



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Hvad er nyt i Regionernes PFAS- håndbog?

ATV's Vintermøde, 7. marts 2023

Seniorkonsulent Julie Kofoed

Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer



Disposition

1. Intro til regionernes PFAS håndbog
2. Hvad er revideret?
3. Hvad er PFAS?
4. Hvilke brancher har PFAS været anvendt i?
5. Kvalitetskriterier, i Danmark og udlandet
6. Fysisk kemiske egenskaber
7. Teoretisk fase distribution /fugacitetsberegninger
8. Analysemetoder
9. Risiko for krydskontaminering
10. Afværgeteknologier til jord og vand
11. Afrunding



Regionernes PFAS håndbog 1/2

- Oprindelig udgivet i 2018 – 178 sider

Indhold:

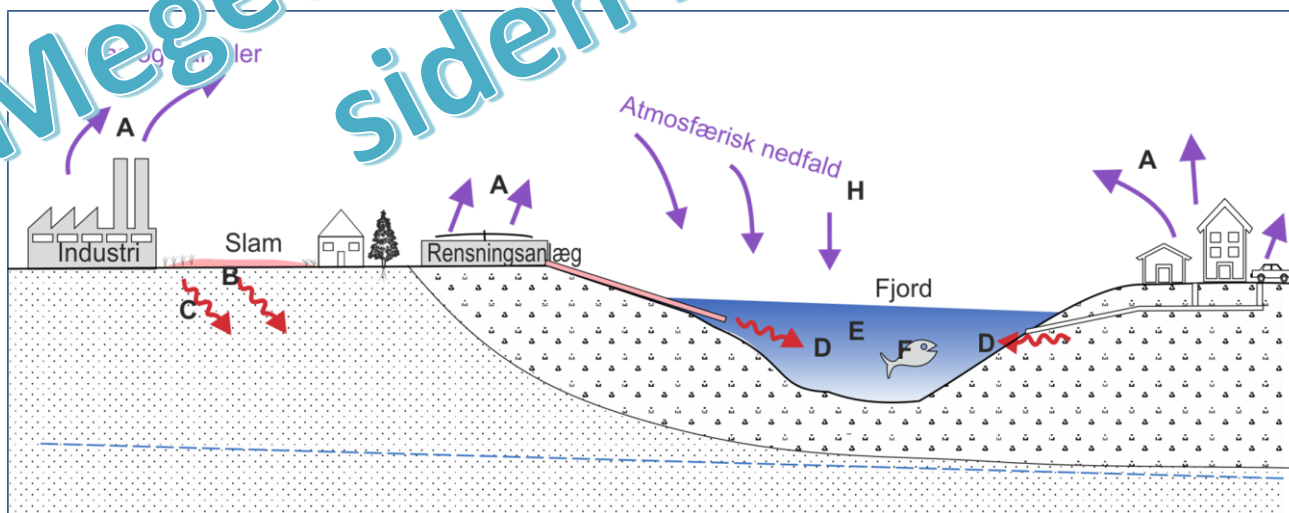
- Hvad er PFAS forbindelser
- Historisk udvikling og regulering / Brancheanvendelser
- Miljø- og sundhedsmæssige konsekvenser / Grænseværdier
- Stofoversigt og egenskaber – herunder persistens
- Spredning og skæbne i miljøet / Optagelse i biota og fødekæden
- Analyseteknikker og prøvetagning



Regionernes PFAS håndbog 2/2

Indhold, fortsat:

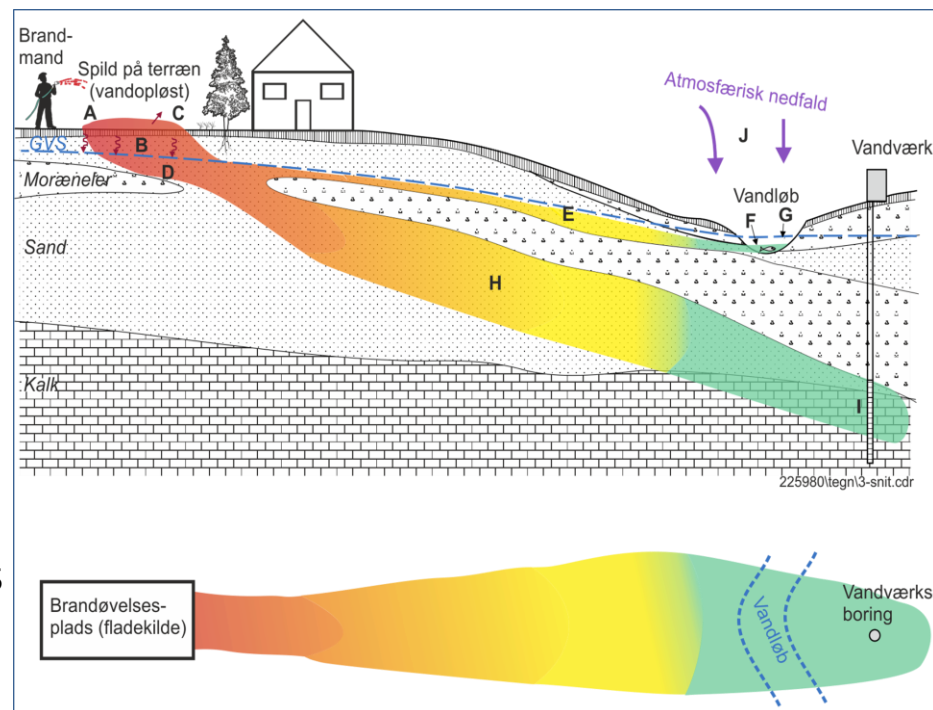
- Bedste praksis for undersøgelser
- Konceptuelle modeller for spredning
- Strategier for indledende og videregående undersøgelser
- Afværgeforanstaltninger (UCC viden)





Regionernes reviderede PFAS håndbog 1/2

- Hovedstruktur er bibeholdt
- Men alt indhold er ajourført
- Håndbogen er tænkt som et opslagsværk, med praktiske og anvendelige oplysninger
- I den nye version er der mange links og henvisninger til litteraturen og forskning indenfor PFAS

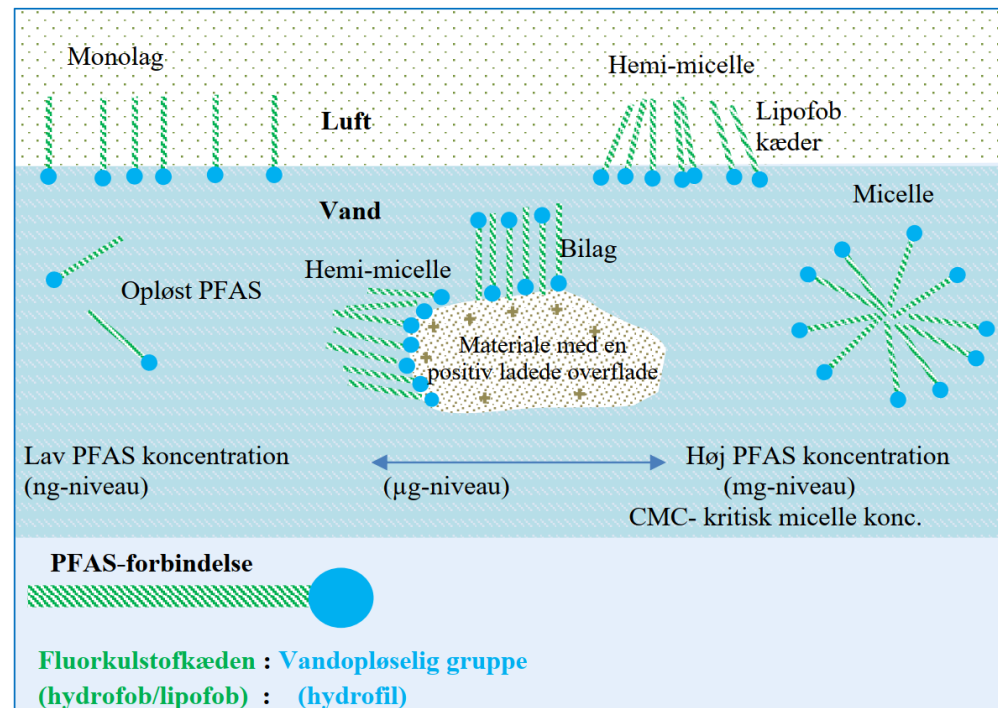




Regionernes reviderede PFAS håndbog 2/2

Fokus i den reviderede version på:

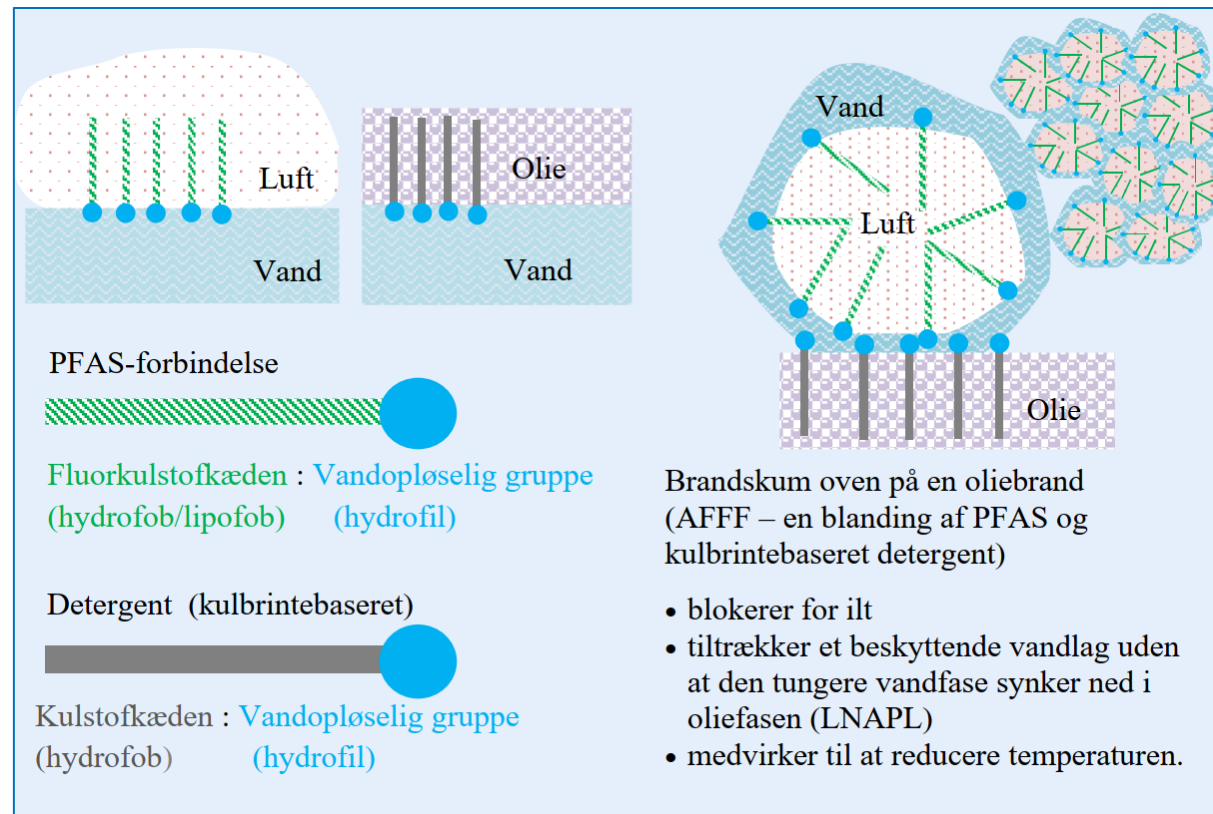
- Viden om de mange PFAS-forbindelser, deres egenskaber og anvendelser
- At videregive bedste praksis ved undersøgelser og afværge
- At forklare analysemuligheder og udfordringer i forhold til prøvetagning og kontaminering
- At samle oplysninger om PFAS, som adskiller sig fra almindelig praksis ved jord- og grundvandsundersøgelser





Hvad er PFAS?

- Per- og polyfluoralkyl forbindelser
- >10.000 stoffer
- Hydrofobiske og lipofobiske (Fluorkulstofkæden)
- Hydrofil funktionel gruppe på enden af kæden
- Som oftest i fast form (pulver eller krystallinsk) ved stuetemperatur
- De kortkædede er ofte væsker





Hvilke brancher har PFAS været anvendt i?

- Brandøvelsespladser
- Losse- og fyldpladser
- Forkromningsindustri
- Malingsindustri
- Tæppeindustri
- Gummi- og plastindustri
- Pap- og papirindustri
- Kemisk industri
- Jern- og metalvareindustri
- Træ- og møbelindustri
- Tekstil- og læderindustri
- Renserier
- Trykkerier
- Elektronikvirksomheder
- Brancher relateret til brand
- Betonvarefabrikker
- Vaskehaller

2014

2016

2021

2022

Table 1 Industry branches and other use categories where PFAS were or are employed. The numbers in parentheses indicate the number of subcategories. No parentheses indicate no subcategories

Industry branches	
Aerospace (7)	Mining (3)
Biotechnology (2)	Nuclear industry
Building and construction (5)	Oil & gas industry (7)
Chemical industry (8)	Pharmaceutical industry
Electroless plating	Photographic industry (2)
Electroplating (2)	Production of plastic and rubber (7)
Electronic industry (5)	Semiconductor industry (12)
Energy sector (10)	Textile production (2)
Food production industry	Watchmaking industry
Machinery and equipment	Wood industry (3)
Manufacture of metal products (6)	
Other use categories	
Aerosol propellants	Metallic and ceramic surfaces
Air conditioning	Music instruments (3)
Antifoaming agent	Optical devices (3)
Ammunition	Paper and packaging (2)
Apparel	Particle physics
Automotive (12)	Personal care products
Cleaning compositions (6)	Pesticides (2)
Coatings, paints and varnishes (3)	Pharmaceuticals (2)
Conservation of books and manuscripts	Pipes, pumps, fittings and liners
Cook- and bakeware	Plastic, rubber and resins (4)
Dispersions	Printing (4)
Electronic devices (7)	Refrigerant systems
Fingerprint development	Sealants and adhesives (2)
Fire-fighting foam (5)	Soldering (2)
Flame retardants	Soil remediation
Floor covering including carpets and floor polish (4)	Sport article (7)
Glass (3)	Stone, concrete and tile
Household applications	Textile and upholstery (2)
Laboratory supplies, equipment and instrumentation (4)	Tracing and tagging (5)
Leather (4)	Water and effluent treatment
Lubricants and greases (2)	Wire and cable insulation, gaskets and hoses
Medical utensils (14)	

*Glüge et al.,
An overview of the
uses of per- and
polyfluoroalkyl
substances (PFAS),
Enviromental Science,
Processes and
Impacts, 2020, 22,
2345-2373*



Tolereret ugentlig indtag af PFAS – vi er blevet klogere

	PFOS	PFOA	PFNA	PFHxS	Ref.
TWI ng/kg kropsvægt / uge					
2008 EFSA	1.050	10.050			(Alexander et al. 2008)
2015 MST	210	700			(Larsen & Giovalle 2015)
2018 EFSA	13	6			(EFSA 2018)
2020 EFSA	4,4				(EFSA 2020)
2021 Draft US EPA	0,0553*	0,0105*			(US EPA 2021a) (US EPA 2021b)

TWI falder
Derfor falder de
danske
kvalitetskriterier

*Foreløbig forslag, men problematisk ift. US kvalitetskriterier for drikkevand, da det er i dag umuligt at analysere på lave niveau



Danske kvalitetskriterier for PFAS

Danmark			Enhed	PFOS	Sum af 4 PFAS	Sum af 12 PFAS	Sum af 22 PFAS
Drikkevand			µg/l		0,002	0,1	
Grundvand			µg/l		0,002		0,1
Jord			mg/kg TS		0,01		0,4
Overflade- vand	Generelt kvalitets- krav	Indlands- vand	µg/l	0,00065			
		Andet overflade- vand	µg/l	0,00013			
	Maksi- mum-kon- centration	Indlands- vand	µg/l	36			
		Andet overflade- vand	µg/l	7,2			
Biota			µg/kg vådvægt	9,1			

Biota-krav er baseret på EU-direktiv ift. kvalitet af overfladevand

Ift. til indtagelse af fisk som fødevarer er der kommet kvalitetskriterier for PFAS, som er afhængig af fiskeart



Internationale kvalitetskriterier for PFAS

	Drikkevand (µg/l)	Jord (mg/kg)	Overfladevand (µg/l)	Industrivand (µg/l)	Reference
	PFOS PFOA	PFOS PFOA	PFOS PFOA	PFOS PFOA	
Sverige	0,09#	0,003/ 0,02	Som DK		(Livsmedelverket 2022)
Norge		0,1/ 0,002	Som DK		(Klima- og miljødepartementet 2022)
Holland	0,53 -	0,0014 0,0019			(RIVM 2021)
Belgien (Flanders)		0,0038 0,0043	Som DK		
Tyskland	0,1 0,1	0,1	Som DK		(BMUV 2022)
Polen			Som DK		
Italien	0,03 (0,5 for sum af PFAS)		Som DK	0,000065 0,1	(Rambøll 2022)
Spanien	0,1 (0,5 for sum af PFAS)		Som DK		
England	0,1 0,5		Som DK		
USA -forslag	0,00002/ 0,000004				(ITRC 2022h)
Australien	0,5 5	22α 220	0,021 0,21 (ferskvand) (ferskvand) 0,616 6,1 (marin) (marin)		(Department of Health 2017)

Se håndbogen for bemærkninger

Pr. 30/11/2022 har Sverige et drikkevandskvalitetskriterie for 4PFAS på 0,004 µg/l og for 21PFAS på 0,1 µg/l



Fysisk-kemiske egenskaber (1/2)

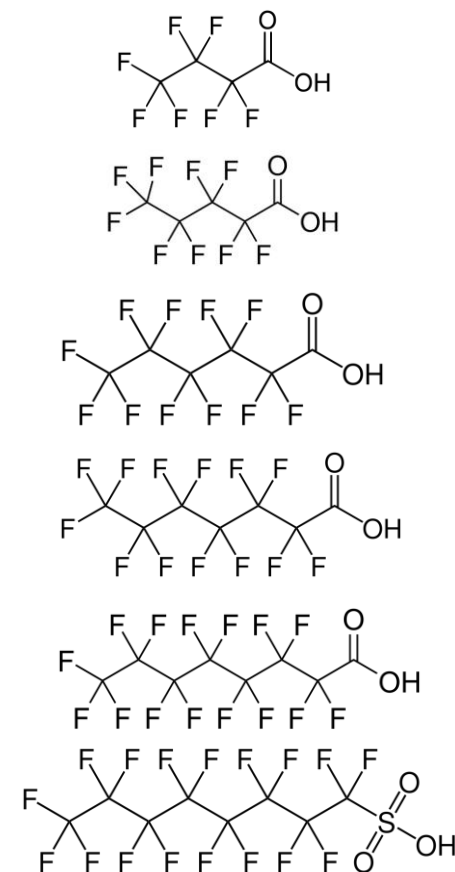
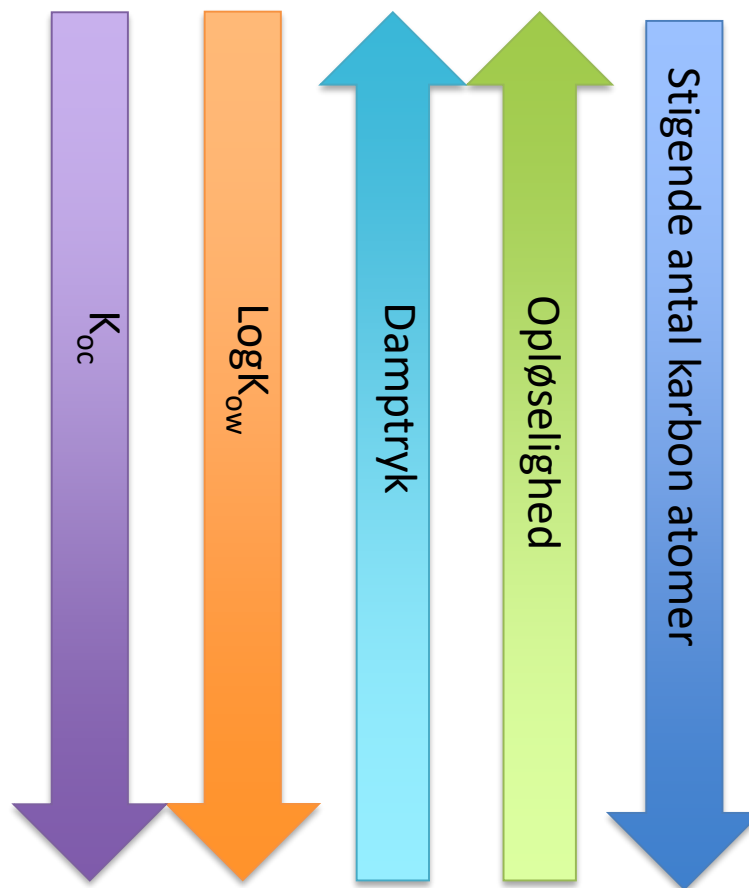
		Antal C i C-F- kæden	Vandopløseligh ed mg/l	Damptryk Pa	K _{aw} (Henry) Dimensionsløs	Log K _{ow}	pK _a , Styrke- eksponent
PFCA'er	PFBA	3	560.000 ⁶	3.900	6,0e-4	2,82	0,85
	PFPeA	4	112.600	1.350	1,0e-3	3,43	0,81
	PFHxA	5	21.700	457	0,003	4,08	0,84
	PFHpA	6	4.200	158	0,006	4,67	0,82
	PFOA	7	9.500	54	0,01	5,3	0,9
	PFNA	8	1.200	18,6	0,03	5,92	0,82
	PFDA	9	5.140	6,6	0,05	6,5	-0,17
	PFUnDA	10	93	2,2	0,12	7,15	-0,17
	PFDoDA	11	0,7	0,7	0,26	7,77	-0,17
	PFTriDA	12	0,2	0,3	0,42	8,25	-
	PFBS	4	30.000	631	0,002	3,9	-3,94
	PFPeS	5	1.720	11	-	3,38	-
PFSA'er	PFHxS	6	2.300	58,9	0,004	5,17	-3,45
	PFHpS	7	465	-	-	4,81	-
	PFOS	8	570	6,8	0,02	6,43	-3,41
	PFNS	9	222	1,50	-	6,78	-
	PFDS	10	190	0,71	0,07	7,66	-2,86
	PFUnDS	11	35	0,0014	-	6,49	-
	PFDoDS	12	24	0,0016	-	7,07	-
	PFTriDS	13	55	0,003	-	7,44	-
	PFOSA	8	4,5	0,25	0,01	5,62	6,24
	6:2 FTS	6	1.300	0,11	1,0e-5	4,44	1,31
	6:2 FTOH	6	41	876	2,31	4,54	13,5
	8:2 FTOH	8	0,1	3,98	2,03	5,58	13,5
FTOH'er Precursorer	10:2 FTOH	10	0,01	254	3,14	6,63	13,5
	14:2 FTOH	14	1,9e-7	144	>10.000	9,76	13,5
	4:2 FTS	4	27.900	0,33	2,0e-6	3,21	-
	8:2 FTS	8	60	0,01	3,0e-5	5,66	1,32
FTS Precursorer	10:2 FTS	10	35	1,0e-3	1,0e-4	6,91	-
	Sulfonamid/ Sulfonamid- ethanoler	8	0,2	0,3	0,26	6,07	-
	N-EtFOSA	8	0,06	0,12	0,43	6,71	-
	N-MeFOSE	8	0,3	4,0e-4	0,005	6,00	-
Sulfonamid- eddikesyrer Precursorer	N-EtFOSE	8	0,1	0,002	0,008	6,52	-
	N-MeFOSAA	8	2,2	2,4	-	-	-
	N-EtFOSAA	8	2,2	1,7	1,0e-8	6,22	1,4
	GenX (HFPO-DA)	3+2	7.000	300	0,008	4,24	0,06
Nye PFAS (Erstatter de tidligere anvendt Precursorer)	Adona	1+6	1.540	23	1,0e-3	4,97	0,51
	F-53B (Hoveddel) 9Cl-PF3ONS	6+2	3	1,9	-	7,41	-
	F-53B (Minordel) 11-Cl-PF3OUds	6+2	23	1,3	0,04	7,03	0,14
	Benzen*	0	1.790	12.639	0,22	2,13	-
Andre typiske forureninger	TCE*	0	1.280	9.199	0,38	2,42	-
	Phenol*	0	82.800	46	2,0e-5	1,46	-
	Dichlorprop*	0	350	1,0e-5	2,7e-9	1,77	-

- For 54 forskellige PFAS stoffer
 - De 22, der er omfattet af de danske kriterier
 - + precursorer (fx PFOSA og FTOH'er)
 - + nye PFAS (fx GenX og Adona)
- Meget lidt eksperimentel data vedr. egenskaber
- QSAR



Fysisk-kemiske egenskaber (2/2)

- Generelt stærke syrer (lave pKa-værdier)
- Danner ikke fri fase
- Er overfladeaktive

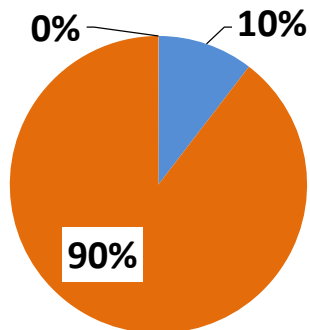


Osv.

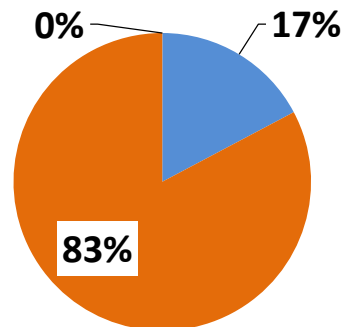


Teoretisk fasedistribution - PFOS

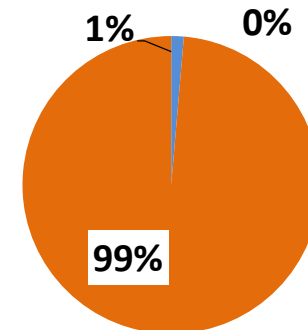
SAND



LER



SANDMULD

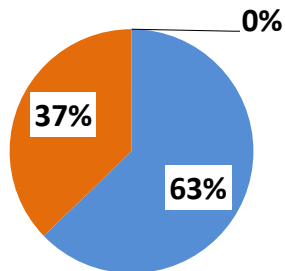


■ Poreluft ■ Porevand ■ Jord

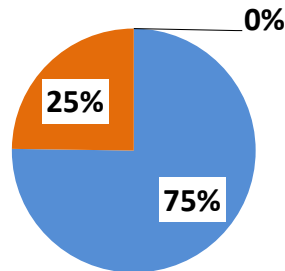


Teoretisk fasedistribution – 6:2 FTS

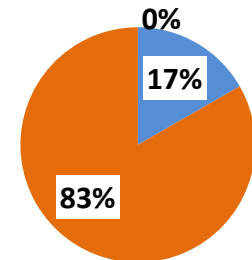
SAND



LER



SANDMULD

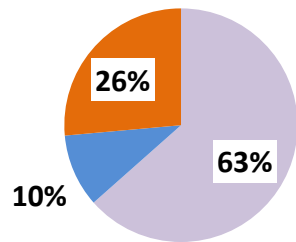


■ Poreluft ■ Porevand ■ Jord

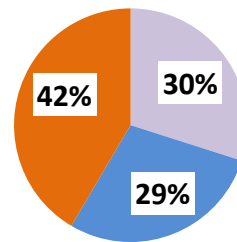


Teoretisk fasedistribution – 6:2 FTOH

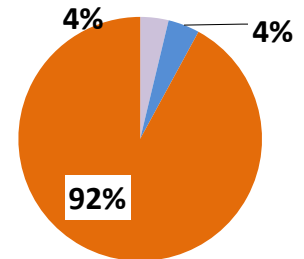
SAND



LER



SANDMULD



■ Poreluft ■ Porevand ■ Jord



Fugacitetsberegning

Jordkonc. µg/kg TS		Sand F _{oc} = 0,1 %		Ler F _{oc} = 0,1 %		Sandmuld F _{oc} = 2%	
		K _{oc} median	K _{oc} (S8)	K _{oc} median	K _{oc} (S10)	K _{oc} median	K _{oc} (S6)
		Porevandskoncentration ng/l					
PFOA	10	37.000	42.000	28.000	16.000	2.800	7,100
PFNA	10	20.000	24.000	17.000	6.000	1.240	2.200
PFHxS	10	40.000	58.000	30.000	21.000	3.200	9.000
PFOS	10	10.000	11.000	9.000	3.000	560	700

10 = kvalitetskriteriet for sum af de 4 PFAS i jord

Bemærk: Der er tale om teoretiske beregninger, og der er flere forhold, som har betydning for koncentrationer i porevand, transport i den umættede zone og i grundvand.



Analysemetoder

- Kommercielt tilgængelige:
 - LC-MS/MS (standard)
 - TOP
 - AOF/EOF/TOF
- Under udvikling:
 - Videreudviklet LC-MS/MS
 - PIGE
 - HRMS og LC-QTOF-MS/MS

Medie	Analyse princip	Akkrediteret	Detektionsgrænse
Spildevand	LC/MS/MS	Target: Ja	0,0002-0,008 µg/L
	TOP	TOP: Ja	0,0002-0,02 µg/L
	TOF	TOF: Nej	50 µg/L
	AOF	AOF: Ja	1 µg/L eller 3 µg/L
Drik- kevand/grundvand	LC/MS/MS	Target: Ja	0,0002-0,008 µg/L
	TOP	TOP: Ja	0,0002-0,002 µg/L
	TOF	TOF: Nej	50 µg/L
	AOF	AOF: Nej	1 µg/L eller 3 µg/L
Overfladevand (fersk/salt)	LC/MS/MS	Target: Ja	0,0002-0,008 µg/L
	TOP	TOP: Ja	0,0002-0,001 µg/L
	TOF	TOF: Nej	50 µg/L
	AOF	AOF: Nej	1 µg/L eller 3 µg/L
Jord	LC/MS/MS	Target: Ja	0,05-2,5 µg/kg
	TOP	TOP: Ja	2-10 µg/kg
	EOF	EOF: Nej	10 µg/kg
Slam	LC/MS/MS	Target: Ja	0,05-2 µg/kg
	TOP	TOP: Ja	2-10 µg/kg
	EOF (I udvikling)	EOF: Nej	10 µg/kg
Biota	LC/MS/MS	Target: Ja	0,01-5 µg/kg

Hør mere senere:

kl. 14.20-14.45, centersal

***TUP-projekt vedr. Analysemetoder til
undersøgelse for PFAS-forbindelser i
jord, grundvand og overfladevand***



Risiko for krydskontaminering

- Direkte prøvekontakt med prøveudtagningsudstyr
- Tilfældig kontaminering (åben prøveflaske)
- Kontaminering under forsendelse

Hør mere senere:

kl. 13.30-13.55, centersal

PFAS – Prøvetagning af jord, grundvand, luft og overfladevand (TUP-projekt)

kl. 13.55-14.20, centersal

Prøvetagning af PFAS af jord og grundvand – udfordringer med forskellige standardmetoder og anbefalinger

Udstyr	Field et al. 2021	Denley et al. 2019	Rodowa et al. 2020
Bailer liner	x	x	
Kerneprøvetager	x		÷
Kerneprøvetager line	x		÷
HDPE rør	x	x	
LDPE rør	x	x	
Nitrilhandsker	x		x
Nonstick aluminiumsfolie	x	÷	x
PTFE (teflon) blære	x	x	
PTFE rør	x	x	
PVC liner	x		x
PVC skærm	x		x
Silastic rør	x	x	
Tidsudløselige bentonit pellets	x	x	
Vinyl endestykker	x		÷
Vandstandstape	x	x	

*Forskellige studier af PFAS i prøvetagningsudstyr
x angiver at der er målt PFAS*



Afværgeteknologier i jord

Metode	Status	Medie		In-situ	Ex-situ	Teknik	Medtager alle PFAS	Pris	Effektivitet	Bemærkninger
		J	GV							
Opgravning og forbrænding /deponering	+	+		-	+	T	+	Middel- høj	Middel-høj	Høj-temperatur forbrænding påkrævet for at fjerne PFAS. Deponering medfører dannelse af perkolat, der skal behandles.
Stabilisering	+	+		+	+	A	+	Middel- lav	Lav-høj	Mange nye adsorbenter på markedet. Blanding af jord og adsorbent skal være effektiv. Dokumentation mangler for effektivitet. Tilbageholder PFAS, men fjerner dem ikke
Termisk oprensning (on-site)	(+)	+		+	+	T	(+)	Høj	(Høj)	Er i Europa på afprøvningsstadiet. Afhænger af temperatur og det er oftest nødvendigt med en efterpole-ring af kortkædede PFAS.
Mobilisering ved jordvask	-	+		-	+	S	(+)	Middel	Lav-høj	Er i Europa på afprøvningsstadiet. Ikke afprøvet på ler-/siltjord. Kræver behandling af den vandige fase. Kritiske parametre er kontakt med jord og vaskemidlets evne til at ekstrahere lang- og kortkædede PFAS.



Afværgeteknologier i vand

Metode	Status	Medie		In-situ	Ex-situ	Teknik	Medtager alle PFAS	Pris	Effektivitet	Bemærkninger
		J	GV							
P&T med GAC	+		+	-	+	A	-	Middel-høj	Mellem-høj	Ikke effektiv for flere kortkædede PFAS. Adsorbent skal bortskaffes eller regenereres. Kræver forbehandling.
P&T med syntetiske resiner (ionbytning)	+		+	-	+	A	-	Middel	Mellem-høj	Effektiv overfor langkædede PFSA'er, mindre effektive overfor PFCA'er og ikke effektive overfor kortkædede PFAS. Adsorbent regenerering kan muligvis foretages on-site. Kræver forbehandling.
Avanceret kemisk oxidation	-	(+)	+	+	-	T	-	Høj	Lav	Endnu på test stadiet
Sonokemisk omdannelse	-		+		+	T	-	Middel?	(Høj?)	Kun testet overfor få PFAS. Mange interferenser. Fare for omdannelse til kortkædede PFAS
Luft stripning	-		+	(+)	+	S	-	Høj	(Høj)	Kun effektiv overfor flygtige PFAS. Fase med PFAS skal bortskaffes
Filtrering, omvendt osmose	+		+		+	S	+	Middel-høj	Høj	Forbehandling nødvendig for at øge filtreringens effektivitet. Koncentrat skal bortskaffes.
Nanofiltrering	+		+		+	S	+	Høj-middel	Høj-middel	Forbehandling nødvendig for at øge filtreringens effektivitet. Koncentrat skal bortskaffes.
Skumfraktionering	(+)		+		+	S	-	Middel-høj	Middel	Bæredygtig løsning, tilsætningsstoffer kan genbruges. Kræver energi, og behandling af restproduktet. Lav effekt overfor de kortkædede PFAS. Kan anvendes på perkolat. Kræver mindre forbehandling af forurenede grundvand end andre separeringsteknikker



Afværgeteknologier generelt

Parametre	Beskrivelse	Vigtighed
Koncentration af kritiske PFAS	Kritiske PFAS vil typisk være dem, der har en høj mobilitet eller er svære at oprense. Om PFAS'en er neutral, anionisk eller kationisk kan have indflydelse på afværgemetoden	+++
PFAS kædelængde	En blanding af kædelængder vil ofte have væsentlig indflydelse på hvilke/n afværgeteknologi/er, der er effektive	+++
Precursor indhold	Er indholdet af precursor kendt og vil metoden kunne omdanne precursorer. Er precursorerne mobile eller immobile?	++
Tilstedeværelsen af andre forureningsstoffer	Hvilke andre forureningsstoffer er dimensionerende for afværge. Og kan tilstedeværelsen af disse stoffer have ændret spredningen af PFAS	++
Tørstof indhold	Højt tørstofindhold kan forhindre en afværgemetode i at være effektiv, hvis det gør PFAS svære at fjerne (fra grundvand)	++
Grundvandets strømningshastighed	Påvirker diffusionshastigheden	+
PFAS oprensning contra hydraulisk barriere	Skal både kildeområde og fane oprenses?	+++
pH	Kan have indflydelse på sorptionsprocesser	+
Organisk indhold i jord (TOC)	Højt TOC i jord kan binde PFAS og gøre dem svære at ekstrahere	++
Er der naturlige forhold, der kan påvirke afværge	F.eks. lerlag/slirer, høje calcium koncentrationer, højt organisk indhold, og i nogen tilfælde høje grundvands strømningshastigheder	++

- Man skal kende sin forurening godt, for at kunne vælge den rette teknologi
- Der er fortsat behov for udvikling
- Men flere lovende teknologier under udvikling



Hvor kan man finde mere info? – Udvalgte udgivelser

Datablade (2021):

[Brandøvelsespladser](#)

[Forkromning](#)

[Pap og papirindustri](#)

[Tæppeindustri](#)

[Olielagre](#)

Faktaark (2022/3):

[Malingsindustri](#)

[Træ- og møbelindustri](#)

[Jern- og metalvareindustri](#)

[Vaskehaller](#)

[Renserier](#)

[Tekstil- og læderindustri](#)

[Gummi- og plastindustri](#)

[Trykkerier](#)

[Elektronikindustri](#)

[Kemisk industri](#)

[Lossepladser](#)

[Regionernes erfaringsopsamling](#) (2021)

[Håndbog i undersøgelser og afværge](#) (opdateret version, 2022)

MST rapporter:

[Screeningsundersøgelser, Miljøprojekt 1600](#) (2014)

[Spredning og sammensætning i grundvand, Miljøprojekt 1892](#) (2016)

[Kortlægning af brancher der anvender PFAS, Miljøprojekt 1905](#) (2016)

www.jordforureninger.dk

Nyt site som udstiller oplysninger fra regionernes årlige redegørelse

www.miljøogressourcer.dk

Alle udgivelser fra Videncenter for Miljø og Ressourcer



Regionernes Videncenter
for Miljø og Ressourcer

Tak til alle dem der har bidraget

Jette Kjøge Olsen, Nanna Thomsen, Dorte Harrekilde, Rambøll
Jacqueline Falkenberg, NIRAS

Rikke Mosevang Vinten Howitz, Ditte Lykkesborg Schrøder, Region
Hovedstaden

Agnieszka Bentzen, Klaus Bundgaard Mortensen, Region
Syddanmark

Kaspar Rüegg, Thomas Ljungberg, Region Midtjylland

Henrik Norptorp, Region Nordjylland

Lene Søe Højbjerg, Region Sjælland

