



VUDP PROJEKTRAPPORT

TEST AF TEKNOLOGIER TIL RENSNING AF PFAS FRA HOTSPOTS – ODENSE NORD MILJØCENTER

TEST AF TEKNOLOGIER TIL RENSNING AF PFAS FRA HOTSPOTS – ODENSE NORD MILJØCENTER

DATO: 18. NOVEMBER 2024

Projekt ID: 2023.54

Udgiver:

VUDP-foreningen

Udarbejdet af:

Anita Rye Ottosen, Rambøll Danmark A/S
Sylvie Brækevelt, Rambøll Danmark A/S
Jakob Fink, Rambøll Danmark A/S
Caroline Elisabeth Flyger, Rambøll Danmark A/S
Dorte Harrekilde, Rambøll Danmark A/S

Finansiering:

Projektet er finansieret af:

- VUDP-Foreningen, Vandsektorens forening til forbedring af vandsektorens effektivitet og kvalitet
- Rambøll Fonden

Samarbejdspartnere:

VandCenter Syd A/S
Odense Renovation A/S
Rambøll Danmark A/S
Envytech Solutions AB
ECT2 Inc.
Enspired Solution Inc.

Indholdsfortegnelse

Sammenfatning	4
Baggrund og VUDP-projektet	4
Er ONM primær PFAS-kilde til Odense NV Renseanlæg	4
Skumfraktionering vs. Flokkulering	4
Efterpolering og opfyldelse af miljøkvalitetskravet	6
English summary	7
Background and the VUDP-project	7
Is ONM the primary PFAS source for Odense NV Wastewater Treatment Plant?	7
Foam Fractionation vs. Flocculation	7
Costs	8
Polishing and compliance with environmental quality standards	9
Introduktion	10
Parternes rolle	10
Projektets betydning for vandbranchen	12
Nyttiggørelse af projektet for vandbranchen	12
Marked og/eller anvendelsesmuligheder	13
Forretningspotentiale	13
Markedspotentiale	13
Anvendelighed	13
Udbredelse og eksport	14
Næste skridt	15
Formidlingsplan	16
Projektet	17
Formål	17
Output	17
Projektresultater	18
PFAS-analysekampagne	18
Skumfraktionering	18
Flokkulering med FluorFlok	18
Økonomi	18
Konklusion	19

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 (september – oktober 2024). Derudover er det vigtigt at pointere, at der er 30% analyseusikkerhed på alle PFAS-analyserne.

Baggrund og VUDP-projektet

I 2022 blev der gennemført en kortlægning af PFAS og andre miljøfremmede stoffer i perkolat fra deponiet drevet af Odense Renovation, kaldet Odense Nord Miljøcenter (ONM). Undersøgelserne viste høje koncentrationer af PFAS22 i perkolat fra alle etaper af deponiet. På baggrund af kortlægningen og erfaringer fra andre deponier blev der udarbejdet økonomiske beregninger (CAPEX, OPEX og TOTEX) for forskellige renseløsninger. En af de mest lovende løsninger var flokkulering med Fluorflok, som kunne nedbringe PFOS-niveauerne til under miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l i det samlede perkolat. Økonomiske analyser viste dog, at omkostningerne ved denne løsning over en 20-årig periode ville være betydelige.

For at få mere sikkerhed omkring hvilke rensemetoder der er bedst egnet 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.

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 Enspered Solution med fotokatalytisk reduktiv 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. I tabel 1 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 1 – 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. 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 realistisk at 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.

Tabel 2 – Samlede omkostninger til anlæg og drift af PFAS-rensning i nutidsværdi

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.

English summary

The regulatory status of PFAS is still evolving, and the scientific community is generating additional data regarding PFAS properties and potential impacts. Therefore, the conclusions of this report are subject to reevaluation and regulation as of the time the report was written (September to October 2024). Additionally, it is important to note that all PFAS analyses have a 30% uncertainty margin.

Background and the VUDP-project

In 2022, a comprehensive mapping of PFAS and other environmentally harmful substances in leachate from the landfill operated by Odense Renovation, known as Odense Nord Miljøcenter (ONM), was conducted. The studies revealed high concentrations of PFAS22 in leachate across all stages of the landfill. Based on these findings and insights from other landfills, economic calculations (CAPEX, OPEX, and TOTEX) were prepared for various treatment solutions. Among the most promising solutions identified was flocculation using Fluorflok, which demonstrated the potential to reduce PFOS levels in the leachate to below the environmental quality standard of 0.65 ng/L. However, the economic evaluation indicated that implementing this solution over a 20-year period would involve significant costs.

To better determine the most effective treatment technologies for the leachate from ONM and to assess the potential reduction levels achievable, there was interest in testing a range of treatment methods on the leachate from ONM. VandCenter Syd, Odense Renovation, Rambøll, ECT2, Envytech Solution and Enspired Solution therefore applied to the VUDP Foundation for funding to conduct laboratory and pilot-scale tests on leachate from ONM. During the project period, additional funding for the project was applied for through the Rambøll Foundation.

Is ONM the primary PFAS source for Odense NV Wastewater Treatment Plant?

An analysis campaign was conducted, including PFAS28 and TOP22 analyses of the effluent from ONM, as well as the influent and effluent from the Odense NV Wastewater Treatment Plant, to assess ONM's contribution to PFAS in the plant. A percolate characterization was also performed to determine which PFAS compounds are relevant based on PFOA equivalents.

The analysis campaign revealed that:

- The calculated PFOA equivalents (730-1,860 ng/l in ONM's effluent, 34-160 ng/l in the influent to the Odense NV Wastewater Treatment Plant, and 32-49 ng/l in the effluent) exceed the environmental quality standard of 4.4 ng/l in all samples.
- Five PFAS compounds contribute over 80% of the PFOA equivalents: PFOA (33-41%), PFHpA (8-19%), PFOS (7-17%), PFNA (6-16%), and PFDA (5-15%).
- TOP analyses indicate that there are not many unknown PFAS precursors in the samples.
- Short-chain PFAS compounds dominate both the percolate and the influent wastewater.
- Short-chain PFAS compounds account for approximately 63-86% in the percolate and 70-90% in the influent wastewater. Based on the PFAS fingerprint in the wastewater, it suggests that ONM percolate is a primary contributor to the PFAS in the influent wastewater of the Odense NV Wastewater Treatment Plant.

Foam Fractionation vs. Flocculation

The project tested both foam fractionation and flocculation:

- **Foam Fractionation:** Envytech Solutions' SAFF tests showed a total PFAS28 reduction between 39.2% (Sample 4, influent to the pre-treatment plant) and 70% (Stige Ø). All tests successfully removed >99.9% of the long-chain PFAS (6:2 FTS, PFOS, PFOA, PFOSA, PFHpS, PFHxS, and PFHpA). The short-chain PFBS was only removed by 29-42%. Based on PFOA equivalents, the total reduction ranged from 72-97%. Enspired Solution also conducted tests on photocatalytic

reductive defluorination of the concentrated SAFF foam, showing over 96% reduction of detectable PFAS (PFHxA, PFHA, PFOA, and PFBS). However, energy consumption must be considered, as it may quickly become costlier in terms of energy (and other CAPEX/OPEX) compared to sending samples for destruction at Fortum.

- **Flocculation:** ECT2's flocculation tests showed a total PFAS22 reduction between 56.1% (Sample 2, mixed waste) and 76.3% (Sample 5, effluent from the pre-treatment plant). All tests successfully removed >99.9% of the long-chain PFAS. In contrast to foam fractionation, PFBS was removed by 73-85%. Based on PFOA equivalents, the total reduction ranged from 79-93%. No destruction tests on the sludge were conducted, but it was assumed to be incinerated at Fortum.

Tests were also conducted for flocculation to assess the reduction of heavy metals and other environmental pollutants. The expected new guideline values for discharging percolate into public sewers were met for all analyzed substances, except for nickel. The table 1 shows a comparison of the two technologies. In the comparison, it was ensured that PFAS22 analyses were used for both tests to provide a consistent basis for comparison. Since foam fractionation was not tested on the effluent from the pre-treatment plant, the results for foam fractionation are compared with the influent percolate to the pre-treatment plant.

Table 1 - Comparison of results from foam fractionation and flocculation of sample 4 (inlet to the pre-treatment plant)

	Foam Fractionation			Flocculation		
	Untreated (ng/l)	Treated (ng/l)	Removal efficiency (%)	Untreated (ng/l)	Treated (ng/l)	Removal efficiency (%)
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

It is observed that foam fractionation reduces PFOS to <10 ng/l and PFOA equivalents to 232 ng/l, while flocculation reduces PFOS to <1 ng/l and PFOA equivalents to 96 ng/l. Therefore, flocculation achieves better purification than foam fractionation. Additionally, flocculation also removes other environmental pollutants such as heavy metals. Both technologies indicate that they can reduce PFOS to below the expected new guideline value of 0.65 ng/l, but high detection limits "mask" the actual purification efficiency.

Costs

In the project, capital and operating cost estimates have been prepared for a full-scale flocculation plant, including a 2,300 m³ buffer tank and sludge handling, as such a plant is considered feasible to construct, even though environmental quality standards cannot be fully met. Two scenarios were considered: in one scenario, the sludge is dewatered to 30% dry matter, while in the other, the sludge is dried to 85% dry matter. In both scenarios, it is assumed that the sludge is sent for destruction at Fortum.

A TOTEX (total expenditure) analysis has been prepared for the total costs of construction and operation, expressed in present value for the period 2025-2045. The results are shown in the table below. Prices are exclusive of VAT.

Table 2 – Total capital and operational costs for PFAS treatment in present value

Present Value	Scenario 1	Scenario 2
CAPEX (DKK)	16.447.115	19.831.731
OPEX (DKK)	205.420.470	165.191.992
Total CAPEX + OPEX (DKK)	221.867.585	185.023.723
Total CAPEX + OPEX (DKK/år)	11.093.379	9.251.186
Total CAPEX + OPEX (DKK/m³)	48,4	40,4

It can be seen that the total cost for handling the percolate is calculated at 48.4 DKK/m³ in scenario 1, where the sludge is not dried, and 40.4 DKK/m³ in scenario 2, where the sludge is dried. However, it should be noted that there is significant uncertainty regarding the amounts of sludge, and therefore the cost of handling the sludge, both in terms of the expected sludge volume and the dry matter content after the screw press.

The project does not include specific pricing for the capital and operating costs of a foam fractionation plant, but based on experience, the capital costs are expected to be much higher (3-4 times higher) than for a flocculation plant. However, the operating costs are expected to be lower (likely below 10 DKK/m³, corresponding to less than 2.3 million DKK annually for ONM, compared to the estimated annual operating costs of 9.4-11.7 million DKK for flocculation). Since operating costs have the greatest impact on the total capital and operating expenditure (TOTEX), a foam fractionation plant would be cheaper than a flocculation plant in a TOTEX calculation. However, as mentioned earlier, a better purification efficiency can be achieved with a flocculation plant.

Polishing and compliance with environmental quality standards

Treatment with foam fractionation or flocculation can significantly reduce PFAS (up to 90%), but it is insufficient to meet the environmental quality standards for PFOS (0.65 ng/l) and PFOA equivalents (4.4 ng/l). There is no expectation that either foam fractionation or flocculation alone can achieve compliance with these standards, even with further technological development, the creation of new additives to enhance foam fractionation efficiency, or improved polymers for flocculation. Therefore, additional polishing steps will be necessary in the future to meet environmental quality standards.

In this project, tests were conducted using resin filtration for polishing the flocculated percolate, which showed a reduction of over 99.7% for PFAS22 and more than 84.5% for PFOA equivalents. However, a very short breakthrough time of PFAS through the resins was observed, as other impurities in the percolate quickly saturated the resins. Due to this rapid breakthrough, it would be necessary to replace the resins every 5 to 9 days, resulting in an expected operating cost of 18 to 36 million DKK annually for resin replacement alone. It is expected that investing in a sand filter or other mechanical pre-treatment before the resins could significantly reduce these operating costs.

Introduktion

I 2022 blev der gennemført en kortlægning af PFAS og andre miljøfremmede stoffer i perkolat fra ONM. Undersøgelserne viste høje koncentrationer af PFAS22 i perkolat fra alle etaper af deponiet. De største koncentrationer, op til 51.194 ng/l PFAS22, blev fundet i områder med shredderaffald, mens koncentrationerne i det samlede perkolat nåede op til 6.500 ng/l PFAS22, primært i form af kortkædede PFAS. Dette udgør en væsentlig miljømæssig udfordring, da PFAS er svært nedbrydelige og kan akkumulere i miljøet og forårsage sundhedsskadelige effekter. Mange deponier er blevet (eller er ved at blive) undersøgt i Danmark, hvor omfattende PFAS-analyser dokumenterer meget høje niveauer af PFAS. ONM adskiller sig ikke fra deponier / etaper der er sammenlignelige med ONM.

Perkolatet fra ONM ledes videre til Odense NV Renseanlæg, hvor en enkelt analyse viste 150 ng/l PFAS22 og 1,7 ng/l PFOS. Disse niveauer overskred de daværende miljøkvalitetskrav for PFOS i ferskvand, som var på 0,65 ng/l.

På baggrund af kortlægningen og erfaringer fra andre deponier blev der udarbejdet økonomiske beregninger (CAPEX, OPEX og TOTEX) for forskellige renseløsninger. En af de mest lovende løsninger var flokkulering med Fluorflok, som kunne nedbringe PFOS-niveauerne til under miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l i det samlede perkolat. Økonomiske analyser viste dog, at omkostningerne ved denne løsning over en 20-årig periode ville være betydelige. For eksempel blev TOTEX vurderet til 47 kr./m³, hvilket med en årlig perkolatmængde på 229.250 m³ ville resultere i en årlig driftsudgift på 12,1 mio. kr. i 2024. Usikkerhederne omkring resultaterne var dog store, da beregningerne var baseret på pilotforsøg fra andre deponier.

Parternes rolle

For at reducere usikkerheden og vurdere de bedste teknologiske løsninger til at rense perkolat fra ONM, ansøgte en række partnere om midler fra VUDP-fonden. Partnerne, herunder VandCenter Syd, Odense Renovation, Rambøll, ECT2, Envytech Solution og Enspired Solution, ønskede at gennemføre omfattende laboratorie- og pilotforsøg med forskellige rensemetoder for at opnå mere præcise resultater og finde en økonomisk og miljømæssigt bæredygtig løsning. I løbet af projektperioden blev der også ansøgt om yderligere midler fra Rambøll Fonden for at udvide forsøgene – blandt andet med forsøg og analyser om reduktion af tungmetaller og andre miljøfremmede stoffer.

- **VandCenter Syd:** VandCenter Syd driver forrenseanlægget ved ONM og har en stor interesse i at undersøge mulighederne for PFAS-rensning. De arbejder tæt sammen med Odense Renovation for at reducere PFAS-niveauerne i det perkolat, der ledes videre til forsyningsanlægget Odense NV Renseanlæg. VandCenter Syd er projektleder og bidrager med prøveudtagning.
- **Odense Renovation:** Odense Renovation er driftsherren på ONM og er derfor en central aktør i projektet. Deres rolle er at levere de nødvendige data om perkolatet fra de forskellige etaper af deponiet samt at sikre, at renseløsningerne kan implementeres praktisk og økonomisk bæredygtigt i fuldskala på deponiet. Odense Renovation er også ansvarlig for samarbejdet med de andre aktører og for at koordinere forsøgene på ONM.
- **Envytech Solution:** Et svensk miljøfirma med speciale i fjernelse af PFAS. De bringer deres ekspertise i Surface Active Foam Fractionation (SAFF) ind i projektet, en teknologi, hvor PFAS binder til små luftbobler og samles i skum, som derefter fjernes. Envytech Solutions rolle er at teste denne teknologi på perkolat fra ONM for at vurdere dens effektivitet og mulige anvendelse i fuldskala.
- **ECT2:** Den danske afdeling (tidligere Vandrensning.com) af den amerikanske virksomhed, der er ledende inden for rensning af miljøfremmede stoffer, herunder PFAS. ECT2 er en vigtig teknologipartner, der bidrager med avancerede renseløsninger (flokkulering med FlourFlok og efterpolering igennem resin) og internationale erfaringer med PFAS-rensning. De hjælper med at tilpasse teknologierne til de danske forhold og sikre, at løsningerne kan opfylde de lokale miljøkrav.

- **Enspired Solution:** En amerikansk aktør, som har udviklet en patenteret destruktionsmetode til PFAS kaldet PFASigator. Denne metode bruger reduktiv defluorinerende UV-belysning, der omdanner PFAS til ufarlige fluorioner, vand og simple kulstofforbindelser. Enspired Solutions rolle i projektet er at afprøve denne teknologi på PFAS-slammet fra flokkuleringen for at undersøge, om det kan destrueres på en bæredygtig måde.

Partnernes samarbejde er afgørende for projektets succes. Hver partner bringer unik ekspertise og teknologi ind i projektet, hvilket muliggør en tværfaglig tilgang til at løse PFAS-udfordringen. Samlet set sigter projektet mod at skabe en bæredygtig og økonomisk effektiv løsning på PFAS-forureningen fra perkolat fra deponiet ONM. Resultaterne af dette projekt kan ikke kun gavne ONM, men også inspirere andre deponier og forsyningsanlæg til at implementere lignende løsninger og dermed reducere den samlede PFAS-forurening i Danmark.

Projektets betydning for vandbranchen

PFAS-forurening er en stigende udfordring for både miljøet og vandforsyningen. PFAS-stoffer er svært nedbrydelige og har potentiale til at akkumulere i miljøet, hvilket medfører alvorlige sundheds- og miljømæssige risici. Dette er særligt problematisk for vandbranchen, der står over for et presserende behov for effektive og økonomisk bæredygtige løsninger til at reducere PFAS-koncentrationer i vandkredsløbet. Mange danske forsyningsrenseanlæg har store udfordringer med høje koncentrationer af PFAS i både ind- og udløb af spildevandet. Dette skyldes blandt andet, at omkring 38 danske forsyninger modtager perkolat fra deponier, som er en væsentlig kilde til PFAS-forurening.

Deponier, som ONM, er blandt de store bidragydere til PFAS-forurening i vandmiljøet, og håndtering af dette problem er afgørende for, at forsyningselskaberne kan leve op til strammere miljøkrav. På nuværende tidspunkt er nogle deponier begyndt at gennemføre laboratorie- og pilotforsøg med PFAS-rensning, og der findes allerede fuldskala anlæg i Danmark. Der er dog stadig et betydeligt behov for videre teknologiudvikling, der kan anvendes i større skala til effektiv fjernelse af PFAS fra perkolat og andre vandstrømme.

Nyttiggørelse af projektet for vandbranchen

Projektet tilfører vandbranchen stor værdi ved at udvikle og afprøve nye renseteknologier, der kan hjælpe danske forsyninger med at reducere PFAS-forurening i deres spildevandssystemer. De væsentligste gevinster fra projektet inkluderer:

1. Effektive og skalerbare renseløsninger: Projektet afprøver innovative teknologier, som flokkulering med FluorFlok og skumfraktionering, der har vist potentiale til at reducere PFAS-koncentrationer markant. Ved at teste teknologierne under reelle forhold, giver projektet deponier og forsyninger konkrete værktøjer til at håndtere PFAS-udfordringerne fra deponierne.
2. Økonomisk bæredygtighed: Projektet leverer detaljerede økonomiske beregninger for én af teknologierne (CAPEX, OPEX, TOTEX), hvilket hjælper deponierne med at vurdere, hvilke teknologier der både er effektive og økonomisk levedygtige. I en sektor, hvor omkostninger er en væsentlig faktor, giver projektet et solidt beslutningsgrundlag for investeringer i PFAS-rensning, hvilket kan føre til lavere driftsomkostninger på sigt.
3. Reguleringsoverholdelse: I takt med at de regulatoriske krav til PFAS bliver strammere, vil deponierne være nødsaget til at finde løsninger, der sikrer, at de overholder de fremtidige krav til PFAS/PFOS, som forventes at blive på niveau med eller tæt på de gældende miljøkvalitetskrav. Dette projekt bidrager direkte til at sikre, at de danske deponier kan bidrage til, at danske forsyninger kan opfylde de nuværende krav vedrørende PFAS-koncentrationer i udløbsspildevand, samt at de selv kan overholde fremtidige krav.
4. Vidensdeling og innovation: Ved at samle erfaringer fra laboratorie- og pilotforsøgene, og dele resultaterne med aktører i vandbranchen, skaber projektet et fundament for fremtidig teknologisk udvikling. Dette vil styrke innovationen inden for PFAS-rensning og gøre det muligt for deponier og forsyningselskaber, at træffe informerede beslutninger baseret på den nyeste forskning og teknologi.

Samlet set adresserer projektet et kritisk behov i vandbranchen ved at levere konkrete, afprøvede løsninger på PFAS-problematikken. Dette hjælper ikke kun med at overholde lovgivningen, men bidrager også til at sikre rent vand og en mere bæredygtig vandforvaltning i Danmark.

Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Potentialet for forretning, marked og anvendelighed i vandbranchen, særligt med fokus på PFAS-rensning i relation til ONM er betydeligt. Dette skyldes den øgede regulering og bevidsthed omkring PFAS-forurening, som skaber både teknologiske og kommercielle muligheder. Her er nogle centrale perspektiver.

Forretningspotentiale

Der er et stigende globalt behov for udvikling og implementering af effektive teknologier til rensning af PFAS, og Danmark spiller en central rolle i denne indsats. Teknologier som flokkulering, skumfraktionering, og efterpolering med resinrensning er i fokus, da de har potentialet til at reducere PFAS-koncentrationer i spildevand. De løsninger, der formår at kombinere høj effektivitet med økonomisk bæredygtighed, vil være særligt attraktive både nationalt og internationalt.

Danmark har en oplagt mulighed for at eksportere avancerede PFAS-rensningsløsninger til andre lande. Når teknologierne er testet og gjort skalerbare, vil de kunne imødekomme den stigende efterspørgsel i Europa og Nordamerika, hvor reguleringerne omkring PFAS bliver stadig strengere. Eksportpotentialet vil være særligt stort i disse regioner, der kæmper med lignende forureningsproblemer.

En af de vigtigste faktorer for succes på dette marked vil være at udvikle teknologiske løsninger, der er skalerbare. De teknologier, som er afprøvet i VUDP-projektet, såsom flokkulering og skumfraktionering, besidder et stort potentiale til at levere innovative løsninger til håndtering af PFAS. Disse teknologier kan bidrage til at imødekomme de strenge miljøkrav, der stilles i forbindelse med rensning. Dette kan åbne op for nye indtægtskilder for danske virksomheder i form af teknologilevering, licenser og serviceaftaler på det globale marked.

Markedspotentiale

Den globale regulering af PFAS og andre miljøfremmede stoffer bliver løbende strammet, hvilket medfører en stigende efterspørgsel efter effektive renseløsninger. Nye grænseværdier i EU, USA og andre regioner tvinger virksomheder, kommuner og renseanlæg til at finde metoder, der kan sikre overholdelse af de nye standarder. Som et resultat forventes markedet for rensning af spildevand fra deponier og industri at vokse hurtigt.

Teknologierne, der udvikles til PFAS-rensning, har et bredere anvendelsesområde end blot deponier; de kan også implementeres i andre sektorer, herunder industrier, hvor spildevand er forurennet med PFAS, samt ved kommunale renseanlæg. Denne alsidighed øger det globale markedspotentiale for sådanne teknologier betydeligt, idet de kan bidrage til en mere effektiv håndtering af spildevand og en reduktion af miljøpåvirkningen.

Anvendelighed

Rensningen af perkolat fra ONM, hvor koncentrationerne af PFAS er høje, vil medføre betydelige miljø- og sundhedsmæssige fordele. Ved effektivt at fjerne PFAS fra spildevandet vil forureningen af åer, fjorde og havet blive reduceret, hvilket i sidste ende forbedrer vandkvaliteten. Denne indsats vil ikke blot beskytte økosystemerne, men også fremme folkesundheden.

Samtidig er der en stigende efterspørgsel efter bæredygtige løsninger i vandsektoren. Løsninger, der ikke kun sikrer effektiv rensning, men også er energibesparende og reducerer kemikalieforbruget, vil have en konkurrencefordel. Desuden vil løsninger, der medfører lavere driftsomkostninger, blive mere attraktive for deponier og forsyningsselskaber, hvilket kan bidrage til en hurtigere implementering af nye teknologier.

Udbredelse og eksport

Resultaterne fra projektet vil spille en afgørende rolle i udviklingen af teknologier, der kan skaleres til andre danske og europæiske deponier. Danmark har potentiale til at blive en testnation for innovative vandteknologier, hvilket vil styrke landets eksportmuligheder.

Den nordiske region, kendt for sine strenge miljøreguleringer, repræsenterer et naturligt eksportmarked for disse teknologier. Derudover er der også muligheder for eksport til EU-lande, der indfører strenge grænseværdier for PFAS. Dette skaber et vækstmarked for teknologiudvikling og konsulenttydelser inden for rensningsteknologier.

Udover Europa er der også et stort potentiale i Nordamerika og Asien, hvor PFAS-forurening er et stigende problem. De løsninger, der udvikles i Danmark, kan tilpasses og implementeres på internationale markeder, hvilket giver mulighed for global udbredelse af effektive teknologier til rensning af PFAS.

Næste skridt

VandCenter Syd og Odense Renovation er i gang med at undersøge mulighederne for at etablere et forbehandlingstrin (formentligt flokkulering med FluorFlok) på perkolat af OMN. Rensning skal enten foregå ved forrenseanlægget ved ONM eller ved Odense NV Renseanlæg, som i dag modtager perkolatet ublandet med andet spildevand.

Derudover er VandCenter Syd og Odense Renovation gået sammen med ETC2, Rambøll og Teknologisk Institut omkring en MUDP-ansøgning, hvor ovenstående forbehandlingsanlæg skal optimeres, og der skal gennemføres test for at undersøge den bedst egnede metode til efterpolering af perkolatet.

Formidlingsplan

Der har allerede været adskillige præsentationer af projektet, blandt andet ved Dansk Vand Konferencen i 2023, Deponets netværksmøde den 2. september 2024 og en workshop i Miljøstyrelsens projekt "Håndtering af PFAS i deponeringsanlæg" den 7. oktober 2024. Derudover vil projektet blive præsenteret til Dansk Vand Konferencen 2024. Teknologileverandørerne har derudover også præsenteret deres del af projektræsultaterne ved diverse konferencer i Danmark såvel som i udlandet.

Projektgruppen har desuden drøftet at arrangere to webinar i 2025. Den ene vil være på dansk og tage udgangspunkt i dansk lovgivning og henvende sig til danske deponier, forsyninger, kommuner, rådgivere mm. Det andet vil blive på engelsk og være målrette alle.

Derudover er der også skrevet en artikel i State of Green (<https://stateofgreen.com/en/solutions/leachate-pfas-removal-from-landfills-in-odense/>).

Projektet

Formål

Der er i 2022 udfærdiget en rapport, der estimerer anlægs- og driftsprisen på et muligt fuldskaalanlæg til rensning af perkolatet fra ONM for PFAS.

Formålet med denne rapport er at levere en grundlæggende økonomisk og teknisk vurdering af to mulige løsninger til PFAS-rensning af perkolat ved ONM. Rapporten har til hensigt at evaluere effektiviteten og omkostningerne ved en fuldskala flokkuleringsteknologi, herunder to forskellige scenarier for slamhåndtering, som omfatter både skruepresse og tørreanlæg.

Derudover gennemføres en PFAS-analysekampagne med PFAS28- og TOP22-analyser i udløbet fra ONM samt i ind- og udløb fra Odense NV Renseanlæg for at vurdere ONM's bidrag til PFAS-niveauerne ved renseanlægget. Desuden udføres en karakterisering af perkolatet for at identificere de mest relevante PFAS-forbindelser baseret på PFOA-ækvivalenter.

Rapporten sigter mod at give en dybdegående analyse af anlægs- og driftsomkostninger forbundet med hver løsning. Ved at præsentere detaljerede beregninger af både kapitaludgifter (CAPEX) og driftsudgifter (OPEX) for de to scenarier, vil rapporten hjælpe med at identificere den mest økonomisk fordelagtige løsning over en 20-årig periode. Derudover inkluderer rapporten anbefalinger om nødvendige yderligere undersøgelser og potentielle alternative efterpoleringsteknologier for at opnå ønskede renskrav.

Formålet er således at støtte beslutningstagning ved at give en klar forståelse af de økonomiske konsekvenser og tekniske krav ved de to overvejede løsninger. Rapporten skal dermed fungere som et værktøj til at træffe informerede beslutninger om investeringer i PFAS-rensningsteknologi og samtidig sikre, at løsningen opfylder de nødvendige miljømæssige standarder.

Output

Outputtet af rapporten er en evaluering af mulighederne for PFAS-rensning af perkolat ved ONM. Der er lavet laboratorie- og/eller pilotforsøg med forskellige teknologier. I rapporten er analyseret anlægs- og driftsomkostninger over 20 år ved anvendelse af flokkulering med FluorLok, samt gennemført en kortlægning af PFAS-bidraget fra ONM til Odense NV Renseanlæg.

Der gives også anbefalinger til den videre proces, herunder test af anlægsdimensioner og efterpoleringsteknologier. Økonomiske konsekvenser præsenteres i nutidsværdi, hvilket understøtter beslutningstagning om implementering. Outputtet inkluderer både tekniske anbefalinger og et totaløkonomisk overblik, der vil være nyttigt for VandCenter Syd, Odense Renovation og andre danske deponier. Se den tekniske rapport i Bilag 1 for yderligere detaljer.

Projektresultater

I de følgende afsnit skitseres projektets resultater kort. For en mere detaljeret gennemgang henvises til den tekniske rapport i Bilag 1.

PFAS-analysekampagne

Den udførte analysekampagne med PFAS28 og TOP-analyser på perkolat fra ONM samt ind- og udløbsspildevand fra Odense NV Renseanlæg har givet indsigt i PFAS-sammensætningen og perkolatets bidrag til PFAS-forurening i spildevandet til Odense NV Renseanlæg. Data viser, at ONM er en betydelig bidragsyder af PFAS til Odense NV Renseanlæg.

Skumfraktionering

Skumfraktionering er en lovende teknologi til fjernelse og opkoncentrering af PFAS i vand. Ved flere trin kan PFAS opkoncentreres op til 2.000.000 gange. Langkædede PFAS fjernes effektivt (>99,9%), mens kortkædede PFAS er sværere at fjerne. Dog kan tilsætning af additiver forøge fjernelsen af de kort PFAS. Det opkoncentrerede skum kan destrueres med termisk forbrænding. En ny lovende teknologi som fotokatalytisk reduktiv defluorering (PRD) til destruktion af skum, er undersøgt i projektet.

Flokkulering med FluorFlok

Flokkulering med FluorFlok, udviklet af Vandrensning.com, reducerede PFAS22-niveauer i perkolat med 78,8-92,2%. Langkædede PFAS blev fjernet effektivt (>99,9%), mens kortkædede som PFBS blev reduceret med 73-85%. Slam fra flokkuleringen kræver destruktion ved høje temperaturer, men tørring af slammet kan reducere behandlingsomkostningerne. Efterpolering med resinrensning viste sig effektiv, men meget dyr med en årlig omkostning på 18-36 mio. kr. alene til udskiftning af resiner.

Økonomi

To scenarier for et PFAS-renselanlæg blev vurderet: Scenarie 1 inkluderer en udligningstank, flokkuleringsanlæg og slamadskillelse med skruepresse, mens Scenarie 2 tilføjer slamtørring. Scenarie 2 har højere anlægsudgifter (22,5 mio. kr. mod 19,1 mio. kr.), men lavere driftsomkostninger (9,4 mio. kr. årligt mod 11,7 mio. kr. årligt i år 2025). Totalomkostning pr. m³ over 20 år er lavest i Scenarie 2 med 41,4 kr. mod 49,5 kr. i Scenarie 1. Over en 20-årig periode er en samlet besparelse på ca. 37 mio. kr. ved Scenarie 2.

Konklusion

Analyserne viser, at ONM er en væsentlig kilde til PFAS-forurening ved Odense NV Renseanlæg, hvor PFAS-fingeraftryk fra perkolat spores i spildevandet. Koncentrationerne af PFOS og PFOA-ækvivalenter i spildevand fra Odense NV Renseanlæg overstiger derudover miljøkvalitetskravene betydeligt.

Forsøg med skumfraktionering og flokkulering med FluorFlok viste lovende resultater, især for langkædede PFAS. 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. Kortkædede PFAS er dog fortsat en udfordring, men dette kan forbedres ved skumfraktionering ved at tilsætte et additiv, som blandt andet kan øge rensegraden for PFBS op til 96%.

Tabel 3 – 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

Der er i projektet også lavet forsøg med håndtering af restprodukter (skum fra skumfraktionering og slam fra flokkulering). Der er blandt andet lavet forsøg 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%. Der er ikke lavet forsøg med destruktion af slam fra flokkulering, men de økonomiske aspekter ved at tørre slammet før destruktion ved Fortum er blevet undersøgt.

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. 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.

Der er i projektet også lavet test med efterpolering med resinsrensning 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 resinskitte med 5-9 dages mellemrum. Resinsrensning er vurderet for dyr en løsning, og yderligere test er nødvendig for at finde en egnet efterpoleringsløsning.

Der er lavet totaløkonomisk vurdering af et flokkuleringsanlæg med to forskellige scenarier med (Scenarie 2) og uden (Scenarie 1) tørring af slammet. Det billigste scenarie vurderes til at koste omkring 40,4 kr./m³ for at rense perkolatet med en effektivitet op til 90-92% for PFAS22. Yderligere efterpolering er ikke prissat, da det kræver yderligere forsøg.

Tabel 4 – Samlede omkostninger til anlæg og drift af PFAS-renseanlæg i nutidsværdi

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

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 typer affald vil have en afvigende PFAS-fingerprint fra ONM's, og der vil konklusionerne være mindre relevante. Dog kan det være, at resultaterne fra nogle af projektets enkelte etaper, fx blandet 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.

For den fulde konklusion samt anbefalinger henvises der til den Tekniske rapport under Bilag 1.

Bilagsoversigt

Bilag 1:

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