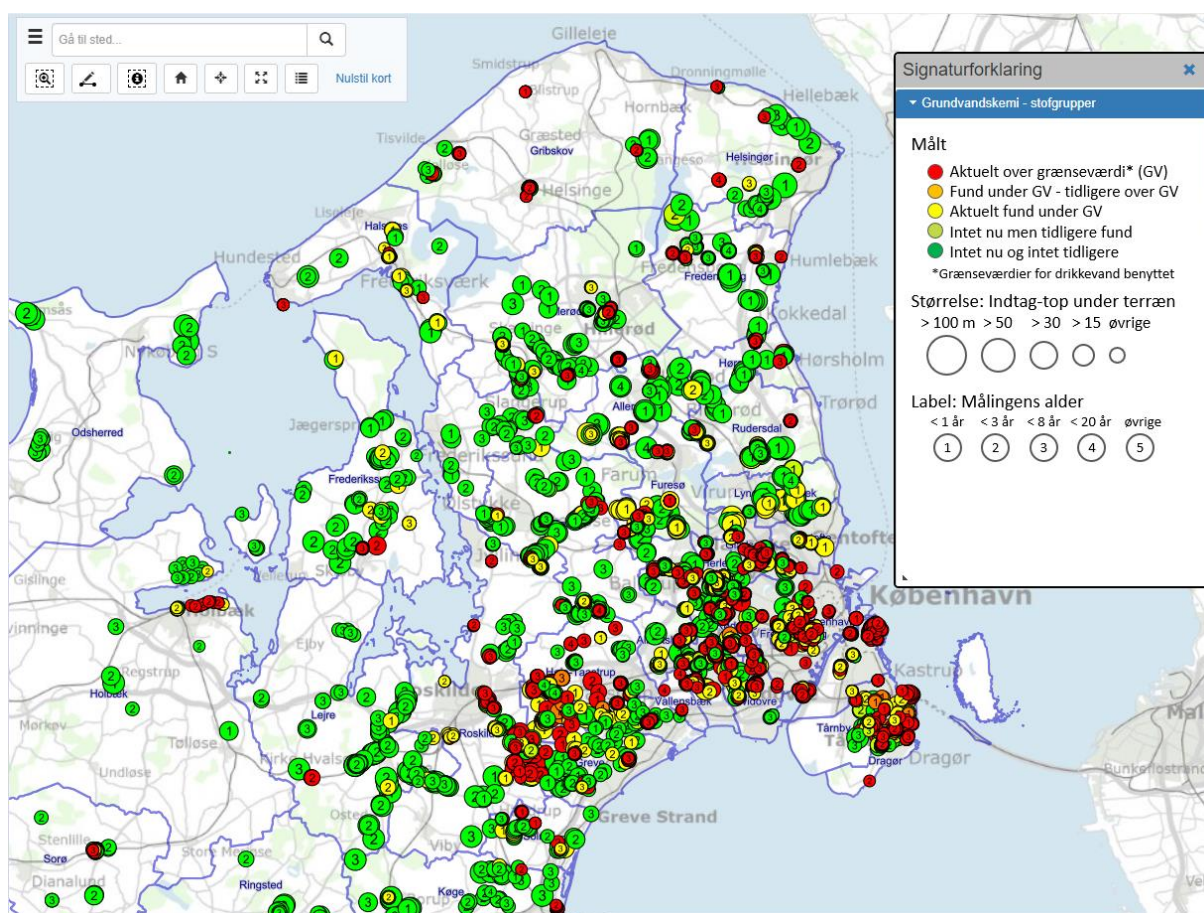


REGION HOVEDSTADEN

**RETNINGSLINJER FOR RISIKOVURDERING
AF PFAS FUND I VIDEREGÅENDE
GRUNDVANDSUNDERSØGELSER**

GÆLDENDE FREM TIL 31-12-2025

15-01-2024





RETNINGSLINJER FOR RISIKOVURDERING AF PFAS FUND I VIDEREGÅENDE GRUNDVANDSUNDERSØGELSER

GÆLDENDE FREM TIL 31-12-2025

REGION HOVEDSTADEN

PROJEKTNUMMER.: 22003377

DATO: 15-01-2024

RÅDGIVER: WSP

PROJEKTLEDER: AIKATERINI.TSITONAKI@WSP.COM

UDARBEJDET AF: BOLETTE BADSBERG JENSEN, KATERINA TSITONAKI,
THOMAS H. LARSEN

KVALITETSSIKRET AF: ELINE WEETH, SANDRA ROOST

WSP

WSP.COM

INDHOLD

BILAGSOVERSIGT	1
1 BAGGRUND & FORMÅL.....	2
1.1 Formål og afgrænsning	2
1.2 Motivation for projektet	2
1.3 Risikoflux for PFAS	5
1.4 Læsevejledning	6
2 PFAS – DEFINITIONER- ANVENDELSER.....	8
2.1 Kilder	10
2.2 Skæbne, transport og processer	15
2.2.1 Faktorer der påvirker sorption i jord	18
2.2.2 Processer i den umættede zone	20
2.2.3 Særlige forhold ved forurening fra brandøvelser	21
2.2.4 Transformation	21
2.3 Hvad betyder disse parametre for transport/risikovurdering	23
3 DATATENDENSER I REGIONERNES UNDERSØGELSER.....	27
3.1 Beskrivelse af datasættet	27
3.1.1 Flere brancher per lokalitet	28
3.2 Datatendenser.....	29
3.2.1 Hit-rate	29
3.2.2 KoncentraTionsniveauer PFAS4 og PFAS22	30
3.2.3 Fingerprinting pr. branche.....	32
3.2.4 Hyppighed af enkeltforbindelser	34
3.2.5 Tendenser vedr. PFAS-forbindelser og dybde	37
3.3 Koncentrationsfordeling af PFAS for udvalgte brancher	39
3.3.1 Koncentrationsfordeling for renserier	40
3.3.2 Koncentrationsfordeling for overfladebehandling af metal	41
3.4 Mediankoncentrationer For Enkeltforbindelser per branche (heat map)	43
3.5 Jordprøver.....	47

4	RETNINGSLINJER FOR RISIKOVURDERING	51
4.1	Risikovurdering- Informationsniveau A	53
4.2	Risikovurdering informationsniveau B	56
4.3	Risikovurdering informationsniveau C	59
5	ANDRE OVERVEJELSER	64
5.1	Anbefalinger til undersøgelser	64
5.2	Flere Lokalteter i samme opland	64
5.3	Antagelser vedr. forurennet areal pr. Branche	65
6	REFERENCER	67

BILAGSOVERSIGT

Bilag 1: Datahåndtering.

Bilag 2: Gruppering af Brancher.

Bilag 3: Brancheanalyse med heat maps, maks koncentrationer og relativ forekomst.

Bilag 4: Koncentrationsfordeling (Histogrammer og fraktiler) for brancher med tilstrækkelig antal prøver.

Bilag 5: Koncentrationsintervaller for hyppigst påviste stoffer i 0-5 m u.t. og i alle dybder.

Bilag 6: Power BI rapport med PFAS dataanalyse.

Bilag 7: Liste over forkortelse mm, fra VMR 2022

1 BAGGRUND & FORMÅL

1.1 FORMÅL OG AFGRÆNSNING

Formålet med nærværende rapport er at levere retningslinjer for udarbejdelse af PFAS-risikovurderinger for grundvandsressourcen og aktuelle indvindinger. Retningslinjerne gælder for lokaliteter på 3 forskellige informationsniveauer, og er nærmere beskrevet i kapitel 0.

Målgruppen for projektet er primært Region Hovedstadens rådgivere og sagsbehandlere, som arbejder med videregående grundvandsundersøgelse. Rapporten skal ses som et supplement til RisikoGuide, der er en del af SAB for de videregående undersøgelser. Retningslinjerne vil være et fælles grundlag, der kan henvises til i forbindelse med risikovurderinger på de lokaliteter, hvor der er konstateret forurening med PFAS. En del af principperne i nærværende dokument kan dog også anvendes på indledende grundvandsundersøgelser.

Der er accept fra alle parter om, at retningslinjerne for nærværende projekt er baseret på WSPs og Region Hovedstadens viden pt. i efteråret 2023, og det er muligt, at fremtidig viden vil ændre på forudsætninger for disse retningslinjer. Derfor anbefales det, at disse retningslinjer kun er gældende indtil 2025, hvorefter de bør revurderes.

Det er især på lokaliteter, hvor man kun har få data om PFAS-forureningen i de potentielle kildeområder og spredningsveje ned mod grundvandsmagasinerne, hvor retningslinjerne skal bruges.

Derudover er retningslinjerne primært målrettet til at frasortere bagatelsager. For at give en størrelse på forventede koncentrationsniveauer i forskellige brancher, og hvilken risiko disse umiddelbart vurderes at udgøre, er der derfor en stor del af retningslinjerne, der baserer sig på dataopsamling fra de hidtil undersøgte brancher.

Ved høje PFAS-niveauer anbefales, at man udfører supplerende videregående undersøgelser for at få mere viden om lokaliteten og dermed en mere robust risikovurdering. Med høje indhold vil der typisk være overskridelser af grundvandskvalitetskriterierne med flere størrelsesordener, som indikeret i afsnit 1.3.

1.2 MOTIVATION FOR PROJEKTET

En opgørelse fra Danske Regioner estimerer, at der er over 15.000 lokaliteter, som er muligt forurenede med PFAS-forbindelser. I Region Hovedstaden er der muligvis tale om flere tusinde lokaliteter. PFAS har været i brug i en række brancher, men er aldrig produceret i Danmark.

På flere igangværende eller for nyligt afsluttende videregående grundvandsundersøgelser er PFAS blevet en del af undersøgelsesprogrammet i en sen fase. På disse sager har der ikke været fokus på PFAS i undersøgelsesernes start, så der foreligger ikke informationer om evt. PFAS indhold i kildeområder, i jorden eller i terrænært grundvand. Derimod eksisterer der stadig filtersatte borer i dybereliggende magasiner på en del lokaliteter, og dermed er det muligt at udtage vandprøver fra disse dybe borer, og analysere grundvandet for indhold af PFAS-forbindelser. Et eksempel på sådan en lokalitet kan ses i BOKS 1. Her kompliceres risikovurderingen af flere usikkerheder:

- Den egentlige kilde **til PFAS forureningen er ikke præcist lokaliseret**,
- Transporthastighederne for PFAS-forbindelserne er anderledes end for de chlorerede opløsningsmidler, særligt for de langkædede forbindelser som f.eks. PFOS, hvor der ikke foregår transport i gasfasen og nogle stoffer sorberer væsentligt mere end PCE og TCE. Det er derfor usikkert om sammensætning og koncentrationsniveau i det dybere grundvand vil

De Danske Regioner har i 2022 udgivet "Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS-forbindelser" (VMR, 2022). Håndbogen beskriver bedste praksis for undersøgelser og afværge af PFAS-forureninger i jord og grundvand, og der henvises til håndbogen for, at læseren kan opnå en dybere forståelse af PFAS-forbindelsernes særlige egenskaber.

ændre sig over tid og dermed også eventuelt øge risikoen over for grundvandet.

Derudover er der en usikkerhed omkring diffuse PFAS påvirkninger i industriområder, hvor forurening kan stamme fra mange mindre kilder såvel som utætte kloakker, men som ikke udgør en væsentlig punktkilde, der kræver opsporing, karakterisering og risikohåndtering.

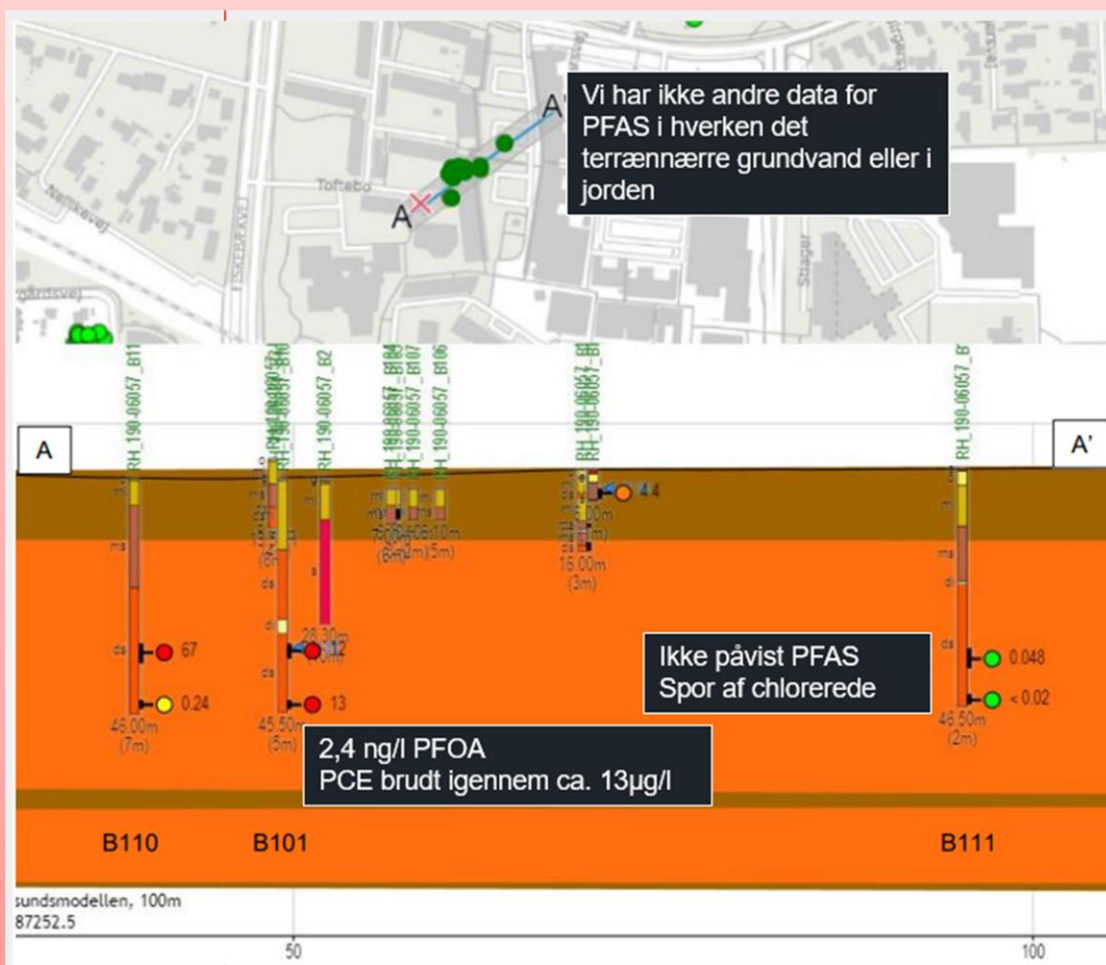
Desuden er der et manglende erfaringsgrundlag mht. PFAS-forureninger hos både regionernes sagsbehandlere og hos rådgiverne, som fører til usikkerheder om:

- Vil sammensætning og koncentrationsniveau ændre sig over tid og dermed også ændre risikobilledet?
- Hvilke niveauer er høje? Hvad er en bagatel?
- Hvorvidt en forurening stammer fra lokaliteten, eller om der er tale om ”diffus” belastning eller en belastning fra en anden punktkilde?

BOKS 1

Et eksempel på en undersøgelse med begrænset datagrundlag

En renseriejendom er tidligere undersøgt for chlorerede opløsningsmidler. Den konstaterede forurening med PCE udgør ingen risiko for arealanvendelsen, indvinding eller grundvandsressourcen som helhed. På lokaliteten er der fortsat 6 monitoringsboringer, filtersat i sandmagasinet i mere end 20 m u.t. I et af de seks filtre er der påvist 2,4 ng/l PFOA. I samme filter er der 13 µg/l PCE.



Rådgiveren har vurderet følgende:

" **Sorptionen til jorden vil være større for den vandopløste del af PFOA end for PCE, og der vil være en langt mindre andel i poreluften af PFOA end for PCE, der kan diffundere både horisontalt og vertikalt, og dermed bidrage til en transport til grundvandet. Det er derfor meget vanskeligt på det foreliggende grundlag at vurdere, om der på sigt kan ske en mere betydende udvaskning af PFAS fra kildeområdet ved renseriet, hvis det målte indhold, som forventet, stammer fra anvendelsen af opløsningsmidlerne i renseriet.** "

Det er formålet med nærværende retningslinjer at redegøre for om det er muligt, med en viden som denne, at foretage en risikovurdering for PFAS ved at kigge på det samlede erfaringsgrundlag for forskellige typer af lokaliteter, og dermed kunne opstille nogle scenarier for en kildestyrke.

1.3 RISIKOFLUX FOR PFAS

Et bærende element i Region Hovedstadens risikovurderinger på videregående undersøgelser er begrebet risikoflux og anvendelsen af denne i regionens RisikoGuide. Risikofluxen defineres for nærværende i forhold til både ressourcen og nærmeste indvinding. Den dimensionsgivende Riskoflux vil være den mindste af disse, se eksempel på selve beregningen herunder. Risikofluxen korrigeres med en usikkerhedsfaktor, der afspejler kvaliteten af de indgående data. Usikkerhedsfaktoren er altid under en størrelsesorden. Risikofluxen skal altid sammenholdes med, om der er særlige omstændigheder, der gælder for den konkrete indvinding/ressource (i værktøjet karakteriseret som formildende/forværrende omstændigheder). Dette kan være andre kilder med forurening, manglende mulighed for at flytte indvindingen til andre borer og en hel række andre faktorer.

RisikoGuide har indtil videre primært været anvendt på videregående undersøgelser med chlorerede opløsningsmidler, men principperne er generelt anvendelige. Nærværende dokument skal som nævnt anvendes på sager med begrænset viden, og det giver nogle særlige opmærksomhedspunkter i forhold til at anvende RisikoGuide. Det vigtigste punkt er, at vurderingerne i RisikoGuide i høj grad baseres på en horisontal flux i magasinet. På sager med manglende gennembrud eller begrænset data i magasinet, er det dog ikke muligt at beregne en horisontal flux. I stedet vil det oftest være nødvendigt at beregne en vertikal flux i stedet, hvilket typisk medfører større usikkerhed på resultatet. I RisikoGuide er der et faneblad til vurdering af korrektionsfaktor for at håndtere usikkerheden, men det kan ikke bruges i sin nuværende form på de sager, som dette dokument omhandler. Det anbefales i stedet at anvende en generel korrektionsfaktor på mindst 10 for at imødekomme de usikkerheder der knytter sig til vores manglende viden om PFAS transport og at vurderingerne er koblet på beregningerne af vertikal flux. Hvis der på en konkret sag er gode argumenter for en mindre korrektionsfaktor kan denne anvendes.

Regneeksempel:

Risikofluxen defineres som grundvandskvalitetskriteriet (GVK) af et givent forureningsstof ganget med en given opblandingsmængde. Standardopblandingsmængden for grundvandsressourcen er 200.000 m³/år. Risikofluxen for den vertikale flux beregnes af ligning 1 og 2.

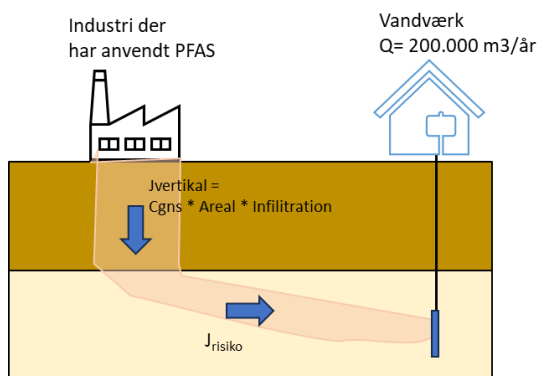
$$J_{\text{risikoflux}} = \text{GVK} * Q_{\text{opblanding}} \quad (1)$$

Hvor $J_{\text{risikoflux}}$ er defineret i g/år

GVK angives i g/m³

og $Q_{\text{opblanding}}$ angives i m³/år.

$$J_{\text{risikoflux}} = J_{\text{vertikal}} = C_{\text{gns}} * \text{Areal} * \text{Infiltration} \Rightarrow C_{\text{gns}} = J_{\text{risikoflux}} / (\text{Areal} * \text{Infiltration}) \quad (2)$$



For PFAS4 (se tabel 2.1) er grundvandskvalitetskriteriet 2 ng/l eller 0,000002 g/m³. Dette svarer til en Risikoflux på 0,4 g/år.

For PFAS22 (se tabel 2.1) er grundvandskvalitetskriteriet 100 ng/l eller 0,0001 g/m³. Dette svarer til en Risikoflux på 20 g/år.

Til sammenligning er Risikofluxen for chlorerede opløsningsmidler 200 g/år for enkeltstofferne ekskl. vinylchlorid, hvor den er 40 g/år. Alle fluxene er opgivet uden usikkerhedsfaktor.

For at give læseren en hurtigt konceptuel forståelse af, hvor stor en forureningskilde, der er nødvendig for at kunne give fluxe af denne størrelse, er der i nedenstående tabel udført en beregning af den nødvendige gennemsnitlige koncentration i porevand i toppen af jorden over et forurennet areal på 1.000 m² ved tre forskellige infiltrationsrater, hvor den vertikale flux skal svare til Risikofluxen (ukorrigeret). Som det fremgår af tabellen, kræver det koncentrationer i størrelsesorden 2.000-8.000 ng/l for, at en forurening med PFAS4 giver en vertikal flux på størrelse med den fastsatte risikoflux (ukorrigeret). Med en usikkerhedsfaktor på en faktor 10 vil kravet være 200-800 ng/l. Dette er under forudsætning af, at der ikke er andre bidrag til grundvandsressourcen indenfor samme opland. Der tages ikke her højde for evt. skærpende omstændigheder i RisikoGuide.

Tabel 1.1 Nødvendige koncentrationer af PFAS4 og PFAS22 for at opnå overskridelse af Risikoflux (ukorrigeret).

Infiltration		Areal af kilden	J _{risiko} for PFAS4/PFAS22	Nødvendig C _{qns} for PFAS4	Nødvendig C _{qns} for PFAS22
mm	m ³ /m ² år	m ²	g/år	ng/l	ng/l
50	0,05	1.000	0,4 /20	8.000	400.000
100	0,1	1.000	0,4 /20	4.000	200.000
200	0,2	1.000	0,4 /20	2.000	100.000

Det er vigtigt at huske at Risikofluxen altid skal korrigeres ifm. med den endelige risikovurdering vha. RisikoGuide.

For PFAS lokaliteter, hvor Risikofluxen beregnes på baggrund af en vertikal flux anbefales der en korrektionsfaktor på 10. Dette betyder at de nødvendige koncentrationer for et kildeareal på 1000 m² for PFAS4 vil være 200-800 ng/l og for PFAS 22 10.000-40.000 ng/l

Hertil kommer at der skal tages hensyn til andre bidrag fra øvrige punktkilder eller diffuse kilder samt evt. skærpende/formildende forhold.

1.4 LÆSEVEJLEDNING

Rapporten består af 4 kapitler udover nærværende indledning.

Kapitel 2 og 3 er baggrundskapitler og kan evt. springes over. De konkrete retningslinjer er præsenteret i kapitel 4 sammen med andre vigtige overvejelser i kapitel .

I kapitel 2 er der en kort gennemgang af PFAS-forbindelserne, hvad angår navngivning, anvendelse samt fysiske og kemiske egenskaber, der styrer spredning i miljøet. Sidst i kapitlet beskrives, hvordan disse parametre har indflydelse på risikovurderingen.

I kapitel 3 er det beskrevet, hvordan der er arbejdet med de eksisterende data fra regionernes undersøgelser for at få et overblik over, hvilke stoffer og niveauer, der kan forventes ved forskellige brancher. Resultaterne fra dette arbejde kan også ses i kapitel 3 med udvalgte grafer for de vigtigste brancher. Derudover henvises der til Bilag 1- 6 og særligt til Power BI databasen, som kan downloades [her](#). Power BI databasen er et vigtigt appendix til denne rapport og kan bruges til at aflæse konkrete værdier for de enkelte brancher. I kapitel 4 gives konkrete retningslinjer/eksempler på, hvordan man kan udføre risikovurdering ved forskellige niveauer af viden om lokaliteterne.

I kapitel 5 er supplerende overvejelser ift. risikovurdering og undersøgelser beskrevet.

2 PFAS – DEFINITIONER- ANVENDELSER

PFAS-forbindelser er en gruppebetegnelse for et stort antal fluorerede stoffer med mindst en fuld fluorerede kulstofatom. Derudover skal antallet af kulstofatomer i de fluorerede kulstofkæder være fra 1 til mere end f.eks. 13 som vist i Tabel 2.1. 1. Gruppen omfatter mere end 4700 forskellige stoffer, og nogle litteraturkilder estimerer op til 10.000 forskellige stoffer (VMR, 2022; ITRC 2022). Det skal bemærkes at der aldrig har været produktion af PFAS i Danmark. I nærværende rapport er der fokus på de 22 udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS22), som indgår i den vejledende grænseværdi for grundvand i henhold til Miljøbeskyttelsesloven §14 (Miljøstyrelsen, 2023a). En oversigt over de 22 udvalgte PFAS-forbindelser kan ses i Tabel 2.1.

Man skelner mellem kort- og langkædede PFAS på baggrund af kulstofkædens længde. Helt overordnet vurderes de langkædede PFAS at være mere toksiske og mindre mobile end de kortkædede, der kan dog være mange nuancer i deres egenskaber.

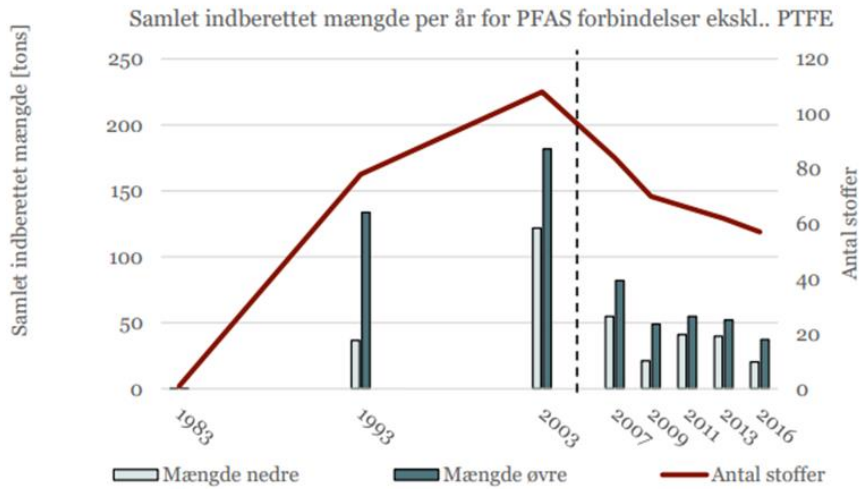
Tabel 2.1 De 22 udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS22) omfattet af Miljøstyrelsens vejledende grundvandskvalitetskriterier for jord og grundvand. Stoffer med rød skrift udgør de 4 PFAS-forbindelser (PFAS4), hvor der er en skærpet grænseværdi. Tabellen er modificeret fra VMR, 2022

	KÆDE	FORKORTE- LSE	CAS NR	FORMEL	NAVN, med markering af navngivende bogstaver	Antal C i alt	Antal C i C-F kæden	Molvægt
PFCA ¹ er Perfluoralkyl/carboxylsyre	Kort	PFBA	375-22-4	C ₃ F ₇ •COOH	PerFluorButansyre	4	3	214,0
		PFPeA	2706-90-3	C ₄ F ₉ •COOH	PerFluorPentansyre	5	4	264,1
		PFHxA	307-24-4	C ₅ F ₁₁ •COOH	PerFluorHexansyre	6	5	314,1
		PFHpA	375-85-9	C ₆ F ₁₃ •COOH	PerfluorHeptansyre	7	6	364,1
	Lang	PFOA	335-67-1	C ₇ F ₁₅ •COOH	PerfluorOktansyre	8	7	414,1
		PFNA	375-95-1	C ₈ F ₁₇ •COOH	PerFluorNonansyre	9	8	464,1
		PFDA	335-76-2	C ₉ F ₁₉ •COOH	PerFluorDecansyre	10	9	514,1
		PFUnDA	2058-94-8	C ₁₀ F ₂₁ •COOH	PerFluorUndecansyre	11	10	564,1
		PFDODA	307-55-1	C ₁₁ F ₂₃ •COOH	PerFluorDoDecansyre	12	11	614,1
		PFTDA	72629-94-8	C ₁₂ F ₂₅ •COOH	PerFluorTridecansyre	13	12	664,1
PFSA ¹ er Perfluoralkylsulfonsyre	Kort	PFBS	375-73-5	C ₄ F ₉ •SO ₃ H	PerFluorButansulfonsyre	4	4	300,1
		PFPeS	2706-91-4	C ₅ F ₁₁ •SO ₃ H	PerFluorPentansulfonsyre	5	5	350,1
	Lang	PFHxS	307-55-1	C ₆ F ₁₃ •SO ₃ H	PerFluorHexansulfonsyre	6	6	400,1
		PFHpS	375-92-8	C ₇ F ₁₅ •SO ₃ H	PerFluorHeptansulfonsyre	7	7	450,1
		PFOS	1 763-23-1	C ₈ F ₁₇ •SO ₃ H	PerFluoroktansulfonsyre	8	8	500,1
		PFNS	68259-12-1	C ₉ F ₁₉ •SO ₃ H	PerFluorNonansulfonsyre	9	9	550,1

¹ En perfluoralkyl-forbindelse er en forbindelse, hvor alle brintatomer, der sidder på kulstofatomerne, er blevet erstattet af fluoratomer undtagen de brintatomer, der sidder på funktionelle grupper som f.eks. hydroxylgruppen (-OH). En polyfluoralkyl-forbindelse er en forbindelse, hvor der er mindst et fuldt fluoreret methyl- eller methylen-kulstofatom (uden en binding til andre atomer som brint, chlor, bromid eller jod), men mindst et kulstofatom er uden fluoratomer eller kun delvis fluorerede, dog undtagen kulstofatomer, som er tilknyttet funktionelle grupper som f.eks. carboxylsyre- (-COO-) eller hydroxylgruppen (-OH).

	KÆDE	FORKORTE- LSE	CAS NR	FORMEL	NAVN, med markering af navngivende bogstaver	Antal C i alt	Antal C i C-F kæden	Molvægt							
		PFDS	335-77-3	C ₁₀ F ₂₁ • SO ₃ H	PerFluorDecansulfonsyre	10	10	600,1							
		PFUnDS	749786-16-1	C ₁₁ F ₂₃ • SO ₃ H	PerFluorUndecnsulfonsyre	11	11	650,2							
		PFD0DS	79780-39-5	C ₁₂ F ₂₅ • SO ₃ H	PerFluorDoDecansulfonsyre	12	12	700,2							
		PFTrDS	791563-89-8	C ₁₃ F ₂₇ • SO ₃ H	PerFluortridecansulfonsyre	13	13	750,2							
Precursor er	Lang	PFOSA	754-91-6	C ₈ F ₁₇ •SO ₂ •NH ₂	PerFluoroktansulfonamid	8	8	499,1							
		6 :2 FTS (6 :2 FTSA)	27619-97-2	C ₆ F ₁₃ •C ₂ H ₄ •SO ₃ H	6:2 FluorTelomerSulfonat (1H,1H,2H,2H- Perfluoroktansulfonsyre)	8	6	428,2							
		Antal C- atomer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Præfix	Meth-	Eth-	Prop-	But-	Pent-	Hex-	Hept-	Okta-	Non-	Dek-	Undek-	Dodek-	Tridek-

Den første PFAS (PTFE) blev første gang syntetiseret i 1938 og er blevet produceret siden 1949. I perioden 1966-2000 er PFAS blevet produceret og anvendt meget bredt i industrien og i forbrugerprodukter, såsom tæpper, møbler, rengøringsmidler, maling, brandslukningsskum, (mad)emballage m.m. Dataudtræk fra Produktregisteret (Nicolajsen og Tsitonaki 2016/Miljøprojekt 1905) viser, at der siden 2003 er sket et fald i de indberettede mængder af forbrugte PFAS-forbindelser for danske virksomheder til under 50 tons, som udgøres af 60 forskellige enkeltstoffer, se Figur 2.1. Stoffet PTFE er ikke medtaget i Figur 2.1, idet PTFE anses som en stabil fluoropolymer.

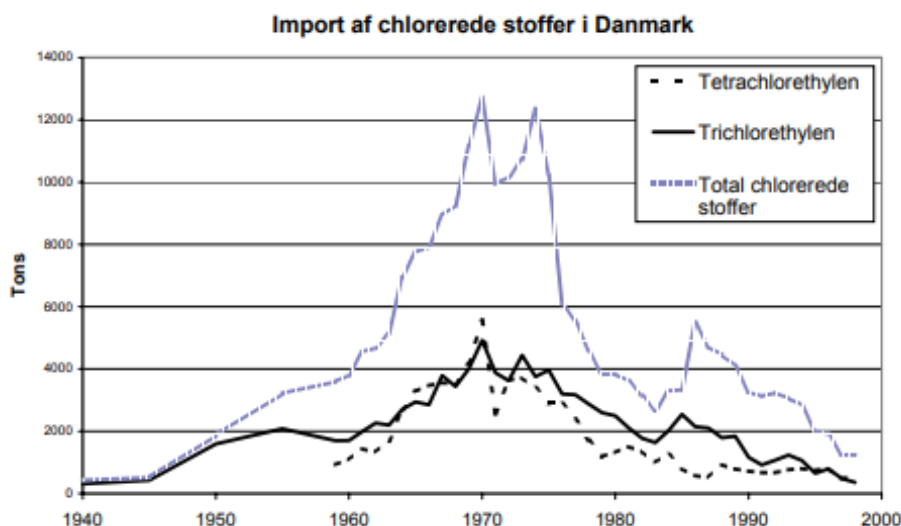


Figur 2.1 Antal PFAS-forbindelser indberettet (eksklusiv PTFE) og samlet estimeret mængde af PFAS-forbindelser i tons til det danske produktregister i udvalgte år i perioden 1983-2016. Data fra 1983 er vurderet at være misvisende, da registreringsproceduren ikke var på plads. Den lodrette stiplede streg markerer 2004, hvor nye regler om ajourføring af indberettede data trådte i kraft (Nicolajsen og Tsitonaki 2016/Miljøprojekt 1905).

I 2000 kom der kommet øget opmærksomhed på PFAS-forbindelsernes sundhedsskadelige effekter og dermed begyndelsen på restriktion og udfasning af udvalgte PFAS-forbindelser, herunder PFOS og PFOA. I 2006 blev PFOS m.fl. udfaset i bl.a. brandslukningsskum, dog var det tilladt at anvende restlager frem til 2011. PFOS og dets afledte stoffer har siden 2009 været på listen over forbudte stoffer under Stockholmkonventionen, og anvendelsen af PFOS har været begrænset i over 10 år under POP-forordningen. PFOA, dets salte og PFOA-relaterede kemikalier har været forbudt

under POP-forordningen siden 4. juli 2020, men for visse anvendelser indeholder konventionen en femårig overgangsperiode, så forbuddet først træder i kraft i 2025. Overgangsperioden gælder bl.a. for brandslukningsskum og implanterbare medicinske anordninger (Randrup og Hansen, 2022). I 2020 er der indført forbud mod brug af PFAS i fødevareremballage i Danmark.

Sammenlignet med chlorerede opløsningsmidler, toppede anvendelsen af PFAS meget senere. For chlorerede opløsningsmidler har hovedparten af anvendelse været frem til 1990, mens det for PFAS har været helt frem til midten 2000'erne.

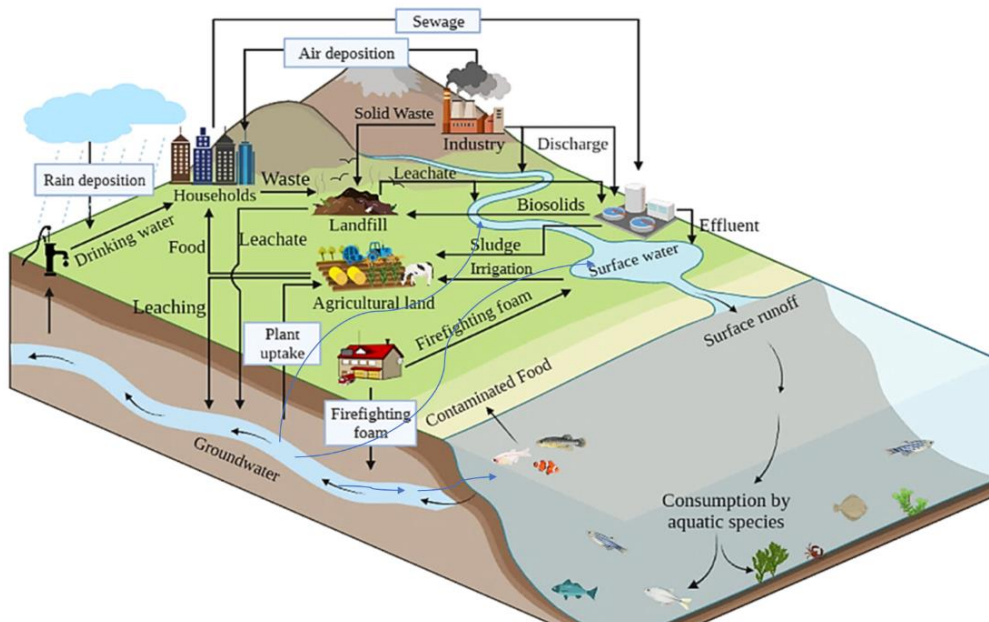


Figur 2.2 Import af PCE og TCE i Danmark /Amternes Videncenter, 2001/ Den del af totalforbruget, der overstiger PCE og TCE udgøres af chlorerede alifater som TCA og TeCM.

Hvis man antager, at PFAS stofferne bevæger sig gennem jorden med samme hastighed som PCE og TCE, vil man forvente, at de vil ankomme til de underliggende magasiner senere end PCE og TCE. Det er dog ikke nødvendigvis tilfældet, og de enkelte PFAS forbindelser opfører sig også meget forskelligt afhængigt af kædelængde og funktionel gruppe.

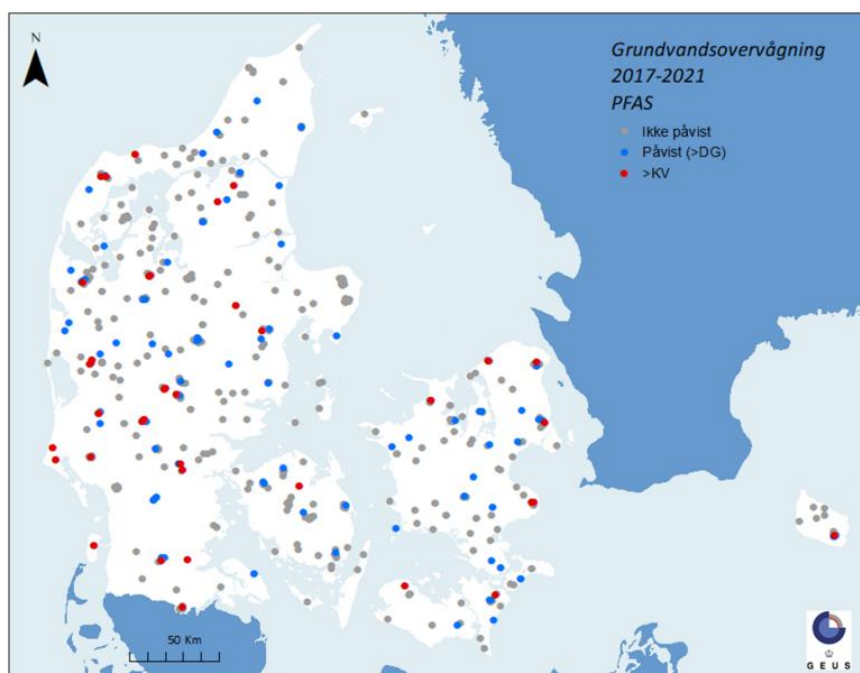
2.1 KILDER

PFAS udslip i miljøet sker fra flere forskelligartede kilder. Figur 2.3 viser de vigtigste kilder til PFAS-udslip i miljøet og vejen til eksponering af mennesker. Der kan skelnes mellem direkte og indirekte udslip. Direkte udslip kan defineres som udslip til luft, vandløb, søer, grundvand og kyster fra PFAS relaterede industrier (produktion af PFAS eller produktion, hvor PFAS indgår som en væsentlig del af processen) eller fra brug af PFAS-holdigt brandslukningsskum. Her sker der udslip direkte til jord og luft (i form af aerosoler), hvorfra forureningen kan sprede sig videre til nærliggende grundvand og overfladevand. Indirekte udslip af PFAS i miljøet omfatter udslip, relateret til de store mængder PFAS-holdige forbrugerprodukter, som ender i affald og spildevand. Det drejer sig om spildevand og spildevandsslam fra almene rensningsanlæg, restprodukter fra affaldshåndtering såsom aske, udslip fra lossepladser (til luft, grundvand og nærliggende overfladevand) og udslip til luft fra forbrændingsanlæg. PFAS-forbindelsernes store tilstedeværelse i det globale miljø, i kombination med deres persistens, gør at PFAS-forurening følger det naturlige vand- og fødekædekredsløb.



Figur 2.3 Kilder og spredningsveje af PFAS i miljøet . Modificeret fra (Saawarn, 2022)

I Danmark er der på nuværende tidspunkt detekteret PFAS4 og PFAS22 i hhv. 15,6% og 19,7% af de almene vandværkers boringskontrol for perioden oktober 2022-september 2023 (GEUS, 2023). Det tyder på en omfattende belastning fra flere punkt- og fladekilder. I Grundvandsovervågning 2017-2021, hvor der er undersøgt for 12 PFAS-forbindelser (PFAS12), er der detekteret mindst en PFAS-forbindelse i 18,1% af undersøgte indtag (124 ud af 686), se Figur 2.4 (Thorling et al. 2023).



Figur 2.4 Forekomst af PFAS i Grundvand i GRUMO 2017-2021. Rød markerer fund over en fastsat kravværdi (>0,002 µg/l for "Sum af PFOS, PFOA, PFHxS og PFNA" eller >0,1 µg/l for "Sum af 12 PFAS-forbindelser"). Blå markerer fund under kravværdien. Grå markerer intet målbart PFAS (Kilde: Thorling et al., 2023)

En anden diffus kilde er PFAS i regnvand. Der foreligger i Danmark dog ingen veldokumenterede undersøgelser af PFAS i regnvand. Undersøgelser fra Sverige har vist niveauer af PFOA og PFOS i regnvandet på ca. 1-2 ng/l (Cousins et al., 2022). Samme niveau er konstateret i upublicerede data fra Gladsaxe Kommune fra målinger i 2022/2023. Miljøstyrelsen har undersøgt havskum som diffus kilde på 11 lokaliteter på vestvendte kyster i Danmark og påvist mellem 17.000 og 250.000 ng/l af PFAS4 (Miljøstyrelsen 2023b). Det tyder dermed på, at der kan være et betydeligt diffust bidrag fra bl.a. regnvand og aerosoler.

NOVANA programmet overvåger PFAS i udløb fra renseanlæg samt fra regnbetingede udledninger fra fælleskloakerede områder. I den seneste NOVANA rapport (data fra 2008-2019) er PFOA, PFOS og PFNA de hyppigste fundne stoffer i udløb fra renseanlæg med gennemsnitlige niveauer på 1,1-39 ng/l. I de regnbetingede udledninger er der hyppigst fundet PFOS, og dernæst PFOA og PFBA. Det højeste niveau var for PFBA på 17 ng/l (Boutrup et al, 2021).

Der er identificeret mere end 200 anvendelser af PFAS-forbindelserne i forskellige industrier og produkter, hvilket har medført, at stofferne har spredt sig i det globale miljø. Et udpluk af de mest almene applikationer kan ses i Tabel 2.2, hvor de er sammenkoblet med mulige spredningsveje til miljøet. Der foreligger begrænset information om hvilke stoffer, der er anvendt i specifikke brancher og i hvilke koncentrationer. Med udgangspunkt i arbejdet i håndbogen (VMR 2022) og branchebeskrivelser/faktaark fra VMR samt Miljøprojekt 1905 (Nicolajsen og Tsitonaki 2016), er der udarbejdet en oversigt for stoffer og indhold i produkter ved de forskellige brancher, som kan ses i Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Oversigt over de vigtigste PFAS anvendelser og forventede koncentrationer i produkter. Modificeret fra (Nicolajsen og Tsitonaki 2016/Miljøprojekt 1905) med input fra VMRs faktaark om PFAS (VMR-2022a). For en forklaring af forkortelser henvises der til Bilag 1-1 i VMRs Håndbog (VMR, 2022a)

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	PFAS-FORBINDELSER	INDHOLD I DET ANVENDTE PRODUKT
Brandøvelsespladser for træning i slukning af oliebrande eller lignende	Som komponent i brandslukningsskum for at sikre effektivitet mod oliebrande. Udslip sker ved anvendelse af skummet eller forkert opbevaring.	4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, ADONA, GenX, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFPeS, PFHxS, PFOS, PFNS, PFDS, PFETs, PFPrS,	Skumvæske indeholder op til 6% PFAS og blandes i forholdet 0,5-6% med vand. Der kan være op til 5000 liter skumvæske i en bil, som blandes til slukningsvand. Derudover kan der være brugt op til 1000 l skumvæske årligt på brandøvelsespladser.
Forkromningsindustri	Befugtningsmiddel, dughindrende middel og overfladeaktive stoffer (kan inkludere kalium, lithium, diethanolamin og ammonium PFOS-salte eller 6:2 FTS). Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	PFOS, 6:2 FTS	I enkeltprodukter har indholdet været 2-9% og det årlige forbrug af produktet i Danmark har været 10-50 kg. (VMR Faktaark 2022)
Tæppeindustri	Produkter til imprægnering af tæppers luvside. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	PFBA, PFOS	Indhold af PFOS på 5% og årligt forbrug på ca. 5 tons. Andre produkter kunne indeholde op til 8,5% C6-PFAS med et årligt forbrug af ca. 2-4 tons. Produkterne blandes i imprægneringsvæske til ca. 6-8,5%. I Danmark er der ca. 4-5 virksomheder, som har foretaget imprægnering. I affald fra tæpper er der konstateret gennemsnitlige indhold af FTOH, FTS, PFCA'er og PFSA'er på hhv. 284, 44, 21 og 3 ng/g. (Coffin et al., 2023)
Tekstil- og læderindustri	Bekæmpelsesmidler, imprægneringsmidler og anden overfladebehandling. Kendte PFAS-	EtFOSE, PFOS, PFOA, PFDS, PFBA, PFPeA,	0,8-1,4 tons PFAS pr. år i Danmark. Indholdet i imprægneringsvæske var på 2-3%. I tekstilaffald er der fundet

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	PFAS-FORBINDELSER	INDHOLD I DET ANVENDTE PRODUKT
	forbindelser er kun anvendt i små mængder. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFUnDA, PFTrDA PFBS, PFHxS PFHpS, PFOS	gennemsnitlige indhold af FTOH på 257 ng/g, PFCA'er på 33ng/g og PFSA på 0,3 ng/g jf. Coffin et al, 2023.
Renserier	Imprægnering af tekstiler. Vask af imprægnerede tekstiler. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	6:2 FTS, PFBS, PFDA, PFHpA, PFHxS, PFNA, PFOSA, PFOS, PFPeA, PFBA, 6:2 FTOH, 8:2 FTOH, 10:2 FTOH, 8:2 FTCA, 8:2 FTS, N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSE, N-EtFOSE	Se tekstiler, formentlig i mindre mængder end ved selve fabrikationen
Malings-, lak- og limindustri	Overfladeaktive stoffer, rengøringsmidler, maling, lak, imprægneringsmidler m.m. En stor andel af de anvendte PFAS-forbindelser er kendte precursorer eller blandt PFAS22. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	PFOS, N-MeFOSE, 6:2 FTS, N-MeFOSE, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFOA, PFHxS, PFDS, PFHpS	Maling kan indeholde på til 1% PFAS. I Danmark er der oplyst indhold på 0,01-0,3%. Maksimale forbrug i malingsindustrier er på ca. 3,5 tons. Hos en enkelt producent vurderede man, at der blev anvendt 2,7 kg PFAS om året (VMR, Faktaark 2022)
Fyldpladser for byggeaffald og ældre lossepladser for dagrenovation	Deponering af PFAS-holdigt affald. Særlig kan maling i byggeindustrien før 2002 have indeholdt PFAS-forbindelser. Udslip kan ske ved forkert ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).		På fyldpladser med byggeaffald kan der teoretisk været deponeret 0,6 kg PFAS på en fyldplads med en affaldsvolumen på 50.000 m ³ .
Træindustri og møbelindustri	Maling og lak, trykfarver, bindemidler, farvestoffer, rengøringsmidler, rustbeskyttelsesmidler. En stor andel af de anvendte PFAS-forbindelser er kendte precursors eller blandt PFAS22. Op til 56% af den indberettede mængde er kendte PFAS-forbindelser. De kendte stoffer er indberettet af op til 7 brancher per år. Risikoen for forurening fra denne branche er primært forbundet med håndtering, påsmøring og afskaffelse.	N-MeFOSE, PFOA, PFOS, Fluoracrylat (27905-45-9)	Op til 4 tons PFAS om året i alt fordelt over ca. 14 virksomheder. Indhold er lignende indhold i maling og lak.
Kemisk industri	Diverse applikationer, til overfladebehandling mm, se også maling. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	MeFOSE, 6:2 FTS, PFOS	Op til 5 tons om året og primært til fremstilling af lak, maling og trykfarver
Pap og papir	Produkter til overfladebehandling af pap, papiremballage og fødevarekontaktpapir. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	N-EtFOSA, N-MeFOSE, DiPAP, PFOA	Næsten ingen information om mængder/indhold i produkter. (VMR Faktaark 2022). I papiraffald er der fundet diPAP, FTOH, PFCAer og PFSAer i gennemsnitlige koncentrationer ad hhv. 629, 2572, 28 og 0,2 ng/g (Coffin et al, 2023)

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	PFAS-FORBINDELSER	INDHOLD I DET ANVENDTE PRODUKT
Bilindustri, herunder autoværksteder og vaskehaller	Produkter til bilpleje (bilvoks, poleringsmidler). Primært gennem kloaksystemet.	PFHxA, PFOA	I bilvoksmidler og polermidler er der fundet indhold af PFAS på 0,5-3,8 µg/l i 2016.
Elektronikindustri	Overtræk til kabler og ledninger. Loddemidler. Overfladebehandling. Kendte PFAS-forbindelser kun anvendt i små mængder. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	PFOA, (APFO) PFOS, PFBS, 6:2 FTS, PFOSA, EtFOSA, MeFOSE	Makssamlede mængde i 2003 var 19 tons. Der kendes ikke til indhold af anvendte produkter. Elektronikaffald indeholder 0,0-0,43 µg/kg PFOS (VMR faktaark)
Jern- og metalindustri	Maling, lak og anden overfladebehandling. Relativt store mængder af både kendte og ukendte stoffer er anvendt i denne branche. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	N-MeFOSE, PFOS 6:2 FTS, PFHxS, PFOA, 14:2 FTOH, 8:2 FTOH	I alt ca. 20 tons i perioden 1983-2016, primært til polering/ lak/ farve mm
Gummi- og plastindustri	Overtræk til kabler og ledninger, bindemidler, maling og farvestoffer. Fremstilling af gummiprodukter er den branche, der har indberettet størst mængder af PFAS-forbindelser under denne branche. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	PFOA, PFOS, PFBS, 6:2 FTS, PFHpA	Samlet set op til 2,4 tons i perioden 1983-2016. Der er ikke oplysninger om indhold i produkter.
Grafisk industri/ trykkerier	PFAS har i trykkeribranchen haft en række forskellige anvendelser, såsom i printerblæk, i printerhoveder til ink-jet printere, til trykpapiret og til litografiske printplader. Da PFAS også kan findes i lim, kan det også være blevet benyttet f.eks. i forbindelse med trykning af bøger. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	PFOS, N-MeFOSA, N-EtFOSA, PFOSA, N-MeFOSE, DiPAP	I alt 11,5 tons PFAS indberettet i 1993-2016. Omkring 15 kg årligt anvendes i printerblæk.
Lokaliteter, hvor en større kemikalie/oliebrand er slukket	Som komponent i brandslukningsskum for at sikre effektivitet mod oliebrande. Udslip sker ved anvendelse af skummet eller forkert opbevaring.	Samme som brandøvelsespladser	Se brandøvelsespladser.
Pesticider/Insekticider.	PFAS kan være en del af bl.a. insekticider. Der er fundet op til 3-20 mg/kg PFOS i amerikanske produkter indeholdende malathion, imidacloprid abamectin og novaluron (Lasee et al., 2022). Imidacloprid, abamectin, er forsat godkendt i Danmark, og malathion har været godkendt og produceret i Danmark (Miljøstyrelsen 2023). Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem anvendelse af	På dyrkede arealer	PFOS på 3,9-19,2 mg/kg i 6 insekticider.

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	PFAS-FORBINDELSER	INDHOLD I DET ANVENDTE PRODUKT
	stoffer til landbruget eller ved produktion af stofferne, samt ved pesticidpunktkilder (vask af sprøjtemaskiner) eller afskaffelse af produkter/beholdere.		

Coffin et. Al. (2023) har sammenfattet oplysninger omkring PFAS-indhold på lossepladser i USA, som modtager almindelig restaffald. Her kan der forventes et gennemsnitlig indhold af total PFAS på 50 µg/kg i affaldet. Dette stammer formentlig primært fra papir, tekstiler og tæppeaffald. I Danmark bliver restaffald sorteret, afbrændt eller genanvendt. Det kan dog forventes, at ældre lossepladser i Danmark kan indeholde PFAS på ca. samme koncentrationsniveau som i USA. I samme studier er indhold af PFAS i forskellige produkter sammenfattet, hvor det fremgår, at FTOH udgør hovedparten af indholdet i papir, tekstiler og tæpper (se Tabel 2.3).

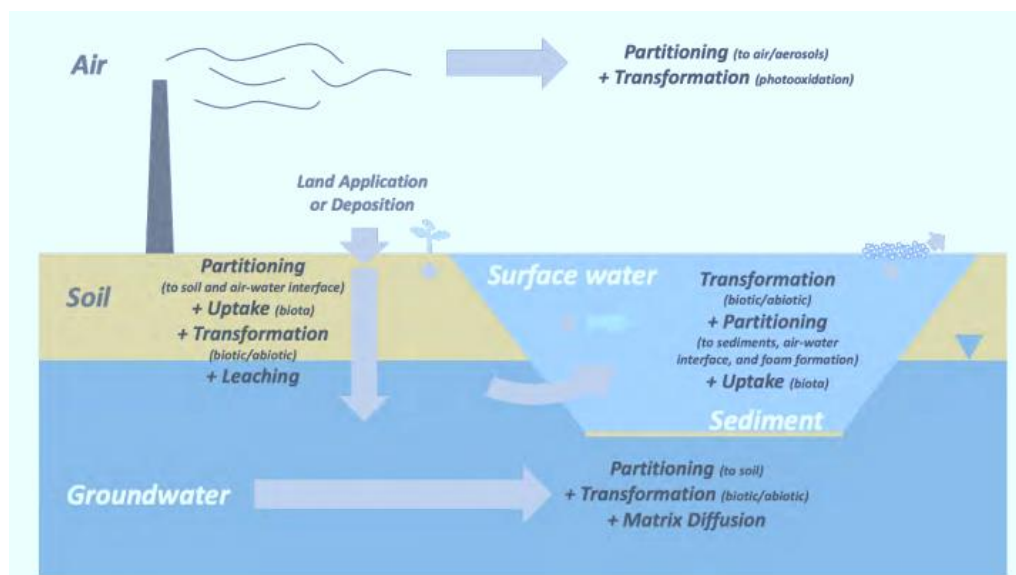
Tabel 2.3 Indhold af forskellige PFAS-forbindelser i deponeret affald for papir, tekstiler og tæpper. Tabellen stammer fra Coffin et al., 2023. For en forklaring af forkortelser henvises der til Bilag 1-1 i VMRs Håndbog (VMR, 2022a)

Average PFAS composition of MSW products by subcategory for paper, textiles, and carpet.					
Material	PFAS Group	Concentration (ng/g)		n	References
		Average	Range		
Paper	diPAP	629	84–7800	5–59	D’eon et al., 2009; Guo et al., 2009; Liu et al., 2015; Kotthoff 2015; Yuan et al., 2016; Timshina et al., 2021; Zabaleta et al., 2020
	FTOH	2572	ND-41130	7–85	
	FTS	ND	ND	29	
	FTCA	ND	ND-333	25	
	PFCA	28	ND-15400	98–165	
Textiles	PFSA	0.2	ND-14	29–87	Guo et al., 2009; Liu et al., 2015; Becanova et al., 2016; Van der Veen et al., 2022
	diPAP	~	~	~	
	FTOH	257	ND-74200	22–48	
	FTS	~	~	~	
	FTCA	~	~	~	
Carpet	PFCA	33	ND-3300	35–102	Guo et al., 2009; Liu et al., 2015; Becanova et al., 2016; Wu et al., 2020
	PFSA	0.3	ND-97	26–61	
	diPAP	~	~	~	
	FTOH	284	ND-8070	29–34	
	FTS	44	ND-2850	29	
	FTCA	~	~	~	
	PFCA	21	ND-2010	29–44	
	PFSA	3	ND-629	29–36	
FTS = fluorotelemer sulfonate.					
n = number of samples.					
ND = non-detect.					

2.2 SKÆBNE, TRANSPORT OG PROCESSER

I dette afsnit gives en kort oversigt over de vigtigste processer, der styrer fordeling, transport og skæbne af PFAS i miljøet. Der er især fokus på de processer, der har betydning for spredning i jord og grundvand. Derudover er der fokus på udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS22 samt enkelte kendte precursorer).

PFAS-forbindelsernes skæbne og transport styres af både deres fysiske-kemiske egenskaber (længden af kulstofkæde, ioniseret form eller ej, molekylets opbygning og fordeling af funktionelle grupper) og mediets karakteristika (dvs. jordtype, permeabilitet, infiltrationsrater, pH, redoxpotentialet osv.). De vigtigste processer er illustreret i Figur 2.5 og gennemgået hver for sig i de følgende afsnit. Der er primært fokus på de processer, der foregår i jord og grundvand.



Figur 2.5 De vigtigste processer der styrer PFAS fordeling, transport og transformation i miljøet. (Modificeret fra ITRC, 2022)

PFAS-forbindelsernes struktur består af en hydro- og lipofob C-F hale og en ikke fluorholdig polær funktionsgruppe, som er hydrofil. Det betyder, at PFAS-forbindelsernes ene ende skyer vand, fedt og organisk kulstof, mens molekylets modsatte ende er hydrofil (vil gerne fordele sig i vand) (Buck et al., 2011, ITRC, 2022). I princippet er PFAS-forbindelser dermed en slags detergent/overfladeaktivt forbindelse ift. transport og opførsel.

Generelt gælder det, at PFAS har en tendens til at akkumulere i overgangsfaser (vand/jord) (jord/luft) (vand/luft) pga. af stoffernes overfladeaktive egenskaber (Brusseau, 2018). PFAS akkumuleres i vand/luft overflader, som det f.eks. sker i havskum. Denne tendens fører til yderligere transport med f.eks. havskum aerosoler, se Figur 2.5. Overordnet set er fluortelomer-alkoholer såsom FTOH mere flygtige end de andre PFAS-forbindelser. PFAS kan forekomme i luftfasen fra direkte udledning ved industrielle luftemissioner eller igennem afdampning fra andre medier. Anioniske PFAS-forbindelser såsom PFOS og PFOA kan sorbere til luftbårne partikler (aerosoler) og spredes videre derfra. Denne spredning er formentlig skyld i den diffuse belastning med PFAS globalt (Cousins et al., 2022).

I Tabel 2.4 angives de vigtigste fysiske kemiske parametre i relation til jord og grundvand for de 22 PFAS-forbindelser omfattet af Miljøstyrelsens grænseværdier (PFAS22). Der findes meget få data for damptryk og fordelingskoefficient mellem vand og luft for PFAS.

Tabel 2.4 De vigtigste fysisk-kemiske parametre og fordelingskoefficienter for udvalgte PFAS-forbindelser, Modificeret fra (VMR, 2022; Nguyen, 2020). K_d værdier er eksperimentelle fra laboratorieforsøg (Nguyen et al., 2020) ved jord pH på 7,2. log Kow er log oktanol/vand fordelingsstallet, K_d er målt fordelingsstal mellem jord/vand på hhv. en sand- og en lerjord, K_{AW} er luft/vand fordelingsstallet (Henrys lov konstanten, dimensionsløs).

FORBINDELSE	ANTAL C I C-F KÆDEN	VANDOPLØ SELIGHED MG/L	DAMPTRYK (PA)	LOGKOW	K_D SAND (F_{OC} 0,4%)	K_D LER (f_{OC} 0,17 %)	PK_A	K_{AW}
PFBA	3	560000	3900	2,82	0,06	0,3	0,85	0,0006
PFPeA	4	112600	1350	3,43	0,04	0,28	0,81	0,001
PFHxA	5	21700	457	4,08	0,5	0,29	0,84	0,003
PFHpA	6	4200	158	4,67	0,3	0,84	0,82	0,006
PFOA	7	9500	54	5,3	0,53	0,86	0,9	0,01
PFNA	8	1200	18,6	5,92	1,27	2,46	0,82	0,03
PFDA	9	5140	6,6	6,5	7,53	11,46	-0,17	0,05
PFUnDA/ PFUnA	10	93	2,2	7,15	11,7	45,1	-0,17	0,12
PFDODA	11	0,7	0,7	7,77	93,1	187,8	-0,17	0,26
PFTTrDA	12	0,2	0,3	8,25				0,42
PFBS	4	30000	631	3,9	0,05	0,31	-3,94	0,002
PFPeS	5	1720	11	3,38	0,1	0,35	-	-
PFHxS	6	2300	58,9	5,17	0,28	0,63	-3,45	0,004
PFHpS	7	465	-	4,81	0,95	2,73		
PFOS	8	570	6,8	6,43	3,22	5,66	-3,41	0,02
PFNS	9	222	1,5	6,78	6,26	9,57		
PFDS	10	190	0,71	7,66	27,3	16,3	-2,86	0,07
PFUnDS	11	35	0,0014	6,49				
PFDODs	12	24	0,0016	7,07				
PFTTrDS	13	55	0,003	7,44				
PFOSA	8	4,5	0,25	5,62	0,19	0,87	6,24	0,01
6:2 FTS	6	1300	0,11	4,44	15,58	12,82	1,31	0,00001

Som det fremgår af tabellen, er pK_a (syrestyrkeskspONENTEN) for PFAS-forbindelser, undtaget PFOSA, meget lave. pK_a udregnes som $-\log$ til pH værdien, hvor 50% af syren er dissocieret i H^+ og anionen. En pK_a på f.eks. -3 betyder dermed, at halvdelen af stoffet er dissocieret med $pH=-3$. Ved $pH=7$ vil den udissoicererede andel udgøre 0,00001% og stoffet derfor i praksis vil være helt dissocieret. PFAS-forbindelser kan dermed betragtes som stærke syrer. Dette betyder, at PFAS-forbindelser, ud over PFOSA, ved pH i normal jord på 6-8 stort set er fuldstændig dissocierede og selve CF-delen af molekylet er dermed negativt ladet. Dette betyder i praksis, at det dermed er CF-kædens længde, der styrer bindingen til det organiske stof i jorden og hermed, at de længerekædede forbindelser teoretisk har en bedre korrelation mellem organisk stofindhold i jorden og observeret fordelingskoefficient mellem vand og jord.

2.2.1 FAKTORER DER PÅVIRKER SORPTION I JORD

PFAS-transport i jord og grundvand er bl.a. afhængig af forbindelsernes binding til jordpartikler, som sker gennem to primære mekanismer:

- Adsorption til organisk kulstof, som generelt stiger med stigende antal C-F i molekylets kæde. Derudover, ses der en tendens til, at adsorption og desorption er non-lineær med højere adsorption ved lave koncentrationer for enkelte forbindelser såsom PFOS (Chen et al., 2016).
- Elektrostatiske interaktioner, som afhænger meget af jordens ladning og er meget følsomme over for pH. F.eks. er de fleste lerjorde negativt ladede ved normal pH. PFOS og PFOA er også negativt ladede under typiske pH-værdier i miljøet, hvilket betyder, at de vil have en mindre tendens til at binde sig til jorden og i stedet udvaskes i større grad. I sandjorde er indholdet af ladede partikler mindre, og her er det derfor helt overvejende det organiske indhold, der styrer sorptionen.

Kompleksiteten af disse mekanismer betyder, at det er svært at modellere PFAS-forbindelsernes transport i jord, hvorfor eksperimentelle data for fordelingskoefficienter i forskellige jordtyper, koncentrationer og mætningsforhold har stor værdi.

Dog kan man i de fleste situationer, hvor koncentrationer af PFAS er under 100µg/l godt beskrive sorptionen med den lineære isotherm:

$$C_s = K_d C_w,$$

hvor C_s er koncentrationen på jordpartiklerne, C_w er koncentrationen i vandfasen og K_d er fordelingskoefficienten, (McGarr et al., 2023; You et al., 2010, Silva et al., 2021). K_d er afhængigt af jordtype, herunder f_{oc} ,

Derudover er der rimelig konsensus om, at et højere indhold af organisk kulstof i jorden (udtrykt ved fraktionen af organisk kulstof i jorden f_{oc}), typisk vil resultere i øget sorption. En målrettet litteraturgennemgang, Jensen et al 2023, udført i Miljøprojekt 2232 viste, at der generelt er en god korrelation for K_d/OC for PFOS og PFOA, mens der er en mindre god korrelation for PFDA, PFBS og PFPeA, PFNA og PFHxS.

BETYDNING AF C-F KÆDELÆNGDEN

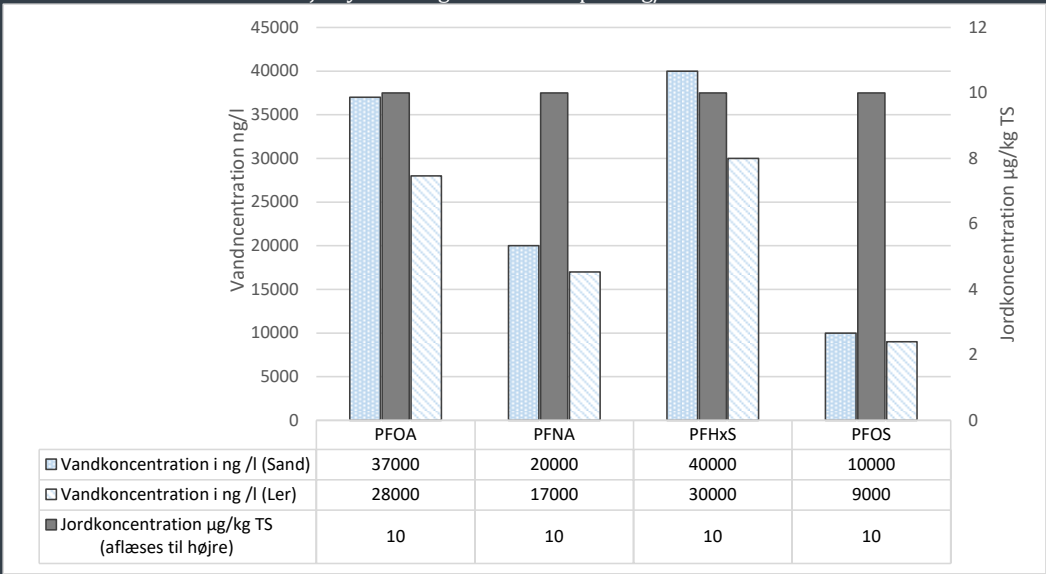
Higgins og Luthy (2006) fandt, at for hver ekstra CF₂ i C-F-kæden, vil log K_d stige med 0,5 til 0,6. Söregård et al. (2020) udførte partikel-sorptionseksperimenter med 17 PFAS-forbindelser og 44 unikke sorbenter og fandt, at sorption af PFAS med identisk kædelængde steg fra FTSA, PFCA, PFSA til perfluoroktansulfonamid (FOSA). Higgins og Luthy og Rayner et al., 2022; rapporterede lignende resultater, hvor PFSA's sorberede mere end PFCAs. Samme konklusion er bekræftet i litteraturgennemgangen i Miljøprojekt 2232, som viser, at PFBS sorberer mere end PFBA. Både molekylvolumen og polaritet spiller en rolle for binding til jorden. Generelt giver en større CF kædelængde et større volumen og en større andel af volumenet, der er non-polært. Dette giver mindre vandopløselighed og dermed større affinitet for binding. For særligt de mindre molekyler er polariteten af molekylet betydende, dvs. hvilken funktionel gruppe der er. Jo mere polær, jo højere opløselighed og dermed mindre binding til jorden. Det er derfor stoffet PFBA vil binde sig mindre end PFBS.

Ligeledes viste data fra 10 feltlokaliteter, at kædelængden var den dominerende faktor på sorption (Anderson et al., 2016). Kæder længere end C8 blev fundet at have en ikke-lineær effekt på sorption. Funktionelle grupper havde større betydning for PFAS-forbindelser med kortere kæder (mindre end C8), og PFSA's havde en større affinitet til sorption sammenlignet med PFCAs.

En vigtig mekanisme i jord- og grundvandssystemet er diffusion. Da PFAS er persistente, kan diffusion fra lavpermeable medier udgøre en langvarig kilde. Overordnet set kan der forventes højere diffusionskoefficienter, jo mindre PFAS-molekylerne er (Schäffer, 2019).

BOKS 2: Jordkoncentrationer vs. vandkoncentrationer

Som beskrevet tidligere, er der forskellige detektionsgrænser for jord- og vandprøver, hvor detektionsgrænsen for jordprøver ligger i størrelsesordenen 0,05-0,1 µg/kg, mens detektionsgrænser for vand ligger på 0,3 ng/l. Set i lyset af, at mange PFAS-forbindelser fordeles sig nogenlunde ligeligt i vand og jord, har det implikationer for tolkning af resultater for jordprøver. I nedenstående figur ses beregnede koncentrationer i porevand for PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS ved en jordkoncentration på niveau med Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterie i jord på 10 µg/kg TS (PFAS4) i hhv. sand og ler jord for median K_{oc} værdier (VMR, 2022). Det ses, at der i nærmest alle tilfælde kan forventes vandkoncentrationer, som er en faktor 5-10.000 over Miljøstyrelsens grænseværdi på 2 ng/l.



Tilsvarende er der udført beregninger for hvordan PFAS vil fordele sig mellem vand- og jordfase i umættet ler og sand for udvalgte PFAS-forbindelser, specifikt, PFBA, PFBS, PFOS, PFOA og PFHxS. Fordeling i porevand/poreluft og jord, hvor der i jord er konstateret et indhold svarende til detektionsgrænsen for de enkelte stoffer kan ses i nedenstående figurer. Bemærk, at det er massefordeling og ikke koncentration der afspejles på figurerne.

	PFBA	PFBS	PFOA	PFOS	PFHxS
Totalkoncentration i jord (µg/kg TS)	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1
Porevandskoncentration (ng/l) i ler	390	403	142	46,5	303
Fordeling i ler	PFBA luft vand jord	PFBS luft vand jord	PFOA luft vand jord	PFOS luft vand jord	PFHxS luft vand jord
Porevandskoncentration (ng/l) i sand	580	600	190	50	400
Fordeling i sand	PFBA luft vand jord	PFBS luft vand jord	PFOA luft vand jord	PFOS luft vand jord	PFHxS luft vand jord

ALDRINGSPROCESSER OG IRREVERSIBLE SORPTION.

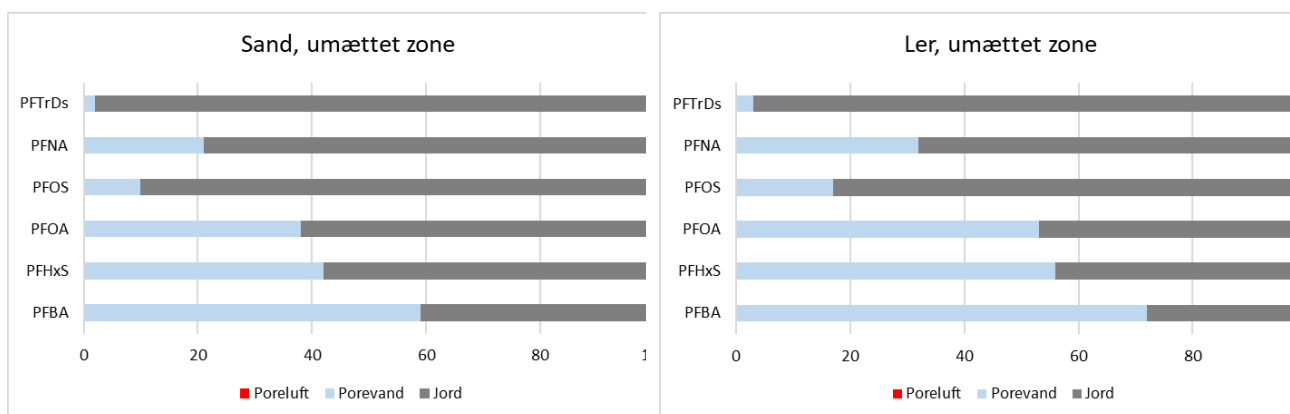
Overordnet set viser gennemgang af felt- og laboratoriedata en større udvaskning i laboratorieforsøg end i feltstudier (Miljøprojekt 2232). Det kan muligvis forklares ved, at en del af PFAS binder sig irreversibelt til jorden i det, der kaldes NER (Non-extractable residue), men også begrænsninger af masseoverførsel, forårsaget af forskelle i hydraulisk ledningsevne i feltstudierne. Jf. et studie af Gassmann et al., (2021) kan op til 90% af massen for PFOA og PFOS være bundet i NER. Andre studier har fundet et tab på 20 til 45% (McLachlan et al., 2019 for hhv. PFOS og PFOA). Implikationerne af dette er, at der kan være tale om en langvarige kilde, dog kan irreversibel sorption være med til at reducere koncentrationen i vandet pga. bindingen til jorden (Miljøprojekt 2232; Mc Garr et al., 2023). Mekanismerne for PFAS og NER, er dog ikke helt kortlagte og forstået endnu (Miljøprojekt 2232).

2.2.2 PROCESSER I DEN UMÆTTEDE ZONE

PFAS-forbindelsernes tendens til at akkumulere i vand/luft overgangen, kan i nogle tilfælde have betydning for PFAS-transport i den umættede zone. Her kan det forventes, at nogle PFAS-forbindelser vil ophobe sig i den kapillære zone. Studier har vist, at i et system med ca. 20% luftmætning, kan op til 50% af PFOS- og PFOA-retention skyldes akkumulering i den kapillære zone (Brusseau, 2018) og dermed bidrage signifikant til en langsommere nedsivning af PFAS-forbindelserne igennem den umættede zone. Jf. Li et al. (2023) gælder det, at der for langkædede PFAS-forbindelser er højt indhold af organisk stof og lav vandmætning med til at reducere udvaskning i større grad end for kortkædede forbindelser. Konklusionen er, at de primære mekanismer og virkninger af organisk stof (organic matter OM) på styring af transporten af PFAS er: (i) OM ($\geq 15\%$) absorberer PFAS gennem hydrofob interaktion, hvilket mindsker mobiliteten af PFAS i mediet, især for langkædede PFAS og (ii) OM ($\leq 5\%$) konkurrerer med PFAS om interaktionssites på medioverfladen gennem elektrostatiske kraft for at mindske tilbageholdelsen af PFAS, især for kortkædede PFAS. Betydning af lav vandmætning forventes at være størst i lokaliteter med en tyk umættet zone.

Det lader til, at den komplekse proces, hvor luftfasen spiller en vigtig rolle, er vigtigst på lokaliteter med høje koncentrationer tilknyttet anvendelse af brandslukningsskum. Da disse lokaliteter ofte vil være en del af en større undersøgelse ligger det udenfor dette projekts opgave at gå i dybden med denne problematik.

I Figur 2.6 angives fasefordeling for seks udvalgte PFAS-forbindelser i den umættede zone for to forskellige jordtyper (sand og ler). De udvalgte PFAS-forbindelser er PFAS4 (PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS) samt den korteste og den længste PFAS-forbindelse blandt PFAS22 (PFBA og PFTrDa). Det fremgår, at der næsten ikke er nogen masse i luftfasen for nogle af de 6 PFAS-forbindelser.



Figur 2.6 Fordeling af udvalgte PFAS-forbindelser i poreluft, porevand og jord i den umættede zone for sand og lerjorde med f_{oc} på 0,1%. Baseret på data og beregninger fra (VMR, 2022) ved brug af standard parametre for ler og sandjord i JAGG 2.1.

2.2.3 SÆRLIGE FORHOLD VED FORURENING FRA BRANDØVELSER

McGarr et al (2023) diskuterer i en reviewartikel, hvilke faktorer, der komplicerer PFAS transport på lokaliteter, hvor kilden til PFAS er brandslukningsskum. Det drejer sig om:

- Tilstedeværelsen af andre forureningsstoffer/tilsætningsstoffer i skum (surfaktanter, organiske opløsningsmidler, polymerer og andre tilsætningsstoffer).
- Sammensætning af skum med talrige forskellige PFAS-forbindelser; op til 50 forskellige PFAS-forbindelser med 2 til 12 C-F bindinger.
- Nedbrydning af precursorer, (dvs. fluorotelomerer), da de kan fungere som en vedvarende kilde til PFAA'er i undergrunden længe efter brugen af brandslukningsskum er ophørt gennem transformation og nedbrydning.
- Varierende mætningsgrad af den umættede zone.
- Varierende fysiske og kemiske egenskaber for både PFAS-forbindelserne og jorden.

Desuden kan der i samme kildeområde forekomme forurening med brændstoffer (olie og lignende), som også kan være i NAPL form. Deres betydning for transport af PFAS er ikke fuldt undersøgt endnu. Det er umuligt, at pålideligt tilskrive sorption af PFAS til en enkelt faktor, men i stedet skal tilskrives en kombination af faktorer (f.eks. OC, lerindhold og pH).

Da disse lokaliteter ofte vil være en del af større undersøgelser, ligger det udenfor dette projekts opgave at gå i dybden med denne problematik.

2.2.4 TRANSFORMATION

PFAS-forbindelser anses, som nævnt ovenfor, generelt som persistente. De PFAS-forbindelser, der kan transformeres, benævnes precursorer og vil typisk transformeres til andre PFAS-forbindelser (slutprodukter), som ikke nedbrydes yderligere. PFOS og PFOA er eksempler på disse slutprodukter, og det samme gælder 20 af de 22 PFAS-forbindelser, omfattet af Miljøstyrelsens kvalitetskriterier. Ud af de 22 PFAS-forbindelser, er det kun 6:2 FTS og PFOSA, der kan transformeres yderligere. PFOSA er en kendt precursor til PFOS, mens 6:2 FTS kan transformeres til PFPeA og PFHxA (VMR 2022). Generelt vil transformation af precursorer betyde, at der dannes mere vandopløselige og persistente PFAA-forbindelser med lidt kortere fluorkulstofkæder end moderstoffet, dvs. at der dannes PFAS-forbindelser, som er mere mobile i grundvandet (VMR, 2022). I PFAS22 er der to precursorer og 20 PFCA/PFSA-forbindelser. Transformation af PFAS som tilhører gruppen fluortelomer alkoholer (FTOH) gennem abiotiske processer til PFOA og PFNA formodes at være en essentiel kilde til disse PFAS-forbindelser i miljøet (ITRC, 2022).

I Håndbogen om PFAS (VMR, 2022) er der lavet en vurdering af potentielle slutprodukter fra omdannelse af diverse precursorer.

Gruppe	Navn	Formel	Antal C i C-F-kæden	Potentielle "dead end" omdannelsesprodukter fra precursorer
Andre PFAS i sumkriteriet Precursorer	PFOSA	$C_8F_{17}SO_2NH_2$	8	PFOS
	6:2 FTS	$C_6F_{13}CH_2SO_3H$	6	PFPeA/PFHxA
FTOH'er Precursorer	6:2 FTOH	$C_6F_{13}CH_2OH$	6	PFBA/PFPeA/PFHxA
	8:2 FTOH	$C_8F_{17}CH_2OH$	8	PFOA
	10:2 FTOH	$C_{10}F_{19}CH_2OH$	10	PFDA
	14:2 FTOH	$C_{14}F_{21}CH_2OH$	14	PFTeDA
FTS Precursorer	4:2 FTS	$C_4F_9CH_2SO_3H$	4	PFBA
	8:2 FTS	$C_8F_{17}CH_2SO_3H$	8	PFOA
	10:2 FTS	$C_{10}F_{21}CH_2SO_3H$	10	PFDA
Sulfonamid/ Sulfonamid- ethanoler Precursorer	N-MeFOSA	$C_8F_{17}SO_2NH(CH_3)$	8	PFOS
	N-EtFOSA	$C_8F_{17}SO_2NH(C_2H_5)$	8	PFOS
	N-MeFOSE	$C_8F_{17}SO_2N(CH_3)CH_2OH$	8	PFOS
	N-EtFOSE	$C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)CH_2OH$	8	PFOS
	N-MeFOSAA	$C_8F_{17}SO_2N(CH_3)CH_2COOH$	8	PFOS
	N-EtFOSAA	$C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)CH_2COOH$	8	PFOS
Nye PFAS (Erstatter de tidligere anvendt) Precursorer	GenX / (HFPO-DA)	$C_8F_{17}OCH_2CF(COOH)CF_3$	3+2	Stabil?
	Adona	$CF_3OCH_2CF_2CH_2CF_2COOH$	1+6	Stabil ?
	F-53B / 9CL-PF3ONS	$CClF_2C_2F_5OCH_2CF_2SO_3H$	6+2	? PFBS
	F-53B / 11-Cl-PF3OUds	$CClF_2C_2F_5OCH_2CF_2SO_3H$	8+2	? PFBS
Sulfonamid-ethanoler Precursorer	FOSE	$C_8F_{17}SO_2N(H)CH_2OH$	8	PFOS
Fluoroether Precursorer	Fluoracrylat	$C_8F_{17}CH_2OCH_2CH=CH_2$	8	PFOA
FTCA'er Precursorer	5:3 FTCA	$C_5F_{11}CH_2COOH$	5	PFBA
	6:2 FTCA	$C_6F_{13}CH_2COOH$	6	PFPeA / PFHxA
	8:2 FTCA	$C_8F_{17}CH_2COOH$	8	PFHxA / PFHpA / PFOA /
	10:2 FTCA	$C_{10}F_{19}CH_2COOH$	10	PFDA
	8:2 FTUCA	$C_8F_{16}CH_2COOH$	8	PFHxA/ PFHpA / PFOA
DiPAP'er Precursorer	6:2 DiPAP	$[C_6F_{13}CH_2O]_2PO_2H$	6	PFHxA
	8:2 DiPAP	$[C_8F_{17}CH_2O]_2PO_2H$	8	PFOA
	6:2/8:2 Di P AP	$C_6F_{13}CH_2OCH_2PO_2HCH_2OCH_2C_8F_{17}$	6/8	PFHxA / PFOA
	DiSAmPAP	$[C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)CH_2O]_2PO_2H$	8	PFOS

Figur 2.7 Eksempler på omdannelsesprodukter fra kendte precursorer (Kilde, VMR, 2022)

2.3 HVAD BETYDER DISSE PARAMETRE FOR TRANSPORT/RISIKOVURDERING

Ift. risikovurderingen er der allerede i afsnit 1.3 taget hul på, hvilke koncentrationer i vandfasen, der skal til for, at risikofluxen overskrides, hvis den beregnede vertikale flux direkte omsættes til en horisontal flux i et grundvandsmagasin. I denne grove vurdering er der ikke taget højde for, at PFAS-forbindelserne dels har forskellige fysisk kemiske egenskaber, ligesom påvirkningen af dette på den tidsmæssige udvikling ikke er inddraget.

Ift. transportprocesserne i jord, er det særligt sorption, der spiller en rolle jf. tidligere afsnit. Ved lave koncentrationer af PFAS i jord/grundvand kan de normale fugacitets-betragtninger (fasefordeling) anvendes til at få et godt estimat på transporthastigheder og opholdstider for transporten. Dette spiller, som for alle andre kendte forureningskomponenter, en rolle i forhold til både risikovurdering og muligheder for afværge.

I de følgende afsnit belyses effekten af sorptionen på særligt transporthastighederne, og dennes indflydelse på risikovurderingen, når man kun har begrænsede informationer om forureningen med PFAS og dens sammensætning. Dette gælder særligt tilfældet, hvor man kun har informationer om indholdet i vandprøver fra dybereliggende magasiner.

Som et udtryk for en simpel konceptuel model er det antaget, at kilden til PFAS på renserier, ved metaloverfladebehandling mv. kan være knyttet til kloaksystemet og oplag på overfladen. Det vil sige, at PFAS er introduceret terrænnært. I det følgende ses på, hvilke konsekvenser det har for sammensætningen i et underliggende magasin og de tidsmæssige aspekter ved transporten af forskellige komponenter.

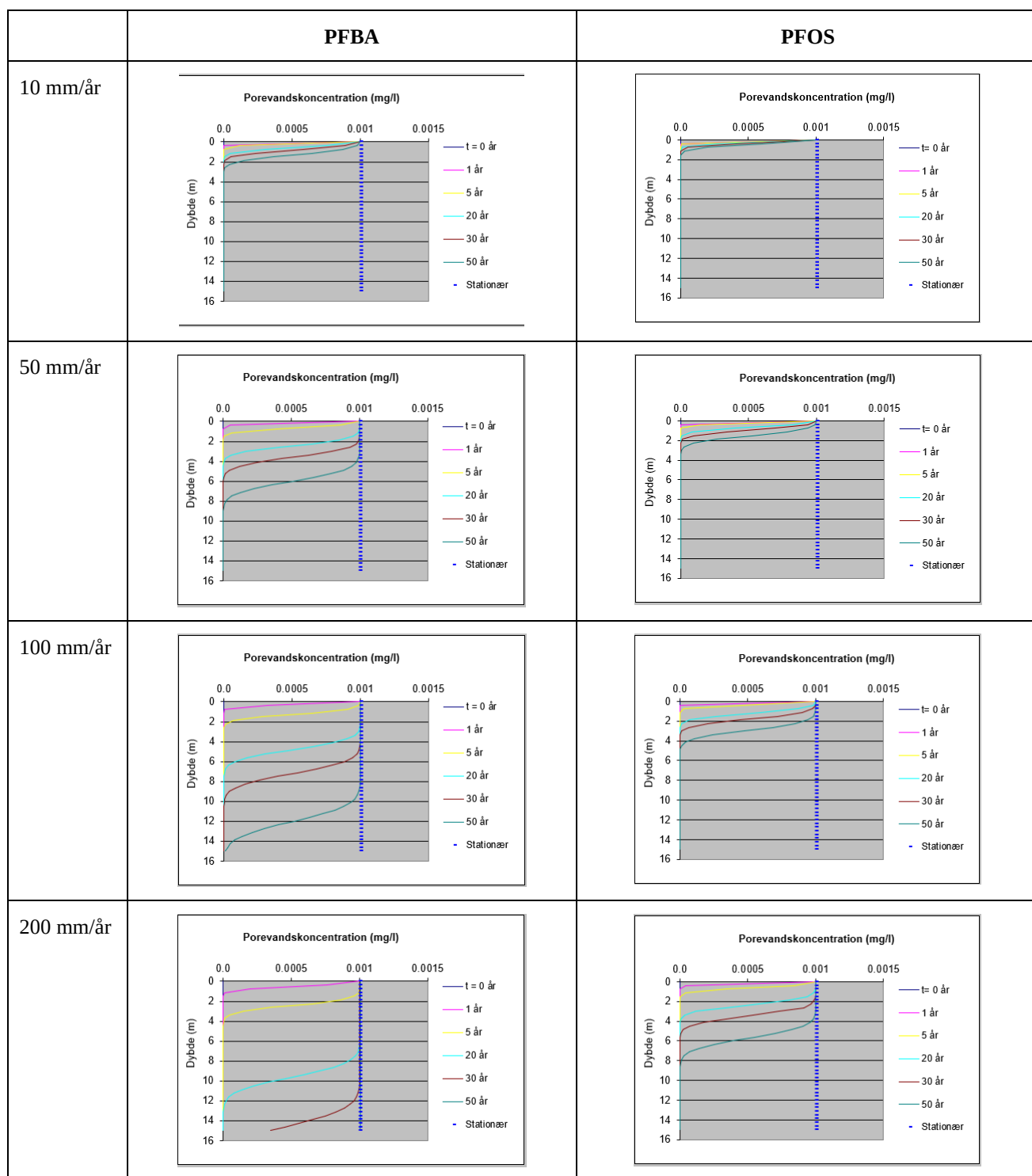
GENNEMBRUD TIL UNDERLIGGENDE MAGASIN

Som repræsentanter for hhv. de mere mobile og mindre mobile PFAS-forbindelser, er der udført regneeksempler på betydningen af infiltrationsraten på hastigheden for gennembrud af PFAS-forbindelserne PFBA og PFOS gennem en 15 m tyk umættet zone, som det ses en del steder i Nordsjælland.

Til evalueringen er anvendt det vertikale transportmodul i JAGG med standardværdier for ler med stempelstrømning (ikke sprækketransport), hvor illustrationerne er genereret fra. Der er udført beregninger af gennembrud for 10, 50, 100 og 200 mm/år, svarende til et spænd fra et helt befæstet areal til en fri ubefæstet overflade. Gennembrudskurver for PFBA og PFOS er vist i Figur 2.8. Figuren illustrerer, at selv for PFBA, vil en begrænset infiltration (50 mm/år eller mindre) betyde, at stoffet ikke når frem til det underliggende magasin indenfor en 50-årig periode. Først ved 100 mm/år eller højere infiltration ses et gennembrud gennem de 15 m dæklag og ved 200 mm/år er der fuldt gennembrud efter 50 år.

For PFOS gælder, at retardationen er så høj, at stoffet selv ved den højeste infiltration på 200 mm/år ikke vil være nået længere ned end til ca. 8 m u. t. og dermed langt fra være brudt igennem til det underliggende magasin.

Her opfører PFAS stofferne (og særligt de langkædede) sig markant anderledes end de chlorerede forbindelser, selv for et stof som PCE, der har noget retardation, idet spredning i gasfasen for PFOS er negligibel, hvilket i kombination med en lidt højere K_d -værdi giver den langsomme transport gennem umættet zone. Konsekvensen af dette vil være, at det ikke er sikkert at give en risikovurdering alene ud fra målinger i dybereliggende lag, idet der kan være stoffer på vej gennem jordmatricen, der endnu ikke er nået frem til stedet for prøveudtagningen.



Figur 2.8 Gennembrudskurver for PFBA og PFOS gennem 15 m umættet zone med JAGGs standardparametre og en startkoncentration på 1000 ng/l (1µg/l)

BETYDNING AF KD-VÆRDIER

Som tidligere anført er det særligt K_d værdierne, der er styrende for transporthastigheden og forskellen, der kan observeres i ankomsttidspunktet for stofferne i forskellige dybder eller afstande fra kilden. K_d værdierne fremkommer generelt for organisk apolære stoffer som et produkt af det organiske indhold i jorden, multipliceret med den normerede organiske fordelingskoefficient K_{OC} ($K_d = f_{OC} * K_{OC}$). Denne koefficient bestemmes typisk ved forsøg, hvor en række jorde/sedimenter testes i batchforsøg, og hvor sammenhørende værdier af koncentration i vandfasen og jorden bestemmes sammen med det organiske indhold af jorden. Ud fra disse data kan K_{OC} for de indgående jordtyper så estimeres. Værdierne man opnår, varierer med jordtyper (type og mængde af det naturlige indhold af organisk kulstof), koncentrationsniveauer anvendt i forsøgene, indholdet af lerpartikler, pH i suspensionen mm. De anvendte værdier skal derfor altid tages med et forbehold og anvendes med omtanke i forhold til, hvilken sammenhæng, man anvender værdierne i. Optimalt set vil lokalspecifikke målinger af K_d være at foretrække og give størst sikkerhed, men det er yderst sjældent at dette er muligt. Man må derfor normalt anvende generelle data og evt. finde data for jordtyper, der minder om det, der skal risikovurderes i mht. sammensætning af ler/sand, organisk indhold og pH.

Jensen et al., (2023) har samlet en del værdier af K_{OC} for en række jordtyper (ikke kun muldjord) ifm. vurdering af udvaskning fra landbrugsjord efter der er udbredt slam fra spildevandsrens anlæg. I rapporten gøres der opmærksom på, at studiet ikke er udtømmende, men der er dog taget flere kilder med og relativt mange forskellige jordtyper. Værdierne er efterfølgende anvendt til modellering af udvaskning og opstilling af kriterier for indhold i slammet.

I Tabel 2.5 er vist fraktiler af log K_{OC} for PFOA og PFOS fra Jensen et al. (2023) og standardværdien i JAGG.

Tabel 2.5 Litteraturværdier af log K_{OC} fra Jensen et al. 2023. N angiver antallet af forskellige jordtyper. N angiver antal værdier.

Forbindelse	pH (N)	10% Fraktil	50% Fraktil	90% Fraktil	JAGG værdi
PFOS	> 2,8 (N=83)	2,84	3,60	4,80	2,95
PFOS	≥ 6,0 (N=30)	2,80	2,98	3,66	
PFOA	> 2,8 (N=74)	1,77	2,30	3,00	2,22
PFOA	≥ 6,0 (N=22)	1,75	2,24	2,99	

Som det ses af tabellen, er den anvendte værdi for log K_{OC} i JAGG relativt tæt på 50% fraktilen, fundet af Jensen et al. 2023, når de mest sure jorde ikke anvendes til fastlægning af log K_{OC} . Sure jorde giver generelt højere log K_{OC} , hvilket skyldes, at flere af PFAS-forbindelser er syrer af natur, der kan fraspalte en H^+ ion og dermed blive negativt ladede og mere polære ved højere pH. Generelt gælder, at jo mere polært en forbindelse er, desto dårligere vil denne sorbere til jordens kulstof.

Betydningen af valget af log K_{OC} er forsøgt illustreret i Tabel 2-6. Her er vist dels K_{OC} og dels retardationen² R af PFOA og PFOS for de forskellige fraktiler fundet for jordene med pH ≥ 6,0.

²Retardationsfaktor (R), der er enhedsløs, udtrykker den faktor hvormed stoffet forsinkes i forhold til det vand det transporteres af; f.eks. betyder en retardationsfaktor på 2, at det tager stoffet dobbelt så lang tid som porevandet at tilbagelægge en given afstand.

Tabel 2.6 Beregnende K_{OC} og retardation © for en jord med $f_{OC} = 0,1\%$ OC (fx smeltevandssand).

FORBINDELSE	10% FRAKTIL	50% FRAKTIL	90% FRAKTIL	FAKTORFORSKEL 90% VS.10%
PFOS – K_{OC}	631	955	4571	7,2
PFOS – Retardation	4,2	5,8	23,9	5,7
PFOA – K_{OC}	56	174	977	17,4
PFOA – Retardation	1,3	1,9	5,9	4,6

Som det ses af tabellen, er der en forskel på en faktor 5 i strømningshastigheden for både PFOS og PFOA afhængig af om man bruger 10% fraktilen eller 90% fraktilen af de eksperimentelt bestemte $\log K_{OC}$ med den anvendte f_{OC} på 0,1%. Øges indholdet af f_{OC} i jorden til 1%, svarende til en øvre fyldhorisont eller lignende, bliver retardationen væsentlig større og for på hastigheden mellem de to fraktiler mere end en størrelsesorden. Dette illustrerer, at man både skal have et godt bud på det organiske stofindhold i jorden, man laver risikovurdering på, ligesom det ikke er uvæsentligt, hvilken værdi af $\log K_{OC}$ man anvender.

3 DATATENDENSER I REGIONERNES UNDERSØGELSER

3.1 BESKRIVELSE AF DATASÆTTET

De 5 danske regioner har undersøgt for PFAS i forbindelse med forureningsundersøgelser siden 2014/2015. For de fleste undersøgelser har lokalisering af PFAS-forurening ikke været det primære formål med undersøgelsen, men der er undersøgt for PFAS-forbindelser, hvis der har været en PFAS-brancher på den konkrete lokalitet. Der er tale om 1451 lokaliteter, hvoraf 608 ligger i Region Hovedstaden. En oversigt over antal lokaliteter per region kan ses i Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Oversigt over antal undersøgte lokaliteter i databasen pr. region

Region	Antal lokaliteter med vandprøver	Antal lokaliteter med jordprøver
Hovedstaden	608	38
Midtjylland	278	38
Syddanmark	288	14
Sjælland	103	11
Nordjylland	174	5
I ALT	1451	119

Alle regionernes data bliver indrapporteret i GEOGIS. I dette projekt er der anvendt data, leveret af alle fem regioner frem til januar 2023. Data er leveret fra de enkelte regioner som .csv filer.

Der er foretaget en opdeling af brancher i forhold, hvorvidt de kan have håndteret PFAS jf. liste fra regionerne fra april 2022 som er udarbejdet af de fem regioner og VMR. Data er samlet og organiseret i en Access-database, så hver lokalitet kun forekommer én gang indenfor samme branche, uafhængigt af evt. flere driftsperioder. I denne organisering er alle branchekoder relateret til lossepladser og fyldpladser lagt sammen. Fra Access-databasen er der udtrukket en række datasæt, der er indlæst i Power BI³ og anvendt til visualisering af data i Power BI og i Excel. De indlæste datasæt samt datavisualiseringer kan ses i Power BI rapporten (Bilag 6). De visualiseringer, der er lavet i Excel er vedlagt som bilag (Bilag 4 og 5). I Bilag 1 beskrives datahåndteringen i flere detaljer.

Brancherne er yderligere grupperet ved indlæsning i Power BI. Som tommelfingerregel efter branchehovedgruppe, men nogle brancher er dog ikke trukket ind under hovedgruppen, da indsigt i forholdene omkring brancheundergruppen har været ønsket, f.eks. 28.51 Overfladebehandling af metal og 17.51 Tæppefabrikker. Grupperingen i branchegrupper kan ses i Bilag 2 ("Brancheliste_grupperede.xlsx"). Databasen indeholder data fra ca. 1451 lokaliteter, bestående af 11.632 prøver og 223.474 analyseresultater for op til 37 PFAS forbindelser.

Som det ses af

Tabel 3.2 er der stor forskel på mængden af data for de enkelte branchegrupper. Der er dermed også forskel på kvaliteten af de statistiske estimater, der præsenteres i dette kapitel.

³ Power BI er en samlet, skalerbar platform til selvbetjening og virksomhedsrelateret business intelligence (BI) som gør det nemt at visualisere data. Det er et standardprodukt fra Microsoft.

Tabel 3.2 Antal analyseresultater, prøver og lokaliteter for alle branchegrupper for prøver taget i hhv. grundvand og jord.

Branchegruppe	VAND			JORD		
	Antal analyseresultater	Antal prøver	Antal lokaliteter	Antal analyseresultater	Antal prøver	Antal lokaliteter
17 Tekstilindustri	5957	294	40	1074	45	4
17.51 Tæppefabrikker	1127	59	8	54	2	1
18 Beklædningsindustri	243	9	2			
19 Læder- og skoindustri	1780	88	15			
20 Træindustri	4332	227	44			
21 Papir- og papindustri	974	39	6	173	4	1
22 Trykkerier	8163	416	78	1172	41	4
24 Kemisk industri	12492	558	53			
24.3 Fremstilling af maling, lak mv.	2269	126	21	64	4	1
25 Gummi- og plastindustri	6459	352	62	490	25	4
26 Cement og beton	2845	146	17	588	24	1
27 Metalfremstilling	5650	249	31			
28 Jern- og metalvareindustri	17916	921	144	1957	82	8
28.51 Overfladebehandling af metal	19004	955	125	1795	86	10
29 Maskinindustri	30575	1611	254	2047	99	14
31 Elektronik, fremstilling	6104	323	48	360	16	3
35 Fremstilling af fly, skibe og både	4626	187	20	1134	42	1
36 Møbelindustri	8953	478	102	1607	88	8
40 El-, gas- og varmforsyning	1872	83	14	270	7	2
45 Elinstallation	139	8	3			
50 Autolakering og undervogsbeh.	11713	631	106	2660	143	8
62 Lufttransport	484	18	2	1134	42	1
63.22.10 Erhvervshavne	453	16	2			
63.23 Lufthavne mv.	10709	722	5	1296	48	2
74.81.20 Fotolaboratorier	54	2	1			
75.22 Forsvar	9857	462	25	10391	395	10
75.25 Brandvæsen og redningskorps	16737	779	45	16197	663	33
90.01 Spildevand	72	4	2	200	11	2
90.0X Losseplads	61103	3185	385	7542	379	24
92.62.20 Lystbådehavne	564	27	3			
93.01 Vaskerier og renserier	3390	175	23	484	28	3
93.01.30 Renserier	23296	1111	153	980	47	5

3.1.1 FLERE BRANCHER PER LOKALITET

Der kan være flere brancher, knyttet til én lokalitet. Det betyder, at én prøve med tilhørende analyseresultater kan optræde f.eks. tre gange i datasættet under tre forskellige brancher.

Denne datastruktur giver den udfordring, at lokaliteter som har mange prøver og/eller meget høje koncentrationer, vil skævvride billedet for tilknyttede brancher, der ikke nødvendigvis er drivende for PFAS-forureningen på lokaliteten. Dette er især problematisk, hvis lokaliteten bidrager med mange analysedata i det samlede datasæt.

Et eksempel er Københavns Lufthavn (lok. Nr. 185-00011). Lokaliteten er registreret med følgende brancher: 63.23 Lufthavne mv. samt 93.01.30 Renserier. De meget høje PFAS-koncentrationer, forårsaget af aktiviteter knyttet til branche aktiviteter ved lufthavnen medtages derfor også for renseriet, selvom aktiviteter i forbindelse med renseriet på lokaliteten ikke vurderes som den drivende for PFAS forureningen.

For at undgå fejlkonklusioner er der foretaget følgende:

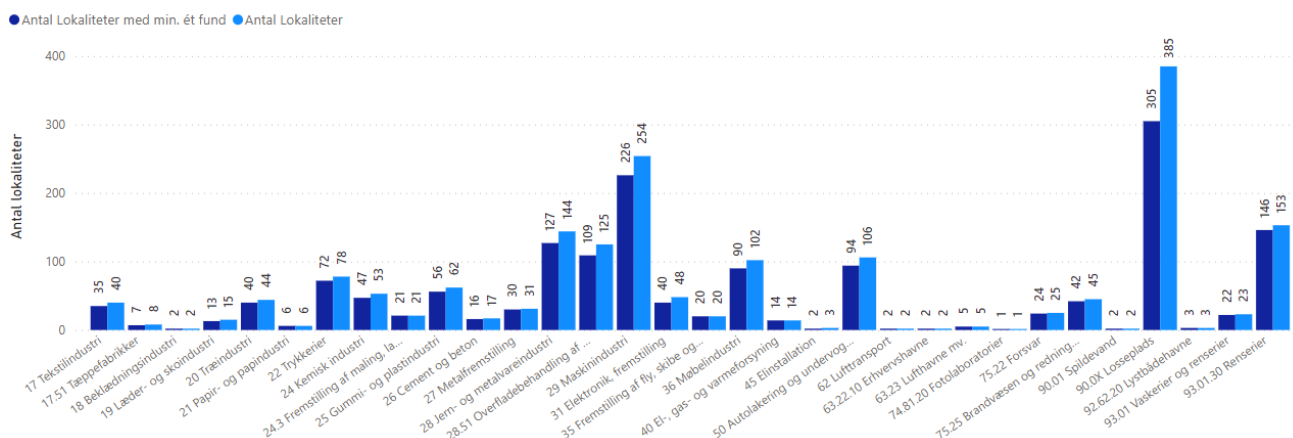
1. For alle brancher er der manuelt tjekket de 5 lokaliteter med de højeste maksimale koncentrationer (enkeltforbindelse) eller dem med maksimale koncentrationer >100 ng/l, hvis der er få lokaliteter i branchen.
2. Derefter er der foretaget en vurdering af, hvilken af de registrerede brancher, der er drivende for PFAS-forureningen på lokaliteten. Det har kun været muligt at foretage denne vurdering for én lokalitet, Københavns Lufthavn (185-00011). Her er lokaliteten fjernet fra branchen "Renserier". For de øvrige lokaliteter er der foretaget en analyse af datasættet med og uden lokaliteter, hvor antallet af prøver udgør mere end 10% af det samlede antal, for på den måde at undgå, at bestemte lokaliteter styrer koncentrationsfordelingen. Kun for to brancher er der frasorteret lokaliteter. Én lokalitet under branchen 28.51 Overfladebehandling af metal og to lokaliteter tilhørende branchen 24 Kemisk industri.
3. For analyser af det samlede datasæt, hvor der ikke skelnes til specifikke brancher, optræder hver lokalitet kun én gang.

3.2 DATATENDENSER

3.2.1 HIT-RATE

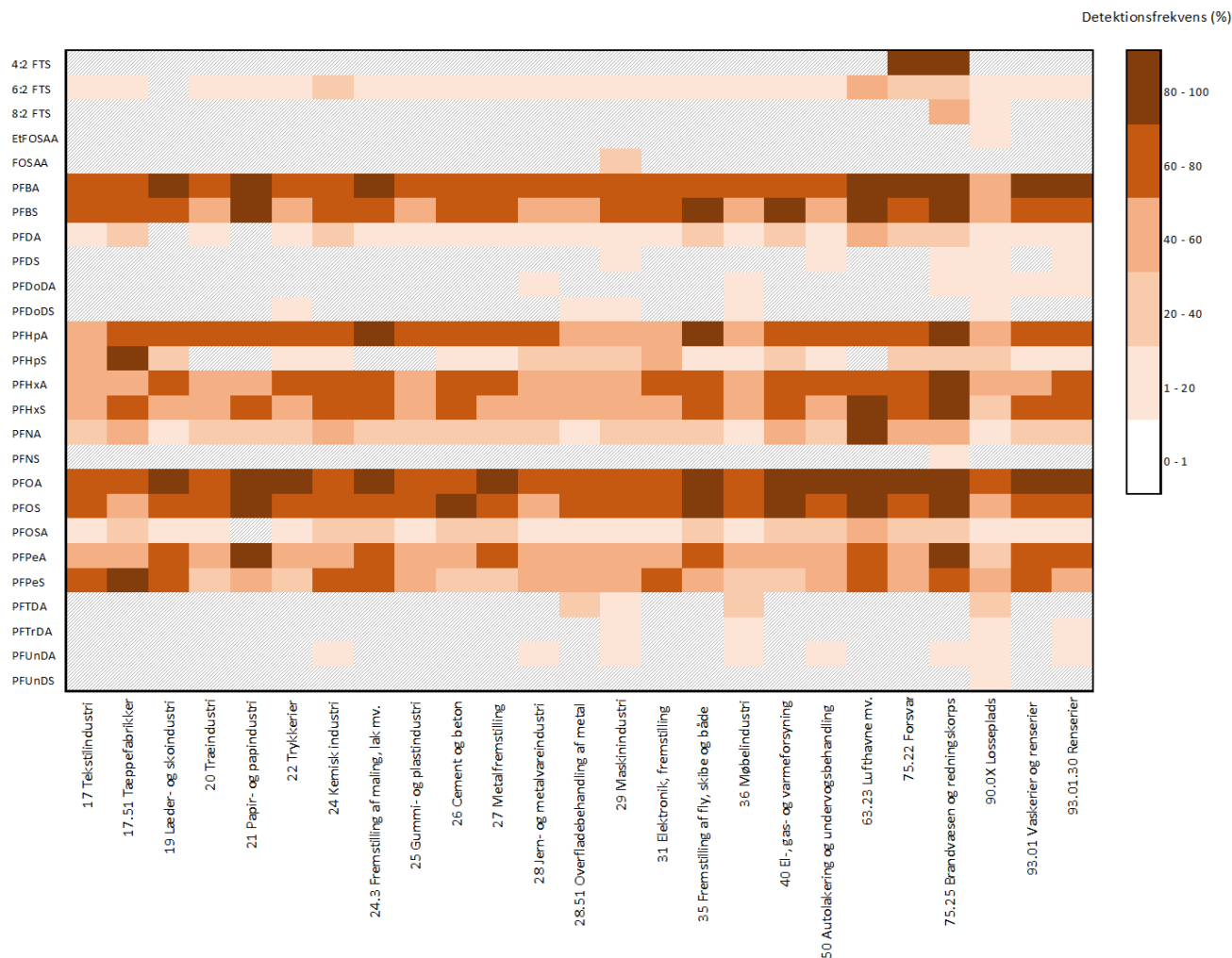
Figur 3.1 viser antal undersøgte lokaliteter pr. branche og antal lokaliteter med minimum ét påvist analyseresultat for PFAS. Det giver et hurtigt overblik over på hvilke brancher, der foreligger mange datapunkter. Hitraten for PFAS-fund på undersøgte lokaliteter ligger mellem 66-100% for de enkelte brancher med en gennemsnitlige hitrate på 93%.

De 10 brancher med flest prøver er (antal prøver):
 90.0X Losseplads (3185)
 29 Maskinindustri (1611)
 93.01.30 Renserier (1111)
 28.51 Overfladebehandling af metal (955)
 28 Jern- og metalvareindustri (921)
 75.25 Brandvæsen og redningskorps (779)
 63.23 Lufthavne mv. (722)
 50 Autolakering og undervognsbehandling (631)
 24 Kemisk industri (558)
 36 Møbelindustri (478)



Figur 3.1 Antal af undersøgte lokaliteter for hver branche og antal af undersøgte lokaliteter med minimum ét fund.

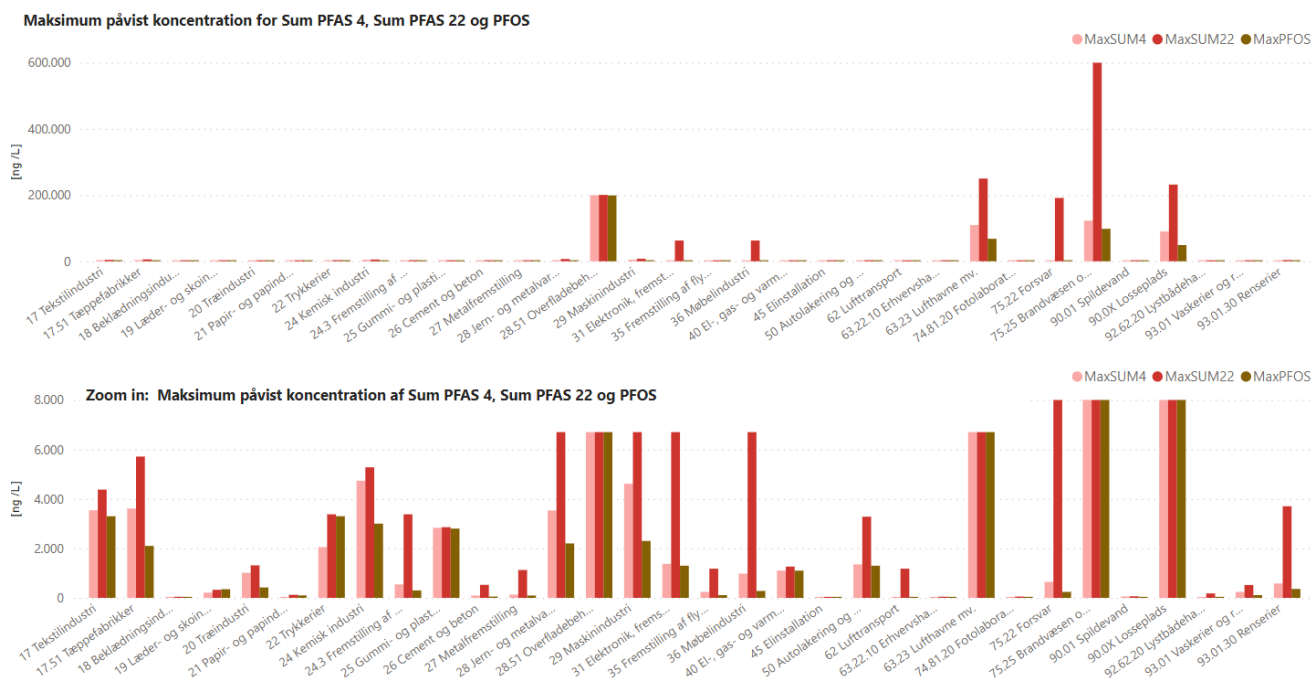
På Figur 3.2 ses detektionsfrekvensen for enkeltforbindelser for hver branche. Frekvensen er beregnet som antal lokaliteter med påviste prøver for en enkeltforbindelse relativt til antal lokaliteter, der er prøvetaget per enkeltforbindelse. Kun brancher med mere end 5 undersøgte lokaliteter er medtaget. Det ses bl.a., at PFOA og PFBA påvises på over 60% af de undersøgte lokaliteter, uanset branche. Datagrundlaget (antal lokaliteter) for beregningen kan ses i Bilag 6, side 15b. Tilsvarende detektionsfrekvens for enkeltforbindelser beregnet for specifikke PFAS-analyser, kan ses i Bilag 3 (samt Bilag 6).



Figur 3.2 Detektionsfrekvens per branche for enkeltforbindelser (per lokalitet) for brancher med 5 eller flere lokaliteter. Grå/skraverede felter betyder "ingen påviste". Se Bilag 6, side 15b for datagrundlaget (antal lokaliteter) for beregningen.

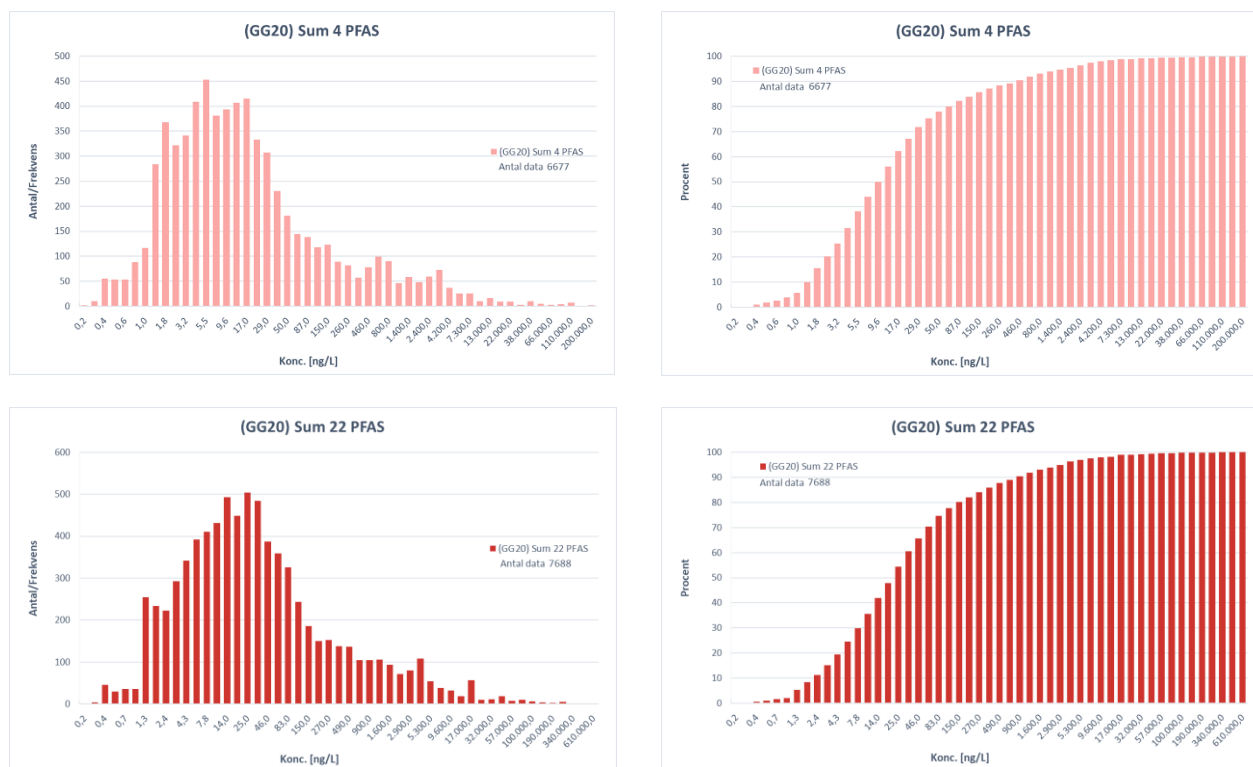
3.2.2 KONCENTRATIONSNIVEAUER PFAS4 OG PFAS22

Som det tydeligt fremgår af Figur 3.3, er de højeste koncentrationer af PFAS påvist ved brancherne 75.22 Forsvar, 75.25 Brandvæsen og Redningskorps, 63.23 Lufthavne, hvilket alle sammen er brancher, der relaterer sig til brandøvelser. Desuden er der påvist høje niveauer (>200.000 ng/l) på en lokalitet tilhørende 28.51 Overfladebehandling af metal (herunder forkromning) og på en lokalitet tilhørende 90.0X Lossepladser.



Figur 3.3 Niveauer for den maksimale påviste koncentration i hver branche. Nederst vises samme graf hvor y-aksen er skåret ved 8.000 ng/l.

Kigger man på fordelingen af de påviste koncentrationer på tværs af hele datasættet (Figur 3.4), ses det af sumkurven, at 50% af prøverne for PFAS4 ligger under 9,6 ng/l, 80% ligger under 66 ng/l og 95% fraktilen har en værdi under 1400 ng/l. Tilsvarende ligger 50%, 80% og 95% fraktilen for sum af PFAS22 på hhv. 25, 150 og 2.900 ng/l.



Figur 3.4 Fordeling af fund for PFAS4 og PFAS22 i hele datasættet. Her optræder hver lokalitet kun én gang uafhængigt om den kan være tilknyttet flere brancher.

3.2.3 FINGERPRINTING PR. BRANCHE

Der er foretaget en analyse af den typiske sammensætning i prøver fra hver branche for at se, hvordan sammensætningen af PFAS-forbindelser er, også kaldet "fingerprinting", i forskellige brancher. Ældre data fra før 2021 kan indeholde prøver, hvor der er analyseret for 12 eller 15 enkeltforbindelser og ikke de 22 forbindelser, der er i den nuværende analysepakke. Dette kan påvirke resultaterne, men hovedparten af analyserne indeholder analyse for 22 PFAS-forbindelser.

For nogle brancher er der så få lokaliteter, at det beregnede fingerprint er behæftet med stor usikkerhed, og derfor ikke kan tillægges stor vægt (se nederst i Figur 3.5, hvor mange lokaliteter fingerprinting er baseret på). Desuden vises kun de 15 forbindelser med højest koncentration, da PFAS-forbindelser med lavere koncentrationer ikke ses at påvirke fordelingen.

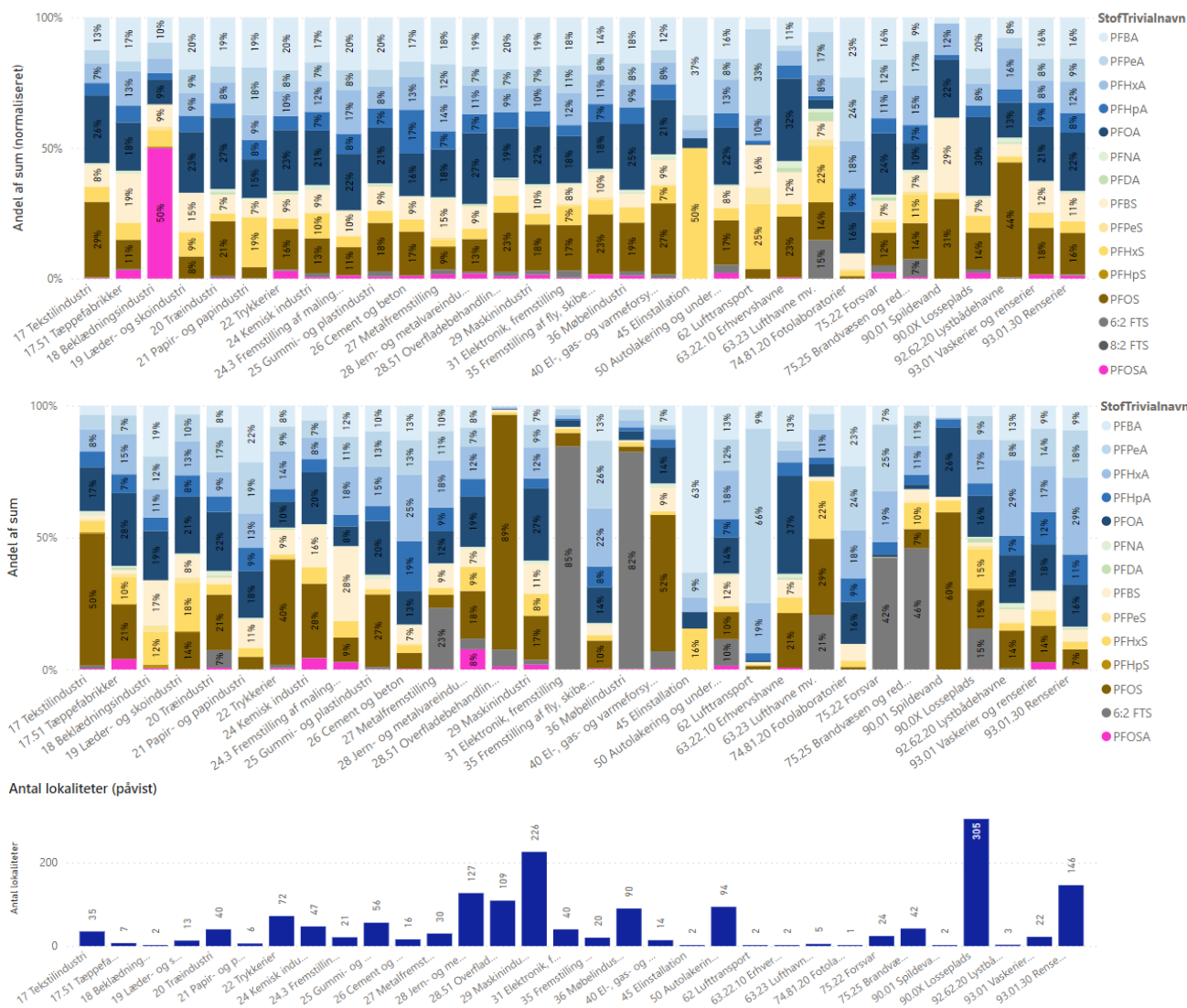
Analysen er foretaget på to forskellige måder:

- 1 I Figur 3.5 øverst er koncentrationerne i vandprøver normaliseret pr. lokalitet, så en fordeling af enkeltforbindelser er beregnet pr. lokalitet. Derefter er disse fordelinger midlet per branche⁴. Dermed vægtes lokaliteter med høje og lave koncentrationer lige i illustrationen.
- 2 I Figur 3.5 nederst vises en oversigt over stofsammensætningen i alle vandprøver for hver branche, hvor andelen af enkeltforbindelse i den samlede sum er opgjort for den samlede mængde af prøver. Dermed vil prøver med høje koncentrationer og lokaliteter med mange prøver dominere sammensætningen.

Ved sammenligning af Figur 3.5 øverst og nederst ses det, at for enkelte brancher (f.eks. 28.51 Overfladebehandling af metal, 75.22 Forsvar, mfl.) er der stor forskel mellem de to fingerprint analyser. Det anbefales, at man i disse brancher anvender worst-case fingerprint, ved informationsniveau C (se afsnit 4 for en definition af informationsniveauerne).

Det skal bemærkes, at nogle lokaliteter kan være tilknyttet flere brancher, hvorfor prøver derfra vil optræde i alle tilknyttede brancher. Som det fremgår af Figur 3.5 er PFOS og PFOA nogle af de mest påviste PFAS-forbindelser på tværs af alle brancher, hvor de tilsammen udgør 20-40% af de påviste PFAS-forbindelser. For brancher, der knytter sig til brandslukningsskum, er billedet noget anderledes med en større andel af andre PFAS-forbindelser. Helt overordnet er det carboxylsyrerne, der dominerer vandprøvesammensætningen, hvilket stemmer godt overens med deres større mobilitet.

⁴ Den totale koncentration pr lokalitet er udregnet på baggrund af summen af enkeltforbindelser (summen af analyseresultater pr lokalitet, men uden summer), dernæst er andelen af hvert stof udregnet. Fordelingen af PFAS-forbindelser pr lokalitet er derefter midlet for at få en fordeling (et "fingerprint") per branche, hvor lave koncentrationer er vægtes ens med høje koncentrationer.

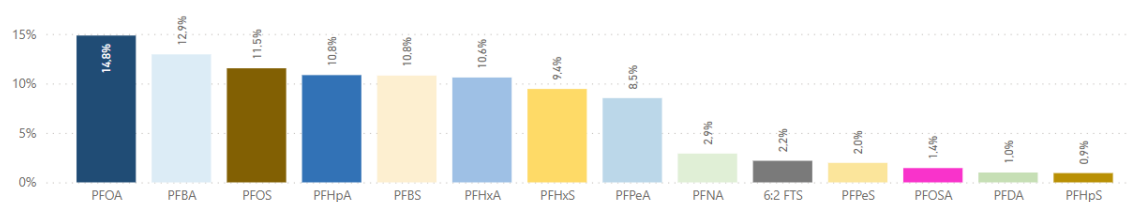


Figur 3.5 Øverst: Fingerprntning pr. branche normaliseret for koncentrationsniveauet for hver enkelt lokalitet. Hver søjle viser den gennemsnitlige andel af specifikke PFAS stoffer i vandprøverne fra de specifikke brancher. **Nederst: Fingerprntning pr. branche baseret på andel af enkeltforbindelse i den samlede sum for hver branche.** Samt antal lokaliteter med påviste fund. Andelen af et givent enkeltforbindelse i en branche kan også ses i Bilag 6 side 3 og 4, ved at holde musen over visualiseringen og aflæse tallet i parentes.

3.2.4 HYPPIGHED AF ENKELTFORBINDELSER

Udover ovenstående fingerprintning-analyser er der lavet en opgørelse for, hvor hyppigt de enkelte forbindelser påvises hhv. i hele datasættet (Figur 3.6) og i hver branche.

Hyppigst påviste PFAS-forbindelser

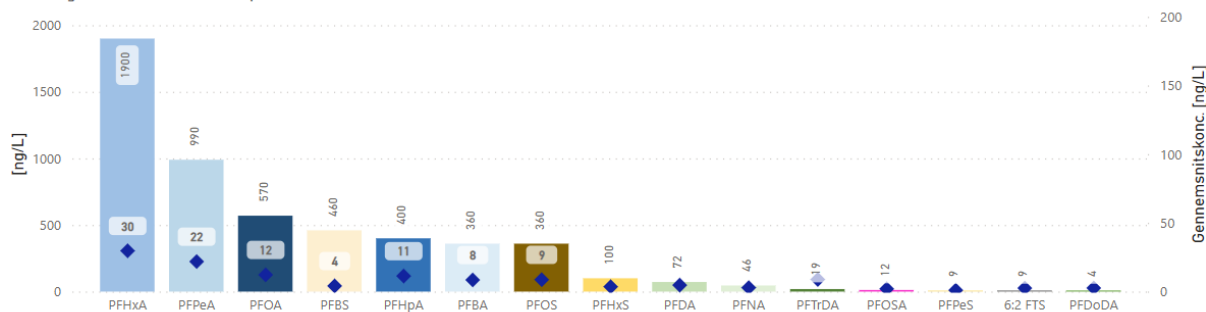


Figur 3.6 Forekomst af enkeltforbindelser i vandprøver i hele datasættet

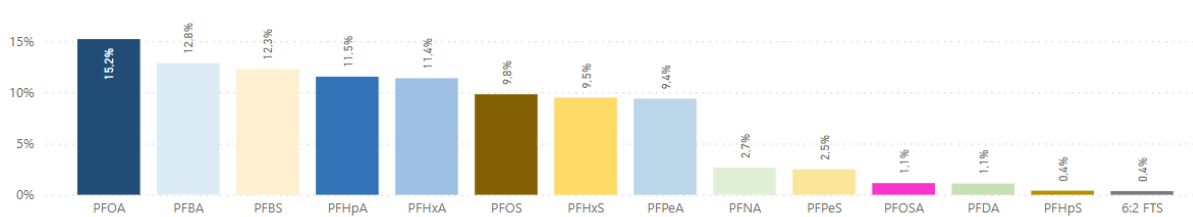
Som det fremgår af Figur 3.6 er PFOA, PFBA, PFOS, PFHpA, PFBS, PFHxA, PFHxS og PFPeA de hyppigst påviste PFAS-forbindelser i datasættet med en relativ forekomst på 14,8-8,5%.

Figurer med brancher kan ses i Bilag 3 og i Power BI (Bilag 6, side 2). I Figur 3.7 - Figur 3.11 er udvalgte brancher vist. Koncentrationsniveauer samt lokalitetsnumre kan også ses i Power BI (Bilag 6, side 2) ved at holde musen over visualiseringen. Som det fremgår af figurene, er det ofte 1-4 lokaliteter med høje koncentrationsniveauer, som adskiller sig fra resten. For at undgå af få, stærkt forurenede lokaliteter påvirker opfattelsen af det gennemsnitlige forureningsniveau i en branche, er der i det videre arbejde brugt koncentrationsfordelinger, som vist på histogrammer.

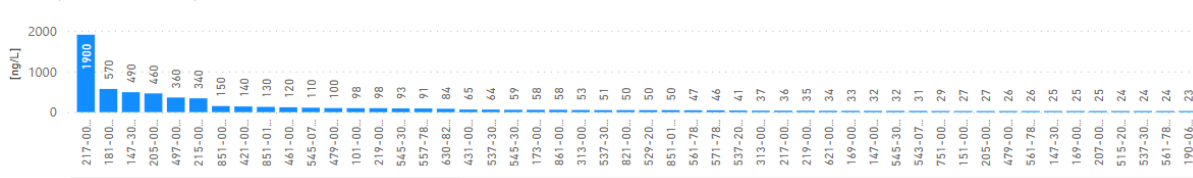
Maks. og middel koncentration per stof



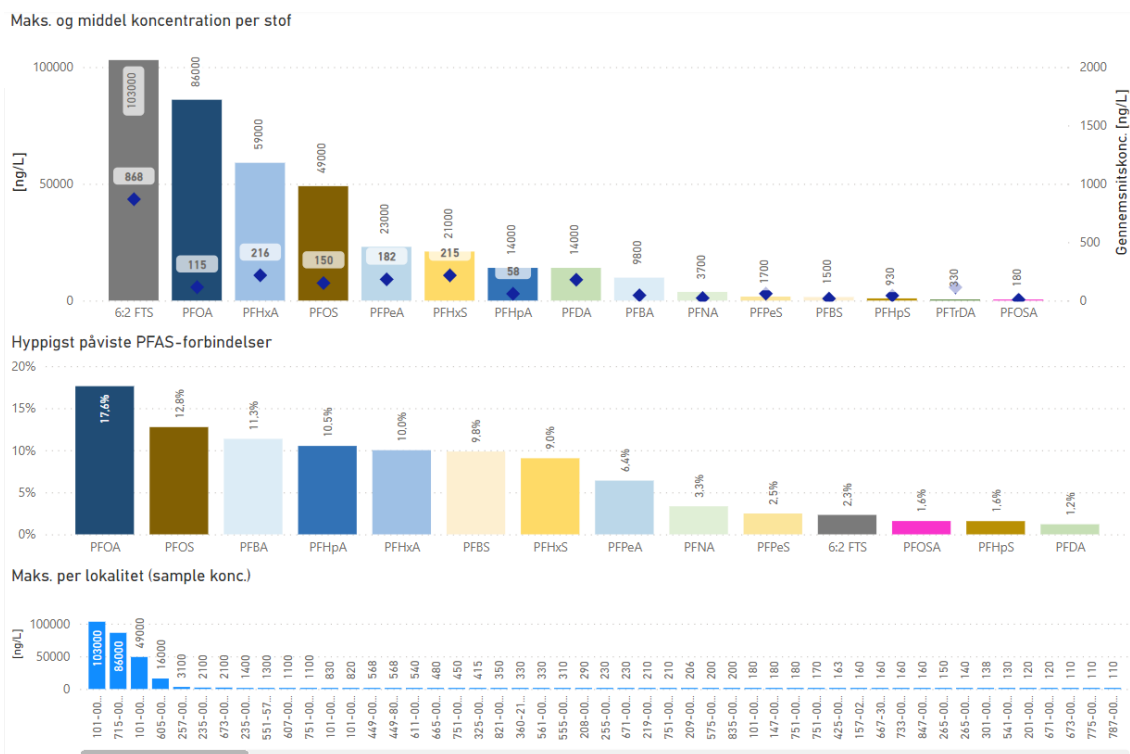
Hyppigst påviste PFAS-forbindelser



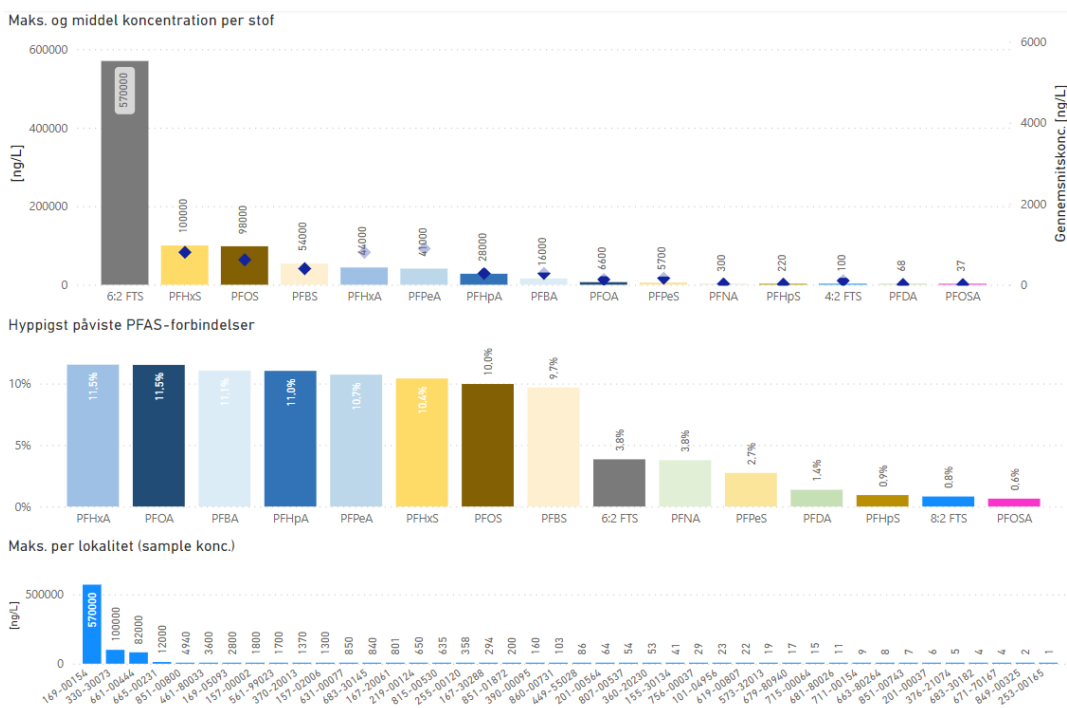
Maks. per lokalitet (sample konc.)



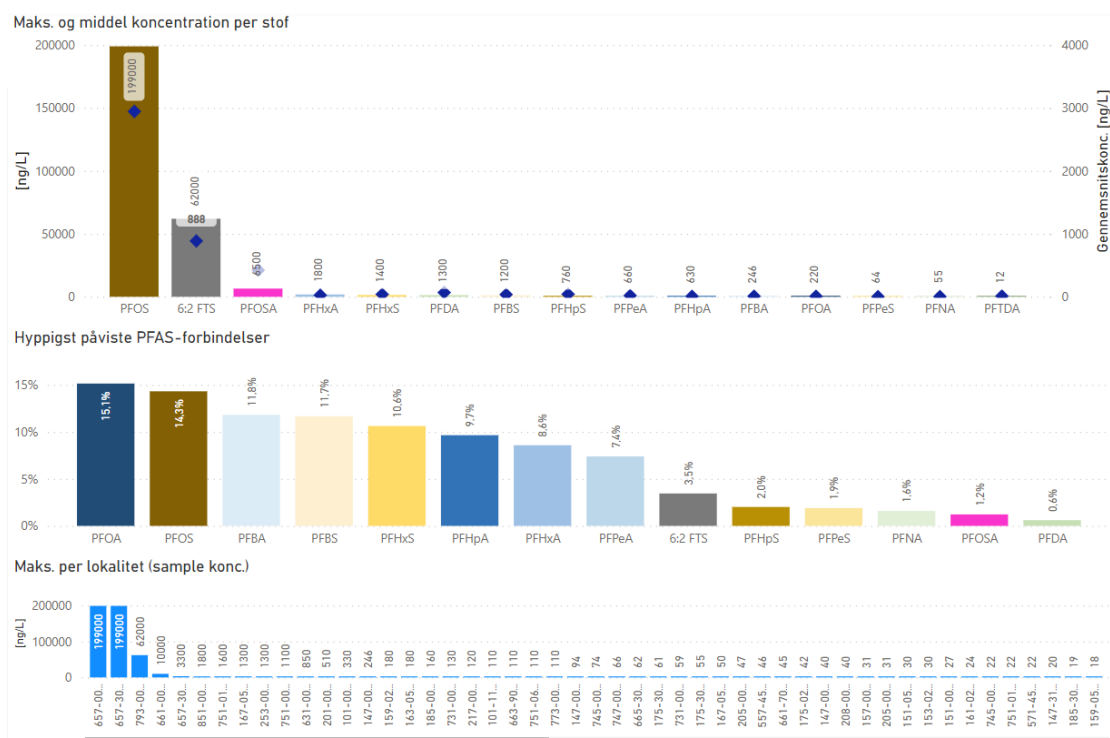
Figur 3.7 Renserier. Forekomst af enkeltforbindelser og deres maks. og gennemsnitskoncentration (diamanten, aflæses på akse til højre) pr. forbindelse. Nederst angives maks. koncentration af enkeltforbindelse pr. lokalitet, hvilket illustrerer, hvordan få lokaliteter kan påvirke de gennemsnitlige niveauer. Det bemærkes, at lokalitet nr. (185-00011) tilknyttet Københavns Lufthavn er udtaget af datasættet.



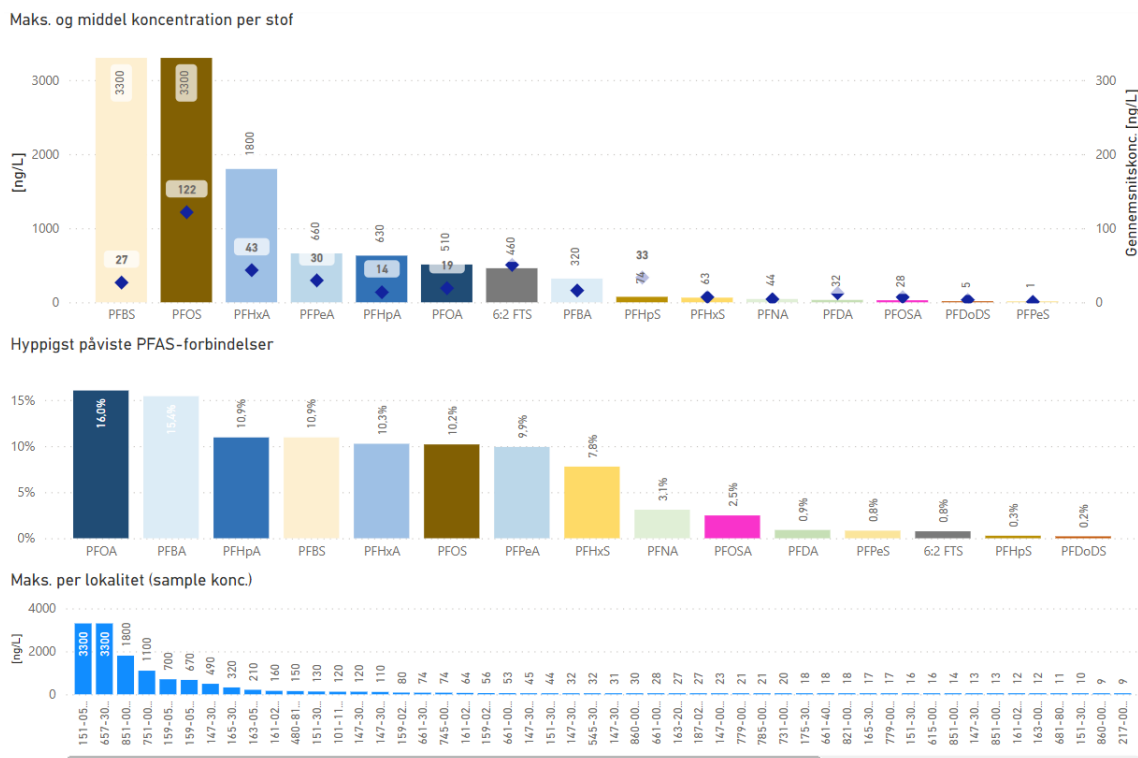
Figur 3.8 Lossepladser. Forekomst af enkeltforbindelser og deres maks. og gennemsnitskoncentration (diamanten, aflæses på akse til højre) pr. forbindelse. Nederst angives maks. koncentration af enkeltforbindelse pr. lokalitet, hvilket illustrerer, hvordan få lokaliteter kan påvirke de gennemsnitlige niveauer.



Figur 3.9 Brandvæsen og redningskorps. Forekomst af enkeltforbindelser og deres maks. og gennemsnitskoncentration (diamanten, aflæses på akse til højre) pr. forbindelse. Nederst angives maks. koncentration af enkeltforbindelse pr. lokalitet, hvilket illustrerer, hvordan få lokaliteter kan påvirke de gennemsnitlige niveauer.



Figur 3.10 Overfladebehandling af metal. Forekomst af enkeltforbindelser og deres maks. og gennemsnitskoncentration (diamanten, aflæses på akse til højre) pr. forbindelse. Nederst angives maks. koncentration af enkeltforbindelse pr. lokalitet, hvilket illustrerer, hvordan få lokaliteter kan påvirke de gennemsnitlige niveauer.



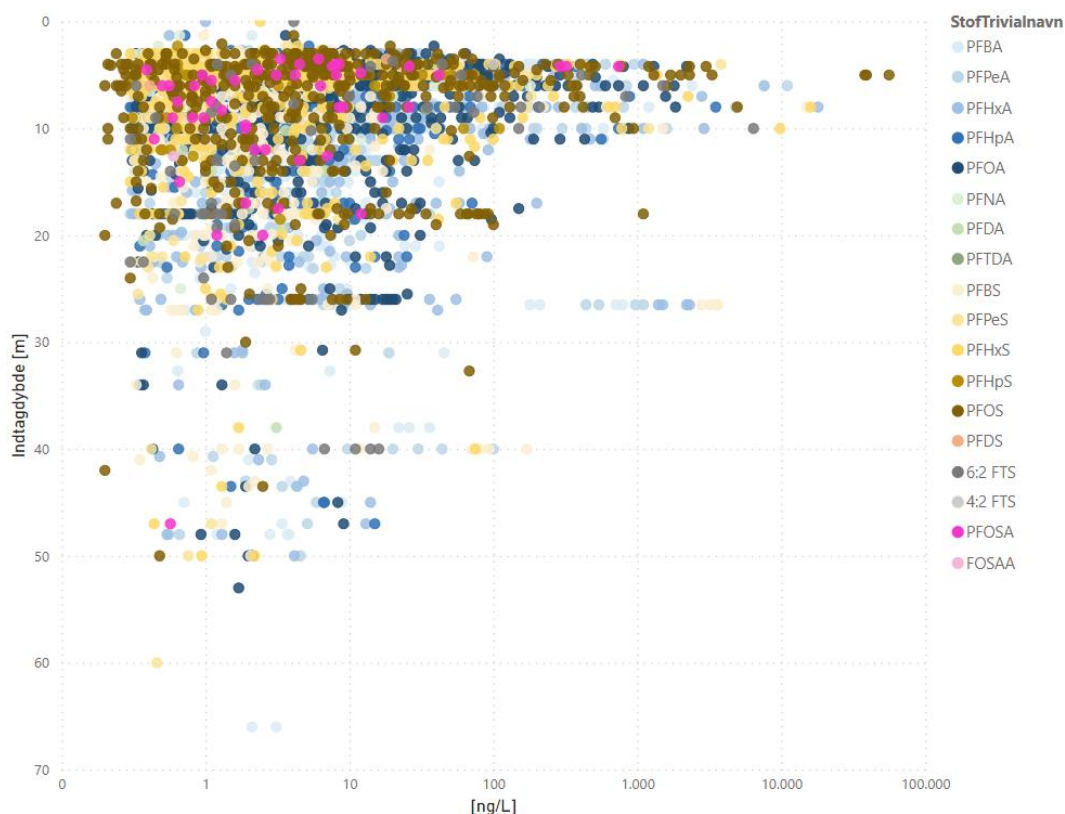
Figur 3.11 Trykkerier. Forekomst af enkeltforbindelser samt deres maks. og gennemsnitlige koncentration (diamanten, aflæses på akse til højre) pr. forbindelse. Nederst angives maks. koncentration pr. lokalitet, hvilket illustrerer, hvordan få lokaliteter kan påvirke de gennemsnitlige niveauer.

3.2.5 TENDENSER VEDR. PFAS-FORBINDELSER OG DYBDE

Analysen af datasættet har bekræftet forventningen om, at de kortkædede PFAS-forbindelser findes i større dybder, mens analyserne mere terrænært domineres af mere langkædede forbindelser, såsom PFOS og PFOA. Figur 3.12 viser en oversigt over alle vandprøver med angivelse af dybde for udtagning samt koncentrationsniveau. Figur 3.13 viser hvilken forbindelse, der er konstateret i det dybeste indtag for hver enkelt lokalitet. Hermed kan man se, hvordan de mest mobile forbindelser PFBS og PFBA er nogle af dem, der oftest træffes i de dybere indtag. Der er dog undtagelser, tilknyttet enkelte lokaliteter, f.eks. fund af 6:2 FTS i 40 m u.t. Der er selvfølgelig en sammenstilling af data fra mange forskellige lokaliteter og geologier, men den overordnede tendens er tydelig.



Figur 3.12 Koncentration og tilhørende dybde for vandprøver i hele datasættet, grupperet efter carboxylsyrer (venstre) og sulfonsyrerne (højre), med kortkædede øverst og langkædede nederst. PFAS-forbindelser er sorteret i legenden efter kædelængde, undtagen precursorerne til sulfonsyrerne.



Figur 3.13 Koncentration af enkeltforbindelse i det dybeste filter pr. lokalitet i hele datasættet.

3.3 KONCENTRATIONSFORDELING AF PFAS FOR UDVALGTE BRANCHER

Der er foretaget en analyse af det tilgængelige datasæt for at illustrere den forventede koncentrationsfordeling pr. branche. Der er også skelnet til, hvordan koncentrationsfordelingen er i forskellige dybder. I de nedenstående afsnit er der beskrevet koncentrationsfordeling for 2 udvalgte brancher, 93.01.30 Renseri og 28.51 Overfladebehandling af metal. Brancherne er udvalgt for at give nogle eksempler fra nogle af de brancher, hvor der foreligger resultater fra mange lokaliteter⁵.

Koncentrationsfordelinger giver indblik i de forventede niveauer, som kan bruges til at sandsynliggøre risikovurderingen for konkrete brancher jf. retningslinjer i kapitel 4. I de få brancher, hvor der foreligger jordprøver, er disse også inkluderet.

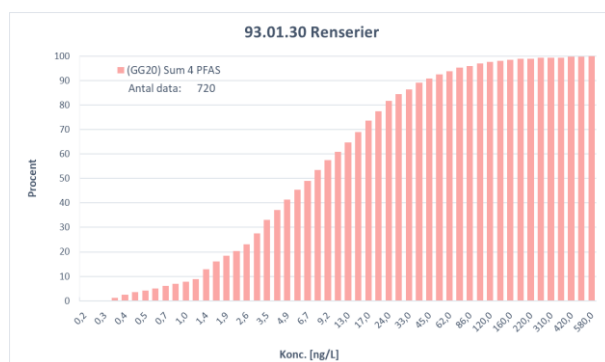
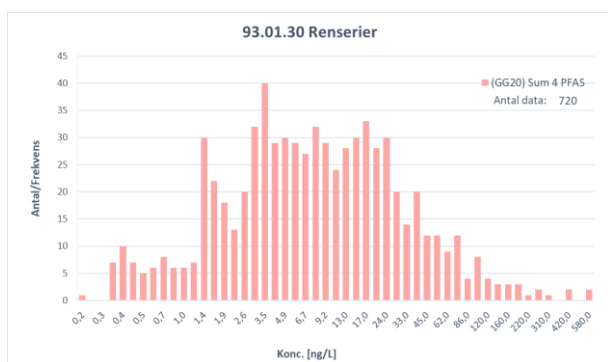
Grafer for alle brancher er vedlagt i bilag 4. Analysen er lavet for de brancher, hvor der var en vis datamængde (antal undersøgte lokaliteter > 50 stk.)

I denne analyse, var der kun 3 lokaliteter, der måtte udelukkes fra datasættet. Det drejede sig om 2 lokaliteter med branchen 24 Kemisk industri og en lokalitet med branchen 28.51 Overfladebehandling af metal. For disse to brancher er analysen foretaget både med og uden de nævnte lokaliteter.

⁵ Der er i regionernes datasæt meget få data fra brandøvelsespladsen, da hovedparten af brandøvelsespladser undersøges af andre myndigheder.

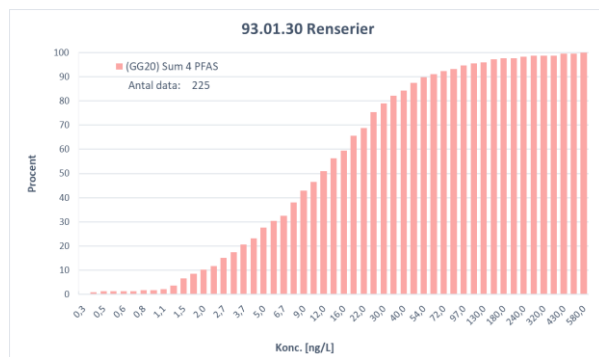
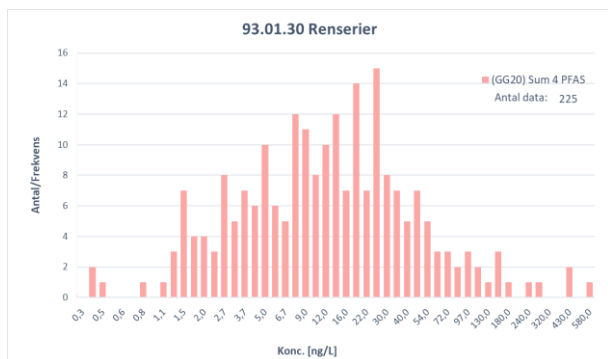
3.3.1 KONCENTRATIONSFORDELING FOR RENSERIER

På Figur 3.14 er fordelingen af PFAS4 i samtlige vandprøver fra branchen 93.01.30 Rensерier illustreret. Ser man på fordelingen af de påviste koncentrationer på tværs af hele datasættet for vandprøver, udtaget på renserier fremgår det, at 50% af prøverne for PFAS4 ligger under 8 ng/l, 80% ligger under 24 ng/l og 95% fraktilen har en værdi under 73 ng/l. Tilsvarende ligger 50%, 80% og 95% fraktilen for vandprøver, udtaget 0-5 m u.t. lidt højere, nemlig på 13, 33 og 120 ng/l.



Alle datapunkter

Alle datapunkter

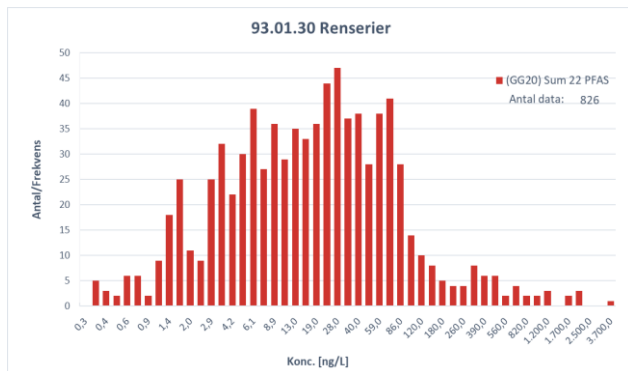


Datapunkter 0-5 m u.t.

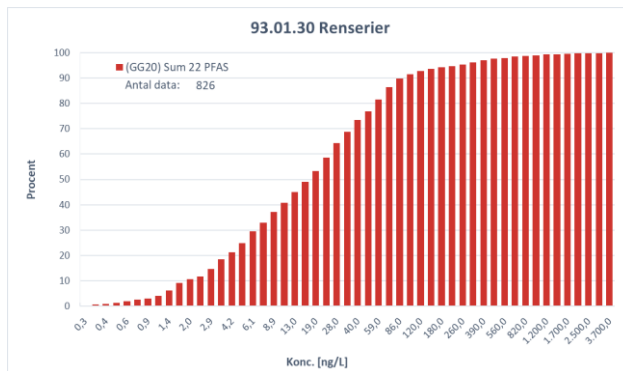
Datapunkter 0-5 m u.t.

Figur 3.14 Histogrammer for sum af PFAS4 i vandprøver fra renserier. Bemærk at x-aksen er logaritmisk.

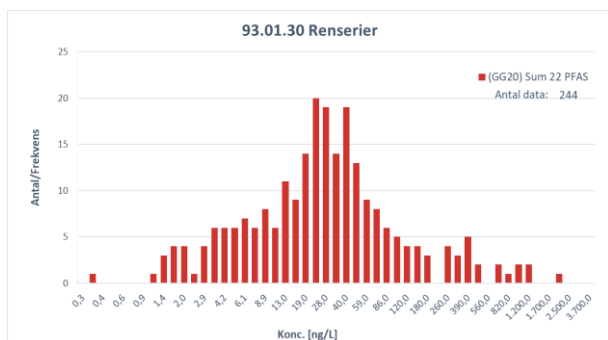
Tilsvarende figurer for PFAS22 er vist i Figur 3.15. Ser man på fordelingen af de påviste koncentrationer på tværs af hele datasættet for vandprøver, udtaget ved renserier ser man, at 50% af prøverne for PFAS22 ligger under 19 ng/l, 80% ligger under 59 ng/l og 95% fraktilen har en værdi under 260 ng/l. Tilsvarende ligger 50%, 80% og 95% fraktilen for vandprøver, udtaget 0-5 m u.t. lidt højere, nemlig i ca. 28, 71 og 390 ng/l.



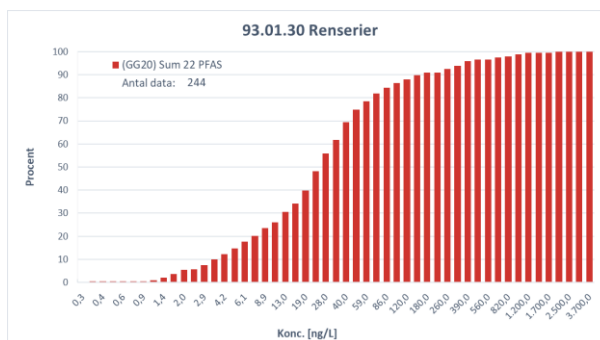
Alle datapunkter



Alle datapunkter



Datapunkter 0-5 m u.t.

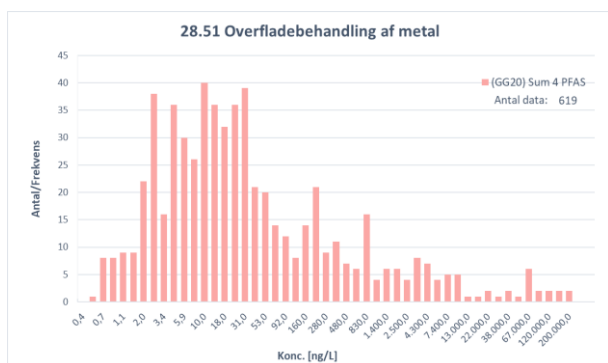


Datapunkter 0-5 m u.t.

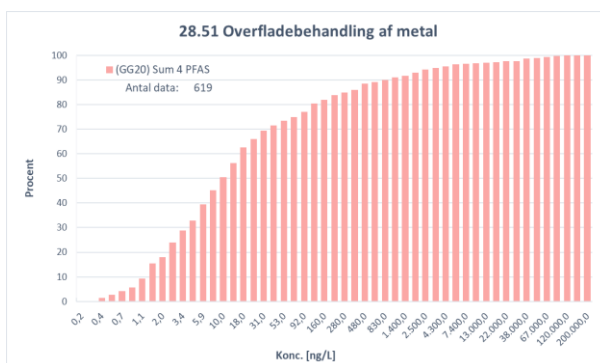
Figur 3.15 Histogrammer for sum af PFAS22 i vandprøver fra renserier. Bemærk at x-aksen er logaritmisk.

3.3.2 KONCENTRATIONSFORDELING FOR OVERFLADEBEHANDLING AF METAL

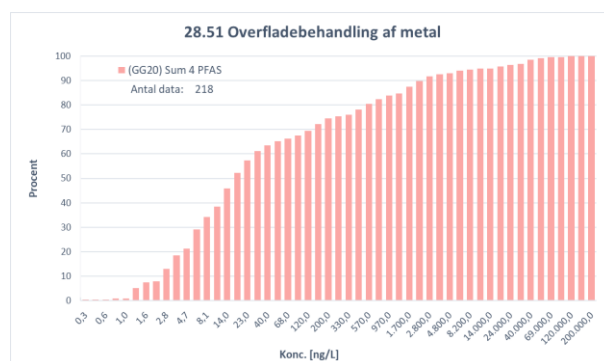
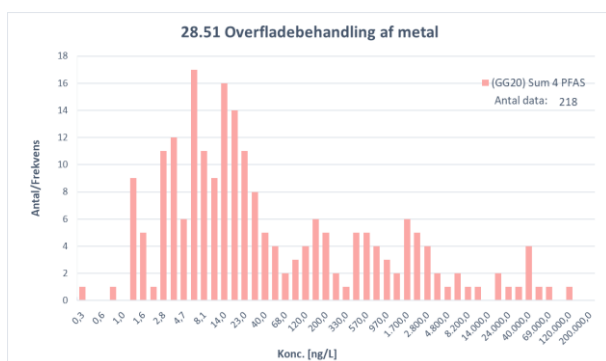
For branchen 28.51 Overfladebehandling af metal, er koncentrationsfordelingen højere end på renserier, idet PFAS og især PFOS har været anvendt i stort omfang i forbindelse med forkromning (se afsnit 2.1). Ser man på fordelingen af de påviste koncentrationer for vandprøver, udtaget ved denne branche, fremgår det, at 50% af prøverne for PFAS4 ligger under 10 ng/l, 80% ligger under 120 ng/l og 95% fraktilen har en værdi helt op til 4300 ng/l. Tilsvarende ligger 50%, 80% og 95% fraktilen for vandprøver udtaget 0-5 m u.t. lidt højere, nemlig i 18, 630 og 17.000 ng/l.



Alle datapunkter



Alle datapunkter

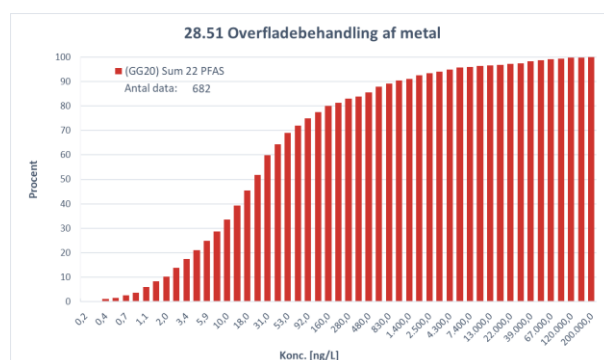
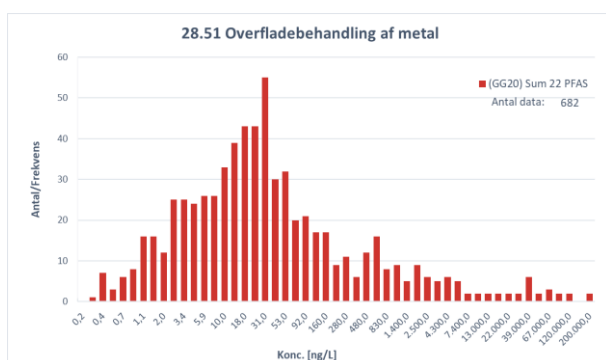


Datapunkter 0-5 m u.t.

Datapunkter 0-5 m u.t.

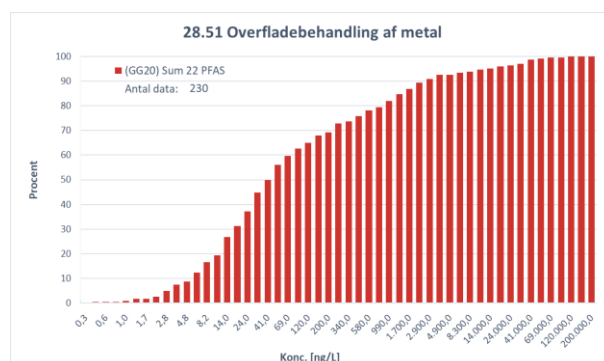
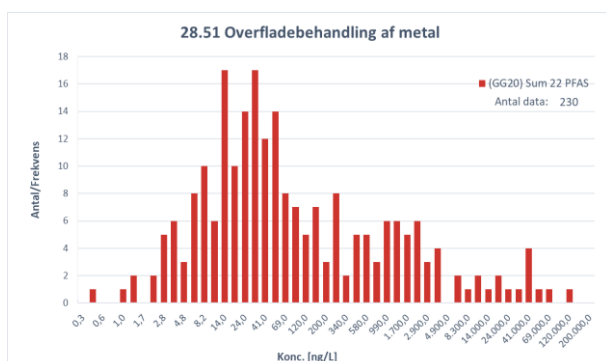
Figur 3.16 Histogrammer for sum af PFAS4 i vandprøver fra overfladebehandling af metal. Bemærk at x-aksen er logaritmisk.

Tilsvarende figurer for sum af 22 PFAS er vist i Figur 3.17. Kigger man på fordelingen af de påviste koncentrationer på tværs af hele datasættet for vandprøver udtaget ved overfladebehandling af metal ser man, at 50% af prøverne for PFAS22 ligger under 23 ng/l, 80% ligger under 160 ng/l og 95% fraktilen har en værdi under 4300 ng/l. Tilsvarende ligger 50%, 80% og 95% fraktilen for vandprøver udtaget 0-5 m u.t. lidt højere, nemlig i ca. 53, 1100 og 17.000 ng/l



Alle datapunkter

Alle datapunkter

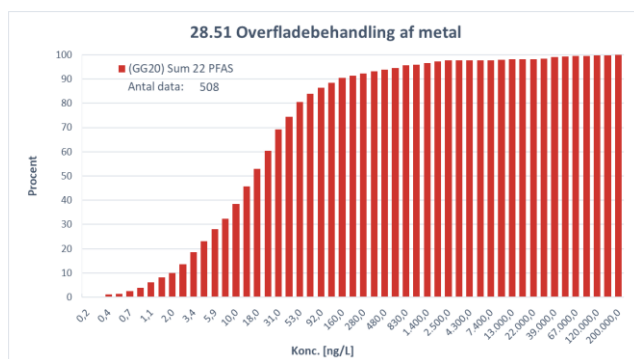
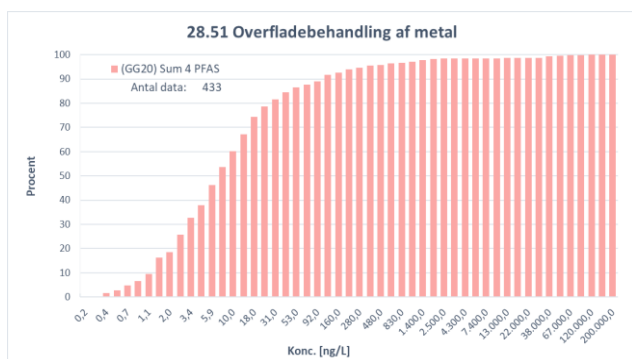


Datapunkter 0-5 m u.t.

Datapunkter 0-5 m u.t.

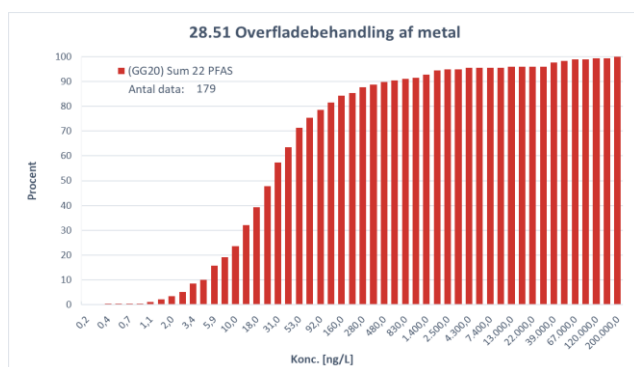
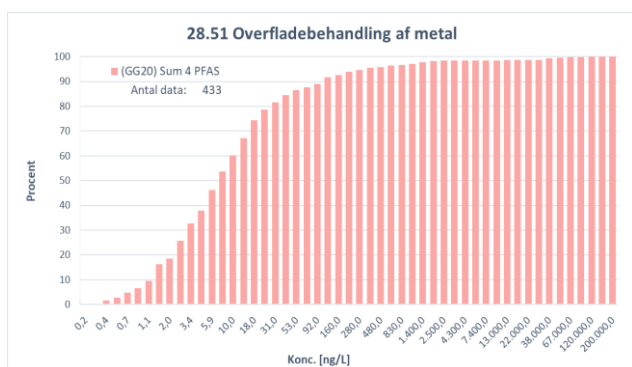
Figur 3.17 Histogrammer for sum af PFAS22– i vandprøver fra overfladebehandling af metal. Bemærk at x-aksen er logaritmisk.

I branchen 28.51 Overfladebehandling af metal er der en enkelt lokalitet, hvor antallet af prøver udgør 21% af det samlede datasæt. For at undersøge påvirkningen af denne lokalitet, er ovenstående dataanalyse gentaget, hvor prøverne fra den konkrete lokalitet er fratrasket datasættet. Resultaterne er vist nedenfor. Som det fremgår, er der ikke nogen væsentlig forskel i de gennemsnitlige niveauer, men det fremgår, at der for 50% fraktilen for PFAS4 er en forskydning mod markant lavere værdier, når denne lokalitet udtages af datasættet.



Alle datapunkter

Alle datapunkter



Datapunkter 0-5 m u.t.

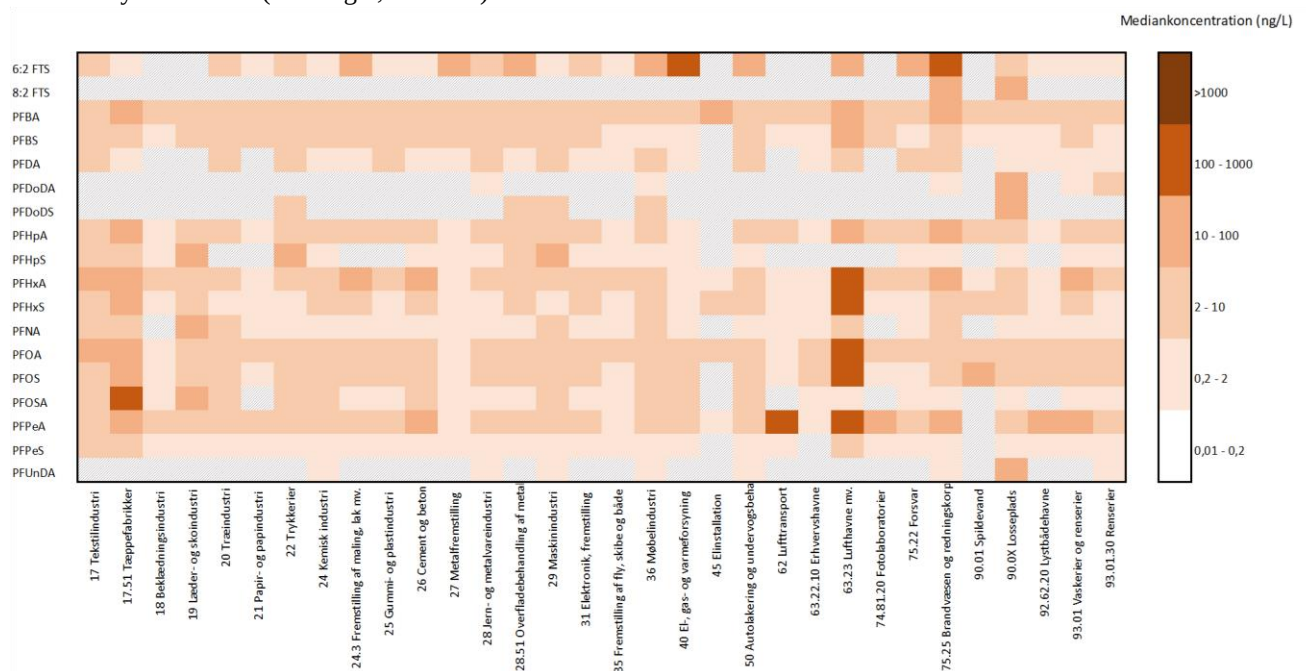
Datapunkter 0-5 m u.t.

Figur 3.18 Sumkurver for PFAS4 og PFAS22 for Overfladebehandling af metal, hvor den lokalitet med det største antal prøver er ekskluderet fra datasættet.

3.4 MEDIANKONCENTRATIONER FOR ENKELTFORBINDELSER PER BRANCHE (HEAT MAP)

Mediankoncentrationen (ng/l) for enkeltforbindelser per branche er vist i Figur 3.19. De bagvedliggende værdier samt datagrundlaget for beregningen (antal prøver) kan ses i Bilag 6, hhv. side 13 og 13b. Det fremgår, at mediankoncentrationerne er høje for især 63.23 Lufthavne mv., med mediankoncentrationer over 100 ng/l for PFHxA, PFHxS, PFOA, PFOS og PFPeA. Det skal igen bemærkes, at der er stor forskel på datagrundlaget for de forskellige brancher, hvor f.eks. mediankoncentrationen for 6:2 FTS for branchen 40 El-, gas- og varmforsyning er beregnet ud fra

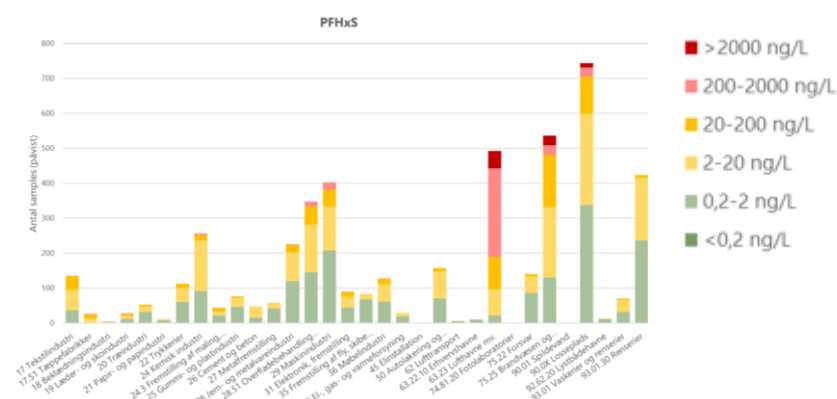
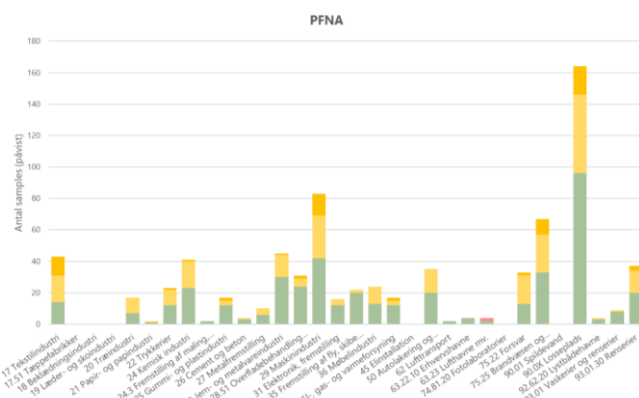
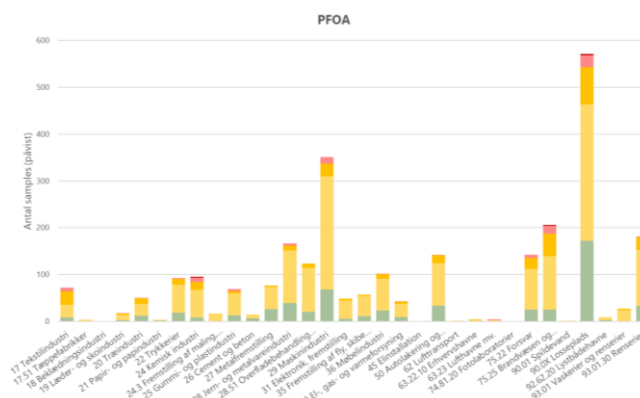
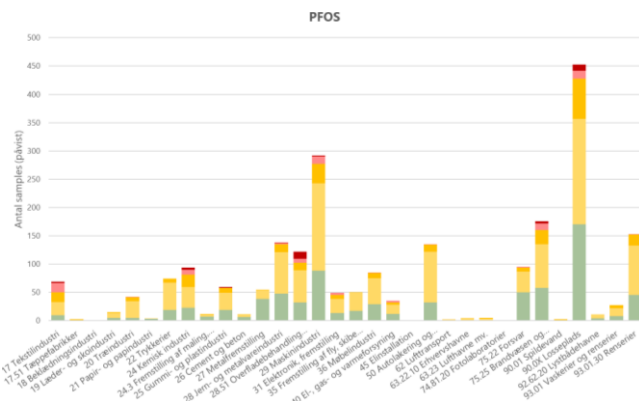
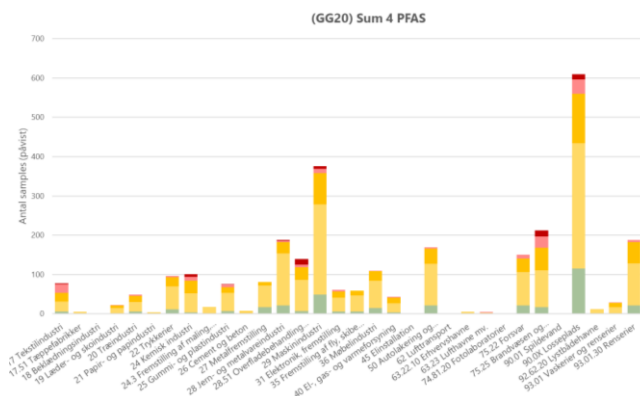
kun 3 analyseresultater (se Bilag 6, side 13b).



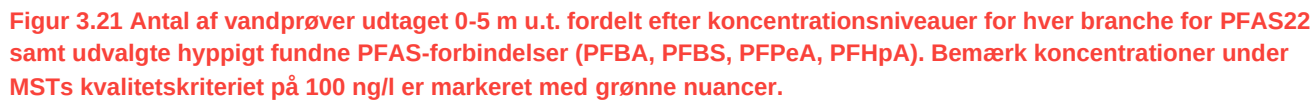
Figur 3.19 Mediankoncentrationen (ng/l) for enkeltforbindelser per branche. Kun enkeltforbindelser med over 10 påviste prøver i alt er medtaget. Koncentrationsintervaller for enkeltforbindelse over alle brancher i forskellige dybder

For de PFAS-forbindelser, der påvises hyppigst i datasættet, er der udført en dataanalyse af, hvilke koncentrationsniveauer, der træffes i terrænnære vandprøver 0-5 m u.t., idet disse må formodes at repræsentere kildestyrken. Illustration af koncentrationsniveauer for udvalgte PFAS-forbindelser samt PFAS4 og PFAS22 for de enkelte brancher kan ses i Figur 3.20 og Figur 3.21 samt i Bilag 5.

Koncentrationsfordelingen for den enkelte forbindelse per branche kan bruges til enten at regne på et teoretisk worst-case scenarie på en given lokalitet, som ikke er velundersøgt, eller til at sammenligne de fundne niveauer med datasættet for en tilsvarende branche, og dermed vurdere om der er tale om en ”typisk” eller en stærkt forurenede lokalitet, som bør undersøges nærmere. Det henvises til det kapitel 4 for tilgangen til risikovurdering. Tilsvarende grafer for sum PFAS22 samt udvalgte PFAS-forbindelser er vedlagt i Bilag 5.



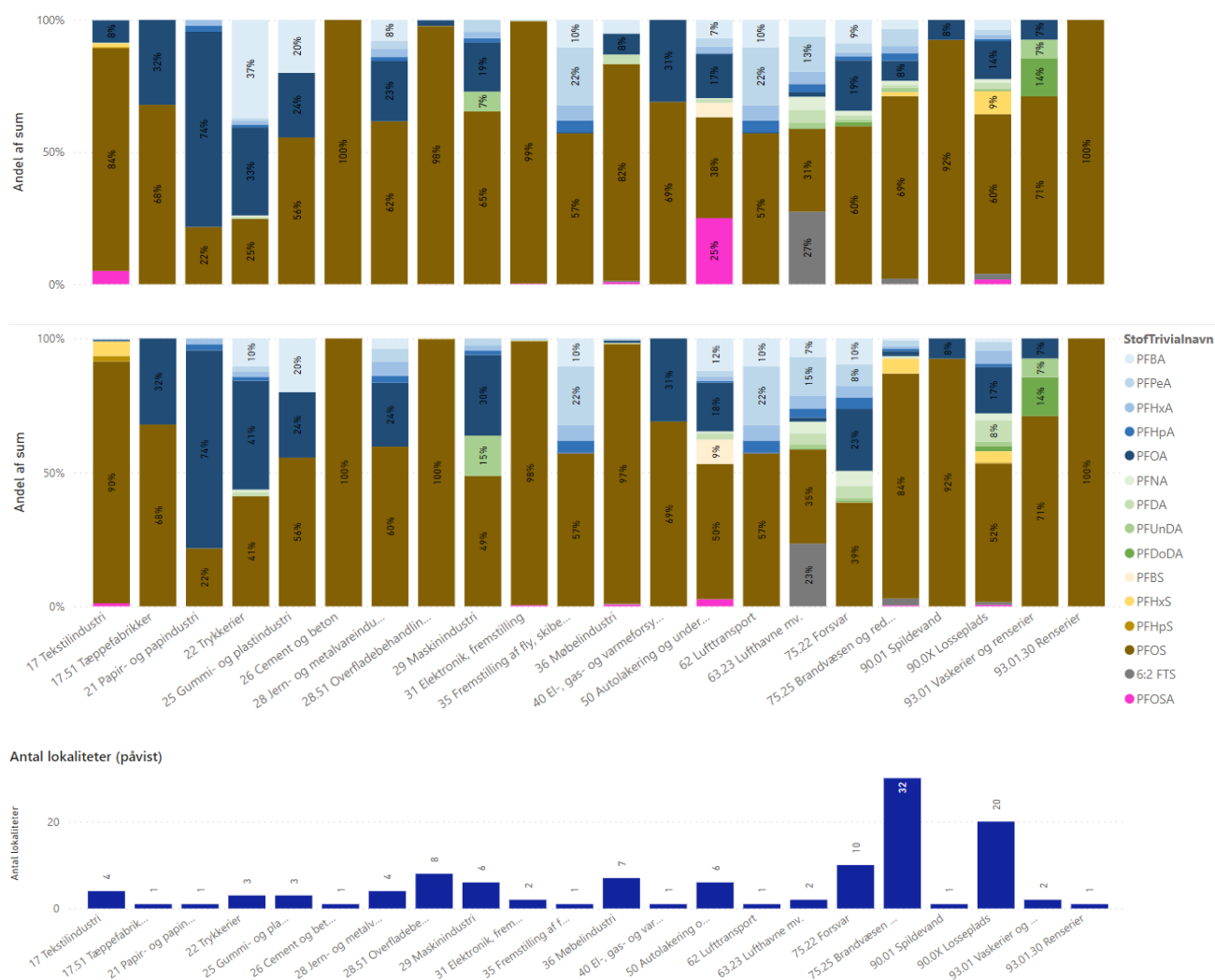
Figur 3.20 Antal af vandprøver udtaget 0-5 m u.t. fordelt efter koncentrationsniveauer for hver branche for PFAS4 (sum af 4) samt PFOS, PFOA, PFNA, og PFHxS. Bemærk koncentrationer under MSTs kvalitetskriteriet på 2 ng/l er i grønne nuancer.



3.5 JORDPRØVER

Overordnet set er der i datasættet meget få jordprøver, der er analyseret for indhold af PFAS. Det er derfor vanskeligt at udtrække generelle konklusioner fra disse.

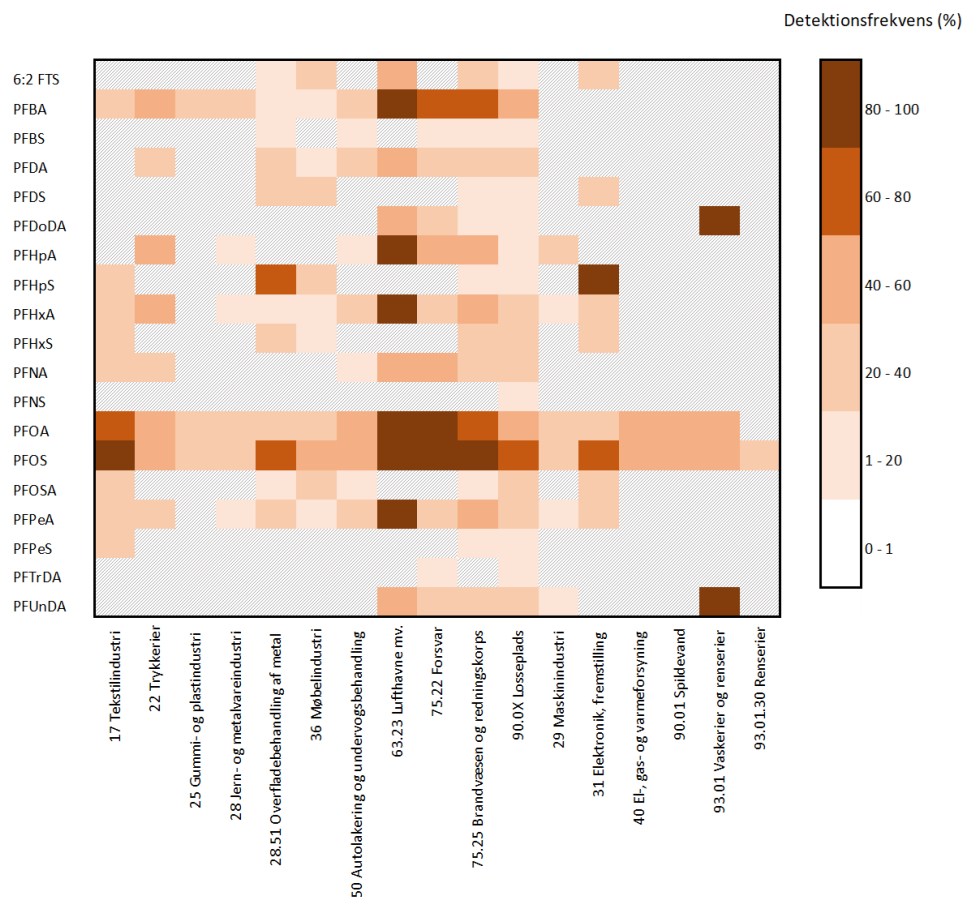
I Figur 3.22 ses nederst en oversigt over sammensætningen i alle jordprøver, hvor andelen af enkeltforbindelse i den samlede sum er opgjort for den samlede mængde af prøver. Det er de samme 22 PFAS-forbindelser, der indgår i de typiske analysepakker for jord og vandprøver. Dermed vil prøver med høje koncentrationer dominere sammensætningen. Til sammenligning ses øverst sammensætningen af jordprøver, hvor der er normaliseret på lokalitetsniveau, og dermed vægtes høje og lave koncentrationer ligeligt i fordelingen. Desuden ses det, at der er en høj hitrate for de undersøgte lokaliteter, hvilket dog formodes at skyldes, at der kun er analyseret jordprøver på lokaliteter, hvor man forventer eller allerede har observeret høje koncentrationer i vandprøver. Dette sker fordi man kun forventer detekterbare niveauer i jorden ved vandkoncentrationer på flere hundrede ng/l, som beskrevet i afsnit 2.2.1. Derfor må jordprøvedatasættet formodes at repræsentere nogle af de kraftigste forureninger pr. branche.



Figur 3.22 Sammensætning af PFAS i jordprøver fra lokaliteter. Øverst: Fingerprintning for alle brancher normaliseret pr. koncentrationsniveau per lokalitet. Gennemsnitlig andel af specifikke PFAS-forbindelser i jordprøverne fra de specifikke brancher. Nederst: Fordeling per branche baseret på andel af enkeltforbindelse i

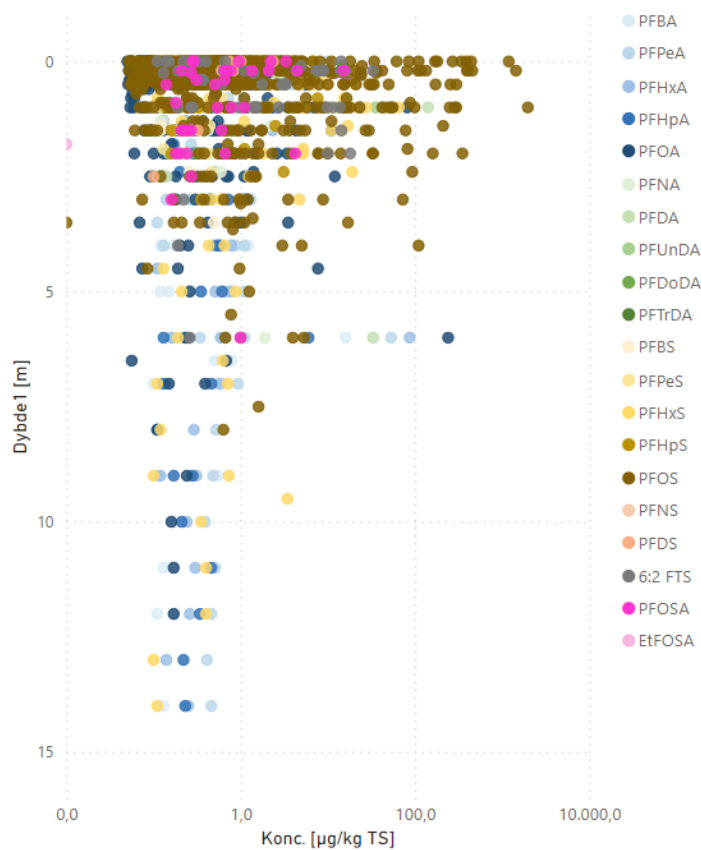
det samlede sum for hver branche, samt en oversigt over antal lokaliteter med mindst en jordprøve over detektionsgrænsen. Det ses på figuren at PFOS er dominerende.

Som det fremgår af figuren, er PFOS og PFOA dominerende i de analyserede jordprøver. Desuden ses der for nogle brancher høje andele af 6:2 FTS og PFOSA. Detektionsfrekvensen for enkeltforbindelser i jordprøver ses af Figur 3.23. Det fremgår også her, at PFOA og PFOS er de enkeltforbindelser, som påvises oftest på tværs af alle brancher. Branchen 63.23 Lufthavne har høje detektionsfrekvenser (100%) for en række enkeltforbindelser, men det skal bemærkes, at der kun er jordprøver fra to lokaliteter.



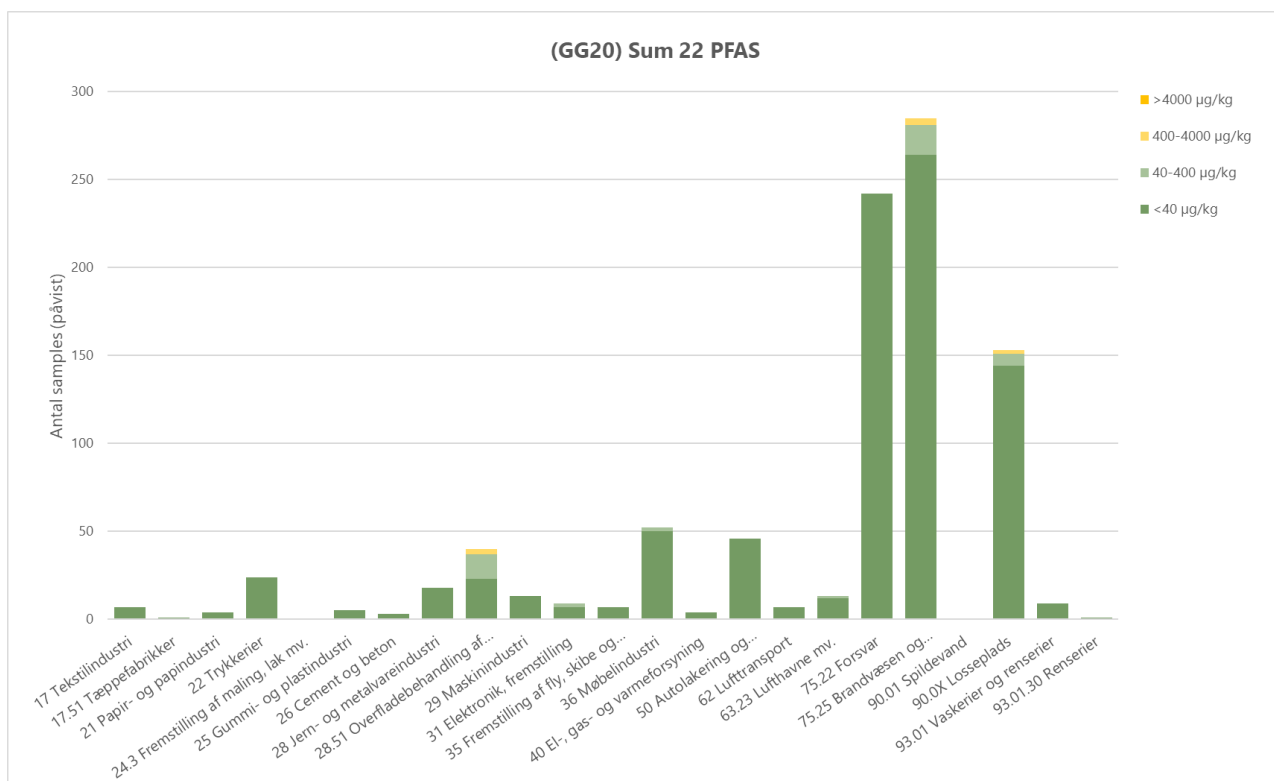
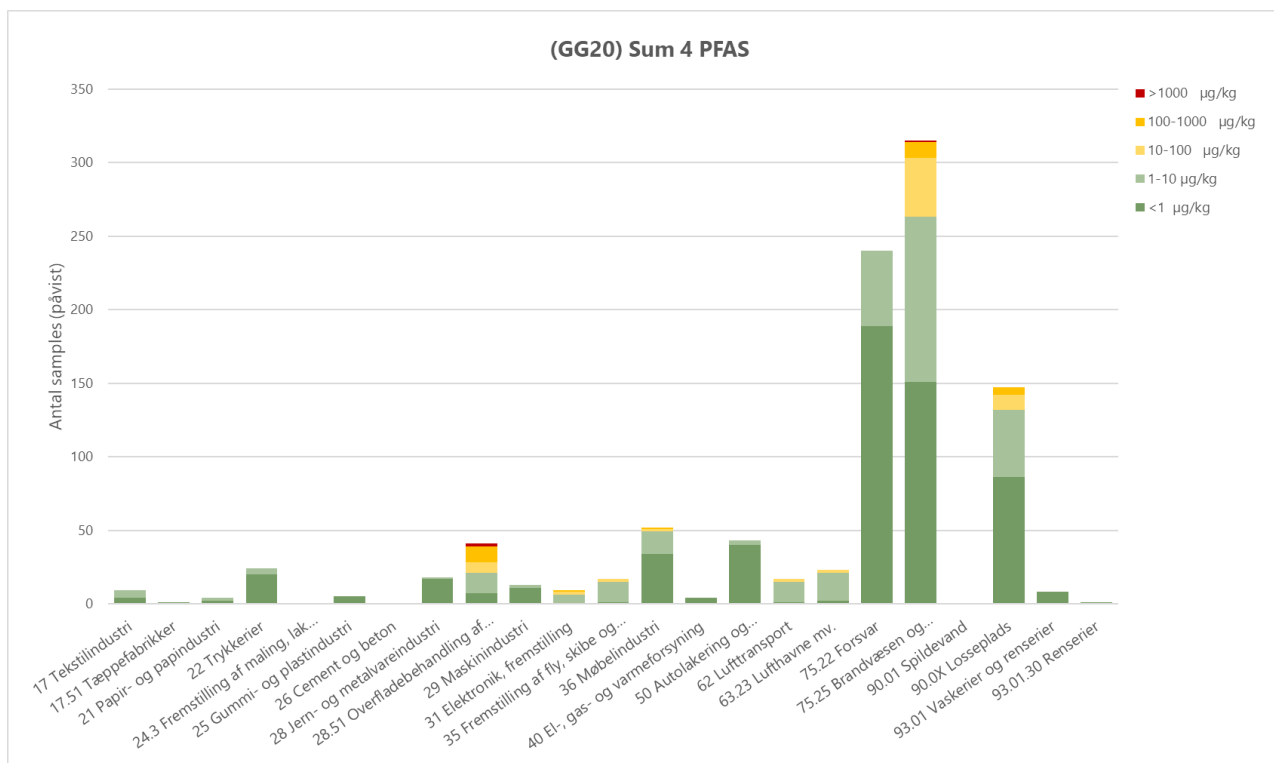
Figur 3.23 Detektionsfrekvens for enkeltforbindelser per branche for jordprøver. Brancher med 2 eller flere prøvetagne lokaliteter er medtaget. Datagrundlaget for beregningen kan ses i Bilag 6, side 15b.

Hovedparten af jordprøver er udtaget fra 0-5 m u.t. som det fremgår af Figur 3.24, hvor også de højeste koncentrationer træffes. De dybeste jordprøver er udtaget fra 10-15 m u.t., og her er der truffet mobile PFAS-forbindelser som PFHxS, PFBA m.fl. i niveauer under 1 µg/kg TS. Samtlige jordprøver, udtaget dybere end 6 m u.t., stammer fra en lokalitet tilhørende branchen 75.25 Brandvæsen og redningskorps.



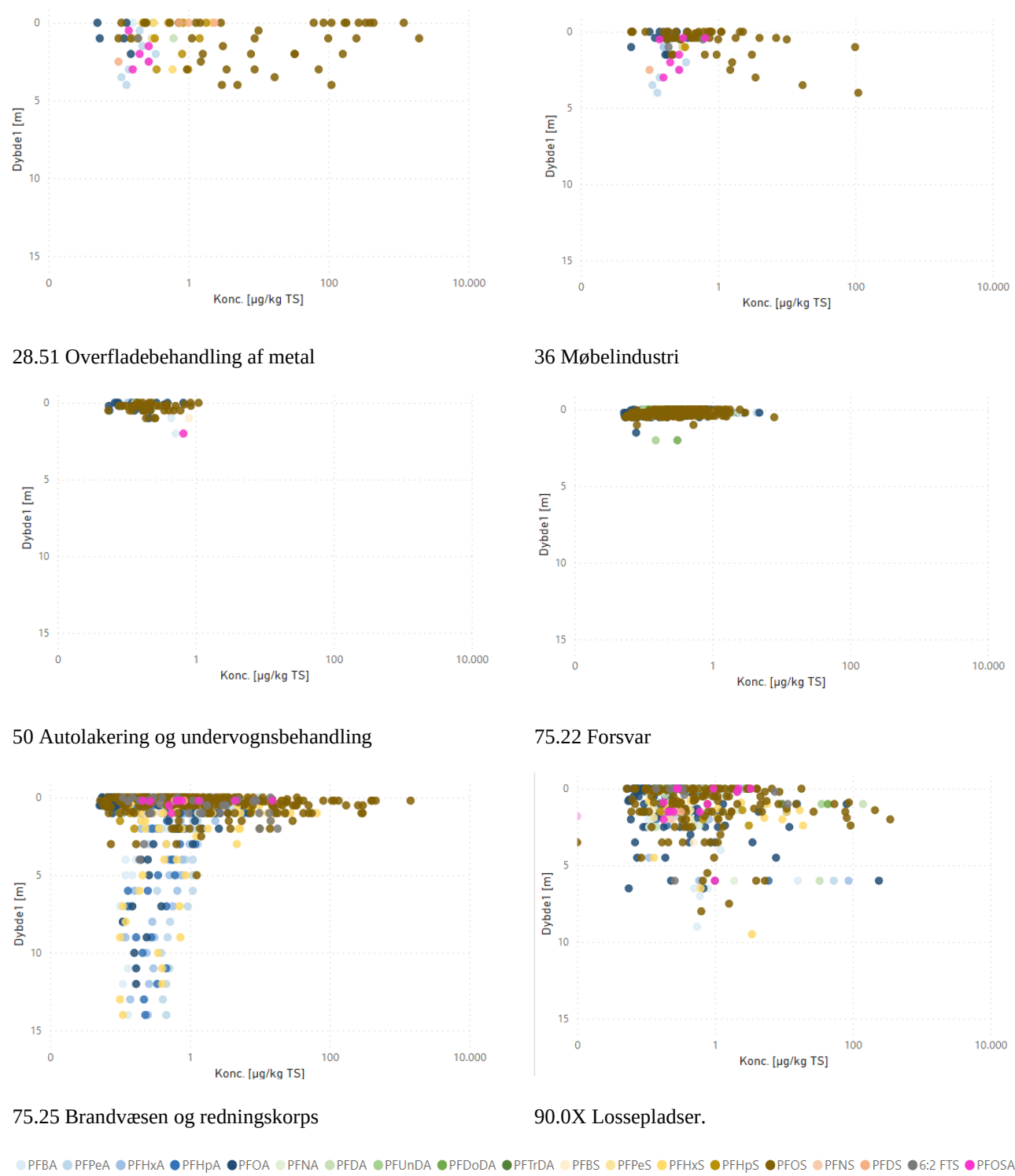
Figur 3.24 Koncentrationer og udtagningsdybde for jordprøver i hele datasættet

En oversigt over antal af analyser for jordprøver for PFAS22 og PFAS4 i alle brancher ses på Figur 3.25. Det fremgår, at der kun er få brancher, hvor der foreligger data for mere end 50 prøver. Derudover fremgår det, at der oftere ses nogle overskridelser af jordkvalitetskriteriet for PFAS4, men kun i enkelte brancher ses overskridelser af PFAS22.



Figur 3.25 Antal af jordprøver hvor der er påvist PFAS for hver branche og koncentrationsintervaller for PFAS4 og PFAS22 i jordprøverne. Bemærk forskellige skala for PFAS4 og PFAS22 svarende til jordkvalitetskriteriet på hhv. 10 µg/kg TS og 400 µg/kg TS.

I nedenstående Figur 3.26 er der angivet jordprøvekoncentrationer for udvalgte brancher, hvor der foreligger mere end 30 prøver med indhold af PFAS i jord over detektionsgrænsen. Mediankoncentrationer for enkeltforbindelser for jordprøver kan desuden ses som heat map i Bilag 3.



Figur 3.26 Jordprøvekoncentrationer for udvalgte brancher

4 RETNINGSLINJER FOR RISIKOVURDERING

Nærværende retningslinjer kan bruges, når det skal vurderes om en forurening med PFAS-forbindelser udgør en risiko over for en grundvandsressource og/eller en aktuel grundvandsindvinding. Der henvises yderligere til Region Hovedstadens principper for fluxbaseret risikovurdering i SAB og RisikoGuide (korrektion for usikkerhed, andre forhold, andre lokaliteter). Som beskrevet i afsnit 1.3 er der ved vurdering af forureninger med PFAS-forbindelser nogle særlige udfordringer ved at anvende RisikoGuide i sin nuværende form. Dette gælder især nødvendigheden af at beregne en vertikal flux, vurdering af korrektionsfaktoren for usikkerhed samt vurdering af bidrag fra andre punktkilder eller diffuse kilder (se også afsnit 5).

Retningslinjerne skal typisk bruges i forbindelse med afslutning af videregående grundvandsundersøgelser:

- hvor der terrænnært er fundet PFAS-forbindelser i jord og/eller grundvand samtidig med, at der ikke er påvist (eller kun er påvist spor af) PFAS-forbindelser i et egentligt dybereliggende grundvandsmagasin, eller
- hvor der er fundet PFAS-forbindelser i dybereliggende grundvand, uden at der er analyseret for indhold af PFAS-forbindelser i overliggende jord, porevand eller mere terrænnært grundvand. Dette er særlig relevant på lokaliteter, hvor den videregående undersøgelse er afsluttet uden, at PFAS har været en del af analyseprogrammet eller ikke var tænkt ind fra starten af undersøgelsen samtidig med, at der står boringer på lokaliteten, hvorfra der efterfølgende kan udtages vandprøver fra et betydende grundvandsmagasin. I sådanne tilfælde kan retningslinjerne bruges til at vurdere, om der kan laves en risikovurdering udelukkende baseret på PFAS-indholdet i vandprøverne fra dette magasin, eller om den videregående undersøgelse skal suppleres med nye data, hvilket kan være analyse af porevandsprøver, jordprøver eller vandprøver fra overliggende grundvandsforekomster.

Det skal bemærkes, at retningslinjerne er skrevet med henblik på videregående undersøgelser, hvor det forudsættes, at der er analyseret for PFAS-indhold i et egentligt grundvandsmagasin, og ikke udelukkende i det førstkommande grundvand som ved en typisk indledende undersøgelse.

Fokus ved udarbejdelse af retningslinjerne er, at man forholdsvis hurtigt kan skille ”småsagerne” fra, med henblik på at fokusere indsatsen over for de lokaliteter, der udgør størst risiko.

Lokaliteter, hvor der er fundet PFAS, er undersøgt med meget forskellig datatæthed og med forskelligt fokus for undersøgelserne, hvilket påvirker tilgangen til risikovurdering for den specifikke lokalitet. Det er ikke meningen, at retningslinjerne skal overtrumfe konkret viden og konceptuel forståelse på de specifikke lokaliteter, men derimod at give forslag til den generelle tilgang til risikovurdering af PFAS. Derfor er retningslinjerne ikke skrevet som en trin for trin vejledning, idet det ikke er muligt at imødekomme alle tænkelige scenarier.

Det er på den baggrund forsøgt at opstille et system til håndtering af forskellige situationer ift. de tilgængelige data. Dette er visualiseret i 3 informationsniveauer betegnet A-C som vist på Figur 4.1.

Informationsniveau A	Informationsniveau B	Informationsniveau C	Noter
• PFAS kilderne er kendte (oplag, utæt kloak, forkromningsbad, imprægneringsanlæg mm) og deres areal kan estimeres. • Der er udtaget jordprøver¹ til analyser for PFAS på lokaliteten ved kilderne og /eller • Der er udtaget flere vandprøver i det terrænære grundvand/porevandsprøver ved kilderne. • Der er ikke påvist PFAS i det første egentlige grundvandsmagasin, eller der er påvist lave indhold²	• PFAS kilderne og deres areal er ukendt • Der er ikke udtaget jordprøver til analyse for PFAS på lokaliteten. • Der foreligger enkelte vandprøver, som er analyseret for PFAS i det terrænære grundvand, eller der er porevandsprøver fra den umættede zone. • Der er ikke påvist PFAS i det første egentlige grundvandsmagasin, eller der er påvist lave indhold²	• PFAS kilderne og deres areal er ikke kendt. • Der er ikke udtaget jordprøver til analyse for PFAS på lokaliteten. • Der er hverken udtaget vandprøver fra det terrænære grundvand, eller porevandsprøver fra den umættede zone. • Der foreligger vandprøver fra et dybere magasin (det kan være det førstkomende reelle grundvandsmagasin) fra en dybde større end 10 m u.t., som er analyseret for PFAS. Der kan være påvist lave eller væsentlige indhold.	• Note 1: På langt de fleste lokaliteter vil der ikke kunne påvises detekterbare niveauer af PFAS i jordprøver, med mindre der er tale om en kraftig forurening med forventede niveauer i vand på flere hundrede ng/l. • Note 2: Når der i grundvandsmagasinet er påvist lave indhold af PFAS, kan man sammenligne fund med de forventede gennembrudskoncentration og vurdere om der er tale om gennemslag eller en begyndende gennembrud. Det skal bemærkes, at der på lokaliteter hvor der er påvist høje koncentrationer i magasinet, også skal inddrage den horisontale flux i risikovurderingen.

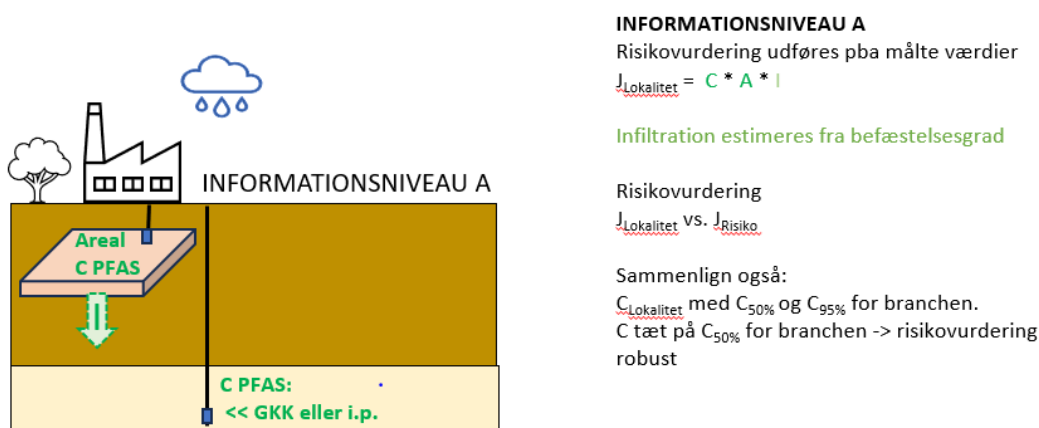
Figur 4.1 Oversigt over datagrundlag for de tre informationsniveauer A-C.

4.1 RISIKOVURDERING- INFORMATIONSNIVEAU A

Lokaliteter, tilhørende informationsniveau A, anses for at være velundersøgte. Her er der lokalitetsspecifikviden om

- Forureningskildens areal.
- Koncentration af PFAS i det terrænære grundvand eller i jorden.
- Koncentration af PFAS i det førstkomende betydende magasin (muligvis kun få prøver).

En konceptuel illustration af informationsniveau A og forslag til risikovurderingstilgang kan ses i Figur 4.2



Figur 4.2 Konceptuel model og forslag til risikovurdering for informationsniveau A

Risikovurderingstilgangen for PFAS ved informationsniveau A lokaliteter vil ikke adskille sig væsentligt fra en risikovurdering overfor andre stoffer, udover at der ofte ikke vil være tilstrækkelige resultater til at beregne en horisontal flux i magasinet. Nogle af de væsentligste overvejelser i forhold til beregning af den vertikale forureningsflux, og dermed den fremtidige påvirkning med PFAS er:

- Anvendelse af en realistisk infiltrationsrate. Her vil den lokalitetsspecifikke viden komme i spil.
- Valg af modelstof, der driver risikoen. Her vil det ofte være en af PFAS4-forbindelserne, der driver risikoen. Når der vurderes på baggrund af en vertikal flux, ses der bort fra det tidsmæssige aspekt og forsinkelse, som for nogle af PFAS-forbindelserne muligvis vil være betydelig.

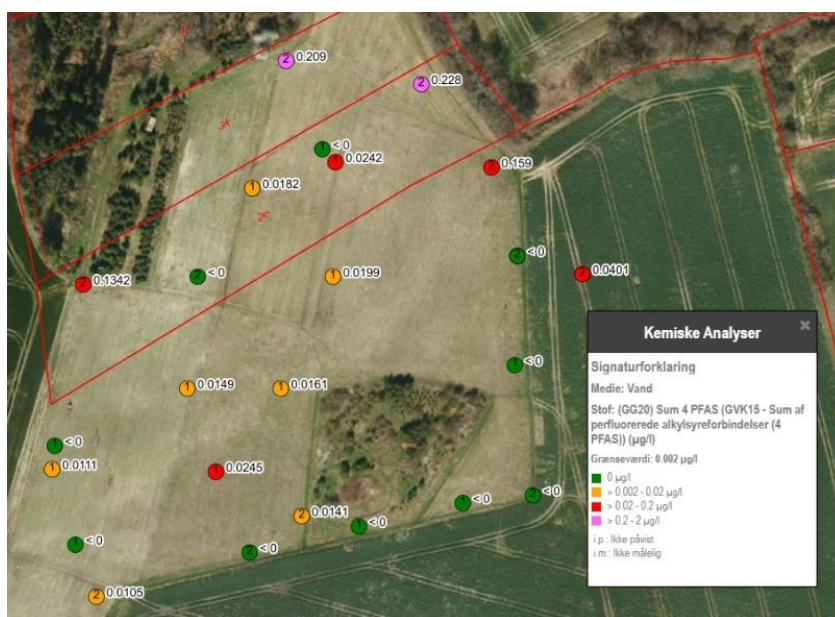
Ved risikovurdering af disse lokaliteter kan der skeles til, hvorvidt sammensætning og koncentrationsniveauerne er typiske for den pågældende branche. Dette kan bruges til at vurdere, hvorvidt der på lokaliteten er mistanke om en kraftig kilde, der skal undersøges nærmere, eller hvorvidt niveauerne passer med det generelle niveau for den pågældende branche. I nedenstående er der givet et par eksempler.

EKSEMPEL 4.1A

NB: Eksemplet er modificeret

På en losseplads er der i det terrænære grundvand påvist PFAS4 i flere borer, som afdækker lossepladsens areal og er filtersat i ca. 1-6 m u.t. Det dybere magasin er undersøgt, og her er der endnu ingen gennembrud af PFAS.

Koncentrationsniveauerne er mellem 11 og 230 ng/l med en gennemsnitlig koncentration på ca. 50 ng/l. Ser man på histogrammerne for lossepladser (se Bilag 4), ligger de højeste prøver omkring 95% fraktilen for lossepladser, og de laveste omkring 50% fraktilen. Da antal af borer vurderes passende, kan risikovurderingen udføres på det eksisterende grundlag.



Lossepladsens forurenede areal udgør ca. 25.000 m². Da arealet er ubefæstet fastsættes infiltrationen til ca. 200 mm/år.

På baggrund af dette, kan der beregnes en vertikal flux på 0,25-1,15 g/år (afhængigt om der regnes med den gennemsnitlige eller maksimale koncentration på hele arealet), hvilket er på niveau med eller over risikofluxen på 0,4 g/år, hvis der ikke anvendes en korrektionsfaktor, jf. SAB og RisikoGuide, se Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Beregningseksempel 4.1A

PARAMETER	VÆRDI	ENHED	KOMMENTAR
Branche	Losseplads		
Infiltration (I)	0,2	m/år	Ubefæstet areal i Nordsjælland
Kildens areal (A)	25000	m ²	Lig med lossepladsens areal
Gennemsnitlig PFAS4 koncentration på lokaliteten	50	ng/l	
Vertikal flux $J = I * C * A$	0,25	g/år	Baseret på gennemsnittet af den påviste koncentration på lokaliteten
Maks af PFAS4 koncentration påvist på lokaliteten	230	ng/l	
Vertikal flux $J = I * C * A$	1,15	g/år	Baseret på den maksimale påviste koncentration lokaliteten
Evt. korrektionsfaktor	10		Det anbefales generelt at bruge en korrektionsfaktor på 10 medmindre der er konkrete argumenter for et andet valg.
Korrigeret vertikal flux fra lokaliteten	2,5-11,5	g/år	
Risikoflux	0,4	g/år	

Koncentrationen på lokaliteten ligger mellem 11-230 ng/l for PFAS4, hvor Bilag 4 viser en 50% fraktil på 8 ng/l og 95% fraktil på 380 ng/l for lossepladser. Da risikoberegningerne peger på, at der er en risiko, og da forureningsniveauerne peger på en forholdsvis stærk forurening for branchen, anbefales det at udføre supplerende videregående undersøgelser eller udføre en mere detaljeret risikovurdering på den pågældende lokalitet. Desuden skal man forholde sig til, hvornår man kan forvente, at der sker gennembrud til det underliggende magasin ved hjælp af JAGGs vertikal transport modul (se afsnit 2.3).

EKSEMPEL 4.1B

På en tidligere forkromningsvirksomhed er der i 8 boringer, filtersat i det terrænnære grundvand fra 2 til 4 m u.t., målt 13-62 ng/l PFOS og op til 80 ng/l PFAS22. Boringerne er placeret under og omkring kilderne, hvor der også er truffet højt indhold af chrom i jorden. Det terrænnære grundvand underlejres af 12 meter ler over et kalkmagasin, hvor der ikke er påvist indhold af PFAS i nogle af vandprøverne.

Det vurderes, at kilderne til PFAS på lokaliteten og kildernes areal er lokaliseret samt afdækket med de eksisterende boringer. Det forurenede areal vurderes at være ca. 2.000 m². De påviste PFAS-niveauer ligger omkring 50-75% fraktilen hhv. 53 ng/l og 17.000 ng/l for andre forkromningsanlæg og virker således plausible (se Bilag 4). Forureningsniveauerne på lokaliteten ligger lavt for branchen.

Arealet ligger dels under bygningen og i asfalteret område, hvorfor en infiltration på 50 mm/år er anvendt her.

På baggrund af dette kan der beregnes en vertikal flux for PFOS på 0,008 g/år, som ligger meget langt under den ukorrigerede risikoflux på 0,4 g/år. Konklusionen vil derfor være, at risikoen for uacceptabel påvirkning med PFOS af ressourcen er meget lille.

Tabel 4.2 Beregningsseksempel 4.1B

PARAMETER	VÆRDI	ENHED	KOMMENTAR
Branche	Overfladebehandling af metal		
Infiltration (I)	0,05	m/år	Befæstet areal
Kildens areal (A)	2000	m2	Lig med kildens areal
Maks af PFAS koncentration påvist på lokaliteten	80	ng/l	
Vertikal flux $J = I * C * A$	0,008	g/år	Baseret på den maksimale påviste koncentration på lokaliteten
Evt. korrektionsfaktor	10		Det anbefales generelt at bruge en korrektionsfaktor på 10 medmindre der er konkrete argumenter for et andet valg.
Korrigeret vertikal flux fra lokaliteten	0,08	g/år	
Risikoflux	0,4	g/år	

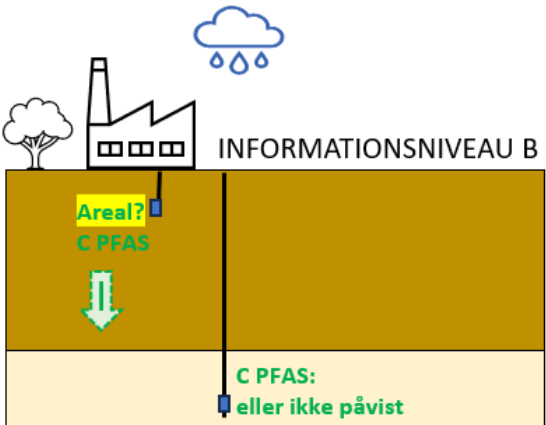
4.2 RISIKOVURDERING INFORMATIONSNIVEAU B

Informationsniveau B er typisk lokaliteter, hvor kildearealer til PFAS-forurening ikke er kendt, men der er udtaget analyser for PFAS, fordi der har været en PFAS-branche/aktivitet på lokaliteten.

På lokaliteter, tilhørende informationsniveau B, er der der lokalitetsspecifikviden om:

- Koncentration af PFAS i det terrænnære grundvand eller i jorden.
- Koncentration af PFAS i det førstkomende betydende magasin (muligvis kun få prøver), mens areal af kilden til PFAS forurening er ukendt.
- Der er ikke udtaget jordprøver til analyse for PFAS.

En konceptuel illustration af informationsniveau B og forslag til risikovurderingstilgang kan ses i Figur 4.3.



INFORMATIONSNIVEAU B

Risikovurdering udføres pba målte værdier

$$J_{\text{Lokalitet}} = C * A * I$$

Areal er ukendt.

Antag matrikel areal eller se tabel 5.1.

Infiltration estimeres fra befæstelsesgrad

Risikovurdering

$$J_{\text{Lokalitet}} \text{ VS. } J_{\text{Risiko}}$$

Beregn ev.t

$$J_{50\%} = C_{50\%} * A * I \text{ og}$$

$$J_{95\%} = C_{95\%} * A * I \text{ for branchen}$$

Er $J_{95\%} < J_{\text{Risiko}}$ og CPFAS i magasinet lavt kan undersøgelsen afsluttes

Figur 4.3 Konceptuel illustration og forslag til risikovurdering for informationsniveau B

- Anvendelse af en realistisk infiltrationsrate, baseret så vidt muligt på den aktuelle befæstelsesgrad og drænforhold.
- Valg af modelstof, der driver risikoen. Her vil det ofte være en af PFAS4-forbindelserne, der driver risikoen. Når der vurderes på baggrund af en vertikal flux, ses det bort fra det tidsmæssige aspekt og forsinkelse, som for nogle af PFAS-forbindelserne muligvis vil være betydelig.
- Informationsniveau for branchen. For flere brancher er der kun få undersøgte lokaliteter. Dette er en skærpende omstændighed, hvorfor man i disse tilfælde må overveje om der er behov for yderligere undersøgelser for at udføre en mere sikker risikovurdering. Her vil overvejelser som f.eks. afstand og sårbarhed af indvindingen have indflydelse på, hvor stor en sikkerhed man vil have i risikovurderingen.

EKSEMPEL 4.2

På lokaliteten har der ligget forskellige brancher, der kan have anvendt PFAS.

- Der er udført 5 filtersatte boreriger ved potentielle kildeområder ved tidligere oplag/ værksted osv., men der foreligger ingen konkret viden om anvendelsen af PFAS på lokaliteten.

[illegible]

Tilsvarende kan der skeles til den generelle viden om brancherne for at vurdere, om der kan være mistanke om en kraftig kilde, som bør undersøges nærmere, eller om der er tale for en diffust indhold, der ofte træffes i denne branche/industri.

WSP
15-01-2024
SIDE 57

Man kan derfor vælge at udføre risikovurdering for de påviste niveauer samt for et worst case scenarie, hvor man anvender 95% fraktiler for brancherne for at vurdere, hvorvidt der er behov for nærmere undersøgelse til kortlægning af kildestyrken.

Det anbefales, at der bruges samme tilgang som i Regionen Hovedstadens fluxprojekt⁶ og en passende infiltrationsrate. I dette tilfælde kan man bruge hele matriklens areal (15*30 meter = 450 m²) og en infiltrationsrate på 100 mm/år, svarende til delvist befæstet areal. Resultaterne fremgår af nedenstående Tabel 4.3. Det ses, at selv med den højeste koncentration, svarende til 95% fraktilen, vil den resulterende korregerede forureningsflux være på kun 0,063 g/år, som er langt fra en risikoflux på 0,4 g/år. På denne baggrund vurderes det, at forurening med PFAS ikke udgør en risiko for ressourcen.

Tabel 4.3 Beregningseksemplet 4.2

PARAMETER	VÆRDI	ENHED	KOMMENTAR
Branche	28. Jern og metalindustri og 50. Autolakering		
Infiltration (I)	0,1	m/år	Delvis befæstet areal
Kildens areal (A)	450	m2	Lig med matriklens areal
Maks PFAS koncentration, C (PFAS4)	8,9	ng/l	Påvist på lokaliteten i det terrænnære grundvand
Vertikal flux J = I * C * A	0,0004	g/år	Baseret på den gennemsnitlige koncentration, uden korrektionsfaktor
50% fraktilen for PFAS 4, C	8	ng/l	50% fraktilen for PFAS4 i Jern og metalindustri er 6 ng/l. I Autolakererier er det 8 ng/l. Der er valgt den højeste
Vertikal flux J = I * C * A	0,00036	g/år	Baseret på maks af 50% fraktilen for PFAS4 i de to brancher uden korrektionsfaktor
95% fraktilen for PFAS 4	140	ng/l	95% fraktilen for PFAS4 i Jern og metalindustri er 140 ng/l. For Autolakererier er det 120 ng/l. Der er valgt den højeste
Vertikal flux J = I * C * A	0,0063	g/år	Baseret på 95% fraktilen for brancherne
evt. Korrektionsfaktor	10		
Korrigeret vertikal flux fra lokaliteten	0,0036 til 0,063	g/år	Baseret på ovenstående beregnede fluxe og en korrektionsfaktor på 10
Risikoflux	0,4	g/år	

Tabel 4.4 Sammenligning af påviste koncentrationer med branchedata for eksemplet 4.2

	LOKALITET	BRANCHE 28		BRANCHE 50		VURDERING
		50%	95%	50%	95%	
PFAS4	8,9	6	17	8	17	De påviste niveauer på lokaliteten er således i god overensstemmelse med de gennemsnitlige niveauer for de relevante brancher samt langt under 95% fraktilen. Det vurderes derfor, at risikovurdering med baggrund i 50% er robust. Selv ved antagelse af 95% fraktilen og korrektionsfaktor 10 overskrides risikofluxen ikke.
PFAS 22	20	140	280	120	640	

⁶ Region Hovedstaden har et igangværende internt projekt vedr. beregning af vertikal flux fra lokaliteter, hvor der anvendes matriklens areal og en infiltrationsrate som afhænger af matriklens befæstelsesgrad

Ovenstående metodik fungerer som inspiration til scenarieberegninger for beregning af en forureningsflux. I den endelige afgørelse for lokaliteten, skal der også tages hensyn til andre forhold, herunder skærpende eller formildende omstændigheder såsom vigtigheden af grundvandsressourcen, tykkelse af dæklag osv.

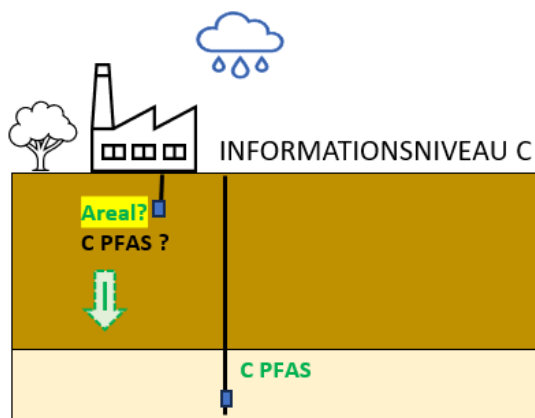
Såfremt der antages et scenarie, hvor de påviste koncentrationer på lokaliteten ligger i nærheden af 95% fraktilen for branchen, vil det være sværere at afvise, at der på lokaliteten ikke findes et kraftigere hotspot med PFAS. I sådanne tilfælde vil man ofte, og afhængigt af de øvrige risikofaktorer (tykkelse af dæklag) osv. være nødsaget til at udføre yderligere undersøgelser for at sikre en mere robust risikovurdering.

4.3 RISIKOVURDERING INFORMATIONSNIVEAU C

I tilfælde af, at der kun er analyseret vandprøver fra dybere (> 5-10 m u.t.) underliggende magasiner vil der jf. de tidligere afsnit være en mulighed for, at ikke alle PFAS-forbindelser er brudt igennem til de dybere niveauer. Herudover kan det ligeledes forekomme, at de PFAS-forbindelser, der detekteres, ikke er udtryk for et fuldt gennembrud. Dette besværliggør vurderingen af risikoen.

På baggrund af lokalitetens tilhørsforhold til de forskellige brancher, vil der allerede ud fra en viden om, hvilken branche en konkret lokalitet tilhører, kunne uddrages en betydelig viden om de mest sandsynlige indhold i jord og øvre grundvand, og dermed også om der forventeligt vil være en risiko i forhold til ressourcen (jf. RisikoGuide).

En konceptuel illustration af informationsniveau C og tilgang til risikovurdering kan ses på Figur 4.5.



INFORMATIONSNIVEAU C

Risikovurdering udføres pba målte værdier

$$J_{\text{Lokalitet}} = C * A * I$$

C på kildelokaliteten er ukendt

Areal er ukendt.

Antag matriklens areal eller se tabel 5.1.

Infiltration estimeres fra befæstelsesgrad

Beregn typiske fluxe for branchen, inklusiv en korrektionsfaktor på 10

$$J_{50\%} = C_{50\%} A * I \text{ og}$$

$$J_{95\%} = C_{95\%} A * I \text{ for branchen}$$

Er $J_{50\%} \ll J_{\text{risiko}}$ og

$J_{95\%} < J_{\text{risiko}}$

Og CPFAS i magasin er lavt kan undersøgelsen afsluttes

Beregn typiske fluxe for branchen

Er $J_{95\%}$ tæt på J_{risiko}

Og/eller C magasin > GKK

Må det tilbageberegnes hvad kildekonzentration er vha fingerprinting

Derefter regnes der på

$$J_{\text{Lokalitet}}$$

$$J_{\text{Lokalitet}} \text{ vs. } J_{\text{risiko}}$$

Figur 4.5 Konceptuel illustration og forslag til risikovurdering for informationsniveau C

Tilgangen beskrevet i Figur 4.5 kan anvendes for alle brancher, dog vil vurderingerne være mindre robuste for brancher med et mindre datagrundlag.

Hvis der som eksempel ses på renserier, så ligger 95% fraktilen for de allerede undersøgte lokaliteter for PFAS4 på 97 ng/l og for PFAS22 på 390 ng/l for vandprøver, udtaget i de øvre 5 m af jorden jf. Figur 3.14 og Figur 3.15 og Tabel 4.5. Dette er langt fra de hhv. 200 ng/l PFAS4 og 10.000 ng/l PFAS22, der skal til, for at overskride risikofluxen ved en kildestørrelse på 1.000 m² og en infiltration på 200 mm/år, se afsnit 1.3 og en korrektionsfaktor på 10. En risiko fra PFAS for denne branche (set i forhold til risikofluxen for nuværende), må anses for at være usandsynligt for langt de fleste renserier (se også 80% fraktilen). På de fleste renserier vil det derfor med helt overvejende sandsynlighed være de chlorerede opløsningsmidler, der vil udgøre den største risiko for grundvandet. Ovenstående betyder dog ikke, at man på forhånd kan afskrive risiko på alle renserier på baggrund af fund af PFAS-forbindelser. De konkrete oplysninger for hver lokalitet, herunder oplysninger om, hvilke type tøj blev håndteret (eks. mange friluftstøj) samt de konkrete fund. Påvises der eksempelvis højere niveauer en forventet, bør man overveje yderligere undersøgelser.

Tabel 4.5 50% og 95% fraktiler for PFAS fund i renserier og overfladebehandling af metal

FRAKTIL	KONCENTRATION NG/L			
	SUM 4 (alle)	SUM 4 (dybde 0-5 m)	SUM 22 (alle)	SUM 22 (dybde 0-5 m)
50%- Renserier	8	13	19	28
80%- Renserier	24	33	59	71
95% Renserier	73	120	260	390
50%- Overfladebehandling af metal	10	18	23	53
80%- Overfladebehandling af metal	120	630	160	1100
95% Overfladebehandling af metal	4300	17000	4300	17000

For branche 28.51.Overfladebehandling af metal ligger 95% fraktilen for de allerede undersøgte lokaliteter for PFAS4 på omkring 17.000 ng/l og for PFAS22 på samme niveau for vandprøver, udtaget i de øvre 5 m af jorden jf. Tabel 4.5. Årsagen til, at niveauet er det samme for PFAS4 og PFAS22 er, at det for denne branche er PFOS, der totalt dominerer sammensætningen i jorden og øvre grundvand, se Figur 3.5 og Figur 3.22. Her vil en potentiel overskridelse af risikofluxen være en mulighed på sigt for PFAS4, som det kan ses af beregningerne i Tabel 4.6. Det er derfor nødvendigt for f.eks. brancher med forkromning at prøve at estimere niveauet i kilden, hvis man udelukkende har vandprøver fra et dybereliggende magasin.

Tabel 4.6 Nødvendige koncentrationer af PFAS4 og PFAS22 for at opnå overskridelse af risikoflux (ukorrigeret).

Infiltration	Areal af kilden	J _{risiko} for PFAS4/PFAS22 Ukorrigeret	Nødvendig C _{gns} for PFAS4	Nødvendig C _{gns} for PFAS22	Nødvendig C _{gns} for med en korrektionsfakt or på 10	Nødvendig C _{gns} for PFAS22 med en korrektionsfakt or på 10
mm	m ²	g/år	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
50	1.000	0,4 /20	8.000	400.000	800	40.000
100	1.000	0,4 /20	4.000	200.000	400	20.000
200	1.000	0,4 /20	2.000	100.000	200	10.000

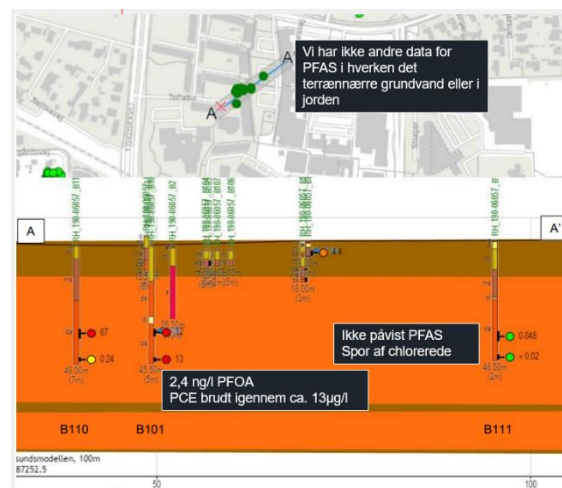
I det følgende beskrives tre eksempler hvor der er påvist forskellige størrelsesordner af PFAS i det primære magasin, uden at der er viden om PFAS niveauet i det terrænære grundvand.

EKSEMPEL 4.3A

Det er samme eksempel som i afsnit 1.2. En renseriejendom er tidligere undersøgt for chlorerede opløsningsmidler. Den konstaterede forurening med PCE udgør ingen risiko for arealanvendelsen, indvinding eller grundvandsressourcen som helhed. På lokaliteten er der fortsat 6 monitoringsboringer, filtersat i sandmagasinet i mere end 20 m u.t. I et af de seks filtre er der påvist 2,4 ng/l PFOA. I samme filter er der påvist 13 µg/l PCE.

Det påviste niveau i det dybe magasin på 2,4 ng/l ligger under 25% fraktilen for PFAS4, som er ca. 3,5 ng/l (se Figur 3.14). Det er derfor sandsynligt, at der endnu ikke er fuldt gennembrud.

Hvis man derudover kigger på den typiske sammensætning af vandprøver for renserier Figur 3.5, udgør PFOA mellem 16 og 22% af den samlede PFAS-mængde. Hvis man antager, at der er sket ca. 50% gennembrud, kan kildeniveauet være ca. 5 ng/l PFOA. Baseret på Figur 3.4 og 3.5 vil dette svare til følgende koncentrationer for PFAS4 (ca. 5 ng/l PFOS, ca. 0 ng/l PFNA, 1,25 ng/l PFHxS) dvs. omkring 12 ng/l PFAS4 i kildeområdet. Dette niveau svarer til ca. 50% fraktilen for kildekonzentrationer i renserierne, og dermed, jf. vurderingerne af risikoflux i Tabel 4.6 langt fra den koncentration, der kan udgøre en risiko for grundvandsressourcen, hvis der antages et forurenede areal på ca. 1000 m², der formentlig er et højt (og dermed konservativt) estimat for kildens størrelse.



Antagelsen for gennembrudsprocenten må afhænge af den pågældende lokalitets geologi og tykkelse af dæklag over magasinet. Det henvises til beregninger af vertikal transport i afsnit 2.3 for retningslinjer til vurdering af gennembrud.

Eksemplets konklusion vil være, at risikoen for uacceptabel påvirkning med af ressourcen med PFAS er meget lille.

EKSEMPEL 4.3B

På en anden renseriejendom er der i en boring i 18,5 m u.t. påvist følgende PFAS-indhold: 28 ng/l PFBA, 460 ng/l PFBS, 13 ng/l PFOA, og 2,1 ng/l PFOA. Geologien består af ca. 10 meter ler underlejret af sandmagasinet, hvori prøven er udtaget. Der er ingen jord- eller vandprøver i kildeområdet eller mere terrænnært.

Det påviste indhold i vandprøven med gennembrud af PFOS og PFOA (PFAS4 på 30,1 ng/l) er over 80% fraktilen for branchen (se Figur 3.14-3.15 og Tabel 4.7). Tilsvarende er det påviste indhold af PFAS22 på ca. 500 ng/l over 95% fraktilen.

I flere andre dybe filtre er indholdet dog væsentligt lavere.

Det tyder på, at der på lokaliteten er en kilde med PFAS, der ligger ud over det forventelige for branchen, og derfor vil supplerende videregående undersøgelser ift. fastlæggelse af en lokal kilde anbefales. Da niveauet er overraskende højt for branchen, kan det også tyde på en anden PFAS-kilde på en anden lokalitet, eller et atypisk renseri (eksempelvis et renseri der modtager meget udendørs-tøj, som er imprægneret).

Eksemplets konklusion vil derfor være, at man ikke kan udelukke, at der er en risiko. I dette tilfælde vil anbefalingen derfor være, at der bør udføres yderligere undersøgelser terrænnært for at fastslå den sande kildestyrke af kilden. Dette skal klarlægges inden der igangsættes supplerende videregående undersøgelser på lokaliteten.

EKSEMPEL 4.3C

I dette eksempel er der tale om en ejendom, hvor der har været forkromning (Branche 28.51 Overfladebehandling af metal).

Der er målt indhold af PFBA på 90 ng/l i flere filtre i et sandmagasin i 10 meters dybde under et morænelersdække forholdsvis tæt på forkromningsanlægget. Der er grønne områder op til bygningen, svarende til en forventet nedsivning under bygningen på omkring 50-100 mm/år. Driftsperioden har været fra midten af 1960'erne og op til omkring år 2000. Formentlig har PFAS været anvendt siden ca. 1970, svarende til, at udvaskningstiden pt. er omkring 50 år.

Som tidligere nævnt er der for branchen overfladebehandling af metal en stor sandsynlighed for, at der i kilden kan forekomme høje koncentrationer, som kan resultere i overskridelse af risikofluxen.

På den konkrete lokalitet, anbefales det at bruge viden om PFAS gennembrud til det primære magasin (her fund af PFBA på 90 ng/l) for at regne på en sandsynlig niveau for kilden vha følgende trin:

1. Udfør en beregning af gennembrudstiden vha. JAGG for at vurdere, om det er sandsynligt, at forurening er brudt igennem dæklaget.
2. Tilbageberegning af kildekonzentrationen med baggrund i PFAS koncentrationen i det primære magasin.
3. Sammenligning af den beregnede kildekonzentration med fraktilerne for branchen. Virker det plausibelt?
4. Beregning af den vertikale flux med baggrund i de tilbageberegnete koncentrationer.

Ad 1: Ud fra JAGG giver det ingen gennembrud (50 mm/år) til fuldt gennembrud (100 mm/år, 94% af indløbskoncentration) for PFBA ved anvendelse af standardparametre for 10 m ler i vertikal transportmodulet. I eksemplet regnes videre med 50% gennembrud for PFBA, svarende til midten af intervallet. Hvis 50% af koncentrationen svarer til 90 ng/l, har udgangskoncentrationen været det dobbelte dvs. knap 200 ng/l i de øvre lag.

Ad 2: PFBA udgør ved forkromningsanlæg en meget lille andel af den samlede koncentration, men er dog til stede i rigtig mange prøver fra forkromning (se Figur 3.2). Hvis man ser på Figur 3.5, hvor prøver fra de forskellige brancher er vurderet i forhold til deres samlede indhold, udgør PFBA kun 0,3% og PFOS omkring 90% af det samlede indhold⁷. Hvis det påviste PFBA indhold på lokaliteten er gennemsnitligt (200 ng/l), vil det samlede PFAS22 indhold i kildeområdet forventeligt være i niveauet $200 \text{ ng/l} / 0,3\% = 60.000 \text{ ng/l}$. Fingerprinting kan i øvrigt anvendes i forhold til kildeopsporing, således at en påvist sammensætning kan holdes op mod den forventede sammensætning for branchen. Stemmer det ikke overens, kunne der være tale om en anden kilde.

Ad 3: Jf. histogrammerne for både PFAS4 og PFAS22 for overfladebehandling af metal er disse stort set identiske. Indenfor den usikkerhed, der er i vurderingen, er det derfor rimeligt at antage, at PFAS4 er i på samme niveau, dvs. omkring 60.000 ng/l, hvilket potentielt kan give en risiko. 60.000 ng/l ligger i den øverste del af fordelingen fra de kendte lokaliteter, hvor maks-indholdet i terrænære prøver er påvist i koncentrationer på op til 120.000 ng/l for PFAS4. De anvendte antagelser vurderes derfor ikke at være fejlagtige.

Ad. 4. Beregning af den vertikale flux kan ses i Tabel 4.7

⁷ Ved sammenligning af Figur 3.4. og 3.5 ses det at for enkelte brancher (f. eks. forkromning, forsvar mm) er der stor forskel mellem de to fingerprint analyser. Det anbefales at man i disse brancher anvender worst-case fingerprint, ved informationsniveau C

Tabel 4.7 Beregningseksempel 4.3B

PARAMETER	VÆRDI	ENHED	KOMMENTAR
Branche	25.51 Overfladebehandling af metal		
Infiltration (I)	0,075	m/år	Delvis befæstet areal
Kildens areal (A)	1000	m ²	Lig med matriklens areal
PFAS koncentration, C (PFAS4)	60000	ng/l	Baseret på tilbageberegning
Vertikal flux $J = I * C * A$	6	g/år	Baseret på den genne tilbageberegnete koncentration
Evt. korrektionsfaktor	10		
Korrigeret vertikal flux fra lokaliteten	60	g/år	Korrigeret estimat baseret, på den tilbageberegnete koncentration
Risikoflux	0,4	g/år	

Eksemplets konklusion vil derfor være, at man ikke kan udelukke, at der er en risiko. I dette tilfælde vil anbefalingen derfor være, at der bør udføres yderligere undersøgelser terrænnært for at fastslå den sande kildestyrke af kilden.

5 ANDRE OVERVEJELSER

5.1 ANBEFALINGER TIL UNDERSØGELSER

Det henvises til PFAS-Håndbogen (VMR 2022), hvor der findes flere anbefalinger til undersøgelsesstrategier for PFAS-lokaliteter.

På konkrete lokaliteter, hvor der er mistanke om kraftig forurening, kan det overvejes at supplere det almindelige undersøgelsesprogram med:

- a) Jordprøver
- b) Precursor-analyser
- c) Udvaskningstests

Helt overordnet og ligesom med alle andre typer forureninger, skal der være fokus på at undersøge kilden med både vand- og jordprøver i de øvre jordlag (0-5 m u.t.) eller (0-10 m u.t.). Hvis det ikke er muligt at udtage almindelige vandprøver, kan porevandsprøver udtages med sugeceller. Det foreslås at have særlig fokus i vand/luft overgangen på lokaliteter, hvor der er mistanke om kraftig forurening.

Den forventede tid for gennembrud, som beskrevet i afsnit 2.3, skal tages i betragtning ved valg af undersøgelsesstrategi for dybere magasiner. Det kan være relevant at udføre beregninger for ankomsttid til det underliggende magasin for at vurdere, hvornår der kan forventes, at PFAS forurening bryder gennem dæklaget. Ved vurdering af ankomsttid til underliggende magasin kan man arbejde med forskellige K_{OC} -værdier. Vurderingen kan laves ved hjælp af JAGGs vertikal transportmodul, som beskrevet i afsnit 2.3. Det foreslås endvidere at udføre en følsomhedsanalyse for betydning af K_d -værdier med afprøvning af 10% og 90% fraktilen (se Tabel 2.5, for PFOS og PFOA). I Miljøprojekt 2223, Appendix A, er der K_{OC} værdier for flere PFAS-forbindelser). Der er opmærksomhed på, at PFAS-transport ikke kan beskrives fuldstændigt af K_d -værdierne, men der tages hensyn til dette ved indførelse af den overordnede korrektionsfaktor for den vertikale risikoflux.

5.2 FLERE LOKALITETER I SAMME OPLAND

Et af de mest centrale problematikker ved risikovurdering af PFAS-lokaliteter, er tilstedeværelse af andre punktkilder samt diffuse kilder i samme opland. Jf. Region Hovedstadens paradigme for risikovurdering (RisikoGuide), og risikofluxen, beskrevet i afsnit 1, skal Miljøstyrelsens kvalitetskriterier i en eventuel fremtidig indvinding på 200.000 m³/år overholdes, når bidrag fra alle kilder i en 500 meter radius er medregnet.

Med det nuværende datagrundlag er det vanskeligt at kende bidrag fra andre kilder. Når der på lidt længere sigt skabes større klarhed over sådanne bidrag, kan det overvejes, at der ved risikovurdering af PFAS-lokaliteter også vurderes på de øvrige V1-/V2 lokaliteter indenfor en radius på 500 meter. Til disse vurderinger kan fx erfaringer fra brancherne (50% fraktilen) og den aktuelle befæstelsesgrad samt en korrektionsfaktor på 10 anvendes til at beregne den samlede belastning i et område. Her vil arealet af kilden ofte være ukendt, hvorfor der kan regnes med matrikelarealet eller 1000 m² (den mindste af de to). Det skal bemærkes, at øvelsen kan pege på nogle lokaliteter som muligt problematiske. Hvis lokaliteterne har været undersøgt før, man bruge de påviste koncentrationer af PFAS fra undersøgelserne.

Bidraget fra diffuse kilder bør der også tages højde for, men her er vidensniveauet også begrænset. Indtil der på nationalt plan bliver indsamlet viden om diffus belastning, kan der ses på, om der i nærområdet findes analyser for PFAS, som ikke kan tilskrives punktkilder.

Netop på grund af ovenstående usikkerheder om den samlede belastning af grundvandsressourcen med PFAS, er det vigtigt at anvende en korrektionsfaktor, når man sammenligner den beregnede flux fra en lokalitet med risikofluxen. Derudover bør man indhente den konkrete viden om fund i grundvandet jf. grundvandsovervågningen i området.

5.3 ANTAGELSER VEDR. FORURENET AREAL PR. BRANCHE

Som det fremgår af kapitel 2, Tabel 2.2 har PFAS haft forskellige anvendelser i forskellige brancher. Der er brancher, hvor PFAS-produkter er anvendt i stor grad i selve processen, eksempelvis forkromningsvirksomheder, mens der i andre brancher træffes PFAS-forurening fordi produkter, som anvendes i branchen, er behandlet med PFAS (eksempelvis i renserier).

Med baggrund i Tabel 2-2 er der i det følgende givet et forslag til fastsættelse af størrelsen af kilden i de enkelte brancher. Det bemærkes, at konkret viden fra lokaliteten altid skal vægtes højere end forslagene i denne tabel.

Tabel 5.1 Forslag til areal, der kan tilskrives branchen, hvis der ikke er nogen konkret viden, og matriklens areal er meget stort.

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	AREAL
Brandøvelsespladser for træning i slukning af oliebrande eller lignende	Som komponent i brandslukningsskum for at sikre effektivitet mod oliebrande. Udslip sker ved anvendelse af skummet eller forkert opbevaring.	Samme som brandøvelsespladsen + ledninger/dræn derfra + areal omkring påfyldningspladsen
Forkromningsindustri	Befugtningsmiddel, dughindrende middel og overfladeaktive stoffer (kan inkludere kalium, lithium, diethanolamin og ammonium PFOS-salte eller 6:2 FTS). Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	Samme som forkromningshallen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Tæppeindustri	Produkter til imprægnering af tæppers luvside. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	Samme som imprægneringshallen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Tekstil- og læderindustri	Bekæmpelsesmidler, imprægneringsmidler og anden overfladebehandling. Kendte PFAS-forbindelser er kun anvendt i små mængder. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	Samme som imprægneringshallen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Rensерier	Imprægnering af tekstiler. Vask af imprægnerede tekstiler. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	+ samme som renseribygningen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Malings-, lak- og limindustri	Overfladeaktive stoffer, rengøringsmidler, maling, lak, imprægneringsmidler m.m. En stor andel af de anvendte PFAS-forbindelser er kendte precursorer eller er tildelt grænseværdier. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	Produktionsområdet + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Fyldpladser for byggeaffald og ældre lossepladser for dagrenovation	Deponering af PFAS-holdigt affald. Særlig kan maling i byggeindustrien før 2002 have indeholdt PFAS-forbindelser. Udslip kan ske ved forkert ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).	Hele lossepladsens areal
Træindustri og møbelindustri	Maling og lak, trykfarver, bindemidler, farvestoffer, rengøringsmidler, rustbeskyttelsesmidler. En stor andel af de anvendte PFAS-forbindelser er kendte precursorer eller er tildelt grænseværdier.	Området, hvor påsmøring er forgået + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering

BRANCHE	BESKRIVELSE/FORMÅL MED ANVENDELSEN OG SANDSYNLIGHED FOR UDSLIP	AREAL
	Op til 56% af den indberettede mængde er kendte PFAS-forbindelser. De kendte stoffer er indberettet af op til 7 brancher per år. Risikoen for forurening fra denne branche er primært forbundet med håndtering, påsmøring og afskaffelse.	
Kemisk industri	Diverse applikationer, til overfladebehandling mm, se også maling. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Produktionshallerne + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Pap og papir	Produkter til overfladebehandling af pap, papiremballage og fødevarekontaktpapir. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Området, hvor påsmøring er forgået + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Bilindustri, herunder autoværksteder og vaskehaller	Produkter til bilpleje (bilvoks, poleringsmidler). Primært gennem kloaksystemet.	Området, hvor lakering er forgået + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Elektronikindustri	Overtræk til kabler og ledninger. Loddemidler. Overfladebehandling. Kendte PFAS-forbindelser kun anvendt i små mængder. Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Området, hvor kablerne er overfladebehandlet + kloakledninger derfra +Oplag +affaldsdeponering
Jern- og metalindustri	Maling, lak og anden overfladebehandling. Relativt store mængder af både kendte og ukendte stoffer er anvendt i denne branche. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Området, hvor påsmøring er forgået + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Gummi- og plastindustri	Overtræk til kabler og ledninger, bindemidler, maling og farvestoffer. Fremstilling af gummiprodukter er den branche, der har indberettet størst mængder af PFAS-forbindelser under denne branche. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Produktionshallen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Grafisk industri/trykkerier	PFAS har i trykkeribranchen haft en række forskellige anvendelser, såsom i printerblæk, i printerhoveder til ink-jet printere, til trykpapiret og til litografiske printplader. Da PFAS også kan findes i lim, kan det også være blevet benyttet f.eks. i forbindelse med trykning af bøger. Udslip kan ske ved forkert/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt afskaffelse af produkterne.	Trykkerihallen + kloakledninger derfra + oplag + affaldsdeponering
Lokaliteter, hvor en større kemikalie/oliebrand er slukket	Som komponent i brandslukningsskum for at sikre effektivitet mod oliebrande. Udslip sker ved anvendelse af skummet eller forkert opbevaring.	Samme som brandøvelsespladser

6 REFERENCER

- Anderson, R.H.; Long, G.C.; Porter, R.C.; Anderson, J.K. Occurrence of select perfluoroalkyl substances at U.S. Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire-training areas: Field-validation of critical fate and transport properties. *Chemosphere* 2016, 150, 678–685.
- Boutrup, S., Kjær, C., Johansson, L.S., Larsen, M.M., Poulsen, M.B., Bossi, R., Christensen, M.R. & Frank-Gopolos, T 2021. Miljøfarlige forurenende stoffer i vandmiljøet. NOVANA. Tilstand og udvikling 2008-2019. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 2–8 s. - Videnskabelig rapport nr. 466. [http://dce2.au.dk/pub/SR466Gassmann et al 2021](http://dce2.au.dk/pub/SR466Gassmann%20et%20al%202021)
- Brusseau, Mark L (2018): Assessing the potential contributions of additional retention processes to PFAS retardation in the subsurface, *Science of The Total Environment*, Volumes 613–614, 2018, Pages 176-185,
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., et al., 2011. Per-fluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), pp.513–541. Available [at: http://doi.wiley.com/10.1002/ieam.258](http://doi.wiley.com/10.1002/ieam.258).
- Chen, Shu, Xing-Chun Jiao, Nan Gai, Xiao-Jie Li, Xiao-Chun Wang, Guo-Hui Lu, Hai-Tao Piao, Zhu Rao, and Yong-Liang Yang. 2016. “Perfluorinated compounds in soil, surface water, and groundwater from rural areas in eastern China.” *Environmental Pollution* 211:124-131.<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.024>
- Coffin, E.S., Reeves, D. M., Cassidy, S. P., (2023) PFAS in municipal solid waste landfills: Sources, leachate composition, chemical transformations, and future challenges, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Volume 31, 2023
- Cousins, I.T., Johansson, J.H., Salter, M.E., Sha, B., Scheringer, M. 2022 Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) *Environmental Science & Technology*, 2022 56 (16), 11172-11179
- Gassmann M, Weidemann E, Stahl T. 2021. Combined leaching and plant uptake simulations of PFOA and PFOS under field conditions. *Environ Sci Pollut Res Int*. 28(2):2097-2107. doi: 10.1007/s11356-020-10594-6.
- GEUS 2023, Forekomst af PFAS-stoffer i de almene vandværkers boringskontrol for perioden 1/10-2022 til 30/9-2023 [BK 2023 Q3 PFAS.pdf \(geus.dk\)](#)
- Higgins, C.P.; Luthy, R.G. Sorption of perfluorinated surfactants on sediments. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40, 7251–7256.
- ITRC, 2022: Front Page (itrcweb.org) Per- and Polyfluoroalkyl Substances, Technical and Regulatory Guidance ITRC juni 2022
- Jensen, J., Fauser, P., Sanderson, H., Vorkamp, K., Andersen, R., Rasmussen, D. (2023): Derivation of cut-off values for PFAS in sewage sludge. Revised edition. Miljøprojekt 2232, marts 2023, Miljøstyrelsen.
- Lasee, S., McDermott, K., Kumar, N., Guelfo, J., Payton, P., Yang, Z., Anderson, T.A (2022) Targeted analysis and Total Oxidizable Precursor assay of several insecticides for PFAS - ScienceDirect. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2022, 3, 100067
- Li, F.; Fang, X.; Zhou, Z.; Liao, X.; Zou, J.; Yuan, B.; Sun, W. Adsorption of perfluorinated acids onto soils: Kinetics, isotherms, and influences of soil properties. *Sci. Total Environ.* 2019, 649, 504–514
- Li, Y.; Oliver, D.P.; Kookana, R.S. A critical analysis of published data to discern the role of soil and sediment properties in determining sorption of per and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Sci. Total Environ.* 2018, 628–629, 110–120.
- McGarr, J.T.; Mbonimpa, E.G., McAvoy, D.C.; Soltanian, M.R. Fate and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) at Aqueous Film Forming Foam (AFFF) Discharge Sites: A Review. *Soil Syst.* 2023, 7, 53. [https://doi.org/ 10.3390/soilsystems7020053](https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053)
- McLachlan MS, Felizeter S, Klein M, Kotthoff M, De Voogt P. 2019. Fate of a perfluoroalkyl acid mixture in an agricultural soil studied in lysimeters *Chemosphere* 223: 180-187. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.012
- Miljøstyrelsen 2023. MOF Alm.del - endeligt svar på spørgsmål 50 Miljø- og Fødevarerudvalget 2022-23 (2. samling) Offentligt MOF Alm.del - endeligt svar på spørgsmål 100 Miljø- og Fødevarerudvalget 2022-23 (2. samling). Miljøstyrelsens opgørelse af PFAS i sprøjtemidler 19. januar 2023

- Miljøstyrelsen 2023a Gældende grænseværdier for PFAS i overfladevand og drikkevand fastsat i bekendtgørelser. Opdateret 20. oktober 2023. [Brev \(mst.dk\)](#)
- Miljøstyrelsen 2023b. Nyhed af 4. oktober 2023, Nye fund af havskum med højt indhold af PFAS. [Nye fund af havskum med højt indhold af PFAS - Miljøstyrelsen \(mst.dk\)](#)
- Nguyen, T.M.H., Bräunig, J., Thompson, K., Thompson, J., Kabiri, S., Navarro, D.A., et al., 2020. Influences of Chemical Properties, Soil Properties, and Solution pH on Soil–Water Partitioning Coefficients of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs). *Environmental Science & Technology*, 54(24), pp.15883–15892. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c05705>
- Nicolajsen, E.S. & Tsitonaki, K., 2016. *Kortlægning af brancher der anvender PFAS*. Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1905
- Randrup og Hansen, 2022: Af Anne-Mette Randrup Rasmussen* og Steffen Foss Hansen** Håndtering af PFOS og PFAS i Danmark og EU , © Tidsskrift for Miljø, August 2022, Artikel 295
- Rayner, J.L., Slee, D., Falvey, S., Kookana, R., Bekele, E., Stevenson, G., Lee, A., Davis, G.B. 2022 Laboratory batch representation of PFAS leaching from aged field soils: Intercomparison across new and standard approaches *Science of The Total Environment*, Volume 838, Part 4, 2022,156-562,
- Saawarn, 2022: Bhavini Saawarn, Byomkesh Mahanty, Subrata Hait, Sahid Hussain, Sources, occurrence, and treatment techniques of per- and polyfluoroalkyl substances in aqueous matrices: A comprehensive review, *Environmental Research*, Volume 214, Part 4, 2022, 114004, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114004>.
- Silva, J.A.K.; Martin, W.A.; McCray, J.E. Air-water interfacial adsorption coefficients for PFAS when present as a multi-component mixture. *J. Contam. Hydrol.* 2021, 236, 103731. [CrossRef]
- Söregård, M.; Östblom, E.; Köhler, S.; Ahrens, L. Adsorption behavior of per- And polyfluoroalkyl substances (PFASs) to 44 inorganic and organic sorbents and use of dyes as proxies for PFAS sorption. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103744.
- Thorling, L., Albers, C.N., Hansen, B., Johnsen, A.R., Kazmierczak, J., Mortensen, M.H. & Troldborg, L., 2023: Grundvand. Status og udvikling 1989–2021. Teknisk rapport, GEUS 2023.
- Wang, Y.; Khan, N.; Huang, D.; Carroll, K.C.; Brusseau, M.L. Transport of PFOS in aquifer sediment: Transport behavior and a distributed-sorption model. *Sci. Total Environ.* 2021, 779, 146444
- You, C.; Jia, C.; Pan, G. Effect of salinity and sediment characteristics on the sorption and desorption of perfluorooctane sulfonate at sediment-water interface. *Environ. Pollut.* 2010, 158, 1343–1347.
- VMR (2022) Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS-forbindelser Teknik og Administration Nr 1. 2022. Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer
- VMR 2022a Faktark for PFAS i forskellige brancher. Udarbejdet af NIRAS for Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer, september 2022. Findes her [Branchebeskrivelser \(miljoeogressourcer.dk\)](#)

BILAG

A TITEL



BILAG

A-1 TITEL

