

Renseteknologier overfor PFAS i vand

Dorte Harrekilde

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.



IT'S THE 80s ALL OVER AGAIN...

Solution Timeline in Decades (e.g., trichloroethylene)



Solution Timeline in Years (PFAS)

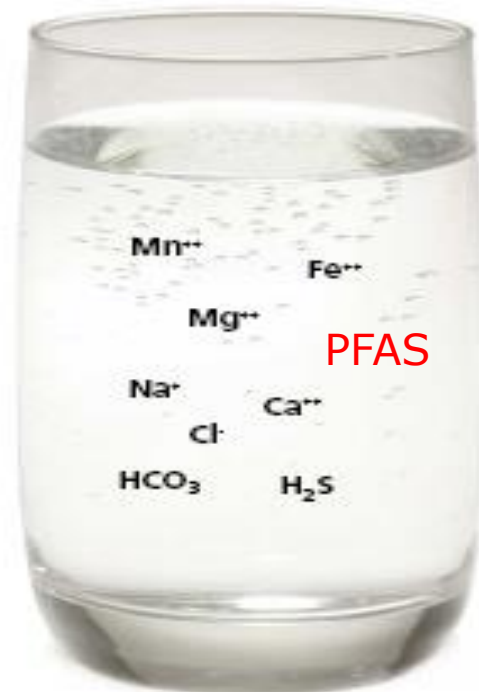


Adapted from: Newell et al., PFAS Experts Symposium 2: PFAS Remediation research – Evolution from past to present, current efforts, and potential futures. (2022) *Remediation Journal*, 1–9. <https://doi.org/10.1002/rem.21705>

Vand

- Grundvand
- Overfladevand
- Perkolat

- → Ex-situ rensning

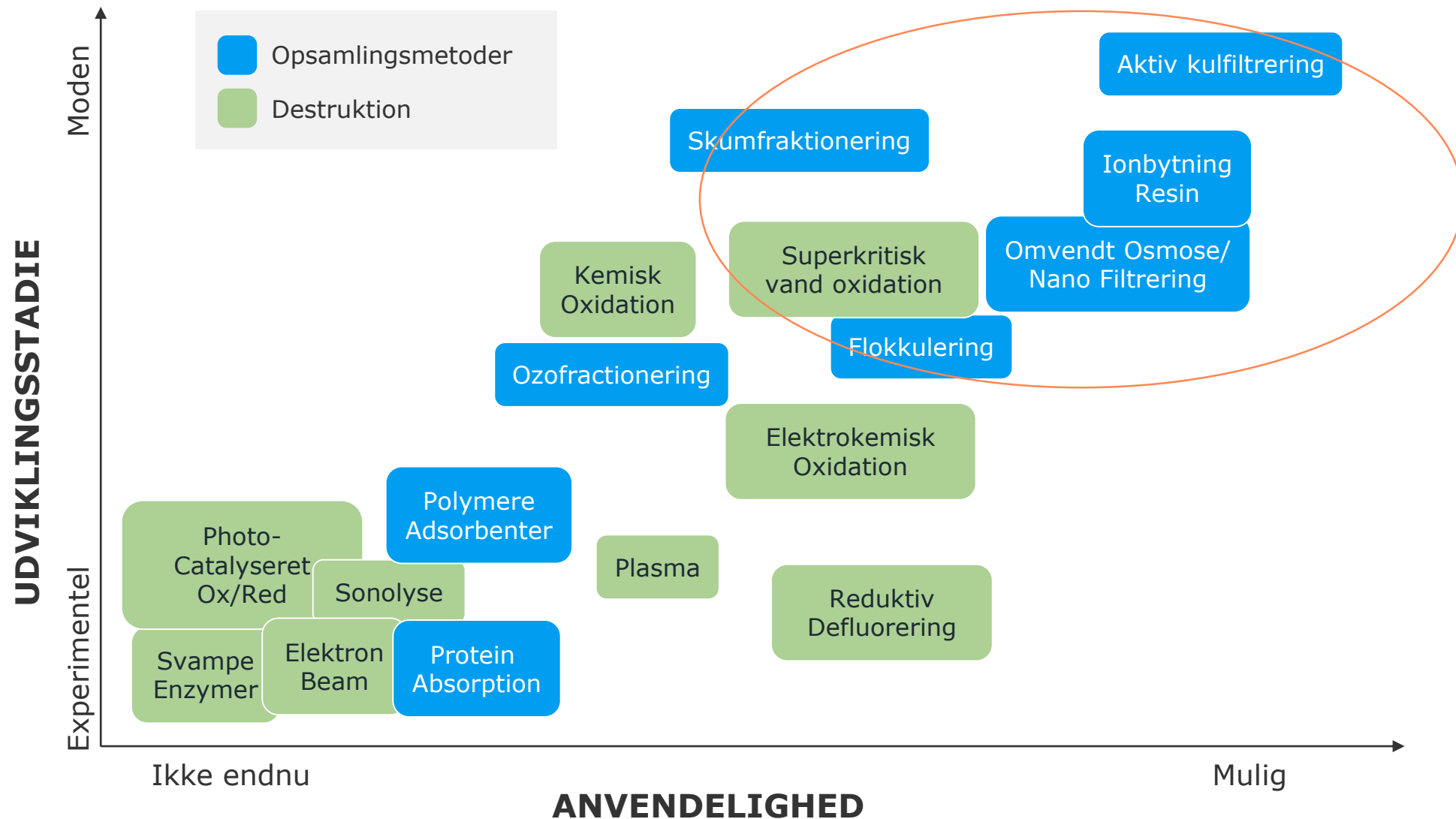


Ikke med i dag:

In-situ rensning af grundvand

- Termisk desorption og opsamling
- Opgravning af jord og jordvask
- Biologiske metoder (ikke endnu)
- ISCO/ISCR (ikke endnu)
- Permeable reaktive barrierer
- Sorptions- og stabiliseringsmetoder med f.eks. PlumeStop eller Fluorosorb – fjerner ikke PFAS

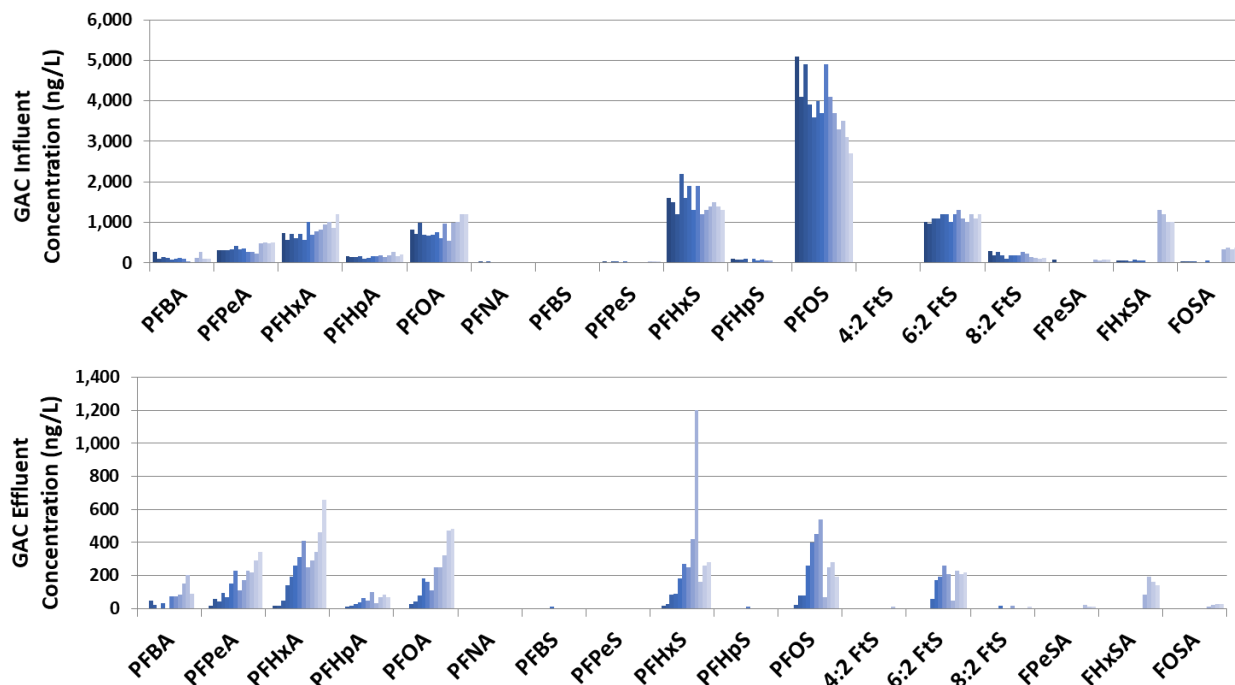
Metoder til rensning af vand med PFAS*



Kulfiltrering (GAC)



Adsorption af molekyler til ladet overflade via van der Waals kræfter



Moden		
Experimentel		
	Ikke endnu	Anvendelig

- + Pt den mest anvendte rensemetode
- + Renser vand til ng/L niveau
- + Kan anvendes til drikkevand
- + Forbrugt GAC skal forbrændes (eller i fremtiden regenereres)
- Renseeffektivitet afhænger af PFAS-type og molekylvægt, mindre effektiv overfor kortkædede
- PFAS kan frigives fra GAC, hvis et andet stof har større affinitet for GAC

Photo fra Calgon Carbon Corporation, 2018

Ionbytning (IX)

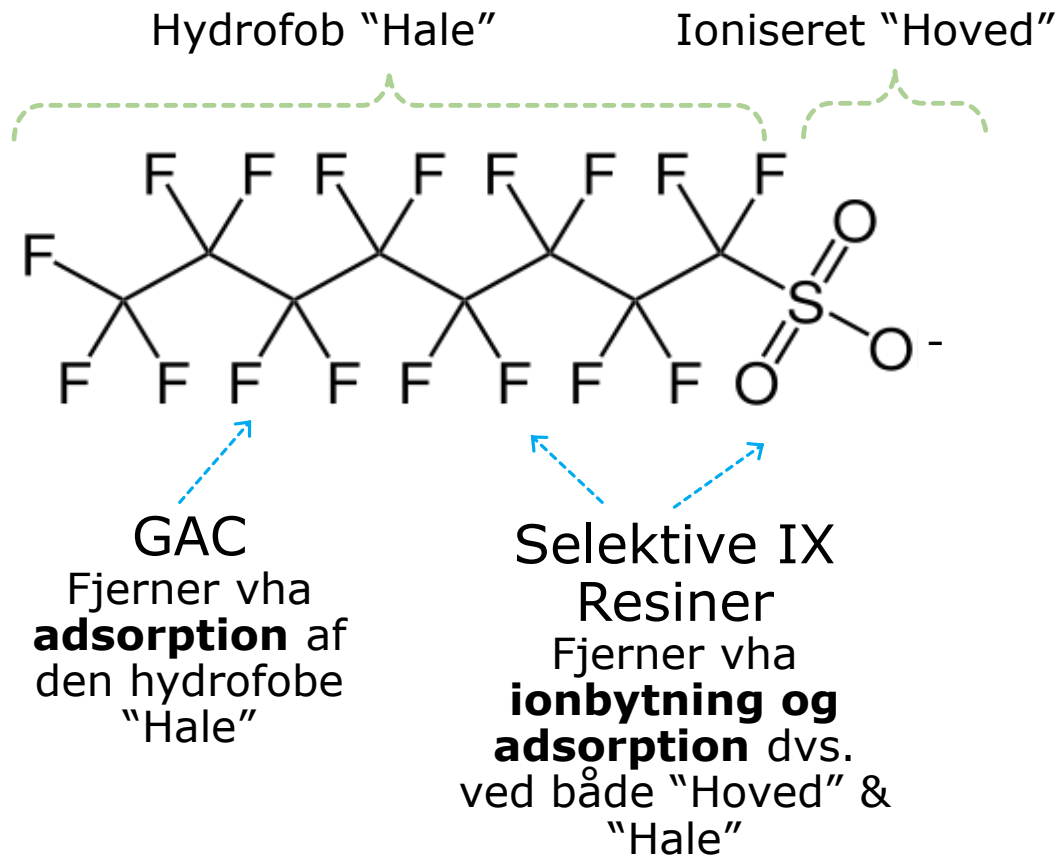
- + Effektiv (kortkædede.....)
- + Mindre kolonne størrelser end GAC og mindre resin pr. ng PFAS
- + Høj operationel kapacitet (100k'ers BV)
- Resiner koster mere end GAC
- ± Regenering af resiner er mulig, hvis rensed vand ikke skal bruges til drikkevand (men nok ikke i Norden pt)
- ± Livs cyclus omkostninger svarer til GAC
 - GAC forbrug baseret på kulstofstype, succeskriterier for PFAS og den øvrige kemi i perkolatet
 - IX forbrug også baseret på krav til resin og lokalitetsspecifikke krav
 - Vurdering skal indeholde bortskaffelsesomkostninger

Moden		
Experimenteal		
	Ikke endnu	Anvendelig

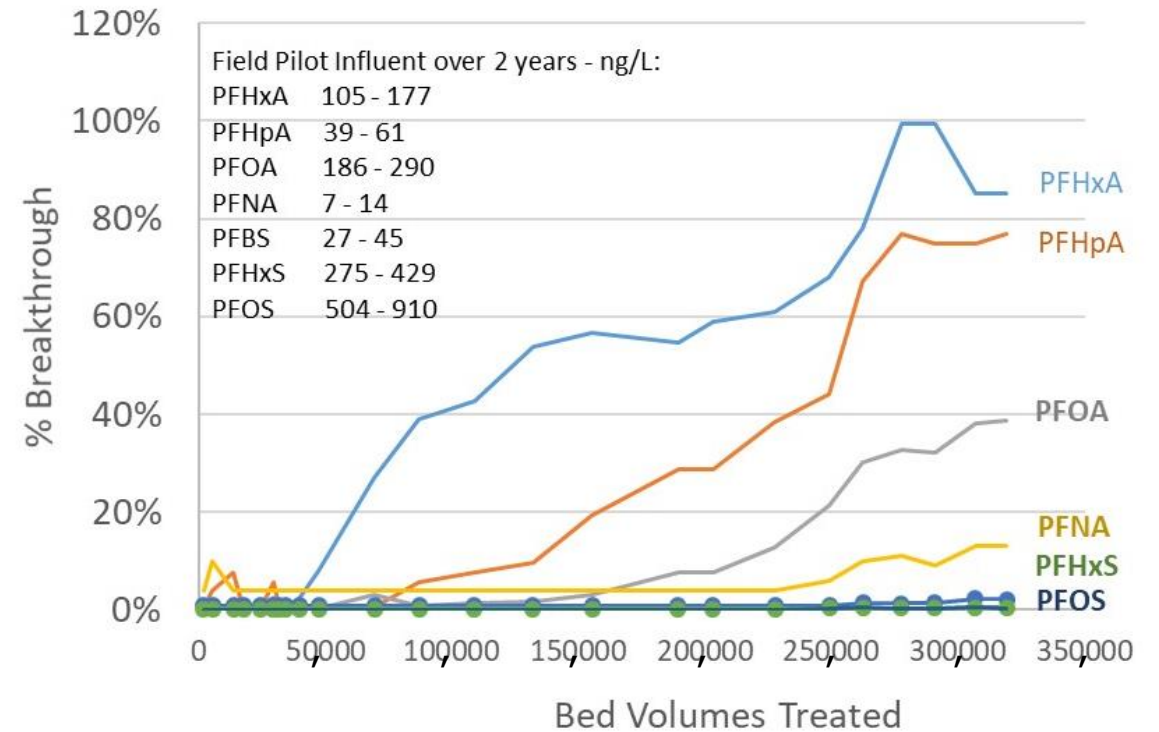


Photo: https://en.wikipedia.org/wiki/Ion-exchange_resin

Ionbytning




Order of Breakthrough with PFAS-Selective Resin

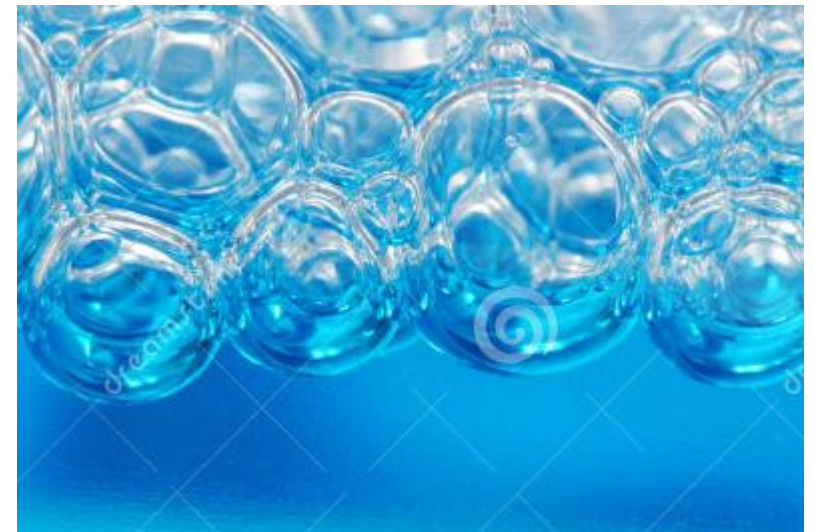


Data fra Purolite, Inc.

Skumfraktionering - SAFF

- Metoden baserer sig på PFAS'ernes særlige egenskaber til at samles i grænsefladen mellem vand og luft
- Dvs. at vandet gennemblæses med luft, hvorved PFAS opsamles i luftboblerne og opkoncentreres i skummet, der så kan fjernes
- Ikke effektiv overfor de kortkædede PFAS, men opholdstiden el.a. kan måske øges for at forbedre dette. Godt til kraftigt forurenset vand
- Skummet udgør ca. $1 \text{ m}^3 / 40.000 \text{ m}^3$ behandlet vand, kan variere, skal destrueres
- Ikke alt vand og perkolat kan skumme! Tilsætningsstoffer kan hjælpe hermed

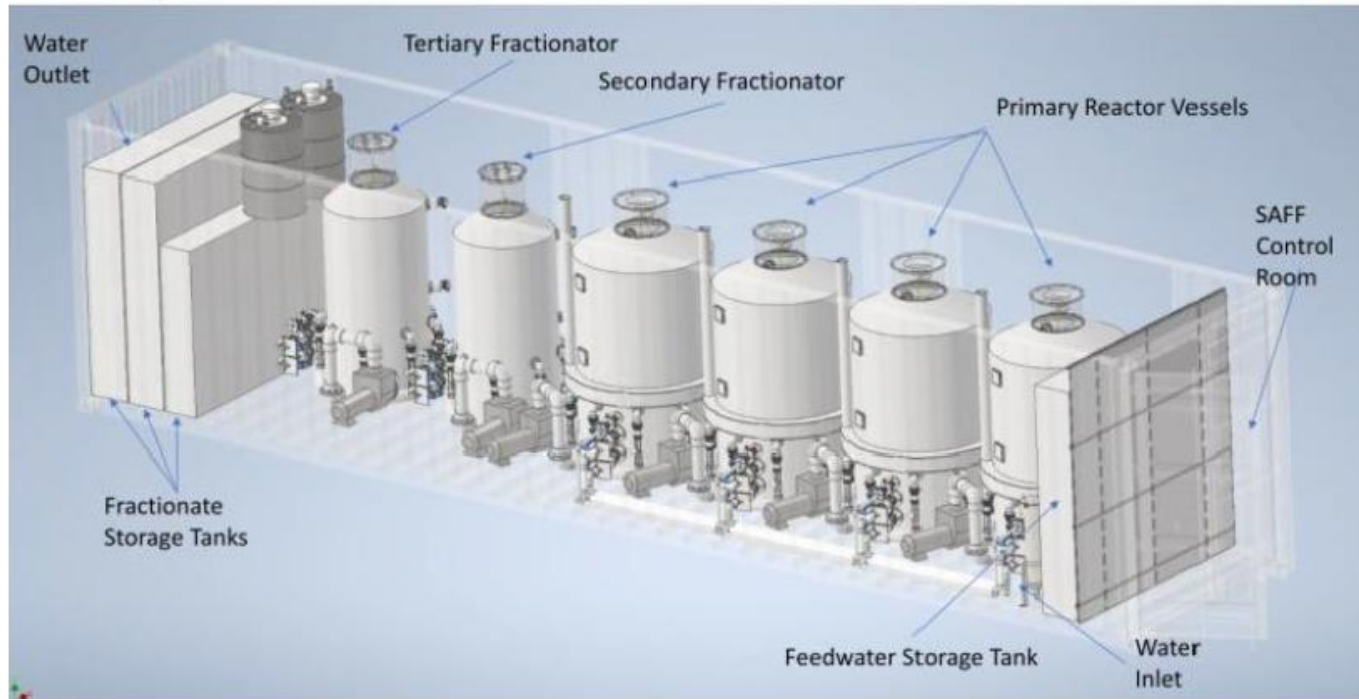
Moden		
Experimentel		
	Ikke endnu	Anvendelig



SAFF – Surface Active Foam Fractionation



ENVYTECH 40' CONTAINERISED SAFF SYSTEM



SAFF uses the air bubbles physiochemistry as the perfect environment for PFAS to get them out of solution and into a removable foam

By "final push", we get some shorter chain removal

From Envytech



Primary step: 10 x conc

Secondary Step: 1500 x conc

Tertiary Step: 500-200 x conc

Foam fractionation

Ämne	Antal kolatomer	OPEC Prediction model GW (full scale)	IVL/Envytech tests with leachate	Half life in Human body (years)
PFDA (Perfluordekansyra)	C10	100%	100%	5,6
PFNA (Perfluornonansyra)	C9	100%	100%	2,8
6:2 FTS (Fluortelomer sulfonat)	C8	100%	100%	0,08
PFOA (Perfluoroktansyra)	C8	100%	100%	3,3
PFOS (Perfluoroktansulfonsyra)	C8	100%	100%	5,7
PFHpA (Perfluorheptansyra)	C7	80%	80%	0,44
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyra)	C6	99%	99%	9,9
PFHxA (Perfluorhexansyra)	C6	20-30%	30%	0,06
PFPeA (Perfluorpentansyra)	C5	25-35%	20%	0,1
PFBA (Perfluorbutansyra)	C4	20-20%	10%	0,009
PFBS (Perfluorbutansulfonsyra)	C4	30-40%	30%	0,107
Summa PFAS		30-70%		

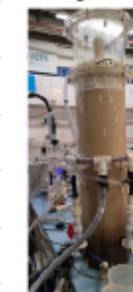
Rapport 2021:02

Avfall Sveriges Utvecklingssatsning
ISSN 1103-4092

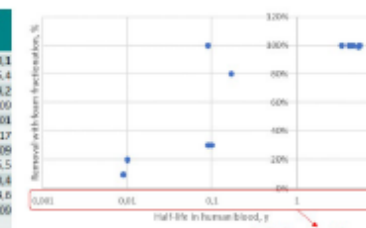
RENING AV PFAS-FÖRORENAT VATTEN FRÅN AVFALLS-ANLÄGGNINGAR

Foam fractionation (leachate and municipal wastewater)

- Leachate from 5 landfills tested by IVL and Envytech in cooperation with OPEC Systems using bench-scale unit



	Groundwater OPEC systems (full scale)	IVL/Envytech tests with leachate	Half-life in Human Body, y
PFBS	30-40%	30%	0,1
PFHxS	99%	99%	5,4
PFOS	100%	100%	4,2
PFDA	20-30%	20%	0,000
PFPeA	25-35%	20%	0,01
PFHpA	80%	80%	0,17
PFHxA	20-30%	30%	0,09
PFOA	100%	100%	5,5
PFNA	100%	100%	3,4
PFDA	100%	100%	4,6
6:2 FTS	100%	100%	0,00
PFAS11		30-70%	



Removes the potentially most toxic PFAS
Potentially extremely competitive option for waters with high DOC
Volume reduction factor needs to be confirmed for "dirty" water

IVL | PFAS REMOVAL METHODS

Source: OPEC Systems website: <https://www.opecsystems.com/en/ivl-2021-02-02>
Malmqvist, G., Lindgren, S., Hårding, P., Teng, J. (2022). Testing on leachate waters från avfallsanläggningar. R3 och R4 del 1 Sverige rapport. Miljökonst, expected to be finalized in dec 2022.



Omvendt osmose

Moden		●
Experimentel		
	Ikke endnu	Anvendelig

Semipermeabel membran under tryk

- + Effektiv
- + Mulig rensegrad >99% for PFOS og PFOA (drikkevand); >90% (spildevand), afhænger af PFAS og membrantype
- ± Retentatet \approx 5% til 25% af indløbsvolumen, afhængig af kvalitet og membran type
- Kræver meget energi
- Bruges typisk ved lave flow
- Kan kræve en forbehandling
- Retentat skal destrueres

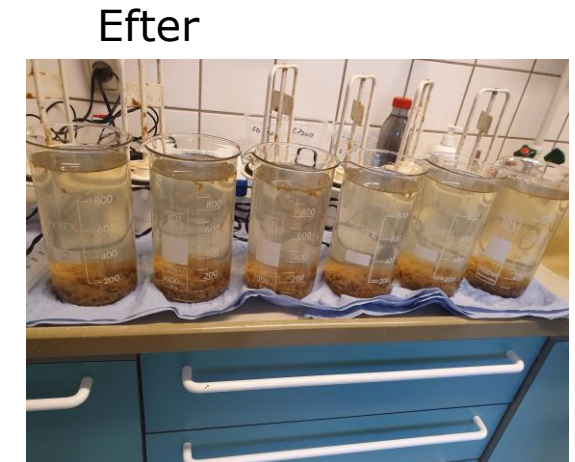
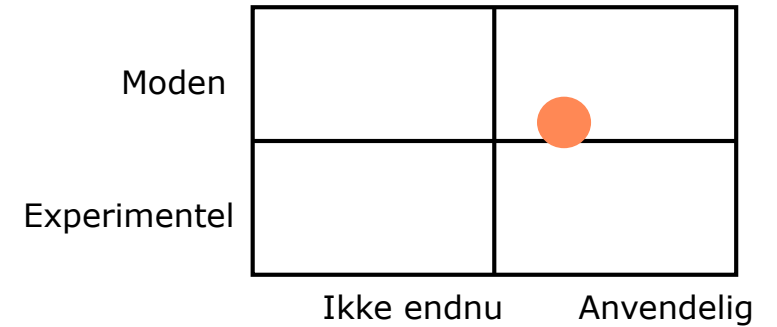


Photo courtesy of Agape Water Solutions, Inc.

Flokkulering/Koagulering

Tilsætning af alum, jernforbindelser, kationiske quaternære ammonium polymere, PAC/Fluor flocc eller andre flocc-midler til at flokkulere og bundfælde PFAS

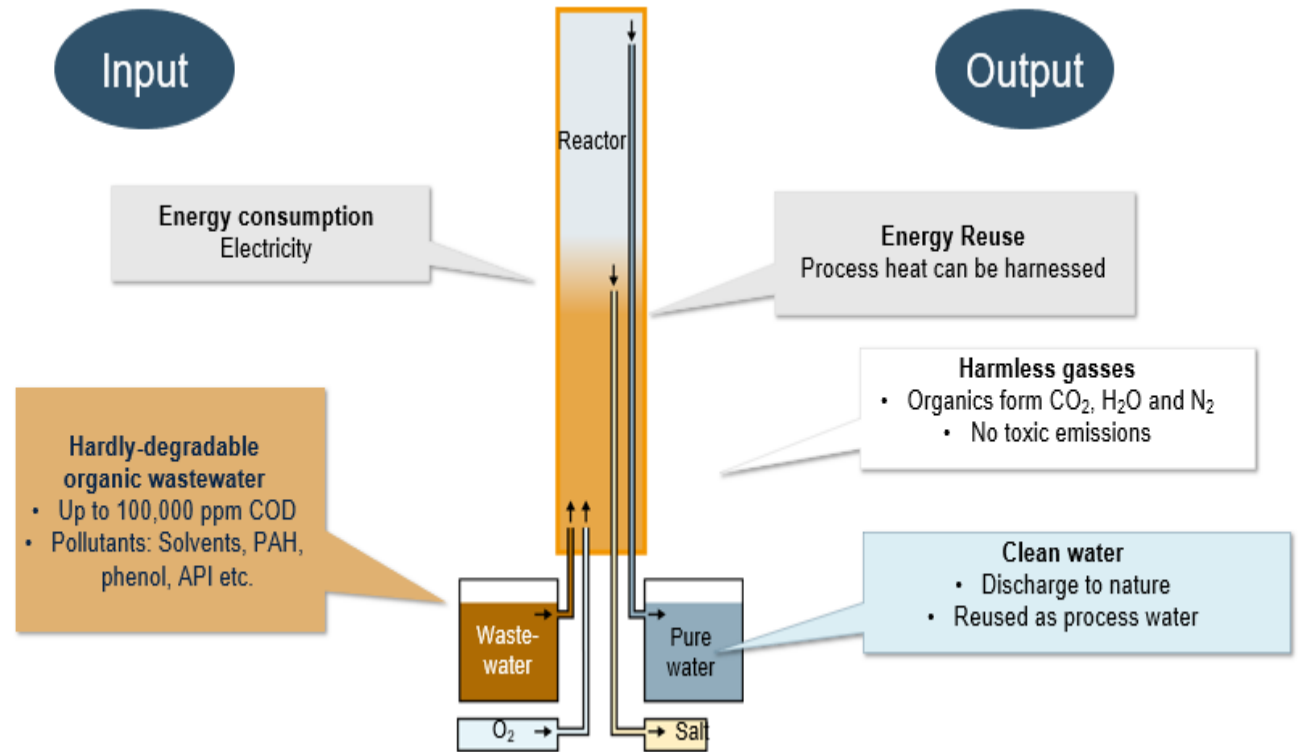
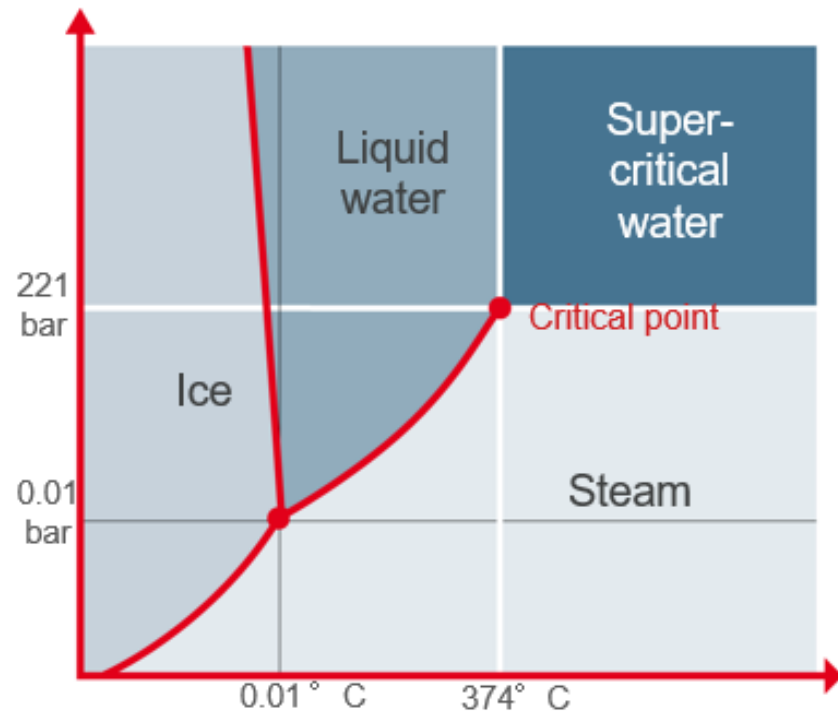
- + Flokkuleringsmiddel kan tilpasses PFAS-sammensætningen
- + Fuldskala systemer er i drift i Europa
- ± GAC eller resin efterpolering af supernatant
- ± Vil i kombi med GAC og IX forøge levetiden af bed life
- Slammet skal destrueres (lamelseparator og slampresse)



Tak til Hjørring Vand

Super Critical Water Oxidation SCWO

Moden	?
Experimentel	
	Ikke endnu Anvendelig



From Aquarden

Plasma



Drexel University: "Gliding arc plasmatron", der danner et roterende elektromagnetisk felt, som splitter PFAS'erne, svarer til en blender

Moden		
Experimentel		●
	Ikke endnu	Anvendelig

- + Ret hurtige reaktioner
 - 90% reduktion af PFAS på en time
- + destruktions teknologi

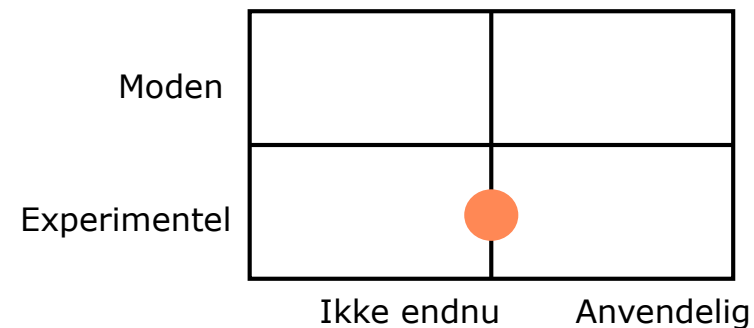
Tak til Ingeniøren (7-2-2023)

Reduktiv Defluorering

Anvender kemikalie inducerede reaktioner til at bryde C-F bindingen
















- Kun ét eksempel: PFAS destruktion ved Hydrotermisk alkalisk behandling – HALT (www.aquaagga.com og Colorado School of Mines). Opvarmer vandet til ca. 350 grader C og tilsætter en base f.eks. NaOH
- Hold øje; kan måske danne kortkædede PFCAer og polyfluorerede PFAS
- Andet eksempel, RD vha. UV-bestråling

PFASigator



Tak til www.aquaagga.com

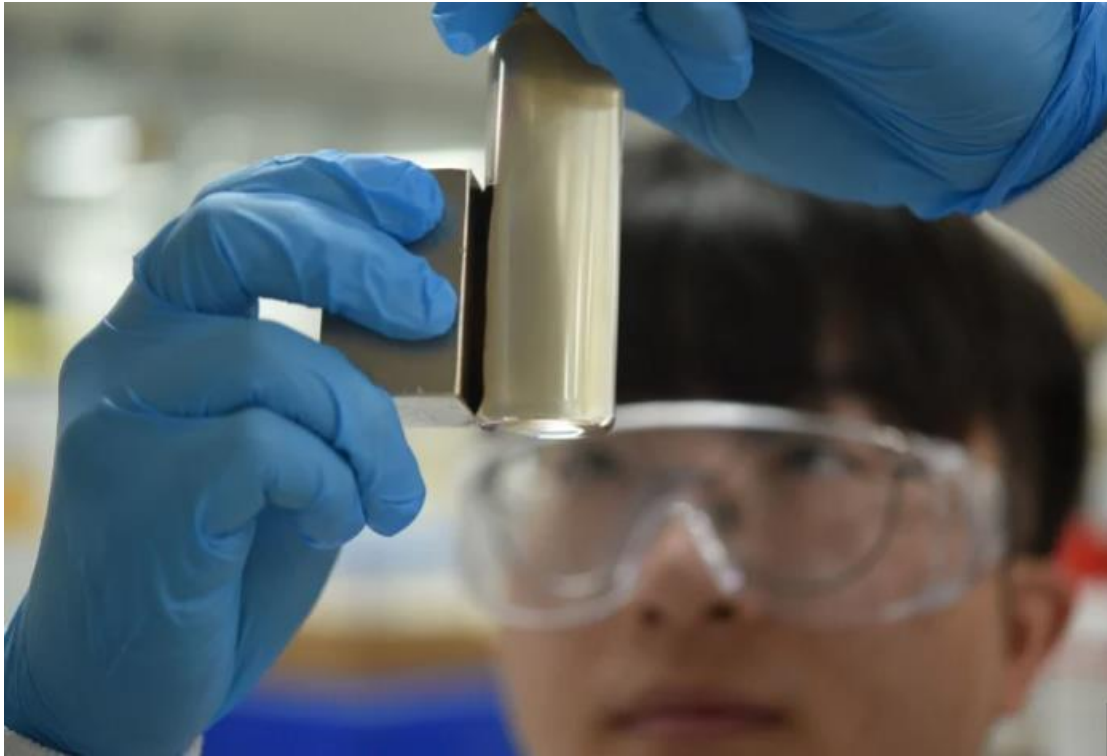
Rensemetoder opsamling

Rensemetode	Status	Behandlings- type	Omkost- ning	Effekt	Produkter	Bemærkninger
Aktivt kul (GAC)		A			Chemviron FiltraSorb 400 CarboTech GPP-20	Ikke så effektiv overfor kortkædede PFAS. Sorberer også andre stoffer, hvilket fordyrer metoden. Brugt kul skal bortskaffes.
Ionbytning m. resiner		A			Purolite PFA694A	Moderat tilbageholdelse af de kortkædede PFAS. Sorberer også andre stoffer, hvilket fordyrer metoden. Brugt resin skal bortskaffes
Skumfraktionering		S			Envytech	Ikke så effektiv overfor kortkædede PFAS. Kraftig opkoncentrering af PFAS i det resulterende restprodukt, der skal bortskaffes og evt. behandles ved SCWO. Dyr i etableringsomkostninger
Omvendt osmose og nanofiltrering		S				Effektiv overfor alle PFAS. Membraner tilstoppes nemt, hvilket kræver ekstra vedligehold. Meget energikrævende. Dyr metode. Tilbageholdt masse skal bortskaffes
Flokkulering		S			Fluorloc mv.	Effektiv overfor alle PFAS. Kun afprøvet få steder i DK. Kan kræve efterpolering. Kræver destruktions af slam og evt. vandrest

Forkortelser:
A: Adsorption; D: Destruction; S: Separering

Fremtidens teknologier (**meget** lille udvalg)

Watertech 3.2.2023 – fjernelse af PFAS med magneter (photo from University of Queensland)



- Photokatalyse på Århus Universitet

Opmærksomhedspunkter – valg af rensemetode

- Jo mere kraftig forureningsstyrke jo mere ofte vil en kombination af metoder være nødvendige
- Sorptions-, filtrerings- og flokkuleringsmetoder samt skumfraktionering er i 2023 kommercielt tilgængelige i Norden, med varierende renseseffektivitet
- Restprodukterne skal også behandles! Destruktionsmetoder er dyre og energikrævende
- "Vand" er forskelligt både i stoftyper og -koncentrationer, hvilket kan gøre at en kombination af rensemetoder ikke virker overfor alle vandtyper
- Udfør pilottest med vandet inden rensemetode vælges
- **Succeskriterier**, renseseffekt, anlægskompleksitet og størrelse samt pris



Tak. Spørgsmål?

Dorte Harrekilde
doh@ramboll.dk

