



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Diffus forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand

Miljøprojekt nr. 2275

September 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Nanna Isbak Thomsen,
Frederik Næsby Sukstorf

ISBN: 978-87-7038-609-8

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1	Resume	4
2	Indledning	5
3	Introduktion til PFAS stofgruppen	6
3.1	Brancher og aktiviteter	6
3.2	Fysisk-kemiske egenskaber og spredning i miljøet	7
3.3	Kvalitetskriterier, regulering og toksikologi	8
4	Definitioner og afgrænsning	9
4.1	Jordforurening	9
4.2	Grundvand	9
4.3	Overfladevand	9
5	Kilder til diffus PFAS forurening	10
5.1	Brancher og aktiviteter	10
5.2	Spredningsveje	12
5.3	Receptorer	13
6	Metode	14
6.1	Litteraturstudie og databehandling	14
6.2	Grundvand	16
6.3	Jord	18
6.4	Overfladevand	19
6.5	Datakvalitet og fejlkilder	19
7	Koncentrationsniveauer for diffus PFAS forurening	20
7.1	Grundvand	20
7.2	Jord	26
7.3	Overfladevand	29
8	Diskussion	34
8.1	Sammenligning af kvalitetskriterier, detektionsgrænser og middelværdier	34
9	Konklusion	36
10	Referencer	37

1 Resume

Forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand findes ved flere brancher (Danske Regioner, 2022a). I forbindelse med undersøgelser af lokaliteter kan det være vanskeligt at vurdere, om en påvist forurening med PFAS skyldes diffus forurening eller er forårsaget af et spild, og dermed er at betragte som en punktkilde.

Formålet med dette projekt er at undersøge niveauet af diffus PFAS forurening i hhv. jord, grundvand og overfladevand vha. litteratursøgning. På den baggrund udledes der, hvis muligt niveauer for diffus PFAS forurening i forbindelse med forskellige arealanvendelser, f.eks. industriområder, bolig og natur.

Litteratursøgningen er foretaget systematisk sådan, at udvalgte ord og kombinationer af ord er anvendt til at søge relevant litteratur frem.

Litteratursøgningen resulterede i PFAS data for jord, grundvand og overfladevand, samt om information omkring kilder og spredningsveje for diffus PFAS forurening. PFAS data er gransket med henblik på at udlede koncentrationsniveauer i de forskellige matricer.

I grundvandet er der generelt meget lave fundhyppigheder. Der kan derfor ikke udledes en numerisk værdi for koncentrationsniveauet af PFAS i hverken de dybe eller de korte borer, det kan bare konstateres at medianen for PFAS i begge datasæt formodentligt er under detektionsgrænsen.

I jorden er der udtaget relativt få prøver og der kan derfor ikke beregnes en median for hverken skov- eller byområderne. Koncentrationerne for de forskellige PFAS i data fra skovjorden (svensk) og byjorden (dansk og norsk) er på samme niveau og er fra ca. 0,02 til 2,9 µg/kg ts. I nærværende datasæt er der ikke en overskridelse af de danske kvalitetskriterier for jord.

For overfladevand kan der ikke beregnes et koncentrationsniveau, på grund af for få prøver. Men kravværdien for PFOS på 0,00065 µg/l er i flere tilfælde overskredet.

Det har på baggrund af nærværende litteraturgennemgang ikke været muligt at estimere et koncentrationsniveau for PFAS, i de undersøgte matricer. Årsagen er enten meget lave fundhyppigheder eller for få data punkter. Der er påvist en eller flere PFAS i alle matricer.

2 Indledning

Forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand findes ved brandøvelsespladser, lossepladser, tekstil- og papirindustri, malingsindustri og flere andre brancher (Danske Regioner, 2022a). På nogle lokaliteter, f.eks. brandøvelsespladser, finder man forureningen i høje koncentrationer (Danske Regioner, 2022a; MST, 2014), men i forbindelse med undersøgelser af lokaliteter ved mange andre brancher finder man kun PFAS i lavere koncentrationer (Danske Regioner, 2022a; MST, 2016b). Samtidig er diffus forurening med PFAS et problem, og man forventer bl.a. at atmosfærisk nedfald via nedbør, partikelbårne emissioner og spredning af slam mm. er medvirkende til forureningen (Danske Regioner, 2022a). I forbindelse med undersøgelser på lokaliteter, hvor der har været en branche, som har anvendt PFAS, kan det være vanskeligt at vurdere, om en påvist forurening med PFAS skyldes diffus forurening eller er forårsaget af et spild, og dermed er at betragte som en punktkilde. Dette er særligt relevant efter at kvalitetskriterierne for fire PFAS (PFOA, PFOS, PFHxS og PFNA) er blevet sænket for jord og grundvand i sommeren 2021.

For di kvalitetskriterierne er lave, vil det fremadrettet blive både vigtigere og vanskeligere i forhold til f.eks. jordforureningsloven at kunne skelne mellem punktkilde og diffus forurening. I jordforureningsloven er det specielt i forhold til spørgsmålet om offentlig indsats, det er vigtigt at kunne afgøre kilden til forurening, ligesom det for vurdering af påbudsmuligheder er væsentligt. I den sammenhæng vil det være nyttigt at kende koncentrationsniveauet for diffus forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand. Derudover er det nødvendigt med forskellige tiltag for at reducere hhv. diffus- og punktkilde forurening med PFAS forbindelser.

Det ligger uden for nærværende projekt at komme til bunds i problematikken med at skelne PFAS punktkilder fra diffus forurening. Dette litteraturstudie bidrager med nyttig viden fra tidligere undersøgelser om kilder til diffus PFAS forurening og niveauer for diffus PFAS forurening.

Formål

At undersøge niveauet af diffus PFAS forurening i hhv. jord, grundvand og overfladevand vha. litteratursøgning og hvis muligt at fastlægge niveauer for diffus PFAS forurening i forbindelse med forskellige arealanvendelser, f.eks. industriområder, bolig og natur.

3 Introduktion til PFAS stofgruppen

I dette kapitel beskrives kort PFAS forbindelsernes anvendelse i industrien, deres fysiske kemiske egenskaber og de kvalitetskriterier og miljøkvalitetskrav som anvendes til at vurdere forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand. Se Danske Regioner 2022a for en mere detaljeret gennemgang.

3.1 Brancher og aktiviteter

PFAS er en gruppebetegnelse for et stort antal fluorerede stoffer. PFAS er en forkortelse for PerFluorAlkyl- og PolyFluorAlkyl-forbindelser. Der findes over 4700 kendte PFAS (OECD 2021) og de seneste opgørelser over mulige PFAS forbindelser anslår at der kan være op til 12000 (USEPA 2023). De mest kendte PFAS forbindelser er PFOS (Perfluoroktansulfonsyre) og PFOA (Perfluoroktansyre), som har kulstofkæder med henholdsvis 8 og 7 fuldt fluorerede kulstofatomer.

PFAS forbindelser er blevet produceret siden 1949, med det højeste forbrug registreret i produktregisteret i 2003 (MST, 2016a). Reguleringen af PFAS forbindelsernes anvendelse er optrappet på både internationalt og nationalt niveau i takt med, at vidensniveauet om forbindelsernes mobilitet og farlighed øges (Danske Regioner, 2022a).

I Danmark har der aldrig været produktion af PFAS forbindelser, men i mere end 60 år er forbindelserne blevet importeret til brug i en lang række brancher og forbrugsprodukter. PFAS forbindelsernes specifikke fysiske-kemiske egenskaber gør, at de både skyer fedt og vand. De bliver derfor fortsat tilsat diverse produkter, f.eks. brandslukningsskum, hvor deres fysiske/kemiske egenskaber gør at skummet kan danne en hinde over brændbare væsker. PFAS forbindelser er derudover anvendt til overfladebehandling (bl.a. overtræk til kabler og ledninger, og belægninger til rør og tanke) og imprægnering af tekstiler, læder og papir. PFAS forbindelser er til stede i maling i koncentrationer op til omkring 1 %, men ofte lavere. Disse forholdsvis små mængder kan dog stadig medføre jord- og grundvandsforureninger (Danske Regioner, 2022b). Deres anvendelse i produkter som maling, voks og fotografiske produkter skyldes, at de kan reducere viskositet og overfladespænding samt statisk elektricitet (Danske Regioner, 2022a).

I 2016 søgte man oplysninger om anvendelse af de ca. 1000 PFAS forbindelser i Produktregisteret; der blev fundet information om 152 forbindelser fordelt over 27 brancher (MST, 2016a).

Der blev på den baggrund udpeget 9 brancher/aktiviteter, som udgør potentielle kilder til jordforurening med PFAS (MST, 2016a). Efterfølgende er der kommet yderligere fokus på PFAS og listen over brancher er udvidet og kan ses herunder (Danske Regioner 2022a, Miljøministeriet 2022):

- Brandøvelsespladser for træning i slukning af oliebrande eller lignende
- Forkromningsindustri
- Tæppeindustri
- Tekstil- og læderindustri
- Renserier
- Malings-, lak- og limindustri
- Fyldpladser for byggeaffald og ældre lossepladser for dagrenovation, særlig kan maling i byggeindustrien før 2002 have indeholdt PFAS forbindelser
- Træindustri og møbelindustri
- Kemisk industri 27
- Emballage producenter (imprægnering, også af fødevareremballage)
- Bilindustri, herunder autoværksteder og vaskehaller
- Elektronikindustri
- Jern- og metalindustri

- Gummi- og plastindustri
- Grafisk industri/trykkerier
- Lokalteter, hvor en større kemikalie/oliebrand er slukket.

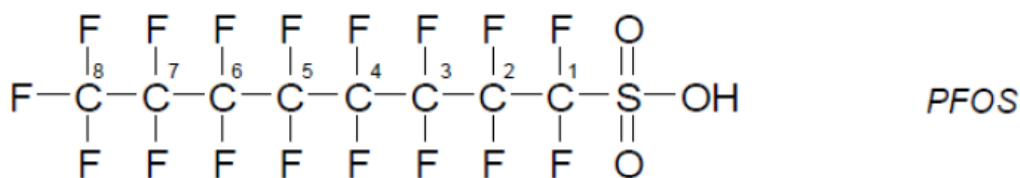
Siden ovenstående liste blev udarbejdet er der kommet fokus på anvendelse af PFAS på renserier, i pesticider og i spildevandsslam, og udbringning af dette på marker samt forekomst ved deponeringsanlæg.

Der er herudover fundet oplysninger om, at PFAS har indgået som stabilisator i pesticider, og i øvrigt kan være anvendt til overfladebehandling i andre brancher end nævnt ovenfor.

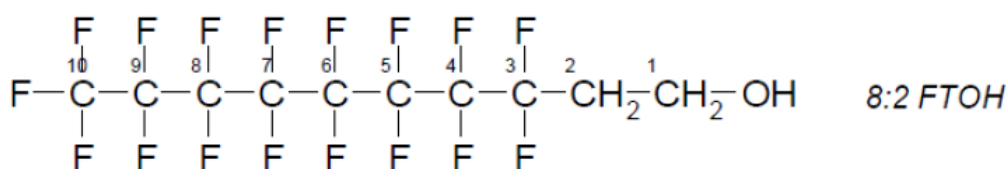
Det skal understreges, at selv brancher, der kun anvender små mængder af PFAS, kan udgøre en risiko for forurening af grundvandet, hvis anvendelsen omfatter direkte udslip/udledning på terræn.

3.2 Fysisk-kemiske egenskaber og spredning i miljøet

PFAS er fluorerede organiske forbindelser, hvor kulstofkædens brintatomer er delvist (poly) eller helt (per) erstattet af fluor. Der skelnes mellem langkædede (PFCA og PFSA med hhv. 7 eller 6 eller flere fluorerede kulstofatomer) og kortkædede (PFCA og PFSA med færre end hhv. 7 eller 6 fluorerede kulstofatomer) PFAS, se eksempler på FIGUR 1 og FIGUR 2.



FIGUR 1. Perfluoralkyl-forbindelsen; PFOS med formelen $\text{C}_8\text{F}_{17}\text{SO}_3\text{H}$



FIGUR 2. Polyfluoralkyl-forbindelsen 8:2 FTOH med formelen $\text{C}_8\text{F}_{17}\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$

Generelt er de fleste PFAS forbindelser svært nedbrydelige, da det kræver et højt oxidationspotentiale at bryde kulstof-fluor(C-F) bindingerne. En CF binding er en af de stærkeste kemiske bindinger inden for organisk kemi (ECHA 2023). Den ikke-fluorerede del af kulstofkæden i polyfluoralkylforbindelserne kan dog blive nedbrudt, hvorfor polyfluoralkylforbindelser kan være forstadier ("precursors") til stabile perfluorforbindelser som f.eks. PFOS og PFOA.

Fordi PFAS forbindelser ikke nedbrydes kan der foregå en kontinuerlig udvaskning fra jord til grundvand. Selv mindre mobile PFAS forbindelser vil spredes, dog langsomt over tid. Dette betyder, at lange forureningsfaner kan dannes med tiden, hvor de mere mobile PFAS forbindelser dominerer i fanefronten.

De har en lav flygtighed, dvs. at de sjældent findes på gasform, dog med undtagelse af PFAS forbindelser, der har en alkohol gruppe (-OH) og nogen drivhusgasser (F-gasser) (OECD,

2022). PFAS forbindelser kan derudover spredes til luft fasen som partikelbåren forurening (Danske Regioner, 2022a).

3.3 Kvalitetskriterier, regulering og toksikologi

Siden starten af det 21. århundrede er der kommet øget fokus på PFAS forbindelser (Pancras et al. 2016). Dette skyldes, at selv meget lave koncentrationer kan medføre en risiko for miljø og menneskers sundhed.

PFAS forbindelserne reguleres globalt via Stockholm konventionen om persistente organiske miljøgifte (POP) med henblik på at udfase anvendelsen af de forbindelser, hvor dette er nødvendigt at hensyn til miljø og menneskers sundhed. For nuværende gælder det PFOS, PFOA, PFHxS, stoffernes salte og beslægtede forbindelser.

I EU-regi reguleres PFAS forbindelserne bl.a. via REACH-forordningen (EU1907/2006). I REACH er der krav til at forbindelser som produceres i EU eller importeres fra lande uden for EU, skal registreres hos ECHA (European Chemicals Agency), såfremt der produceres eller importeres et ton eller mere af et stof pr. år. Forordningen indebærer, at det skal vurderes, om stoffet er farligt og klassificeret ift. mærkning og emballering, og der skal udarbejdes et sikkerhedsdatablad (EU CLP-forordning 1272/2008).

Der er en udfordring med stofferne på kandidatlisten (SVHC) i REACH i forhold til diffus forurening med PFAS, fordi man for de fleste brancher og anvendelser kun skal deklarere forbindelser såfremt indholdet af et stof er $\geq 0,1\%$. Det betyder, at lavt stofindhold generelt ikke skal deklareres (EU CLP-forordning 1272/2008) (ECHA, 2017). Samtidig er det muligt at produkter med lavt stofindhold kan forårsage diffus forurening med PFAS.

I Danmark er der fastsat et sumkriterium for grundvand og jord for 22 specifikke PFAS forbindelser. Ud over sumkriteriet på de 22 forbindelser er der opstillet et skrapere sumkriterium for fire PFAS forbindelser (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS).

Tablet 1. Kvalitetskriterier for PFAS forbindelser i jord og grundvand anno 2022 (MST, 2022a).

Stofnavn	Jordkvalitetskriterium mg/kg	Grundvandskvalitetskriterium µg/ liter
Sum af de 22 forbindelser	0,4	0,1
Sum af fire forbindelser, PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	0,01	0,002

Flere PFAS forbindelser anses for at være hormonforstyrrende, og samtidig mistænkes de for at være reproduktionstoksiske og kræftfremkaldende (EFSA, 2020).

Den danske sundhedsstyrelse konkluderer i et studie fra 2023: at der er en væsentlig mistanke om, at eksponering for PFAS-forbindelser, særligt PFOA, PFOS og PFNA, øger risikoen for udvikling af følgende helbredseffekter:

- Nedsat antistofrespons i forbindelse med vaccination hos børn og voksne (PFOA, PFOS og PFHxS)
- Forhøjet kolesterol hos børn og voksne (PFOA, PFOS og PFNA)
- Små nedsættelser i fødselsvægt (PFOA, PFOS og PFNA)
- Øget risiko for nyrekræft hos voksne (PFOA)

SST (2023).

For mennesker sker den største eksponering af PFAS forbindelserne gennem føden, hvorfra forbindelserne optages. PFAS forbindelserne kan blive optaget og opkoncentreret i planter og derved udgøre en trussel for dyr og mennesker via fødekæden. PFAS forbindelser bindes især til proteiner, og de er derfor konstateret i blod, lever og nyre og til dels i milten, knoglemarv, testikler, lunger, hjerne og muskler hos mennesker og dyr. I det PFAS forbindelser kan opkoncentreres i planter kan de derved indgå i ernæringskæden for dyr og mennesker. Optag af PFAS forbindelser i planter afhænger bl.a. af plantetype, jordarten og PFAS forbindelsen samt jordkoncentrationer (Danske Regioner, 2022a).

4 Definitioner og afgrænsning

Dette kapitel gennemgår definitioner og begreber som anvendes i rapporten. Dette er relevant, fordi der i litteraturen er forskellige begreber vedr. diffus forurening, som benyttes lidt i flæng, f.eks. diffus forurening og baggrundsniveauer. Derudover er der også begreber i relation til lovgivningen og administration, f.eks. punktkilder, fladekilder og diffus forurening, som det kan være nyttigt at kende.

Generelt gælder det at der i litteraturen ofte refereres til et baggrundsniveau for PFAS forbindelser. Men baggrundsniveauet for et stof, er det niveau, hvorpå koncentrationer af stoffet forekommer naturligt i jord, grundvand eller overfladevand. Da PFAS forbindelser ikke forekommer naturligt, anvendes denne betegnelse ikke her.

4.1 Jordforurening

Diffus jordforurening består af forholdsvis ensartede og ofte lave forureningskoncentrationer i et større område. Diffus jordforurening opstår som følge af længere tids spredning eller opblanding af forureningsbidrag fra forskellige kilder, men uden at forureningen kan kædes sammen med en kilde (MST, 2024). Kilder til diffus jordforurening med PFAS er beskrevet i denne rapport's kapitel 5. Med lave koncentrationer menes i kontekst af denne rapport værdier under kvalitetskriteriet.

4.2 Grundvand

Diffus grundvandsforurening defineres som forholdsvis ensartede og lave forureningskoncentrationer i et større område, hvor kilden til forureningen ikke er en kendt lokalitet. Man kan læse mere om kilder til diffus grundvandsforurening med PFAS i denne rapport's kapitel 4.

I denne rapport skelner vi mellem "diffus grundvandsforurening med PFAS forbindelser" og grundvandsforurening fra faner fra jordforureninger med PFAS forbindelser og områder med mange kendte kilder til PFAS forurening. Med lave koncentrationer menes i kontekst af denne rapport værdier under kvalitetskriteriet.

4.3 Overfladevand

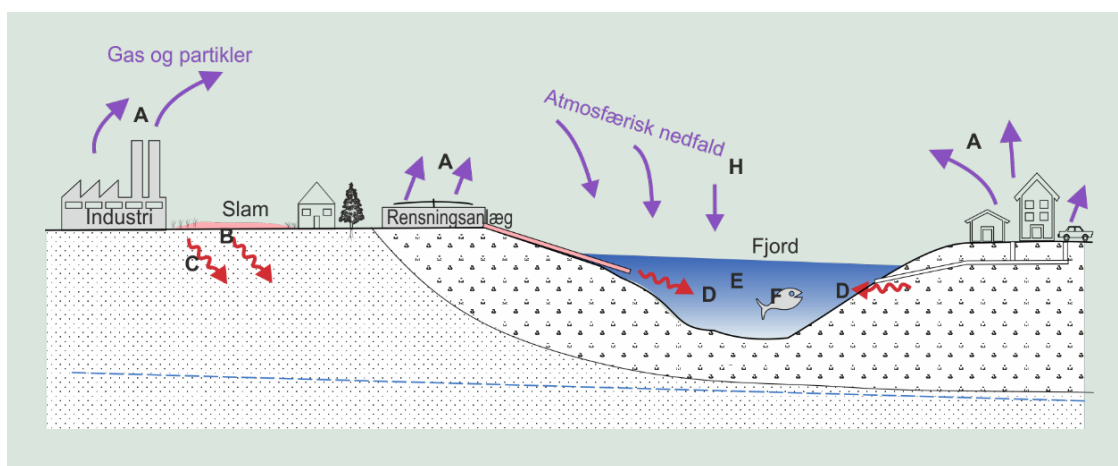
Diffus forurening af overfladevand er ligesom i jord og grundvand forholdsvis ensartede og lave forureningskoncentrationer i et større område eller over en længere strækning af et vandløb. Kilden til forureningen er ikke en kendt lokalitet.

Det er en udfordring i forhold til definitionen af diffus forurening med PFAS forbindelser fordi de er meget persistente og vil transporteres langt i f.eks. et vandløb. Derfor er det vigtigt at skelne mellem overgangen fra en fane til diffus forurening. Med lave koncentrationer menes i kontekst af denne rapport værdier under kvalitetskriteriet for grundvand.

5 Kilder til diffus PFAS forurening

PFAS forbindelser anvendes på grund af deres fysisk/kemiske egenskaber bredt i samfundet. Se kapitel 2 for mere generel information om PFAS forbindelserne og en gennemgang af de brancher og aktiviteter, som er relevante i forbindelse med jordforurening fra punktkilder.

Dette kapitel gennemgår brancher og aktiviteter, spredningsveje og receptorer i forhold til diffus forurening med PFAS forbindelser i jord, grundvand og overfladevand (FIGUR 3).



FIGUR 3. Emissioner og fjerntransport, A: Gas og partikler, B: Jordforbedring med slam fra rensningsanlæg, C: Nedsivning til grundvand efter jordforbedring med slam fra rensningsanlæg, D: Overfladeafstrømning, E: Overfladevand, F: Biota, H: Atmosfærisk nedfald (Fra Danske Regioner, 2022a).

5.1 Brancher og aktiviteter

Udledning fra industri

PFAS forbindelser har været anvendt og anvendes stadig bredt i industrien, blandt andet som imprægnering i madpapir og kartoner (f.eks. pizzabakker, emballage til mikroovnspopcorn m.m.) på grund af deres fedtafvisende egenskaber. Derudover bruges PFAS forbindelser bl.a. også til overfladebehandling i både metal-, træ- og tekstilindustrien.

Diffus forurening med PFAS forbindelser fra industrier til luften sker som emission af gas eller partikler, dvs. enten som afdampning af flygtige forbindelser eller på overfladen af støv eller damp (Danske Regioner, 2022a; MST, 2016a). I luften kan PFAS forbindelserne transporteres over lange afstande (Danske Regioner, 2022a). Forurening kan også ske via udledning af spildevand. Spildevandet ledes til rensningsanlæg, der kan findes PFAS i spildevandsslam og spildevand generelt (Boutrup et al., 2021). Affald og affaldsprodukter kan udgøre en kilde til diffus forurening med PFAS hvis affaldet deponeres eller afbrændes.

Bidrag fra affald fra byggeindustrien og ældre dagrenovationspladser

Fyldpladser med deponeret byggeaffald eller ældre dagsrenovationspladser kan være kilder til PFAS forureninger. Dette skyldes, at affald som f.eks. deponeret byggemateriale med bl.a.

maling, kan indeholde PFAS forbindelser, som dermed kan blive udvasket (MST, 2014). Derudover kan forbindelserne i mindre grad afgasse, hvilket fører til diffus forurening i både luft, jord, grundvand og overfladevand (Danske Regioner, 2022a; Länsstyrelserna, 2022). Andre typer af ældre byggematerialer (f.eks. kloakrør m.m.) kan potentielt også indeholde PFAS forbindelser, dog har litteratursøgningen ikke kunne bekræfte dette. Husholdningsaffald, der kan bestå af madpapir og karton m.m., samt møbler, tekstil og tæpper er angiveligt deponeret indtil slutningen af 1980'erne (MST, 2014).

Fordi PFAS-forbindelser har været produceret længe (siden 1949) må det forventes at de vil udvaskes fra ældre dagrenovationspladser som er anlagt uden membran. Igennem en undersøgelse udført for Miljøstyrelsen i 2017 er der fundet PFAS forbindelser i perkolatet fra 6 ud af 7 lossepladser (MST, 2017a).

Spildevand og spildevandsslam

Spildevand fra industrier, der anvender PFAS forbindelser i deres produktion, kan indeholde disse forbindelser og ligeledes kan husholdningsspildevand indeholde PFAS. Forekomsten kan skyldes spild fra produktionen eller udvaskning fra produkter. Spildevandsanlæg betragtes som en punktkilde til forurening med PFAS forbindelser, eftersom disse forbindelser både måles i indløb, slam og i udløbsvandet (Strand et al., 2007). I udløbsvandet kan PFAS forbindelser måles lokalt i nærliggende vand og biota. Derudover bliver spildevandsslam spredt på landbrugsjord hvor det udgør en fladekilde, hvilket fører til at PFAS forbindelser måles i jord, overfladevand samt grundvand (MST, 2023b). Den diffuse forurening sker desuden som afgasning fra marker og via udvaskning til nærliggende vandløb, hvor PFAS forbindelser kan optages i biota (Danske Regioner, 2022a). Tørslev et al. (2020) nævner, at den væsentligste kilde til PFOS i spildevand sandsynligvis er vask af importerede tekstiler fra bl.a. Kina, men at importen af tekstiler med PFOS må forventes at falde på grund af øget fokus på stofgruppen også i Kina. Dette er dog ikke underbygget og markedsføring og anvendelse af PFOS holdige tekstiler, har været forbudt (begrænset) siden udfasningen af PFOS i 2006 (76/769/EØF).

Landbrug

PFAS forbindelser har indgået som stabilisator i pesticider og er på den måde blevet udledt på bl.a. marker og andre arealer hvor der anvendes sprøjtemidler (MST, 2016a). Dette bidrager til diffus forurening via udvaskning til grundvandet, som luftemission (gas og/eller partikler) eller via overfladeafstrømning. Samt ovennævnte udbringning af spildevandsslam på landbrugsjord.

Affaldsforbrænding

Der er ikke publiceret studier af massestrømme for PFAS i affald i Danmark, men i begrænsningsforslaget fra EFCA er der beregnet massestrømme for PFAS i affald i Europa. De største massestrømme findes i tekstilindustrien (50 853 ton/år) og fødevarekontakt materialer og emballage (24.565 ton/år) (ECHA, 2023a). I Danmark har vi et forbud fra 2020 om at man ikke må markedsføre PFAS i mademballage, men den historiske anvendelse kan stadig give anledning til diffus forurening med PFAS fra affald og på affaldsforbrændingsanlæg.

I 1960'erne og 1970'erne og før endte dagrenovation primært på ukontrollerede fyld- og lossepladser, hvorfra husholdningsprodukter, der var overfladebehandlet eller imprægneret med PFAS forbindelser, afgassede til luften og udvaskedes som perkolat. Den mest almindelige metode til at håndtere affald i dag i Danmark er affaldsforbrænding. Det er usikkert hvorvidt der opnås en komplet destruktion af PFAS-forbindelser under affaldsforbrænding ved 850 °C som er normalt, da det vurderes at en temperatur på 1600-2000 °C kræves for komplet omsætning (Danske Regioner 2022a, ECHA, 2023b).

Andre lande i EU, herunder Finland, Tyskland, Holland, Sverige m.fl., anvender også primært afbrænding og/eller genbrug og i mindre grad lossepladser. Omvendt er der lande som Grækenland, Malta, Bulgarien m.fl., hvor mere end 50% af affaldet fortsat ender på lossepladser (Europaparlamentet, 2021). Afhængigt af hvordan affaldet bliver håndteret, ender PFAS forbindelser i luften, jorden eller grundvand/overfladevand.

Der er i 13 danske slaggeprøver gennemført analyser for indhold af de 22 PFAS. For alle 13 slaggeprøver ligger værdierne væsentligt under de pågældende PFAS-grænseværdier for jord, for henholdsvis summen af 4 PFAS (altså 0,55 µg/kg TS) og 22 PFAS (0,55 – 1,62 µg/kg TS). Det vil sige at de er under 10 µg/kg TS og 400 µg/kg TS (MST, 2023a).

Der er ikke påvist PFAS i luftemissionen fra de danske affaldsforbrændingsanlæg, hvilket sandsynligvis skyldes de høje temperaturer kombineret med en effektiv rensning (Nedenskov og Dyreborg, 2023a). Men det kan også være at detektionsgrænsen ikke er tilstrækkelig lav til at påvise PFAS i de koncentrationer som giver anledning til diffus forurening af jord og grundvand. Desuden er det særligt de kortkædede PFAS-forbindelser som forventes at spredes fra affaldsforbrænding og disse er ikke undersøgt i nærværende (ECHA, 2021b).

Brandøvelsespladser og anvendelse af brandslukningsskum

Det er almindeligt kendt, at anvendelsen af PFAS forbindelser til brandslukning og særligt i forbindelse med brandøvelsespladser, ofte forårsager forurening med PFAS forbindelser, og det er sandsynligt, at spredning af PFAS-holdigt skum med vinden bidrager til diffus forurening med PFAS forbindelser. Samtidig vil spredning til grundvandet i form af faner som med tid og fortynding bliver til diffus forurening også bidrage til et øget forureningsniveau.

5.2 Spredningsveje

PFAS forbindelser kan måles overalt og spredes langt fra deres kilder, og er bl.a. også målt i Arktis, selvom produktionen af forbindelserne foregår tusinder af kilometer væk. PFAS forbindelser findes derfor som diffus forurening i miljøet i vand (overfladevand og grundvand), jorden og luften (Danske Regioner, 2022a).

Atmosfærisk nedfældning og nedbør

Bidraget af PFAS forbindelser fra div. kilder til luften via fordampning afhænger af forbindelsernes damptryk, men det kan også ske som en indirekte spredning af PFAS forbindelser på ionform bundet til partikler (Danske Regioner, 2022a; ITRC, 2022).

Nogle af de PFAS forbindelser, der i højere grad vil fordampe til luften, er FTOH'er (fluortelomer alkoholer). Teorier om, hvordan FTOH'er kan transporteres over store afstande til f.eks. Arktis, beskriver, at når FTOH'er transporteres i gasfasen, omdannes disse til f.eks. PFAA'er, (Perfluoralkylsyrer) og nedfældes derefter i form af regn og sne. Derudover kan dissocierede PFAS forbindelser (ioner) transporteres i luften, når disse sorberer til luftbårne partikler og i form af aerosoler. Med bidrag i form af støv, regn og sne kan dette give en diffus belastning i fjerne egne (Filipovic, Laudon, et al. 2015).

En anden måde, hvorpå PFAS forbindelser kan transporteres i atmosfæren, er gennem havskum og aerosoler. Det sker når bobler bryder vandoverfladen (Li et al., 2019) og transporteres med luften op i atmosfæren (De Leeuw et al., 2011). I et land som Danmark, som er omgivet af hav, er det muligt at bidraget herfra er betydeligt.

I regnbetingede udløb fra fælleskloakerede områder er PFOS fundet med størst hyppighed og dernæst PFOA og PFBA. Koncentrationsniveauet i de undersøgte regnbetingede udløb var lavere end koncentrationsniveauet i udløb fra renseanlæg. Der er ikke fundet indikation på, at PFOS i udløb fra fælleskloakerede områder har medført forurening i overfladevand, som overskrider miljøkvalitetskravet (Strand et al. 2007).

2004 er der analyseret 7 regnvandsprøver fra 7 DMU baggrundsstationer fordelt over Danmark og konstateret indhold af PFOS, PFDA og PFUnA i enkelte prøver med op til 23 ng/l. Det højeste indhold var for PFDA (23 ng/l), PFUnA (15 ng/l) og PFOS (2,4 ng/l) (Strand et al. 2007).

Grundvand

Kilderne til diffus forurening med PFAS forbindelser i grundvand er primært spredning af spildevandsslam, anvendelse som hjælpeforbindelser i pesticider samt udledning fra punktkilder til faner som ikke oprenses og med tiden fortyndes i grundvandet.

Mange PFAS forbindelser er persistente og vandopløselige og har derfor potentiale for at spredes langt i grundvandet. Samtidig er kvalitetskriterierne lave og PFAS forbindelserne er derfor problematiske selv i lave koncentrationer. Tidshorisonten for udvaskning af PFAS fra en kilde til grundvandet spænder fra få år til langt over 10 år og afhænger af bl.a. klimaforhold og kildekonzentration (ITRC, 2022).

Overfladevand

Forekomst af PFAS forbindelser i overfladevand kan stamme fra flere forskellige kilder, herunder udledning af spildevand fra rensningsanlæg, afstrømning fra lossepladser, brandøvelsespladser, tilstrømning fra forurenede grundvand fra punktkilder, atmosfærisk nedfald osv. (MST 2016b).

5.3 Receptorer

Optagelsen af PFAS forbindelser i, f.eks. biota og mennesker, afhænger bl.a. af om der er tale om kortkædede forbindelser (C2-C6/7) eller langkædede forbindelser (>C6/7) (Danske Regioner, 2022a). De kortkædede PFAS forbindelser har tendens til at være mere mobile og kan derfor måles i fisk og skaldyr. Omvendt har langkædede PFAS forbindelser tendens til at sorbere til organisk materiale (jord), og kan dermed forekomme i afgrøder.

PFAS i fødekæden

PFAS i vandet kan blive optaget i biota (fisk, skaldyr, planter mv.). PFAS forbindelser kan opkoncentreres i planter og derved indgå i fødekæden for dyr og mennesker. Optag af PFAS forbindelser i planter anghænger bl.a. af plantetype, jordarten og PFAS forbindelsen (Ghisi et al. 2019).

Husdyr som drikker forurenede vand eller spiser forurenede græs, hø eller anden afgrøde vil optage og evt. bioakkumulere PFAS i deres organer, f.eks. hos kød- og malkekvæg, høns og grise. Dette betyder, at mennesker kan eksponeres gennem indtagelse af forurenede kød eller mælk m.v.

I de højere led i fødekæden bioakkumulerer PFAS forbindelserne, hvilket medfører at forbindelserne kan måles i både dyr og naturen, langt fra den oprindelige kilde (Strand et al., 2007). Bioakkumuleringen er generelt højere i vandlevende organismer end i jordlevende organismer (Larsen & Giovalle 2015).

Eksponering af mennesker

Mennesker udsættes for PFAS forureninger ved indtag/spisning af forurenede mad, drikkevand og jordstøv samt ved indånding af støv i inde- og udeluft. I Held (2016) er givet en opgørelse over dagligt indtag af PFOS fordelt på de forskellige kilder, og heraf fremgår det, at indtag via mad er langt den største kilde til menneskers indtag af PFAS forbindelser. De væsentligste bidrag kommer fra fisk, andre fødevarer fra havet og frugt. I den nyeste risikovurdering fra EFSA (EFSA 2020) er der ligeledes en vurdering af indtagelse af PFAS via forskellige fødevarer, såsom kød, æg, frugt og drikkevand.

6 Metode

For at undersøge koncentrationsniveauer for diffus PFAS forurening i jord, grundvand og overfladevand i Danmark, og lande der ligner Danmark er der indsamlet data fra videnskabelig litteratur, rapporter fra offentlige institutioner og offentligt tilgængelige databaser.

6.1 Litteraturstudie og databehandling

Litteratursøgningen er foretaget sådan, at udvalgte ord og kombinationer af ord er anvendt til at søge relevant litteratur frem. Benyttede søgeord omfatter, men er ikke begrænset til, de præsenterede termer i tabellen nedenfor (Tabel 2). Søgeudtryk er herved sammensat ved at kombinere termer fra de tre kategorier nævnt i tabellen. Der er primært søgt på engelsk, men da nærværende projekt forsøger at etablere koncentrationer af PFAS i miljøet som er relevante i en dansk kontekst, er der også foretaget søgninger med danske oversættelser af søgeordene.

Tabel 2. Tre grupper af udvalgte søgetermer i litteratursøgningen

Forbindelser og grupper af forbindelser	Forureningstyper	Medier
PFAS	Diffuse pollution	Groundwater
PFOS	Diffuse contamination	Soil
PFC	Background concentrations	Surface water
PFOA	Background levels	Environment
Perfluoroalkyl	Ambient levels	
Polyfluoroalkyl	Ambient concentration	
	Screening	

Den fremsøgte litteratur er indledningsvis screenet på baggrund af titel og er dernæst vurderet ift. en række udvælgelseskriterier ved gennemlæsning:

- i. Hele eller dele af prøvetagning for PFAS forbindelser er ikke foretaget ifm. En konkret kendt forurening,
- ii. Studiet er foretaget under forhold som er sammenlignelige med danske, hvad angår f.eks. geografi, klima og samfundsøkonomi,
- iii. Rådata skal, til et vist omfang, være tilgængelige
- iv. Der skal være analyseret for en række af de PFAS forbindelser der indgår i Miljøstyrelsens kvalitetskriterier.

Udover data fra international videnskabelig litteratur er der i nærværende undersøgelse indhentet data fra to offentligt tilgængelige databaser; den nationale boringsdatabase Jupiter (GEUS, 2022), og miljødata.dk (hvorfra data fra regionernes undersøgelser af overfladevand er udtrukket). Endelig indgår også data fra overvågningen i NOVANA af miljøfarlige forurenende forbindelser i vandmiljøet og fra en miljøundersøgelse i et byområde på Sjælland.

Der er i nærværende bestemmelse af niveauer for diffus forurening med PFAS forbindelser fokuseret på de 22 PFAS forbindelser, der indgår i Miljøstyrelsens kvalitetskriterier (MST, 2022a).

Til databehandlingen er de enkelte studiers analyseresultater så vidt muligt tilgået. Fundhyppighed er beregnet som procentdelen af analyseresultater over detektionsgrænsen. Max.

Fund er den højeste fundne koncentration af et givent stof og ligeledes er min. fund den laveste koncentration.

Estimering af koncentrationsniveauet for diffus forurening

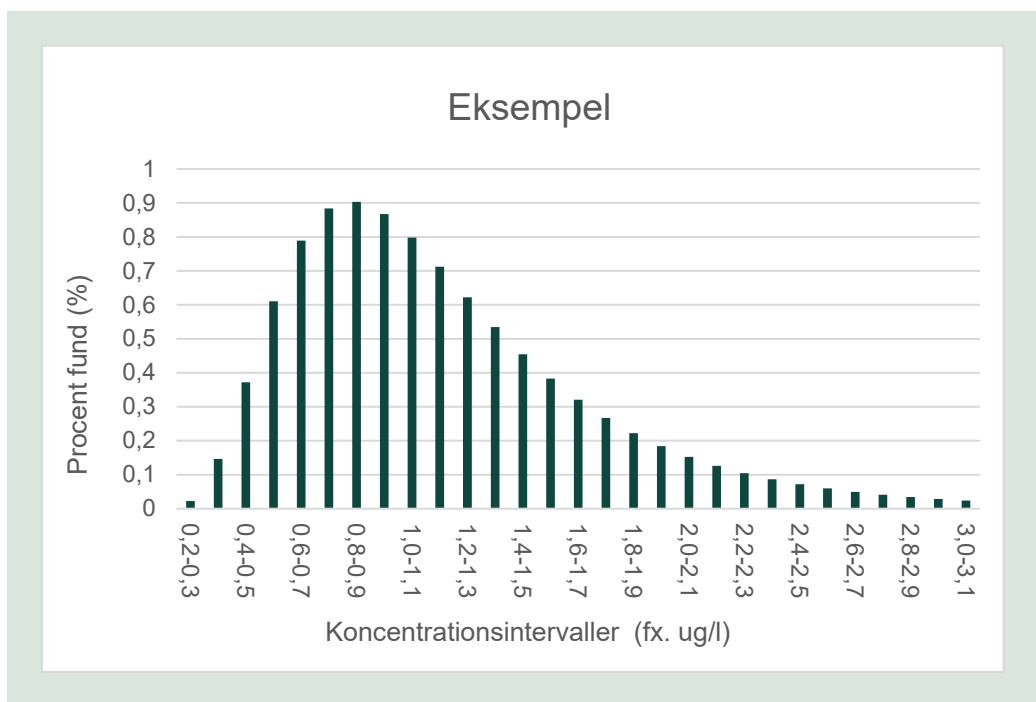
Koncentrationsniveauet for diffus forurening, kan estimeres på flere måder alt efter datakvalitet mv. Det kunne f.eks. være et gennemsnit, eller en median værdi, fordelt på forskellige typer arealanvendelse (f.eks. by og land).

Der findes flere metoder og anbefalinger til at estimere koncentrationsniveauet for diffus forurening for miljøfremmede stoffer. I forhold til nærværende så er det interessant at afklare antal prøver, hvilken statistisk estimator som bedst beskriver niveauet af diffus forurening, hvilken statistisk fordeling der bedst beskriver data og hvordan man behandler prøver under detektionsgrænsen.

Almindeligvis kan man beregne en stikprøves størrelse, hvis man antager at data er normalt fordelt og kender standardafvigelsen, fejlmarginen og konfidensintervallet. Alternativt kan man anvende erfaringsbaserede tal fra andre undersøgelser.

Data indsamlet i forbindelse med undersøgelser af diffus forurening, vil ofte være lognormal fordelt fordi man forventer at data er "skewed" mod lave værdier, og har en "hale" af data med høje værdier. Dette gør det mindre robust at anvende middelværdier.

Det at man forventer at data er lognormalfordelt eller skewed betyder mange målinger giver koncentrationer som ligner hinanden, på Figur 4 omkring 1 ug/l, og denne værdi vil man forstå som niveauet for diffus forurening. Samtidig vil der være en "hale" på grafen hvor koncentrationerne er højere og påvises mindre hyppigt. Der anvendes derfor ofte enten median eller fx toppen af grafen aflæst på x-aksen som værdi for koncentrationen af diffus forurening.



FIGUR 4. Eksempel for lognormalfordelt koncentrations data.

I DCE (2017) beskriver man databehandling og datavurdering af miljøfarlige stoffer i vand, sediment og biota fra vandløb, søer og kystvande. I (DCE, 2017) anvendes der percentiler til at

estimere niveauet af diffus forurening. Dette er fordi overvågningsdata ikke altid er normalt fordelt, hvorfor en middelværdi kan være misvisende. Hvilken percentil der anvendes (10, 25, 50 etc.) afhænger af hvilke data der er tale om. F.eks. forventer man for monitorings data en påvirkning fra forurenede grunde og her kan man anvende 10 % fraktilen, men for data fra pristine områder anvendes 50 fraktilen (median værdien). I (AVJ, 2000 og MST, 2002) beregnes medianværdier for jord i Københavns området og provinsen, her er data indsamlet i forbindelse med kortlægning af belastede områder.

I (DCE, 2017) anbefales det at man for ikke naturligt forekommende stoffer anvender følgende retningslinjer (Tabel 3) i forhold til prøver som ligger under detektionsgrænsen.

Tabel 3. Forslag til at estimere koncentration for ikke naturligt forekommende stoffer under detektionsgrænsen fra DCE (2017).

Ikke-naturligt forekommende stoffer		
Fundhyppighed	≤ 20 %	> 20 %
Estimeret koncentration ved konc. < detektionsgrænsen	0	½ * detektionsgrænse

I forhold til antal prøver så vurderes det i DCE (2017) at fraktil eller percentil klassifikationer kun bør foretages på datasæt med 50 eller flere data. Med den undtagelse at hvis prøverne udtages i pristine omgivelser, hvor der forventes en ensartet koncentration, så kan der skønsmæssigt undersøges 5 områder, hvor der udtages mindst 3 prøver.

I forhold til erfaringer med at fastlægge et niveau for diffus forurening i jord, så forventer man mere heterogene forhold i jorden fordi der ikke sker den samme opblanding som i vand. Omvendt må man for diffus forurening, som følge af atmosfærisk nedfald kunne antage en mere eller mindre ensartet påvirkning. I MST (2002) har man undersøgt diffus jordforurening i byområder og her har man væsentligt flere prøver (>500) men her må man også forvente noget større heterogenitet i koncentrationsniveauet. Det samme gør sig gældende for ITRC (2023), men her skelner man mellem naturlig og antropogen diffus forurening.

I de følgende afsnit udfoldes og uddybes de enkelte datasæt med beskrivelser af datakilder og databehandling forud for opstillingen af tabeller for forureningskoncentrationer i afsnit 6.

6.2 Grundvand

Datagrundlaget for koncentrationsniveauer af PFAS i grundvand bygger primært på analyser fra 278 grundvandsindtag som indgår i den landsdækkende grundvandsovervågning (GRUMO). Disse borer er generelt mere terrænnære og geografisk spredt end vandforsyningsboringer, hvorfor de kan bruges til at undersøge niveauet af diffus forurening med PFAS i grundvandet (MST, 2022b). Analyser fra en prøvetagningsrunde i 2021 er tilgængelige i Jupiter (GEUS, 2022), hvorfra data til nærværende rapport er udtrukket. Til brug i den nærværende undersøgelse er borer delt i korte (0-20 m.u.t.) og dybe (>20 m.u.t.) borer, med hhv. 182 og 96 indtag i hver kategori.

Der er ikke knyttet information om arealanvendelsen til en given boring, men prøverne er ikke udtaget i forbindelse med en konkret forurening, hvorfor de antages at repræsentere diffus forurening.

Som supplement er også medtaget data fra en svensk screening af PFAS forbindelser i grundvand og overfladevand. Heri er 164 grundvandsboringer på tværs af Sverige analyseret for

PFAS forbindelser (Ahrens et al. 2016). Data fra den nævnte undersøgelse er dog præsenteret i en separat tabel, da kun ca. 30 % af borerne er angivet med dybde, og et ukendt antal er placeret i områder med kendte, potentielle kilder til PFAS forurening.

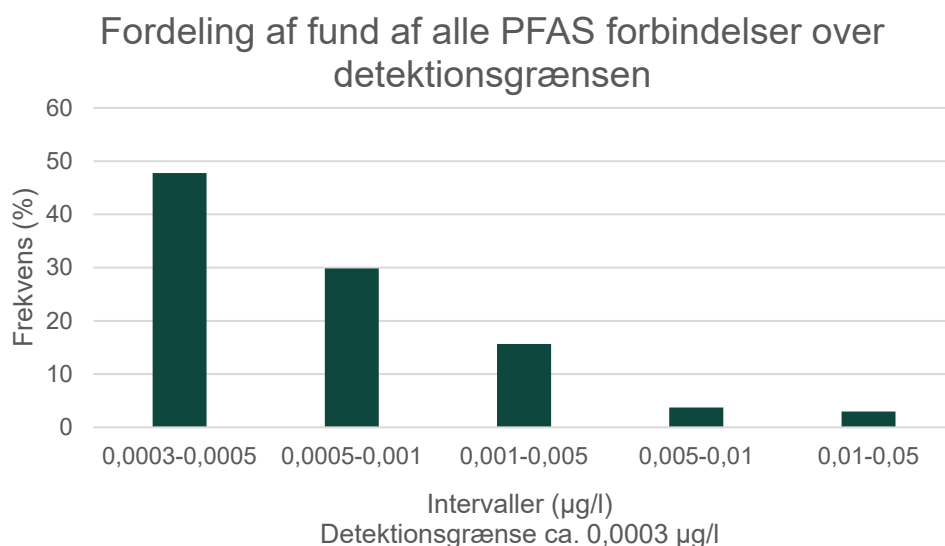
Beregning af niveauet af diffus forurening for grundvand

For data fra GRUMO gælder særligt, at der ikke er fundet PFAS over detektionsgrænsen i alle prøver (se fundhyppighed i % i Tabel 4 og Tabel 5), og koncentrationsniveauerne er generelt i samme størrelsesorden som detektionsgrænsen på analyseresultaterne. Det er derfor overvejet, om det f.eks. er middelværdien eller medianen som bedst beskriver det konkrete datasæt. Da det forventes at data er skewed og kan antages lognormalt fordelt, er det mest hensigtsmæssigt at anvende medianen.

I FIGUR 5 ses fordelingen af fund af PFAS forbindelser (på enkelt forbindelser) over detektionsgrænsen for GRUMO-indtagene (n=134). Der fremgår tydeligt et stigende antal prøver med koncentrationer i nærheden af detektionsgrænsen, hvilket indikerer, at der sandsynligvis findes et ikke-ubetydeligt antal prøver hvor niveauet af diffus forurening med PFAS, ikke er 0, men ligger mellem 0 og detektionsgrænsen. Dette er en udfordring, fordi det kan indikere at niveauet af diffus forurening med PFAS ligger under eller meget tæt på detektionsgrænsen.

Man kan diskutere hvad værdien af at kende det præcise niveau for diffus forurening er, hvis det ligger under detektionsgrænsen, specielt hvis det er behæftet med stor usikkerhed. I mange tilfælde vil det være tilstrækkeligt at vide at det er under detektionsgrænsen.

For GRUMO-boringerne, er der over 50 prøver fordelt på forskellige indtag. Datagrundlaget er derfor ifølge DCE (2017) godt nok til at der kan beregnes en median. De meget lave fundprocenter indikerer at medianen vil ligge under detektionsgrænsen. Det vurderes at der ved lavere fundprocenter vil være stor usikkerhed behæftet med et resultat beregnet efter værdierne foreslået i Tabel 3 og en værdi under detektionsgrænsen vil uanset have mindre interesse. Her er det i første omgang vigtigt at vide at værdien er under detektionsgrænsen. For GRUMO boringerne beregnes der derfor en median værdi, hvis der er fund i mere end 50 % af prøverne. Behandlingen af fund under detektionsgrænsen følger Tabel 3.



FIGUR 5. Fordelingen af fund over detektionsgrænsen for GRUMO-boringer (både dybe og korte), n=134. Detektionsgrænsen for flere PFAS forbindelser er 0,0003 µg/l.

6.3 Jord

Til fastsættelsen af koncentrationsniveauer for diffus PFAS forurening i jord er der forsøgt skelnet mellem jordanalyser udtaget i miljøer med varierende grad af menneskelig påvirkning, f.eks. urørt natur, byområder eller landbrugsjord. På den baggrund er der blandt den udvalgte litteratur opstillet to kategorier; jord fra skovområder og jord fra byområder, indeholdende data fra to undersøgelser hver. I alle anvendte datasæt er jordprøver udtaget som overfladeprøver inden for den øverste halve meter af jorden.

Forureningsniveauer for skovjord er baseret på to svenske studier, Mattias et al. (2022) og Kikuchi et al. (2018), hvor sidstnævnte er en undersøgelse foretaget af den svenske miljøstyrelse. Begge undersøgelser forsøger eksplicit at etablere koncentrationsniveauer for diffus forurening med PFAS forbindelser og har udtaget jordprøver fra skovområder på tværs af Sverige, alle i gamle skove uden kendte forureninger. Data til tabellen i nærværende rapport er udtrukket fra bilag A2 i Kikuchi et al. (2018) og fra den supplerende information til Mattias et al. (2022). Der er analyseret en prøve pr. skovområde, prøverne er udtaget som en blandeprøve af fem nedstik.

For jord i byområder er anvendt en rapport fra den norske miljøstyrelse (Heimstad et al. 2020), hvor jordprøver er udtaget i og omkring Oslo, samt en miljøundersøgelse fra et byområde på Sjælland, hvor der er udtaget prøver i en park. Prøverne er udtaget på ikke-forureningskortlagte arealer (Region Hovedstaden, 2022). Prøverne fra området omkring Oslo er udtaget fem steder, hvor der for hvert sted er udtaget 3 prøver i de øverste 0-20 cm. De sjællandske prøver er udtaget som en blandeprøve fra fem nedstik over dybden 0,0-0,3 m under terræn. Alle prøver er udtaget med 2" håndbor.

Beregning af niveauet af diffus forurening for jordprøver

For fund af PFAS forbindelser i jord (Tabel 6 og Tabel 7) er der for skovjord 31 prøver og for byjord 32 prøver, det er færre end de 50 der anbefales DCE (2017) og meget færre prøver end i MST (2002) og ITRC 2023. Det er derfor behæftet med for stor usikkerhed at beregne en medianværdi for jordprøverne. Jord er ikke beskrevet i DCE (2017), som udelukkende om-

fatter vand, sediment og biota fra vandløb, søer og kystvande. Men forurening spredes anderledes i jord og større heterogenitet i koncentrationstværdier kan forekomme inden for korte afstande og det må derfor forventes, at et højere antal prøver er nødvendigt for at kunne beregne en troværdige median.

I nærværende skelnes der mellem byjord hvor der må forventes en vis heterogenitet og PFAS forurening i områder med begrænset menneskelig påvirkning. Men da der i ingen af tilfældene er data nok til at der kan estimeres et niveau for diffus forurening med PFAS, rapporteres der i stedet min, max for PFAS koncentrationen, antal prøver og fundprocenten.

6.4 Overfladevand

Ved tidspunktet for udarbejdelsen af denne rapport var PFAS analyser fra 27 vandløbsstrækninger tilgængelige på Miljødata.dk (Danmarks Miljøportal, 2022). De pågældende vandløb er alle undersøgt grundet risiko fra en konkret jordforurening, men ved alle undersøgelser er der desuden udtaget en vandprøve opstrøms for kilden. Udelukkende disse opstrøms prøver anvendes her som udtryk for niveauer af diffus forurening. Dette er under antagelse om at der ikke findes en anden, ukendt forureningskilde opstrøms for disse kilder. Koncentrationerne for vandløb i datasættet fra Miljødata.dk sammenlignes med data fra overvågningen af miljøfarlige forurenende stoffer i vandmiljøet, NOVANA (Boutrup et al. 2021). I screeningen for grundvand og overfladevand i Sverige (Ahrens et al. 2016) indgår analyser af vand fra 10 "baggrunds-søer", dvs. søer som ligger afsondret og derfor antageligvis er minimalt påvirket af kilder til PFAS forurening.

Estimering af niveauet for diffus forurening med PFAS i overfladevand

Der er stor variation i forskellen på fund og detektionsgrænsen for overfladevandsprøverne (Tabel 8 og Tabel 9). Data fra regionerne databehandles som foreslået i DCE (2017). Dvs. der beregnes en median værdi hvis der er over 50 prøver og værdier under detektionsgrænse behandles som foreslået i Tabel 3.

I forbindelse med NOVANA indsamles der ifølge Boutrup et al. (2021) data om 5 PFAS forbindelser i vandløb i perioden 2008-2019, det er Perfluorhexansulfonsyre (PFHxS), Perfluoroktansyre (PFOA), Perfluoroktansulfonsyre (PFOS), Perfluoroktansulfonamid (PFOSA), Perfluordecansyre (PFDA) og Perfluorundecansyre (PFUnA) (Boutrup et al. 2021). NOVANA data præsenteres i en tabel og data sammenlignes. Desuden har der ikke været adgang til rådata, hvorfor det ikke har været muligt identificere min. og max. fund for dette datasæt.

6.5 Datakvalitet og fejlkilder

Data er indsamlet fra en række kilder, hvor af noget er monitoring i forbindelse med myndigheders arbejde og andet er universitetsprojekter og der kan for hvert enkelt studie være forskellige fejlkilder. Det er ikke alle datasæt hvor det er beskrevet hvordan afsmitning mellem udstyr og prøver håndteres, hvilket ellers er relativt vigtigt, når man arbejder med lave koncentrationer.

Den generelle analyseusikkerhed er på hhv. 23 og 29 % for 22 PFAS forbindelser i jord og grundvand/overfladevand. Hertil skal tilføjes usikkerheder forbundet med selve prøvetagningen, hvor selv en minimal tilføjelse af PFAS forbindelser udefra (kontaminering) vil føre til potentielle overskridelser.

7 Koncentrationsniveauer for diffus PFAS forurening

I dette kapitel undersøges koncentrationsniveauer for diffus PFAS forurening i jord, grundvand og overfladevand. Der er i nærværende bestemmelse af niveauer for diffus forurening med PFAS forbindelser fokuseret på de 22 forbindelser der indgår i Miljøstyrelsens kvalitetskriterier og kravværdier (MST, 2022a; MST, 2017b).

7.1 Grundvand

Tabel 4, 5 og 6 præsenterer koncentrationsniveauer for diffus forurening med PFAS for hhv. dybe borer, korte borer og screening af svenske borer.

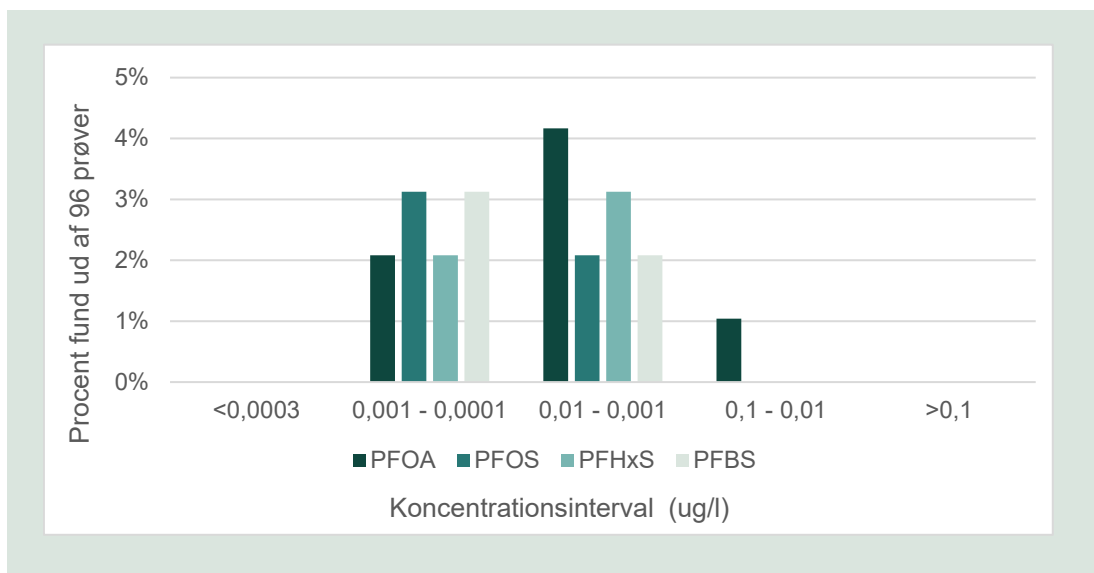
Tabel 4. Grundvand i Danmark, dybe borer (>20m), antal indtag n=96. Kolonnerne min. Og max. Viser hhv. den laveste og den højeste koncentration af PFAS forbindelsen.

Enhed: µg/l	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for koncentrations niveau	Detektionsgrænse
PFOS ^{1,2,3}	5	0,0004	0,003	-	0,0003
PFOA ^{1,2,3}	7	0,0005	0,04	-	0,0003
PFNA ^{1,2,3}	1	0,0004	0,0004	-	0,0003
PFHxS ^{1,2,3}	5	0,0007	0,002	-	0,0003
Σ4 PFAS		-		-	
PFBS ^{2,3}	5	0,0004	0,008	-	0,0003
PFOSA ^{2,3}	1	0,0007	0,0007	-	0,0003
6:2 FTS ^{2,3}	1	0,0006	0,0006	-	0,0003
PFBA ^{2,3}	1	0,002	0,002	-	0,002
PFHxA ^{2,3}	0	-	-	-	0,0003
PFHpA ^{2,3}	4	0,0005	0,01	-	0,0003
PFDA ^{2,3}	1	0,0005	0,0005	-	0,0003
PFPeA (PFPA) ^{2,3}	1	0,01	0,01	-	0,0003
PfUnDA ³	0	-	-	-	0,0003
PfDoDA ³	0	-	-	-	0,0003
PfTrDA ³	0	-	-	-	0,0003
PFPeS (PFPS) ³	3	0,0005	0,005	-	0,0003
PFHpS ³	0	-	-	-	0,0003
PFNS ³	0	-	-	-	0,0003
PFDS ³	0	-	-	-	0,05
PfUnDS ³	i.a.		-	-	0,0003
PfDoDS ³	0		-	-	0,0003
PfTrDS ³	i.a.				
Σ22 PFAS				-	

¹Σ4 PFAS, ²Σ 12 PFAS, ³Σ22 PFAS. i.a. = ikke analyseret.

Kvalitetskriterier: Σ4 PFAS = 0,002 µg/l, Σ22 PFAS = 0,1 µg/l. **Værdier med rød indikerer en overskridelse af 4 PFAS for enkeltstoffer** og værdier med blå indikerer en overskridelse af Σ22 PFAS for enkeltstoffer.

Data for dybere GRUMO-boringer (Tabel 4) indeholder prøver fra 96 indtag, og alle prøver er udtaget i 2021. Ved gennemgang af data fremgår generelt lave fundhyppigheder, hvor den hyppigst fundne forbindelse, PFOA, kun er fundet i 7 % af indtagene, svarende til 7 prøver. I FIGUR 6 ses fordelingen af koncentrations niveauer af PFAS forbindelser med de højeste fundprocenter. Det kan ikke udelukkes at niveauet af diffus forurening på nogen lokaliteter vil overskride kvalitetskriteriet for Σ4 PFAS på 0,002 µg/l, men ud fra forhåndenværende data vil det være i meget få tilfælde ca. i størrelsesordenen 5 %.



FIGUR 6. Fundprocenter for de hyppigst fundne PFAS forbindelser (PFOA, PFOS, PFHxS og PFBS) i de dybe borer.

Det at der kun findes PFAS i få af de 96 indtag betyder, at der er mange borer hvor koncentrationen af PFAS er under detektionsgrænsen eller 0. Dette indikerer at niveauet af diffus forurening med PFAS er lavt og måske under detektionsgrænsen. 96 indtag er ganske mange og resultatet er derfor behæftet med mindre usikkerhed. På denne baggrund kan det konkluderes at niveauet for diffus PFAS i de dybe borer for alle forbindelser vil være under detektionsgrænsen i langt de fleste tilfælde.

I Tabel 5 ses data fra de korte GRUMO-borer (<20m) der er data fra 182 indtag og alle prøver er udtaget i 2021.

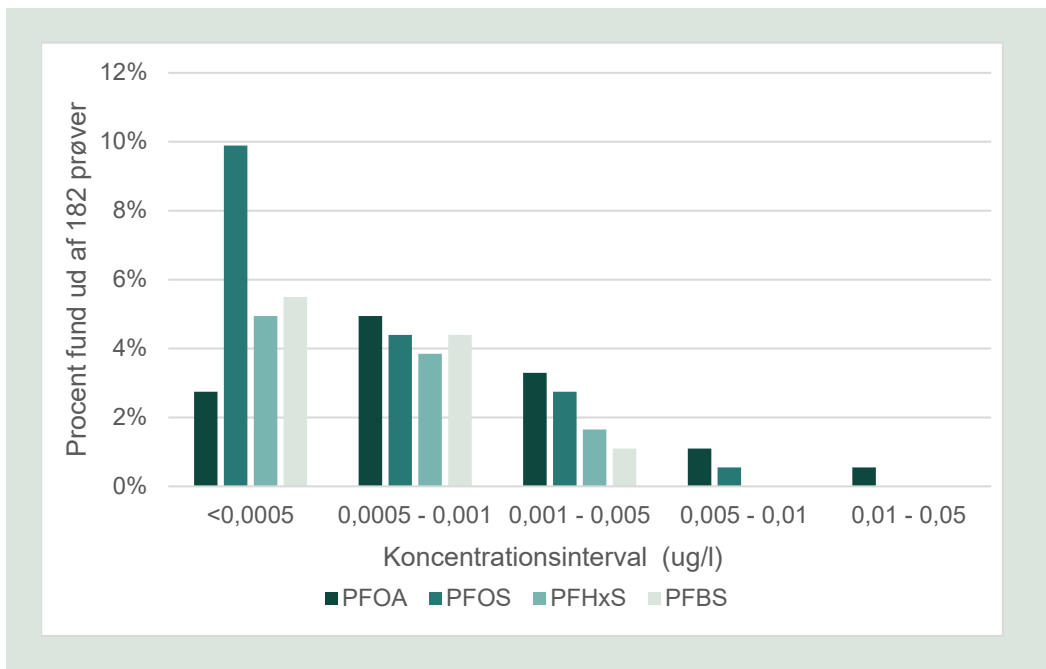
Table 5. Grundvand i Danmark, korte borer ($<20\text{m}$), $n=182$. Kolonnerne min. og max. Viser hhv. den laveste og den højeste koncentration af PFAS forbindelsen.

Enhed: $\mu\text{g/l}$	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for koncentrations niveau	Detektionsgrænse
PFOS ^{1,2,3}	18	0,0003	0,009	-	0,0003
PFOA ^{1,2,3}	13	0,0003	0,03	-	0,0003
PFNA ^{1,2,3}	0	-	-	-	0,0003
PFHxS ^{1,2,3}	10	0,0003	0,003	-	0,0003
$\Sigma 4$ PFAS					-
PFBS ^{2,3}	11	0,0003	0,002	-	0,0003
PFOSA ^{2,3}	0	-	-	-	0,0003
6:2 FTS ^{2,3}	0	-	-	-	0,0003
PFBA ^{2,3}	1	0,004	0,004	-	0,002
PFPeA (PFPA) ^{2,3}	2	0,0003	0,002	-	0,0006
PFHxA ^{2,3}	6	0,0003	0,004	-	0,0003
PFHpA ^{2,3}	5	0,0003	0,003	-	0,0003
PFDA ^{2,3}	0	-	-	-	0,0003
PFUnDA ³	0	-	-	-	0,0003
PFDoDA ³	0	-	-	-	0,0003
PFTTrDA ³	0	-	-	-	0,0003
PFPeS (PFPS) ³	1	0,0006	0,0006	-	0,0003
PFHpS ³	0	-	-	-	0,0003
PFNS ³	0	-	-	-	0,0003
PFDS ³	0	-	-	-	0,0003
PFUnDS ³	i.a.			-	0,05
PFDoDS ³	0	-	-	-	0,0003
PFTTrDS ³	i.a.				
$\Sigma 22$ PFAS				-	-

¹ $\Sigma 4$ PFAS, ² $\Sigma 12$ PFAS, ³ $\Sigma 22$ PFAS. i.a. = ikke analyseret.

Kvalitetskriterier: $\Sigma 4$ PFAS = $0,002 \mu\text{g/l}$, $\Sigma 22$ PFAS = $0,1 \mu\text{g/l}$. **Værdier med rød indikerer en overskridelse af 4 PFAS** for enkeltstoffer og værdier med blå indikerer en overskridelse af $\Sigma 22$ PFAS for enkeltstoffer.

I de korte borer er der generelt lav fundhyppighed, PFOS findes i 18 pct. På FIGUR 7 ses koncentrationen for de fire PFAS forbindelser (PFOS; PFOA, PFBS og PFHxS) som man hyppigst finder.



FIGUR 7. Fundprocenter for de hyppigst fundne PFAS forbindelser (PFOA, PFOS, PFHxS og PFBS) i de korte borer.

På FIGUR 7 ses en generel stigning i fundhyppigheder mod lavere koncentrationer, på nær for PFOA. Det højeste niveau af PFOS, PFOA og PFHxS i de korte borer på 0,03 µg/l overskrider grundvandskvalitetskriteriet for $\sum 4$ PFAS. For nærværende data kan det konkluderes at niveauet af diffus forurening med PFAS i de fleste tilfælde vil være under detektionsgrænsen for de korte borer.

Der er ikke skelnet mellem forskellige arealanvendelser, f.eks. industri og byområder. Men det er sandsynligt, at man her ville kunne se en forskel både i koncentrationer og sammensætning af PFAS forbindelser, men datagrundlaget har ikke været tilstrækkeligt.

Generelt gælder for både Tabel 4 og Tabel 5 at detektionsgrænsen for PFAS forbindelserne er ca. en faktor 10 lavere end kvalitetskriteriet for $\sum 4$ PFAS og ca. en faktor 500 lavere end kvalitetskriteriet for $\sum 22$ PFAS, med undtagelse af nogle få forbindelser (PFBA og PFUnDS).

Der kan pga. de lave fundprocenter ikke udledes en numerisk værdi for koncentrationsniveauet af PFAS forbindelser i hverken de dybe eller de korte borer, det kan bare konstateres at medianen for begge datasæt er under detektionsgrænsen.

I forbindelse med en svensk screening for PFAS forbindelser i grundvand er 164 grundvandsboringer analyseret for PFAS forbindelser (Ahrens et al. 2016), resultatet kan ses i Tabel 5.

Tabel 6 Grundvand i Sverige (Ahrens et al., 2016), n=164. Kolonnerne min. Og max. Viser hhv. den laveste og den højeste koncentration af PFAS.

Enhed: µg/l	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for kon- centrations niveau	Detektions- grænse
PFOS ^{1,2,3}	18	0,0002	0,03	-	0,0002
PFOA ^{1,2,3}	21	0,0004	0,40	-	0,0004
PFNA ^{1,2,3}	26	0,0001	0,07	-	0,00008
PFHxS ^{1,2,3}	36	0,0002	0,08	-	0,0001
Σ4 PFAS				-	
PFBS ^{2,3}	26	0,0002	0,02	-	0,0002
PFOSA ^{2,3}	32	0,0001	0,01	-	0,0001
6:2 FTS ^{2,3}	9	0,002	2,7	-	0,002
PFBA ^{2,3}	11	0,0004	0,4	-	0,0002
PFPeA ²	14	0,0001	0,02	-	0,00003
PFHxA ^{2,3}	36	0,0001	1,9	-	0,00009
PFHpA ^{2,3}	40	0,0001	0,7	-	0,00005
PFDA ^{2,3}	18	0,0002	0,1	-	0,0002
PFPeA ³	i.a.				
PFUnDA ³	12	0,0002	0,02	-	0,0002
PFDoDA ³	12	0,0002	0,06	-	0,0002
PFTTrDA ³	1	0,002	0,004	-	0,00005
PFPeS ³	i.a.				
PFHpS ³	i.a.				
PFNS ³	i.a.				
PFDS ³	1	0,0047	0,005	-	0,0002
PFUnDS ³	i.a.				
PFDoDS ³	i.a.				
PFTTrDS ³	i.a.				
Σ22 PFAS				-	

¹Σ4 PFAS, ²Σ 12 PFAS, ³Σ22 PFAS. i.a. = ikke analyseret.

Kvalitetskriterier: Σ4 PFAS = 0,002 µg/l, Σ22 PFAS = 0,1 µg/l. **Værdier med rød indikerer en overskridelse af 4 PFAS for enkeltstoffer** og værdier med blå indikerer en overskridelse af Σ22 PFAS for enkeltstoffer.

Som det fremgår af Tabel 6, bliver der i de udvalgte grundvandsboringer i den svenske PFAS screening (Ahrens et al., 2016) i højere grad fundet PFAS forbindelser end i de danske boringer, og koncentrationen i flere af boringerne overskrider de danske kvalitetskriterier. Dette kommer til udtryk i højere fundhyppigheder.

Detektionsgrænsen for flere forbindelsers vedkommende er lavere i Ahrens et al. (2016) end for GRUMO boringerne, hvilket forklarer en del af de højere fundhyppigheder. Derudover er et antal af boringerne i Ahrens et al. (2016) placeret i områder med kendt forurening, ligesom dybden for mange boringer er ukendt. Derved har det ikke været muligt at identificere de boringer, som bedst repræsenterer diffus forurening. Det vurderes, at datasættet i mindre grad er repræsentativt for niveauet af diffus forurening med PFAS end GRUMO boringerne.

7.2 Jord

Af Tabel 7 fremgår forureningsniveauer for skovjord baseret på to svenske studier, Mattias et al. (2022) og Kikuchi et al. (2018), med jordprøver fra 31 skovområder på tværs af Sverige. Der er et overlap i prøverne i de to undersøgelser hhv. Mattias et al. (2022) og Kikuchi et al. (2018), datasættet er derfor renset for dubletter.

Tabel 7. Skovjord i Sverige, n=31 skovområder, der er analyseret en prøve pr. område, udtaget som en blandeprøve af fem nedstik. Kolonnerne min. Og max. Viser hhv. den laveste og den højeste koncentration af PFAS.

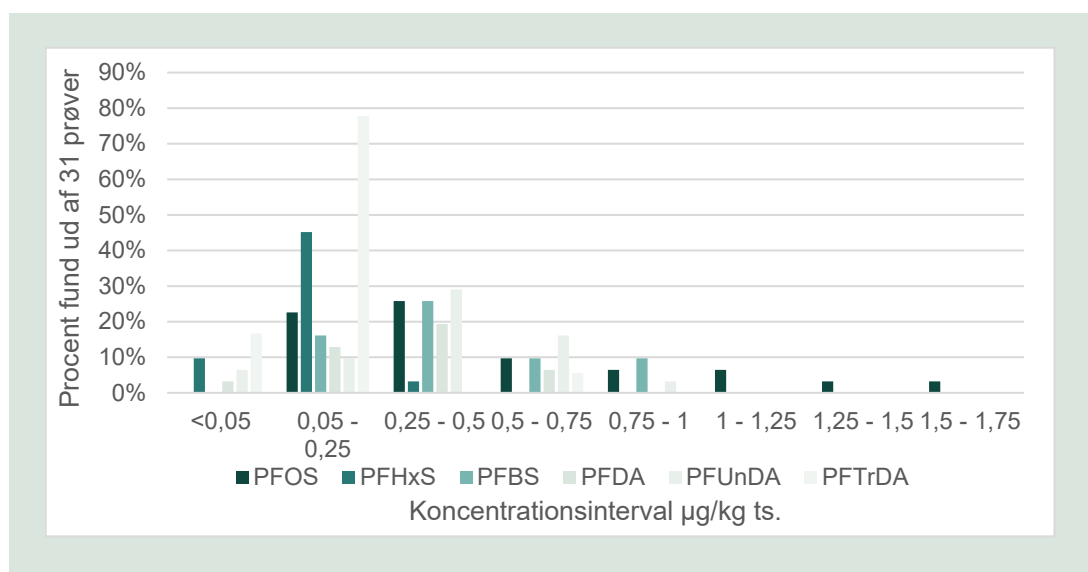
Enhed: µg/kg ts	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for koncentrationsniveau	Detektionsgrænse
PFOS ^{1,2,3}	77	0,09	1,7	-	0,02 – 0,05
PFOA ^{1,2,3}	16	0,11	0,6	-	0,02
PFNA ^{1,2,3}	29	0,06	0,7	-	0,02
PFHxS ^{1,2,3}	58	0,04	0,4	-	0,04
Σ4 PFAS					-
PFBS ^{2,3}	61	0,07	1,0	-	0,04
PFOSA ^{2,3}	6	0,04	0,6	-	0,02 – 0,04
6:2 FTS ^{2,3}	i.a.				
PFBA ^{2,3}	0	-	-	-	3,5
PFHxA ^{2,3}	0	-	-	-	8
PFHpA ^{2,3}	13	0,23	1,9		0,02 – 0,2
PFDA ^{2,3}	42	0,04	0,7	-	0,008
PFPeA (PFPA) ^{2,3}	0	-	-	-	208
PFUnDA ³	65	0,03	0,8	-	0,01
PFDoDA ³	29	0,03	0,3		0,02
PFTTrDA ³	61	0,02	0,5	-	0,02
PFPeS (PFPS) ³	i.a.				
PFHpS ³	i.a.				
PFNS ³	i.a.				
PFDS ³	0	-	-	-	0,02
PFUnDS ³	i.a.				
PFDoDS ³	i.a.				
PFTTrDS ³	i.a.				
Σ22 PFAS					-

¹Σ4 PFAS, ²Σ12 PFAS, ³Σ22 PFAS. i.a. = ikke analyseret.

Kvalitetskriterier: Σ4 PFAS = 10 µg/kg ts, Σ22 PFAS = 400 µg/kg ts. **Værdier med rød indikerer en overskridelse af 4 PFAS for enkeltstoffer** og værdier med blå indikerer en overskridelse af Σ22 PFAS for enkelt stoffer.

Af Tabel 6 fremgår fundhyppighed og detektionsgrænser baseret på jordprøver fra 31 skovområder på tværs af Sverige. Der ses generelt høje fundhyppigheder med PFOS som den mest dominerende forbindelse, efterfulgt af PFBS, PFUnDA, PFTTrDA og PFHxS, alle fundet i over

halvdelen af prøverne, men der er for få prøver til at der kan beregnes en median for koncentrationsniveauet.



FIGUR 8. Fundprocenter for de hyppigst fundne PFAS forbindelser (PFOS, PFHxS, PFBS, PFDA, PFTTrDA og PFUnDA) i skovjord i Sverige.

Koncentrationsniveauet for de hyppigst forekommende forbindelser (PFOS, PFBS, PFUnDA, PFTTrDA og PFHxS) er på samme niveau og er fra 0,02 til 1,7 $\mu\text{g/kg ts}$. De fleste prøver ligger i intervallet 0,05-0,5 $\mu\text{g/kg ts}$, men højere eller lavere værdier kan altså ikke udelukkes. Maks værdierne overskrider ikke kvalitetskriterierne for $\Sigma 4$ PFAS og $\Sigma 22$ PFAS.

Da der er udvalgt jord fra svenske skove i områder hvor der ikke har været anvendt PFAS, er det sandsynligt at den konstaterede PFAS forurening stammer fra atmosfærisk deposition som er transporteret langt fra kilden (Se kapitel 4). Samtidig er det interessant at tre af forbindelserne (PFOS, PFUnDA og PFTTrDa) er relativt langkædede forbindelser (C8 – C13). PFBS og PFHxS er kortkædede (C4 og C6). Langkædede PFAS forbindelser adsorberer mere end kortkædede (Danske Regioner, 2022a), men i det konkrete tilfælde er det altså også muligt at de er transporteret relativt langt.

I Tabel 8 vises data fra 32 prøver udtaget i byjord, hvor der ikke er en kendt kilde til forurening med PFAS forbindelser. Prøverne er udtaget i og omkring Oslo (Heimstad et al. 2020) og i et byområde på Sjælland.

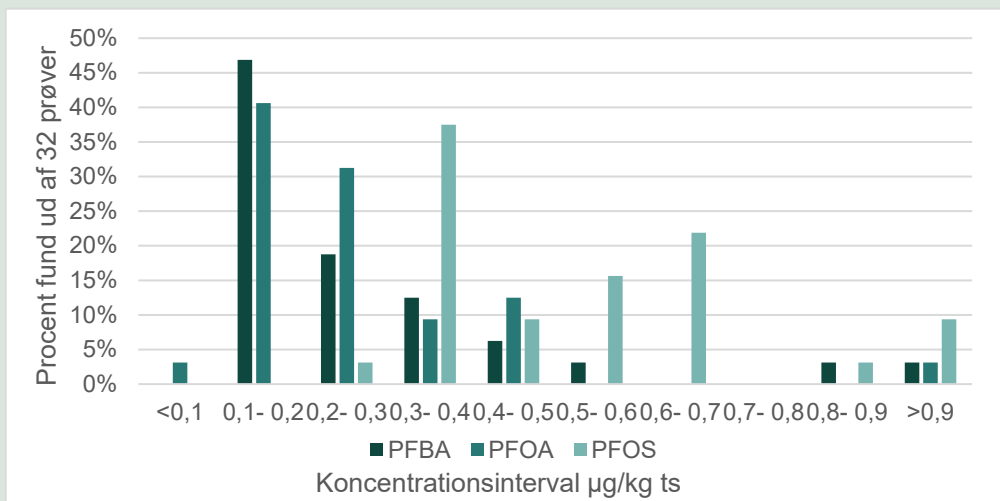
Table 8. Byjord i Danmark og Norge, n=32 prøver. Kolonnerne min. Og max. Viser hhv. den laveste og den højeste koncentration af PFAS forbindelsen.

Enhed: µg/kg ts	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for kon- centrations ni- veau	Detektions- grænse
PFOS ^{1,2,3}	100	0,3	2,9	-	0,05
PFOA ^{1,2,3}	100	0,1	1,4	-	0,05
PFNA ^{1,2,3}	9	0,1	0,8	-	0,03-0,1
PFHxS ^{1,2,3}	0	-	-	-	0,1-0,5
Σ4 PFAS	-	-	-	-	-
PFBS ^{2,3}	0	-	-	-	0,03-0,1
PFOSA ^{2,3}	3	0,2	0,2	-	0,1-0,3
6:2 FTS ^{2,3}	0	-	-	-	0,07-0,1
PFBA ^{2,3}	94	0,1	2,4	-	0,06-0,1
PFHxA ^{2,3}	16	0,1	0,3	-	0,06-0,1
PFHpA ^{2,3}	22	0,1	0,4	-	0,03-0,1
PFDA ^{2,3}	0	-	-	-	0,1
PFPeA (PFPA) ^{2,3}	4	0,2	0,2	-	0,1
PFUnDA ³	16	0,03	0,5	-	0,02-0,1
PFDoDA ³	13	0,05	0,4	-	0,02-0,1
PFTTrDA ³	6	0,06	0,08	-	0,02-0,1
PFPeS (PFPS) ³	0	-	-	-	0,03-0,1
PFHpS ³	0	-	-	-	0,1-0,5
PFNS ³	3	0,1	0,1	-	0,03-0,3
PFDS ³	10	-	-	-	0,1
PFUnDS ³	0	-	-	-	1
PFDoDS ³	0	-	-	-	1
PFTTrDS ³	0	-	-	-	1
Σ22 PFAS	-	-	-	-	-

¹Σ4 PFAS, ²Σ 12 PFAS, ³Σ22 PFAS.

Kvalitetskriterier: Σ4 PFAS = 10 µg/kg ts, Σ22 PFAS = 400 µg/kg ts. **Værdier med rød indikerer en overskridelse af 4 PFAS for enkeltstoffer** og værdier med blå indikerer en overskridelse af Σ22 PFAS for enkeltstoffer.

For jord i byområder ses ligeledes høje fundhyppigheder for nogle PFAS forbindelser, men der er for få prøver til at der kan beregnes en median for koncentrations niveauet.



FIGUR 9. Fundprocenter for de hyppigst fundne PFAS forbindelser (PFOS, PFOA, PFBA) i byjord i Danmark og Norge.

Fordelingen af koncentrationsniveauet for de hyppigst forekommende forbindelser (PFOS, PFOA og PFBA) kan ses på FIGUR 9. De er generelt på samme niveau og er fra 0,1 til 2,9 µg/kg ts. Generelt ligger koncentrationerne i jorden i nærværende undersøgelse på niveau med hinanden i hhv. skov- og byområder.

Der er analyseret for flere af de 22 PFAS forbindelser i byjorden end i skovjorden, hvorfor man skal være påpasselig med at konkludere noget endegyldigt vedr. sammensætningen af PFAS forbindelser i de to datasæt. Et forsigtigt gæt kunne være, at der findes flere forskellige PFAS forbindelser i byjorden, men nærværende datasæt kan ikke bekræfte dette. Samtidig er data fra både Danmark og Norge og det er muligt at dette har en betydning, men datagrundlaget er ikke godt nok til at drage konklusioner om dette.

Koncentrationerne af PFAS forbindelser i by- og skovjord i nærværende datasæt er under Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier, som lyder på 10 µg/kg ts for sum af 4 PFAS og 400 µg/kg ts for sum af 22 (MST, 2022a).

7.3 Overfladevand

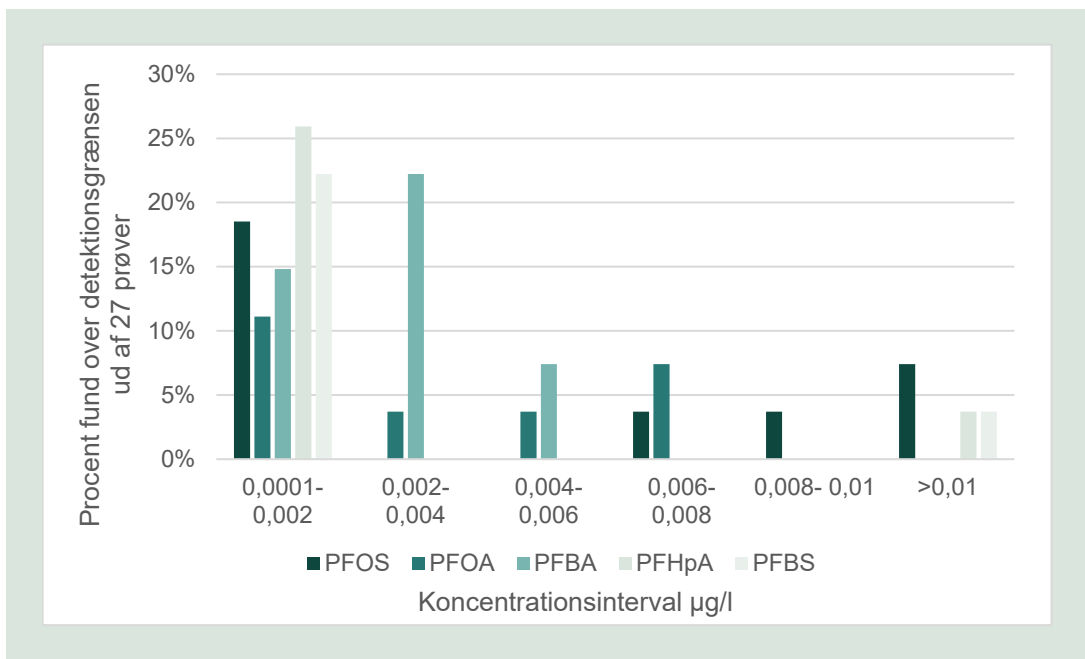
I Tabel 9 ses data fra regionernes undersøgelser af PFAS forurening i overfladevand (Danmarks Miljøportal, 2022). De pågældende vandløbsstrækninger er alle undersøgt grundet risiko fra en konkret jordforurening, men ved alle undersøgelser er der desuden udtaget en vandprøve opstrøms for kilden. Udelukkende disse opstrøms prøver anvendes her som udtryk for niveauer af diffus forurening.

Tabel 9. Overfladevand i Danmark, n=27, dvs. der er udtaget prøver i 27 vandløb.

Enhed: µg/l	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median for koncentrationsniveau	Detektionsgrænse
PFOS	33	0,0004	0,024	-	0,0003-0,001
PFOA	26	0,0008	0,008	-	0,0003-0,001
PFNA	0	-	-	-	0,00008-0,001
PFHxS	11	0,002	0,008	-	0,00015-0,001
PFBS	26	0,0003	0,024	-	0,0002-0,001
PFOSA	0	-	-	-	0,0001-0,001
6:2 FTS	4	0,002	0,002	-	0,0003-0,002
PFBA	44	0,001	0,005	-	0,0003-0,001
PFPeA (PFPA)	15	0,000	0,011	-	0,00003-0,005
PFHxA	15	0,001	0,015	-	0,00009-0,005
PFHpA	30	0,001	0,011	-	0,00005-0,001
PFDA	0	-	-	-	0,0002-0,002
PFPA	i.a.				
PFUnDA	0	-	-	-	0,0002-0,02
PFDoDA	0	-	-	-	0,0002-0,001
PFTTrDA	0	-	-	-	0,00005-0,001
PFPeS (PFPS)	i.a.				
PFHpS	0	-	-	-	0,0003-0,001
PFNS	0	-	-	-	0,0003-0,001
PFDS	0	-	-	-	0,0003-0,001
PFUnDS	i.a.				
PFDoDS	0	-	-	-	0,001
PFTTrDS	i.a.				

Miljøkvalitetskrav, ferskvand: PFOS = 0,00065 µg/l, **Værdier med rød indikerer en overskridelse af kravværdien for PFOS.**

I data fra regionernes undersøgelser af overfladevand (Tabel 9) er PFOS, PFOA, PFHpA, PFBS og PFBA de hyppigst fundne PFAS forbindelser. Ligesom for grundvandsprøverne er der ikke konstateret de langkædede PFUnDA, PFDoDA og PFTTrDA. Samtidig er max værdierne i overfladevand generelt større end max værdierne i det danske grundvand (Tabel 4 og Tabel 5) Fordelingen af fundene kan ses på FIGUR 10. Det skal bemærkes, at detektionsgrænsen varierer markant både indenfor og mellem de enkelte forbindelser, hvilket kan have indflydelse på antallet af fund.



FIGUR 10. Fundprocenter for de hyppigst fundne PFAS forbindelser (PFOS, PFOA, PFBA, PFHpA og PFBS) i vandløb i forbindelse med regionernes undersøgelser i Danmark.

Med en prøvestørrelse på 27 stk. er det vanskeligt at sige noget om koncentrations trends for overfladevandsprøverne. Men et forsigtigt gæt kunne være at det minder om trenden i de terrænnære borer, hvor fundprocenten stiger med lavere værdier ned til detektionsgrænsen. Der er også et overlap i de forbindelser som findes hyppigst (terrænnære borer: PFOS, PFOA, PFHxS og PFBA, OFV: PFOS, PFOA PFBA, PFHpA, PFBS) om der er en fysisk sammenhæng er vanskeligt at sige noget om ud fra de forhåndenværende data.

For PFOS er der fastsat et generelt kvalitetskrav på $6,5 \times 10^{-4}$ µg/l i indlandsvand (MST, 2017b), minimum værdien for fund af PFOS er på 4×10^{-4} µg/l og kvalitetskravet er således ikke overskredet i nærværende, men der er overskridelser på andre prøver. Det er ikke muligt at udlede en numerisk medianværdi for PFAS ud fra de forhåndenværende data, da der er for få data punkter. Men det kan altså ikke udelukkes at diffus forurening med PFOS kan overskride kravværdien i nogen tilfælde. Det skal bemærkes at detektionsgrænsen for nogen prøver er højere end kravværdien, og man kan derfor ikke udelukke at hvis den var lavere ville der være højere fundprocenter også over kravværdien.

Der er i forbindelse med NOVANA screeningsprogrammet indsamlet data om PFAS forbindelser i vandløb som indgår i den operationelle overvågning. Det vil sige den del af overvågningen som afdækker forholdene i vandløb som er i risiko for manglende målopfyldelse.

Table 10. PFAS in water samples collected in connection with NOVANA screening, from water flow investigated by operational monitoring in the period 2008-2013 and 2014-2019. Detection limit is given as interval for highest and lowest detection limit. There are 140 values in the data set from 2008-2013 and 324 values in the data set from 2014-2019.

Enhed: µg/l	Fundhyppighed (%)	10 % fraktil	90 % fraktil	Median	Detektionsgrænse
PFOS 2008-2013	32	<DG	0,0042	<DG	0,001
PFOS 2014-2019	75	<DG	0,0076	0,0012	0,000065- 0,65
PFOA 2008-2013	21	<DG	0,003	<DG	0,002
PFOA 2014-2019	66	<DG	0,016	0,0036	0,001-0,002
PFHxS 2008-2013	9,3	<DG	<DG	<DG	0,0002
PFHxS 2014-2019	34	<DG	0,0013	<DG	0,002-0,001
PFOSA 2008-2013	0,71	<DG	<DG	<DG	0,001
PFOSA 2014-2019	8,6	<DG	<DG	<DG	0,001
PFDA 2008-2013	1,4	<DG	<DG	<DG	0,002
PFDA 2014-2019	6,6	<DG	<DG	<DG	0,002
PFUnDA 2008-2013	2,9	<DG	<DG	<DG	0,002
PFUnDA 2014-2019	0	-	-	-	0,001-0,02

Miljøkvalitetskrav, ferskvand: PFOS = $6,5 \times 10^{-4}$ µg/l, **Værdier med rød indikerer en overskridelse af kravværdien for PFOS.**

In NOVANA data set there is analyzed for five PFAS compounds, the most frequently found PFOS, PFOA and PFHxS, in the region's data it was PFOS, PFOA PFBA, PFHpA, PFBS. It is not possible to explain the difference from the surrounding. For PFOS it is with a finding rate of 75%, possible to calculate a median for the concentration of PFOS in the water flow on 0,0012 µg/l, which is above the general environmental requirement.

Table 11 shows in addition analyses of water from 10 Swedish lakes, where there are collected samples, for to cover the level of diffuse pollution with PFAS (Ahrens et al. 2016), i.e. lakes that are isolated and therefore presumably minimally affected by point sources, where the pollution level represents diffuse pollution.

Table 11. Overfladevand svenske søer n=10 prøver.

Enhed: µg/l	Fundhyppighed (%)	Min.	Max.	Median	Detektionsgrænse
PFOS ^{1,2,3}	20	0,0004	0,0004	-	0,00021
PFOA ^{1,2,3}	50	0,0005	0,0009	-	0,0004
PFNA ^{1,2,3}	90	0,0001	0,0009	-	0,00008
PFHxS ^{1,2,3}	30	0,0003	0,0003	-	0,00015
PFBS ^{2,3}	10	0,0003	0,0003	-	0,00022
PFOSA ^{2,3}	20	0,0001	0,0001	-	0,00011
6:2 FTS ^{2,3}	20	0,0087	0,0095	-	0,0018
PFBA ^{2,3}	0	-	-	-	0,0003
PFPeA (PFPA) ^{2,3}	0	-	-	-	0,00003
PFHxA ^{2,3}	60	0,0001	0,0005	-	0,00009
PFHpA ^{2,3}	80	0,0001	0,0005	-	0,00005
PFDA ^{2,3}	40	0,0003	0,0011	-	0,00019
PFPA ³	i.a.				
PFUnDA ³	30	0,0003	0,0005	-	0,00016
PFDoDA ³	20	0,0004	0,0006	-	0,00019
PFTTrDA ³	0	-	-	-	0,00005
PFPeS (PFPS) ³	i.a.				
PFHpS ³	i.a.				
PFNS ³	i.a.				
PFDS ³	0	-	-	-	0,00025
PFUnDS ³	i.a.				
PFDoDS ³	i.a.				
PFTTrDS ³	i.a.				

Miljøkvalitetskrav, ferskvand: PFOS = $6,5 \times 10^{-4}$ µg/l, Værdier med grøn indikerer en overskridelse af kravværdien for PFOS.

I de undersøgte svenske søer er PFNA og PFHpA de hyppigst fundne PFAS forbindelser med hhv. 90 og 80 %, men da der kun er prøvetaget ti søer, er antallet af fund relativt lavt, og konklusionerne vedrørende niveauet af PFAS i søerne vurderes at være usikre. Ikke desto mindre ses generelt fund af 11 ud af de 16 forbindelser der er analyseret for, dog i meget lave koncentrationer, som ofte er på niveau med detektionsgrænsen, men ikke overskrider kravværdien for PFOS.

8 Diskussion

8.1 Sammenligning af kvalitetskriterier, detektionsgrænser og middelværdier

En central udfordring i arbejdet med diffus forurening med PFAS forbindelser i miljøet udspringer af de meget lave koncentrationer, som disse forbindelser forventes at findes i. Som et eksempel præsenteres der i Tabel 12 en opsummering af koncentrationsniveauer, detektionsgrænser og kvalitetskriterier for PFOS.

Tabel 12. Opsummering af koncentrationsniveau, detektionsgrænser, fundprocenter kvalitetskriterier for PFOS. UD = Under detektionsgrænsen.

Stof	Median for koncentrationsniveau	Detektionsgrænse	Fundprocent %	Antal prøver	Kvalitetskriterier ^{1,2}	Enhed
Grundvand – dybe borer						
PFOS	UD	0,0003	5	96	$\sum 4$ PFAS = 0,002 $\sum 22$ PFAS = 0,1	µg/l
Grundvand – korte borer						
PFOS	UD	0,0003	18	182	$\sum 4$ PFAS = 0,002 $\sum 22$ PFAS = 0,1	µg/l
Jord – skovområder						
PFOS	-	0,02-0,05	77	31	$\sum 4$ PFAS = 10 $\sum 22$ PFAS = 400	µg/kg ts
Jord – byområder						
PFOS	-	0,05	100	32	$\sum 4$ PFAS = 10 $\sum 22$ PFAS = 400	µg/kg ts
Overfladevand – vandløb						
PFOS	-	0,0003- 0,001	33	27	PFOS = 0,00065	µg/l

1: MST (2021). Liste over kvalitetskriterier i relation til forurennet jord. Opdateret juli 2021.

2: MST (2017b). BEK nr. 1625 af 19/12/2017.

Værdier med grøn indikerer en overskridelse af 4 PFAS for enkeltstoffer og værdier med blå indikerer en overskridelse af $\sum 22$ PFAS for enkeltstoffer, værdier med rød indikerer en overskridelse af kravværdien for PFOS i overfladevand.

For grundvand (både de korte og de dybe borer) er der relativt mange prøver (182 og 96 hhv.) men lave fundprocenter (18 og 5 hhv.). Samtidig ses der en trend i data hvor der er højere fundprocenter med lavere koncentrationer ned til detektionsgrænsen (FIGUR 5), og medianen for koncentrationsniveauet formodentlig er under detektionsgrænsen for PFOS. Det betyder ikke at der ikke er diffus forurening med PFOS i grundvandet, men at det i de fleste tilfælde vil være under detektionsgrænsen. Samtidig findes PFOS hyppigere i det terrænnære grundvand end det dybe. Detektionsgrænsen for PFOS er 0,0003 µg/l og grænseværdien for $\sum 4$ PFAS er 0,002 µg/l så detektionsgrænsen er ca. en faktor 10 under kvalitetskriteriet.

For jordprøverne er der på trods af relativt høje fundprocenter (77 og 100 for hhv. skov og by) for få prøver (31 og 32 for hhv. skov og by) til at man kan estimere koncentrationsniveauet i

jorden. Detektionsgrænsen er under kvalitetskriteriet. Det er muligt, at der for jordprøverne lige som for grundvandsprøverne, er en tendens til højere fundprocenter med lavere koncentrationer ned til detektionsgrænsen.

I vandløbene er der også udtaget for få prøver (27) til at der kan udledes en medianværdi. Detektionsgrænsen for PFOS i datasættet varierer meget og den har i perioder været over kravværdien. Der ses på FIGUR 7 muligvis samme trend som i grundvandet hvor man har højere fundprocenter med lavere koncentrationer ned til detektionsgrænsen. Til sammenligning er der for NOVANA data fra årene 2014-2019, 324 prøver og med en fundprocent på 75, og her finder man en median for koncentrationen af PFOS i vandløbene på 0,0012 ug/l, hvilket er over det generelle miljøkrav.

Fordi værdierne for kvalitetskriterier, koncentrationen af diffus forurening og detektionsgrænser ofte er i samme størrelsesorden, kan det være vanskeligt at bestemme niveauet af diffus PFAS forurening. I relation til dette bemærkes, at jo nærmere man kommer detektionsgrænsen, des større bliver usikkerheden på analysen. Den generelle analyseusikkerhed er på hhv. 23 og 29 % for 22 PFAS forbindelser i jord og grundvand/overfladevand. Men i dette studie indgår data fra mange forskellige kilder og usikkerheden kan derfor være højere. Hertil skal tilføjes usikkerheder forbundet med selve prøvetagningen, hvor selv en minimal tilføjelse af PFAS forbindelser udefra (kontaminering) vil føre til potentielle overskridelser.

9 Konklusion

I grundvandet er der generelt meget lave fundhyppigheder. Det gælder både det dybe grundvand og det terrænnære. Der kan derfor ikke udledes en numerisk værdi for koncentrationsniveauet af PFAS forbindelser i hverken de dybe eller de korte borer, det kan bare konstateres at medianen for PFAS forbindelserne i begge datasæt formodentligt er under detektionsgrænsen.

I jorden i de 31 skovområder på tværs af Sverige ses der generelt høje fundhyppigheder med PFOS som den mest dominerende forbindelse, efterfulgt af PFBS, PFUnDA, PFTrDA, PFDA og PFHxS. Der er udtaget relativt få prøver og der kan derfor ikke beregnes en median for skovområderne. For jord i byområder ses ligeledes høje fundhyppigheder, men da det samlede antal af prøver er lavt (n=32), kan der ikke estimeres median værdier for dette datasæt.

Koncentrationerne for de forskellige PFAS forbindelser i data fra skovjorden (svensk) og byjorden (dansk og norsk) er på samme niveau og er fra ca. 0,02 til 2,9 µg/kg ts. I nærværende datasæt er der ikke en overskridelse af de danske kvalitetskriterier for jord.

I data fra regionernes undersøgelser af overfladevand (27 prøver) kan der ikke beregnes et koncentrationsniveau, på grund af for få prøver. Men det ses på FIGUR 9 at kravværdien for PFOS på 0,00065 µg/l i flere tilfælde, hvor der er fund, er overskredet. Det kan altså ikke udelukkes at diffus forurening med PFOS kan overskride kravværdien i nogen tilfælde. I NOVANA datasættet er medianen for data fra perioden 2008-2013 under detektionsgrænsen, men for datasættet fra 2014-2019 er medianen for PFOS 0,0012 µg/l, hvilket er over det generelle miljøkrav.

Det er forskelligt hvor mange forbindelser der er analyseret for i de respektive medier (grundvand, jord og overfladevand), og derfor er det vanskeligt at konkludere noget endegyldigt omkring sammensætningen af PFAS forbindelser. PFOS og PFOA er blandt de historisk set mest brugte PFAS, og det kan måske være årsagen til, at man finder dem i alle medier.

I grundvand og overfladevand i Danmark er der generelt fundet færre forbindelser (ca. 10) end i jorden, selv om der analyseres rimeligt bredt. I jorden konstateres der generelt flere forbindelser og her påvises også ofte langkædede forbindelser. Dette skyldes formodentligt at disse ikke udvaskes, men det er også interessant at de kan transporteres over lange afstande.

Det har på baggrund af nærværende litteraturgennemgang ikke været muligt at estimere et koncentrationsniveau for PFAS, i de undersøgte matricer. Årsagen er enten meget lave meget lave fundhyppigheder eller for få data punkter. Der er påvist en eller flere PFAS forbindelser i alle matricer.

10 Referencer

Ahrens, L., Hedlund, J., Dürig, W., Tröger, R., & Wiberg, K., 2016. Screening of PFASs in groundwater and surface water. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö.

Arbejdstilsynet, 2024. Registrering, vurdering og godkendelse af samt begrænsninger for kemikalier – REACH. Available at: [REACH — forordningen om registrering, vurdering og godkendelse af samt begrænsninger for kemikalier | Safety and health at work EU-OSHA \(europa.eu\)](#)

AVJ, 2000. Diffus jordforurening – fase 2 Statistisk bearbejdning af data, Teknik & Administration, Nr. 3 2000.

Boutrup, S., Kjær, C., Johansson, L.S., Larsen, M.M., Poulsen, M.B., Bossi, R., Christensen, M.R. & Frank-Gopolos, T, 2021. Miljøfarlige forurenende stoffer i vandmiljøet. NOVANA. Tilstand og udvikling 2008-2019. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 288 s. – Videnskabelig rapport nr. 466.

Danmarks Miljøportal, 2022. Udtræk af PFAS analysedata for overfladevandsundersøgelser i 2021 fra Miljødata.dk. Data tilgået d. 3. februar 2022. [Link til miljødata - https://miljoedata.miljoportal.dk/](https://miljoedata.miljoportal.dk/).

Danske Regioner, 2022a. Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS forbindelser. *Teknik Og Administration*, 2. <https://miljoegressourcer.dk/index.php>

[Danske Regioner, 2022b](#), PFAS i malingsindustrien, [Microsoft Word – Fakta-ark PFAS i malingsindustrien efter kommentarer.docx \(miljoegressourcer.dk\)](#)

DCE, 2017. Notat om "Udredning af metode til databehandling og datavurdering af miljøfarlige stoffer i vand, sediment og biota fra vandløb, søer og kystvande", Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

De Leeuw, G., Andreas, E. L., Anguelova, M. D., Fairall, C. W., Lewis, E. R., O'Dowd, C., Schulz, M., & Schwartz, S. E., 2011. Production flux of sea spray aerosol. *Reviews of Geophysics*, 49(2). <https://doi.org/10.1029/2010RG000349>

ECHA, 2017, Requirements for substances in articles, December 2017, [Global document template \(europa.eu\)](#).

ECHA; 2023a, ANNEX XV RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) Annex A, [d2f7fce1-b089-c4fd-1101-2601f53a07d1 \(europa.eu\)](#)

ECHA; 2023b, ANNEX XV RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) Annex B, [6f4a2076-7221-67a3-64f7-c67cc307f59c \(europa.eu\)](#).

EFSA, 2020. [PFAS in food: EFSA assesses risks and sets tolerable intake | European Food Safety Authority \(europa.eu\)](#).

Held, T., 2016. Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFC bei alllastverdächtigen Flächen und nach Löschmitteleinsätzen Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung un.Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz, (Projektstufe 1), pp.1–

85. Available at:

http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_4.14/index.jsp.

Heimstad, E. S., Moe, B., Nygård, T., Herzke, D., & Bohlin-Nizzetto, P., 2020. Environmental-pollutants in the terrestrial and urban environment - 2019. Norwegian Environment Agency, NILU report 20/2021.

[ITRC, 2022. PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances \(itrcweb.org\)](#)

ITRC (2023) [Establishing Soil Background – Soil Background and Risk Assessment \(itrcweb.org\)](#)

[Ghisi, R., Vamerli, T., Manzetti, S, 2019. Accumulation of perfluorinated alkyl substances \(PFAS\) in agricultural plants: A review, doi: 10.1016/j.envres.2018.10.023 Environ Res.](#)

GEUS, 2022. Udtræk af analyseresultater for 278 grundvandsboringer fra Jupiter. Data tilgængeligt d. 3. februar 2022. <https://data.geus.dk/JupiterWWW/index.jsp>.

Kikuchi, J., Wiberg, K., Stendahl, J., & Ahrens, L., 2018. Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in soil from Swedish background sites. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö.

Länsstyrelserna. (2022). *PFAS vid deponier Handläggarens stöd med fokus på PFAS i lakvatten*.

Li, R., Espi, I., Johansson, J. H., Salter, M. E., Navarro, J. C. A., Leck, C., Nilsson, E. D., & Cousins, I. T., 2019. *Global transport of perfluoroalkyl acids via sea spray aerosol*. 21, 595–772. <https://doi.org/10.1039/c8em00525g>

Mattias, S., Kikuchi, J., Wiberg, K., Ahrens, L., 2022. Spatial distribution and load of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden. *Chemosphere*. Vol. 295.

Miljøministeriet, 2022a. BEK nr 972 af 21/06/2022. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Available at: <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2022/972>

Miljøstyrelsen, 2002, Kortlægning af diffus jordforurening i byområder. Delrapport 1, Miljøprojekt Nr. 663 2002

Miljøstyrelsen, 2014. Screeningsundersøgelse af udvalgte PFAS forbindelser som jord- og grundvandsforurening i forbindelse med punktkilder. In *Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1600* (Issue 1600).

Miljøstyrelsen, 2016a. Kortlægning af brancher der anvender PFAS. In *Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1905* (Issue 1905).

Miljøstyrelsen, 2016b. Spredning og sammensætning i grundvand ved PFAS forureninger - Litteraturstudie. In *Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1892* (Issue 1892).

Miljøstyrelsen, 2017a. *Nye forureningsstoffer i perkolat fra lossepladser*. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2017/aug/perkolat-fra-lossepladser/>

Miljøstyrelsen, 2017b. Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. BEK nr 1625 af 19/12/2017.

Miljøstyrelsen, 2022a. Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord. [Brev \(mst.dk\)](#)

Miljøstyrelsen, 2022b. PFAS fundet i grundvandet. Tilgængeligt d. 2. februar 2022. [https://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2022/jan/PFAS stoffer-fundet-i-grundvandet/](https://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2022/jan/PFAS%20stoffer-fundet-i-grundvandet/).

Miljøstyrelsen, 2023a. Forekomst og udvaskning af PFAS i slagger fra affaldsforbrændingsanlæg, Miljøprojekt nr. 2229, Februar 2023.06.30

Miljøstyrelsen, 2023b. Derivation of cut-off values for PFAS in sewage sludge, [Derivation of cut-off values for PFAS in sewage sludge, Environmental Project no. 2232, \(mst.dk\)](#)

Miljøstyrelsen, 2024, Kortlægning og områdeklassificering, Se: [Kortlægning og områdeklassificering - Miljøstyrelsen \(mst.dk\)](#)

Nedenskov, J. og Dyreborg, S, 2023. PFAS fra affaldsforbrændingsanlæg – har vi styr på det? TEMADAG: PFAS - 6. MARTS 2023

OECD, 2021. Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances : Recommendations and Practical Guidance. OECD Series on Risk Management, (61), pp.1–45. Available at: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinatedchemicals/terminology-per-and-polyfluoroalkyl-substances.pdf>.

OECD, 2022, Fact Cards of Major Groups of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs). Series on Risk Management No. 68.

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), (8), p.121. Available at: <https://www.concawe.eu/publications/558/16/Environmental-fate-and-effects-of-poly-and-perfluoroalkyl-substances-PFAS-report-no-8-16>.

Region Hovedstaden, 2022. Undersøgelse af PFAS forbindelser i jord.

Strand, J., Bossi, R., Sortkjær, O., Landkilehus, F., & Larsen, M. M., 2007. PFAS og organotinforbindelser i punktkilder og det akvatiske miljø. In *NOVANA screeningsundersøgelse* (Issue 608).

Sundhedsstyrelsen (2023) Helbredseffekter af PFOA, PFNA, PFOS og PFHxS, [Helbredseffekter af PFOA, PFNA, PFOS og PFHxS \(sst.dk\)](#).

Tørslev, J. og Rasmussen, D., 2020, Kvantificering af tilførsel af miljøfarlige forurenende stoffer fra diffuse kilder til vandmiljøet [Rapport \(mst.dk\)](#)

USEPA, 2023. [CompTox Chemicals Dashboard \(epa.gov\)](#)

Yamada, T., Taylor, P. H., Buck, R. C., Kaiser, M. A., & Giraud, R. J., 2005. Thermal degradation of fluorotelomer treated articles and related materials. *Chemosphere*, 61(7), 974–984. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.025>

Diffus forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand

Forurening med PFAS i jord, grundvand og overfladevand findes ved flere brancher (Danske Regioner, 2022a). I forbindelse med undersøgelser af lokaliteter kan det være vanskeligt at vurdere, om en påvist forurening med PFAS skyldes diffus forurening eller er forårsaget af et spild, og dermed er at betragte som en punktkilde.

Formålet med dette projekt er at undersøge niveauet af diffus PFAS forurening i hhv. jord, grundvand og overfladevand vha. litteratursøgning. På den baggrund udledes der, hvis muligt niveauer for diffus PFAS forurening i forbindelse med forskellige arealanvendelser, f.eks. industriområder, bolig og natur



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk