



VUDP PROJEKTRAPPORT

AFSMITNING AF MILJØFREMMEDE STOFFER
FRA AKTIVT KUL OG IONBYTTERESINER
SAMT TEST FOR TILSTEDEVÆRELSE AF OG
RENSNING FOR +50 PFAS STOFFER
(PFAS-RENS GRAD)



AFSMITNING AF MILJØFREMMEDE STOFFER FRA AKTIVT KUL OG IONBYTTERESINER SAMT TEST FOR TILSTEDEVÆRELSE AF OG RENSNING FOR +50 PFAS STOFFER (PFAS-RENS GRAD) VUDP-FORENINGEN PROJEKTRAPPORT

DATO:
07.11.2024

Projekt ID: 2023.45

Udgiver:

VUDP Foreningen, Godthåbsvej 83, 8660 Skanderborg

Udarbejdet af:

Liselotte Clausen, Anne H. Thomsen, Natasa Skrbic og Christine M. Jensen (HOFOR A/S)
Niels D. Overheu og Line M. Fischer (Region Hovedstaden)
Julie Elise Christensen og Hans-Jørgen Albrechtsen (DTU Sustain)

Finansiering:

Vejledningen er finansieret af
VUDP-Foreningen, Vandsektorens forening til forbedring af vandsektorens effektivitet og kvalitet

Samarbejdspartnere:

HOFOR A/S, Region Hovedstaden, DTU Sustain, Envidan A/S, Split Water Nordic Aps og Wendt & Sørensen A/S

Følgegruppe:

Rasmus Nørbøge Ottosen (Silhorko-Eurowater) og Selina K. Tisler (KU PLEN)





Indholdsfortegnelse

Sammenfatning	3
English summary	4
Introduktion	5
Projektets betydning for vandbranchen	10
Marked og/eller anvendelsesmuligheder	10
Næste skridt	10
Formidlingsplan	11
Projektet	12
Formål	12
Output	12
Projektresultater	12
Konklusion og perspektivering	27
Litteraturliste	29

Sammenfatning

Per- og polyfluoralkylstoffer (PFAS-stoffer) er i de seneste år blevet fundet mere udbredt i dansk grundvand. Miljøstyrelsen indførte i 2021 et skærpet kvalitetskrav for summen af fire PFAS-stoffer (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS herefter benævnt PFAS4) på 2 ng/L i drikkevand. I de seneste opgørelser er 5,6 % af de aktive drikkevandsboringer over dette kvalitetskrav. Da den normale vandbehandling ikke kan fjerne disse stoffer, er det nødvendigt at undersøge nye renseteknologier for at fastholde en høj forsyningssikkerhed og en god drikkevandskvalitet.

Formålet med dette projekt var at øge vidensniveauet for håndtering af PFAS-stoffer i dansk grundvand herunder at afdække, hvilke PFAS-stoffer, der er til stede, hvor effektivt de fjernes i forskellige sorptionsteknologier samt om der er afsmitning af uønskede miljøfremmede stoffer ved implementering af de nye teknologier. Projektet er gennemført i tre arbejdsplaner, der er afleveret i separate bilagsrapporter, og som har haft følgende delmål:

- 1) Undersøge afsmitningen af miljøfremmede stoffer fra selektive PFAS resiner (Bilag 1)
- 2) Undersøge tilstedeværelse af det totale antal analyserbare target PFAS-stoffer gennem udvidet analyse af 51 PFAS-stoffer og med non-target metoder (Bilag 2)
- 3) Undersøge rensningskapaciteten på forskellige aktivt kul typer og én selektiv PFAS resin (Bilag 3).

Migrationstest og pilotforsøg viste afsmitning af uønskede stoffer fra ionbytterresiner designet til at fjerne PFAS-stoffer. I laboratorieundersøgelser gennemført som standardiserede migrationstests (jf. den amerikanske materialegodkendelse NSF/ANSI-61) er der målt afsmitning af formaldehyd, acetophenon, tributylamin og nitrosaminen NDBA, hvoraf sidstnævnte kan være kræftfremkaldende. Non-target analyser har foruden påvist en lang række andre stoffer, heraf flere derivater fra ionbytterresinens funktionelle gruppe (tributylamin). I pilotanlæg er der ikke målt afsmitning af NDBA over detektionsgrænsen (1 ng/L) efter længere tids drift, men der er målt kontinuert afsmitning af tributylamin over en driftsperiode på 7 måneder. På baggrund af disse fund har projektet udviklet et kvalificeret analyseprogram, som kan indgå i vurderingen af brug af ionbytterresiner til PFAS i vandbehandlingen. Der er ikke målt afsmitning af uønskede stoffer fra aktivt kul.

Med et udvidet analyseprogram bestående af 51 PFAS-stoffer er grundvandet blevet undersøgt på fem af Region Hovedstadens afværgeanlæg og på 41 af HOFORs kildepladser. Der er overordnet set ikke fundet yderligere PFAS-stoffer i grundvandet, ud over dem som allerede indgår i analyseprogrammet med 22 PFAS-stoffer jf. drikkevandsbekendtgørelsen (BEK nr. 940 af 22/07/2024). Der er få undtagelser på enkelte lokaliteter, hvor der er fundet PFCHS, PFPrS og PFPeS med non-target analysemetoder, som ikke er påvist med target-analyser.

Rensningseffektiviteten af forskellige sorptionsmedier (aktivt kul og ionbytterresiner) blev undersøgt i pilottest på Solhøj Kildeplads samt på to af Region Hovedstadens afværgeanlæg. På Solhøj Kildeplads blev fem parallelle testlinjer undersøgt med forskellige sorptionsmedier til at fjerne PFAS4 (6 ng/L) til under kvalitetskravet. Forskellige kul typer fjernede PFAS4 effektivt med en rensningskapacitet på <5-12 g kul per m³ behandlet vand. En kombination af forskellige aktivt kul typer eller aktivt kul og efterpolering med ionbytterresin fjernede PFAS4 til under detektionsgrænsen under hele forsøgsperioden på 265 dage, hvorfor den endelige rensningseffektivitet endnu ikke kan estimeres. Aktivt kul havde desuden en effektiv tilbageholdelse (>94 %) af en lang række miljøfremmede stoffer. På et afværgeanlæg med markant højere belastning af miljøfremmede stoffer (fx klorerede opløsningsmidler) fjernede traditionel GAC-filtrering PFAS4 (11-20 ng/L) til under kvalitetskravet med en foreløbig rensningskapacitet på 125 g kul per m³ behandlet vand. På et andet afværgeanlæg fjernede en PFAS-selektiv ionbytterresin (uden primær GAC-filtrering) PFAS4 med en rensningskapacitet på 21-23 g resin per m³ behandlet vand. Både aktivt kul og ionbytterresiner er effektive filtermedier til at fjerne PFAS4 til koncentrationer under kvalitetskravet i drikkevand.

English summary

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS substances) have recently been detected in Danish groundwaters. In 2021, the Danish Environmental Protection Agency introduced a regulatory limit for the sum of four PFAS substances (PFOA, PFOS, PFNA and PFHxS, hereafter referred to as PFAS4) of 2 ng/L in drinking water. In the latest monitoring surveys PFAS4 were detected above this limit in 5.6% of the active groundwater wells. Since the water works cannot remove these substances, it is necessary to investigate new treatment technologies to maintain a high security of supply and a good drinking water quality. The purpose of this project was to increase the level of knowledge for managing PFAS substances in Danish groundwater, including investigating which PFAS substances are present, how effectively they are removed by various sorption technologies, as well as if unwanted substances might migrate into the drinking water through the implementation of new technologies. The project was conducted in three work packages reported in separate annex, which had the following objectives:

- 1) Investigate the migration of substances from PFAS specific ion exchange resins (Appendix 1)
- 2) Investigate the presence of the total number of analyzable targeted PFAS substances through extended analyses of PFAS 51 and non-target methods (Appendix 2)
- 3) Investigate the treatment capacity of different sorption media (Appendix 3).

Migration tests and pilot scale investigations showed migration of unwanted substances from PFAS specific ion exchange resins. In laboratory studies, carried out as standardized migration tests (NSF/ANSI-61), migration of formaldehyde, acetophenone, tributylamine and the nitrosamine NDBA were observed, of which the latter compound is potentially carcinogenic. Non-target screening methods furthermore detected a range of different substances migrating, including derivatives from the functional group of the ion-exchange resin (tributylamine). In the pilot plant, no migration of NDBA was measured above the detection limit (1 ng/L) after long operating period, but continuous migration of tributylamine was observed throughout the operating period of 7 months. Based on these findings, the project has developed a qualified analysis program for future evaluations of the use of ion exchange resins for PFAS in drinking water treatment. No migration of unwanted substances was detected from activated carbon filters.

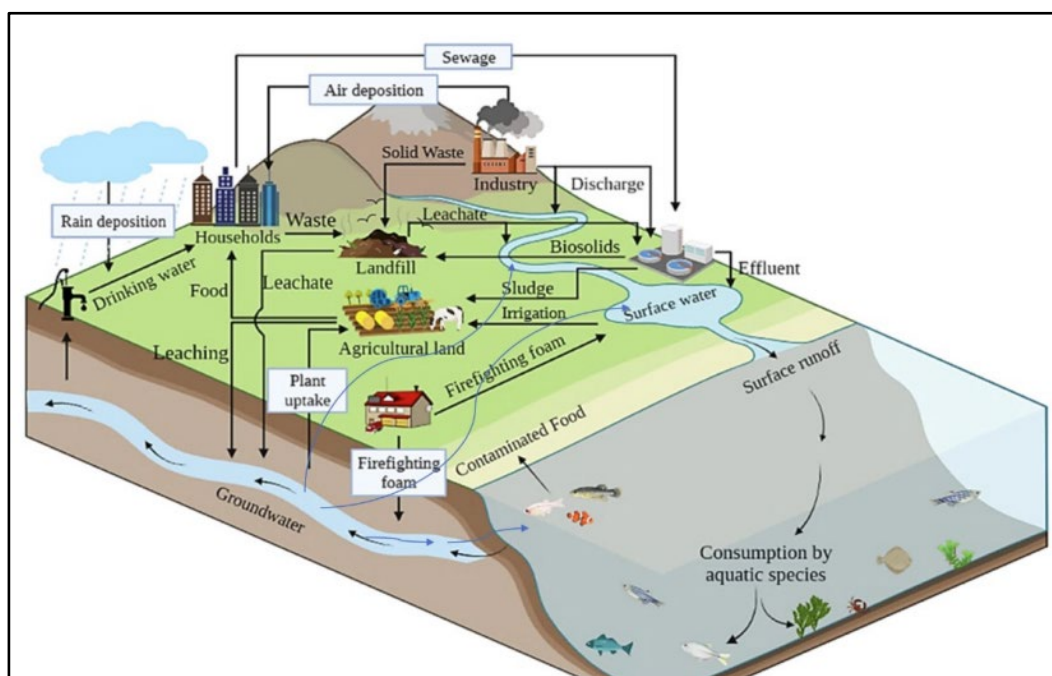
With an extended analysis program consisting of 51 PFAS substances, the groundwater was examined at five remediation sites (Region H) and at 41 groundwater abstraction well fields (HOFOR). Overall, no additional PFAS substances were found in the groundwater, apart from those already included in the monitoring program including 22 PFAS substances (National drinking water regulation BEK no. 940 of 22/07/2024). There were only a few exceptions, including the detection of PFECHS and PFPrS at two locations found using non-target screening methods.

The treatment efficiency of different sorption media (activated carbon and ion exchange resins) was investigated in pilot tests at a groundwater abstraction (Solhøj Kildeplads) and at two groundwater remediation sites. At Solhøj Kildeplads, five parallel test lines of approximately 2 m³/h investigated different sorption media to remove PFAS4 (6 ng/L) to below the regulatory limit. Different carbon types removed PFAS4 effectively with a removal capacity of <5-12 g carbon per m³ treated water. A combination of different activated carbon types or activated carbon and post-polishing with ion exchange resin removed PFAS4 below the detection limit during the entire 265-day test period, thus, the true treatment efficiency could not yet be estimated. Activated carbon generally showed an effective removal (>94%) of a broad range of micropollutants. At the groundwater remediation sites with a significantly higher load of micropollutants (e.g. chlorinated solvents), GAC filtration removed PFAS4 (11-20 ng/L) below the regulatory limit at a capacity of 125 g carbon per m³ treated water. And at another remediation site, a PFAS-selective ion exchange resin (without primary GAC filtration) removed PFAS4 at a capacity of 21-23 g resin per m³ of treated water. Both activated carbon and PFAS specific ion exchange resins are effective sorption media for removing PFAS4 from groundwater.

Introduktion

PFAS-forbindelser (per- og polyfluoralkylstoffer) er en stor gruppe af kemiske stoffer, der har været brugt i vid udstrækning siden 1940'erne, hvor de første gang blev produceret. Stoffernes på samme tid hydrofile og hydrofobe egenskaber har ført til en bred anvendelse i industrien fra brandslukningsskum, til smuds- og vandafvisende tekstiler og fedtafvisende fastfood emballage. De mange anvendelser har betydet, at PFAS-stofferne er spredt til bl.a. grundvand via mange forskellige spredningsveje (Figur 1).

De primære punktkilder af PFAS er brug af brandslukningsskum på brandøvelsespladser, udslip fra industrier, der har anvendt PFAS i produktionen og udslip fra deponier. Derudover findes der PFAS i jord og grundvand, hvor der umiddelbart ikke er en kilde til forurening i nærheden. Dette kan f.eks. skyldes atmosfærisk deposition af luftbåren forurening med PFAS eller hav-aerosoler (Tsitonaki et al., 2023). Aarhus Universitet (DCE) har i 2024 påvist ca. 3 ng/l PFAS i regnvand ved Roskilde (Bossi et al., 2024).



Figur 1: Eksempler på kilder og eksponeringsveje for PFAS (Saawarn, 2022).

I Danmark indførte Miljøstyrelsens i november 2021 verdens strengeste kvalitetskrav til indholdet af PFAS i drikkevand på 0,002 µg/l (2 ng/l) for sum af 4 PFAS (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS fremover benævnt PFAS4) og 0,1 µg/l for sum af 12 forskellige PFAS-forbindelser (PFAS12) (BEK nr. 2361 af 26/11/2021). Kravværdien til PFAS12 er i 2023 yderligere skærpet til 0,1 µg/l for 22 forskellige PFAS-forbindelser (PFAS22) (BEK nr. 504 af 14/05/2023) jf. Figur 2.

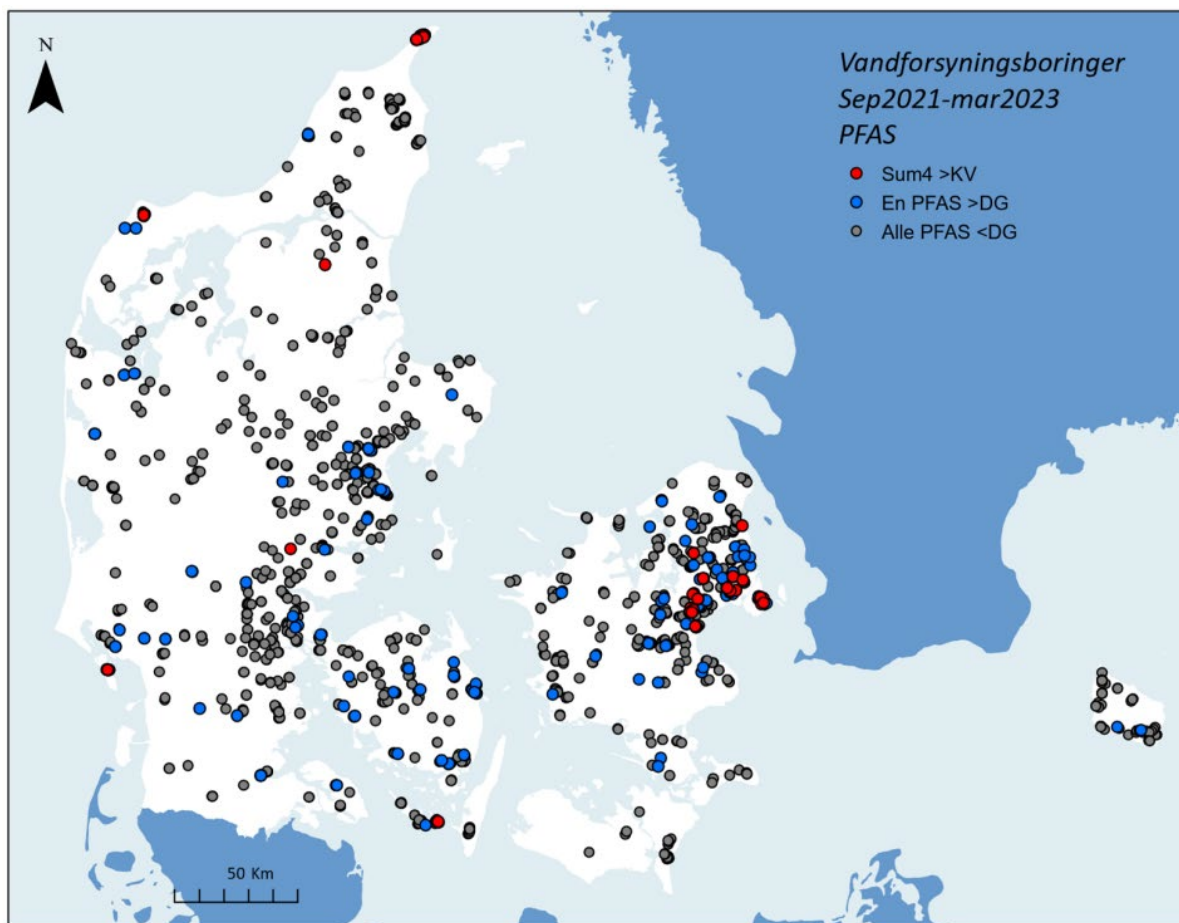


Stofgruppe/sum-værdi	Stofnavn	Krav-værdi (KV, µg/l)
PFAS (4 styk)	PFHxS (perfluorhexansulfonsyre) PFOS (perfluoroctansulfonsyre) PFOA (perfluoroctansyre) PFNA (perfluornonansyre)	0,002
PFAS (12 styk)	Ovenstående fire +: PFBA (perfluorbutansyre) PFPeA (perfluorpentansyre) PFHxA (perfluorhexansyre) PFHpA (perfluorheptansyre) PFDA (perfluordecansyre) PFBS (perfluorbutansulfonsyre) PFOSA (perfluoroctansulfonamid 6:2 FTS (6:2 fluorotelomersulfonsyre)	0,1
PFAS (22 styk)	Ovenstående 12 +: PFUnDA (Perfluorundecansyre) PFDoDA (Perfluordodecansyre) PFTrDA (Perfluortridecansyre) PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre) PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre) PFNS (Perfluornonansulfonsyre) PFDS (Perfluordecansulfonsyre) PFUnDS (Perfluorundecansulfonsyre) PFDoDS (Perfluordodecansulfonsyre) PFTrDS (Perfluortridecansulfonsyre)	0,1
-	TFA (trifluoreddikesyre)	9

Figur 2: PFAS-forbindelser inkluderet i kravværdier (sum for gruppen) for drikkevand i Danmark (BEK nr. 504 af 14/05/2023).

Der er ingen indvindingsboringer i Danmark, der har et PFAS-indhold over kravværdien til PFAS22, men 5,6 % af vandforsyningsboringerne har PFAS-koncentrationer over det nye drikkevandskrav til PFAS4 (Thorling et al., 2023).

Den geografiske fordeling af PFAS-indhold i vandforsyningsboringer er vist på Figur 3. Det er primært vandforsyninger langs vestkysten, som har problemer med PFAS4 som følge af PFAS-indhold i havskum (Henriksen og Lenschow, 2024). Derudover er der et stort område omkring hovedstadsområdet og syd herfor, hvor relativt mange boringer er påvirket af PFAS fra deponier og brandøvelsespladser (Høje-Taastrup Kommune, 2024).



Figur 3: Geografisk fordeling af analyserede vandforsyningsboringer uden fund (grå), med fund (blå) og med mediankoncentrationer over kravværdi for drikkevand for PFAS4 (rødt) (Johnsen et al., 2023).

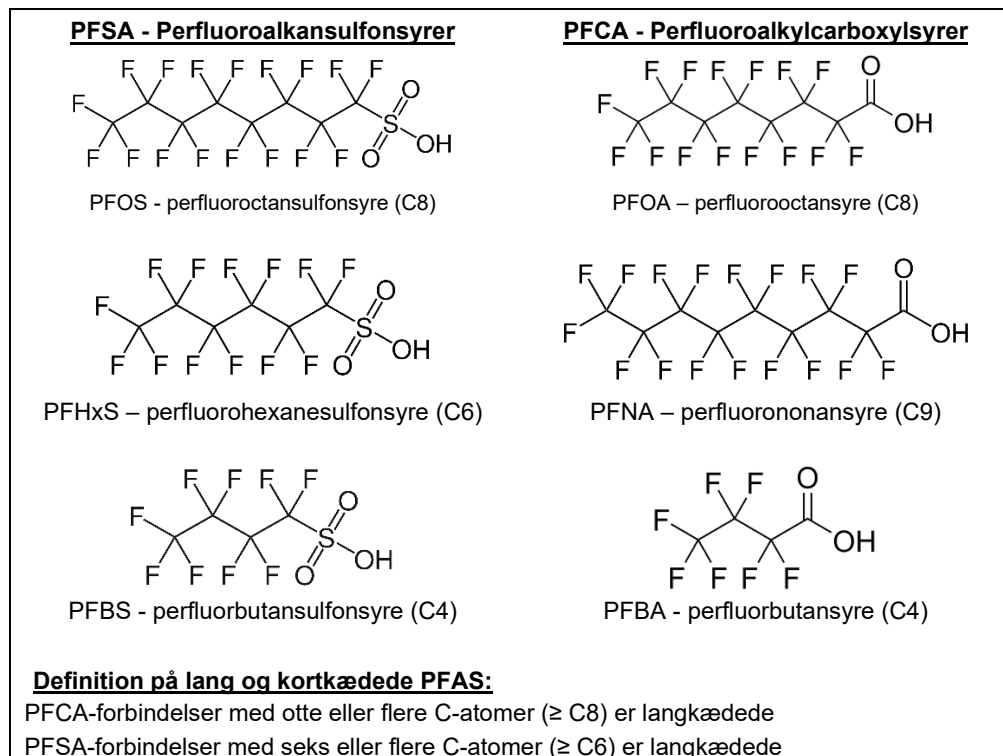
Rensning af drikkevand for PFAS vil sandsynligvis blive mere udbredt fremadrettet, men da PFAS er et forholdsvist nyligt erkendt problem i Danmark, er der ikke de store erfaringer med PFAS-fjernelse fra drikkevand.

Et litteraturstudie om rensningsmetoder til PFAS-fjernelse på vandværker udført af Nørgaard et al. (2022) har vist, at undersøgelser i udlandet er udført på vand med langt højere koncentrationer end der hidtil er fundet i drikkevandsboringer i Danmark. Der mangler derfor – også internationalt – viden om rensning af PFAS ned til 2 ng/l for PFAS4. I Nørgaard et al. (2022) er det vurderet, at rensning med Granulært Aktivt Carbon (GAC) og ionbytning med selektive PFAS resiner er de teknologier med de største potentialer til fjernelse af PFAS fra drikkevand i Danmark. Udenlandske erfaringer viser, at det oftest er de kortkædede carboxylsyrer som f.eks. PFBA (Figur 4), der giver flest udfordringer, og her har resiner ofte en bedre rensningseffektivitet end GAC (Nørgaard et al., 2022).

PFAS selektive resiner er ofte fremstillet af polystyren eller -akryliske kæder med forskellige funktionelle grupper, og da disse er organiske materialer, kan de afgive uønskede stoffer til drikkevandet. Der foreligger dog ikke meget viden om risikoen for afsmitning fra resiner (Nørgaard et al., 2022). I et nyligt afsluttet VUDP-projekt, hvor der bl.a. blev udført pilotforsøg på Hvidovre Vandværk med en resin, målte HOFOR afsmitning af både phenoler og klorerede opløsningsmidler herunder vinylklorid (Hedegaard og Clausen, (2023)).

Ved implementering af rensning for PFAS til under 2 ng/l for PFAS4 er det derfor vigtigt at undersøge, om der er afsmitning af uønskede miljøfremmede stoffer fra sorptionsmaterialerne, så

der ikke implementeres en rensningsteknik, der fjerner PFAS, men tilføjer andre uønskede miljøfremmede stoffer til drikkevandet.



Figur 4: Molekylestruktur for udvalgte PFAS-forbindelser og definition af lang- og kortkædede PFAS (Nørgaard et al., 2022).

Det er desuden vigtigt for de danske vandforsyninger at have en vis sikkerhed for, at der i grundvandet ikke forekommer andre bekymrende PFAS-stoffer, som der ikke analyseres for i dag. Typisk analyseres der kun for PFAS12 eller PFAS22, men da PFAS dækker over potentielt mange tusinde forskellige stoffer, kan forureningsproblemet være langt større end erkendt for nuværende.

Formålet med nærværende projekt har derfor været at øge vidensniveauet ift. muligheden for at benytte aktivt kul og resiner til at rense drikkevand både i Danmark og internationalt ved at:

1. måle afsmittningen af miljøfremmede stoffer fra aktivt kul og PFAS selektive resiner
2. analysere for tilstedeværelse af det totale antal analyserbare target PFAS-stoffer (PFAS 51) og med non-target metoder
3. bestemme rensningskapaciteten på forskellige kultyper og resiner.

Projektet er gennemført i 3 arbejdsplaner, der er beskrevet herunder i forhold til opgaver og partnernes roller.

Undersøgelse af afsmittning fra resiner til PFAS-fjernelse (DTU)

DTU har undersøgt afsmittning fra 3 selektive PFAS resiner i laboratoriet med henblik på at undersøge, om der er afsmittning af uønskede miljøfremmede stoffer fra resiner. De tre resiner er alle aktuelle på det danske marked. Afsmittningen blev undersøgt ved target analyser udført af Eurofins og DTU samt ved non-target analyser udført af Københavns Universitet (KU).

Udvidede PFAS-analyser på en række afværgeanlæg og kildepladser (Region Hovedstaden, HOFOR og EnviDan)

Region Hovedstaden og HOFOR har (med Envidan som rådgiver) udført udvidede PFAS-analyser på fem afværgeanlæg og 46 kildepladser, hvor Eurofins har analyseret for 51 PFAS-stoffer. På ét afværgeanlæg (Naverland 26), hvor der er målt høje koncentrationer af PFAS, er indløb og udløb undersøgt ved non-target analyser udført af Århus Universitet med henblik på identifikation af ukendte PFAS-forbindelser. Desuden er rensningskapaciteten for PFAS undersøgt på to afværgeanlæg: 1) Afværgeanlæg på Naverland 26 (GAC-anlæg) og 2) Afværgeanlæg på Industrivej, hvor Regionen har testet anvendelse af en PFAS ionbytterresin.

Afværgeanlæggene vil repræsentere en worst-case rensningskapacitet for PFAS på hhv. GAC-anlæg og resinanlæg i Danmark, da de begge er belastet med andre miljøfremmede stoffer.

Pilottest på Solhøj Kildeplads (HOFOR, EnviDan, Split Water Nordic og Wendt & Sørensen)

HOFOR har i samarbejde med Envidan, Region Hovedstaden, Split Water Nordic og Wendt & Sørensen testet fem forskellige teknologier til PFAS-fjernelse med henblik på at fastlægge den mest optimale rensningsteknik til drikkevand. Pilotforsøgene har omfattet fem parallelle testlinjer med kombinationer af renseteknikker med Pulveriseret Aktivt Carbon/keramisk membran (Split Water Nordic anlæg), to forskellige GAC-anlæg, og GAC i serie med en resin (sorptionsmaterialer leveret af Wendt & Sørensen) og endelig et μ GAC anlæg, som er fluidiseret aktivt kul med en mindre kornstørrelse end GAC. Pilotanlæggenes rensningskapacitet er sammenlignet, og der er målt for afsmitning med suspect og non-target screening udført af Københavns Universitet (KU).



Projektets betydning for vandbranchen

Ved implementering af nye skærpede kravværdier er det vigtigt, at danske vandforsyninger har et teknologisk beredskab, så der foreligger veldokumenterede rensningsmetoder. På denne måde sikres gode, rigtige og langtidsholdbare beslutninger som grundlag for fremtidige investeringer og fremtidig vandværksdrift.

Dette projekt har ved undersøgelser af renseteknologier til PFAS under danske forhold, dvs. ved lave PFAS-koncentrationer i relativt hårdt grundvand, fastlagt reelle rensningskapaciteter for forskellige kultyper og resiner, så fuldskalaanlæg kan designes ud fra BAT (Best Available Technology). Afsmitning fra de testede sorptionsmaterialer er undersøgt gennem migrationstest og i pilotforsøg med både target og non-target analysemetoder, hvilket har resulteret i ny viden (også internationalt) om hvilke stoffer, der afsmitter. På den baggrund er der udarbejdet et forslag til et analyseprogram ved idriftsættelse af PFAS ionbytterresiner, så myndighedsgodkendelsen kan kvalificeres, og så analysebudget kan optimeres. Endelig har projektet understøttet udvikling af non-target analysemetoder, og dermed forbedret sikkerheden for, at der er fokus på alle stoffer, der findes i drikkevandet og ikke kun de, der analyseres for ved target-analyser.

Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Veldokumenterede rensningsmetoder for PFAS, der renser ned til under 2 ng/l PFAS4, er til gavn for flere aktører i vandbranchen - både rådgivere, teknologileverandører, vandforsyninger og relevante myndigheder.

Konkret viden om rensningskapaciteter sikrer kvalificeret rådgivning, og mindsker risikoen for fejldimensionering af fuldskalaanlæg. Solid og transparent viden hos teknologileverandører sikrer troværdighed og et godt image, som kan skabe mersalg internationalt efterhånden, som de skærpede krav til PFAS4 må forventes at blive udbredt i flere lande.

Viden om stoffer, der afsmitter, vil medføre overvejelser om god implementering og idriftsættelsesprocedure for polymerbaseret filtermaterialer i kontakt med drikkevand hos både vandforsyninger og myndigheder. Nærværende projekt har påvist, at der med resiner kan fjernes PFAS4 til under kvalitetskravet, men samtidigt, at der i en indkøringsperiode kan afgives uønskede stoffer som nitrosaminer. På den baggrund er der udarbejdet et analyseprogram, som kan indgå i myndighedernes vurderinger ved godkendelse af ionbytterresiner til brug i vandbanen, jf. drikkevandsbekendtgørelsen kapitel 2. Herunder, at den godkendende myndighed evt. stiller krav om overholdelse af en idriftsættelsesprocedure, før drikkevandsproduktionen til forbrugerne kan påbegyndes.

Samlet set vil den indhentede information medvirke til fremadrettet at forbedre drikkevandskvaliteten og vandrensningen nationalt og internationalt.

Næste skridt

Ved projektets afslutning var det ikke muligt at beregne præcise rensningskapaciteter på de testede GAC-kultyper og ionbytterresinen, da der endnu ikke (efter drift i 265 dage) var gennembrud på filtrene. Driften af pilotanlæggene fortsættes, og HOFOR tager opfølgende analyser for at bestemme det fulde gennembrud på GAC-filtre, så det præcise kulforbrug kan beregnes.

Et af de næste skridt vil være, at HOFOR og vandbranchen vælger renseteknologier til forureningsproblemer med PFAS. For at kunne træffe disse beslutninger er det imidlertid også nødvendigt at undersøge bæredygtighed af de forskellige teknologier herunder undersøgelser af, hvordan

destruktion af PFAS på GAC/ionbytterresiner håndteres mest bæredygtigt. Endelig udestår en kostberegning i forhold til fuldskala implementering.

Formidlingsplan

Projektets resultater er løbende blevet formidlet i præsentationer og indlæg på diverse nationale og internationale konferencer. Ligeledes har der været mange fremvisninger af pilotanlægget på Solhøj Kildeplads til Regioner, kommuner og danske vandforsyninger. Det har sikret en god inddragelse af den danske vandbranche og myndigheder.

Fremvisning af pilotanlæg på Solhøj Kildeplads:

- 22. september 2023 v. Natasa Skrbic Mrkajic. Region Hovedstadens driftsteam.
- 26. februar 2024 v. Liselotte Clausen. Region Sjælland, Region Hovedstaden, Greve Kommune, Ishøj Kommune og Høje-Taastrup Kommune.
- 8. april 2024 v. Liselotte Clausen. Vandforsyninger i InSa-Drikkevand ([InSa-Drikkevand](#)).

Præsentationer og indlæg på konferencer:

- 7. november 2023: AWWA Water Quality & Technology Conference, Dallas: "Managing PFAS in a groundwater-based water supply" v. Martin Rygaard.
- 23. november 2023: Dansk Vand konference: "Pilotforsøg med adsorptionsteknologier til fjernelse af PFAS" v. Natasa Skrbic Mrkajic.
- 11. januar. 2024: Plantekongressen: "Udfordringer med PFAS hos vandforsyninger" v. Mathilde J. Hedegaard.
- 6. marts 2024: ATV Jord & Grundvand Vintermøde "Rensning af drikkevand for miljøfremmede stoffer i Danmark – overblik over afprøvede teknologier og erfaringer" v. Liselotte Clausen.
- 14. marts 2024: Seminar om PFAS hos Bech-Bruun: "PFAS på HOFORs kildepladser til Værket ved Thorsbro – Hvad gør HOFOR ?" v. Liselotte Clausen.
- 22. august 2024. Danva/Envina Grundvandsseminar 2024. "Udvikling og forundersøgelser – metoder til videregående vandbehandling" v. Liselotte Clausen.
- 18. september 2024: Nordiwa - Nordic Drinking Water Conference conference. "Pilot testing of adsorption technologies to remediate PFAS contaminated groundwater" v. Anne Holm Thomsen.
- 19. september 2024: Nordiwa - Nordic Drinking Water Conference conference. "Do we do harm when we are treating the drinking water? Investigation of remediate PFAS contaminated groundwater" v. Hans-Jørgen Albrechtsen.
- 27.-28. november 2024: Dansk Vand konference "Pilotundersøgelser til sammenligning af adsorptionsteknologier til rensning for PFAS på HOFORs største kildeplads" v. Liselotte Clausen.
- 27.-28. november 2024: Dansk Vand konference " Undersøgelse af migration af uønskede stoffer til drikkevand fra resiner ved PFAS-fjernelse" v. Julie Elise Christoffersen.

Artikler til peer-reviewed videnskabelige tidsskrifter:

- Selina Tisler, Natasa Skrbic Mrkajic, Lisa M. Reinhardt, Christine Mosegaard Jensen, Liselotte Clausen, Anne Holm Thomsen, Hans-Jørgen Albrechtsen og Jan H. Christensen. "Effective PFAS Removal but unintended drinking water contamination? A Non-Target Evaluation of Treatment and migration by activated carbon and ion Exchange resin". Submitted to Water Research.

Artikler i danske tidsskrifter:

- WaterTech artikel d. 9. januar 2024: "Testforsøg: Aktivt kul renser PFAS rigtig godt – men der er også ulemper".

Projektet

Formål

Danmark har - med meget kort varsel - indført verdens foreløbige strengeste krav til indhold af PFAS i drikkevand. Det er derfor vigtigt, at de danske vandforsyninger har et teknologisk beredskab i form af veldokumenterede rensningsmetoder for PFAS, så forsyningssikkerheden opretholdes, og så drikkevandet i Danmark fortsat – også efter rensning – er af høj kvalitet.

Formålet med nærværende projekt har været at skabe et solidt og transparent vidensniveau i forhold til mulige rensningsmetoder til PFAS i drikkevand ved:

1. Undersøgelse af afsmitningen af miljøfremmede stoffer fra aktivt kul og selektive PFAS resiner
2. Undersøgelse af tilstedeværelse af det totale antal analyserbare PFAS-stoffer ved target og non-target metoder
3. Undersøgelse af rensningskapaciteten på forskellige sorptionsmaterialer.

Output

Migrations- og pilotforsøg har vist, at der ved opstart af selektive PFAS ionbytterresiner frigives uønskede stoffer, som kan være kræftfremkaldende. Der er derfor udarbejdet et forslag til et analyseprogram, som kan indgå i myndighedernes vurderinger ved godkendelse af PFAS-resiner til brug i vandbanen. Fra aktivt kul er der ikke påvist frigivelse af uønskede stoffer.

Der er gennemført et udvidet analyseprogram for PFAS på fem af Region Hovedstadens afværgeanlæg og på 46 af HOFORs kildepladser, hvor der er udført target analyser for 51 PFAS-stoffer. Der er med en enkelt undtagelse et sammenfald mellem de påviste stoffer i hhv. 22 og 51 PFAS-analysen, så analyse for de udvalgte 51 PFAS giver ikke yderligere information, end hvad der kan opnås med analyse for pakken med PFAS22. Non-target analyser har givet anledning til fund af yderligere et stof på Naverland afværgeanlæg (PFPeS) og et stof på Solhøj Kildeplads (PFECBS), som ikke blev målt med target analyserne i hhv. PFAS22 og 51 PFAS-pakken. Derudover er der på Solhøj Kildeplads ved non-target analyse påvist stoffet PFPrS, som ikke indgår i de normale PFAS analysepakker.

Pilotforsøg på Solhøj Kildeplads med forskellige kultyper har vist, at aktivt kul effektivt fjerner PFAS4, med rensningskapaciteter på mellem <5 og <24 g kul per m³ rensset vand. På et afværgeanlæg, som er kraftigt belastet med andre miljøfremmede stoffer (klorerede opløsningsmidler op til 1,6 mg-TCE/l) er rensningskapaciteten bestemt til 125 g kul per m³ rensset vand. Traditionel GAC-filtrering fjerner generelt en lang række forskellige stoffer inklusiv PFAS4, og giver en god drikkevandskvalitet i en lang driftsperiode (7 måneders test). Både aktivt kul og selektive PFAS ionbytterresiner er effektive sorptionsmedier til at fjerne PFAS4 til koncentrationer under drikkevandskravet.

Projektresultater

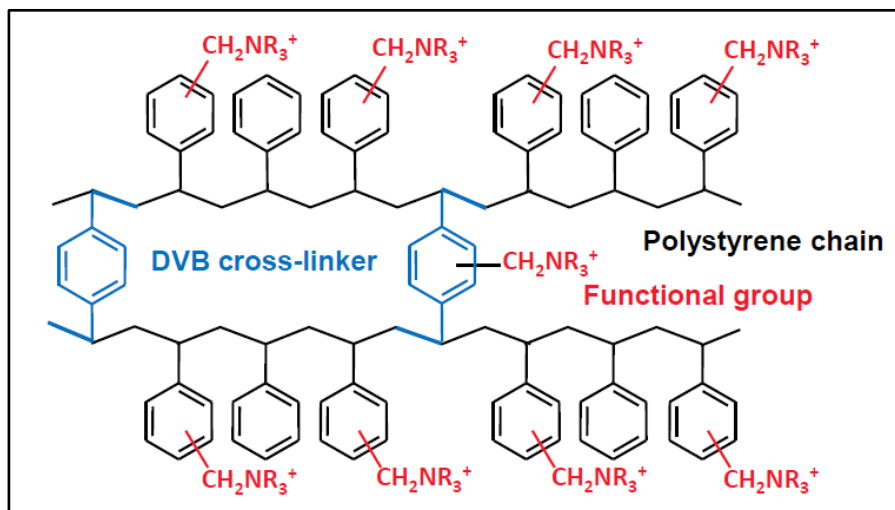
Undersøgelse af afsmitning fra resiner (anionbyttere) til at fjerne PFAS

DTU har undersøgt afsmitning fra tre forskellige resiner, der alle anbefales til PFAS-fjernelse af leverandørerne. Undersøgelsen er detaljeret beskrevet i Bilag 1. Følgende resiner blev undersøgt på baggrund af deres nuværende anvendelse og test til PFAS-fjernelse i Danmark:

- Resinex PFCR-1 - herefter benævnt "Resinex" (Producent: Jacobi Carbons): Resinen er testet i pilotskala på Solhøj Kildeplads (Bilag 3) efter anbefalinger fra Jacobi Carbons.

- Purofine PFA694E – herefter benævnt "Purofine" (Producent: Purolite): Resinen har været anvendt på et afværgeanlæg i Hedehusene af Region Hovedstaden.
- Fortrolig resin – herefter benævnt "SE/DW": Navn og producent er fortrolig information. Resinen sælges af Silhorko-Eurowater og er implementeret i fuldskala på Fanø Vandværk og på Tune Vandværk.

Resinerne er alle baseret på polystyrenkæder, som for Resinex og Purofine har tværbindinger af divinylbenzen (DVB) jf. Tabel 1. Resinerne er designet med funktionelle grupper, der har høj affinitet for binding af PFAS, hvilket ofte vil være kvarternær ammonium, complex amino eller tributylamin, som illustreret på Figur 5 (Dinges, 2024; Dixit et al., 2021).



Figur 5: Eksempel på struktur af resiner til PFAS-fjernelse (Dinges, 2024).

Purofine og SE/DW er godkendt til brug i kontakt med drikkevand gennem amerikansk national standard (NSF/ANSI-61), mens Resinex er ansøgt godkendt under europæisk certificering (jf. Tabel 1).

Tabel 1: Egenskaber for tre udvalgte resiner, der anvendes eller testes til PFAS-fjernelse i Danmark.

	Resinex PFCR-1	Purofine PFA694E	SE/DW
Producent	Jacobi Carbons	Purolite	-
Porestruktur	Makroporøs	Gel	Gel
Polymer matrix	Polystyrene-DVB ¹	Polystyrene-DVB ¹	Polystyrene
Ionbytter	SBA ²	SBA ²	-
Funktionel gruppe	Tributylamin	Complex amino	-
Type	PS-DVB/M/Type I	PS-DVB/G/CA	-
Bulk densitet	700-800 kg/m ³	650-700 kg/m ³	-
Certificering	Ansøgt godkendt under europæisk certificering	NSF/ANSI-61	NSF/ANSI-61

¹DVB: Divinylbenzen
²Strong base anion - Stærkt basisk anionbytter

I litteraturen er der begrænset information om mulig afsmitning af stoffer fra resiner. Indledende blev der derfor udarbejdet et relevant analyseprogram på baggrund af viden fra følgende:

- Pilotforsøg udført af HOFOR A/S med Resinex AD-3015 og Resinex AD-3004 på Hvidovre Vandværk (påvist afsmitning af phenoler og chlorerede opløsningsmidler) (Hedegaard og Clausen, (2023))
- NSF/ANSI 61 Test ved certificering af RESINEX-PFCR-2
- Indkøring og brug af SE/DW resinen på Fanø Vandværk ved SILHORKO
- Analyseprogram udarbejdet af DHI til Region Hovedstaden for migrationstest af Purofine PFA694E og en anden type resin, Amberlite PSR2. Analyseprogrammet er udarbejdet på baggrund af resinernes receptur.

Ud fra den indhentede viden blev relevante stoffer og stofgrupper udvalgt til specifikke, target-analyser. Analyseprogrammet udarbejdet af DHI inkluderede fire stoffer, som ifølge producenten var fortrolige. Der var således fire stoffer, som der var risiko for kunne afsmitte, som der ikke kunne inkluderes i target analyser, da navnene på disse stoffer ikke kunne frigives. For at overvinde denne udfordring samt for at analysere for forekomst af hidtil ukendt afsmitning og sikre, at analyseprogrammet omfattede så mange relevante forbindelser som muligt, blev non-target (ikke-målrettet) analyser (NTA) inkluderet i analyseprogrammet. Det fulde analyseprogram og strategi for udvikling af analyseprogrammet findes i Bilag 1.

Migrationstesten blev udført som batchforsøg efter en amerikansk godkendelsesordning (NSF/ANSI 61). Princippet i disse tests er, at resinerne indledningsvis forbehandles efter leverandørens forskrift for ibrugtagning, derefter suspenderes de i vand i migrationsperioder på 60 minutter, hvorefter vandet blev udskiftet. Der blev prøvetaget til NTA efter 2. migrationsperiode og til specifikke analyser efter 3. migrationsperiode.

Der blev påvist migration fra alle tre resiner med specifikke target-analyser, med tydelige fund, hvor de migrerende stoffer blev påvist i betydelige koncentrationer jf. Tabel 2 . Analyserne viste god overensstemmelse mellem duplikaterne og uden fund i kontrolprøver jf. Tabel 2 . Der blev ved target-analyser påvist afsmitning af NVOC, formaldehyd, acetophenon, tributylamin, dichlormethan, 1,2-dichlorethan og N-nitrosodibutylamine (NDBA) jf. Tabel 2. Størstedelen (65) af de 72 stoffer, der blev analyseret for med specifikke target-analyser, blev ikke påvist.

Tabel 2: Koncentration af stoffer påvist med specifikke target-analyser i migrationstest af tre ionbytterresiner i batchforsøg (duplikat) udført på DTU Sustain. DL = detektionsgrænse. For en detaljeret beskrivelse af metode henvises til Bilag 1.

	Enhed	DL	Kontrol		Resinex PFCR-1		Purofine PFA694E		SE/DW		Udført af
			A	B	A	B	A	B	A	B	
NVOC	mg/l	0,1	-	0,17	1,14	1,04	1,29	1,12	0,46	0,36	DTU Sustain
Formaldehyd	µg/l	1,0	-	-	443	322	-	-	-	-	DTU Sustain
Acetophenon	µg/l	0,05	-	-	0,065	0,056	-	-	0,26	0,35	DTU Sustain
Tributylamin	µg/l	100	-	-	850	770	-	-	220	150	DTU Sustain
Dichlormethan	µg/l	0,02	-	-	0,057	0,047	-	-	-	-	Eurofins
1,2-dichlorethan	µg/l	0,02	-	-	5,1	4,8	-	-	0,15	0,19	Eurofins
N-Nitrosodibutylamin (NDBA)	ng/l	1	-	-	26,0	56	14,1	4,0	64,0	70,0	Eurofins
- angiver at prøvens indhold er under detektionsgrænsen (DL)											

De højeste koncentrationer blev målt for tributylamin i prøver fra Resinex (670-750 µg/L) og SE/DW (50-120 µg/L), samt for formaldehyd i prøver fra Resinex (322-443 µg/L) jf. Tabel 2. I prøver fra Resinex blev 1,2-dichlorethan påvist i koncentrationer over kvalitetskrav til drikkevand (BEK nr. 940 af 22/07/2024). Nitrosaminer som N-nitrosodibutylamine (NDBA) blev påvist i koncentrationer på 4-70 ng/L jf. Tabel 2, men der foreligger ikke egentlige grænseværdier for dette stof. Nitrosaminer betragtes generelt som carcinogene, og for et lignende stof (N-nitrosodimethylamin (NDMA)) angives en estimeret livslang cancerisiko på 1 ud af 10.000 ved en 70 ng/L i drikkevand (US EPA, 2018).

Non-target analysen påviste en række stoffer, som ikke blev påvist med de specifikke analyser: Ibutylamin, tertiære aminforbindelser/fragmenter, O-tributylamin / tributylamin-N-oxid, styren-fragmenter, monoethyl phthalat og diethylphthalat, samt pentasakkarider og en række ikke-karakteriserede features (kromatografisk top ved specifik masse og retentionstid) (jf. Tabel 3). De fleste af disse stoffer var ikke omfattet af måleprogrammet for specifikke analyser, så på denne måde bidrog non-target analyse til påvisning af stoffer, som det med den forudgående viden ikke kunne forudses.

Alle resinerne afgav dibutylamin, tributylamin eller fragmenter heraf, tertiære aminforbindelser/fragmenter, O-tributylamin / tributylamin-N-oxid, NDBA, styren-fragmenter samt NVOC.

Derudover var migrationen forskellig fra de forskellige resiner, og de specifikke analyser viste størst migration fra Resinex, dernæst SE/DW og Purofine. Udover de stoffer, alle resinerne afgav, blev der desuden afgivet acetophenon, formaldehyd, dichlormethan, 1,2-dichlorethan samt monoethyl phthalat og diethyl phthalat fra Resinex; og acetophenon, 1,2-dichlorethan samt pentasakkarider fra SE/DW. Migrationen var mindst fra Purofine både i antal stoffer og koncentration, og baseret på de specifikke analyser blev der kun påvist afsmitning af NDBA og NVOC. NVOC-koncentrationen var imidlertid på samme niveau som fx Resinex, hvilket ikke kunne forklares med kulstofindholdet i de påviste stoffer jf. bilag 1. Non-target analysen påviste imidlertid afgivelse af en række sukkerstoffer (fx pentasakkarider) og tributylamin, samt fragmenter herfra, som kunne forklare den tilsyneladende forskel. Non-target analysen viste flest unikke features (1680) for Resinex, dernæst Purofine (661) og SE/DW (213). Der blev fundet 552 fælles features for de tre resiner, hvor den højeste peakintensitet blev fundet i prøver fra Resinex, dernæst SE/DW og Purofine jf. bilag 1.

De betydelige fund af tributylamin og aminforbindelser viser afsmitning fra resinernes funktionelle grupper. Fund af styren-fragmenter tyder på afsmitning fra fremstillingen af polymermatricen til resinens skelet, og de øvrige fundne stoffer kan stamme fra elementer til fremstillingen af resin – eller være nedbrydningsprodukter fra disse elementer. Der kan også være tale om hjælpestoffer benyttet under fremstillingen.



Tabel 3: Sammenligning af resultater fra specifikke target analyser og non-target analyser (NTA) af migrationsprøver fra ionbytter-resiner.

Fundne stoffer/analyse	Kontrol		Resinex PFCR-1		Purofine PFA694E		SE/DW	
	Target	NTA	Target	NTA	Target	NTA	Target	NTA
NVOC	+	n.a	+	n.a	+	n.a	+	n.a
Formaldehyd	<	n.a	+	n.a	<	n.a	<	n.a
Dichlormethan	<	n.a	+	n.a	<	n.a	<	n.a
1,2-dichlorethan	<	n.a	+	n.a	<	n.a	+	n.a
Acetophenon	<	<	+	<	<	<	+	<
Styren-fragmenter	<	<	<	+	<	+	<	+
N-Nitrosodibutylamin (NDBA)	<	<	+	<	+	<	+	<
Dibutylamin (C ₈ H ₁₉ N)	-	<	-	+	-	+	-	+
Tributylamin (C ₁₂ H ₂₇ N)	<	<	+	++	-	++	+	++
<i>Tributylamin fragmenter:</i>								
C ₆ H ₁₃ N	-	<	-	+	-	+	-	+
C ₇ H ₉ NO	-	<	-	++	-	+	-	++
C ₁₂ H ₂₅ N	-	<	-	+	-	+	-	+
C ₁₂ H ₂₅ NO	-	<	-	+	-	+	-	+
C ₁₂ H ₂₇ NO (O-tributylamin/tributylamine N-oxide)	-	<	-	++	-	++	-	++
<i>Øvrige tertiære aminforbindelser/fragmenter:</i>								
C ₁₁ H ₂₆ N	-	<	-	+	-	+	-	+
C ₂₀ H ₃₃ NO ₂	-	<	-	++	-	++	-	++
C ₂₁ H ₃₅ NO	-	<	-	++	-	+	-	++
C ₆ H ₁₃ N	-	<	-	+	-	+	-	+
C ₆ H ₈ O	-	<	-	+	-	+	-	+
Tetraethylammonium (fragment)	-	<	-	+	-	+	-	+
<i>Andet</i>								
N,N-Dibutylformamid	-	<	-	+	-	+	-	+
Monoethyl phthalat	-	<	-	+	-	-	-	-
Diethyl phthalat	-	<	-	+	-	-	-	-
Pentasakkarider	-	<	-	-	-	+	-	+
Ikke definerede fragmenter	-	<	-	++	-	++	-	++

- = Ikke analyseret
n.a.= Ikke tilgængelig med analysemetoden
< = Mindre end detektionsgrænse/ikke detekteret
+ = Fund
++ = Fund med høj peakintensitet (signal >10⁶)

Undersøgelsen blev udført som en standardiseret batchtest, der repræsenterer et worst case scenarium med nye resiner og meget længere kontakttid end under normal drift. De målte koncentrationer afspejler således ikke en normal driftssituation. Formålet var at identificere stoffer, der afgives fra resinerne, og hvilke man skal være opmærksom på ved introduktion af

ionbytterresiner til PFAS-fjernelse. På baggrund af undersøgelsen er der opstillet et forslag til analyseprogram til overvågning af drikkevandskvalitet ved opstart og indkøring af disse resiner jf. Tabel 4.

Danske erfaringer med etablering og indkøring af resiner til PFAS-fjernelse viste ligeledes fund af acetophenon og NDBA – men der har ikke nødvendigvis været analyseret for alle de stoffer, som denne undersøgelse har påvist. Generelt viste erfaringerne, at efter forbehandlingen falder koncentrationen af disse stoffer. Disse erfaringer understøtter nødvendigheden af at monitorere vandkvaliteten, også efter forbehandlingen af resinerne.

Tabel 4: Forslag til analyseprogram til overvågning af drikkevandskvaliteten ved opstart og indkøring af ionbytterresiner til PFAS-fjernelse i drikkevandsproduktion, baseret på analyse for specifikke stoffer.

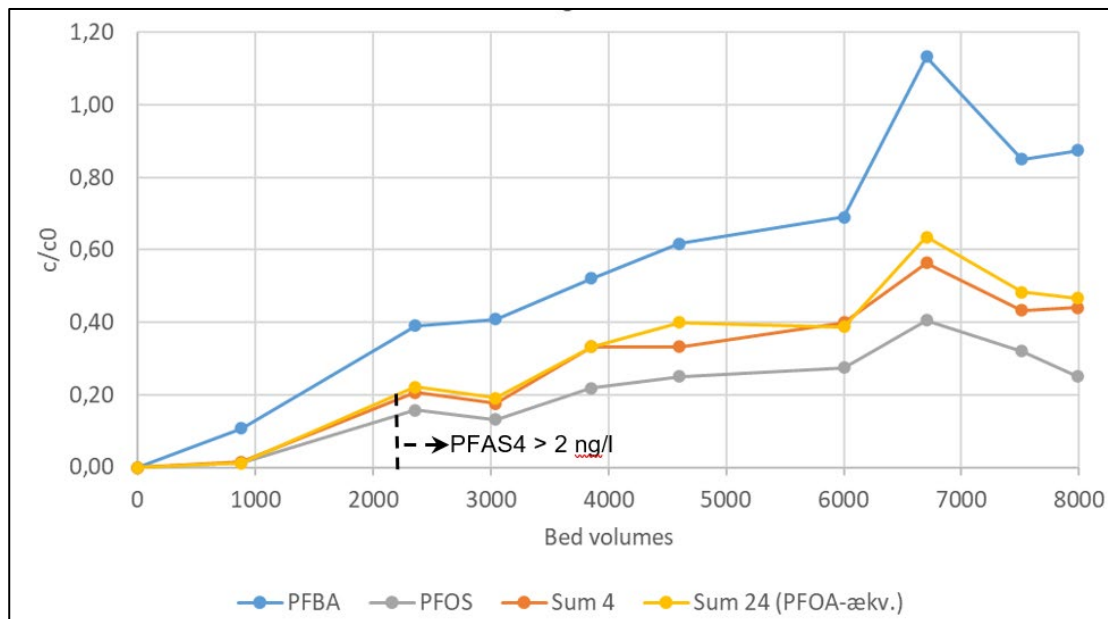
Stofgrupper	Anbefalet Detektionsgrænse*
NVOC	n.a. (0,1 mg/L)
AOC/mikrobiologisk eftervækst ¹⁾	n.a.
Nitrosaminer ²⁾	≤1 ng/L
Chlorerede alifater ³⁾	≤0,02 µg/L
Alkylaminer ⁴⁾	n.a.
Phthalater fx mono- og diethylphthalat	n.a.
Specifikke stoffer	
Acetophenon	≤0,05 µg/L
Styren	≤0,01 µg/L
Tributylamin	≤25 µg/L
Formaldehyd	≤2 µg/L
Napthalen	≤0,25 µg/L
N,N-dibutylformamid	n.a.
1) Er ikke undersøgt, men relevant hvis NVOC-analysen indikerer afgivelse af organisk stof, som ikke kan forklares med de påviste stoffer 2) Nitrosaminer: NDMA, NMEA, NDEA, NDPA, NDBA, NPIP, NPYR, NMOR 3) Chlorerede alifater: Chlorethan, 1,2-dichlorethan, dichlormethan, vinylchlorid *Angivet af DHI i analyseprogram for Amberlite og Purofine 4) Der bør udføres en vurdering af, hvilke alkylaminer der kan afledes fra den specifikke resins funktionelle gruppe. For resiner sammenlignelig med Resinex er relevante afledte fx dibutylamin, tripropylamin. *Angivet af DHI i analyseprogram for Amberlite og Purofine. n.a.= ingen anbefalet værdi	

Undersøgelse af PFAS-stoffer på udvalgte afværgeanlæg og kildepladser samt rensningseffektivitet på afværgeanlæg

For at øge vidensniveauet med hensyn til PFAS-stoffer i grundvandet er der gennemført et udvidet analyseprogram på fem af Region Hovedstadens afværgeanlæg og på 46 af HOFORs kildepladser, hvor der er udført target analyser for 51 PFAS-stoffer hos Eurofins. Resultaterne er detaljeret beskrevet i Bilag 2.

Generelt er der i alle analyser et sammenfald mellem de påviste stoffer i hhv. 22 og 51 PFAS-analysen med en enkelt undtagelse på én af HOFORs kildepladser (Kilde X), hvor stoffet PFECHS påvises, som kun indgår i 51 analysepakken. Så undtagen for dette stof (PFECHS) giver analyse for de udvalgte 51 PFAS ikke yderligere information, end hvad der kan opnås med analyse for pakken med 22 PFAS. Non-target analyser viste fund af PFPeS på Region Hovedstadens afværgeanlæg på Naverland 26 i Albertslund og fund af PFECHS på Solhøj Kildeplads. Disse stoffer blev ikke fundet med target analyserne, men begge stoffer indgår i analysepakkerne (hhv. PFAS22 og 51 PFAS-pakken), hvilket viser at non-target analyser kan have en lavere detektionsgrænse. På Solhøj Kildeplads blev der ved non-target analyse påvist stoffet PFPPrS, som ikke indgår i de normale PFAS analysepakker.

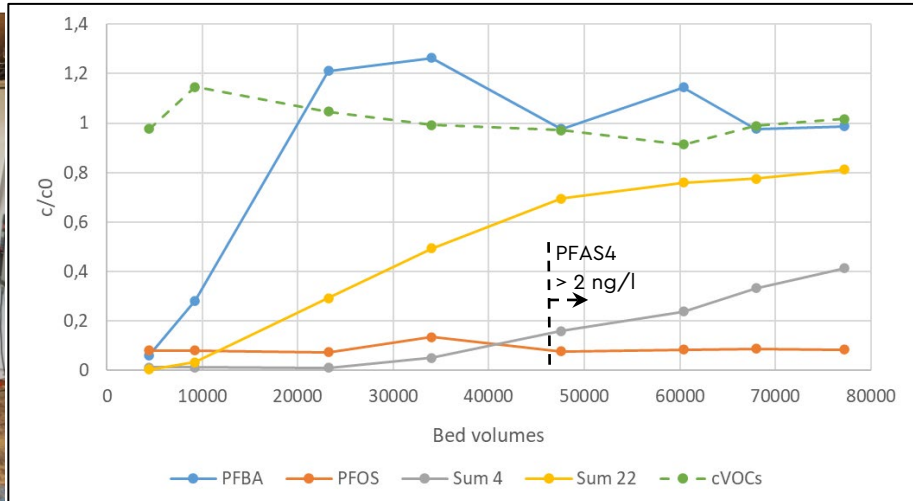
Rensningskapaciteten for PFAS på GAC blev bestemt på et af Region Hovedstadens afværgeanlæg på Naverland (jf. Figur 6). Anlægget består af 2 kulfilter i serie med hver 1.000 kg (ca. 2 m³) Aquasorb CS GAC fra Jacobi og en opholdstid på 27 minutter. Anlægget er udvalgt til PFAS kapacitetsbestemmelse, da anlægget har en høj belastning med andre miljøfremmede stoffer, og derfor sandsynligvis vil repræsentere en worst-case adsorptionskapacitet. Indløbskoncentrationer af klorerede opløsningsmidler er for PCE og TCE på 1.100-2.800 µg/l, for cis-DCE på 170-230 µg/l og for vinylklorid 0,7-2,8 µg/l. Indløbskoncentrationer af PFAS-stoffer ligger i niveauet 30-50 ng/l PFBA, 1,8-3,4 ng/l PFOS, 8-12 ng/l PFOA og 11-16 ng/l PFAS4.



Figur 6: Gennembrudskurver på Region Hovedstadens afværgeanlæg på Naverland 26 for udvalgte PFAS-stoffer og -grupper efter første kulfilter (1.000 kg kul, opholdstid 27 minutter), som funktion af gennemløbne beholdervolumener (BV) efter kulskift d. 16. jan. 2024.

Der er hurtigt gennembrud af PFBA efter < 1.000 gennemløbne beholdervolumener (BV), og fuldt gennembrud af PFBA efter ca. 6.500 BV i første kulfilter. Der er bedre tilbageholdelse af de længere kædede PFAS, hvor drikkevandskravet på 2 ng/l PFAS4 er overskrevet i første kulfilter efter ca. 2.300 BV. Ved projektets afslutning (161 dages drift, og 8.000 BV) er drikkevandskravet på 2 ng/l for PFAS 4 endnu ikke overskredet i udløbet fra 2. kulfilter, da udløbskoncentrationen efter 161 dages drift kun er 0,43 ng/l PFAS4. Dette giver en foreløbig rensningskapacitet på 125 g kul per m³ behandlet vand, men den endelige rensningskapacitet kan først beregnes ved fuldt gennembrud.

På et afværgeanlæg på Industrivej 28-30 i Hedehusene har Region Hovedstaden i en periode fra 2022-2024 haft et testanlæg med ionbytterresinen Purofine PFA694E (600 liters filter). Indløbskoncentrationerne til anlægget er 13-20 ng/l PFAS4 og 70-90 ng/l PFAS22 heraf er PFBA koncentrationen på 7-10 ng/l. Anlægget har kørt med et flow på 11 m³/h og en opholdstid på 3 minutter og en filterhastighed på 33 m/h. Gennembrudskurver fra anlægget er vist på Figur 7.



Figur 7: Tv: Foto af 600 L resinbeholder, diameter 0,65 m, flow 11 m³/h. Th: Gennembrudskurver for udvalgte PFAS-stoffer og -grupper samt sum af klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter (cVOCs) som funktion af gennemløbne beholdervolumener (Bed Volumes (BV)).

Der er i hele driftsperioden en god tilbageholdelse af PFOS på ionbytterresinen og til dels PFAS4, mens der hurtigt ses gennembrud af PFBA og fuldt gennembrud efter 15-20.000 BV. Udløbskoncentrationerne ligger over drikkevandskravet for PFAS4 efter ca. 48.000 BV. Rensningskapaciteten blev her estimeret til 21-23 g resin per m³ behandlet vand. Helt fra starten ses ingen tilbageholdelse af de klorerede forbindelser, så den testede ionbytterresin må siges at være selektiv overfor PFAS.

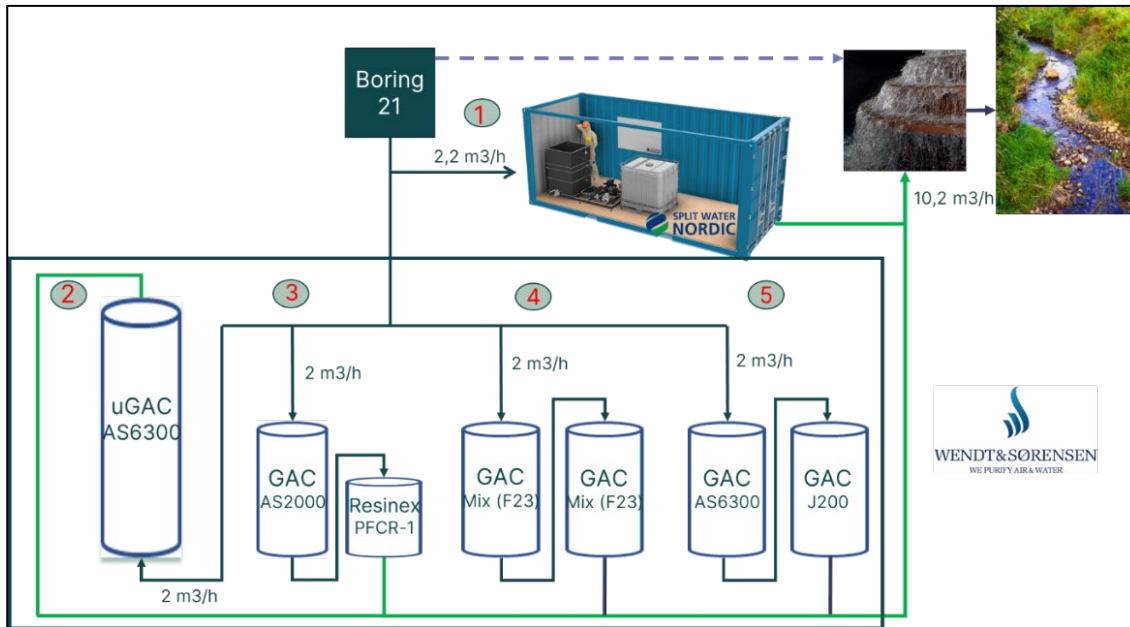
Pilotforsøg på Solhøj Kildeplads

For at undersøge hvilket sorptionsmedie, der har det største potentiale for at rense PFAS fra drikkevand, har HOFOR undersøgt rensningskapaciteten på forskellige typer aktivt kul samt en ionbytterresin i pilotskala ved Solhøj Kildeplads jf. bilag 3.

Formålene med pilotundersøgelserne har været at øge vidensniveauet ift. muligheden for at benytte disse teknikker til at rense drikkevand forurenet med PFAS, herunder:

- 1) At undersøge rensningseffektiviteten ved filtrering med aktivt kul og en ionbytterresin til kvalitetskravet i drikkevand.
- 2) At undersøge om der er udfordringer med afsmitning fra de undersøgte teknologier ved hjælp af target analyser (måling for kendte stoffer), suspect screening (screening for liste af stoffer) og non-target screening (ukendte stoffer).

Pilotanlægget til undersøgelse af PFAS-fjernelse på Solhøj Kildeplads består af fem parallelle testlinjer, der hver behandler en delstrøm på ca. 2m³/t jf. Figur 8.



Figur 8: Pilotanlægget på Solhøj Kildeplads til undersøgelse af sorptionsmedier til fjernelse af PFAS.

De fem parallelle test-linjer er følgende:

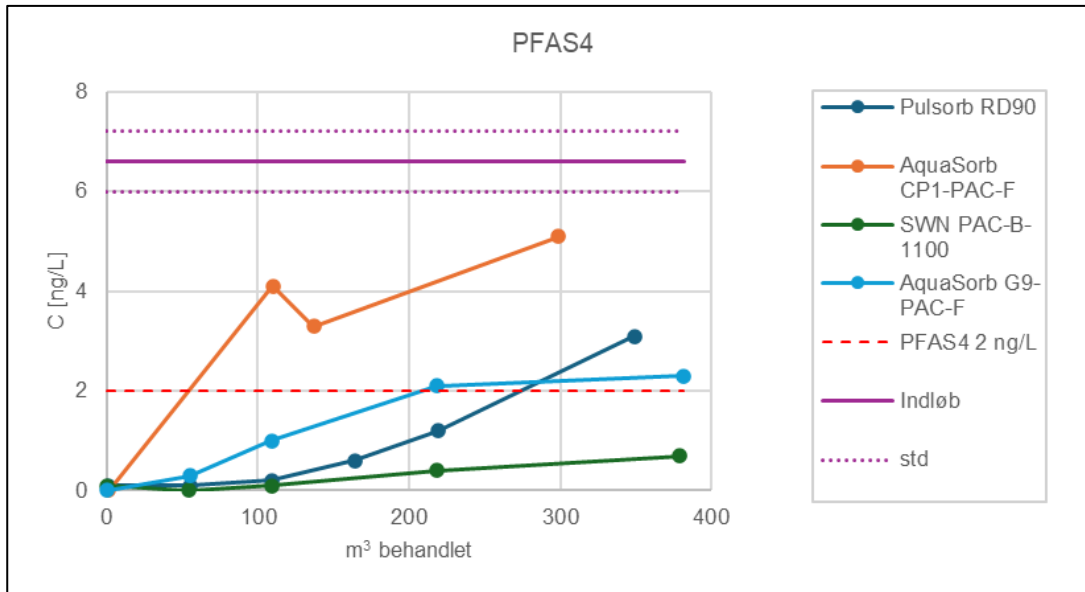
1. Pulveriseret aktivt kul (PAC) i kombination med en keramisk membran, hvor den keramiske membran bruges til tilbageholdelse af PAC kul, hvilket er en ny renseteknologi udviklet af Split Water Nordic.
2. Fluidiseret mikro-granuleret aktivt kul (μ GAC, AquaSorb AS6300) i et såkaldt Opacarb®FL anlæg, der er en ny renseteknologi udviklet af Veolia i Frankrig.
3. Traditionel granuleret aktivt kul (GAC, AquaSorb AS2000) i serie med ionbytterresin (Resinex PFCR-1 herefter benævnt RESINEX) som er anbefalet af Jacobi Carbons.
4. To traditionelle kulfiltre i serie med granuleret aktivt kul bestående af et GAC-mix (GAC, AquaSorb F23 I og F23 II), hvor kulmixet er udvalgt af Jacobi Carbons på baggrund af vandkvaliteten i boringen.
5. To traditionelle kulfiltre i serie med granuleret aktivt kul bestående af to standard GAC-typer, hvor den første kulstype anbefales til fjernelse af langkædede PFAS og den efterfølgende kulstype anbefales til kortkædede PFAS (GAC, AquaSorb AS6300 og AquaSorb J200).

Pilotanlægget og de undersøgte sorptionsmedier er nærmere beskrevet i Bilag 3.

Split Water Nordic pilotanlæg (PAC) (Testlinje 1)

Rensningskapaciteten i Split Water Nordics (SWN) anlæg med PAC, som tilbageholdes på en keramisk membran, blev undersøgt batch-vis i seks forskellige forsøg med en driftsperiode på hver 7 eller 14 dage, hvor effekten af forskellige PAC-typer og doseringsmængder blev vurderet.

Fjernelseseffektivitet af de fire undersøgte PAC-typer var højest for SWN PAC B-1100, som fjernede PFAS4 til under kvalitetskravet i hele forsøgsperioden jf. Figur 9. Denne kulstype er produceret i Malaysia og er ikke en standard kulstype. Der er således tvivl om levering af kulypen fremadrettet, og det blev derfor valgt at udføre supplerende test med den næstbedste kulstype Pulsorb RD90, hvor rensningseffektiviteten blev undersøgt med en øget kulmængde (1,2 og 4 kg kul).



Figur 9: Ind- og udløbskoncentrationer fra forsøg med fire forskellige PAC kulyper på Split Water Nordic pilotanlæg.

Kulforbruget til at fjerne PFAS4 blev ved SWN PAC pilotanlæg estimeret til <5 til 36 g/m³ (Tabel 5). Ved at øge mængden af kul fra 1 til 2 kg steg fjernelseeffektiviteten. Den samme effekt blev ikke observeret ved en yderligere øgning fra 2 til 4 kg kul, hvilket formentligt skyldes, at den større kulmængde ikke kunne fordeles homogent på membranen og dermed opretholde dets struktur på den keramiske membran ved det anvendte vakuum. Kulforbruget med vandtypen fra Solhøj Kildeplads var således 7 g/m³ behandlet vand for standardkulyperen Pulsorb RD90.

Det brugte PAC kul kan ikke regenereres, men skal bortskaffes til godkendt forbrændingsanlæg.

Tabel 5: Resultater fra pilottest med Split Water Nordic (PAC kul i kombination med keramisk membran). Kulforbrug er beregnet ved en udløbskoncentration af PFAS4 på 2 ng/l.

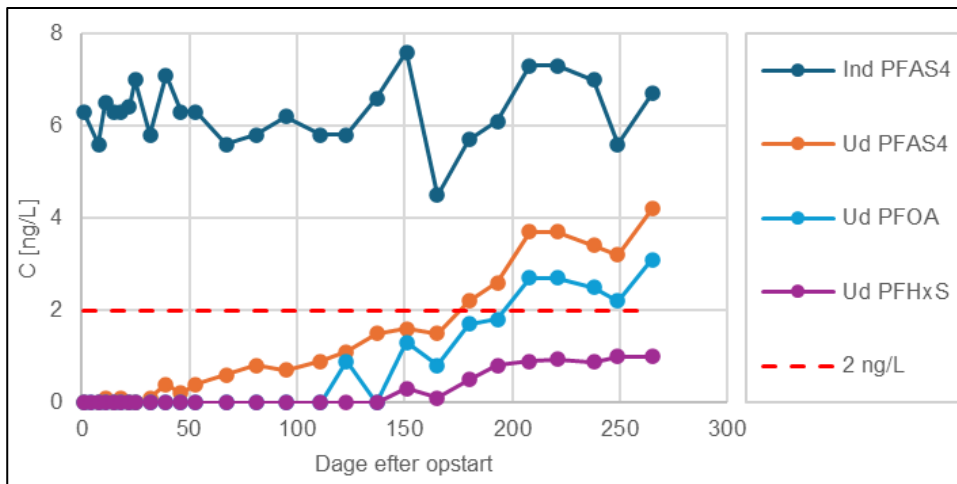
SWN Test runde	PAC type	PAC mængde (kg)	Fjernet % PFAS 4 (7 dage)	Fjernet % PFAS 22 (7 dage)	PAC Producent	Kulforbrug (PFAS4 2 ng/l) g/m ³
1	Pulsorb RD90	1	22	6	Chemviron	10
2	Pulsorb RD90	2	47	26	Chemviron	7
3	AquaSorb CP1-PAC-F	2	25	10	Jacobi	36
4	SWN PAC B-1100	2	88	48	Century chemical	< 5
5	AquaSorb G9-PAC-F	2	60	35	Jacobi	10
6	Pulsorb RD90	4	-	-	Chemviron	13



Opacarb®FL anlæg (µGAC) (Testlinje 2)

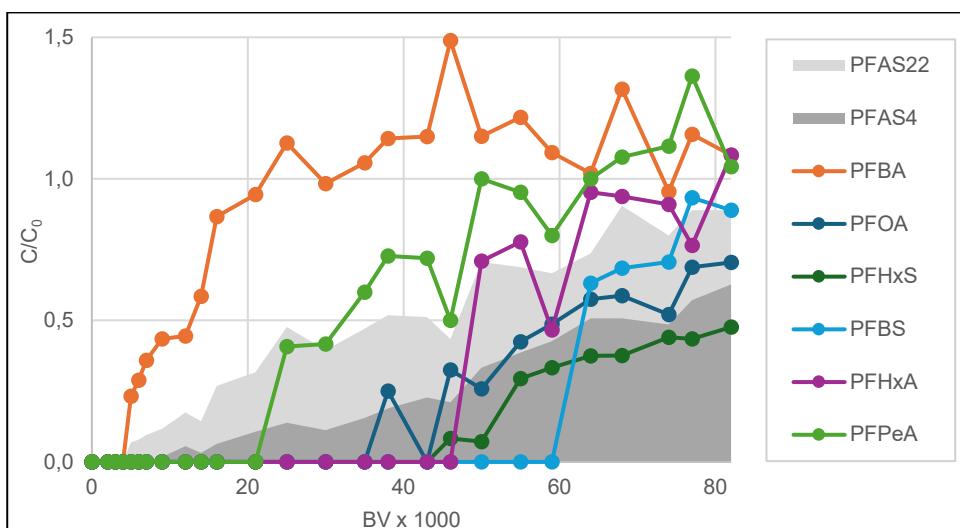
Opacarb®FL teknologien består af en cylindrisk reaktor/kolonne, der er fyldt med suspenderet granuleret aktivt kul med en kornstørrelse på 0,3-0,8 mm, kaldet µGAC. I reaktoren filtreres den opadgående vandstrøm af det fluidiserede µGAC.

PFAS4 blev fjernet til under kvalitetskravet på 2 ng/l til og med 165 dages drift (jf. Figur 10), hvilket svarer til et kulforbrug på ca. 8 g/m³.



Figur 10: Ind- og udløbskoncentrationer af PFAS4 i µGAC-pilotanlæg.

Adsorptionskapaciteten for PFAS-forbindelserne på µGAC kullet blev rangordnet i forhold til deres kædelængde og struktur i overensstemmelse med litteraturen: PFBA (C4, PFCA) < PFPeA (C5, PFCA) < PFHxA (C6, PFCA) < PFBS (C4, PFSA) < PFOA (C8, PFCA) < PFHxS (C6, PFSA). Som den korteste PFAS-forbindelse undersøgt var PFBA den mest udfordrende at fjerne via adsorption. Samtidig blev der observeret en langvarig desorption af PFBA fra µGAC efter et fuldt gennembrud ved ca. 21.000 BV jf. Figur 11.

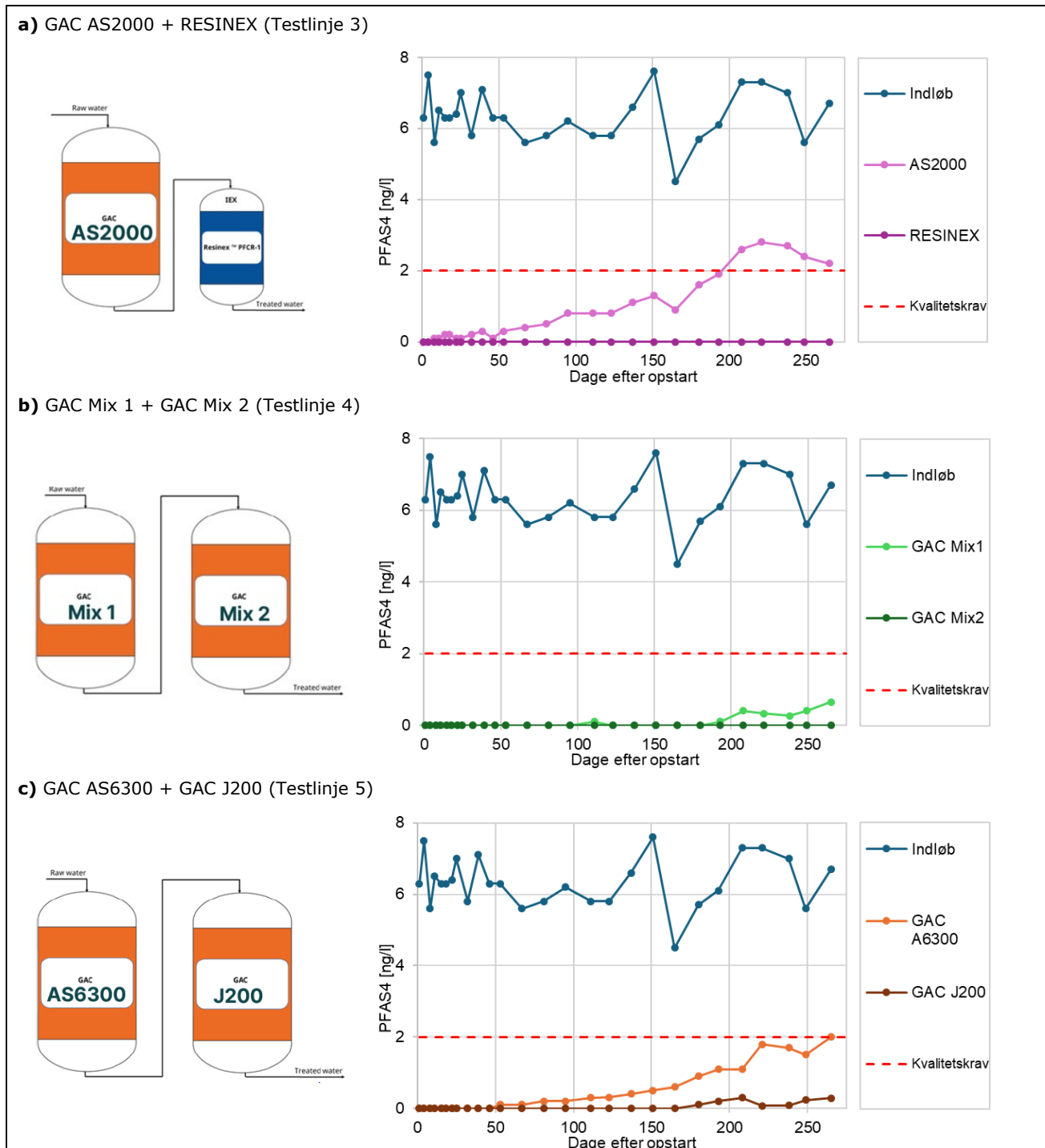


Figur 11: Fjernelse af PFAS-forbindelser i µGAC-pilotanlæg på Solhøj Kildeplads, C/C_0 er den målte udløbskoncentration normaliseret i forhold til indløbet (C_0) til et givent prøvetagningstidspunkt, BV er antallet af gennemløbne filter volumener.



GAC med efterpolering med ionbytterresin (Testlinje 3) og traditionelle GAC-anlæg (Testlinje 4 og 5)

Undersøgelserne af PFAS-fjernelse i GAC med efterpolering med ionbytterresin (testlinje 3) og af traditionel GAC i serie (testlinje 4 og 5) viste, at alle testlinjer fortsat effektivt fjernede PFAS4 efter 265 dages drift svarende til ca. 12.000 m³ behandlet vand og hhv. 29.000 BV (testlinje 3), 19.000 BV (testlinje 4) og 18.000 BV (testlinje 5) (jf. Figur 12).



Figur 12: Gennembrudskurver af PFAS4 på testlinje 3, 4 og 5 på pilotanlæg på Solhøj Kildeplads.

GAC med efterpolering med ionbytterresin såvel som kulmixet i serie fjernede PFAS4 til under detektionsgrænsen, men i testlinje 5 (kombination af to forskellige GAC-typer i serie) blev der observeret begyndende gennembrud af PFOA efter 180 dage (ca. 12.500 BV).

PFAS4 blev observeret over kvalitetskravet for drikkevand i første GAC-filter i testlinje 3 og 5 (AS2000 og AS6300) jf. Figur 12 efter 193 og 265 dage svarende til hhv. 32.000 og 38.000 BV. Dette svarer til et kulforbrug på 12-16 g/m³ jf. Tabel 6. Der blev ikke observeret udløbskoncentrationer af PFAS4 i kulmix 1 over 0,65 ng/L, hvorfor kulforbrug i testlinje 4 endnu ikke kan beregnes, men det kan estimeres til <12 g/m³ jf. Tabel 6. Kulmixet viste - foruden den bedste fjernelse af PFAS4 (PFOA og PFHxS) - også den bedste fjernelse af PFHxA i pilotanlægget på Solhøj Kildeplads (Bilag 3).

Tabel 6: Sammenligning af PFAS-fjernelse i forskellige sorptionsmedier i pilotanlæg på Solhøj Kildeplads.

Testlinje	1) PAC	2) µGAC	3) GAC + IX		4) GAC Kulmix		5) GAC	
Sorptionsmedie	SWN-PAC-B-1100	µGAC AS6300	AS2000	AS2000 +RESINEX	Mix 1	Mix 1 + Mix 2	AS6300	AS6300 +J200
Mængde (kg)	2	70	150	250	150	300	145	295
EBCT (min)	3	11	10	14	10	20	10	20
PFAS4 > 2 ng/L								
Kulforbrug ^{1,2)} (g/m ³)	< 5	8	16	<20	<12	<24	12	<24
- BV	-	59.000	32.000	> 29.000	>38.000	>19.000	38.000	>18.000
- m ³	>379	8.800	9.200	>12.400	>12.400	>12.400	12.400	>12.400
Note: 1) Kul-/resinforbrug er beregnet mængde af filtermedie (g) divideret med den behandlede vandmængde (m ³) ved et observeret gennembrud for PFAS4 > 2 ng/L. For anden kolonne i en serie er kulforbruget estimeret som summen af filtermedier for hele testlinjen. 2) Hvor der er angivet "<" blev der endnu ikke observeret gennembrud af PFAS4 > 2 ng/L i forsøgsperioden på 265 dage.								

Gennembruddet af NVOC (ikke-flygtigt organisk kulstof) i pilotanlæggene blev fulgt over forsøgsperioden (jf. bilag 3), og resultaterne viste, at der i µGAC var fuldt gennembrud (1 mg/L) efter ca. 35.000 BV. Dette kan give en indikation af, hvornår der forventes gennembrud på de øvrige pilotanlæg, hvor traditionel GAC og ionbytterresin (testlinje 3) ved forsøgsperioden slutning havde behandlet ca. 29.000 BV og de øvrige to testlinjer (testlinje 4 og 5) havde behandlet ca. 18.000 BV.

Andre miljøfremmede stoffer undersøgt i pilotanlæggene inkluderede DMS, TFA og 2,5-DCBSA. De to sidstnævnte stoffer blev dog kun undersøgt ved SWN teknologi (Testlinje 1). Resultaterne viste, at DMS generelt blev fjernet bedst i traditionel GAC-filtre ved brug af kokosnød-baseret GAC J200 (Bilag 3). TFA blev ikke fjernet i testlinje 1 (PAC i kombination med keramisk membran), men 2,5-DCBSA blev fjernet fra ca. 0,1 µg/L til under detektionsgrænsen (<0,01 µg/L) gennem hele forsøgsperioden.

Resultater fra suspect- og non-target screening

For at undersøge dels afsmitning og dels om der i indløbsvandet til pilotanlægget på Solhøj Kildeplads var flere PFAS-stoffer end dem, der kan detekteres med target analyser, og i givet fald, hvordan fjernelsesgraden af disse stoffer var, udførte KU suspect screening på ind- og udløb. Der blev udtaget prøver til non-target screening inden filtermaterialerne blev lagt i anlæggene (t0) for at undersøge afsmitning fra materialer anvendt i pilotanlæggene og igen efter hhv. 5 dages drift (t1) og 7 måneders drift (t2). Dog blev testlinje 1 (PAC i kombination med keramisk membran) kun

prøvetaget én gang. Resultaterne er publiceret i Tisler et al. (*submitted*), hvor også den anvendte non-target analysemetode er beskrevet i detaljer.

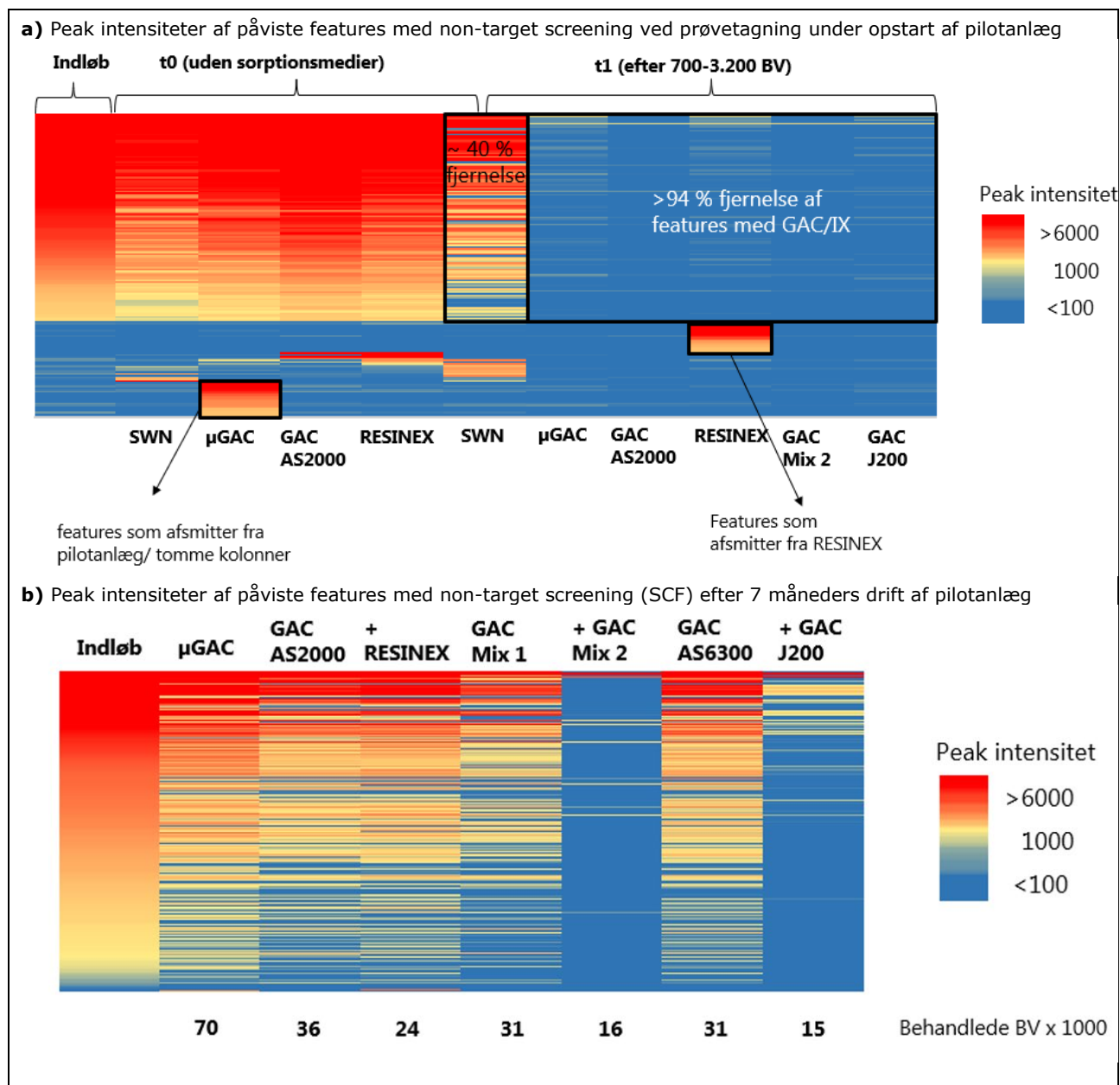
Non-target screening af vand fra pilotanlæggene viste indledningsvist, at pilotanlæggene uden adsorptionsmedier gav anledning til afsmitning (jf. Tabel 7, Figur 13). Der blev primært observeret afsmitning fra μ GAC-pilotanlægget, som bestod af plexiglas, og her blev stofferne Hexa(methoxymethyl)-melamine og 2-Octenylsuccinic Anhydride identificeret (jf. bilag 3). Dette pilotanlæg blev bygget uden hensyntagen til brug af materialer godkendt til brug i kontakt med drikkevand, hvorfor afsmitningen ikke var forsøgt undgået. De to identificerede afsmitningsstoffer blev dog fjernet i kulfilteret, da de ikke kunne detekteres i udløbet jf. Tabel 7.

Tabel 7: Identificerede stoffer ved non-target analyse, som afsmitter fra RESINEX og μ GAC pilotanlæg på Solhøj Kildeplads. ID: Identifikations-niveau, 1) Stoffet er bekræftet med referencestandard; 2) Stoffet er en sandsynlig "stofkandidat" ud fra databaser. Ip: ikke påvist (Tisler et al, submitted).

Navn/kemisk formel	Afsmitning fra	ID	5 døgn ng/L	7 md. ng/L
Monobutyl phthalat	RESINEX	1	140	Ip.
O-tributylamin	RESINEX	2	34	2
Tributylamin	RESINEX	1	12	13
N-oxide tributylamin	RESINEX	2	804	43
Hexa(methoxymethyl)melamin	μ GAC-anlæg	2	Ip.	Ip.
2-Octenylsuccinic Anhydride	μ GAC-anlæg	2	Ip.	Ip.

I udløbet fra RESINEX blev påvist 20 features, som ikke var til stedet i indløbet, og derfor kan tilskrives afsmitning fra ionbytterresinen (jf. Figur 13). En feature er her defineret som en kromatografisk top (peak) ved en specifik retentionstid og masse. En feature kan være ét kemisk stof, men kan også være et fragment, så flere features tilsammen udgør et kemisk stof. Der blev identificeret 4 stoffer fra RESINEX kolonnen (jf. Tabel 7), heriblandt monobutyl phthalat, som tilhører en stoftype, som ofte anvendes som blødgøre i diverse plastikmaterialer. Det kan være bekymrende eftersom nogle phtalater mistænkes for at være hormonforstyrrende og derfor er uønskede i drikkevandet. Koncentration af monobutyl phthalat blev målt til 140 ng/l efter 5 døgn drift, men stoffet blev ikke påvist efter 7 måneders drift. Afsmitning af tributylamin, og derivater til tributylamin, som stammer fra resinens funktionelle gruppe, blev fundet i hele forsøgsperioden, dog faldt koncentrationen overordnet set fra første prøvetagning efter 5 døgn til anden prøvetagning efter 7 måneder, hvilket indikerede en aftagende afsmitning under drift. Dog blev der efter 7 måneders drift (ca. 24.000 BV) fortsat påvist afsmitning af tributylamin fra RESINEX i samme størrelsesorden 13 ng/L jf. (Bilag 3).

På baggrund af resultater fra migrationstest af resiner (Bilag 1) blev der udført opfølgende analyser af nitrosaminer og formaldehyd ved udløbet til RESINEX efter 137 dages drift svarende til ca. 15.000 behandlede BV. Der blev ikke påvist hverken nitrosaminer (< 1 ng/L) eller formaldehyd (< 1 μ g/L) over detektionsgrænserne.



Figur 13: Resultater fra non-target screening af pilotanlæg ved Solhøj Kildeplads (Tisler et al., submitted). BV er antallet af behandlede filter volumener. a) Heat-map med peak intensiteter af påviste features i pilotanlæg uden sorptionsmedier (t_0) og pilotanlæg med sorptionsmedier efter indkøring (t_1) via nts LC POS, og b) Heat-map med peak intensiteter af påviste features fra pilotanlæg efter 7 måneders drift (t_2) via nts SCF-POS.

Non-target screening viste generelt god fjernelseeffektivitet i alle testlinjer på Solhøj, hvor >94% af de påviste features i grundvandet blev fjernet i alle pilotanlæg (Figur 13a). Efter 7 måneders drift blev der generelt observeret flere features i udløbet fra pilotanlæggene. Her havde μ GAC behandlet et langt større antal BV end de øvrige testlinjer, hvorfor fjernelsen generelt var lavere (Figur 13b). GAC og efterpolering med RESINEX viste et større gennembrud af features end GAC Kulmix eller en kombination af forskellige GAC kultyper, hvilket skyldes at RESINEX havde en større selektivitet overfor PFAS-stoffer og samtidig en lavere fjernelseeffektivitet for øvrige miljøfremmede stoffer.

Der blev gjort fund af to yderligere PFAS-forbindelser på Solhøj Kildeplads (PFPrS og PFECHS) samt to industrikemikalier (2,4,5-TCBS og ACMBs), som der ikke tidligere er analyseret for. De fire stoffer blev dog alle fjernet effektivt i pilotanlæggene (> 85 % jf. Bilag 3).

Konklusion og perspektivering

Dette projekt har undersøgt afsmitning af miljøfremmede stoffer fra aktivt kul og ionbytterresiner samt test for tilstedeværelse af og rensning for PFAS-stoffer i dansk grundvand. Der er i projektet udført laboratorieundersøgelser af tre forskellige ionbytterresiner, en udvidet screening af mere end 51 PFAS-stoffer i grundvand, pilotundersøgelser af fem forskellige sorptionsmedier, samt erfaringsindsamling fra Region Hovedstadens afværgeanlæg og Silhorko-Eurowater's implementering af ionbytteranlæg i Danmark.

På baggrund af projektet kan der konkluderes følgende:

- 1) Ionbytterresiner som i Danmark anvendes til at fjerne PFAS, kan afsmitte uønskede stoffer til drikkevandet som fx nitrosamin og tributylamin.

Migrationstest har bl.a. vist afsmitning af et kræftfremkaldende stof nitrosamin samt en lang række andre uønskede mikroforureninger påvist gennem target analyser og non-target screening. Ved brug af ionbytterresiner i pilot- eller fuldskala blev der ikke målt nitrosaminer over detektionsgrænsen (1 ng/L), men der er påvist afsmitning af en række andre stoffer herunder tributylamin, der afsmitter kontinuert i op til syv måneder efter idriftsættelse. På baggrund af den nye indsigt i afsmitning fra ionbytterresiner, har projektet udviklet et kvalificeret analyseprogram, som kan hjælpe med at vurdere de afledte effekter ved implementering af denne renseteknologi. Det er essentielt, at nye renseteknologier til at fjerne uønskede stoffer som fx PFAS ikke tilfører nye uønskede stoffer, som forringer drikkevandets kvalitet. En god idriftsættelsesprocedure og monitorering af de potentielle stoffer, der afsmitter, er nødvendig for en fremtidig god implementering af ionbytterresiner i dansk vandbehandling.

- 2) Analysepakken med 22 PFAS-stoffer jf. drikkevandsbekendtgørelsen dækker generelt over de PFAS-stoffer, der pt. kan analyseres med 51 PFAS pakken.

I et udvidet analyseprogram med 51 PFAS-stoffer foretaget på fem af Region Hovedstadens afværgeanlæg og 46 af HOFORs kildepladser blev der - med en enkelt undtagelse - fundet et sammenfald mellem de påviste stoffer i hhv. 22 og 51 PFAS-analysen. Analyse for de udvalgte 51 PFAS giver derfor ikke yderligere information, end hvad der kan opnås med analyse for pakken med PFAS22. Non-target screening kan være mere følsom end target analyserne, da der i enkelte tilfælde blev påvist yderligere stoffer (PFPeS, PFECHS), som ikke blev målt med target analyserne med en detektionsgrænse på 1 ng/L. Derudover blev der ved non-target analyse påvist stoffet PFPrS, som ikke indgår i target analysepakkerne.

- 3) Aktivt kul og ionbytterresiner kan fjerne PFAS4 effektivt til under kvalitetskravet i drikkevand på 2 ng/L

Pilotforsøg på Solhøj Kildeplads viste, at aktivt kul fjernede PFAS4 med en rensningskapacitet på mellem 5 og <24 g kul per m³ behandlet vand. På afværgeanlæg med en markant højere belastning af miljøfremmede stoffer blev rensningskapaciteten estimeret til 125 g kul per m³ behandlet vand. GAC-filtrering med et kulmix baseret på indholdet af PFAS-stoffer i vandet eller GAC-filtrering i kombination med en ionbytterresin som efterpolering viste effektiv fjernelse af PFAS4 over hele forsøgsperioden på 265 dage og ca. 12.000 m³ behandlet vand. Der er derfor behov for at forlænge driftsperioden for en endelig estimering af rensningskapacitet, hvilket er et positivt resultat af pilotundersøgelserne, da alle testede teknologier effektivt fjerner PFAS4. PFAS-specifikke ionbytterresiner fjernede effektivt PFAS4 på afværgeanlæg med en rensningskapacitet på 21-23 g resin per m³ behandlet vand. Traditionel GAC-filtrering fjernede overordnet set flere miljøfremmede

stoffer påvist ved non-target screening end en PFAS-specifik ionbytterresin, hvorfor GAC-filtrering kan være at foretrække, hvis man har behov for en renseteknologi, som kan fjerne andet end PFAS-stoffer.

Litteraturliste

Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg, BEK nr 810 af 18/06/2024 (2024). <https://www.retsinformation.dk/eli/Lta/2024/810>

Bossi, Rossana (2024): "Målinger af PFAS i luft og nedbør". Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Teknisk rapport nr. 313.

Dixit, F., R. Dutta, B. Barbeau, P. Berube og M. Mohseni (2021): "PFAS removal by ion exchange resins: A review". Chemosphere 272.

Dinges, Björn (2024). "Lewatit® ion exchange resins for PFAS remediation: Challenges & Removal" Præsentation ved ZeroPM Seminar i Rasttat 12. Juni. 2024.

Hedegaard, Mathilde Jørgensen og Liselotte Clausen (2023): "Laboratorie- og pilotundersøgelser af aktivt kul og resiner til sorption af DMS". Bilag 2 til VUDP-rapport 19. september 2023. <https://danva.dk/publikationer/vudp-rapporter/renseteknologi-for-nye-pesticidrester-dms-og-metabolitter-fra-alachlor-og-dimethachlor-paa-vandvaerker/>.

Henriksen, Anne og Søren Rygaard Lenschow (2024): "Kan PFAS virkelig spredes fra havet til grundvand?". Fremlæggelse på ATV Jord & Grundvand Vintermøde 5. marts 2024.

Høje-Taastrup Kommune (2024): "Redegørelse for PFAS-forureninger i Høje-Taastrup Kommune". Notat til Miljø- og Fødevareudvalget 2023-24. MOF Alm del – Bilag 502.

Johnsen, Anders, Lærke Thorling og Christian N. Albers (2023): PFAS-stoffer og pesticider i grundvand. Nationalt overblik 2023 til brug for InSA-Drikkevand. Teknisk rapport". GEUS, Rapport 2023/42.

Nicolaisen, Ellen og Katerina Tsitonaki (2016): "Kortlægning af brancher der anvender PFAS", Miljøprojekt nr. 1905, Miljøstyrelsen

Nørgaard, Vibeke, Ingrid Frederiksen, Peter Borch Nielsen, Søren Dyreborg og Anders G. Christensen (2022): "PFAS. Litteraturstudie ang. metoder til fjernelse af PFAS på vandværker". Rapport udarbejdet for HOFOR af Niras/Krüger.

Saawarn, Bhavini, Mahanty Byomkesh, Subrata Hait og Sahid Hussain (2022): "Sources, occurrence, and treatment techniques of per- and polyfluoroalkyl substances in aqueous matrices: A comprehensive review". Environmental Research, Volume 214, Part 4.

Thorling, L., C. N. Albers, C.B. Ditlefsen, B. Hansen, A. R. Johnsen, J. Kazmierczak, M. H. Mortensen & L. Trolborg, L. (2024). "Grundvandsovervågning. Status og udvikling 1989-2022". GEUS.

Tsitonaki, Katerina, Stine Priess og Sandra Roost (2023): "Overblik over viden om PFAS til vurdering af grundvands mulige påvirkning af overfladevand". Rapport udarbejdet af WSP til Miljøstyrelsen.

Tüchsen, Peter Lysholm, Anne H. Thomsen, Manuela Schliemann-Haug, Liselotte Clausen, Mathilde J. Hedegaard, Martin Bymose, Louise Aahauge, Rasmus Boe-Hansen, Krüger og Hans-Jørgen Albrechtsen (2023): "Renseteknologier for nye

pesticidrester (DMS og metabolitter fra alachlor og dimethachlor) på vandværker.
DANVA VUDP Projektrapport.

US EPA (2018). United States Environmental Protection Agency. *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories (DWSHA)* (Standard EPA 822-F-18-001; s. 12). EPA, Office of Water.