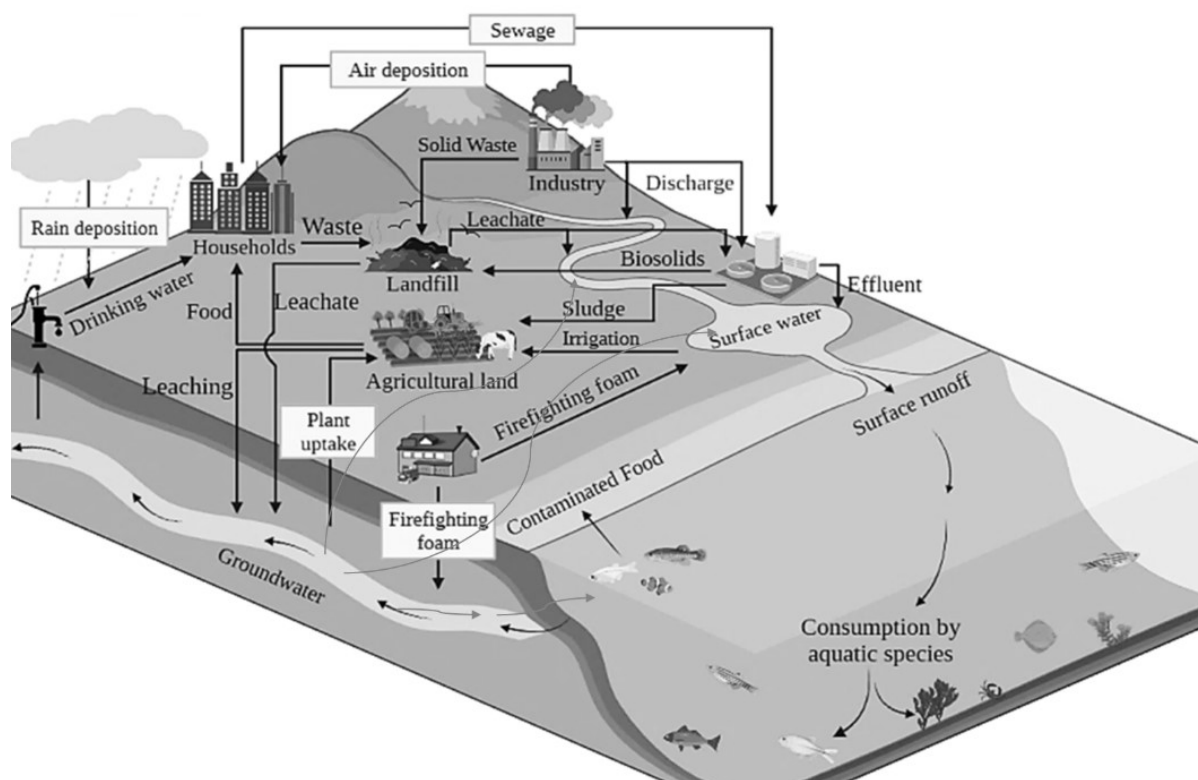


MILJØSTYRELSEN

OVERBLIK OVER VIDEN OM PFAS TIL VURDERING AF GRUNDVANDETS MU- LIGE PÅVIRKNING AF OVERFLADE- VAND

DECEMBER 2023

Dato: 2024-01-02





Projektnavn:	Overblik over viden om PFAS til vurdering af grundvandets mulige påvirkning af overfladevand
WSP projektnr.:	22001582
Kundens projektnr.:	8554628
Projektleder:	Sandra Roost
Udarbejdet af:	Katerina Tsitonaki, Stine Priess og Sandra Roost
Kvalitetssikret af:	Katrine Hauge Smith
Godkendt af:	Sandra Roost

INDHOLD

FORORD 4

1	BAGGRUND	5
1.1	HISTORIK	6
1.2	GRÆNSEVÆRDIER OG MILJØKVALITETSKRAV	7
1.3	DETEKTIONSGRÆNSER	9
2	PFAS-KREDSLØBET	10
2.1	KILDER	10
2.2	SKÆBNE, TRANSPORT OG PROCESSER	12
3	FUND I DANMARK OG UDLANDET	20
3.1	SPILDEVAND OG SPILDEVANDSSLAM	20
3.2	EMISSIONER TIL ATMOSFÆREN	25
3.3	REGNVAND	26
3.4	VANDLØB	28
3.5	SØER	43
3.6	KYSTER OG FJORDE	46
3.7	GRUNDVAND	51
3.8	JORD	60
4	OVERBLIK OVER PFAS I MILJØET	62
5	OPSAMLING	64
5.1	OPSAMLING PÅ DANSKE DATA	64
5.2	OPSAMLING OP UDENLANDSKE DATA	66
	REFERENCER	67
BILAG 1	ANVENDELSE OG REGULERING- VIGTIGE ÅRSTAL	71

FORORD

Dette notat har fokus på at skabe overblik over PFAS-kilder og deres påvirkning af overfladevand, således at det nemmere kan vurderes om indhold af PFAS i grundvand i betydende omfang kan forklare forekomst af PFAS i overfladevand.

Formålet er at lave en opsamling omkring PFAS-kilder og mulige spredningsveje ved at få overblik over nuværende data i overfladevand og grundvand. Der er tale om en opsamling af eksisterende viden i Danmark og i udlandet i forhold til forskellige medier, hvor der er konstateret PFAS-forbindelser.

Notatet er bygget op således:

Der indledes med et kort baggrundsafsnit, herunder en gennemgang af historik for brug af PFAS-forbindelse, en oversigt over grænseværdier og miljøkvalitetskrav, samt en beskrivelse af udvikling af detektionsgrænser.

Det efterfølgende afsnit indeholder en opsamling på PFAS-kredsløbet, herunder kilder til forurening af miljøet samt skæbne, transport og processer for PFAS-forbindelser i miljøet.

Herefter følger et afsnit om fund i Danmark og udlandet frem til oktober 2023. Dog indeholder enkelte udtræk kun data frem til november 2022. Dette fremgår i de enkelte afsnit. Opsamlingen indeholder en gennemgang af følgende medier og det fremgår:

- Spildevand og spildevandsslam (potentielle kilder til PFAS)
- Forbrændingsanlæg (potentiel kilde til PFAS)
- Regnvand
- Vandløb inkl. punktkilder iht. Jordforureningsloven
- Søer
- Kyster og fjorde
- Grundvand inkl. punktkilder iht. Jordforureningsloven
- Jord

Efterfølgende kommer et afsnit med et overblik over PFAS-forbindelser i miljøet ud fra en konceptuel figur, der tager udgangspunkt i PFAS-kredsløbet.

Afslutningsvist følger et afsnit med en opsamling af de væsentligste data for Danmark og udlandet.

1 BAGGRUND

WSP er blevet anmodet af Miljøstyrelsen om at udarbejde et notat, der beskriver PFAS-kilder og spredningsveje til miljøet med henblik på at muliggøre vurdering af, om indhold af PFAS-forbindelser i grundvand i betydende omfang kan forklare forekomst af PFAS-forbindelser i overfladevand. Notatet indgår som en del af Miljøstyrelsens arbejde med EU's vandrammedirektiv, hvor der ønskes overblik over, hvorledes grundvandsforekomster påvirker overfladevand. PFAS-forurening kan stamme fra mange forskellige kilder og findes mange forskellige steder i miljøet.

Der er derfor behov for at skabe overblik over nuværende data om PFAS i forhold til overfladevand og grundvand samt en kortlægning af kilder til forurening med PFAS. I notatet er der taget udgangspunkt i vanddata for overfladevand fra databasen VanDa. Data omfatter blandt andet data fra regionernes undersøgelser af jordforureninger, der kan true overfladevand, og data fra NOVANA-overvågningen. I NOVANA har overvågningen af PFAS i overfladevand siden 2017 udelukkende været foretaget i biota, fordi miljøkvalitetskravet for PFOS i biota er fastsat med større sikkerhed end miljøkvalitetskravet for PFOS i vand. Biota-data er dog ikke inddraget i notatet, idet det ikke er vurderet meningsfyldt i forbindelse med vurdering af grundvandets potentielle påvirkning af overfladevand. Fordi formålet med rapporten er at danne grundlag for grundvandets potentielle påvirkning af overfladevand, og grundvandskvalitetskriterierne danner baggrund for tilstandsvurderingen af grundvand, er data i dette notat – uanset om de stammer fra grundvand eller overfladevand – i vidt omfang sammenholdt med grundvandskvalitetskriterierne for PFAS.

PFAS-forbindelser er en gruppebetegnelse for et stort antal fluorerede forbindelser, der betegnes som PerfluorAlkyl- og PolyfluorAlkyl-forbindelser. Gruppen omfatter mere end 4700 forskellige forbindelser, og nogle literaturkilder estimerer op til 10.000 forskellige forbindelser (VMR, 2022; ITRC 2022). PFAS forbindelser er persistente på grund af den meget stærke fluor-kulstofbinding i molekylerne. I nærværende notat er der fokus på de 22 udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS 22), som indgår i det vejledende grundvandskvalitetskriterium for grundvand i henhold til Miljøbeskyttelsesloven §14 (Miljøstyrelsen, 2022a). En oversigt PFAS 22 kan ses i Tabel 1.1.

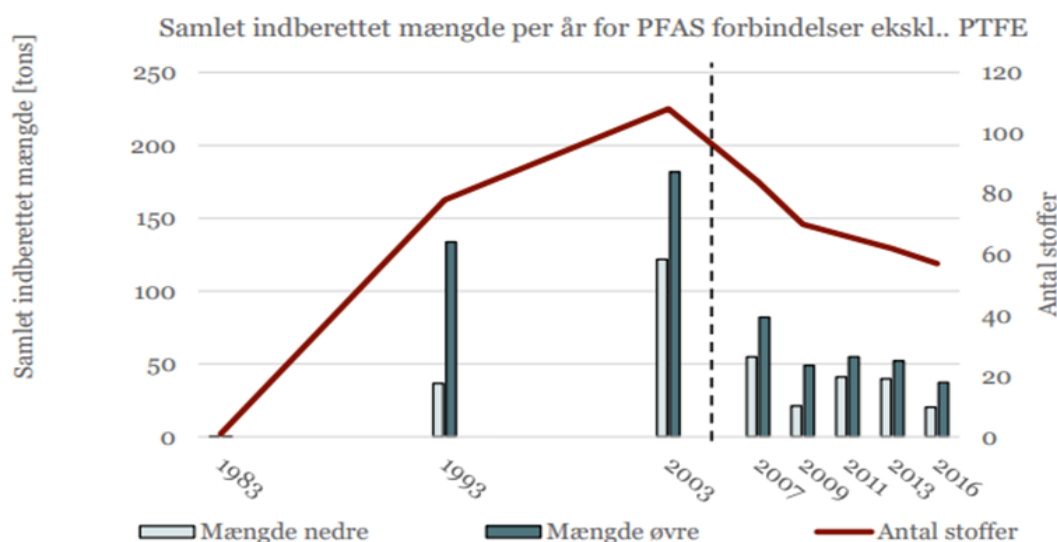
Tabel 1.1 De 22 udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS 22) omfattet af Miljøstyrelsens vejledende grundvandskvalitetskriterier for jord og grundvand. Forbindelser med rød skrift udgør de 4 PFAS-forbindelser (PFAS 4), hvor der er en skærpet grænseværdi (VMR, 2022)

	Forkortelse	CAs nr	Formel	Navn	Antal C i C-F kæden
PFCA'er	PFBA	375-22-4	C ₃ F ₇ •COOH	Perfluorbutansyre	3
	PFPeA	2706-90-3	C ₄ F ₉ •COOH	Perfluorpentansyre	4
	PFHxA	307-24-4	C ₅ F ₁₁ •COOH	Perfluorhexansyre	5
	PFHpA	375-85-9	C ₆ F ₁₃ •COOH	Perfluorheptansyre	6
	PFOA	335-67-1	C ₇ F ₁₅ •COOH	Perfluoroktansyre	7
	PFNA	375-95-1	C ₈ F ₁₇ •COOH	Perfluornonansyre	8
	PFDA	335-76-2	C ₉ F ₁₉ •COOH	Perfluordecansyre	9
	PFUnDA	2058-94-8	C ₁₀ F ₂₁ •COOH	Perfluorundecasyre	10
	PFDoDA	307-55-1	C ₁₁ F ₂₃ •COOH	Perfluordodecansyre	11
	PFTTrDA	72629-94-8	C ₁₂ F ₂₅ •COOH	Perfluortridecansyre	12
PFSA'er	PFBS	375-73-5	C ₄ F ₉ •SO ₃ H	Perfluorbutansulfonsyre	4
	PFPeA	2706-91-4	C ₅ F ₁₁ •SO ₃ H	Perfluorpentansulfonsyre	5
	PFHxS	307-55-1	C ₆ F ₁₃ •SO ₃ H	Perfluorhexansulfonsyre	6
	PFHpS	375-92-8	C ₇ F ₁₅ •SO ₃ H	Perfluorheptansulfonsyre	7
	PFOS	1 763-23-1	C ₈ F ₁₇ •SO ₃ H	Perfluoroktansulfonsyre	8
	PFNS	68259-12-1	C ₉ F ₁₉ •SO ₃ H	Perfluornonansulfonsyre	9

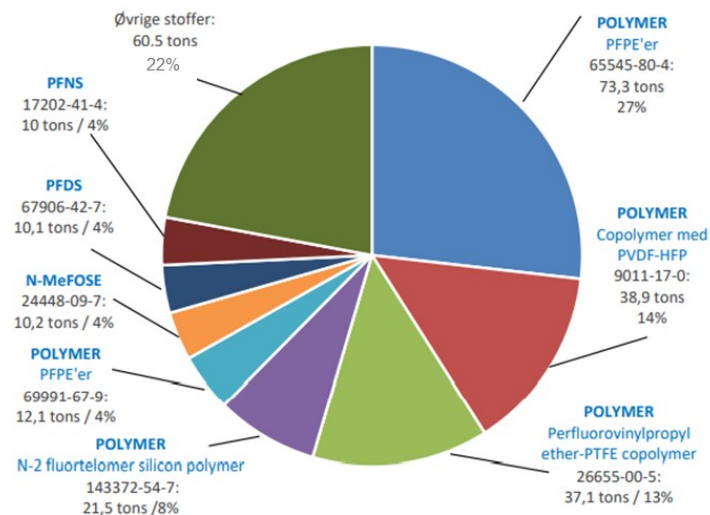
	PFDS	335-77-3	$C_{10}F_{21} \bullet SO_3H$	Perfluordecansyre	10
	PFUnDS	749786-16-1	$C_{11}F_{23} \bullet SO_3H$	Perfluorundecn sulfonsyre	11
	PFDoDS	79780-39-5	$C_{12}F_{25} \bullet SO_3H$	Perfluordodecansulfonsyre	12
	PFTTrDS	791563-89-8	$C_{13} F_{27} \bullet SO_3H$	Perfluortridecansulfonsyre	13
Precursorer	PFOSA (FOSA)	754-91-6	$C_8F_{17} \bullet SO_2 \bullet NH_2$	Perfluoroktansulfonamid	8
	6 :2 FTS (6 :2 FTSA)	27619-97-2	$C_6F_{13} \bullet C_2H_4 \bullet SO_3H$	6:2 Fluortelomersulfonat (1H,1H,2H,2H-Perfluoroktansulfon- syre)	6

1.1 Historik

Den første PFAS-forbindelse, PTFE, blev første gang syntetiseret i 1938 og er blevet produceret siden 1949. I perioden 1966-2000 er PFAS-forbindelser blevet produceret og anvendt meget bredt i industrien og i forbrugerprodukter, såsom tæpper, møbler, rengøringsmidler, maling, brandslukningsskum, (mad)emballage m.m. Der har aldrig været produktion af PFAS-forbindelser i Danmark. Dataudtræk fra Produktregisteret (Miljøstyrelsen, 2016) 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 forbindelser (se Figur 2.1). Forbindelsen, PTFE, er ikke medtaget, idet PTFE anses som en stabil fluoropolymer, der ikke nedbrydes til mere problematiske PFAS forbindelser (SCA, 2006). Desuden viser data fra Produktregisteret (Miljøstyrelsen 2016), at tre polymerstoffer (PFPE'er, copolymer med PVDF-HFP og perfluorovinylpropyl ether-PTFE copolymer) står for over 50% af de indberettede forbindelser (Figur 2.2).



Figur 1.1 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 (Miljøstyrelsen, 2016).



Figur 1.2 De mest dominerende PFAS-forbindelser indberettet til det danske produktregister for hele indberetningsperioden fra 1983-2016 (Miljøstyrelsen, 2016)

I 2000 begyndte der at komme øget opmærksomhed på PFAS-forbindelsernes sundhedsskadelige effekter, hvilket også blev 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 forbindelser har siden 2009 været på listen over forbudte forbindelser under Stockholm-konventionen, 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 fødevareemballage i Danmark. En oversigt over de vigtigste årstal kan ses i bilag 1. I 2022 blev PFHxS, dets salte og PFHxS-relaterede kemikalier optaget under Stockholmkonventionen, og i august 2023 blev PFHxS, dets salte og PFHxS-relaterede kemikalier tilføjet til POP-forordningen med visse undtagelser.

1.2 Grænseværdier og miljøkvalitetskrav

En oversigt over de pr. oktober 2022 gældende grænseværdier og miljøkvalitetskrav i forskellige medier kan ses i Tabel 2.2. I Danmark er der fastsat krav i henhold til gældende bekendtgørelse samt kriterier i henhold til vejledning fra Miljøstyrelsen. Både kravene og kriterierne anvendes i forbindelse med vurdering af påvirkning afhængig af medier, forbindelser og/eller sum af PFAS-forbindelser.

Tabel 1.2 Oversigt over gældende grænseværdier og kvalitetskrav pr. oktober 2022

Medie	Forbindelse	Grænseværdi/kvalitetskrav (Grundvandskvalitetskriterier/ miljøkvalitetskrav)	Bemærkning
Jord	PFAS 4* PFAS 22**	0,01 mg/kg TS 0,4 mg/kg TS	Vejledende i henhold til § 14 i Miljøbeskyttelsesloven ⁺ , MST, juli 2021 ⁺⁺
Grundvand	PFAS 4* PFAS 22**	0,002 µg/l 0,1 µg/l	Vejledende i henhold til § 14 i Miljøbeskyttelsesloven ⁺ , MST, juli 2021 ⁺⁺
Drikkevand	PFAS 4* PFAS 12****	0,002 µg/l 0,1 µg/l	Drikkevandsbekendtgørelsen BEK nr. 1383 af 03/10/2022
Overfladevand-ferskvand	PFOS***	0,00065 µg/l (generelt kvalitetskrav) 36 µg/l (maksimumkoncentration)	Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand BEK nr. 1625 af 19/12/2017
Overfladevand-saltvand	PFOS***	0,00013 µg/l (generelt kvalitetskrav) 7,2 µg/l (maksimumkoncentration)	Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand BEK nr. 1625 af 19/12/2017
Overfladevand-biota	PFOS***	9,1 µg/kg vådvægt (fisk)	Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand BEK nr. 1625 af 19/12/2017
Badevand	PFAS 4 og PFAS 12 Se under drikkevand	Ingen kriterier. WHO har foreslået at drikkevandskvalitetskrav kan bruges som udgangspunkt til at udlede kriterier. Styrelsen for Patientsikkerhed har angivet en vejledende grænseværdi på 20 gange drikkevandskvalitetskravet.	MOF Almdel endeligt svar på spørgsmål 292 Bilag 1 MSTs notat om PFAS i skimmelag til MOF spm 292pdf (ft.dk)
Slam	PFAS 4 og PFAS 12 Se under jord		Bilag 1 - Vejledende grænseværdi for PFAS i spildevandsslam (mst.dk)

PFAS 4*: PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS

PFAS 22** SE Tabel 1.1

***PFOS og derivativer, dvs. PFOS relaterede forbindelser defineret som flere eller alle forbindelser, der indeholder en PFOS-struktur og kan omdannes i miljøet til PFOS, f.eks. PFOSA og EtFOSE, EtFOSSA og N-etFOSA m.v

****PFAS 12: Ved PFAS-forbindelser forstås: PFBS (perfluorbutansulfonsyre), PFHxS (perfluorhexansulfonsyre), PFOS (perfluoroctansulfonsyre), PFOSA (perfluoroctansulfonamid), 6:2 FTS (6:2 fluorotelomersulfonsyre), PFBA (perfluorbutansyre), PFPeA (perfluoropentansyre), PFHxA (perfluorhexansyre), PFHpA (perfluorheptansyre), PFOA (perfluoroctansyre), PFNA (perfluorononansyre) og PFDA (perfluordecansyre).

+Miljøbeskyttelsesloven. Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse. LBK nr. 1218 af 25/11/2019

++MST, Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord, opdateret juli 2021

1.3 Detektionsgrænser

Der er sket en udvikling i analysemetoder for PFAS-forbindelser samt grænseværdierne og miljøkvalitetskrav for disse forbindelser, som har gjort, at detektionsgrænsen har ændret sig. Derudover vil der være forskel i detektionsgrænserne for udenlandske data i forhold til de danske, og dette vanskeliggør sammenligninger.

I forbindelse med nærværende notat, er der taget kontakt til to laboratorier, ALS og Eurofins. De har oplyst, at det i 2015 blev muligt for laboratorierne i Danmark at reducere detektionsgrænsen fra 0,01 µg/l til 0,001 µg/l for PFAS-forbindelserne. Ændringer i detektionsgrænsen sker ofte på baggrund af udbud og efterspørgsel, og ændringer kan også ske som følge af, at detektionsgrænsen ligger tæt på grænseværdien/miljøkvalitetskravet. Da Miljøstyrelsen i 2021 varslede lavere grænseværdi for PFAS 4 i grundvand og drikkevand, var det også nødvendigt at reducere detektionsgrænsen for de enkelte PFAS-forbindelser, hvilket skete i 2022, hvor detektionsgrænsen gik fra 0,001 µg/l til 0,00003 µg/l. For at kunne reducere detektionsgrænsen til dette niveau har laboratorierne skulle investere i bedre teknisk udstyr og sikre lave blindniveauer. For at kunne styre blindniveauerne er der optimeret på emballage, vand og solventer. For PFTTrDA, PFDoDS, PFTeDS og PFUnDS er det på nuværende tidspunkt ikke teknisk muligt for de to mest anvendte laboratorier i Danmark, Eurofins og ALS, at opnå en detektionsgrænse på 0,00003 µg/l. I 2022 lå detektionsgrænsen for disse forbindelser på 0,1 µg/l for analyser af grundvand.

I Danmark opgives koncentrationer fra laboratorierne helt ned til detektionsgrænsen, hvor det i udlandet nogle steder kun opgives ned til kvantifikationsgrænsen. Kvantifikationsgrænsen er defineret som 3*detektionsgrænsen.

Endelig viser erfaringer fra bl.a. prøvetagning i vandløb, at på grund af de lave indhold af PFAS-forbindelser, der skal detekteres i vandprøverne, kan resultaterne påvirkes af matrixinterferens. Dette kan iflg. laboratorierne bl.a. skyldes forskellige former for partikler, jord og chlorid, som kan give forskellig matrixinterferens for forskellige PFAS-forbindelser og dermed påvirke detektionsgrænsen forskelligt.

I nærværende notat vil det have betydning for sammenstilling af data for summen af PFAS-forbindelser, da resultater under detektionsgrænsen, ved beregning af sum af PFAS-forbindelser, anses som nulværdier, og dermed ikke indgår i summen. Derfor kan der være en forskel i datasættene, som f.eks. gør at i nogle tilfælde anvendes en specifik værdi i datasættet, mens denne værdi i et andet datasæt kan ligge under den pågældende detektionsgrænse.

2 PFAS-KREDSLØBET

2.1 Kilder

Der er identificeret mere end 200 anvendelser af PFAS-forbindelserne i forskellige industrier og produkter, hvilket har medført, at PFAS-forbindelserne har spredt sig i det globale miljø. Et udpluk af de mest almene applikationer kan ses i Tabel 2.1, hvor de er sammenkoblet med mulige spredningsveje til miljøet.

Hovedkilder til PFAS-udslip i miljøet er internationalt beskrevet som jf. (ITRC, 2022):

- Industrier, der producerer PFAS eller anvender PFAS i deres produktion af andre produkter.
- Arealer, hvor man anvender eller opbevarer PFAS-holdigt brandslukningsskum.
- Affald, der indeholder PFAS-forbindelser og deponeres på lossepladser og/eller forbrændingsanlæg.
- Spildevand eller spildevandsslam, der indeholder PFAS-forbindelser fra almene eller kommunale anlæg. Her er der tale om en indirekte kilde/tilførselsvej for PFAS-forbindelser, da Miljøstyrelsen ikke anser spildevand som en egentlig kilde til miljøfarlige forurenende stoffer.

Med udgangspunkt i ovenstående, samt konkrete aktiviteter i Danmark, er de nævnte brancher i Tabel 2.1 identificeret som de mest kritiske kilder for et udslip til grundvand eller overfladevand (VMR, 2022; Miljøstyrelsen, 2016).

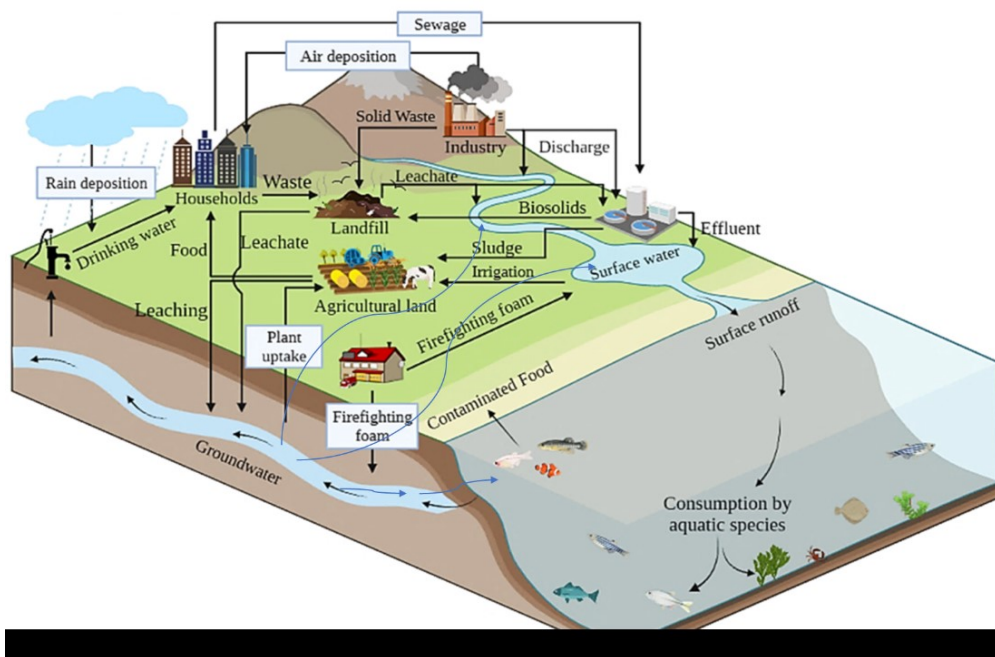
Tabel 2.1 Oversigt over de vigtigste PFAS anvendelser. Modificeret fra (Miljøstyrelsen, 2016) med input fra VMRs faktaark om PFAS (VMR, 2022 og NIRAS, 2021)

Branche	Beskrivelse/formål med anvendelsen	Sandsynlighed for udslip
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.
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 opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning) samt bortskaffelse af produkterne.
Tæppeindustri	Produkter til imprægnering af tæppers luvside.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning) samt bortskaffelse af produkterne.
Tekstil- og læderindustri	Bekæmpelsesmidler, imprægneringsmidler og anden overfladebehandling. Kendte PFAS-forbindelser er kun anvendt i små mængder.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning) samt bortskaffelse af produkterne.
Renserier	Imprægnering af tekstiler. Vask af imprægnerede tekstiler.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning).
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 opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning) samt bortskaffelse af produkterne.

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 fra ældre, lossepladser (etableret før Miljøbeskyttelsesloven i 1974), der ikke har etableret foranstaltninger til sikring af udslip til miljøet. Udslip kan også potentielt ske fra nedknust byggeaffald forurennet med fx PFAS-holdigt maling.
Træindustri og møbelindustri	Maling og lak, trykfarver, bindemidler, farvestoffer, rengøringsmidler, rustbeskyttelsesmidler. En stor andel af de anvendte PFAS-forbindelser er kendte precursors eller er tildelt grænseværdi. 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 bortskaffelse.
Kemisk industri	Diverse applikationer, til overfladebehandling mm, se også maling.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt bortskaffelse af produkterne.
Pap og papir	Produkter til overfladebehandling af pap, papiremballage og fødevarekontaktpapir.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt bortskaffelse af produkterne.
Bilindustri, herunder autoværksteder og vaskehaller	Produkter til bilpleje (bilvoks, poleringsmidler).	Primært gennem kloaksystemet.
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 bortskaffelse af produkterne.
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 opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt bortskaffelse af produkterne.
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 opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt bortskaffelse af produkterne.
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-forbindelser også kan findes i lim, kan det også være blevet benyttet f.eks. i forbindelse med trykning af bøger.	Udslip kan ske ved forkert opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem kloak (utætheder og udledning), samt bortskaffelse af produkterne.
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.

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 fortsat godkendt i Danmark, og malathion har været godkendt og produceret i Danmark	Udslip kan ske ved forkert opbevaring/spild ved opbevaring eller igennem anvendelse af stoffer til landbruget. Desuden ved produktion af stofferne, samt ved pesticid-punktkilder (vask af sprøjtemaskiner) eller bortskaffelse af produkter/beholdere .
--------------------------	--	--

Figur 2.1 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 overfladevand.



Figur 2.1 Kilder og spredningsveje af PFAS i miljøet . Modificeret fra (Saawarn, 2022)

Indirekte udslip af PFAS-forbindelser i miljøet omfatter udslip, relateret til de store mængder PFAS-holdige forbrugerprodukter, som ender i affald og spildevand. Det er således 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.

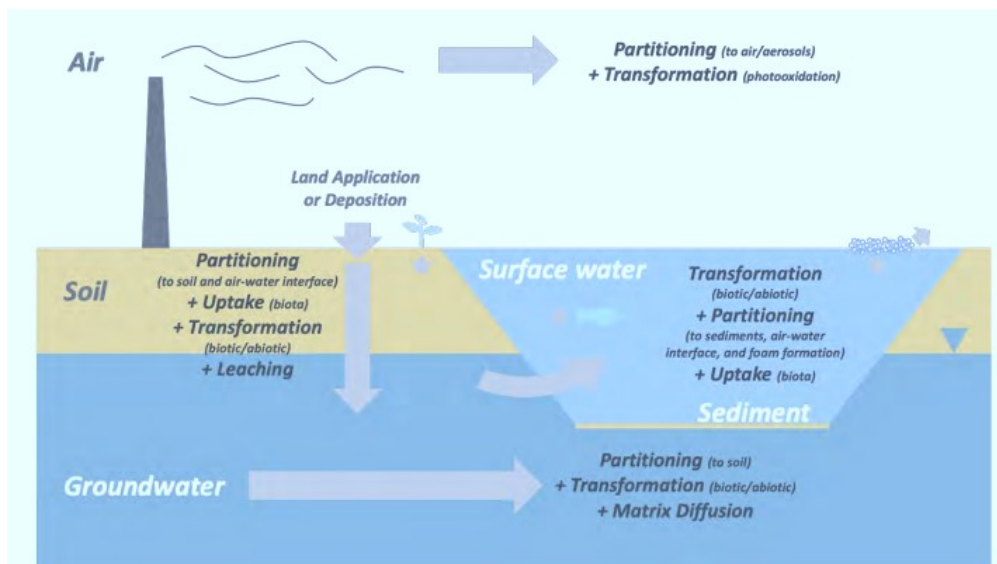
PFAS-forbindelsernes store tilstedeværelse i det globale miljø i kombination med deres persistens gør, at PFAS-forurening følger det naturlige vand- og fødekædekredsløb.

2.2 Skæbne, transport og processer

I dette afsnit bliver der givet en kort oversigt over de vigtigste processer, der styrer fordeling, transport og skæbne af PFAS i miljøet. Da PFAS er en meget stor gruppe af forbindelser med forskellige egenskaber, kan det

være svært at generalisere. I dette afsnit er der derfor fokus på de vigtigste processer og på udvalgte PFAS-forbindelser (PFAS 22 samt kendte precursorer som FTOH'er (fluoropolymer alkoholer)).

PFAS-forbindelsernes skæbne og transport styres af både deres fysisk-kemiske egenskaber (længden af kulstofskæde, ioniseret form eller ej, molekylets opbygning og fordeling af funktionelle grupper) og mediets karakteristika (dvs. jordtype, permeabilitet, infiltrationsrate, redoxpotential osv.). De vigtigste processer er illustreret i Figur 2.2 og gennemgået hver for sig i de følgende afsnit.



Figur 2.2 De vigtigste processer der styrer PFAS fordeling, transport og transformation i miljøet. (Modificeret fra Adamson, 2020)

2.2.1 Fordeling (partitioning)

PFAS-forbindelsernes struktur består af en hydro- og lipofob C-F hale og en ikke fluorholdig polær funktionel gruppe, som er hydrofil. Det betyder, at PFAS-forbindelsernes ene ende skyer vand, fedt og organisk kulstof, mens molekylets andet ende er hydrofil (vil gerne fordele sig i vand) (Buck et al., 2011, ITRC, 2022). Denne konflikt resulterer i meget komplicerede fordelingsegenskaber, som afhænger af den specifikke struktur, koncentration og selve mediets egenskaber, herunder om der f.eks. er tale om en jord med højt indhold af organisk kulstof eller ej. Generelt gælder det, at PFAS-forbindelser har en tendens til at akkumulere i overgangsfaser (vand/jord) (jord/luft) (vand/luft) (Brusseau, 2018).

PFAS-forbindelser akkumuleres i vand/luft overflade. Stofferne er stabile i denne grænseflade, da stoffernes polære del (syre med negativ ladning) vil være i vandfasen og blive fastholdt af polære vandmolekyler, mens stoffernes upolære del (kæde af fluorerede kulbrinter) vil bindes i luftfasen. Der vil således kunne ske en opkoncentrering i vandoverfladen og følgelig havskum og i aerosoler, som dannes når bølger brydes (NIRAS 2023). Denne tendens fører til yderligere transport med f.eks. havskum aerosoler, se i Figur 2.2.

I Tabel 2.2 angives en række fysisk-kemiske parametre for PFAS 22. Der findes meget få data for damptryk og fordelingskoefficient mellem vand og luft for PFAS. 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. Alle PFAS 22 forbindelser er anioniske og kan sorbere til luftbårne partikler (aerosoler) og spredes videre derfra.

Tabel 2.2 De vigtigste fysisk-kemiske parametre og fordelingskoefficienter for udvalgte PFAS-forbindelser, modificeret fra (VMR, 2022; Nguyen, 2020). Kd værdier er eksperimentelle fra laboratorieforsøg (Nguyen et al., 2020)

Forbindelser	Antal C I C-F kæden	Opløselighed mg/l	Damptryk PA	Kow	LOGKow	Kd SAND (SAND, Foc 0,4%)	Kd LER (Foc 0,17 %)	Pka	Kaw
PFBA	3	560000	3900	0,0006	2,82	0,06	0,3	0,85	0,0006
PFPeA	4	112600	1350	0,001	3,43	0,04	0,28	0,81	0,001
PFHxA	5	21700	457	0,003	4,08	0,5	0,29	0,84	0,003
PFHpA	6	4200	158	0,006	4,67	0,3	0,84	0,82	0,006
PFOA	7	9500	54	0,01	5,3	0,53	0,86	0,9	0,01
PFNA	8	1200	18,6	0,03	5,92	1,27	2,46	0,82	0,03
PFDA	9	5140	6,6	0,05	6,5	7,53	11,46	-0,17	0,05
PFUnDA/ PFUnA	10	93	2,2	0,12	7,15	11,7	45,1	-0,17	0,12
PFDoDA	11	0,7	0,7	0,26	7,77	93,1	187,8	-0,17	0,26
PFTTrDA	12	0,2	0,3	0,42	8,25				0,42
PFBS	4	30000	631	0,002	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	0,004	5,17	0,28	0,63	-3,45	0,004
PFHpS	7	465	-	-	4,81	0,95	2,73		
PFOS	8	570	6,8	0,02	6,43	3,22	5,66	-3,41	0,02
PFNS	9	222	1,5	0,07	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	0,01	5,62	0,19	0,87	6,24	0,01
6:2 FTS	6	1300	0,11	0,00001	4,44	15,58	12,82	1,31	0,00001

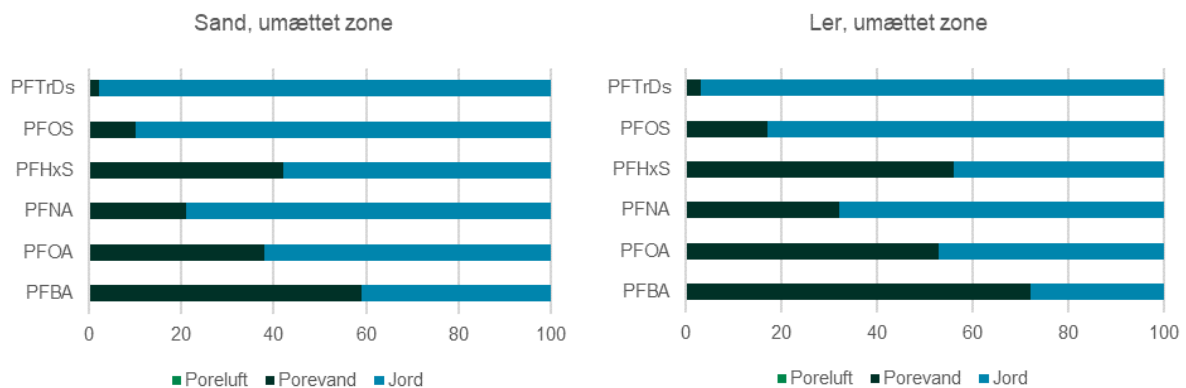
PFAS-transport i jord og grundvand (se Figur 2.2) er bl.a. afhængig af PFAS-forbindelsens binding til jordpartikler, som sker gennem to primære mekanismer:

- 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 ikke-lineær med højere adsorption ved lave koncentrationer for forbindelser såsom PFOS (Chen et al., 2016).
- Elektrostatiske interaktioner, som afhænger meget af jordens ladning og er meget følsom over for pH. F.eks. er de fleste lerjorde negativt ladet. PFOS og PFOA er også negativt ladet 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.

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

PFAS-forbindelsernes tendens til at akkumulere i vand/luft overgangen har også en stor betydning for PFAS-transport i den umættede zone (Figur 2.2). Her kan det forventes, at nogle PFAS-forbindelser vil samle 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 forbindelserne igennem den umættede zone. Denne effekt forventes at være størst i lokaliteter med en tyk umættet zone.

I Figur 2.3 angives fasefordeling for seks udvalgte PFAS-forbindelser i den umættede zone for to forskellige jordtyper (sand og jord). Der er set på PFAS 4 (PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS) samt den korteste og den længste PFAS-forbindelse blandt PFAS 22, PFBA og PFTrDS.



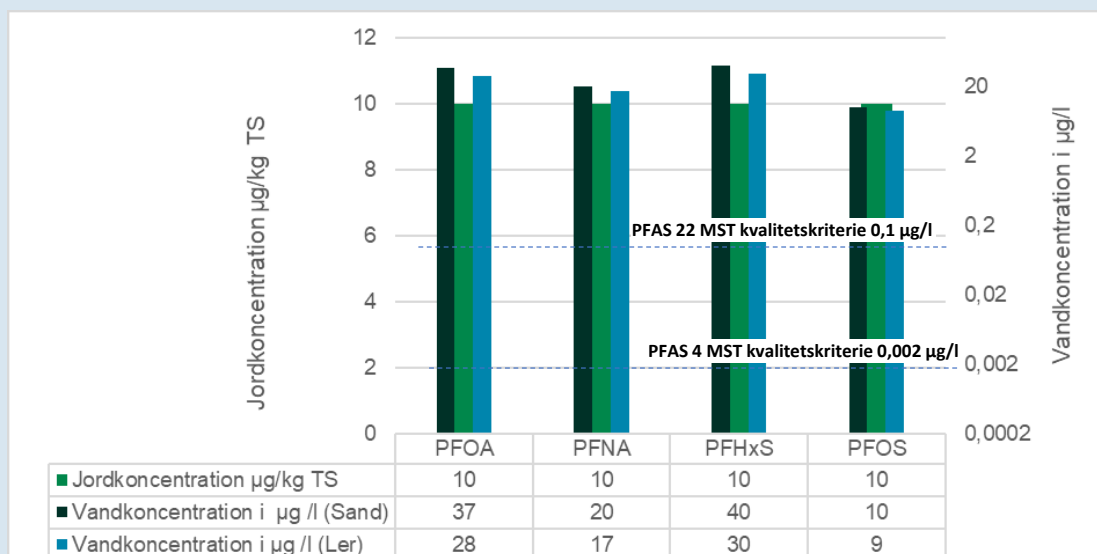
Figur 2.3 Fordeling af udvalgte PFAS-forbindelser i poreluft, porevand og jord i den umættede zone for sand og lerjorde med foc på 0,1%. Det ses en forsvindende lille andel i poreluft. Baseret på data og beregninger fra (VMR, 2022) ved brug af standard parametre for ler og sandjord i JAGG 2.1.

2.2.2 Diffusion

En vigtig mekanisme i jord- og grundvandssystemet er diffusion. Da PFAS-forbindelser er persistente, kan diffusion i lavpermeable medier på forurenede lokaliteter resultere i et langvarigt bidrag med PFAS-forurening. Overordnet set kan der forventes højere diffusionskoefficienter, jo mindre PFAS-molekylerne er (Shæffer, 2019).

BOKS 1: Jordkoncentrationer vs. vandkoncentrationer

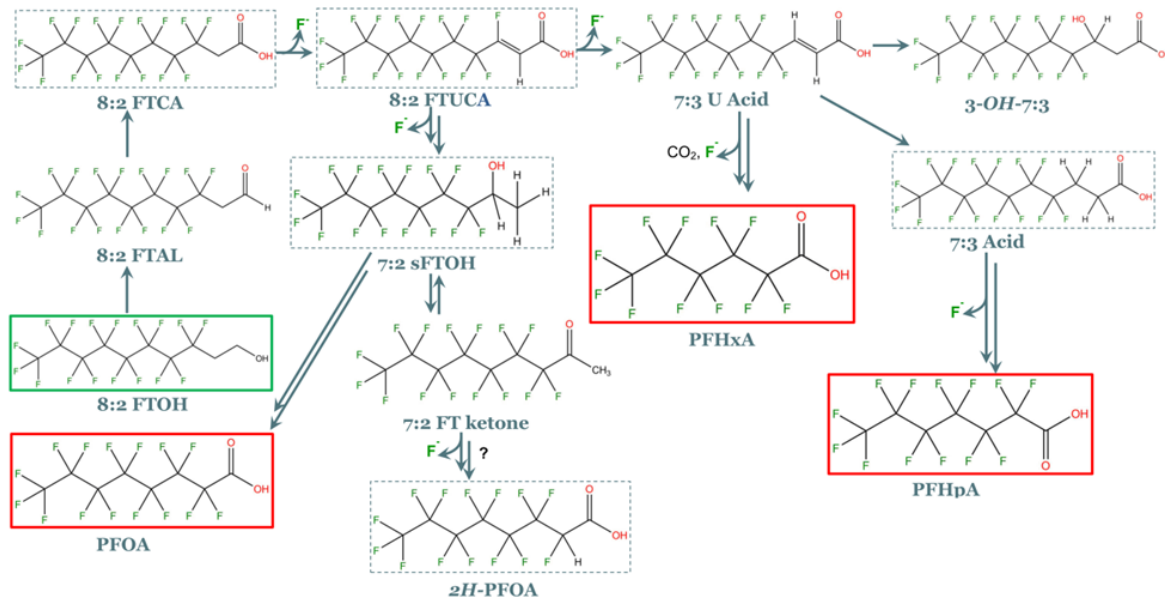
Som beskrevet tidligere, så er der forskellige detektionsgrænser for jord- og vandprøver, hvor detektionsgrænsen for jordprøver ligger i størrelsesordenen 0,01 µg/kg, mens detektionsgrænser for vand ligger i størrelsesorden 0,3 ng/l. Set i lyset af, at mange PFAS-forbindelser fordeler sig i både vand 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 kvalitetskriterie i jord på 10 µg/kg TS. Porevandskoncentrationer er beregnet i hhv. sand og lerjord for median Koc 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 i grundvand.



2.2.3 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. 20 forbindelser fra PFAS 22 er slutprodukter, herunder PFOS og PFOA. Det er kun 6:2 FTS og PFOSA, der kan transformeres yderligere. PFOSA er kendt precursor til PFOS, mens 6:2 FTS muligvis kan transformeres til PFPeA og PFHxA (VMR 2022). Generelt vil transformation af precursorer betyde, at der dannes mere vandopløselige og persistente PFAS-forbindelser med lidt kortere fluorkulstofkæder end moderstoffet, dvs. at der dannes PFAS-forbindelser, som er mere mobile i grundvandet (VMR, 2022). I PFAS 22 er der to precursorer og 20 PFCA/PFSA-forbindelser. Transformation af PFAS-forbindelser, som tilhører gruppen FTOH'er gennem abiotiske processer, til PFOA og PFNA formodes at være en essentiel kilde til disse PFAS-forbindelser i miljøet (ITRC, 2022).

I jord- og vandmiljøet ses der bl.a. abiotiske nedbrydning af et PFAS-forbindelse kendt som POSF (Perfluorrock-tan sulfonfluorid) til PFOS, samt formation af PFBS fra oxidation af fluorotelomere (ITRC, 2022). Biologiske processer fører også til transformation af nogle precursorer til mindre PFAA, herunder PFOS og PFOA under aerobe forhold (Pancras et al 2016). Der mangler viden om anaerobe processer, men på nuværende tidspunkt må der forventes meget langsommere transformation af precursorer under anaerobe forhold. Et eksempel er vist på Figur 2.4, hvor man kan se, at transformation af 8:2 FTOH kan medføre dannelse af PFHxA, PFHpA og PFOA. Disse mulige omdannelsesprodukter af 8:2 FTOH er omfattet af Miljøstyrelsens sumkriterium for PFAS 22 og er medtaget i de nuværende analysepakker, men 8:2 FTOH er pt. ikke medtaget i analysepakkerne (VMR, 2022).



Figur 2.4 Transformationsvej gennem aerob nedbrydning for 8:2 FTOH i jord. 8:2 FTOH er markeret med grøn. PFAS-forbindelser, som indgår i det danske sumkriterium, er markeret med rødt. Dobbelt pil indikerer multi-transformationstrin. Stabile eller semistabile forbindelser er vist i de stiplede bokse. PFAS forbindelser, der er stabile og med i det danske sumkriterie for PFAS 22 er vist i bokse med de røde linjer (VMR, 2022)

2.2.4 Optagelse i planter og biota

Når PFAS-forbindelser frigives i miljøet, kan de optages i både planter og dyr. Der kan forekomme optagelse i planter i områder, hvor jorden eller vandingsvand er forurenset med PFAS, hvilket kan overføre PFAS-forbindelserne til dyr og mennesker ved indtagelse af disse planter. Nogle forbindelser har en tilbøjelighed til at bioakkumulere i organismen og derefter ophobe sig højere op i fødekæden. Således findes der relativt lave niveauer hos hvirvelløse dyr og fisk, mens højere niveauer er observeret hos større dyr (f.eks. sæl, isbjørn, ørne m.fl.). Generelt er det vurderet, at de forholdsvis kortkædede PFAS-forbindelser (C2 – C6/7) spredes i vand, og via vandfasen kan de optages af akvatiske organismer. Imens bindes de langkædede PFAS-forbindelser (>C6/7) til partikler og optages i biota via fødekæden - og dette sker i stigende grad i takt med stigende antal kulstofatomer i fluorkulstofkæden (VMR 2022). Forbindelserne akkumulerer forskelligt i dele af en organisme, f.eks. ses der en større akkumulering i lever end i fedt.

Som et eksempel på, hvordan PFAS-forbindelser ophober sig i biota, kan der skeles til fastsættelse af et miljøkvalitetskrav til overfladevand for PFOS (European Commission 2011b). Her er der anvendt en biokoncentrati-

onsfaktor (BCF) på 2,696 samt biomagnificeringsfaktorer BMF1 (opkoncentrering mellem vand og akvatisk invertebrat) på 5 og en BMF2 (opkoncentrering mellem akvatisk invertebrat og fisk) på 5¹. Indtagelse af mad med PFAS-forbindelser (f.eks. fisk) vurderes at være den primære eksponeringsvej for mennesker, som ikke er i nærheden af andre emissioner (PFAS-industri og/eller PFAS-forurenede lokaliteter). Derudover sker der eksponering af mennesker igennem anvendelsen af PFAS-holdige produkter (kosmetik, imprægnering af tekstiler, mad, pakket emballage med PFAS mm).

¹ BCF = Koncentration i biota / Koncentration i vandfasen. BMF = Koncentration i rovdyret/ koncentration i føde, definerer et stofs evne til at ophobe højere oppe i fødekæden. I saltvand anvendes yderligere et led i fødekæden; således er der tale om en BMF1 for primærkonsumenter og en BMF2 for fiskeædere.

3 FUND I DANMARK OG UDLANDET

3.1 Spildevand og spildevandsslam

I de følgende afsnit, er der først en gennemgang af PFAS-forbindelser i spildevand og herefter fund af PFAS-forbindelser i spildevandsslam.

3.1.1 Spildevand

DANVA har i 2022 indsamlet data fra danske og europæiske studier om indhold af PFAS-forbindelser i udledt spildevand, se Tabel 3.1, hvor de to øverste datasæt (NOVANA og Nøgletal) stammer fra danske anlæg. NOVANA datasættet indeholder prøver fra 7 kommunale anlæg (Silkeborg, Randers, Skjern, Ejby Mølle, Lynetten, Køge og Dalby) fra 2004 og 2005 (Strand et al., 2007). Det nyere danske datasæt, Nøgletal, er baseret på data fra 30 fuldt udbyggede renseanlæg og 4 mekaniske anlæg (Kjølholt et al., 2021). I datasættet, som stammer fra perioden 2011 til august 2019 er der også renseanlæg, som er påvirket af en "industriel" punktkilde, hvilke fører til høje maksimale værdier.

Generelt har forfatterne i DANVAs rapport konkluderet, efter at have taget de enkelte datasæts omfang og karakter (industrielle punktkilder eller ej) i betragtning, at der kan forventes et indhold på mellem 10-35 ng/l i spildevand fra almindelige kommunale renseanlæg. Dette indhold forventes at komme fra udvaskning fra gængse forbrugsprodukter (tøj, imprægnerede produkter, emballage mm) i husholdningsspildevand. Hvis renseanlægget modtager spildevand fra en punktkilde, det kan f.eks. være industri, brandøvelsesplads eller losseplads, ses der typisk markant højere værdier, som det fremgår af resultater fra Holland i Tabel 3.1. Der er ikke yderligere oplysninger om, hvilke 35 forbindelser, der refereres til for Holland i Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Oversigt over målte værdier af PFAS i spildevand (afløb) fra renselanlæg fra Danmark og udlandet. Værdier i ng/l. Tabellen er modificeret fra DANVA (2022).

	Koncentrationer afløbsvand			Stoffer inkluderet	Antal anlæg	Kilde
Datasæt	Max	Min	Gen			
NOVANA	PFOS: 18,1 PFOSA: 1,6 PFHxS: 2,7 PFOA: 24,4 PFNA: 3,1 PFDA: 2,5 PFUnA: <2,2	PFOS: <1,5 PFOSA: <0,3 PFHxS: <0,2 PFOA: <2,0 PFNA: <0,8 PFDA: <1,6 PFUnA: <2,2		PFOS,PFOSA, PFHxS, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA	7	Strand et al. 2007
Nøgletal	PFOS: 280 PFHxS: 140 PFOA: 420 PFNA: 67 PFDA: 130 PFHxA: 49		PFOS: 12 PFHxS: 2,3 PFOA: 17 PFNA: 4,2		34	Kjølholt et al., 2021
Slagelse	PFOS: 18 PFOA: 24 PFNA: 3,1 PFHxS: 2,7					Jørgensen & Dyreborg 2020
EU	PFOS: 2100 PFOA: 15900 PFNA: 2735 PFDA: 1687 PFHxA: 23800		PFOS: 62,5 PFOA: 255 PFNA: 35,1 PFDA: 23,9 PFHxA: 304	PFOS PFOA PFNA PFDA PFHxA	90	Loos et al., 2013
Ahrens /SE	PFOS: 15 PFHxS: 7,5 PFOA: 19 PFNA: 1,6 PFDA: <0,4 PFHxA: <4,4 PFUnDA: 4,2 PFDoDA: <17 PFHpA: <2,6	PFOS: <6,4 PFHxS: <5,4 PFOA: <3,6 PFNA: <0,72 PFDA: <0,4 PFHxA: <4,4 PFUnDA: <1,4 PFDoDA: <17 PFHpA: <2,6			15	Golovko et al., 2020
Australien	PFOS: 70 PFHxS: 50	PFOS: 15 PFHxS: ~5			15	Coggan, 2019
Holland (STOWA ²)	ΣPFAS 809	ΣPFAS 13,6		35 PFAS'er	8	Derksen & Baltussen 2021

I forbindelse med regionernes undersøgelse af jordforureningers påvirkning af overfladevand er der også tilløb fra renselanlæg i nogle af de undersøgte vandløbsstrækninger. I Boks 2 er beskrevet et eksempel fra denne undersøgelse, som viser, at tilløb fra et renselanlæg sandsynligvis er hovedkilden til PFAS frem for en forurennet kortlagt lokalitet.

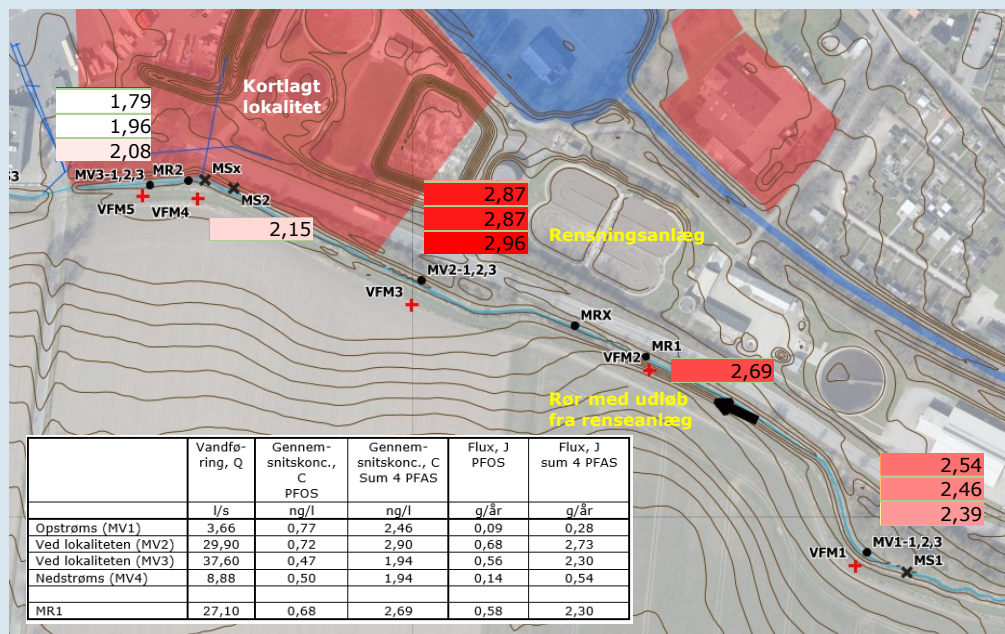
Boks 2 –Renseanlægs potentielle påvirkning af vandløb - eksempel

I forbindelse med regionernes undersøgelser af jordforureninger påvirkning af overfladevand er der i 2021 og 2022, er der udført undersøgelser af, hvorvidt jordforureninger kan påvirke nærliggende vandløb. Der er blandt andet udført en undersøgelse i et vandløb, som ligger ved en forurenede kortlagt lokalitet, men hvor der også er et udløb fra et renseanlæg på den undersøgte strækning (lokaliteten er anonymiseret). Placering af vandløb, lokalitet og renseanlæg er vist i figuren nedenfor, hvor der også er angivet analyseresultater for PFAS 4 i de udtagne vandprøver.

Ud for selve lokaliteten sker der en stigning i vandføringen, som dermed indikerer, at der sker målbar lokal grundvandstilførsel til vandløbet ud for lokaliteten.

Der kan beregnes en flux af PFAS i vandløbet på baggrund af den målte koncentration og vandføringen såfremt, der er opnået fuld opblanding på tværs af vandløbet (se også afsnit 3.4). I nedenstående figur er indsat en tabel med de beregnede fluxe ned gennem vandløbet. Der sker en stigning i fluxen og dermed massen af PFOS og PFAS 4 i den undersøgte vandløbsstrækning. Rør fra renseanlægget er placeret mellem MV1 og MV2. Her er der beregnet et bidrag med en flux på 0,58 g PFOS pr. år og 2,30 g PFAS 4 pr. år fra røret til vandløbet. Såfremt denne flux blandes op i selve vandløbet, vil det give en estimeret koncentration på 0,61 ng/l PFOS og 2,4 ng/l for PFAS 4. Den estimerede koncentration svarer nogenlunde til den koncentration, der er målt i MV2. Derfor vurderes det, at der er en påvirkning fra MR1 (udløb fra renseanlægget). Det var ikke muligt at beregne en flux fra MRX, da vandføringen ikke kunne bestemmes ved måling. Der sker herefter et fald for både PFOS og PFAS 4. Dette skyldes, at vandløbet sandsynligvis taber vand fra vandløbsbunden til undergrunden på denne strækning, hvilket kan ses på vandføringsmålingerne i den indsatte tabel.

Samlet vurderes der at ske en påvirkning af vandløbet med PFAS-forbindelser, hvor bidraget sandsynligvis kommer fra MR1, som kommer fra renseanlægget, samt en mulig ukendt opstrøms kilde. Det vurderes derfor, at den kortlagte lokalitet ikke bidrager med PFAS-forbindelser til vandløbet.



Figur 3.1 Placering af forurenet lokalitet sammen med renseanlæg og udløb herfra. Der er angivet koncentrationen (ng/l) for PFAS 4. Rødfarvning af koncentrationerne er farvet lineært fra grundvandskvalitetskriteriet på 2 ng/l (hvid) til den maksimale påviste værdi (mørkerød). Da der ikke er et krav i ferskvand for PFAS 4, er der sammenlignet med grundvandskvalitetskriteriet efter retningslinjer fra regionernes undersøgelser. Indsat i tabel er vist fluxberegning for

3.1.2 Spildevandsslam

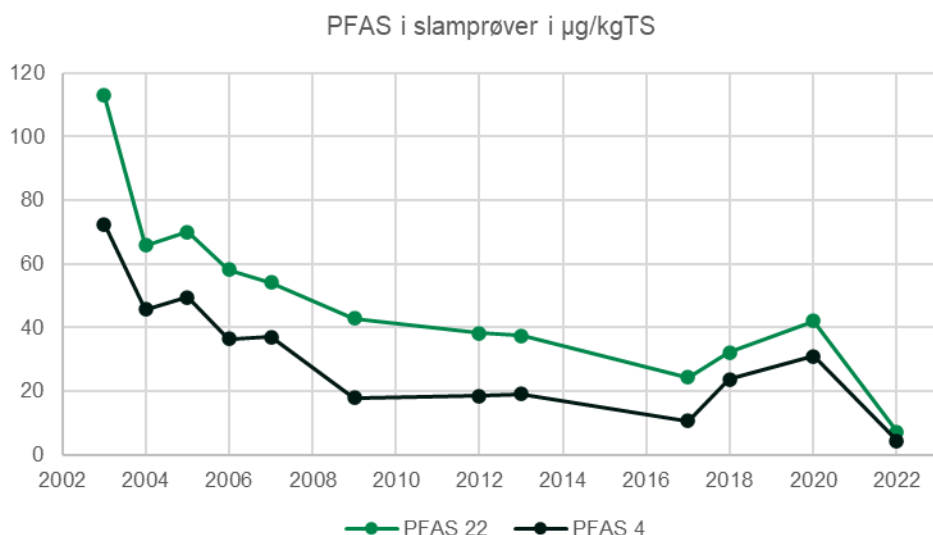
Der er indsamlet data fra 384 prøver vedr. koncentration af PFAS-forbindelser i spildevandsslam i perioden oktober 2021- juli 2022 i forbindelse med Miljøstyrelsens rapportering til EU om implementering og anvendelse af direktiv 86/278/EØF af 12. juni 1986 om beskyttelse af miljøet, navnlig jorden, ved anvendelse af slam fra rensningsanlæg i landbruget (MST, 2022, Orientering nr. 57). Data omfatter analyser af alle typer slam, og dermed også slam, som ikke er godkendt til jordbrugsformål. Det ses i Tabel 3.2, at kun få prøver overskrider den vejledende grænseværdi for PFAS 4 i jord, mens stort set ingen prøver er over grænseværdien for PFAS 22 i jord. Det gennemsnitlige indhold for PFAS 4 var 8,1 µg/kg TS, og for PFAS 22 var det på 12,2 µg/kg TS. Det er således PFAS 4, der udgør ca. 50% af den samlede PFAS-masse for 22 PFAS-forbindelser, der er analyseret for.

I spildevandsslam fra danske kommunale renselanlæg i 2004 blev målt 12-150 µg/kg TS af 7 PFAS-forbindelser; PFOS, PFOSA, PFHxS, PFOA, PFNA, PFDA og PFUnA (Strand et al., 2007).

Tabel 3.2 Indhold af PFAS 4 og PFAS 22 i spildevandsslam jf. Miljøstyrelsen 2022 i prøver fra oktober 2021 til juli 2022. Værdier i µg/kg TS på baggrund af 384 besvarelser

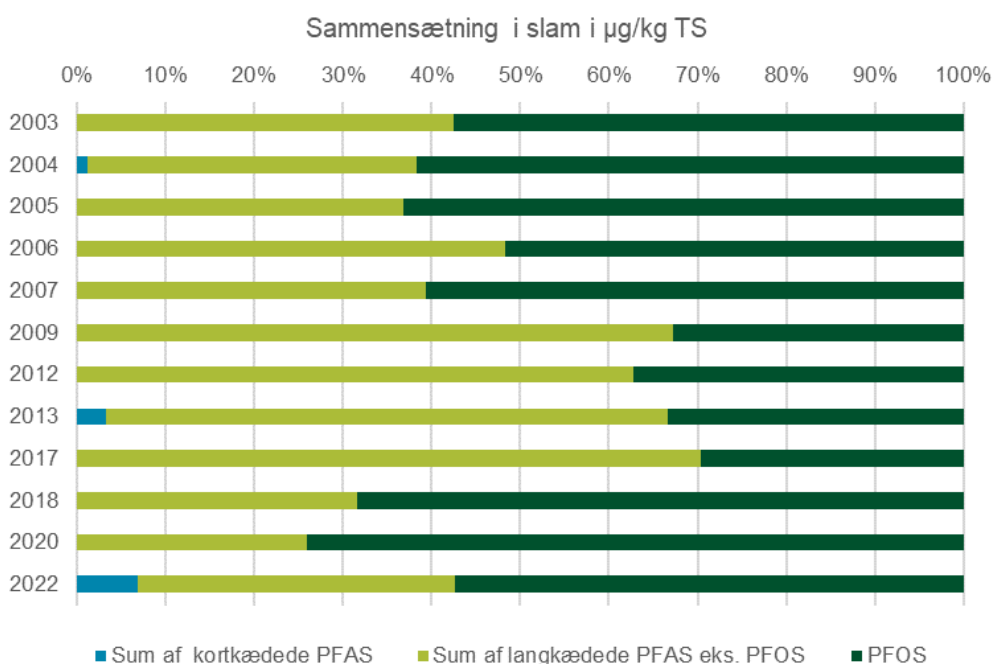
	Gennemsnit	25. kvartil	50. kvartil	75. kvartil	Grænseværdi
PFAS 4	8,1	2,2	5,2	9,4	10
PFAS 22	12,2	4,6	9,4	16	400

I forbindelse med et projekt, finansieret af Genanvend Biomasse, er der udført målinger af PFAS-indhold i arkiverede prøver af spildevandsslam fra et stort kommunalt rensningsanlæg i Hovedstadsområdet. Prøverne har været opbevaret i -18 grader (almindelig fryser) forud for analyse (Genanvend Biomasse, 2022). Resultater fra disse målinger ses i nedenstående diagrammer (Figur 3.2 og Figur 3.3). Der ses et faldende indhold af PFAS i perioden 2003 til i dag, dog med enkelte udsving. Dette er sammenfaldende med EU-regulering for udfasning af PFOS m.fl. i 2006, samt den faldende tendens af indberettede PFAS-produkter til produktregistret (se Figur 1.1).



Figur 3.2 Indhold af PFAS 4 og PFAS 22 i spildevandsslam i prøver fra 2003 til 2022 fra et stort dansk renselanlæg. Dataejer: Genanvend Biomasse, 2022.

PFOS er den dominerende forbindelse i alle prøver og udgør 30-70 % af den totale mængde, også i nyere prøver efter udfasning af PFOS i 2005 (se Figur 3.3). Dette kan skyldes, at PFOS er nedbrydningsprodukt af flere PFAS-forbindelser. Derudover består under 0-10% af den totale mængde af korte forbindelser, mens de langkædede forbindelser udgør resten. Der ses dog ikke en gennemgående faldende eller stigende tendens i sammensætning.



Figur 3.3 Sammensætning af PFAS-forbindelser i slam fra 2003 til 2022 fra et stort dansk renselanlæg. Dataejer: Genanvend Biomasse, 2022.

3.2 Emissioner til atmosfæren

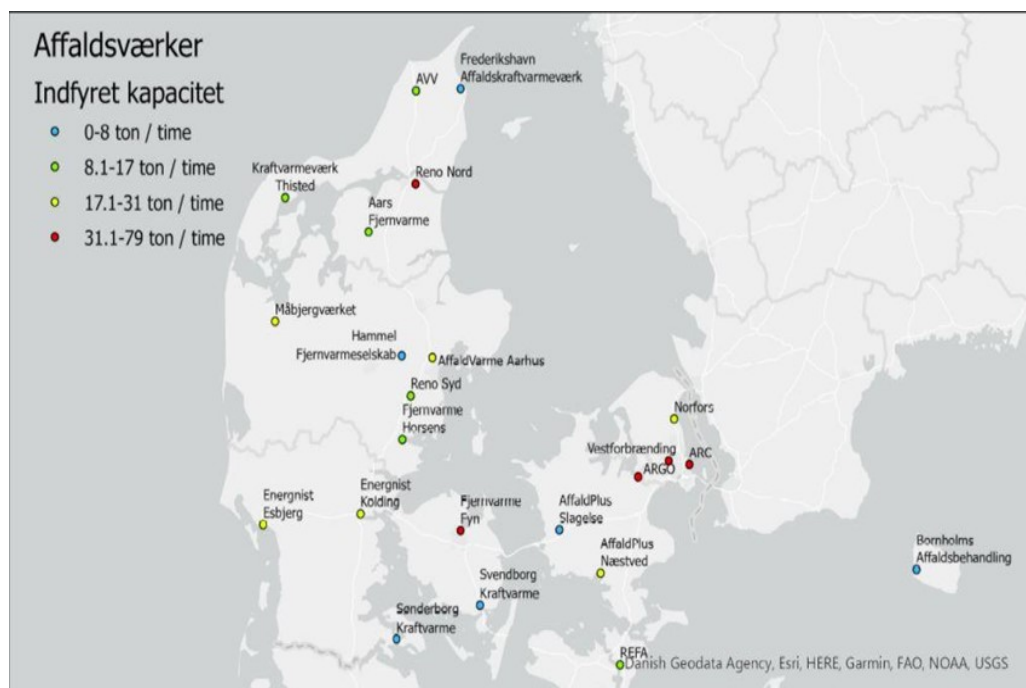
Som nævnt i afsnit 2.1 har der i Danmark aldrig været PFAS-producerende industri. En mulig kilde til PFAS-forbindelser i luft i Danmark kan være affaldsforbrænding, hvor bl.a. PFAS-holdige forbrugerprodukter bliver brændt. Et kort over forbrændingsanlæg og deres kapacitet i Danmark kan ses i Figur 3.4.

På nuværende tidspunkt mangler der viden om, i hvor høj grad PFAS bliver destrueret i forbrændingsanlæg-gene. Generelt er der konsensus om, at der ved temperaturer over 1000 °C forekommer destruktion af PFAS under laboratorieforhold, men der er ikke klarhed om, i hvor stor grad dette kan opnås under de forhold og opholdstider, der er i fuldskala kommunale anlæg, hvor ovntemperaturer typisk ligger mellem 850-950 °C. I følge (Altarawneh, 2021) anbefales der temperaturer over 1200 °C til omdannelse af PFOA til HF-gas og mindre fluorkulbrinter.

I Holland har man målt for PFAS-forbindelser i røggas fra forbrændingsanlæg og fundet op til 20 ng/m³ røggas (RIVM, 2021). I både Danmark og Holland anvendes ovntemperaturer på omkring 850-950 °C, hvor det forventes, at nogle PFAS-forbindelser destrueres, mens andre bliver omdannet til mindre PFAS-forbindelser.

I juni 2022 har BIOFOS undersøgt for PFAS 22 i asken og røggas fra deres slamforbrændingsanlæg. Der blev ikke detekteret PFAS-forbindelser i hverken røggassen eller aske fra deres egen slam (BIOFOS, 2022). I slam fra BIOFOS er der i 2022 målt ca. 5,4 µg/kg TS PFAS 4 og op til 8,9 µg/kg TS PFAS 22 (Genanvend Biomasse 2022)

Ved temperaturer på 900-1100 °C forventes det, at PTFE og fluoropolymerer vil nedbrydes til mindre fluorkulstof molekyler. I Kina er tre byaffaldsforbrændingsanlæg undersøgt for indhold af PFAS (Liu, 2021). Koncentrationerne af PFAS i flyveaske fra anlæggene var mellem 1,4 og 88 µg/kg (gns. 16,4 µg/kg), og lignende niveauer blev påvist i bundaske (3-77 µg/kg). PFOS var den dominerende forbindelse i begge typer.



Figur 3.4 Oversigt over forbrændingsanlæg i Danmark og deres kapacitet.

3.3 Regnvand

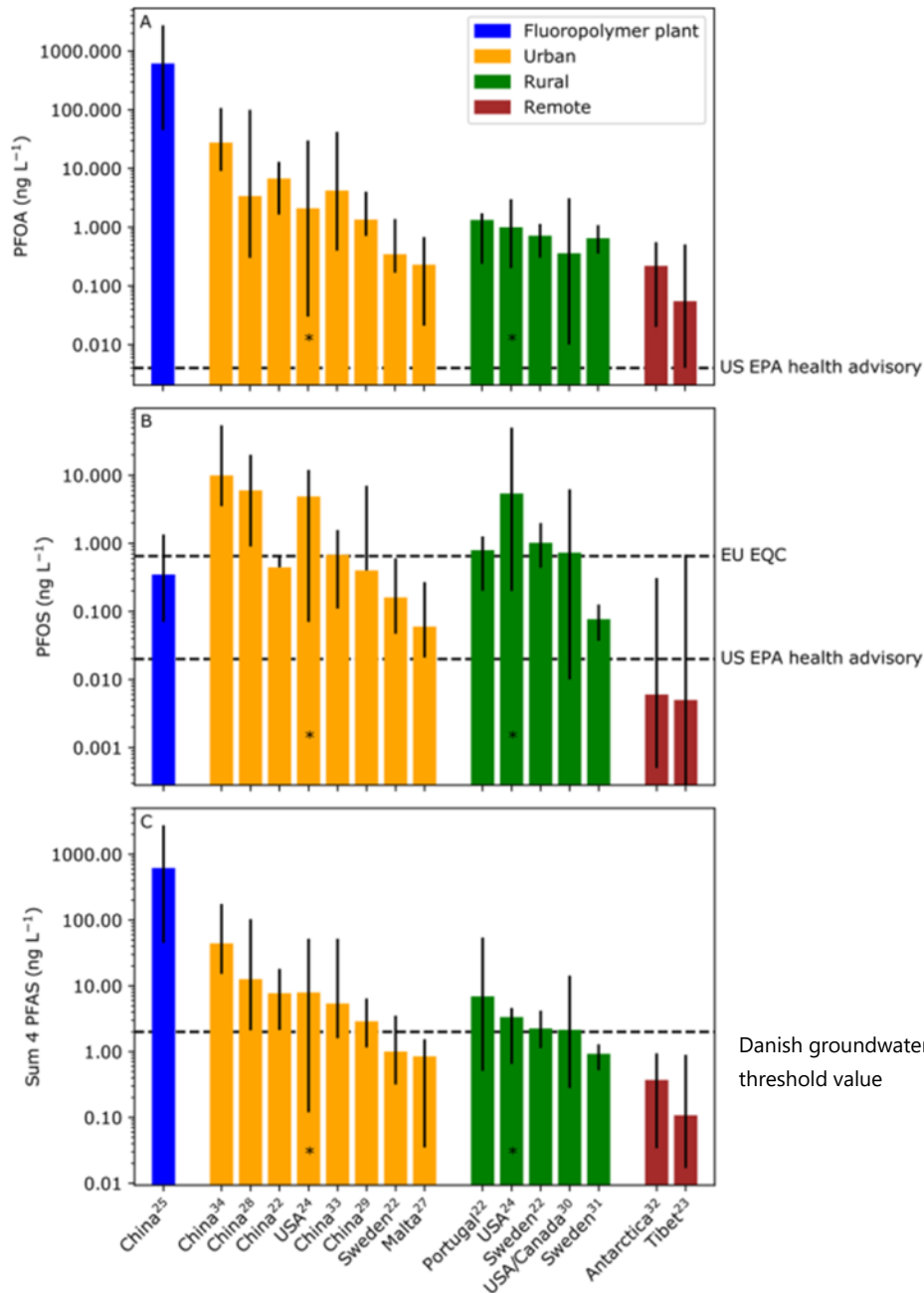
PFAS-forurening er en global problematik, idet indhold af PFAS-forbindelser måles i det meste af verden, herunder også i Antarktis. I (Cousins et al., 2022) er der indsamlet data fra en række studier efter 2010 vedrørende indhold af PFOS, PFOA og PFAS 4 i nedbør (regn eller sne) verden over. De højeste værdier er målt i nærheden af industrier, der producerer PFAS. Der er her konstateret op til 1000 ng/l for PFOA og PFAS 4 samt op til 1 ng/l for PFOS. PFOS-niveauerne tæt på industrielle kilder er lave og på niveau med, hvad der måles i øvrige by- og landområder, hvilket stemmer godt sammen med at der er sket udfasning af PFOS siden 2006.

Resultaterne fra Cousins et al., (2022) er illustreret i Figur 3.5 og sammenlignes med det generelle miljøkvalitetskrav for PFOS i overfladevand, og grundvandskvalitetskriteriet for PFAS 4 i grundvand. Der måles nogenlunde lige høje niveauer i nedbør i land- og byområder, som i mange tilfælde overskrider grænseværdierne, ligesom der måles indhold i øde områder som Antarktis og Tibet, hvor der i gennemsnit er konstateret 0,055 ng/l for PFOA samt koncentrationer på over 0,1 ng/l for PFAS 4.

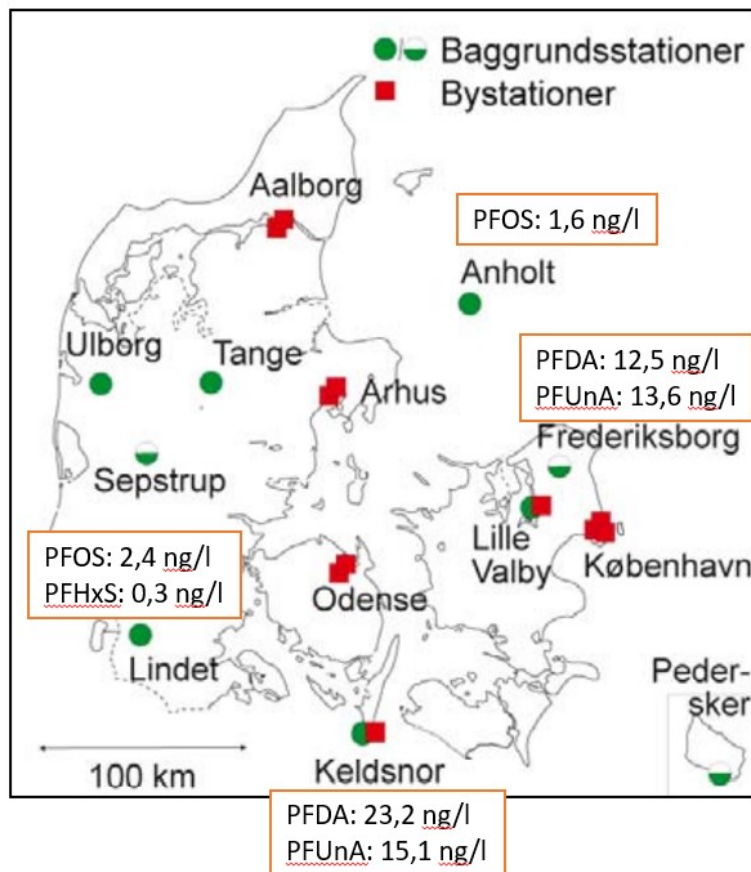
I 2004 er der også målt i nedbør i Danmark, hvor der er analyseret 7 regnvandsprøver fra 7 baggrundsmålestationer fordelt over Danmark (som led af det atmosfæriske baggrundsovervågningsprogram BOP, DMU). Der blev analyseret for syv PFAS-forbindelser (PFOSA, PFHxS, PFNA, PFDA og PFUnA PFOS og PFOA), heraf blev der konstateret indhold af PFOS, PFDA og PFUnDA, hvor der i enkelte prøver blev konstateret indhold på op til 23 ng/l. De højeste indhold var for PFDA (23 ng/l), PFUnDA (15 ng/l) og PFOS (2,4 ng/l) (Strand, 2007; VMR, 2022).

Resultaterne for nedbør kan ses på Figur 3.6. I rapporten fra Strand, 2007, fremgår det, at man ikke kan trække nogle konklusioner på basis af de 7 prøver, der er analyseret i denne undersøgelse, fordi det vil kræve en mere systematisk monitoring for at kunne udtale sig generelt om koncentrationerne. De påviste niveauer af PFOS ligger på niveau med det globale fund i USA og Sverige i landdistrikter målt efter 2010 (Cousins et al., 2022). De målte niveauer af de langkædede forbindelser PFDA og PFUnA i Keldsnor og Fredensborg er overraskende høje op på niveau med fund af PFOA i regnvand ved byområder i Kina, som typisk har mere PFAS-industri end i Danmark (se Figur 3.5). rapporten fra 2007 mistænkte forfatterne dengang, at de påviste niveauer i Keldsnor og Frederiksborg kunne skyldes kontaminering af prøverne, men lagde op til at fremtidige undersøgelser var nødvendige for at afgøre dette (Strand, 2007).

I 2022 har TV2 Vejret fået analyseret nedbørsprøver fra forskellige steder i Danmark, men de er ikke medtaget, da deres oprindelse, udtagning og analysemetoder ikke er kendte.



Figur 3.5 Indhold af PFOA, PFOS og PFAS 4 i nedbør verden over i prøver fra 2010 og frem til i dag. Data stammere fra forskellige studier og er rapporteret samlet af Cousins et al (2022). De blå søjler indikerer data i nærheden af PFAS-industri. Gule søjler er data fra bymæssige områder, grønne søjler er landområder og mørkerøde søjler er fjerne områder som Antarktis og Tibet. PFOA-værdierne er sammenlignet med USEPA vejledende grænseværdi for PFOA på 0,004 ng/l, PFOS-værdierne er sammenlignet med miljøkvalitetskravet for PFOS i overfladevand for ferskvand på 0,65 ng/l, og PFAS 4 er sammenlignet med det danske grundvandskvalitetskriterium for grundvand på 2 ng/l (Cousins et al., 2022).



Figur 3.6 Påviste PFAS-indhold i regnvand i perioden 15.-30. oktober 2004 i Danmark jf. Strand et al., 2007. Detektionsgrænserne for de 7 forbindelser varierede således: PFHxS 0,2 ng/l, PFOS 1,5 ng/l, PFOSA 0,3 ng/l, PFOA 2 ng/l, PFNA 0,8 ng/l, PFDA 1,6 ng/l, og PFUnA 2,2 ng/l.

3.4 Vandløb

Der er lavet et udtræk fra VanDa-databasen den 17. oktober 2022 for hele Danmark, hvor der er udtrukket vandanalyser for PFAS-forbindelser, som er indberettet i databasen siden 2011. Udtrækket indeholder alle indberettede analyser for PFAS, der er udtaget i fersk overfladevand og sediment, hvilket både omfatter data, indberettet af Miljøstyrelsen og de fem regioner.

Det er i afsnit 1 beskrevet en variation i detektionsgrænsen for analyser af PFAS. I datasættet er der detektionsgrænser for de enkelte forbindelser på op til 400 ng/l. Samlet drejer det sig om ca. 40 % af de analyserede forbindelser, hvor der er en detektionsgrænse på > 0,3 ng/l. Koncentrationen i ca. 1/3 af de analyserede prøver for PFOS ligger over en detektionsgrænse på 0,3 ng/l. Det betyder, at vurderingen af fund med bl.a. PFOS i nærværende projekt kan være underestimeret, og værdier er usikre, da miljøkvalitetskravet for PFOS i ferskvand ligger på 0,65 ng/l.

Der er ikke et generelt miljøkvalitetskrav for ferskvand for summen af PFAS-forbindelser. I forbindelse med regionernes undersøgelser af jordforureningers påvirkning af overfladevand, er der derfor i stedet sammenlignet med grundvandskvalitetskriterierne for grundvand for PFAS 4 på 2 ng/l og PFAS 22 på 100 ng/l (se afsnit 1.2).

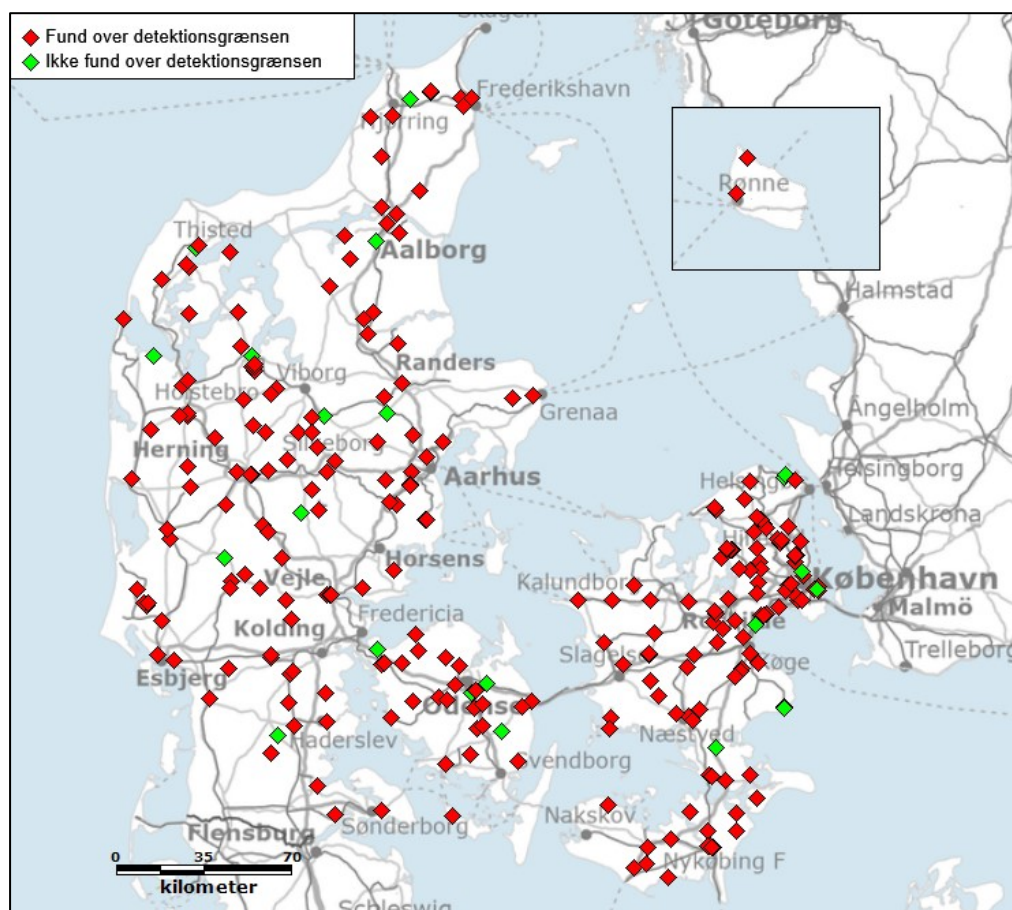
Det er retningslinjer, der er udarbejdet af de fem regioner i forbindelse med databehandling og rapportering af regionernes undersøgelser af jordforureningers påvirkning af overfladevand.

Der indgår 6952 analyserede vandprøver fra vandløb i datasættet, hvor nogle af dem kan være genprøvetagning i samme målested, men på forskellige datoer. Heraf er der i 2338 af vandprøverne ikke konstateret PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen, hvilket svarer til ca. 34 % af de analyserede vandprøver. Størstedelen af vandprøverne, som ligger i VanDa, er udtaget i forbindelse med regionernes undersøgelse af jordforureninger i nærheden af overfladevand. Det drejer sig om 4.599 af vandprøverne, der er udtaget i forbindelse med regionernes undersøgelser af jordforureninger i nærheden af overfladevand i 2021 og 2022. Senere i dette afsnit er der en særskilt bearbejdning af regionernes data (se afsnit 3.4.4).

3.4.1 Landsdækkende fund af PFAS i vandløb

Den geografiske fordeling af vandløbsstrækninger, hvor der er udtaget vandprøver til analyse for PFAS, er vist i Figur 3.7. Figuren viser de vandløbsstrækninger, hvor der er fund over og under detektionsgrænsen. Der indgår 275 undersøgte vandløbsstrækninger i datasættet, hvoraf de 199 af vandløbsstrækningerne er undersøgt af regionerne, svarende til ca. 72 % vandløbsstrækningerne. Der er konstateret fund af en eller flere forbindelser i 255 af vandløbsstrækningerne, hvilket svarer til ca. 93 % af de vandløbsstrækninger, hvor der er udtaget vandprøver. 176 af vandløbene, hvor der er fund over detektionsgrænsen for PFAS, er undersøgt i forbindelse med regionernes undersøgelser af jordforureninger nær overfladevand, som er yderligere uddybet senere i nærværende afsnit (se afsnit 3.4.4). Der tegner sig ikke umiddelbart et klart billede af, hvorvidt der er steder i Danmark med flere fund end andre steder.

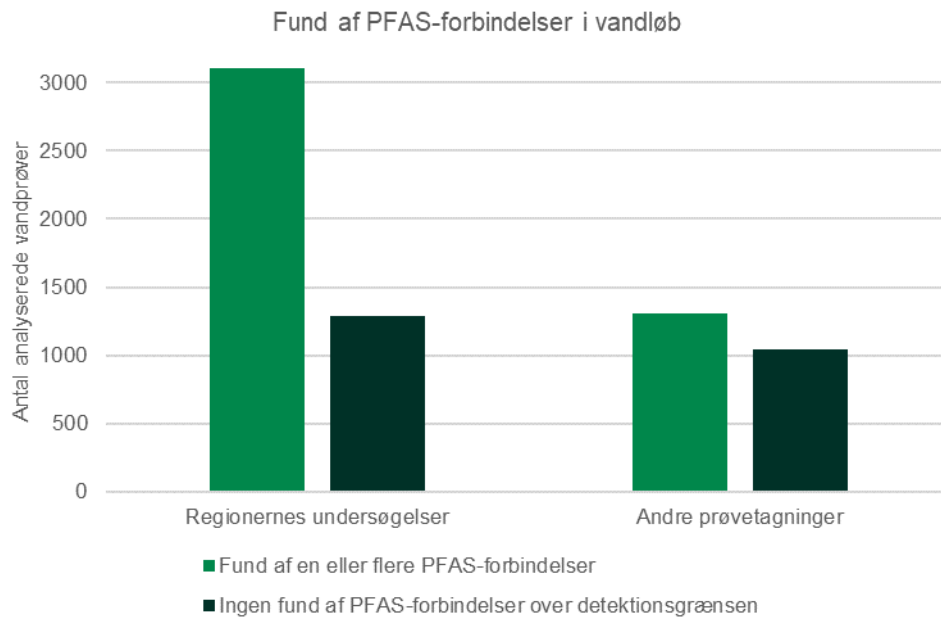
Der er udvalgt undersøgte vandløbsstrækninger inden for byzoner for at undersøge, hvorvidt disse vandløb er mere udsatte for en diffus bymæssig belastning med PFAS-forbindelser. Dette er gjort ved at vælge de prøvesteder i vandløbsstrækningerne, som ligger inden for byzoner, defineret i et GIS-lag med zonekort. Det ser dog ikke umiddelbart ud til, at de 96 vandløb, der er prøvetaget inden for byzoner, er mere udsatte, da der er fund i ca. 91 % af dem, hvilket er den samme andel af vandløb med fund i landzonen (168 ud af 183 vandløb). I datagrundlaget indgår også regionernes prøvetagninger i vandløb nær jordforureninger. Dermed kan der også være en potentiel påvirkning af vandløbene med PFAS fra punktkilder. Dette ændrer dog ikke billedet af, at der ikke er forskel i fund af PFAS i hhv. by- og landzonen.



Figur 3.7 Prøvepunkter på vandløbsstrækninger, hvor der er udtaget vandprøver til analyse for PFAS.

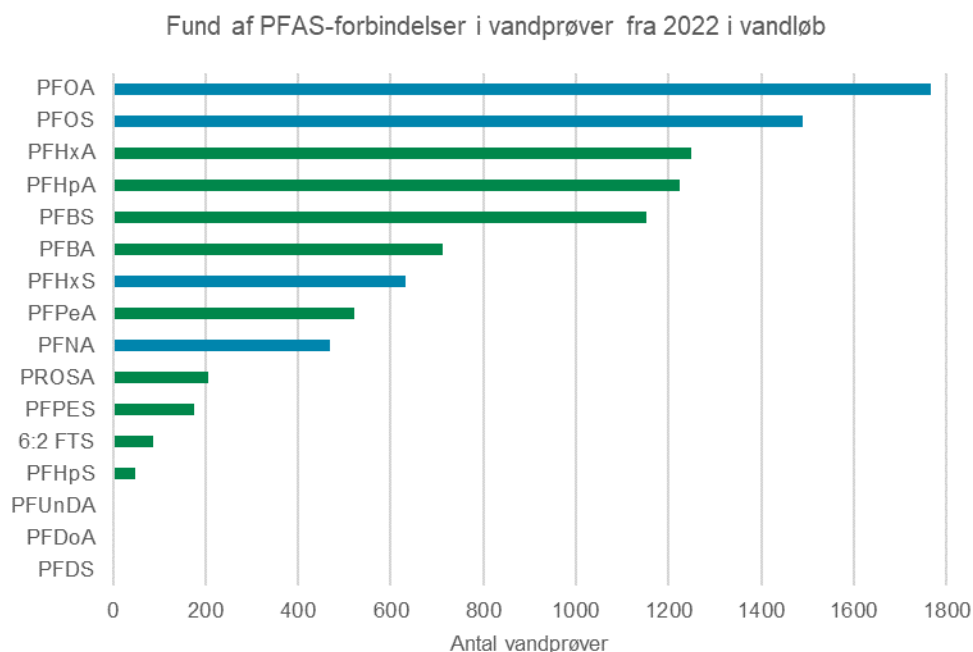
3.4.2 Hyppighed og koncentrationer af fund i vandløb

Fordelingen mellem PFAS-forbindelser over og under detektionsgrænsen i data fra regionernes undersøgelser og andre prøvetagninger er vist i Figur 3.8. Data fra regionerne indeholder fund af en eller flere PFAS-forbindelser med detektionsgrænser på op til 15 ng/l, mens data fra øvrige prøvetagninger har en detektionsgrænse på 0,6 ng/l (dog også væsentligt færre analyser). Andelen af fund er langt højere i regionernes undersøgelser end i andre prøvetagninger (eksempelvis NOVANA), hvilket formentlig kan forklares ved, at regionernes undersøgelser var rettet mod jordforureninger i nærheden af overfladevand. Se også afsnit 3.4.4,



Figur 3.8 Fordeling af vandprøver på fund af enkelt PFAS-forbindelser over og under detektionsgrænsen. Datasættet er delt mellem data fra regionernes undersøgelse og andre prøvetagninger med Miljøstyrelsen som dataejer. Datagrundlaget udgøres af 6.952 prøvetagninger.

I de vandprøver fra vandløb, hvor der er konstateret PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen, er der i alt konstateret 16 forskellige forbindelser ud af de op til 22 forbindelser, der analyseres for. Datagrundlaget udgøres af i alt 13.204 analyser af forbindelser. De forbindelser, der oftest konstateres i vandløb, er PFOA og PFOS, som er til stede i over en tredjedel af prøverne (4.705 fund). Herefter følger PFBS, PFHpA, PFHxA og PFBA. Dette er vist i Figur 3.9 for vandprøver, udtaget i 2022, hvor der er anvendt den samme analysepakke på PFAS 22. I datasættet indgår kun to vandprøver fra andre prøvetagninger, som ikke vedrører regionernes undersøgelser af jordforureninger nær overfladevand.



Figur 3.9 Fordeling af fund af de 16 PFAS-forbindelser, der er konstateret i vandprøver fra vandløb fra 9.740 analyseresultater fordelt på 1.816 vandprøver fra 2022. OBS: PFDoA og PFDS har hver 2 fund. I datasættet indgår alle vandanalyser. Med blå er markeret de forbindelser, der indgår i PFAS 4

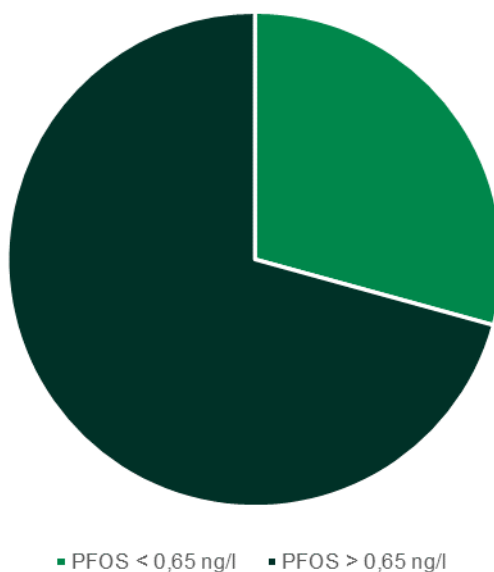
Der er foretaget et udtræk af data fra 2022 med de forskellige PFAS-forbindelser. Det er undersøgt for, hvorvidt forbindelserne konstateres i vandløb i byzoner eller i vandløb i landzoner. Det fremgår af Figur 3.10, at der ikke er forskel på, hvilke PFAS-forbindelser, der konstateres i vandløb i hhv. byzoner og landzoner. De forbindelser, som oftest konstateres i vandløbene jf. Figur 3.10, fordeler sig nogenlunde ligeligt mellem by- og landzoner. Der indgår kun to prøvetagninger i datasættet, som ikke vedrører regionernes undersøgelser af jordforureninger nær overfladevand.



Figur 3.10 Fordeling af hyppighed af fund i 2022 af de enkelte PFAS-forbindelser i vandløb, der er placeret i byzoner og landzoner. Rækkefølgen af forbindelserne svarer til Figur 3.9, hvor de hyppigst fundne er øverst. Datagrundlaget udgøres af 1.767 fund.

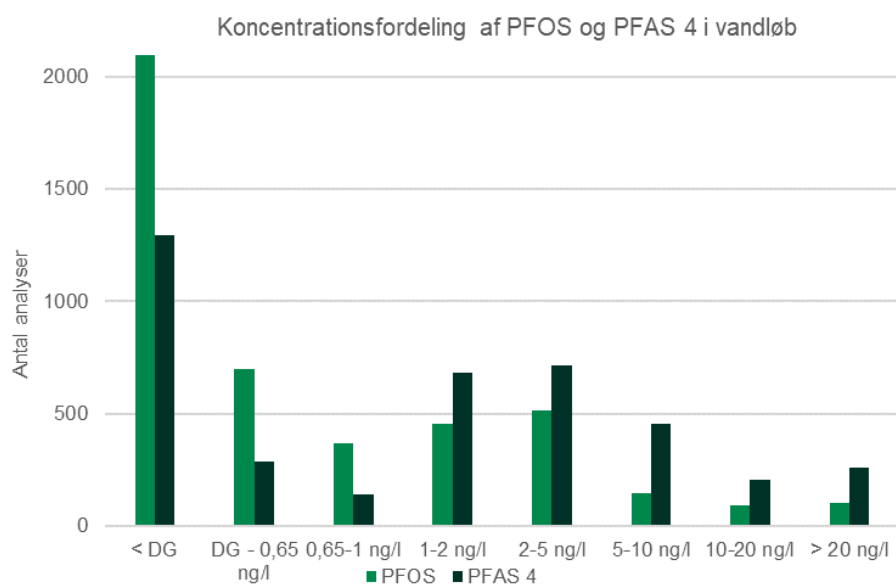
De fire forbindelser, som indgår i PFAS 4 (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS), udgør tilsammen næsten halvdelen af fund af PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen (se Figur 3.9). For PFAS 4 ligger halvdelen af fundene (59 %) over grundvandskvalitetskriteriet for grundvand på 2 ng/l, som er den, regionerne sammenligner med for PFAS 4, når de skal vurdere jordforureningers påvirkning af overfladevand. Det drejer sig om 1112 af de 2743 vandprøver, hvor PFAS 4 ligger over grænseværdien. Som tidligere nævnt er der prøver, hvor laboratoriet har angivet en forhøjet detektionsgrænse. For PFAS 4 ligger detektionsgrænsen på mellem 0,6-15 ng/l, hvilket betyder, at der kan være vandprøver, hvor analyseresultater angives som ikke påvist, men hvor der reelt kan være en forekomst af PFAS 4 over grænseværdien. I Figur 3.11 er vist fund af PFOS over detektionsgrænsen fordelt mellem fund under og over miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l. Figuren viser, at ca. 70 % af fundene over detektionsgrænsen overskrider miljøkvalitetskravet, svarende til 1683 af de 2380 fund over detektionsgrænsen.

Fordeling af fund af PFOS i forhold til miljøkvalitetskravet



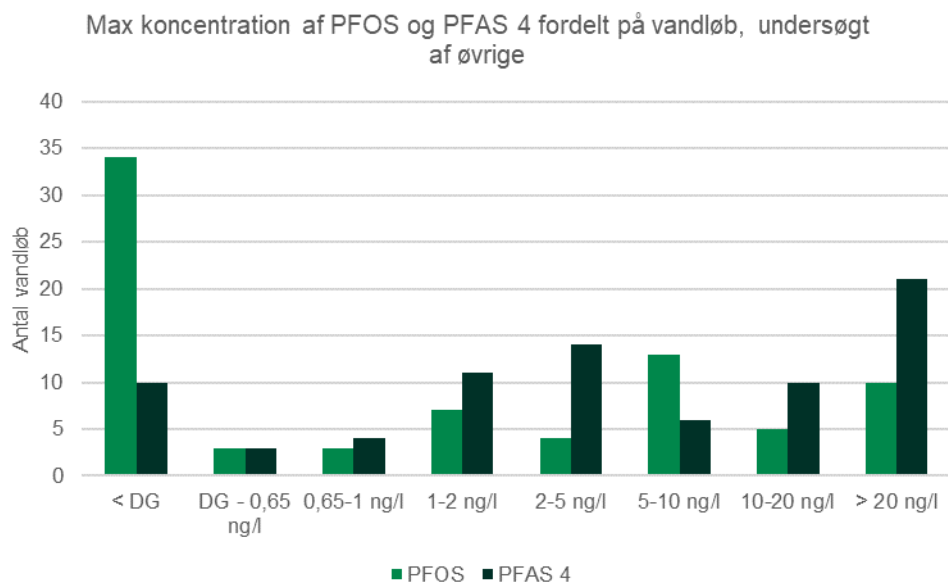
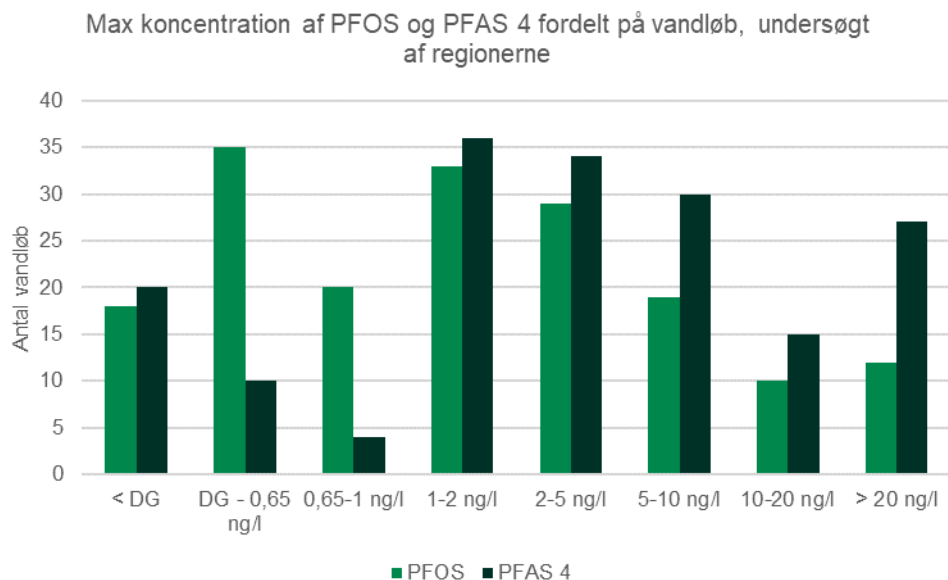
Figur 3.11 Koncentrationsfordeling af fund af PFOS over detektionsgrænsen i vandprøver fra vandløb i forhold til miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l. Datasættet består af alle 2380 vandprøver i vandløb fra VanDa-databasen

I Figur 3.12 er vist koncentrationsfordelingen af PFAS 4 sammenlignet med koncentrationen af PFOS i vandløb fordelt på det samlede antal analyser. Det skal bemærkes, at til og med 2021 lå detektionsgrænsen for PFOS på 1 ng/l, hvilket kan betyde, at andelen af fund under detektionsgrænsen ikke er helt retvisende, men reelt kan indeholde fund af PFOS mellem den nuværende detektionsgrænse 0,3 ng/l og den tidligere på 1 ng/l.



Figur 3.12 Analyser for PFOS og PFAS 4 i vandprøver fordelt i koncentrationsniveauer.

I Figur 3.13 er vist den maksimale koncentration, der er målt i hvert vandløb for henholdsvis PFOS og PFAS 4. Figuren viser den maksimale koncentration, konstateret i vandløb, undersøgt af regionerne (øverst) og de øvrige vandløb med fund af PFAS (nederst). Det fremgår af figuren, at i 123 af de undersøgte vandløb af regionerne ligger koncentrationen af PFOS over miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l, svarende til ca. 70 %. For de øvrige undersøgte vandløbsstrækninger, er der konstateret PFOS over miljøkvalitetskravet i 42 vandløb, svarende til ca. 53 % af de prøvetagede vandløb.

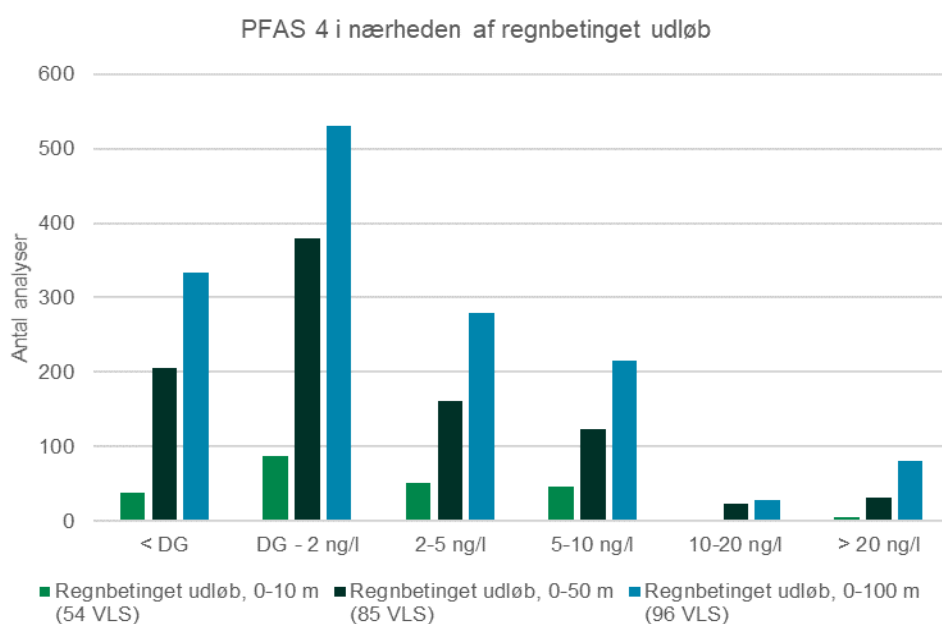


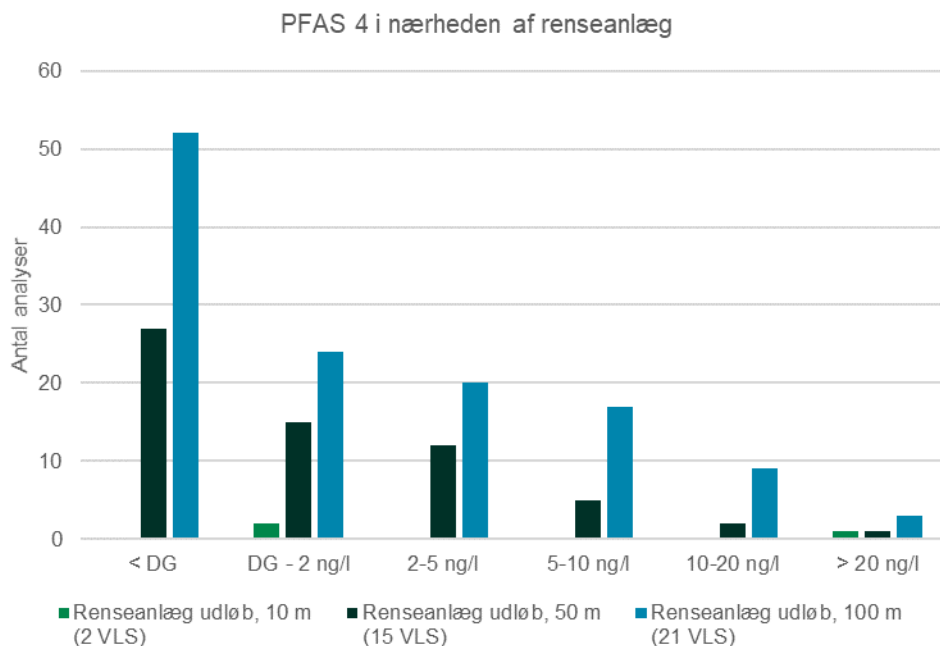
Figur 3.13 Maksimale koncentration af PFOS og PFAS 4 i de undersøgte vandløbsstrækninger, som hhv. er udført af regionerne (øverst) og øvrige (nederst)

3.4.3 Udløb nær vandløb

På baggrund af data fra VanDa er der endvidere foretaget en sammenligning af vandprøverne i forhold til, hvor de er udtaget i en afstand på 10-100 m fra regnbetingede udløb eller udløb fra renseanlæg. Der er set på resultater for PFAS 4. Der er således lagt en buffer omkring udløbene på hhv. 10 m, 50 m og 100 m, hvorefter der er foretaget en udvælgelse af de vandprøver, som er udtaget inden for denne afstand. Datasættet består udelukkende af data fra regionernes undersøgelser af jordforureninger nær overfladevand.

I Figur 3.14 er vist fordelingen af PFAS 4 i forskellige koncentrationsintervaller i forhold til afstanden til et regnbetinget udløb eller udløb fra renseanlæg.





Figur 3.14 Analyser for PFAS 4 i vandprøver, udtaget i nærheden af regnbetingede udløb (2624 analyser) og udløb fra renseanlæg (190 analyser). I parentes er angivet antallet af vandløbsstrækninger (VLS), der er berørt, da flere vandprøver kan repræsentere det samme udløb

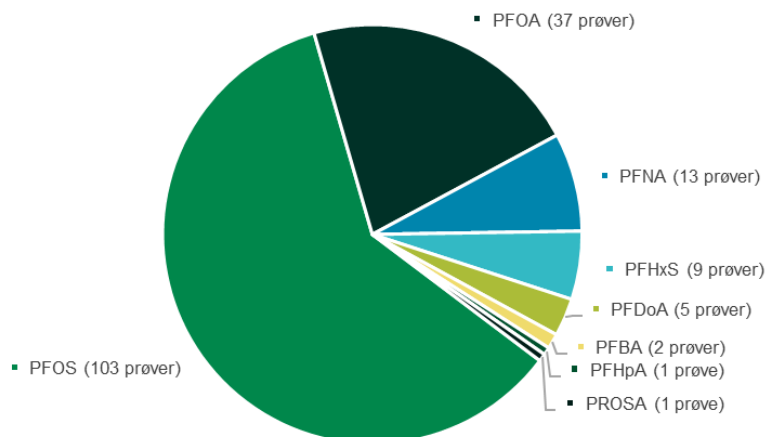
Der ses ikke umiddelbart nogen sammenhæng mellem afstand fra det regnbetingede udløb til prøvetagningspunktet og koncentration af PFAS 4 i vandløbet. I forbindelse med regionernes undersøgelser er størstedelen udført i sommerperioden for at opnå minimal fortynding i vandløbet i forhold til at påvise en evt. grundvandsbåren forurening fra de kortlagte lokaliteter. Det har også betydet, at langt de fleste udløb har været mindre aktive eller tørlagte. Derfor er en stor del af vandprøverne sandsynligvis ikke påvirket i særlig stor grad fra regnbetingede udløb.

I forbindelse med regionernes undersøgelser er der ligeledes udtaget vandprøver i nærheden af udløb fra renseanlæg. Dette er vist i Figur 3.15 nederst. Her ses ligeledes ikke en sammenhæng mellem afstanden fra udløb fra renseanlæg i forhold til, hvor vandprøven er udtaget i vandløbet.

3.4.4 PFAS i sediment i vandløb

I VanDa er der rapporteret resultater for analyse af PFAS-forbindelser i sedimentprøver i 85 vandløbsstrækninger. Alle sedimentprøverne stammer fra vandløb nær jordforureninger, der er undersøgt af regionernes. Sedimentprøver fra øvrige vandløbsstrækninger i VanDa er ikke analyseret for PFAS. I forbindelse med prøvetagning af sediment i 59 af vandløbsstrækningerne er der ikke konstateret indhold af PFAS over detektionsgrænsen, som har varieret fra 0,01-50 µg/kg. Det svarer til 70 % af de undersøgte vandløbsstrækninger, hvor der er udtaget sedimentprøver til analyse.

I modsætning til det antal PFAS-forbindelser, der konstateres i selve vandløbet, er der kun konstateret 8 forskellige PFAS-forbindelser i sedimentprøverne. Her dominerer PFOS, som konstateres i 60 % af de 171 sedimentprøver med fund over detektionsgrænsen. Dette er vist i Figur 3.15.



Figur 3.15 Fordeling af hyppighed af fund af de enkelte forbindelser i sedimentprøver fra vandløb.

Der er ikke en grænseværdi for PFAS-forbindelser i bundsediment, men i forbindelse med regionernes undersøgelser er det valgt i stedet at sammenligne med jordkvalitetskriterierne. For summen af PFAS 4 i jord er der en vejledende jordkvalitetskriterium på 10 µg/kg jf. afsnit 1. Dette kvalitetskriterium er kun overskredet i sedimentprøver fra en enkelt vandløbsstrækning, hvor der er konstateret indhold af PFAS 4 på op til 54 µg/kg, hvilket således er en overskridelse af kvalitetskriteriet på en faktor 5,4. I dette vandløb er der i vandprøver fra selve vandløbet konstateret indhold af PFAS 4 på mellem 59-530 ng/l, hvilket også er blandt de fem vandløb, hvor der er konstateret de højeste koncentrationer af PFAS 4.

3.4.5 Jordforureningers påvirkning af vandløb

De vandprøver, der er udtaget i forbindelse med regionernes undersøgelser af jordforureningers påvirkning af overfladevand, fordeler sig på 199 undersøgte vandløbsstrækninger fordelt i alle fem regioner, som indgår i nærværende databehandling. Det drejer sig om 1.964 vandprøver, som er udtaget i 2021-2022. I vandprøver fra 23 af de undersøgte vandløbsstrækninger er der ikke påvist indhold af PFAS-forbindelser. Det vil sige, at der i forbindelse med regionernes undersøgelse er konstateret fund af et eller flere PFAS-forbindelser i ca. 88 % af de undersøgte vandløbsstrækninger.

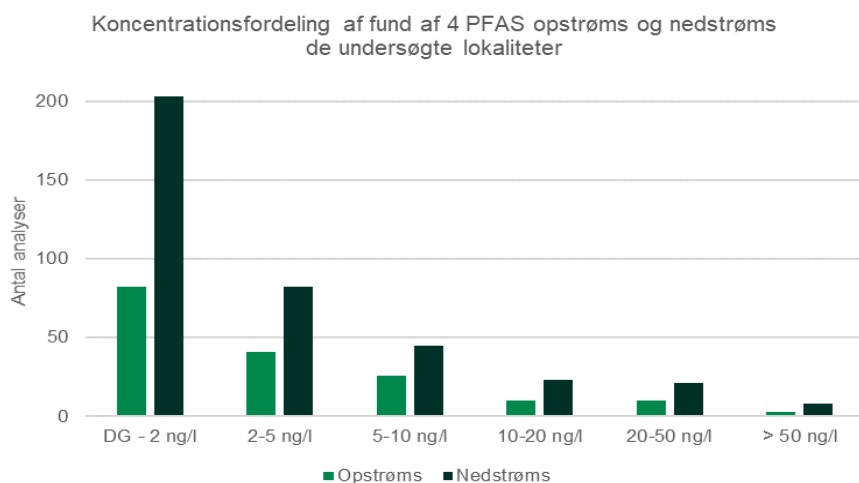
Undersøgelserne er udført i henhold til Miljøstyrelsens undersøgelsesdesign og regionernes tekniske beskrivelse. Det betyder, at der har været ens navngivning af alle prøvetagningspunkter i forbindelse med undersøgelserne. Der er udtaget vandprøver opstrøms de forurenede lokaliteter, som er navngivet MV1 samt nedstrøms en vurderet udstrømningszone fra lokaliteten, som er angivet med den højeste nummerering i prøvetagningen. Såfremt der er udtaget ekstra vandprøver udover de planlagte, er disse navngivet med et "x" sammen med nærmeste planlagte prøve (fx MV2x).

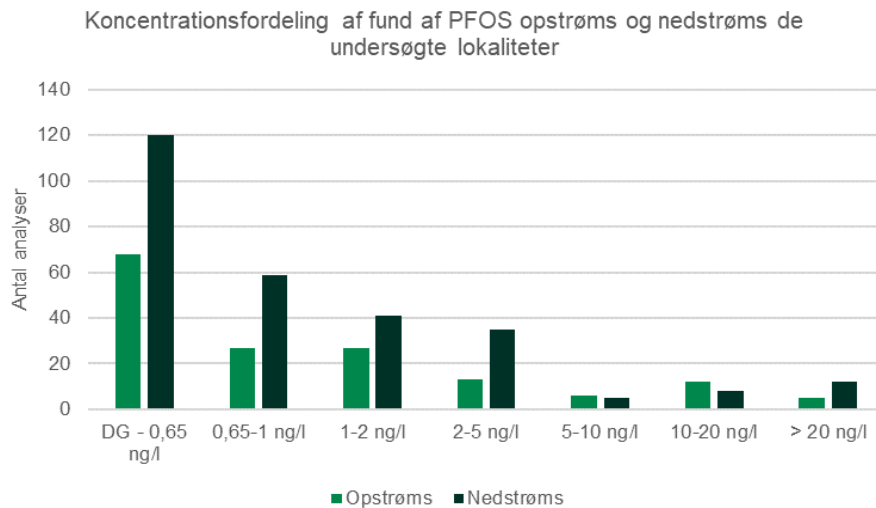
Som tidligere beskrevet er de fire PFAS-forbindelser, PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS, ofte dem, der bliver fundet i forbindelse med prøvetagning i vandløb. Disse fire forbindelser indgik i regionernes analysepakke i både 2021 og 2022, hvorved der er foretaget en sammenligning i koncentrationerne for PFAS 4 opstrøms og nedstrøms de undersøgte lokaliteter. Der er medtaget de data, hvor der vurderes at være et retvisende grundlag i forhold til de anvendte nummereringer.

Der er vandløbsstrækninger, hvor flere lokaliteter skal undersøges, hvorved der kan være overlap mellem prøvetagningspunkterne. Det betyder, at det kan være vanskeligt at udpege den "rigtige" nedstrøms prøve, når de enkelte undersøgelser ikke er kendte. Her er der sket en konservativ frasortering, så usikre data er taget ud af databehandlingen. Derudover er kun medtaget den maksimale påviste koncentration nedstrøms, da der således er taget højde for, at der ikke nødvendigvis er fuld opblanding. Dermed ses på *worst case*. Der er mere sikkerhed omkring opstrøms prøverne, som altid er navngivet med MV1 – også ved prøvetagning over flere strækninger.

I Figur 3.16 er vist resultatet af de vandprøver, der er udtaget hhv. opstrøms og nedstrøms de udpegede forurenede lokaliteter, som potentielt kan påvirke de nærliggende vandløb. Det fremgår af figuren, at 90 af de 172 opstrøms vandprøver med fund af PFAS 4 overskrider grundvandskvalitetskriteriet i grundvand for PFAS 4 på 2 ng/l, svarende til ca. 52 %, mens det nedstrøms drejer sig om 172 af 375 vandprøver, svarende til 46 %. I vandprøver med fund af PFOS ligger 90 af de 158 vandprøver med fund opstrøms over det generelle miljøkvalitetskrav på 0,65 ng/l, svarende til ca. 57 %. Dette er samme andel for vandprøver nedstrøms, hvor det er 160 ud af de 280 vandprøver med fund af PFOS.

Det var forventet, at der var flere vandprøver, hvor kriteriet var overskredet nedstrøms, men dette kan hænge sammen med de tilgængelige data, hvor nedstrøms prøver ikke har en specifik markering, men er udvalgt på baggrund af antagelser, som tidligere beskrevet. Det vil kræve en manuel gennemgang af de enkelte undersøgelser med henblik på at udpege de vandprøver, som reelt repræsenterer situationen lige nedstrøms en jordforurening.



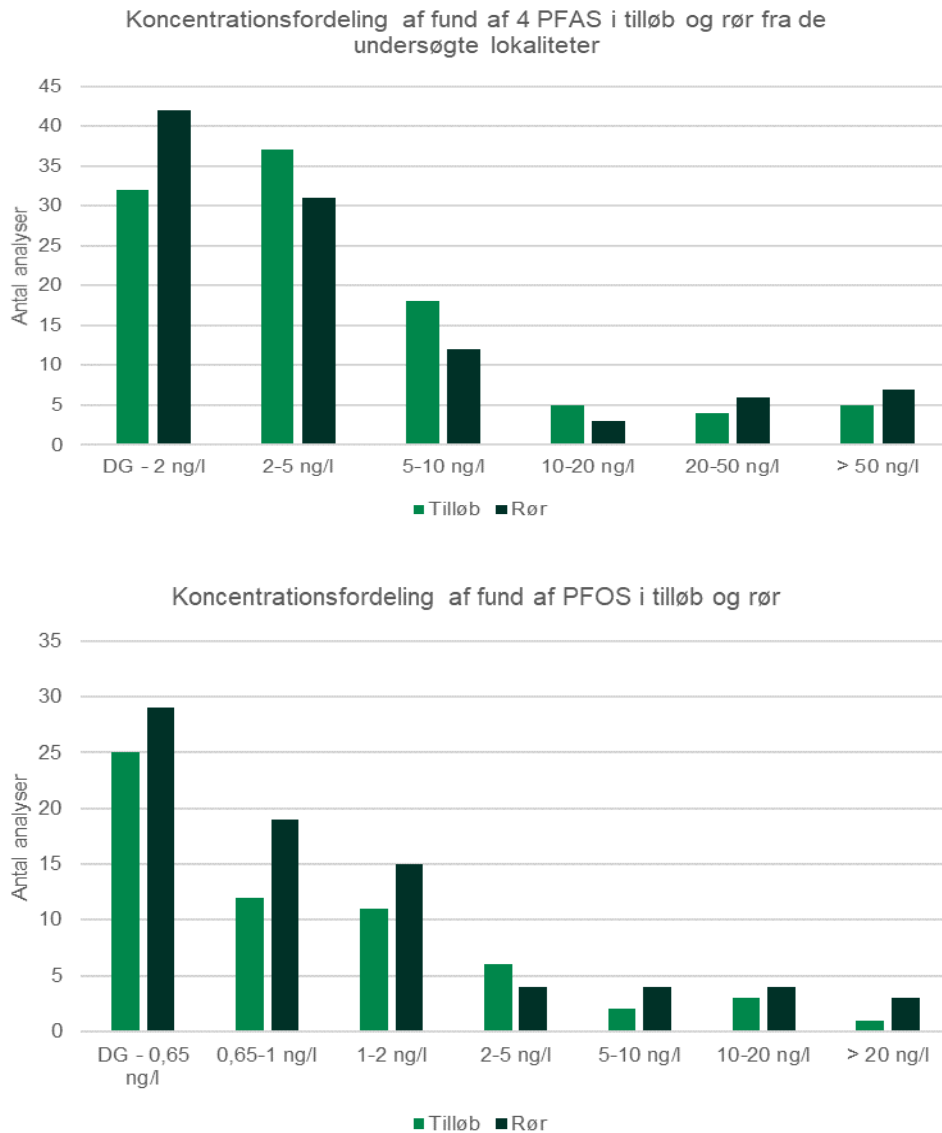


Figur 3.16 Koncentrationsfordeling af PFAS 4 (øverst) og PFOS (nederst) i vandprøver fra vandløb, der er taget hhv. opstrøms og nedstrøms en lokalitet, som potentielt kan påvirke vandløbet med PFAS-forbindelser

I forbindelse med regionernes undersøgelser, er der også udtaget vandprøver fra rør og tilløb, såfremt de var aktive på prøvetagningstidspunktet. Dette er sket bl.a. med henblik på at vurdere, hvorvidt rør og tilløb kan påvirke vandløbet med PFAS-forbindelser som en mulig direkte transportvej fra lokaliteten, eller om påvirkningen udelukkende skyldes en mulig grundvandsbåren forurening. Derudover er rør og tilløb prøvetaget for at vurdere evt. andre kilder og potentiel fortynding ved tilførsel af "rent" vand.

I Figur 3.17 er vist analyseresultater fra de tilløb og rør, der er prøvetaget i forbindelse med regionernes undersøgelser. Der er medtaget data for de prøver, der er angivet MR (Rør) og MT (tilløb). Da feltkampagnerne hovedsageligt er foretaget i perioder i løbet af foråret og sommeren, hvor der forventes en vandføring så tæt på medianminimum som muligt, har rør og tilløb ofte ikke været eller kun været begrænset aktive. Dog med undtagelse af enkelte større tilløb.

Derfor er udtaget 68 vandprøver fra tilløb ved 35 vandløb i forbindelse med regionernes undersøgelser, hvor ca. 68 % af prøverne overskrider grænseværdien for grundvand for PFAS 4 og ca. 40 % af prøverne overskrider miljøkvalitetskravet for PFOS (se Figur 3.17). Der er også udtaget 99 vandprøver fra rør ved 54 vandløb, hvor der er overskridelse af grænseværdien for PFAS 4 i 59 analyser, hvilket svarer til ca. 58 % og overskrider miljøkvalitetskravet for PFOS i ca. 41 % af prøverne.



Figur 3.17 Koncentrationsfordeling af PFAS 4 (øverst) og PFOS (nederst) i vandprøver fra vandløb, der er taget i rør og tilløb i nærheden af lokaliteter, som potentielt kan påvirke vandløbet med PFAS-forbindelser.

Ovenstående opsamling på analyser siger noget om, hvad der konstateres i vandløbene samt hvad der konstateres fra rør og tilløb. De skal dog kobles med vandføringsmålinger, som udføres på samme tid som prøvetagningen med henblik på at estimere en evt. forureningspåvirkning. Ifølge Miljøstyrelsen (2018) er det muligt at estimere en forureningsflux, såfremt der er fuld opblanding i et transekt på tværs af vandløbet ved:

$$J = Q * C, \text{ hvor } J \text{ er fluxen, } Q \text{ er vandføringen og } C \text{ er den målte koncentration i vandløbet.}$$

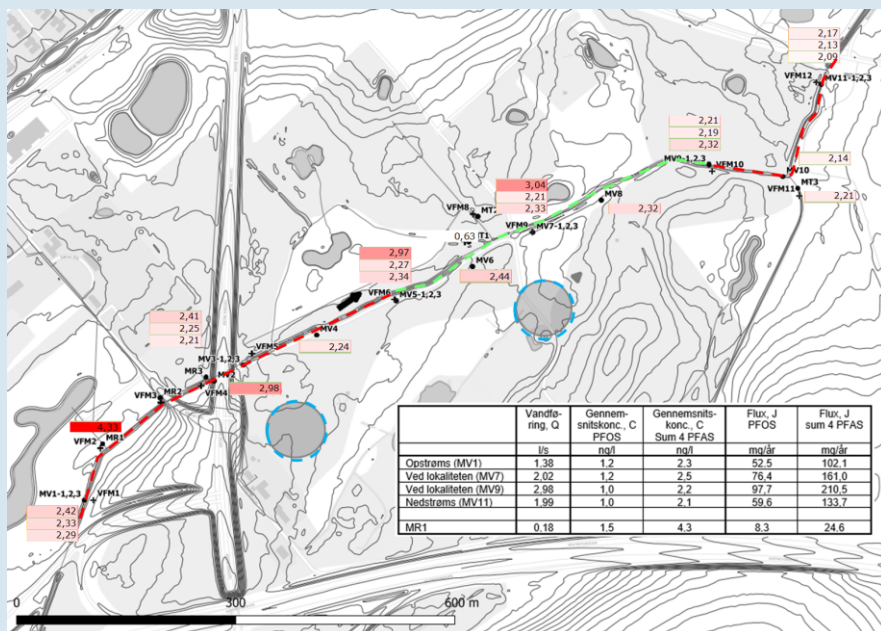
Dette kan herefter sammenholdes med ændringer i vandføringsmålingerne ned gennem vandløbet i forhold til at vurdere om, der sker en grundvandstilførsel eller tab af vand til undergrunden. Derudover kan bidraget fra en evt. flux fra et rør eller tilløb vurderes i forhold til den samlede påvirkning. Nedenstående case (se boks 3) viser, at de målte koncentrationer i vandløb ikke kan stå alene, når påvirkning af vandkvaliteten i et vandløb skal vurderes, men at andre parametre såsom vandføringsmålinger og vurdering af bidrag fra rør og tilløb skal inddrages.

Boks 3 – Jordforurenings påvirkning af vandløb. Eksempel

I Figur 3.18 er vist en case fra en af regionernes undersøgelser. I casen indgår to arealer, der er kortlagte på grund af lossepladsaktiviteter. Det er uvist, hvorvidt der har været deponeret PFAS-holdigt affald, så forbindelserne er medtaget i analyseprogrammet. Der er konstateret ni forskellige PFAS-forbindelser i vandprøverne, herunder PFOS og PFAS 4, der overskrider hhv. miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l og grundvandskvalitetskriteriet på 2 ng/l i alle vandprøverne fra selve vandløbet samt i rør, MR3 og tilløb MT3. Der er konstateret indhold af PFOS på op til en faktor 2,2 over miljøkvalitetskravet på 0,65 ng/l i vandprøverne. Forholdene i vandløbet repræsenterede ved prøvetagningstidspunktet den konservative situation i vandløbet, idet den nærliggende referencestation (med lang tidsserie) viste, at vandløbene i området havde en vandføring relativ tæt på deres medianminimumsvandføring (minimum fortynding i vandløbet).

Vandføringsmålinger ned gennem vandløbet viste målbar hydraulisk kontakt mellem vandløbet og grundvandet (dvs. grundvandstilførsel) på vandløbsstrækningen mellem MV5 og MV9 ud for den østlige del af lokaliteten. Dette bevirker, at en eventuel tilførsel af forurening fra lokaliteten kan blive tilført vandløbet på denne vandløbsstrækning. På den øvrige del af den undersøgte vandløbsstrækning var der på baggrund af vandføringsmålingerne tegn på tab af vand til undergrunden.

I Figur 3.18 er indsat tabel med beregning af flux i transekter, der er placeret ned gennem den undersøgte vandløbsstrækning. Der er estimeret en total stigning i fluxen og dermed massen af PFOS og de 4 PFAS-forbindelser i den undersøgte vandløbsstrækning fra MV1 opstrøms til MV9 nedstrøms det kortlagte område mod øst. Vandføringsmålingerne viste endvidere, at der var en grundvandstilførsel frem til MV9, hvilket forklarer stigningen i fluxen. Der er konstateret højere indhold af PFAS i røret, der kommer opstrøms lokaliteterne. Såfremt den beregnede flux blandes op i selve vandløbet, vil det give en estimeret koncentration, som er mindre end det, der er konstateret i selve vandløbet. Derfor vurderes røret, MR1, ikke at bidrage målbart til indholdet af PFAS-forbindelser i vandløbet. Konklusionen på undersøgelsen er således, at de to kortlagte områder vurderes at bidrage til en grundvandsbåren forurening med PFAS-forbindelser, som påvirker vandkvaliteten i vandløbet.



Figur 3.18 PFAS 4 konstateret i vandprøver fra case 1. Blå cirkler viser kortlagte forureninger, rød linje viser strækning med tab af vand til undergrunden og grøn linje viser målbar tilførsel af grundvand. Rødfarvning af koncentrationerne er farvet lineært fra kravet på 2 ng/l (hvid) til den maksimale påviste værdi (mørkerød). Indsat i tabel er vist fluxberegning for PFOS og PFAS 4.

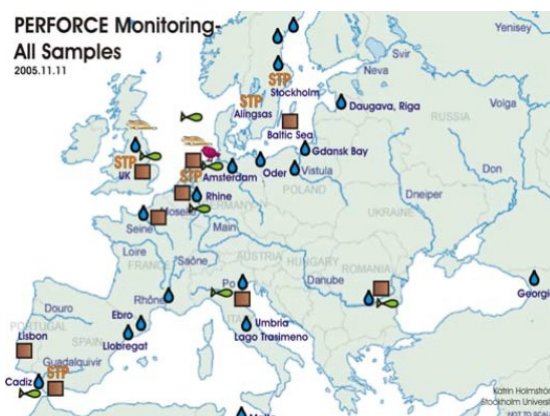
3.4.6 Data fra vandløb i udlandet

Der findes få nyere studier af PFAS-niveauer i vandløb fra udlandet, som kan give indsigt i såkaldte "baggrunds-niveauer". En del målinger i større kinesiske og indiske vandløb vurderes ikke at være repræsentative, idet disse områder ofte er karakteriseret af tung industri og større kilder. I vandløbssystemet ved Lake Victoria (Afrika) er der i 2009 målt PFOA og PFOS på 0,4-96,4 ng/l og 0,4-13,2 ng/l (Panieri, 2022). I Hubei provinsen i Kina (Qing River) ses der meget højere niveauer på op til 39,44-207,59 ng/l i målinger fra 2016-2017 (Panieri, 2022). I 64 vandprøver fra fem vandløb beliggende i ikke industrialiserede områder af Vietnam er der undersøgt for 13 PFAS-forbindelser i perioden 2013-2015. Der blev ikke konstateret PFAS-forbindelser over 5 ng/l i nogle af prøverne, men til gengæld blev der påvist PFOA og PFOS i over 81 % og 51 % af prøverne med gennemsnitskoncentrationer på ca. 1-3 ng/l (Lam, 2016).

I et ældre studie fra de Voogt et al (2007), præsenteres data fra målinger i flere forskellige europæiske vandløb. Hovedparten af målingerne er udført i 2005. En oversigt over de fundne koncentrationer ses i Tabel 3.3. Der ses niveauer af bl.a. PFOA og PFNA på under 0,14 ng/l og op til 200 ng/l. De "reneste" vandløb var i det nordlige Sverige, mens de store vandløb i Centraleuropa var mere påvirkede. I studiet blev der ikke analyseret for PFOS. Da danske vandløb er meget mindre end de fleste europæiske vandløb, er det svært at sammenligne disse niveauer med forholdene i de danske vandløb. I hollandske vandløb er der målt koncentrationer af PFOS i vandløb på mellem <10 og 56 ng/l (deVoogt, 2006).

Tabel 3.3 Koncentration i prøver fra større europæiske vandløb (de Voogt, 2007). Prøver er hovedsageligt udtaget i 2005.

River	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA
Dalälven	<0.94	0.36	<0.97	<0.14
Vindelälven	<0.58	0.20	<0.65	0.22
Kalix Älv	<0.58	0.26	<0.85	<0.14
Elbe	15.3	2.7	7.6	0.27
Oder	2.2	0.73	3.8	0.73
Vistula	2.3	0.48	3.0	0.36
Po	19	6.6	200	1.5
Danube	3.0	0.95	16.4	0.27
Daugava	<0.90	0.53	<1.37	0.22
Seine	14.5	3.9	10.6	1.43
Loire	3.2	0.87	3.3	0.42
Thames	32	4.1	23	0.79
Rhine	18.2	1.80	11.6	0.55
Guadalquivir	6.2	1.58	4.6	1.02

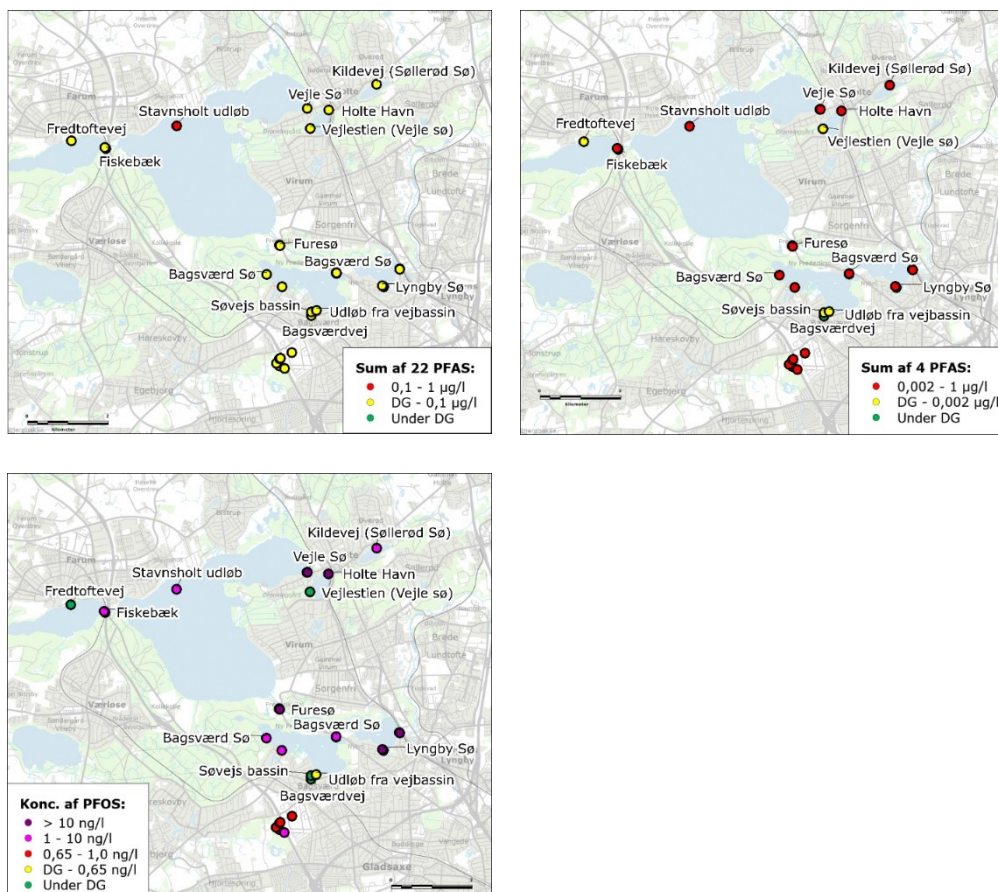


3.5 Søer

Der er ikke data i VanDa vedrørende vandprøver, der er udtaget i søer og analyseret for PFAS-forbindelser. Der er udtaget sedimentprøver fra 18 søer i november og december 2008, som der ligger data på i VanDa, og Miljøstyrelsen står som dataejer. Der er i ingen af sedimentprøverne konstateret PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen, som er 10 µg/kg for alle analyser - undtagen en enkelt analyse, hvor der er angivet en detektionsgrænse på 100 µg/kg. PFAS-forbindelser overvåges i biota i NOVANA-programmet, hvilket formentlig forklarer de meget få data for sediment (og vand). Som tidligere nævnt er data vedr. biota ikke medtaget i nærværende

notat. Derudover skal det bemærkes, at der i forbindelse med regionernes undersøgelse af jordforureninger i nærheden af overfladevand ikke blev udtaget vandprøver fra søer. Her blev der i stedet udført borer mellem lokaliteten og søen, hvor der blev udtaget grundvandsprøver til kemisk analyse for bl.a. PFAS.

Kommunerne Lyngby-Taarbæk, Gladsaxe, Furesø og Rudersdal har i et samarbejde undersøgt flere søer og åer samt spildevandsudløb for PFAS. Resultaterne fra undersøgelse er vist på Figur 3.19 for hhv. PFAS 22, PFAS 4 og PFOS. Prøverne er udtaget i 2022, og der er analyseret for PFAS 22 med en generel detektionsgrænse på 0,3 ng/l. For nogle parametre er detektionsgrænsen 1-10 ng/l på grund af interferens.



Figur 3.19 Koncentration af hhv. PFAS 22, PFAS 4 og PFOS i vandprøver udtaget fra overfladevand forskellige steder i Gladsaxe, Furesø, Lyngby-Taarbæk og Rudersdal kommuner. DG: Detektionsgrænse.

Figur 3.19 viser fund af PFAS-forbindelser i de undersøgte prøver fordelt på PFAS 22, PFAS 4 og PFOS. I hovedparten af prøverne er koncentrationen for PFAS 22 under grænseværdien for grundvand på 100 ng/l. For PFAS 4 er grænseværdien for grundvand på 2 ng/l, og her er grænseværdien for hovedparten af prøvestederne overskredet. Ved enkelte prøvesteder er PFAS 4 under grundvandskvalitetskriteriet for grundvand og et enkelt sted (ved Bagsværdvej) er der ikke påvist PFAS 4 over detektionsgrænsen.

Det generelle miljøkvalitetskrav for PFOS i ferskvand på 0,65 ng/l er overskredet i hovedparten af prøverne, og flere steder er koncentrationen over 10 ng/l. Der er enkelte steder, hvor indholdet af PFOS er under detektionsgrænsen, men i flere af disse prøver er detektionsgrænsen op til 10 ng/l, og derfor kan der sagtens være indhold af PFOS over miljøkvalitetskravet i disse prøver.

3.5.1 Data fra søer i udlandet

Det mest repræsentative studie af PFAS-niveauer i søer i udlandet vurderes at være et svensk screeningsstudie fra 2016 (Ahrens, 2016). Her er der bl.a. undersøgt for PFAS i ti søer, som ligger i øde områder, og derfor ikke kan være påvirket af spildevand (eller andet vandudledning), PFAS punktkilder eller industrier. Ved disse er der fundet gennemsnitlige koncentrationer af 3,4 ng/l for PFAS 22 (median på 1,4 ng/l), som må formodes at skyldes atmosfærisk deposition. Detektionsgrænserne for analysemetoderne har varieret mellem 0,03 og 0,25 ng/l for de enkelte forbindelser.

Sammensætningen i søer kan ses på Figur 3.20 angivet som "screening lakes", hvor der også kan ses den målte sammensætning i andre vandløb og søer, tættere på byområder og potentielle punktkilder. I overfladevand var miljøkvalitetskravet for PFOS overskredet i 42% af prøverne. Summen af 26 PFAS-forbindelser i overfladevand fra ikke øde områder var i gennemsnit 112 ng/l (median 4,1 ng/l) fra 285 prøver, mens der i grundvand blev påvist i gennemsnit 49 ng/l (median 0,4 ng/l).

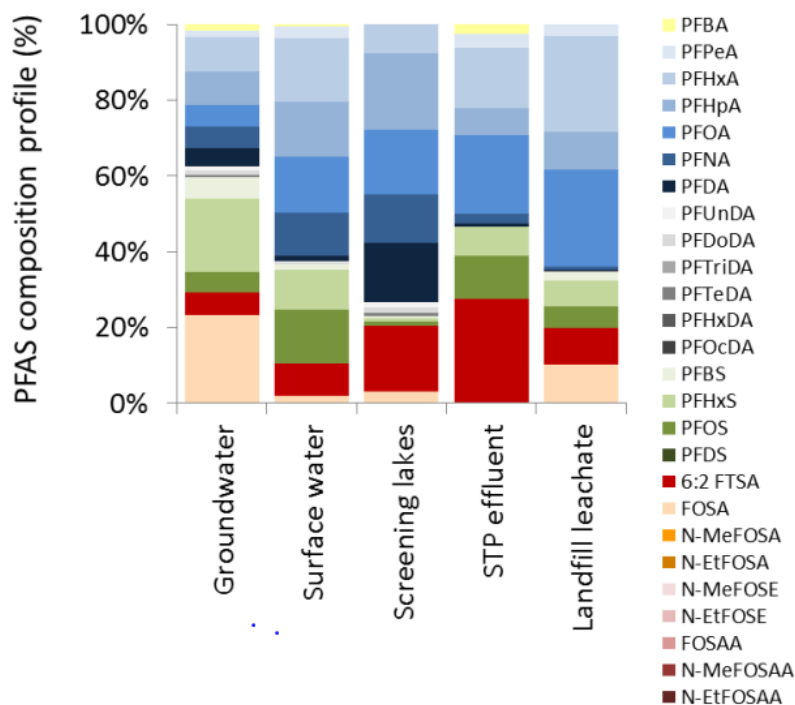


Figure 8. Composition profile (%) for individual PFASs for groundwater (n = 164), surface water (n = 285), screening lakes (n = 10), sewage treatment plants (STP) effluents (n = 13) and landfill leachates (n = 10).

Figur 3.20 Sammensætning af PFAS (26 forbindelser i analysepakken) i prøver fra Sverige. Der er målt i 2016, i grundvand, overfladevand, og "jomfruelige" søer (screening lakes). Det ses bl.a. af indholdet af PFOS i disse screeningsøer er meget lavt, mens PFCA-gruppen dominerer sammensætningen (Ahrens, 2016). I Ahrens, 2016, dækker beskrivelse overfladevand både vandløb og søer. "Screening lakes", refererer til søer i meget øde områder.

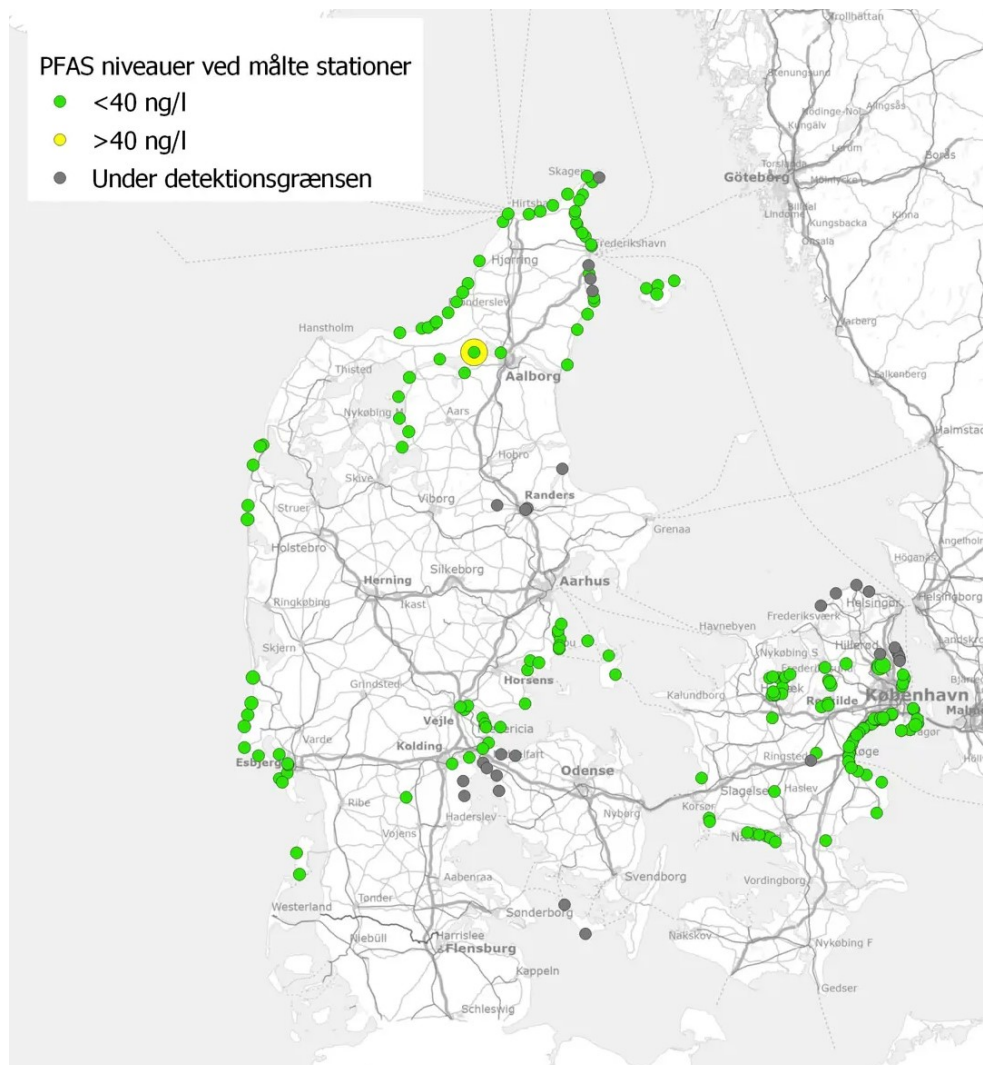
I andre studier er der fundet 0,4–11,65 ng/l for PFOA og 0,4–2,53 ng/l for PFOS i Lake Victoria (Afrika). I en svensk sø, beliggende i nærheden af en brandøvelsesplads, er der målt 1700 ng/l for sum af 9 PFAS-forbindelser (Panieri, 2022).

3.6 Kyster og fjorde

Miljøstyrelsen har sammen med kommunerne undersøgt badevand for PFAS 4. Der er både udtaget almindelige badevandsprøver og skimmeprøver af de øverste vandlag (Miljøstyrelsen 2022c).

For PFAS 4 gælder en vejledende grænseværdi for badevand på 40 ng/l. Der er 41 kommuner, som har analyseret i alt 216 prøver i henholdsvis badesøer og kystvande, og Miljøstyrelsen har udtaget badevandsprøver ved 50 badevandsstationer jævnt fordelt langs Danmarks kyster. Alle badevandsprøverne er udtaget i 0,30 meters dybde.

Undersøgelsen viste, at koncentrationen af PFAS 4 i badevandet, i havet og søer generelt ligger væsentligt under den vejledende grænseværdi for badevand. I en enkelt kommune blev der dog i en enkelt badevandsanalyse konstateret overskridelse af grænseværdien, men ved en opfølgende prøvetagning var analyseresultatet under grænseværdien. Der blev påvist indhold af PFAS-forbindelser under grænseværdien i 48 ud af de 50 badevandsanalyser. I de sidste to er der ikke påvist PFAS-forbindelser over den generelle detektionsgrænse, som ligger mellem 0,2-1 ng/l.

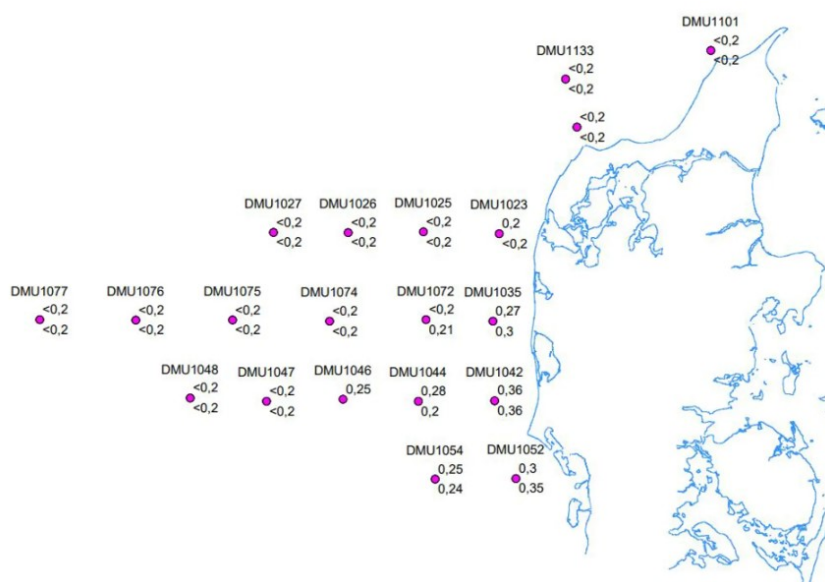


Figur 3.21 Kommunernes målinger af de PFAS 4 i badevandet (Miljøstyrelsen, 2022c)

Derudover har Miljøstyrelsen udtaget 50 skimmeprøver af det allerøverste lag af havvandet. På to lokaliteter blev der desuden udtaget skimmeprøver i små indsøer på stranden. Indsøer er småsøer, der kan opstå på stranden, og som kan forsvinde igen. De undersøgte indsøer var af en størrelse på cirka 30 kvadratmeter.

Niveauet af PFAS 4 i skimmeprøverne var på niveau med, hvad der er fundet i badevandsprøverne. Analyseresultaterne af skimmeprøverne fra to indsøer ved Henne Strand i Varde Kommune viser dog koncentrationer af PFAS 4 på henholdsvis 1.000 ng/l og 270 ng/l.

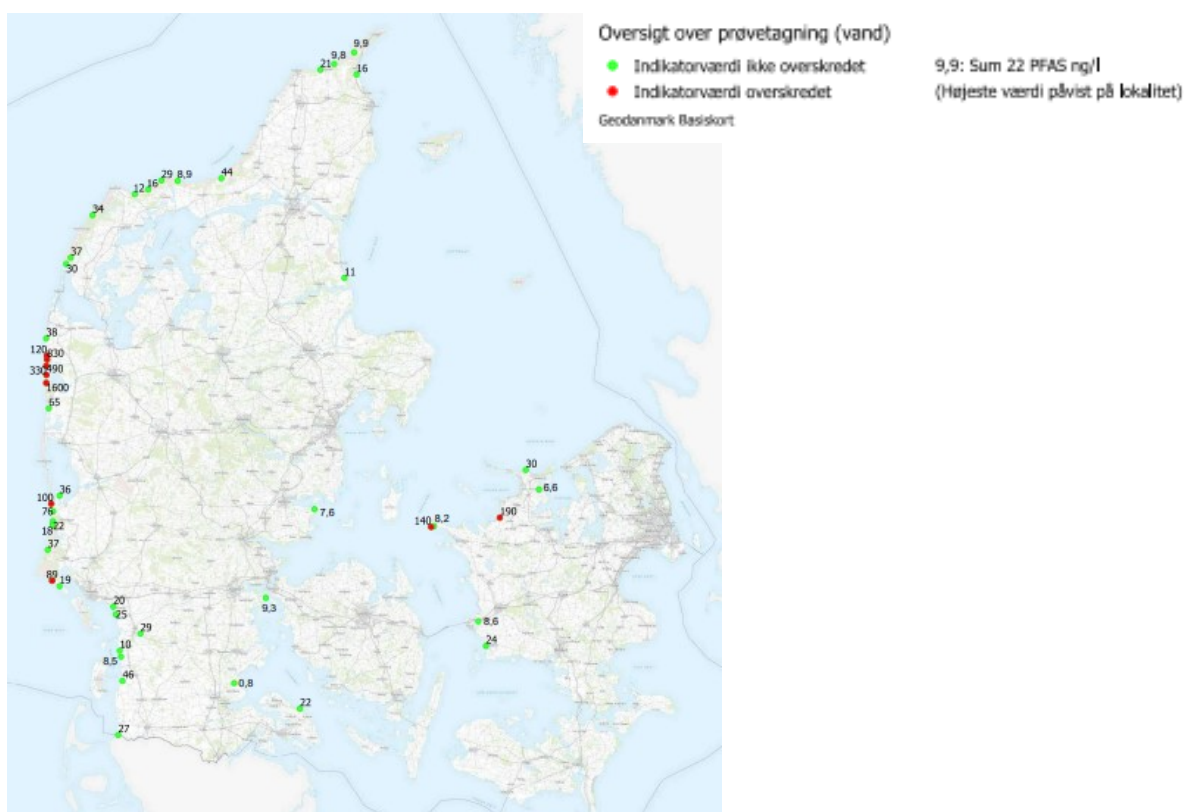
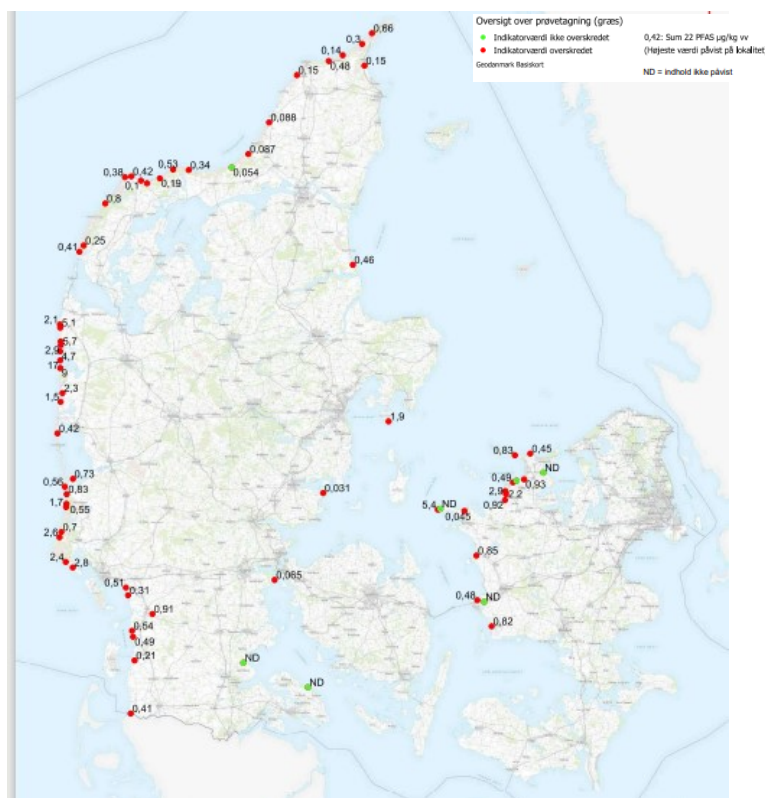
I september 2023 tog Miljøstyrelsen vandprøver i Nordsøen. Her blev der analyseret for PFBS, PFBA, PFHxA, PFOSA, PFOS, PFOA og PFPeA (Miljøstyrelsen 2023a). Der blev taget vandprøver på i alt 20 lokaliteter i en afstand fra seks til 300 km fra kysten. Der blev taget prøver fra 2 dybder på hver lokalitet, i cirka 5 meters dybde og i 17-75 meters dybde. Miljøkvalitetskravet for PFOS i marint overfladevand er på 0,13 ng/l. Vurderinger ift. miljøkvalitetskravet kræver mindst 12 årlige målinger på samme lokalitet, og derfor kan fund i denne undersøgelse ikke vurderes ift. miljøkvalitetskravet. Resultaterne indikerer højere koncentrationer for PFOS på 0,27-0,36 ng/l på målestationer ca. 30 km fra kysten og faldende koncentrationer ned til 0,25 ng/l på målestationer 65 til 123 km væk fra kysten. Der er ikke fundet PFAS-forbindelser længere ude end 123 km fra kysten. Der blev ikke fundet tydelige forskelle på indholdet i de 2 målte dybder.



Figur 3.22 Kortet viser analyseresultaterne for PFOS ved de 20 prøvestationer. Alle resultater er angivet i ng/l. For hver station er angivet måleresultater fra de to dybder. Resultatet <0,2 angiver, at koncentrationen af PFOS er under analysemetodens detektionsgrænse (Miljøstyrelsen, 2023a)

I 2022 gennemførte Miljøstyrelsen og Naturstyrelsen en undersøgelse, hvor der blev taget prøver for PFAS 22 af græs og overfladevand på 67 statsejede engarealer (Miljøstyrelsen, 2023b). Prøverne blev primært taget i en afstand af op til 1 km fra havet langs Vestkysten fra Skagen til grænsen og langs den sjællandske vestkyst fra Rørvig til Skælskør. Desuden blev taget syv prøver ved den østjyske kyst. Fødevarestyrelsens indikatorværdier var overskredet på 60 engarealer. Ligeledes blev der fundet PFAS-forbindelser over indikatorværdien i vandhuller på 9 arealer ud af i alt 47 undersøgte arealer.

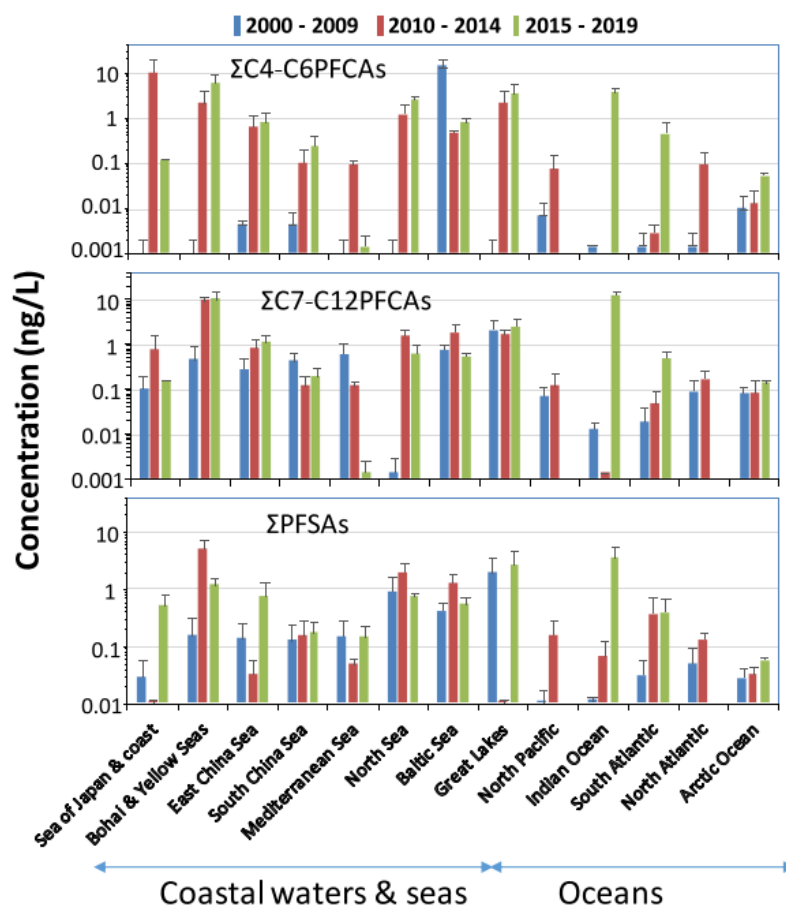
Resultaterne kan tyde på, at der kan være tale om diffus forurening med PFAS, som blandt andet kan spredes fra havet til land. Der er dog brug for yderligere undersøgelser af mulige kilder og spredningsveje for at kunne fastlægge dette (Miljøstyrelsen, 2023b).

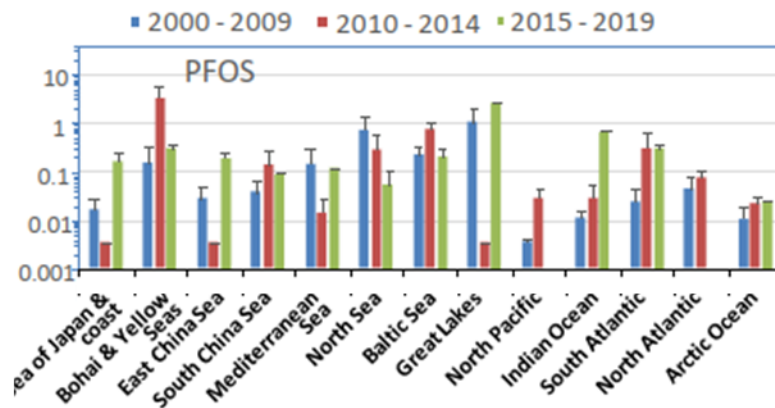


Figur 3.23 Figuren viser 2 kort med fund af PFAS 22 i græs (øverst) og overfladevand (nederst), (Miljøstyrelsen, 2023b)

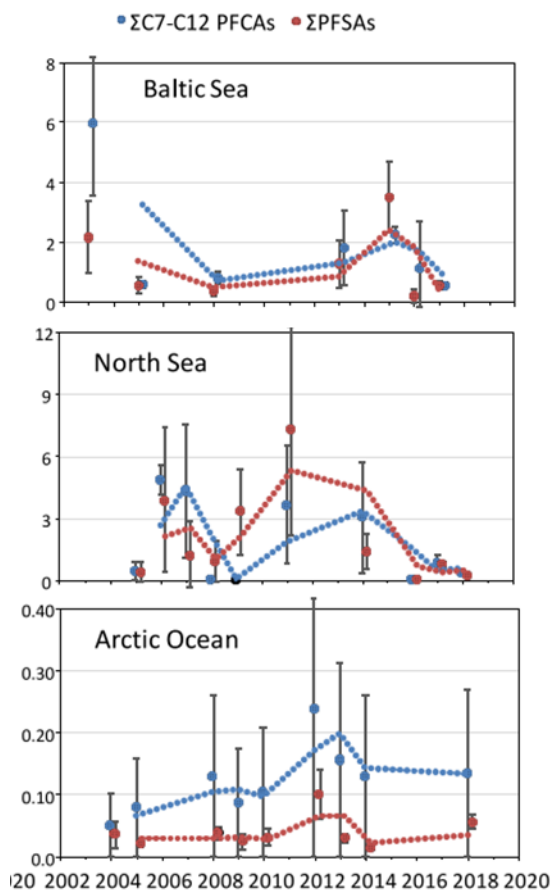
3.6.1 Data fra kyster i udlandet

Der er på verdensplan indsamlet og databehandlet målinger fra over 29.000 prøver af PFAS-forbindelser i kyst og åben hav siden 2000 og beregnet mediankoncentrationer over tre perioder; 2000-2009, 2010-2015 og 2015-2019 (Muir, 2021). En oversigt over disse målinger ses i Figur 3.24. Der ses generelt niveauer mellem 0,1 og 10 ng/l i prøver fra hele verden. PFOS-koncentrationer er generelt mellem 0,01 og 1 ng/l. PFAS-niveauer over 1 ng/l, i perioden 2015-2019 er målt i kystvande i Asien, i Nordsøen og i det indiske hav (Bohai og Yellow Sea) og er sammenfaldende med de højeste PFOS niveauer. Det ses dog faldende koncentrationer i Nordsøen og Østersøen igennem perioden (se Figur 3.25).





Figur 3.24 Median koncentrationer af kort og langkædede PFCA's, (PFOA er C8-PFCA) og PFSA's (PFOS er C8-PFSA) i kystvande og hav verden over. Værdier angives i ng/l. Nederst ses samme data for PFOS (Muir, 2021)



Figur 3.25 Variation af median koncentrationer af ΣC7-C12 PFCA's og ΣPFSA's i hav omkring Danmark over en periode på ca. 15 år. Koncentration angives i ng/l. Figuren er modificeret fra (Muir, 2021)

Udvikling i koncentrationen over tid ses på Figur 3.25, hvor data for de kystvande, der omgiver Danmark, er vist. Her ses en faldende tendens for PFSA i Nordsøen og det Baltiske hav siden 2014, med værdier på ca. 1-2 ng/l i Østersøen (Baltic Sea) og ca. 0,5 ng/l i Nordsøen. I det arktiske hav måles der stabile niveauer på ca. 0,15 ng/l for PFCA og 0,02 ng/l for PFSA.

Det er vist, at PFAS-forbindelser (og andre overfladeaktive forbindelser) vil opkoncentreres i bølgeskum, hvorfra PFAS-forbindelserne kan transporteres til atmosfæren via havsprayaerosoler (Sha, 2022). Aerosolerne kan transportere sig mere end 300 km fra kystarealer, og dermed kan PFAS-forbindelser nedfælde langt fra kysten med nedbør. Det er svært at kvantificere bidrag fra disse havaerosoler. Et studie i Norge har målt PFAS på to lokaliteter hhv. 1,3 og 20 km fra kysten, hvor PFAS-niveauer blev sammenholdt med Na⁺ niveauet som indikator for hav-aerosoler (Sha, 2022). Studiet konkluderede en signifikant sammenhæng mellem indhold af PFAS-forbindelser og påvirkning fra haveaerosoler i luftprøverne, især for PFOA i den mest kystnære lokalitet (1,3 km fra kysten).

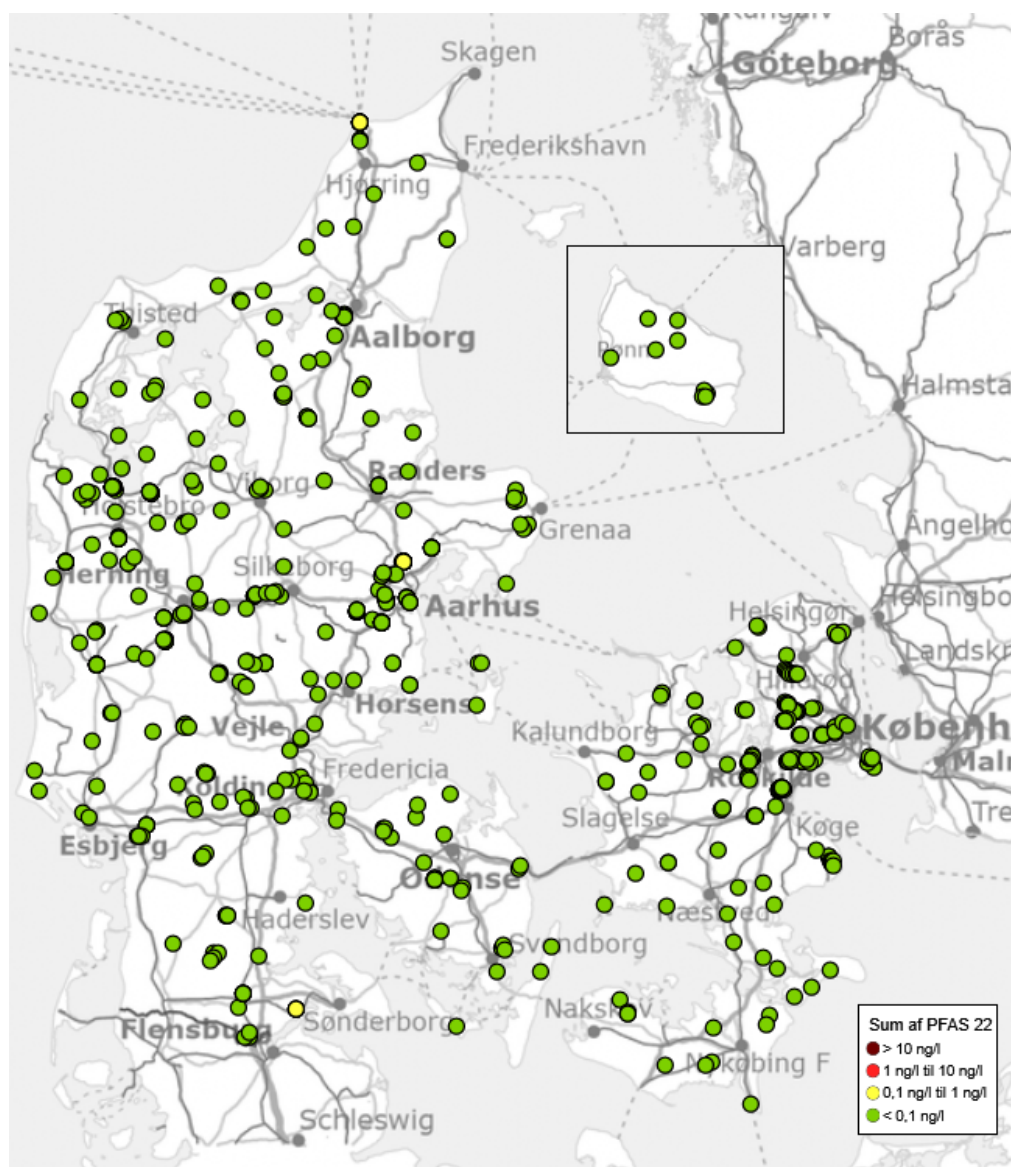
3.7 Grundvand

3.7.1 Fund i det danske grundvand

Der er lavet et udtræk fra Jupiter-databasen den 22. august 2022 for hele Danmark, hvor der er udtrukket analyser for PFAS-forbindelser. Der ligger i Jupiter databasen analysedata for PFAS-forbindelser i grundvand tilbage til 2013. I det videre arbejde med data, medtages kun den nyeste analyse fra hvert indtag i borerne.

Detektionsgrænsen for PFAS-analyser er meget forskellig over tid. Før 2016 var detektionsgrænsen 10 ng/l for hvert af PFAS-forbindelserne, og her indeholdt analysepakken 12 PFAS-forbindelser. Efterfølgende blev detektionsgrænsen sænket til 1 ng/l for hver af de 12 PFAS-forbindelser. I august 2021 er detektionsgrænsen sænket yderligere til 0,3 ng/l for 12 PFAS-forbindelser, og i 2022 udvides analysepakken, så der nu analyseres for 22 PFAS-forbindelser. Der kan desuden være forskel på detektionsgrænsen i den enkelte analyse for hver af de enkelte forbindelser på grund af interferens.

På Figur 3.26 er vist indholdet af summen af PFAS 22 i den nyeste analyse i indtag i Danmark. Der er valgt kun at medtage de analyser, hvor der er analyseret for PFAS 22. Der er vist indhold i alle typer borer både forurenings-, indvindings- og GRUMO-boringer m.fl.



Figur 3.26 Sum af PFAS 22 i borer i Danmark, jf. Jupiter-databasen. Figuren viser seneste analyser fra de enkelte borer, som er udtaget i perioden maj 2021 til august 2022

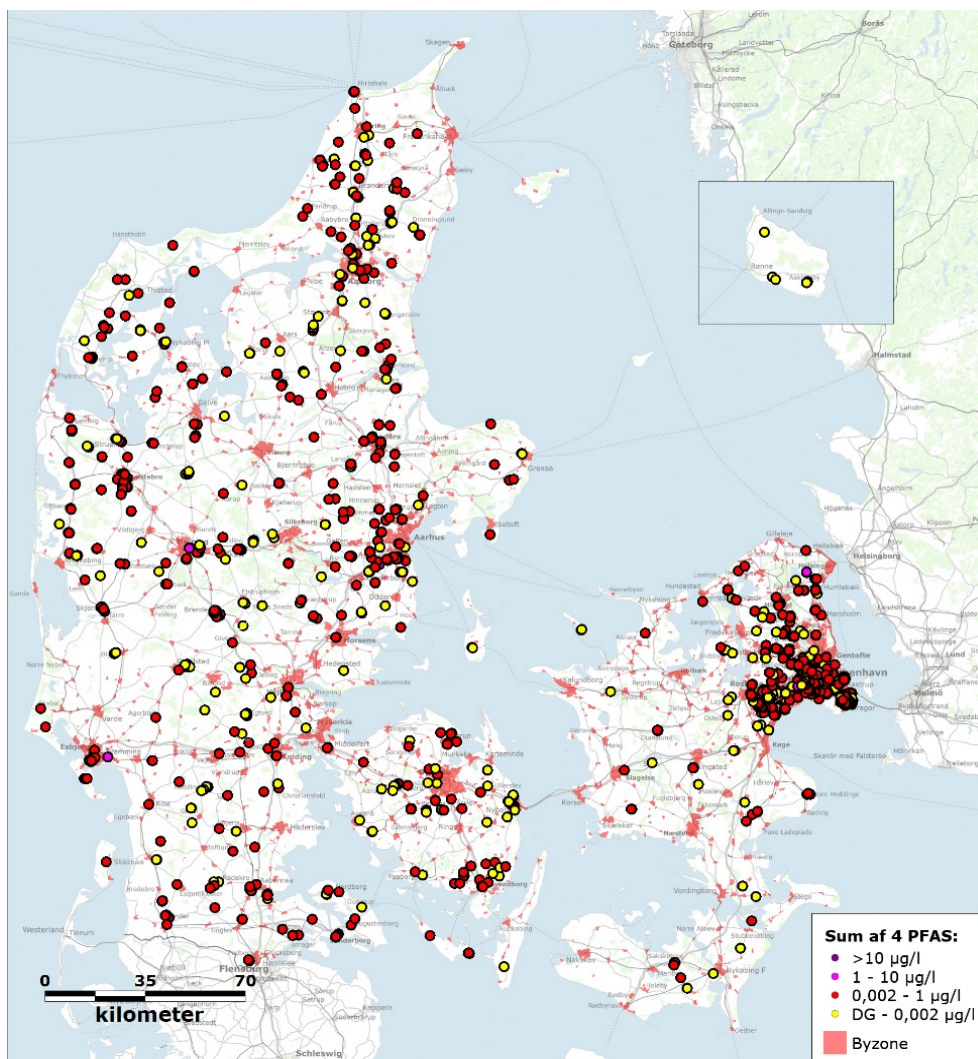
Der er en overvægt af målinger i Region Hovedstaden jf. Tabel 3.4. Ud fra Tabel 3.4 ses det, at 45,4 % af indtag med PFAS-analyser i perioden maj 2021- august 2022 ligger i Region Hovedstaden.

I ca. lidt under halvdelen af de indtag, hvor der er analyseret for PFAS-forbindelser, er der fund over detektionsgrænsen for en eller flere PFAS-forbindelser jf. Tabel 3.4. I Region Hovedstaden er der fund over detektionsgrænsen i 57,4 % af indtagene.

Tabel 3.4 Antal indtag med analyser og antal fund af en eller flere PFAS-forbindelser. Tabellen er baseret på den seneste analyse for hvert indtag. Data stammer fra Jupiter udtræk i august 2022 og indeholder data for perioden maj 2021 til august 2022.

	Antal indtag med PFAS analyser	Antal analyserede indtag med fund af PFAS
Region Hovedstaden	4.118	2.363 (57,4 %)
Region Nordjylland	913	400 (43,8 %)
Region Syddanmark	1.396	466 (33,4 %)
Region Sjælland	789	179 (22,7 %)
Region Midtjylland	1.855	789 (42,5 %)
I alt	9.071	4.197 (46,3 %)

På Figur 3.27 er vist boringer med fund over detektionsgrænsen for PFAS 4 sammenholdt med byområder. Der ses en jævn fordeling over hele landet, dog med en større hyppighed i hovedstadsområdet. På figuren ses en del boringer med indhold af PFAS 4, der ligger over grundvandkvalitetskriteriet for grundvand for PFAS 4 på 2 ng/l, hvilket også ses af Tabel 3.5.



Figur 3.27 Boringer med fund af PFAS 4 i Danmark, jf. Jupiter udtræk af august 2022. Figuren viser den seneste analyse, udtaget i perioden maj 2021 til august 2022 ift. Jupiter udtræk 2022 for hver boring og kan dermed omfatte varierende detektionsgrænser. DG: Detektionsgrænse.

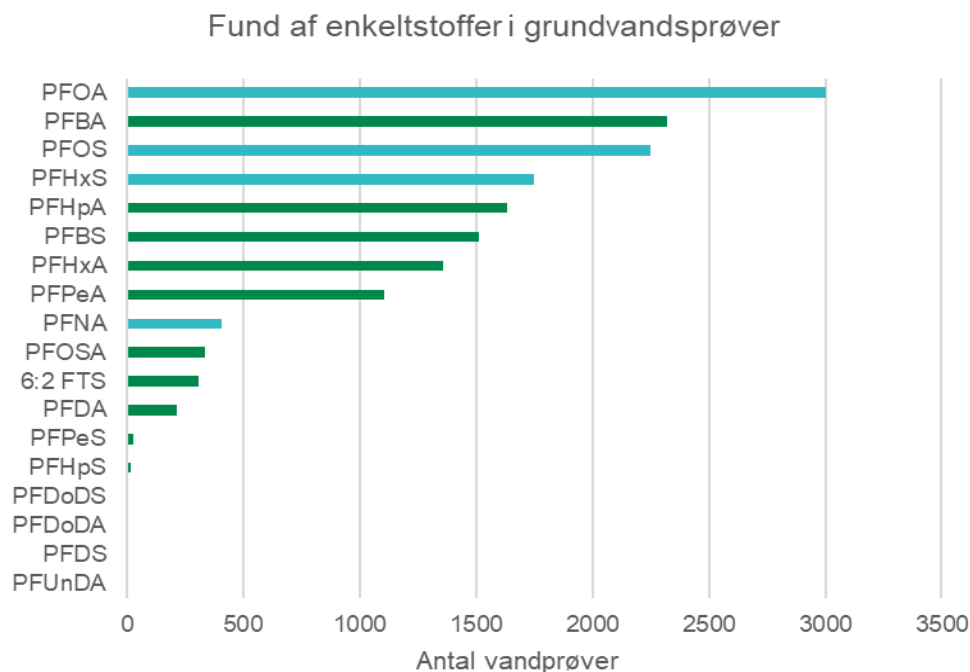
I Tabel 3.5 er vist antallet af fund over og under grundvandskvalitetskriteriet for grundvand for PFAS 4.

For PFAS 4 ligger koncentrationen under grundvandskvalitetskriteriet for grundvand på 2 ng/l i 7,6 % af indtagene. Derimod ligger koncentrationen over grundvandskvalitetskriteriet for PFAS 4 i 22 % af indtagene og i 9,7 % af indtagene over 10×grundvandskvalitetskriteriet.

Tabel 3.5 Indtag med fund af PFAS 4 i seneste analyse jf. Jupiter udtræk af august 2022.

	PFAS 4	
	Antal	%
Samlet antal indtag	9.071	
Indtag uden fund	5.508	60,7
Indtag med fund under grundvandskvalitetskriteriet	692	7,6
Indtag med fund over grundvandskvalitetskriteriet	1.993	22,0
Indtag med fund over 10×grundvandskvalitetskriteriet	878	9,7
Grundvandskvalitetskriterium	2 ng/l	

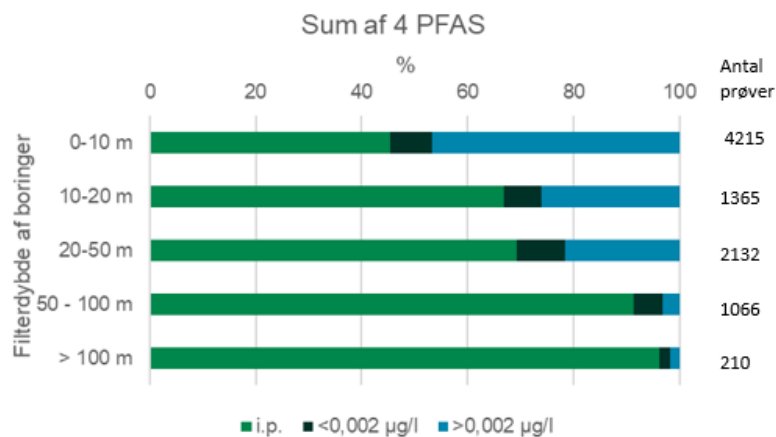
På Figur 3.28 er vist fund af de forskellige PFAS-forbindelser i boringer fra Jupiter-databasen. Figur 3.28 viser, at der i de undersøgte vandprøver med fund oftest forekommer PFOA, PFBA og PFOS. Der er fund af 18 forskellige PFAS-forbindelser i vandprøverne i Jupiter-databasen, men da der først er analyseret for PFAS 22 i 2022, er der endnu ikke så mange analyser for de 10 "nye" PFAS-forbindelser, og dermed heller ikke så mange fund af disse.



Figur 3.28 Fund af PFAS-forbindelser i 8.740 vandprøver fra Jupiterdatabasen, jf. Jupiter udtræk af august 2022. Figuren viser den seneste analyse for hvert indtag og kan dermed omfatte varierende detektionsgrænser. PFAS 4 er vist med blå.

For at se sammenhængen mellem filterdybden af boringer og koncentrationen af PFAS-forbindelser i seneste analyse er disse to parametre plottet på Figur 3.29. Der er benyttet oplysninger om bunden af filter i hver en-

kelt boring, og hvis der ikke er oplysninger om filterdybde er benyttet dybde af boring. Hvis der hverken er oplysninger om filterbund eller dybde af boring er den pågældende boring ikke medtaget på figuren. Til højre på figuren er vist antallet af boringer, hvor der er udtaget prøver for hvert interval af filterdybde af boringer. Der er taget udgangspunkt i analyseresultaterne for summen af PFAS 4.



Figur 3.29 Koncentration af PFAS 4 i forhold til filterdybde af boringer, jf. Jupiter udtræk af august 2022. Figuren viser den seneste analyse for hver boring og kan dermed omfatte ældre analyser og varierende detektionsgrænser.

Figur 3.29 viser flere fund af PFAS 4 i filtre tættere på terræn. I Tabel 3.6 er vist fund af PFAS 4 i seneste analyse i indtag, beliggende enten indenfor eller udenfor byområde. Tabel 3.6 viser, at der generelt er flere fund af PFAS-forbindelser i boringer med indtag i byområder end i boringer med indtag uden for byområder.

Tabel 3.6 Fund af PFAS 4 i seneste analyse i boringer beliggende inden for eller uden for byområde.

	Byområde		Uden for byområder	
	Antal indtag	Antal indtag med fund af PFAS 4	Antal indtag	Antal indtag med fund af PFAS 4
Region Hovedstaden	2.293	1.132 (49,4 %)	1.825	842 (46,1 %)
Region Nordjylland	348	168 (48,3 %)	565	164 (29,0 %)
Region Syddanmark	422	164 (38,9 %)	974	260 (26,7 %)
Region Sjælland	143	47 (32,9 %)	646	102 (15,8 %)
Region Midtjylland	775	407 (52,5 %)	1.080	277 (25,6 %)
I alt	3.981	1.918 (48,2 %)	5.090	1.645 (32,3 %)

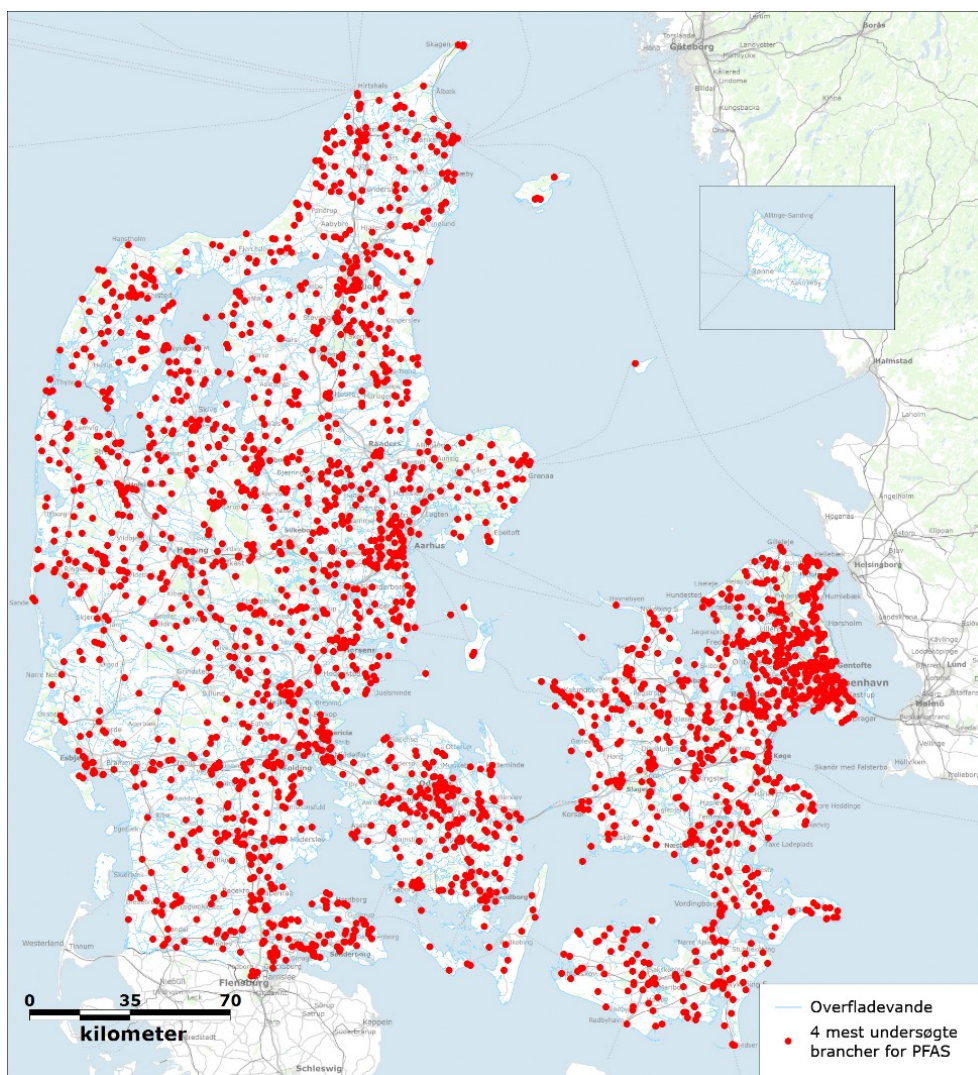
3.7.1.1 Fund i grundvand ved punktkilder iht. Jordforureningsloven

Regionernes Videnscenter for Miljø og Ressourcer har i 2021 lavet en opsummering af regionernes arbejde med undersøgelser for PFAS ved forskellige brancher for de kortlagte grunde. Data er primært fra 2015-2021, da regionerne i 2015 begyndte at tage vandprøver fra brancher, hvor der potentielt kunne være anvendt PFAS-forbindelser. De brancher, som er hyppigst undersøgt for PFAS af regionerne er vist i Tabel 3.7. Vandprøverne fra de kortlagte lokaliteter er som udgangspunkt analyseret for 12 PFAS-forbindelser og med en detektionsgrænse på 1 ng/l. Vandprøverne fra de kortlagte lokaliteter er også med i Jupiterudtrækket og er derfor også vist på figurene tidligere i dette afsnit.

Tabel 3.7 Påvisning af PFAS-forbindelser i de fire hyppigst undersøgte brancher af kortlagte grunde. Forkromning er opgjort som en branche for sig, men vises her også sammen med øvrig jern- og metalvareindustri, som er den mest undersøgte branche.

	Antal lokaliteter	>detektions-grænse	PFAS 12 >1 µg/l (10xgrænseværdi)	PFAS 4 >0,02 µg/l (10xgrænseværdi)
Jern- og metalvareindustri (forkromning)	409 (30)	81% (97%)	5% (17%)	31% (47%)
Losse- og fyldpladser	258	73 %	2%	23%
Træ- og møbelindustri	99	89 %	3%	33%
Renserier	57	95%	0%	53%

Ved de hyppigst undersøgte brancher er der også et stort antal fund af PFAS-forbindelser. Alle regionernes kortlagte grunde har tilknyttet en branchekode og på Figur 3.30 er vist de kortlagte grunde med de fire brancher fra Tabel 3.7.

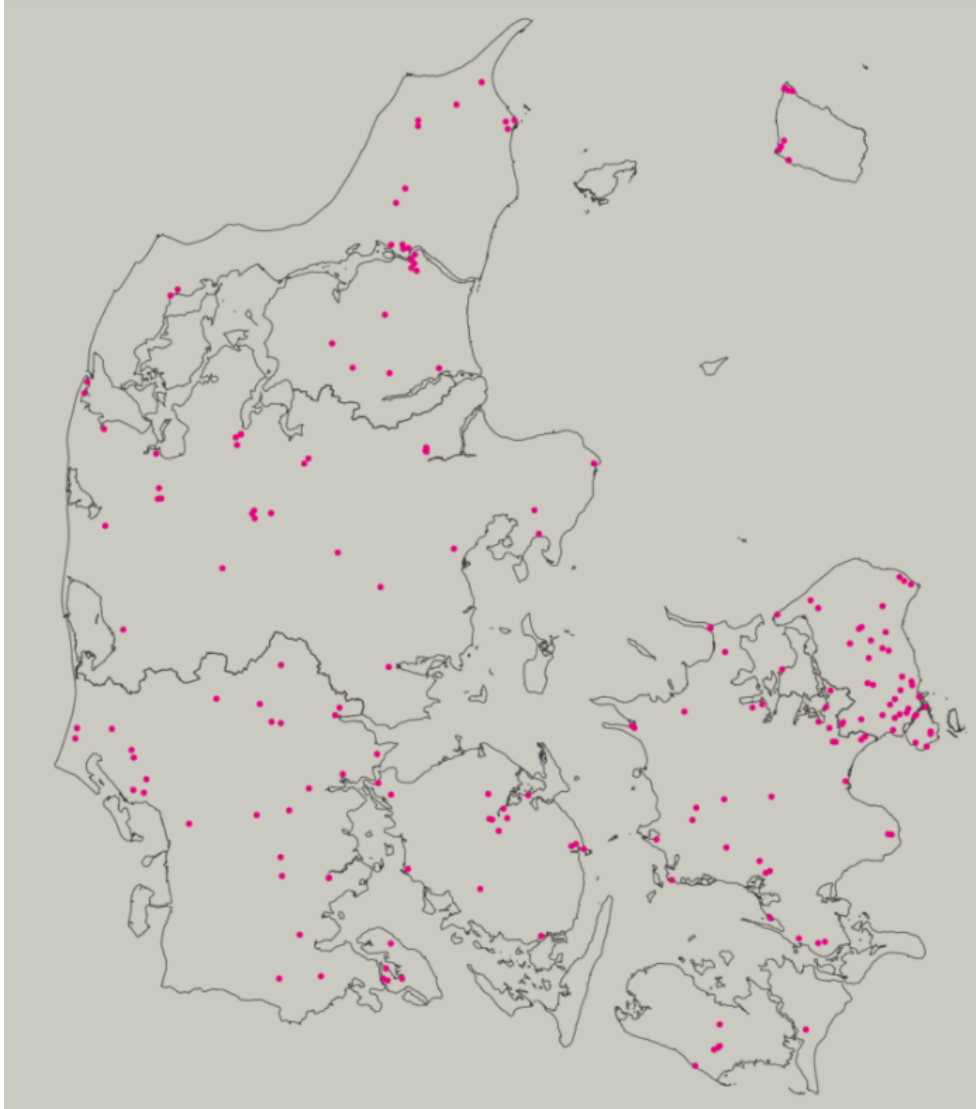


Figur 3.30 Kortlagte grunde med de 4 hyppigst undersøgte branchekoder og overfladevand.

Figur 3.30 viser, at regionerne har udført analyser for PFAS-forbindelser på et stort antal kortlagte lokaliteter, og at lokaliteterne er spredt godt i hele landet, dog med en overvægt af lokaliteter i Region Hovedstaden. Der er 3.078 lokaliteter med de fire brancher fra

Tabel 3.7, og i nærheden af disse kortlagte grunde kan der være risiko for forurening af overfladevand og grundvand. Med hensyn til fund i overfladevand henvises til afsnit 3.4.

Den branche med de største bidrag til forurening med PFAS er brandøvelsespladser. På Figur 3.31 er vist regionernes overblik over brandøvelsespladser i Danmark.



Figur 3.31 Brandøvelsespladser i Danmark fra marts 2022 jf. Danske Regioner 2022

Figur 3.31 viser at der et forholdsvis stort antal brandøvelsespladser i Danmark (næsten 200), der er jævnt fordelt over hele landet, dog flest i hovedstadsområdet. Risikoen for PFAS i overfladevand og grundvand er stor i nærheden af disse brandøvelsespladser.

3.7.2 Fund i grundvand i andre lande

Forurening med PFAS i grundvandet er udbredt over hele verden. Og de påviste PFAS-niveauer i Danmark er tilsvarende det der findes i undersøgelser i andre lande, hvilket beskrives i det følgende.

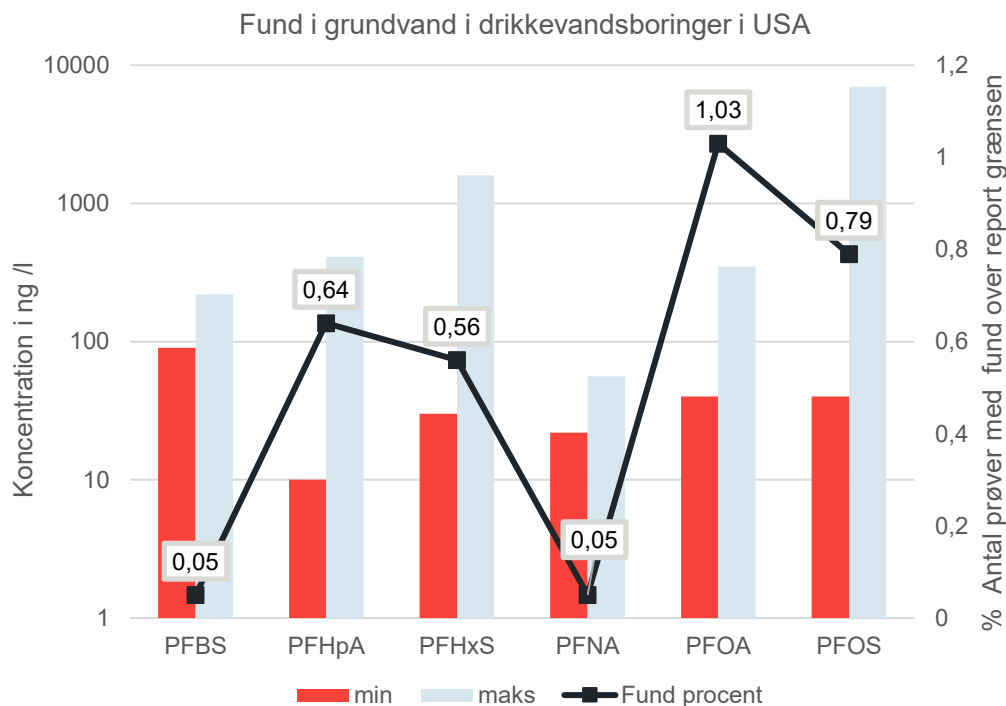
Xu et al., 2021 har indsamlet grundvandsdata fra forskellige studier i verden, hvor der er målt for 6 PFAS-forbindelser, PFOA, PFNA, PFBA, PFOS, PFHxS og PFBS. Der ses gennemsnitlige indhold på 0-4800 ng/l for PFOS, 0-4150 ng/l for PFOA, 0-3610 ng/l for PFBA, 0-865 ng/l for PFBS, 0-280 ng/l for PFHxS og 0-22 ng/l for PFNA med de højeste niveauer i Kina. I landområder i det østlige Kina, hvor der ikke er kendskab til PFAS industriaktiviteter, er der målt gennemsnitlig værdier på 90,8 ng/l for PFOA.

I andre lande ses der også betydelige niveauer af PFAS forbindelser i grundvand uden kendskab til nærliggende PFAS-forurening. For eksempel har man i Holland målt ca. 30 ng/l for sum af 16² PFAS-forbindelser i frie magasiner, mens der måles ca. 6 ng/l i sekundære magasiner (ikke så dybe) og 0-1 ng/l i dybe magasiner (Slenders, 2022).

I USA er der i 2017 foretaget målinger i grundvandsmagasiner, der bruges til drikkevand, hvor der er konstateret fund³ over 10 ng/l i ca. 0,05 -1 % af borerne (se Figur 3.31) for 6 udvalgte PFAS-forbindelser (PFHxS, PFOS, PFOA, PFBS, PFNA og PFHpA).

² 6:2FTS, 8:2diPaP, PFBA, PFBS, PFDA, PFHpA, PFHpS, PFHxA, PFHxS, PFNA, PFOA lineær, PFOA forgrenet, PFOS lineær, PFOS forgrenet, PFPeA, PFPeS

³ USEPA arbejder med konceptet MRL (Minimum Reporting Levels) hvor værdierne kan være under eller over grænseværdier, men i de fleste tilfælde over detektionsgrænsen. I den konkrete opgørelse har værdierne for de 6 PFAS stoffer været (PFBS 90 ng/l, PFHpA 10 ng/l, PFHxS 30 ng/l, PFNA 20 ng/l, PFOS, 40 ng/l og PFOA 20 ng/l)



Figur 3.32 Fund i drikkevandsboringer i USA, jf. USEPA 2017. Der er prøvetaget mere end 4600 borer for de 6 angivne PFAS-forbindelser over hele USA. Der er kun rapporteret fund over 10 ng/l, se fodnote.

3.8 Jord

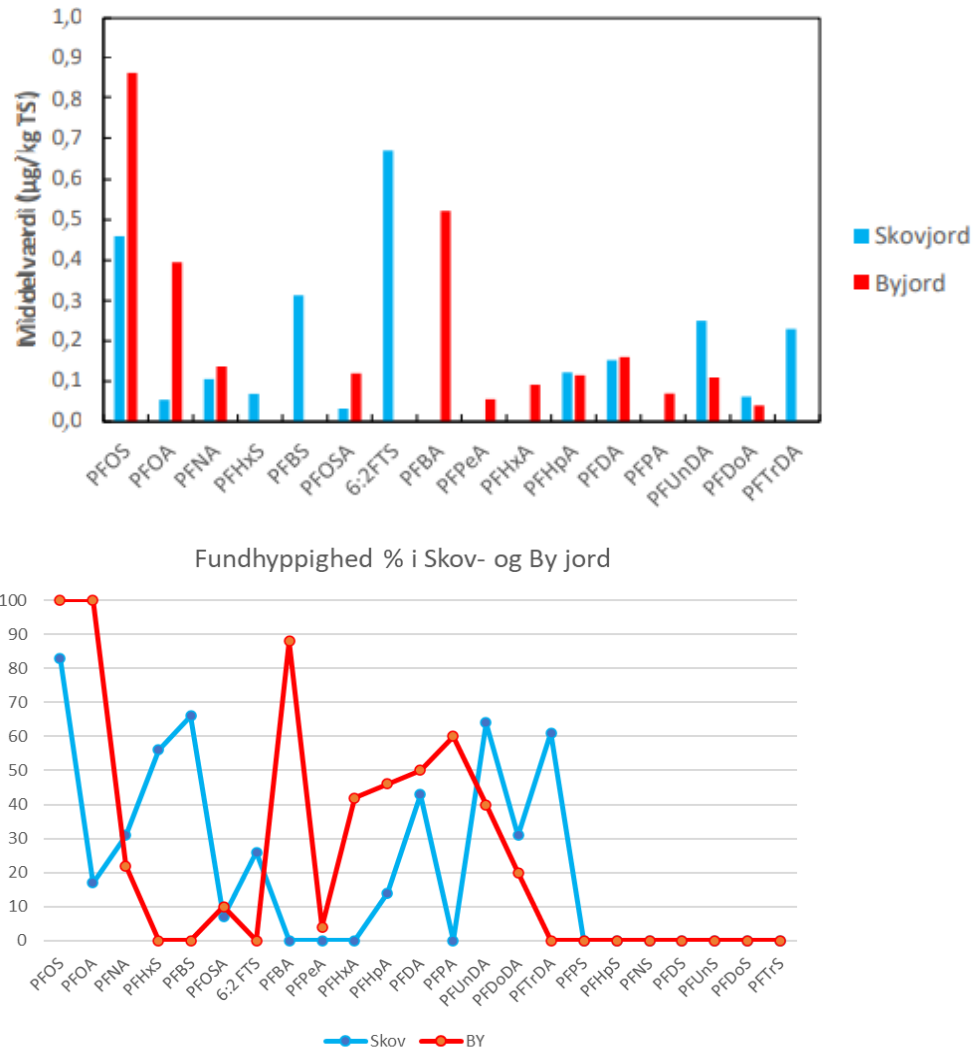
I en undersøgelse af Rankin, 2016 er der undersøgt 62 prøver fra hele verden og målt PFOA og PFHxA i samtlige prøver. Det samme gjaldt for PFOS med undtagelsen af en prøve fra Antarktis. De målte koncentrationer var mellem 0,029-14,3 µg/kg TS. I et ældre studie fra Strynar (2012), hvor der er målt på 60 prøver fra 6 lande (USA, Kina, Japan, Norge, Grækenland og Mexico) er der bestemt en mediankoncentration på 0,124 µg/kg TS for PFOA og 0,472 µg/kg TS for PFOS. PFOS blev detekteret i 48% af prøverne, mens PFOA blev detekteret i 28%.

Der findes ikke mange danske studier for fund af PFAS-forbindelser i jord. For nyligt er der i jord fra marker, gødet med spildevandsslam, påvist op til 10 µg/kg TS for PFAS 22, heraf var ca. halvdelen PFOS (Genanvend Biomasse, 2022). Det påførte slam indeholdt ligeledes høje indhold af PFOS på ca. 30-70 % af det samlede PFAS-indhold (for PFAS 22, se afsnit 3.4, [Figur 3.3](#)).

Der er foretaget undersøgelser af byjord og sammenlignet med diffus belastning fra jord, der stammer fra svenske skovområder (Rambøll, 2022). Værdierne kan ses på [Figur 3.33](#).

Der er tilsyneladende relativ høj tilstedeværelse af langkædede PFAS-forbindelser (PFDA, PFUnDA, PFDoDA og PFTrDA) i jordprøverne sammenlignet med grundvandsprøver. Værdierne er langt under grænseværdier for jord, men fundhyppighed er til gengæld meget høje. Eksempelvis findes PFOA og PFOS i samtlige prøver. Derudover påvises langkædede forbindelse som PFDA, PFUnDA og PFDoDA i over 30-60% af prøverne ved begge jordtyper med højere koncentrationer i skovjord. Dette understøttes af, at forekomsten af nogle af de langkædede forbindelser i jorden kan skyldes diffus forurening gennem atmosfærisk disposition, og indikerer, at fund

af PFUnDA i regnvand (se afsnit 3.3) muligvis ikke skyldes en fejl. Prøverne er udtaget fra 6 byområder i Norge og Danmark (n=32) og 58 skovområder i Sverige (58 skove).



Figur 3.33 Øverst: Koncentration af PFAS i µg/kg i jordprøver fra svenske skovjorde og byjord fra norske og danske byer (Rambøll, 2022). Fund er langt under de danske grænseværdier på 10 µg/kg TS for PFAS 4 og 400 µg/kg TS for PFAS 22. Nederst: Fundhyppighed af hver forbindelse i prøver fra hhv. skov og by. Grafen er tegnet af WSP med baggrund af data fra Rambøll (2022).

Af Figur 4.1 fremgår nogle af de væsentligste kilder til PFAS i miljøet, såsom luftemissioner, lossepladser, spildevandsslam, brandøvelsespladser og industri. PFAS-niveauerne i tilknytning til anvendelse af brandsluknings-skum er flere størrelsesordnere højere, end hvad der træffes i tilknytning til andre punktkilder såsom lossepladser, og ligeledes meget højere end niveauerne i spildevand.

I jorde, som er gødet med spildevandsslam, kan der forekomme fund af PFAS-forbindelser, men i koncentrationer under kvalitetskriterier. Set i lyset af denne anvendelse er over større arealer, kan det have et væsentligt samlet bidrag, på trods af niveauerne er meget lavere end eksempelvis ved brandøvelsespladser eller ved andre jordforureninger.

Senest er der konstateret indhold af PFAS-forbindelser i en række insekticider ved en amerikansk undersøgelse (Lasee et al, 2022). Jf. Miljøstyrelsens notat af 7. juli 2023 er der kun seks af disse aktivstoffer, der indgår eller tidligere har indgået i pesticidprodukter godkendt til anvendelse i Danmark:

- Abamectin: Indgår i et aktuelt godkendt pesticidprodukt i Danmark.
- Mineral Oil (Petroleum oil): Herunder hører paraffinolie, der indgår i et aktuelt godkendt pesticidprodukt i Danmark.
- Beauveria bassiana: Der er tale om et mikrobiologisk aktivstof, der i udgaverne Beauveria bassiana GHA og Beauveria bassiana ATCC 74040 indgår i aktuelt godkendte pesticidprodukter i Danmark.
- Spinosad: Indgår i et aktuelt godkendt pesticidprodukt i Danmark.
- Imidacloprid: Indgår ikke i aktuelt godkendte pesticidprodukter, men har tidligere været godkendt i Danmark.
- Malathion: Indgår ikke i aktuelt godkendte pesticidprodukter, men har tidligere været godkendt i Danmark.

Aktivstofferne indeholder ikke fluor. Det må formodes, at fundene af PFAS-forbindelser i stedet stammer fra andre stoffer i de formulerede produkter end aktivstofferne. Det fremgår dog ikke af den amerikanske artikel hvilke specifikke (formulerede) pesticidprodukter, der er undersøgt. Miljøstyrelsen skriver i deres notat, at de derfor ikke kan vurdere, om produkter med de samme formuleringer, og herunder de samme hjælpestoffer, anvendes eller har været anvendt i Danmark. Miljøstyrelsen har fulgt op på, om der indgår PFAS i formuleringerne af aktuelt godkendte danske pesticidprodukter med aktivstofferne abamectin, spinosad, paraffinolie og mikroorganismen Beauveria bassiana, der er nævnt i den amerikanske artikel. Ingen af de godkendte produkter indeholder hjælpestoffer med fluor-forbindelser, og aktivstofferne indeholder som nævnt ikke fluor. Stofferne i disse produkter kan altså ikke karakteriseres som PFAS. For flere detaljer vedr. dette henvises der til Miljøstyrelsens notat "Kilder til PFAS – amerikansk undersøgelse: Pesticider og biocider om mulig tilstedeværelse af PFAS i pesticider i Danmark" af 7. juli 2023.

5 OPSAMLING

Dette afsnit indeholder en kort opsamling af de indsamlede data og erfaringer fra danske og udenlandske studier.

5.1 Opsamling på danske data

Spildevand og spildevandsslam:

- Der kan forventes et indhold på mellem 10-35 ng/l i spildevand fra almindelige kommunale rensningsanlæg.
- I prøver af spildevandsslam fra 384 danske anlæg i 2021-2022 var det gennemsnitlige indhold for PFAS 4 på 8,1 µg/kg TS og for PFAS 22 på 12,2 µg/kg TS.
- I prøver af dansk spildevandsslam fra 2003 er der målt op til 120 µg/kg TS PFAS 22, heraf ca. 7 µg/kg TS PFOS.

Emissioner fra forbrændingsanlæg:

- I dette studie er der ikke fundet store danske undersøgelser af PFAS-forbindelser i aske og røg fra forbrændingsanlæg.
- I juni 2022 har BIOFOS undersøgt for PFAS 22 i asken og røggas fra deres slamforbrændingsanlæg. Der blev ikke detekteret PFAS-forbindelser i hverken røggassen eller aske fra deres egen slam.

Regnvand:

- Der findes kun et studie af PFAS-indhold i regnvand i Danmark med et vist datagrundlag, hvor prøverne stammer fra 2004.
- Der blev analyseret for 7 PFAS-forbindelser (hhv. PFOSA, PFHxS, PFNA, PFDA og PFUnA PFOS og PFOA), og der blev konstateret indhold af PFOS op til 2,4 ng/l.
- Der blev desuden fundet PFDA og PFUnDA, hvor der i enkelte prøver blev konstateret indhold på op til 23 ng/l. Der var mistanke om, at dette skyldes fejl eller kontaminering af prøven.

Vandløb:

- Der er bearbejdet et større datasæt, som hovedsageligt bygger på regionernes undersøgelser af jordforureninger i nærheden af overfladevand.
- Der er konstateret fund af en eller flere PFAS-forbindelser i 242 vandløbsstrækninger, hvilket svarer til 92 % af de prøvetagede vandløbsstrækninger. 199 af disse vandløbsstrækninger er undersøgt i forbindelse med regionernes undersøgelse af nærliggende jordforureninger.
- De PFAS-forbindelser, der oftest konstateres i vandløb, er PFOA og PFOS, som er til stede i over en tredjedel af prøverne.
- Der er ikke forskel på, hvilke PFAS-forbindelser, der konstateres i vandløb i hhv. byområder og landområder.
- De fire PFAS-forbindelser, som indgår i PFAS 4 (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS), udgør til sammen næsten halvdelen af fund af de enkelte forbindelser over detektionsgrænsen. Der er ikke en grænseværdi for summen af PFAS 4 i ferskvand, men i regionernes undersøgelser er der valgt at sammenligne med

grundvandskvalitetskriteriet. 55 % af fundene af PFAS 4 ligger over dette grundvandskvalitetskriterium for grundvand på 2 ng/l.

- Set i relation til formodede punktkilder, har halvdelen af opstrøms vandprøver koncentrationer højere end grænseværdien for grundvand på 2 ng/l, mens det nedstrøms drejer sig om 73 %. Der er således indikationer på, at der er vandløbsstrækninger, som er påvirket af nærliggende forurenede lokaliteter.
- I 70 % af de undersøgte vandløbsstrækninger, hvor der er udtaget sedimentprøver til analyse, er der ikke konstateret PFAS-forbindelser over detektionsgrænsen.
- PFOS er dominerende stof i sedimentprøverne fra vandløb.

Søer:

- Der foreligger kun begrænset data for søer, hvilket kan skyldes, at PFAS overvåges i biota i NOVANA-programmet, som ikke er en del af nærværende notat.
- Der er fund af PFAS 22 i hovedparten af prøverne fra Mølleåsystemet, men under grundvandskvalitetskriteriet for grundvand på 100 ng/l.
- Der er fund af PFAS 4 i en stor del af prøverne fra Mølleåsystemet, heraf en stor del af prøverne over grundvandskvalitetskriteriet for grundvand på 2 ng/l.
- Der er fund af PFOS i en stor del af prøverne fra Mølleåsystemet, heraf en stor del af prøverne over det generelle miljøkvalitetskrav for overfladevand på 0,65 ng/l og flere prøver over 10 ng/l.

Kyst og fjorde:

- 266 badevandsprøver er sammenlignet med en vejledende grænseværdi for PFAS 4 (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS) på 40 ng/l. Prøverne viste, at niveauet i havet og søer generelt ligger væsentligt under den vejledende grænseværdi for badevand.
- Der er data fra 50 skimmeprøver af det allerøverste lag af havvandet samt to små indsøer på stranden. Niveauet af PFAS 4 i skimmeprøverne var på niveau med, hvad der er fundet i badevandsprøverne.
- Analyseresultaterne af skimmeprøverne fra de to indsøer viser dog koncentrationer af PFAS 4 på henholdsvis 1.000 ng/l og 270 ng/l.
- Undersøgelser af havvand, kystnært enggræs og overfladevand indikerer, at der kan ske en diffus spredning fra hav til land, men det kræver flere undersøgelser at fastslå dette.

Grundvand:

- Der findes et stort antal målinger for PFAS i grundvand i Danmark.
- Der er fund i 46 % af borerne med et eller flere PFAS-forbindelser. Der er fund over grundvandskvalitetskriteriet for grundvand på 2 ng/l i 23 % af borerne for PFAS 4.
- Der er flere fund i borer med lille filterdybde, dvs. korte borer.
- Der er flere fund i borer i byområder.
- Der er et stort antal kortlagte grunde med risiko for PFAS, der kan medføre forurening af overfladevand og grundvand.
- Der er oftest fund af PFOA, PFBA og PFOS i grundvandsboringer.

Jord

- Der er få data for indhold af PFAS i jord i Danmark.
- Der er udtaget enkelte prøver fra markjord som er behandlet med spildevandsslam, hvor der blev påvist op til 10 µg/kg TS for PFAS 22, heraf bestod ca. halvdelen af PFOS.
- I en kontrolprøve fra markjord, der ikke havde modtaget slam, blev der påvist 0,2 µg/kg TS.

- I prøver fra seks byområder i Danmark og Norge er der påvist PFOS og PFOA i samtlige prøver, dog i niveauer under 1 µg/kg.

5.2 Opsamling op udenlandske data

I forbindelse med dette projekt er der søgt i nyere (fra 2020 og frem) international litteratur efter undersøgelser, der omhandler PFAS-forurening i miljøet. Fokus har været på opsamling af observerede data i forskellige medier. Der er generelt fravalgt undersøgelser i områder med kendt PFAS-industri, idet det vurderes, at disse data ikke repræsenterer forholdene i Danmark. Fokus har således været mere på den diffuse belastning, samt på at opnå en forståelse af, om de danske tal afviger meget fra tal i andre vestlige lande.

De overordnede konklusioner fra den internationale litteratur er:

- Indhold af PFAS-forbindelser i spildevandsslam varierer meget og har for europæiske anlæg været helt op til 600 ng/l i gennemsnit baseret på data fra 2013.
- Målinger af PFAS-forbindelser i røggas fra forbrændingsanlæg i Holland har vist indhold op til 20 ng/m³. I både Danmark og Holland anvendes ovntemperaturer på omkring 850-950 grader, hvor nogle PFAS-forbindelser destrueres, mens andre bliver omdannet til mindre PFAS-forbindelser. Det skal bemærkes, at Holland har haft produktion af PFAS og må derfor antages at have større generel forurening end i Danmark.
- I regnvand verden over måles nogenlunde ens niveauer i nedbør i land- og byområder på 1-10 ng/l for PFAS 4. Selv i øde områder som Antarktis og Tibet, er der i gennemsnit konstateret 0,055 ng/l PFOA samt koncentrationer på over 0,1 ng/l for summen af PFAS 4.
- I vandløb fra ikke industrielle områder i Vietnam er påvist PFOA og PFOS i over 81% og 51% af prøverne med gennemsnitskoncentrationer på ca. 1-3 ng/l. I det nordlige Sverige er der målt ca. 0,24 ng/l, mens der i hollandske vandløb er målt koncentrationer af PFOS i vandløb på mellem <10 og 56 ng/l. Som nævnt ovenfor forventes større forureninger i Holland, da de har haft produktion i landet.
- Der er konstateret PFAS-forbindelser i søer, som ligger i øde områder i det nordlige del af Sverige, i koncentrationer på 3,4 ng/l for PFAS 22 (median på 1,4 ng/l). Summen af 26 PFAS-forbindelser i overfladevand fra ikke øde områder var i gennemsnit 112 ng/l (median 4,1 ng/l) fra 285 prøver, mens der i grundvand blev påvist 49 ng/l (median 0,4 ng/l).
- I Nordsøen og Østersøen er der målt hhv. 0,5 ng/l og ca. 1-2 ng/l. I det arktiske hav måles der stabile niveauer på ca. 0,15 ng/l for PFCA og 0,02 ng/l for PFSA.
- I grundvandsprøver fra Holland er der målt ca. 30 ng/l for sum af PFAS-forbindelser i frie magasiner, mens der måles ca. 6 ng/l i sekundære magasiner (ikke så dybe) og 0-1 ng/l i dybe magasiner. I USA er der målt i grundvandsmagasiner, der bruges til drikkevand i 2017, hvor der er konstateret fund over en værdi på 10 ng/l i ca. 0,05 -1 % af borerne.
- I 62 jordprøver fra hele verden er der påvist PFOA og PFHxA i samtlige prøver. Det samme gjaldt PFOS med undtagelsen af prøven fra Antarktis. De målte koncentrationer var mellem 0,029-14,3 µg/kgTS.

REFERENCER

Adamson, 2020: Figure from Environwiki PFAS Transport and Fate - Enviro Wiki

Ahrens, L., Hedluind J., Durig, W., Tröger, R., Wiberg, K., 2016: Screening of PFASs in groundwater and surface water. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2016:2

Altarawneh, 2021: Mohammednoor Altarawneh, Mansour H. Almatarneh, Bogdan Z. Dlugogorski, Thermal decomposition of perfluorinated carboxylic acids: Kinetic model and theoretical requirements for PFAS incineration, Chemosphere, Volume 286, Part 2, 2022, 1316-85, ISSN 0045-6535,

Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., et al., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. Integrated Environmental Assessment and Management, 7(4), pp.513–541. Available at: [Reference som henviser til en hjemmeside.](#)

BIOFOS, 2022: Første renseanlæg i Danmark til at måle PFAS i røggas fra slamforbrændingsanlæg | BIOFOS

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,

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>

Cousins, I.T., Johansson J.H., Salter, 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

DANVA, 2022: PFAS I SPILDEVAND DATO: 12. april 2022 Udgiver: DANVA Udarbejdet af: Kai Bester, Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab For: DANVA, Vandhuset, Godthåbsvej 83, 8660 Skanderborg Finansiering: Notatet er finansieret af DANVA

Danske Regioner, 2021: regioner.dk/services/nyheder/2021/september/overblik-over-brandoevelsespladser-er-klar

de Voogt P, Berger U, de Coen W, de Wolf W., Heimstad, E., McLachlan, M2., van Leeuwen, S., van Roon, A., (2007) PERFORCE: PERFLUORINATED ORGANIC COMPOUNDS IN THE EUROPEAN ENVIRONMENT, FLUORINATED COMPOUNDS I (TOXICOLOGY), Organohalogen Compounds Vol 69 (2007)

DMU Stationer og måleprogram (dmu.dk) <https://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/bop-kvart/q2/qover.htm>

European Commission, 2011b. EQS dossier for PFOS, Available at: http://ec.europa.eu/environment/water/water-dangersub/lib_pri_substances.htm

Genanvend Biomasse 2023, Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam. Udført af WSP, version 25-1-2023

ITRC, 2022: Front Page (itrcweb.org) Per- and Polyfluoroalkyl Substances, Technical and Regulatory Guidance ITRC juni 2022

Kjølholt, J., Schmidt Froskov, L., Arnbjerg-Nielsen, K., Gade Holm A., Nøgletal for miljøfarlige forurenende stoffer i spildevand fra renseanlæg, Miljøstyrelsen, 2021

- Lam, 2016: Lam, N.H., Cho, C.R., Kannan, K., Cho, H.S., 2017. A nationwide survey of perfluorinated alkyl substances in waters, sediment and biota collected from aquatic environment in Vietnam: distributions and bio-concentration pro-files. J. Hazard Mater. 323, 116-127 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.010>
- Liu, 2021: Liu S, Zhao S, Liang Z, Wang F, Sun F, Chen D. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in leachate, fly ash, and bottom ash from waste incineration plants: Implications for the environmental release of PFAS. Sci Total Environ. 2021 Nov 15;795:148468. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148468. Epub 2021 Jun 24. PMID: 34252761.
- Miljøstyrelsen, 2016: Kortlægning af brancher der anvender PFAS. Miljøprojekt nr. 1905, 2016. E. Nicolajsen og K. Tsitonaki, Orbicon A/S
- Miljøstyrelsen, 2018: Vandløb påvirket af jordforurening, Tidslig variation i koncentration og vandføring. Miljøprojekt 2050 fra 2018. S. Roost og C. Bach, Orbicon A/S, G. Lemaire, A. Sonne, P. L. Bjerg, DTU Miljø og G. Lilbæk, NIRAS
- Miljøstyrelsen, 2022a: Oversigt over PFAS-grænseværdier_ (mst.dk)
- Miljøstyrelsen 2022b: Gennemførelse og anvendelse af slam-direktivet, Afrapportering - Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 57, 29-08-2022
- Miljøstyrelsen 2022c: Resultater fra PFAS-målinger i badevand, Resultater fra PFAS-målinger i badevand - Miljøstyrelsen (mst.dk)
- Miljøstyrelsen 2023a: Fund af PFAS i Nordsøen (mst.dk)
- Miljøstyrelsen 2023b: PFAS fundet i græs ved kysten (mst.dk)
- Muir, 2021: Spatial and Temporal Trends of Perfluoroalkyl Substances in Global Ocean and Coastal Waters, Derek Muir and Luc T. Miaz, Environmental Science & Technology 2021 55 (14), 9527-9537, DOI: 10.1021/acs.est.0c08035
- NIRAS 2023: Undersøgelser af kystnær PFAS-forurening af jord- og grundvand Den Syddanske Udviklingspulje, Oktober 2023. Journal nr. 22/52316
- 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>.
- NIRAS, 2022: Faktaark for PFAS (Malingsindustri, Kemisk Industri, Elektronikindustri, Gummi og plast-industri, Tekstil- og læderindustri, Renseier, Kern og metalindustri, Træ og møbelindustri, Vaskehaller, Trykkerier). Alle Faktark kan down-loades fra Udgivelser :: Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer (miljoeogressourcer.dk)
- Pancras, T., Schrauwen, G., Held, T., Baker, K., Ross, I. & Slenders, H., 2016. Environmental fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS). Concawe Soil and Groundwater Taskforce (STF/33)
- Panieri, 2022: Panieri, E.; Baralic, K.; Djukic-Cosic, D.; Buha Djordjevic, A.; Saso, L. PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment. Toxics 2022, 10, 44. <https://doi.org/10.3390/toxics10020044>
- Rambøll 2022: PFAS Diffuse forurening og slamdepot fra renseanlæg, ATV Vintermøde Jord og Grundvand, 9. marts 2022 Jette Kjøge Olsen og Frederik Næsby Sukstorf. Rapporter er pr. 1/12 2023 ikke publiceret.

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

Rankin, 2016: Rankin, Keegan, Scott A. Mabury, Thomas M. Jenkins, and John W. Washington. 2016. "A North American and global survey of perfluoroalkyl substances in surface soils: Distribution patterns and mode of occurrence." *Chemosphere* 161:333-341.<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.109>

RIVM, 2021: Per- and polyfluorinated substances in waste incinerator flue gases RIVM report 2021-0143 J. Bakker | B. Bokkers | M. Broekman Per- and polyfluorinated substances in waste incinerator flue gases (rivm.nl)

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>.

SCA- Swedish Chemical Agency (2006) Perfluorinated substances and their use in Sweden, Report 07/16 ISSN: 0284-1185 Order No. 360 844, Stockholm, November 2006

Schaefer, C.E., Andaya, C., Urtiaga, A., McKenzie, E.R. & Higgins, C.P., 2015. Electrochemical treatment of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) in groundwater impacted by aqueous film forming foams (AFFFs). *Journal of Hazardous Materials*, 295, pp.170–175.

Sha, Bo, 2022: Transport of perfluoroalkyl acids from the ocean to the atmosphere via sea spray aerosol. Academic dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Sciences, Stockholm University ISBN: 978-91-7911-787-0 (electronic)

Slagelse Kommune, 2022: <https://www.slagelse.dk/da/service-og-selvbetjening/bolig-og-byggeri/vand-og-kloak/spildevand/pfos-forurening-i-korsoer/>

Slenders, Hans, 2022: PFAS- Deal with it! Putting things into Perspective, NORDROCS, OSLO September 6th, 2022

Strand, J., Bossi, R., Sortkjær, O., Landkildehus, F. & Larsen, M.M., 2007. PFAS og organotinforbindelser i punktkilder og det akvatiske miljø. NOVANA screeningsundersøgelse. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU nr. 608. Available at: <http://www.dmu.dk/Pub/FR608.pdf>.

Strynar, 2012: Strynar, Mark J., Andrew B. Lindstrom, Shoji F. Nakayama, Peter P. Egeghy, and Laurence J. Helfant. 2012. "Pilot scale application of a method for the analysis of perfluorinated compounds in surface soils." *Chemosphere* 86 (3):252-257.<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.036>

USEPA. 2017. "Monitoring Unregulated Drinking Water Contaminants Occurrence Data for the Unregulated Contaminant Monitoring Rule." <https://www.epa.gov/dwucmr/occurrence-data-unregulated-contaminant-monitoring-rule>, UCRM 3

VMR, 2022: Danske Regioner 2022. PFAS-forbindelser og brandøvelsespladser I Danske Regioner (jordforureninger.dk). Op-dateret liste med brandøvelsespladser kopi-af-oversigt-over-brandøvelsespladser-jan-2022.xlsx (live.com)

Xu, B., Liu, S., Zhou J.L., Zheng, C., Weifeng, J., Chen, B., Zhang, T., Qiu W., (2021) PFAS and their substitutes in groundwater: Occurrence, transformation and remediation, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 412, 2021, 125-159, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125159>.

BILAG 1 ANVENDELSE OG REGULERING- VIGTIGE ÅRSTAL

