samlede PFAS-fjernelse ved flokkulering med Fluorflok viste, at 74 % og 76 % af alle PFAS blev fjernet fra henholdsvis det indgående og det udgående vand. Desuden blev 96% og 97% af PFAS 4 (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS) fjernet henholdsvis fra det indgående og det udgående vand. Den viser også, at de samlede koncentrationer af PFAS er højere i det udgående vand sammenlignet med det indgående. Resultaterne indikerer også en mere effektiv fjernelse fra de højere koncentrationer, men her skal der også tages højde for analyseusikkerheden på 31% for alle PFAS-resultater i Eurofins-analysere.

Table 1 Resumé af flokkulering vedrørende PFAS 22 og PFAS 4

	Indgående råvand (ng/L)	Indgående Flokkuleret (ng/L)	Fjernet %	Udgående Råvand (ng/L)	Udgående Flokkuleret (ng/L)	Fjernet %
Sum af PFOA,PFOS, PFNA og PFHxS	580	24	96%	890	29	97%
Sum af 22 PFAS	5400	1400	74%	8000	1900	76%

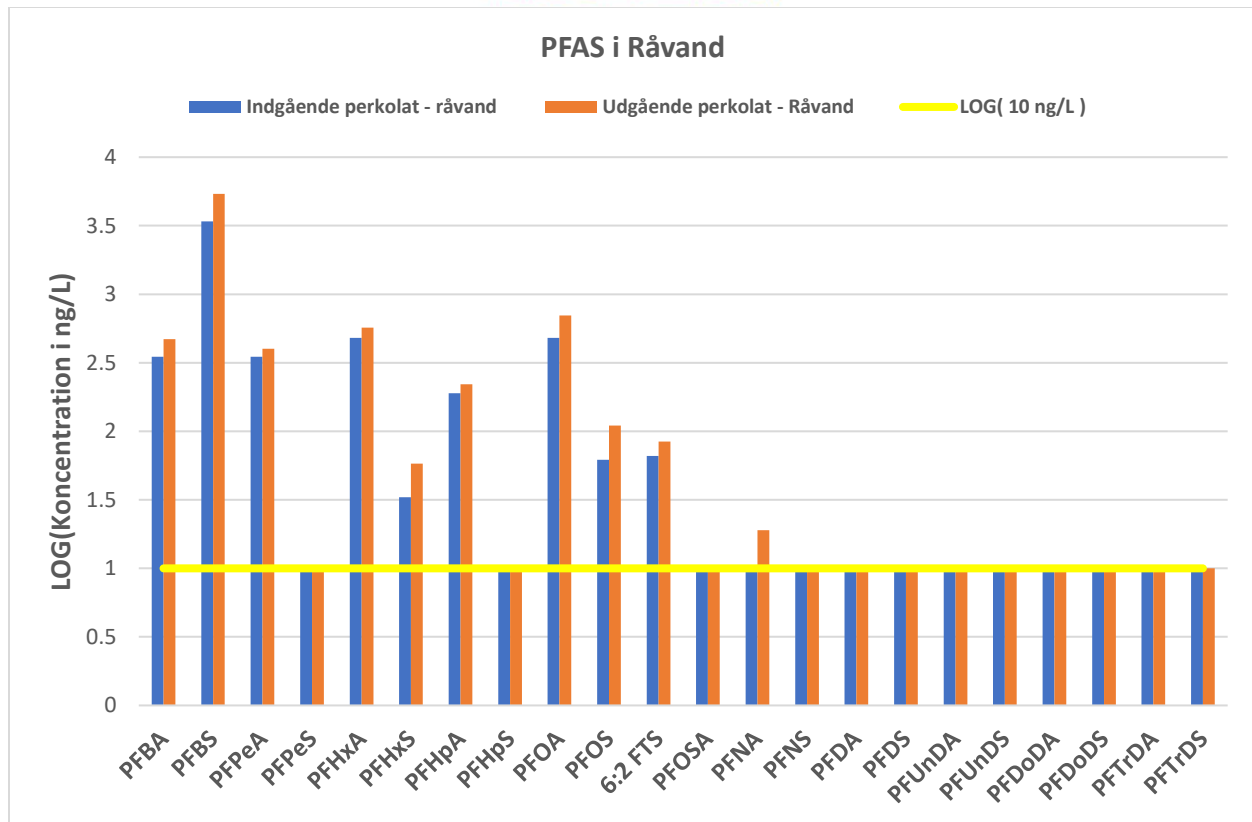


Figure 1 Fordeling af de 22 PFAS i indgående og udgående råvand

Figure 1 viser fordelingen af de forskellige PFAS-molekyler før flokkulering på logaritmsk skala (Se Table 2 for de oprindelige resultater) for at muliggøre sammenligning. Mens detektionsgrænsen er 0,3 ng/l for de fleste PFAS undtagen PFDaDS og PFTTrDA (DL = 1 ng/l), afslørede resultaterne fra Eurofins kun, at koncentrationerne er under 10 ng/l for PFPeS, PFHpS, PFOSE, PFNS, PFDA, PFDS, PFUnDA, PFUnDS, PFDaDa, PFDaDAm PFTTrDA og PFTTrDS. Denne grænse er fremhævet med den gule linje på grafen. Denne stigning i detektionsgrænserne kan skyldes den høje koncentration af andre forbindelser og dermed perkolatets høje matrixeffekter.

Figure 2 viser fordelingen af PFAS-molekyler efter flokkulering med de logaritmiske koncentrationer ganget med 100 for et bedre overblik over fordelingen mellem molekylerne (Se Table 2 for de oprindelige resultater). Her repræsenterer den gule linje detektionsgrænsen på 0,3 ng/L, der gælder for de fleste, mens PFDaDS og PFTTrDA ligger under deres detektionsgrænse på 1 ng/L.

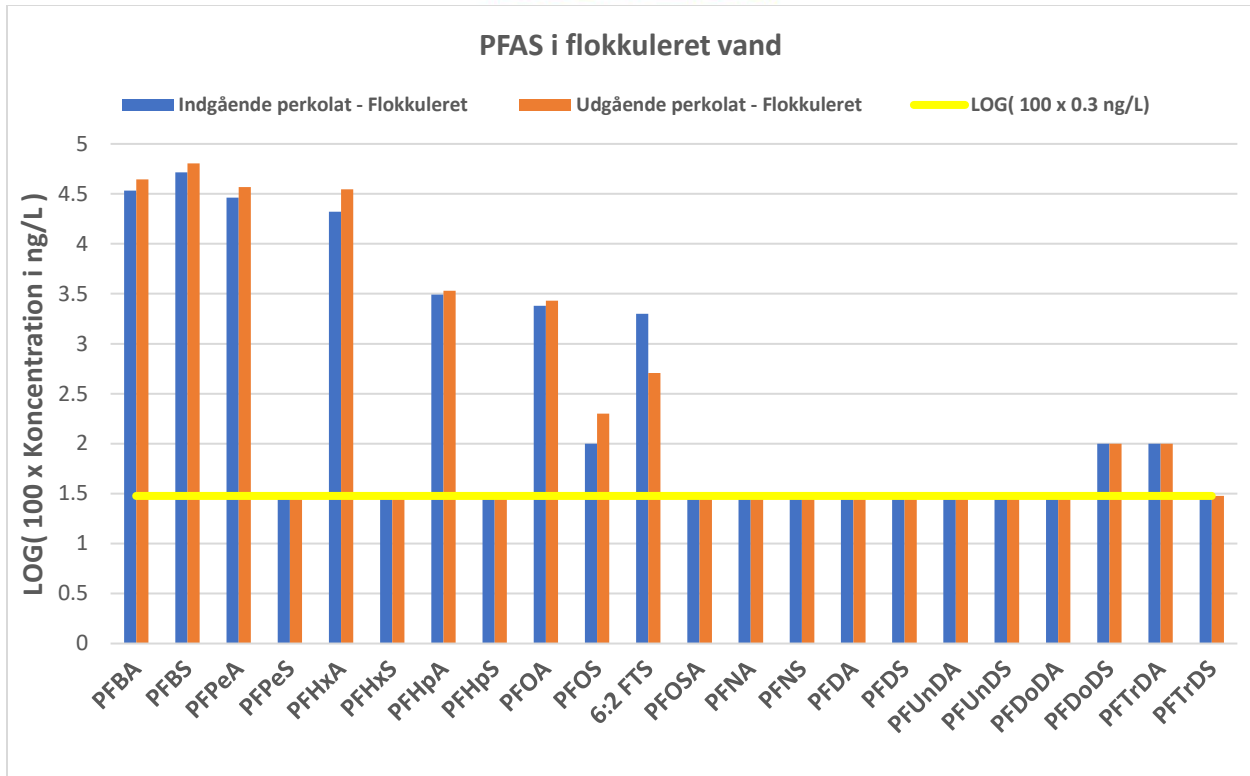


Figure 2 Fordeling af de 22 PFAS i flokkuleret indgående og udgående vand

På den baggrund kan det ikke udelukkes, at PFAS-molekyler, der oplyses som under 10 ng/l i råvandsanalysen, er til stede.. I de flokkulerede vandprøver er disse imidlertid alle under deres detektionsgrænser, og derfor vil disse PFAS-molekyler blive udelukket i den igangværende diskussion af resultaterne, og fokus vil være på den højere koncentration PFBA, PFBS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFHxS, PFOA, PFOS og 6: 2 FTS.

Koncentrationerne for de udvalgte PFAS-molekyler i det ind- og udgående vand til både før og efter flokkulering er angivet i Table 3, sammen med de tilsvarende fjernelsesprocenter. Ser man på koncentrationen, er det klart, at det udgående vand fra ONVR indeholder et højere niveau af alle PFAS sammenlignet med det indgående vand. For PFBS, PFOA og PFOS tæt på det dobbelte af koncentrationen. Dette skyldes sandsynligvis en ændring i de indkommende PFAS-koncentrationer sammen med opholdstiden i den biologiske proces.

I Figure 3 sammenlignes fjernelsesprocenterne også på et søjlediagram for de udvalgte PFAS-molekyler. Det viser, at flokkulering er meget effektiv for PFHxS, PFOA og PFOS, hvor fjernelsesraterne er tæt på 100%.

Table 2 Alle resultater for ind- og udgående vand før og efter flokkulering

Komponent	Enhed	Indgående perkolat - råvand	Indgående perkolat - Behandlet	% fjernet	Udgående perkolat - Råvand	Udgående perkolat - Behandlet	% fjernet
PFBA	ng/l	350	340	3%	470	440	6%
PFBS	ng/l	3400	520	85%	5400	640	88%
PFPeA	ng/l	350	290	17%	400	370	8%
PFPeS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFHxA	ng/l	480	210	56%	570	350	39%
PFHxS	ng/l	33	<0.3		58	<0.3	
PFHpA	ng/l	190	31	84%	220	34	85%
PFHpS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFOA	ng/l	480	24	95%	700	27	96%
PFOS	ng/l	62	1	98%	110	2	98%
6:2 FTS	ng/l	66	20	70%	84	5.1	94%
PFOSA	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFNA	ng/l	<10	<0.3		19	<0.3	
PFNS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFDA	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFDS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFUnDA	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFUnDS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFDoDA	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
PFDoDS	ng/l	<10	<1		<10	<1	
PFTTrDA	ng/l	<10	<1		<10	<1	
PFTTrDS	ng/l	<10	<0.3		<10	<0.3	
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	ng/l	580	24	96%	890	29	97%
Sum af 22 PFAS	ng/l	5400	1400	74%	8000	1900	76%

PFBS og PFHpA fjernes også effektivt med fjernelsesrater over 85%, mens PFOA fjernes relativt effektivt, med en vis forskel i det ind- og udgående vand. I dette tilfælde opnås 94 % fjernelse fra 84 ng/l ned til 5,1 ng/l, og kun 70 % startende fra 66 ng/l ned til 20 ng/l.

PFHxA viser en beskedent fjernelse på 56% og 39% for henholdsvis ind- og udgående vand. PFBA og PFPeA viser de mindste fjernelsesrater, hvor fjernelse af PFBA er næsten ubetydelig.

Table 3 Koncentration af de udvalgte PFAS-molekyler i ind- og udgående vand før og efter flokkulering

	Indgående Råvand (ng/L)	Indgående Flokkuleret (ng/L)	Fjernet %	Udgående Råvand (ng/L)	Udgående Flokkuleret (ng/L)	Fjernet %
PFBA	350	340	3%	470	440	6%
PFBS	3400	520	85%	5400	640	88%
PFPeA	350	290	17%	400	370	8%
PFHxA	480	210	56%	570	350	39%
PFHxS	33	0.3	99%	58	0.3	99%
PFHpA	190	31	84%	220	34	85%
PFOA	480	24	95%	700	27	96%
PFOS	62	1	98%	110	2	98%
6:2 FTS	66	20	70%	84	5.1	94%

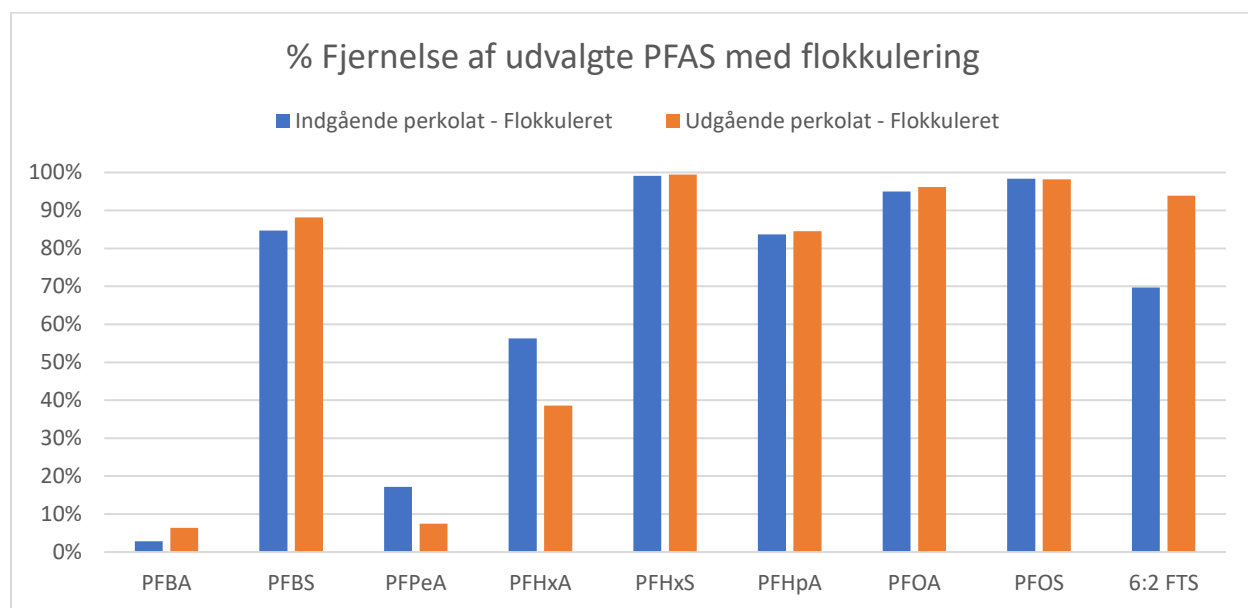


Figure 3 Fjernelse af udvalgte PFASer med flokkulering

Baseret på fjernelsesprocenterne i Figure 3 fungerede flokkulering bedre for PFOA og PFBA i det udgående vand, mens det fungerede bedre for PFPeA og PFPeS fra det indgående vand. Igen kan disse forskelle tilskrives usikkerheden på 30% i Eurofins-analysen, så der kan ikke entydigt konkluderes på disse

Samlet set viser flokkulering sig at være en effektiv behandling til fjernelse af størstedelen af PFAS, især i betragtning af PFBS, PFOA, PFHxS og PFOS. PFHxS fjernes til under detektionsgrænserne, og derfor medtages det ikke i den følgende harpikskolonneevaluering. Det er tydeligt at der er størst effekt på sulfonsyrerne (dem der ender på S). De største koncentrationer, der er tilbage, er den kortkædede PFBA, PFBS (selvom mere end 80% fjernes), PFPeA og PFHxA. Data passer godt overens med hvad vi har set andre steder, flokkulering er mere effektiv overfor sulfonsyrer end for carboxylsyrerne, et tydeligt eksempel er PFBA mod PFBS. Når carboxylsyrerne bliver tilstrækkeligt store molekyler fjernes de også.

Evaluering af resinkolonne rensning

Tabel 4 Parametre for kolonneeksperimentet

Resinvolumen (bedvolumen)	300	mL
Flowhastighed gennem søjlen	1.5	L/time
Tilsvarende opholdstid	12	min
Tilsvarende BV/hr	5	BV/time

Alle relevante koncentrationer fremgår af Table 5 sammen med fjernelsesprocenterne. Resultaterne for kolonneeksperimenterne er forskellige for kolonne 1 og kolonne 2, som det ses bedst i Figure 4 og Figure 5. Mens kolonne 1 har vist en total reduktion af PFAS indtil mindst 565 bedvolumener og gennembrud startende fra omkring 925 bed volumener, har kolonne 2 vist et gennembrud af PFAS fra det første prøvepunkt på 439 bedvolumener. I kolonne 1 ligger de øvrige PFAS alle under detektionsgrænserne for alle prøver, mens de for kolonne 2 også viser gennembrud som vist i Figure 6.

COD-målinger kan hjælpe med at forstå, om denne forskel kommer fra mængden af forurenende stoffer, der er til stede i vandet efter flokkuleringen, hvor vandet efter den biologiske behandlingsproces kan have en større mængde organiske stoffer til stede.

Den højeste koncentration PFBS fjernes derimod fuldstændigt i både kolonne 1 og kolonne 2 gennem alle prøverne, selv når andre PFAS er ved eller begynder at bryde igennem. Dette stemmer også overens med hvad vi ser mange andre steder.

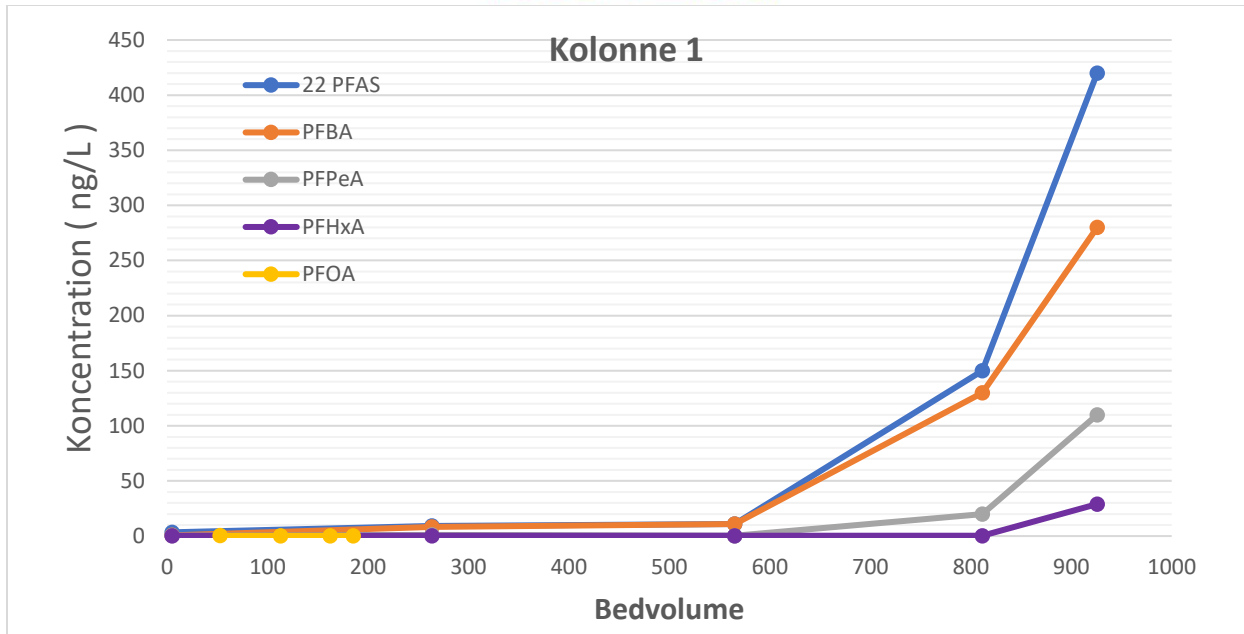


Figure 4 Udviklingen i samlet PFAS 22, PFBA, PFPeA og PFHxA efter passerede bedvolumener i kolonne 1

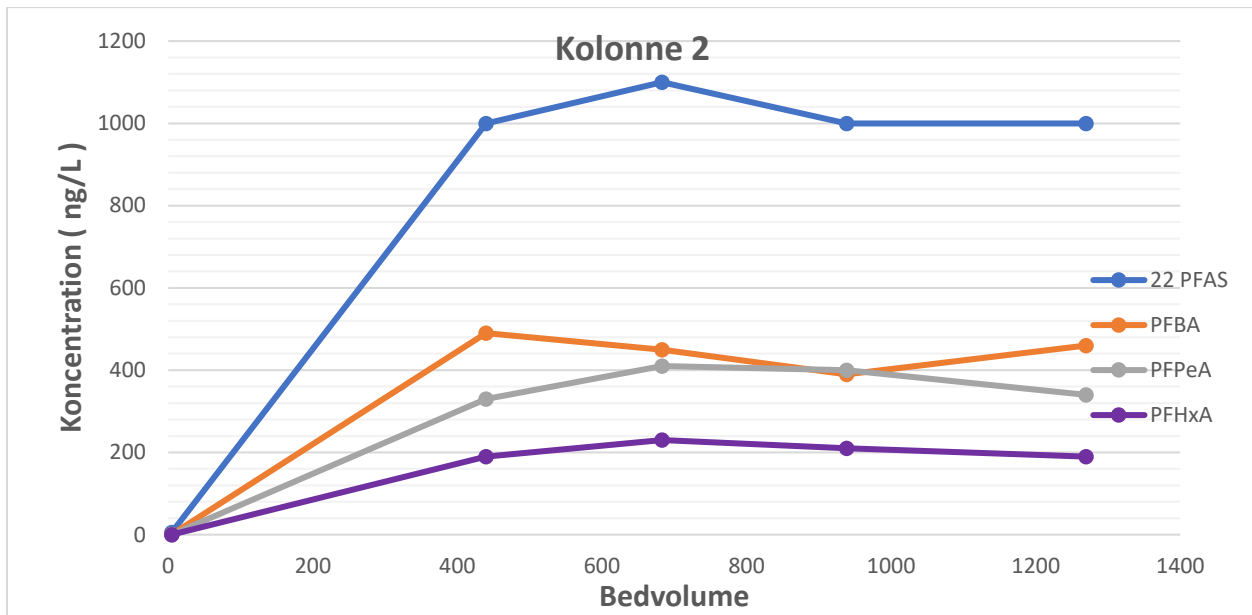


Figure 5 Udviklingen i samlet PFAS 22, PFBA, PFPeA og PFHxA efter passerede bedvolumener i kolonne 2

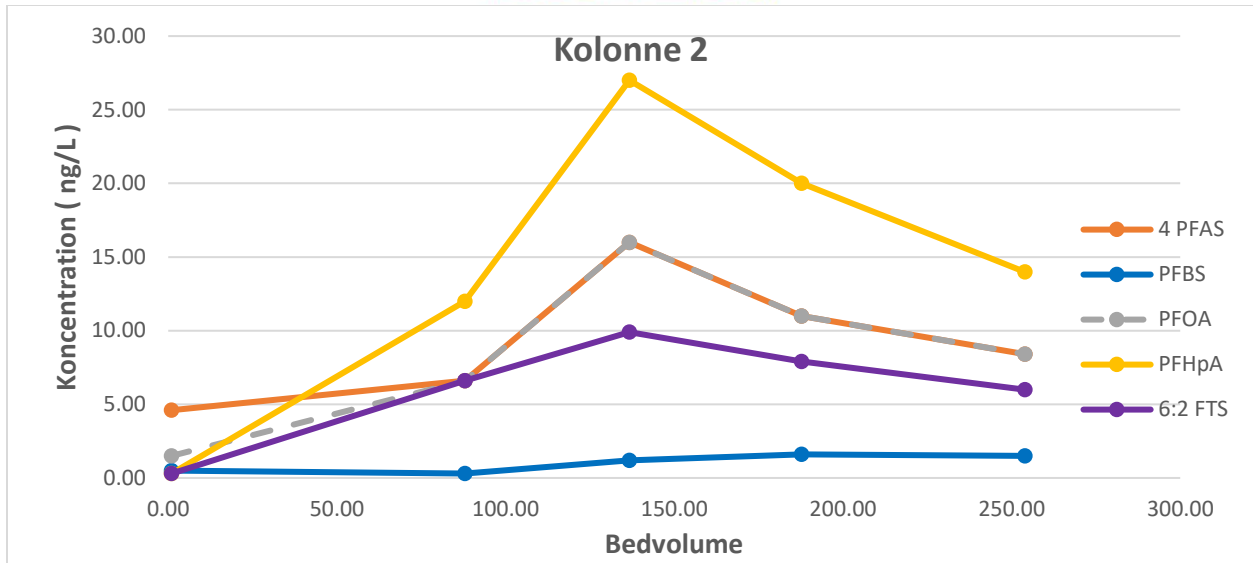


Figure 6 Udviklingen i PFAS 4, PFBS, PFOA, PFHpA og 6: 2 FTS efter passerede bedvolumener i kolonne 2



Table 5 Results of concentrations from the Eurofins analysis together with the removal percentages using the flocculated concentrations from Table 3

Kolonne 1																				
4 PFAS		22 PFAS		PFBA		PFBS		PFPeA		PFHxA		PFHpA		PFOA		PFOS		6:2 FTS		
BV	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %
5	1		3.4	100%	0.6	100%	0.56	100%	0.59	100%	0.3	100%	0.3	99%	0.37	98%	0.66	34%	1.2	94%
263.75	n/a	n/a	9.2	99%	8.2	98%	0.3	100%	1	100%	0.3	100%	10	68%	0.3	99%	0.2	80%	0.3	99%
565	n/a	n/a	11	99%	11	97%	0.3	100%	0.3	100%	0.3	100%	0.3	99%	0.3	99%	0.2	80%	0.3	99%
811	n/a	n/a	150	89%	130	62%	0.95	100%	20	93%	0.3	100%	0.3	99%	0.3	99%	0.2	80%	0.3	99%
925	n/a	n/a	420	70%	280	18%	0.3	100%	110	62%	29	86%	0.3	99%	0.3	99%	0.2	80%	0.45	98%

Kolonne 2																				
4 PFAS		22 PFAS		PFBA		PFBS		PFPeA		PFHxA		PFHpA		PFOA		PFOS		6:2 FTS		
BV	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %	Konc. (ng/L)	Fjernet %
5	4.60	84%	5.70	100%	0.60	100%	0.50	100%	0.30	100%	0.30	100%	0.30	99%	1.50	94%	3.10	-55%	0.30	94%
439	6.60	77%	1000.00	47%	490.00	-11%	0.30	100%	330.00	11%	190.00	46%	12.00	65%	6.6	76%	0.2	90%	6.6	-29%
683	16.00	45%	1100.00	42%	450.00	-2%	1.20	100%	410.00	-11%	230.00	34%	27.00	21%	16.00	41%	0.20	90%	9.90	-94%
938	11.00	62%	1000.00	47%	390.00	11%	1.60	100%	400.00	-8%	210.00	40%	20.00	41%	11.00	59%	0.20	90%	7.90	-55%
1269	8.40	71%	1000.00	47%	460.00	-5%	1.50	100%	340.00	8%	190.00	46%	14.00	59%	8.40	69%	0.20	90%	6.00	-18%

Evaluering af fjernelsen af andre miljøforurenende stoffer

Table 6 viser resultaterne for analysen af tungmetallerne i det ind- og udgående vand før og efter flokkulering. Den viser, at der blev opnået relativt høje fjernelseshastigheder (over 50%) for bly, chrom og zink. Der kan også påvises en vis fjernelse for cadmium, nikkel og kobber, mens kviksølv viste en lille stigning, hvilket kan tilskrives den lave koncentration af kviksølv sammen med analyseusikkerheden, hvilket konkluderer, at det ikke fjernes ved flokkulering. Disse resultater er opnået uden tilsætning af speciel kemi i forhold til metallerne, alene med flokkulering for PFAS. I betragtning af at yderligere koaguleringsmidler som Metalsorb og TMT kan bruges til målrettet fjernelse af tungmetaller, indikerer disse resultater en rimelig yderligere fjernelse af tungmetal, når fokus primært er på fjernelse af PFAS.

Table 6 Tungmetalkoncentrationer med en fortynding på 200 ml/l

	Indgående Råvand (µg/L)	Indgående behandlet (µg/L)	Fjernet %	Udgående Råvand (µg/L)	Udgående behandlet (µg/L)	Fjernet %
Nitrifikationshæm 1 konc/std.slam	< 20	< 20	0%	< 20	< 20	0%
Bly (Pb)	2.7	< 0,5	>81.48%	1.5	< 0,5	>66.67%
Cadmium (Cd)	0.065	< 0,05	>23.07%	0.075	< 0,05	>33.33%
Chrom (Cr)	9.3	4.2	55%	14	3.5	75%
Kobber (Cu)	9.7	5	48%	9	4.8	47%
Kviksølv (Hg)	0.11	0.16	-45%	0.13	0.16	-23%
Nikkel (Ni)	59	42	29%	63	41	35%
Zink (Zn)	24	10	58%	36	12	67%

Table 7 viser, at kulbrinterne er steget efter flokkulering, hvilket sandsynligvis skyldes tilsætning af koaguleringsmidler og flokkuleringsmidler. Optimering af dosering kan hjælpe med at reducere stigningen. Det viser også stigning i aromatiske kulbrinter, men koncentrationerne af disse er lave, og ændringerne i dem skyldes sandsynligvis analysens usikkerhed.

Table 8 viser, at PAH'erne i det indgående vand oprindeligt er højere end i det udgående vand, hvilket viser en effektiv fjernelse af disse ved den biologiske behandling. Flokkulering i det tilførte vand viser at fjerne ca. 95% PAH'er ifølge Eurofins-analysen, men mange af resultaterne er tæt på eller ved detektionsgrænsen, derfor er det vanskeligt at konkludere den reelle effektivitet af flokkulering for disse forurenende stoffer. Det samme gælder for phenoler og ethoxylater i Table 9, hvor resultaterne viser en vis fjernelse for visse forurenende stoffer, men resultaterne ligger tæt på deres detektionsgrænser.

Table 7 Kulbrinter koncentrationer

	Indgående Råvand (µg/l)	Indgående behandlet (µg/l)	Fjernet %	Udgående Råvand (µg/l)	Udgående behandlet (µg/l)	Fjernet %
LAS	< 100	< 100	0%	< 100	< 100	0%
Benzen	0.3	1.2	-300%	< 0,02	0.021	-5%
Toluen	0.13	0.21	-62%	< 0,02	0.025	-25%
Ethylbenzen	0.074	0.081	-9%	< 0,02	< 0,02	0%
o-Xylen	0.43	0.32	26%	< 0,02	< 0,02	0%
m+p-Xylen	0.49	0.49	0%	< 0,02	0.024	-20%
Naphthalen	0.37	0.47	-27%	< 0,02	0.028	-40%
C6H6-C10	19	16	16%	< 2	< 2	0%
C10-C15	68	1300	-1812%	21	1800	-8471%
C15-C20	47	180	-283%	31	210	-577%
C20-C25	38	97	-155%	19	85	-347%
C25-C35	25	77	-208%	18	85	-372%
C35-C40	< 10	< 10	0%	< 10	14	-40%
Sum (C6H6-C40)	200	1700	-750%	89	2200	-2372%

Table 8

	Indgående Råvand (µg/l)	Indgående behandlet (µg/l)	Fjernet %	Udgående Råvand (µg/l)	Udgående behandlet (µg/l)	Fjernet %
Naphthalen	< 0,5	< 0,4	20%	< 0,03	< 0,04	-33%
Acenaphthylen	< 0,1	< 0,08	20%	< 0,01	< 0,01	0%
Acenaphthen	0.7	< 0,5	>28.57 %	< 0,02	< 0,01	50%
Fluoren	0.34	< 0,3	>11.76 %	< 0,01	< 0,01	0%
Phenanthren	0.12	< 0,07	>41.66 %	< 0,01	< 0,01	0%
Anthracen	0.062	0.059	5%	0.019	0.021	-11%
Fluoranthren	0.029	0.011	62%	< 0,01	< 0,01	0%
Pyren	0.022	< 0,02	>9.09%	< 0,01	< 0,01	0%
Benzo(a)anthracen	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Chrysen/ Triphenylen	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Benzo(b+j+k)fluorant hen	< 0,01	< 0,02	-100%	< 0,01	< 0,01	0%

Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Dibenz(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01	0%	< 0,01	< 0,01	0%
Sum af 16 PAH'er (EPA)	1.3	0.07	95%	0.019	0.021	-11%

Table 9

	Indgående Råvand (µg/l)	Indgående behandlet (µg/l)	Fjernet %	Udgående Råvand (µg/l)	Udgående behandlet (µg/l)	Fjernet %
Diethylhexylphthalat (DEHP)	< 0,2	< 0,1	50%	0.26	< 0,1	>61.54%
Nonylphenoler	1.1	0.56	49%	0.1	0.07	30%
Nonylphenol Monoethoxylat	< 0,07	< 0,06	14%	< 0,09	< 0,08	11%
Nonylphenol Diethoxylat	< 0,5	< 0,05	90%	< 0,1	< 0,1	0%
Sum af Nonylphenol+ethoxylater	1.1	0.56	49%	0.1	0.07	30%
Phenol	4.2	< 4	>4.76%	< 0,61	0.62	-2%
Cresoler	1	0.66	34%	0.31	< 0,11	>64.51%
Xylenoler	1.8	2	-11%	< 0,05	< 0,06	-20%
Pentachlorphenol	< 0,05	< 0,05	0%	< 0,05	< 0,05	0%
2,4+2,5-dichlorphenol	0.1	< 0,09	>10%	< 0,05	< 0,05	0%
2,6-dichlorphenol	< 0,05	< 0,05	0%	< 0,05	< 0,05	0%
2,4,6-trichlorphenol	< 0,05	< 0,05	0%	< 0,05	< 0,06	-20%
2,3,4,6-tetrachlorphenol	< 0,05	< 0,05	0%	< 0,05	< 0,05	0%
4-chlor-2-methylphenol	0.58	0.61	-5%	< 0,05	< 0,09	-80%
6-chlor-2-methylphenol	< 0,05	< 0,05	0%	< 0,05	< 0,06	-20%

Konklusion

Flokkulering med koaguleringsmidler, der er målrettet mod PFAS, kan effektivt fjerne en stor del af PFAS'er sammen med nogle tungmetaller og en begrænset mængde andre organiske molekyler. Deraf følgende resinsøjlerensning reducerer PFAS yderligere til næsten 100% i tilfælde af det indgående vand til mindst 565 bedvolumener, mens det viser gennembrud hurtigt for søjle 2. Begge kolonner fjernede imidlertid PFBS fuldstændigt efter gennembrud af andre PFAS. Det sværeste at fjerne er PFBA, som var den første til at bryde igennem i begge kolonner og med mindst fjernelse under flokkulering.

Den hurtige gennembrud på kolonne 2 tyder på en fouling af adsorptionsstederne i harpiksen. Denne fouling af adsorptionsstederne kan reduceres med yderligere forbehandling før resinsøjlerne. Dette er vigtigt, da perkolat kan have en høj kompleksitet af vandmatrixen med mange forskellige forurenende stoffer. Disse forskellige forurenende stoffer konkurrerer alle om de tilgængelige adsorptionssteder, hvilket reducerer mængden af PFAS, der kan binde i resinen. Forbehandling ved hjælp af for eksempel sand- eller GAC-søjler kan hjælpe med at reducere denne kompleksitet til hovedsageligt PFAS-molekyler i vandet, der passerer gennem resinsøjlen, og dette gør det muligt for resin kolonner at bruge sine specialiserede adsorptionssteder hovedsagelig til disse.

Bilag 6
6.ECT2 - Slamforsøg

Pilotforsøg ved Odense Nord Miljøcenter

Rapport om slam forsøg

Protokol

1. Tørstofvægt (TS)
 1. Flokkulering blev udført med de doser, der er beskrevet i Delrapport AP3 for en prøvestørrelse på 0,5 L for hvert indgående og udgående vand.
 2. Filterpapir blev for-tørret ved 105 grader celsius i 10 minutter og målt på en præcisionsvægt. Derefter blev de flokkulerede prøver vakuumfiltreret gennem filtrene. Bægerglasset med prøverne blev skyllet med postevand for eventuelle resterende salte. Det våde slam med filteret blev derefter tørret ved 105 C i ca. 6 timer, og vægtene blev registreret hele vejen igennem for at bestemme, hvornår det har nået sin endelige tørvægt.
1. PFAS-indhold i slam
 1. Flokkulering blev udført med de doser, der er beskrevet i Delrapport AP3 for en prøvestørrelse på 5 L for hvert indgående og udgående vand. Slammet adskiltes, hvilket resulterede i en prøvestørrelse på ca. 100 ml.
 2. Prøven blev sendt ind til PFAS24-analyse hos Eurofins.

Resultater

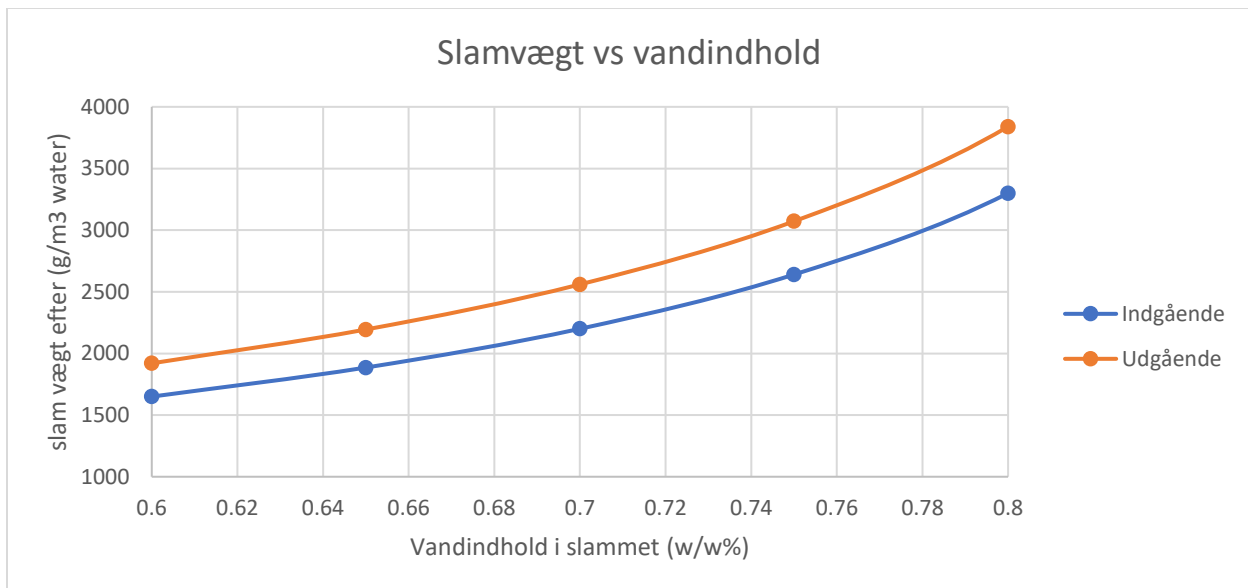
Tabel 1 Tørstofindhold (TS)

	Filter vægt	Med TS	Forskel	Volumen (L)		Tørstof	
Indgående	1.449	1.779	0.33	0.5	0.33	g/0,5L	
				1	0.66	g/L	
				1000	660	g/m ³	
Udgående	1.462	1.846	0.384	0.5	0.384	g/0,5L	
				1	0.768	g/L	
				1000	768	g/m ³	

Der blev kun målt tørstof ved en lejlighed, hvilket giver en betydelig usikkerhed på resultatet, vi ved fra andre deponier at perkolatet kan variere meget fra dag til dag. Data for tørstofindholdet efter slampresse er erfaringstal fra lignende anlæg.

Efter flokkuleringen er det fjernede slamvolumen ca. 1-2 v/v% af det indgående vandvolumen med et vandindhold på ca. 95 w/w%. Skruepressen kan afvande slammet til et vandindhold på 60-80%, afhængigt af slammets egenskaber og finjusteringen af skruepressen.

Figur 1 nedenfor viser udviklingen i vandindhold i forbindelse med tørringen



Figur 1 Slamvægt som funktion af vandindholdet

Det viser, at optimering af afvandingen er vigtig, da der er en reduktion på 33,3 % af vægten allerede ved at gå fra 80 w/w% til 70 w/w% vandindhold. På flere fuldskalaanlæg afvandes slammet til et vandindhold på 70 w/w%.

Slamindholdet afhænger desuden af doseringen af koaguleringsmidler og flokkuleringsmidler. Der blev udført eksperimenter for den bedste flokkulering i laboratorieskala til optimering af PFAS-fjernelsen, hvor de anvendte doser generelt er højere end hvad der normalt implementeres i en mere fuld skala. Dette påvirker også mængden af slam, der genereres, især doseringen af koagulant og polymer forventes at kunne reduceres.

Tabel 2 viser nedenfor de omtrentlige værdier for slamgenerering pr. m³ behandlet perkolat med de doser, der er præsenteret i Delrapport AP3.

Table 2

	Indgående (g/m ³)	Udgående (g/m ³)
Efter skruepresse (30 %TS)	2200	2560
Før skruepresse (5 % TS)	13200	15360

PFAS-indholdet i slammet til forsøgsprøven er vist nedenfor i tabel 3. Som forventet er en meget høj mængde total PFAS koncentreret i slammet. Størstedelen af det er PFBS, PFFHxA, PFHpA og PFOA. Det koncentrerede PFAS-indhold korrelerer godt med PFAS-indholdet i det undersøgte perkolat og fjernelseshastigheden af de enkelte komponenter. Disse resultater findes i Delrapport AP3. Nedenstående resultater viser også at der faktisk bindes kortkædet carboxylsyre-PFAS i slammet, da både PFBA, PFPeA og PFFHxA alle er højere i slammet end i vandfasen.

Table 3

Komponent	Indgående slam (ng/L)	Udgående slam (ng/L)
PFBA (Perfluorbutansyre)	1100	890
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	140000	150000
PFPeA (Perfluorpentansyre)	3400	2700
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	340	410
PFFHxA (Perfluorhexansyre)	11000	10000
PFFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	1100	1700
PFHpA (Perfluorheptansyre)	5800	7300
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	43	47
PFOA (Perfluoroktansyre)	13000	16000
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	1800	1600
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	2300	2800
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	50	120
PFNA (Perfluoronansyre)	280	440
PFNS (Perfluoronansulfonsyre)	<10	<10
PFDA (Perfluordekansyre)	120	230

Opdateret d. 09/09-2024



PFDS (Perflordekansulfonsyre)	<10	<10
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	<10	14
PFUnDS (Perfluorundecansulfonsyre)	<10	<10
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	<10	<10
PFDoDS (Perfluordodecansulfonsyre)	<10	<10
PFTrDA (Perfluortridekansyre)	<10	<10
PFTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	<10	<10
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	16000	20000
Sum af PFAS	180000	190000