



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Spredning og sammensætning i grundvand ved PFAS-forureninger Litteraturstudie

Miljøprojekt nr. 1892

November 2016

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jacqueline Anne Falkenberg, NIRAS

Anders G. Christensen, NIRAS

Marko Filipovic, NIRAS Sverige

ISBN: 978-87-93529-29-8

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. 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

Forord	4
Konklusion og sammenfatning	5
Summary and Conclusion	8
1. Indledning og baggrund	11
1.1 Formål og afgrænsning.....	12
1.2 Litteratursøgning	12
1.3 Nomenklatur og forkortelser	12
2. Hvad er PFAS	13
2.1 Hvad er PFAS	13
2.2 Syntesen og den historiske udvikling.....	16
2.3 Anvendelse i produkter.....	17
2.4 Regulering	19
3. Stofsammensætning i vand	21
3.1 Analytiske udfordringer.....	21
3.2 AFFF - Brandslukningsaktioner og brandslukningsøvelsespladser	22
3.3 Lossepladsperskolat og spildevand	25
3.4 Grundvand, vandløb og overfladevand	26
3.5 Precursorer og mulighed for transformation	27
4. Konklusion	30
5. Perspektivering	31
Referencer	32
Bilag 1: Oversigt over den anvendte litteratur	38
Bilag 2: Ordliste og forkortelser	55

Forord

Miljøstyrelsen har iværksat nærværende litteraturstudie med henblik på at skabe en oversigt over viden om spredning og stofsammensætning i grundvand af forurening med perfluoralkyl- og polyfluoralkylforbindelser (PFAS-forbindelser).

Litteraturstudiet tager primært udgangspunkt i internationale resultater over grundvandsforurening med PFAS-forbindelser, både ved forureningskilder og nedstrøms for disse.

Rapporten er udarbejdet under Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening i samarbejde med Preben Bruun, Miljøstyrelsen.

Konklusion og sammenfatning

PerFluorAlkylForbindelser og PolyFluorAlkylForbindelser (PFAS-forbindelser) er menneskeskabte kemiske stoffer. Deres unikke overfladeaktive egenskaber betyder, at de tilsættes diverse produkter med henblik på at forbedre produkttegenskaberne. De bliver ofte anvendt til imprægnering af tekstiler, tæpper og læder samt i almindelige husholdningsprodukter som bagepapir, madpapir og papemballage. Desuden anvendes de i industrielle produkter som brandslukningsskum (aqueous film forming foams – AFFF), ved galvanisering, i maling og diverse andre produkter, hvor der er behov for en forbedring af flydeevne og reduktion af overfladespænding.

PFAS-forbindelser, og især PFOS og PFOA, har været meget i fokus i nyhederne de sidste par år på grund af deres uønskede sundhedsmæssige og miljømæssige effekter samt det faktum, at de findes overalt i miljøet. PFOS og PFOA tilhører en klasse PFAS-forbindelser, som kaldes perfluoralkylsyrer (PFAA), og omfatter perfluorcarboxylsyrer (PFCA'er som f.eks. PFOA) og perfluorsulfonsyrer (PFSA'er som f.eks. PFOS). PFAA-forbindelser er persistente, dvs. ikke bionedbrydelige, og toksiske. De lang-kædede PFAA-forbindelser kan bioakkumulere i mennesker, dyr og vandlevende organismer. Endvidere er der i den internationale litteratur meget fokus på de såkaldte PFAA-precursorer. PFAA-precursorer er særlige klasser af PFAS-forbindelser, som kan transformeres (delvis nedbrydes) til persistente metabolitter, dvs. "dead-end" PFAA-forbindelser.

Som det fremgår af flere miljøundersøgelser og miljøprojekter, udgør PFAS også en trussel mod grundvand og drikkevand samt miljøet. Den største udfordring ved vurdering af litteratur om fund af PFAS-forbindelser i grundvandet er, at der traditionelt kun analyseres for et begrænset antal PFAS-forbindelser, og med fokus på PFOS og PFOA. Når der ses bort fra PFOS, som anvendes i mange produkter, indtil regulering og udfasning i løbet af 00'erne, kan det konstateres, at der ikke analyseres for de PFAS-forbindelser, som findes i produkterne, men derimod for de persistente metabolitter ("dead-end" PFAA-forbindelser), som omdannes ved transformation (delvis nedbrydning) af visse PFAS-forbindelser, især polyfluortelomere og perfluoralkylsulfonamider.

Grundvandet kan være forurenede med mange forskellige PFAS-forbindelser. Forskellige produkter kan have været anvendt gennem tiden, blandt andet er produkter med f.eks. PFOS og PFOA blevet udfaset, og de nyere produkter indeholder de kortkædede (C₄- C₆) fluortelomer-forbindelser, dvs. en tendens væk fra C₈-stoffer, som udgør størstedelen af PFAS-forbindelserne. PFAS-sammensætningen ("PFAS-fingerprint") i en grundvandsforurening kan evt. indikere noget om de anvendte produkter eller perioden for anvendelse. Ændringer i PFAS-sammensætningen i forhold til afstanden til en lokalitet kan skyldes forskelle i retardation, blanding af forureningsfaner fra forskellige kilder eller transformation af PFAA-precursorer i kildeområdet. Men hvis der kun analyseres for et begrænset antal PFAS-forbindelser, kan det være svært at drage klare konklusioner om forureningsforholdene.

En gennemgang af den internationale litteratur om fund af PFAS-forbindelser i grundvand har vist følgende:

- Der er sket en løbende udvikling i, hvilke PFAS-forbindelser, der produceres og anvendes i produkter.
- PFAS-holdige produkter indeholder typisk flere forskellige PFAS-grupper, og i de tidligere år blev der også dannet fluorerede urenheder under produktionen.
- De mange forskellige PFAS-grupper, som findes i produkter, er sjældent omfattet af de analytiske pakker, som anvendes ved analyse af miljøprøver.
- Der findes flere forskellige PFAS-forbindelser i grundvand og overfladevand end der traditionelt analyseres for. Der pågår en løbende udvikling i avancerede analyseteknikker. En række nye PFAS-forbindelser er identificeret i produkterne, og disse kan muligvis også forurene vandressourcerne. Blandt andet kan nævnes 8:2 FTS, 8:2FTOH, 6:2FTOH, 8:2 FTC, N-MeFOSAA, N-ETFOSAA, 5:3 FTCA og C2 - C3 PFAS-forbindelser.
- Som konsekvens heraf, forventes det, at der vil være flere andre PFAS-forbindelser i grundvand og overfladevand end omfattet af det danske grundvandvands- og drikkevandskriterium for sum af 12 PFAS-forbindelser.
- Såfremt der analyseres for et større antal PFAS-forbindelser i vandprøver, findes næsten altid følgende stoffer, som også indgår i DK-sum-kriteriet:
 - perfluoralkylcarboxylsyrer (PFCA'er) som PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA og PFOA
 - perfluoralkylsulfonsyrer (PFSA'er) som PFBS, PFHxS og PFOS
 - fluortelomere som 6:2 FTS
- PFAA-precursorer som polyfluoralkyl-forbindelser og perfluoralkylsulfonamider m.fl., kan transformeres (en delvis nedbrydning) til de såkaldte "dead-end" persistente perfluoralkylsyrer (PFAA-perfluoroalkyl acids). PFAA-forbindelser omfatter både perfluoralkylcarboxylsyrer (PFCA'er som f.eks. PFOA) og perfluoralkylsulfonsyrer (PFSA'er som f.eks. PFOS).
- Analyseteknikker som TOP (total oxiderbare precursorer) kan belyse, om vandprøven indeholder precursorer. Ved TOP udsættes vandprøven for en forbehandling, således at precursorer oxideres til en række PFAA-forbindelser, som kan måles ved standardanalyseteknikker. Den kemiske oxidation, som anvendes ved TOP- teknikken, medfører ikke nødvendigvis transformation til de samme PFAA-homologe, som opstår i naturen.
- Analyseteknikker, hvor der måles totalt organisk fluor i vandprøven, kan belyse, om der er mange ukendte PFAS-forbindelser, som ikke indgår i standard LC/MS/MS analysen.

Undersøgelserne af "PFAS-fingerprint" i produkter eller i perkolat fra lossepladser har belyst, at et bredt spektrum af mange af de identificerede stoffer ikke indgår i standard analysepakker.

I Danmark er kvalitetskriteriet for drikkevand og grundvand et administrativt sumkriterium for 12 specifikke per- og polyfluoralkyl-forbindelser (PFAS-forbindelser), som er almindeligt forekommende, såfremt der konstateres en PFAS-forurening i grundvandet. Da der kun findes tilstrækkelige data til en sundhedsmæssig vurdering af PFOS og PFOA, er sum-kriteriet for de 12 PFAS-forbindelser sat til det laveste kriterium for det mest skadelige af dem, dvs. PFOS.

Udover de 12 PFAS-forbindelser i sum-kriteriet kan en vandprøve have et ukendt PFAS-indhold, som kan udgøre en sundhedsmæssig risiko. Selvom disse ukendte stoffer identificeres, vil det ikke være muligt at kvantificere risikoen, da de toksikologiske data endnu ikke findes. Umiddelbart vurderes det, at det danske administrative kriterium betyder, at der vil kunne identificeres væsentlige grundvandsforureninger med PFAS-forbindelser, idet de ukendte PFAS-forbindelser ikke forventes at optræde alene, men sammen med nogle af de 12 PFAS-forbindelser i sum-kriteriet.

En vandprøve kan ligeledes have et indhold af PFAA-precursorer, som ikke er kvantificeret ved standardanalyser og som med tiden kan transformeres til de persistente "dead-end" metabolitter som PFOS og PFOA. Analyse for de 12 PFAS-forbindelser i det danske sum-kriterium kan muligvis underestimere det potentielle fremtidige indhold af PFOS, PFOA og andre PFAA-forbindelser. Det

danske administrative kvalitetskriterium er baseret på sum af 12 almindeligt forekommende PFAS-forbindelser. Kvalitetskriteriet er dog sat til det laveste kriterium for det mest skadelige af dem, dvs. PFOS. Da PFAA-precursorer ikke forventes at optræde alene, vil kriteriet for sum af 12 PFAS sandsynligvis indikere, om der foreligger en potentiel grundvandsrisiko.

Derimod er vurderingen af PFAS-sammensætning, precursorindhold og kvantificering af ukendte PFAS-forbindelser (evt. ved bestemmelse af total organofluor) væsentlig ved vurdering af kildestyrke og forureningsfane samt ved afværgetiltag og opstilling af succeskriterier for afværgeforanstaltninger.

Summary and Conclusion

PerFluoro Alkyl Substances and **Poly**Fluoro Alkyl Substances abbreviated (PFAS) are man-made chemicals. Their unique surface-active properties make them applicable in many products to improve the product properties. PFAS are frequently used as dirt and water repellent finishes for clothing, carpets and leather as well as in ordinary domestic products such as food packing, baking papers etc. They are also used in industrial applications such as firefighting foams (aqueous film forming foam -AFFF), galvanisation, paints and various other products in order to improve flow properties and reduce surface tension.

PFAS - and especially two specific substances, PFOS and PFOA - have been in public focus for a number of years due to their ubiquitous presence in the environment and undesirable health effects on human and wildlife. PFOS and PFOA belong to a class of PFAS termed perfluoroalkyl acids (PFAAs), which includes perfluorocarboxylic acids (PFCAs such as PFOA), and perfluorosulfonic acids (PFSAs such as PFOS). PFAAs are highly persistent in the environment, toxic and long chain PFAAs can bioaccumulate in man, animals and aquatic life. Furthermore, there is an increasing focus in the scientific literature on PFAA-precursors. PFAA precursors are particular classes of PFAS, which can be biotransformed to persistent “dead-end” metabolites.

However PFAS, as documented by many investigations and environmental reports, also threaten groundwater, surface water resources, drinking water and the environment in general. The greatest challenge when evaluating literature results concerning PFAS in the groundwater environment is that most studies report only a limited number of PFAS compounds, with emphasis on PFOS and PFOA. Discounting PFOS, which has been used in many products until regulated and phased out in the early 2000s, it is apparent that most analytical methods do not comprise a broad number of PFAS-subgroups, but a range of the “dead end” persistent PFAAs, which are formed by the partial degradation of PFAA-precursors such as fluorotelomers and polyfluoroalkyl substances.

Groundwater can be polluted by many different PFAS. Over the years, many different PFAS containing products have been used and the phasing out of PFOS and PFOA has encouraged the production of novel PFAS with a tendency towards shorter-chained PFAS (C₄-C₆ chemistry) and away from the C₈-chemistry. The source or timeframe for PFAS pollution might be indicated by the PFAS “fingerprint” of different PFAS homologues in the sample. Changes in composition downstream for a site can be due to retardation of the long chain PFAS, mixing of plumes from different source zones at the site or transformation of PFAA-precursors in the source area. However, it is difficult to draw conclusions about the source of the contamination, if only a limited number of PFAS are included in the analytical suite.

Review of the scientific literature concerning PFAS in groundwater has revealed the following aspects:

- There has been a continual development of novel PFAS compounds for application in products.
- Usually a number of different classes of PFAS compounds have been incorporated in products and the early production methods produced a range of fluorinated compounds with many fluorinated impurities.
- The wide range of different classes of PFAS compounds are seldom covered by the standard analytical suites used for environmental investigations.
- Detailed and extensive analysis has however determined the presence of many novel PFAS compounds in groundwater, surface water and waste water. The development of these more advanced analytical techniques is on-going. Some of the new PFAS compounds which are identified in products and therefore may pollute water resources are: 8:2 FTS, 8:2FTOH, 6:2FTOH, 8:2 FTC, N-MeFOSAA, N-ETFOSAA, 5:3 FTCA and C₂ - C₃ PFAS compounds. More than thousands of different PFAS compounds have been produced world-wide.
- The Danish quality sum criterion for 12 PFAS does not cover a broad spectrum of PFAS subgroups and therefore cannot be expected to determine the full extent of PFAS contaminants present in the water samples.
- However, the investigations which have examined a large range of PFAS in groundwater have usually demonstrated that many of the 12 PFAS in the Danish criterion are also always present in water samples. The most common pollutants are as follows:
 - Perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs) such as PFBA PFPeA, PFHxA, PFHpA and PFOA
 - Perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSAs) such as PFBS, PFHxS and PFOS
 - Fluorotelomers such as 6:2 FTS
- PFAA precursors such as polyfluoroalkyl substances and the perfluoroalkyl sulfonamides as well as other PFAS with substituent chains can biotransform to so-called “dead-end” persistent perfluoroalkylcarboxylic acids (PFCAs) and perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSAs).
- Analytical techniques such as TOP (total oxidisable precursors), whereby pre-treatment using conventional chemical oxidation is carried out before analysis, can indicate if the water sample contains PFAA-precursors to the persistent PFCAs and PFSAs. The presence of PFAA-precursors indicates a potential for the formation of PFCAs and PFSAs, but the chemical oxidation does not necessarily transform the PFAA-precursors into the same PFAA homologue patterns as would occur in nature (or natural waters).
- Analytical techniques which determine the total organic fluoride can illustrate the presence of unidentified PFAS substances, which are not included in the standard LC/MS/MS analysis.

Investigations of the PFAS “fingerprint” in products or in leachate from solid or liquid waste treatment plants has demonstrated that a broad spectrum of the identified PFAS are not included in the standard commercially available analytical suites.

In Denmark, the quality criterion for drinking water and groundwater is an administrative criterion for the sum of 12 specific per- and polyfluoroalkyl substances, all of which are commonly present in environmental samples contaminated by PFAS. Since only sufficient toxicological data was available for derivation of health-based criteria for two substances, PFOS and PFOA, the sum criterion for the 12 PFAS is set to the criterion for the most critical substance, PFOS.

The presence of other PFAS not determined by the analytical suite might pose a health risk, but even if these are identified, the risk cannot be evaluated since the toxicological data does not as yet exist. Essentially, the Danish administrative criterion will allow identification of a significant risk due to groundwater contamination with PFAS in that the 12 PFAS substances in the sum criterion are commonly present and will trigger the risk assessment.

Furthermore, an unidentified content of PFAA-precursors may be present in the groundwater and therefore present a potential pool of PFAS that can be transformed to the persistent dead-end

products such as PFOS and PFOA. The Danish administrative sum-criterion might underestimate the potential future content of PFOA, PFOS and other PFAAs. The Danish administrative sum criterion is however equivalent to the health based criterion for PFOS alone and since PFAA-precursors seldom occur alone, the presence of the 12 PFAS substances in the sum criterion will again trigger the risk assessment.

However, an assessment of precursors and quantification of unknown PFAS substances including estimation of total organic fluoride is essential for the assessment of source loads, pollution plumes, and remediation requirements as well as the derivation of success criteria for remediation activities.

1. Indledning og baggrund

PerFluorAlkylForbindelser og **PolyFluorAlkylForbindelser** (PFAS-forbindelser) er menneskeskabte kemiske stoffer. Deres unikke overfladeaktive egenskaber betyder, at de tilsættes diverse produkter med henblik på at forbedre produkttegenskaberne. De bliver ofte anvendt til imprægnering af tekstiler, tæpper og læder samt i almindelige husholdningsprodukter som bagepapir, madpapir og papemballage, (f.eks. mikrobølgepopcornposer og pizzabakker). Desuden anvendes de i industrielle produkter som brandslukningsskum (aqueous film forming foams – AFFF), ved galvanisering, i maling og diverse andre produkter hvor der er behov for en forbedring af flydeevne og reduktion af overfladespænding.

PFAS- forbindelser, og især PFOS og PFOA, har været meget i fokus i nyhederne de sidste par år på grund af deres uønskede sundhedsmæssige og miljømæssige effekter samt det faktum, at de findes overalt i miljøet. PFOS og PFOA tilhører en klasse PFAS-forbindelser, som kaldes perfluoralkylsyrer (PFAA- perfluoroalkyl acids), og omfatter perfluorcarboxylsyrer (PFCA'er som f.eks. PFOA) og perfluorsulfonsyrer (PFSA'er som f.eks. PFOS). PFAA-forbindelser er persistente, dvs. ikke bionedbrydelige og toksiske. De lange kædede PFAA-forbindelser kan bioakkumulere i mennesker, dyr og vandlevende organismer. Endvidere er der i den internationale litteratur meget fokus på de såkaldte PFAA-precursorer. PFAA-precursorer er PFAS-forbindelser, som kan transformeres (delvis nedbrydes) til persistente metabolitter, dvs. "dead-end" PFAA-forbindelser.

Flere PFAS-forbindelser er optaget på kandidatlisten under REACH som SVHC (Substances of Very High Concern). PFOS er defineret som en POP (Persistent Organic Pollutants) under Stockholm konventionen.

Som det fremgår af flere miljøprojekter, udgør PFAS også en trussel mod grundvand og drikkevand samt miljøet (Lassen et al. 2013), (Tsitonaki et al. 2014), (Enevoldsen & Juhler 2014) og (Strand et al. 2007).

Miljøstyrelsen har iværksat en række tiltag til kortlægning af problemet, herunder miljøprojekt nr. 1600 (Tsitonaki et al. 2014) og LOUS-review (Lassen et al. 2013). PFAS-forbindelser indgår i NOVANA screeningen (7 PFAS-forbindelser), som udføres af Naturstyrelsen. Der findes desuden flere andre danske rapporter om PFAS-forbindelser.

Desuden har Miljøstyrelsen fået udført en vurdering af sundhedsmæssige effekter, og der er fastsat et kvalitetskriterie for sum af 12 PFAS-forbindelser i drikkevand, grundvand og jord (Larsen & Giovalle 2015), og dette betyder, at det er almindeligt i Danmark kun at analysere for de disse 12 PFAS-forbindelser.

Mange lande i såvel Europa som i USA og Canada har stor fokus på disse forbindelser og deres spredning og forekomst i miljøet, herunder i grundvand og overfladevand. Dette har afstedkommet, at de analytiske værktøjer til kortlægning af disse stoffer løbende udvides, og at der medtages mange flere PFAS-forbindelser i analyseprogrammer i dag end tidligere.

1.1 Formål og afgrænsning

Miljøstyrelsen har iværksat nærværende litteraturstudie, som tager udgangspunkt i fund af PFAS-forbindelser i grundvand.

Formålet med litteraturstudiet er at indsamle og systematisere de internationale resultater over fund af PFAS-forbindelser i grundvand ved selve forureningskilderne og nedstrøms for disse.

Ved at skabe en bedre oversigt over den potentielle PFAS-stofsammensætning i grundvand, kan der tages stilling til, om vi ved kortlægning af forureningsfaner analyserer for de rigtige stoffer, og om det danske administrative kvalitetskriterium er fuldt dækkende, eller det bør justeres.

1.2 Litteratursøgning

Litteraturen er indsamlet ved gennemgang af artikler nævnt og citeret ved seminarer og konferencer. Ved gennemgang af den indsamlede litteratur blev yderligere referencer fundet som krydsreferencer og fremskaffet. Herudover er der foretaget søgninger i en række søgemaskiner, suppleret med Google, med søgeord som "PFOS", Perfluoroalkanes, PFAS og PFC kombineret med følgende søgeord: "groundwater", "composition", "transformation", "degradation" og "profile".

Referencerne omhandlende toksicitet, spredning i atmosfæren eller afværgeteknologier blev ikke vurderet som relevante for denne rapport og er derfor ikke medtaget. Den anvendte litteratur er opsummeret og opdelt i emner i bilag 1.

1.3 Nomenklatur og forkortelser

Da PFAS-forbindelser omfatter en meget stor gruppe af **P**er**F**luor**A**lky**L**Forbindelser og **P**oly**F**luor-**A**lky**L**Forbindelser, er der anvendt mange forkortelser til opdelinger i stofgrupper og ved henvisning til specifikke stoffer (Buck et al. 2011).

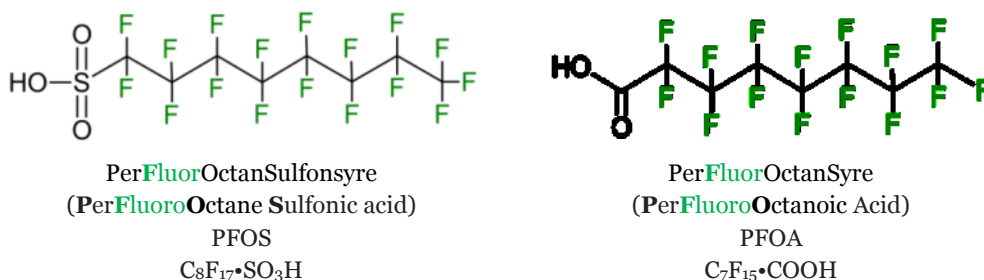
I bilag 2 er der lavet en oversigt over de anvendte forkortelser.

2. Hvad er PFAS

2.1 Hvad er PFAS

PFAS er som nævnt en forkortelse for **Per**Fluor**Alkyl**Forbindelser og **Poly**Fluor**Alkyl**Forbindelser (substances), dvs. organiske forbindelser med kulstofkæder, hvor brintatomer på kulstofkæden erstattes af fluor.

De mest kendte PFAS-forbindelser er PFOS (Perfluoroctansulfonsyre) og PFOA (Perfluoroctansyre), som har kulstofkæder med henholdsvis 8 og 7 fuldt fluorerede kulstofatomer (C8 og C7-forbindelser), jf. Figur 2-1. Afhængig af den anvendte produktionssyntese, kan der være dannet både lineære og forgrenede PFAS-isomere, også af PFOS og PFOA.



FIGUR 2-1 STRUKTUR FOR PFOS OG PFOA

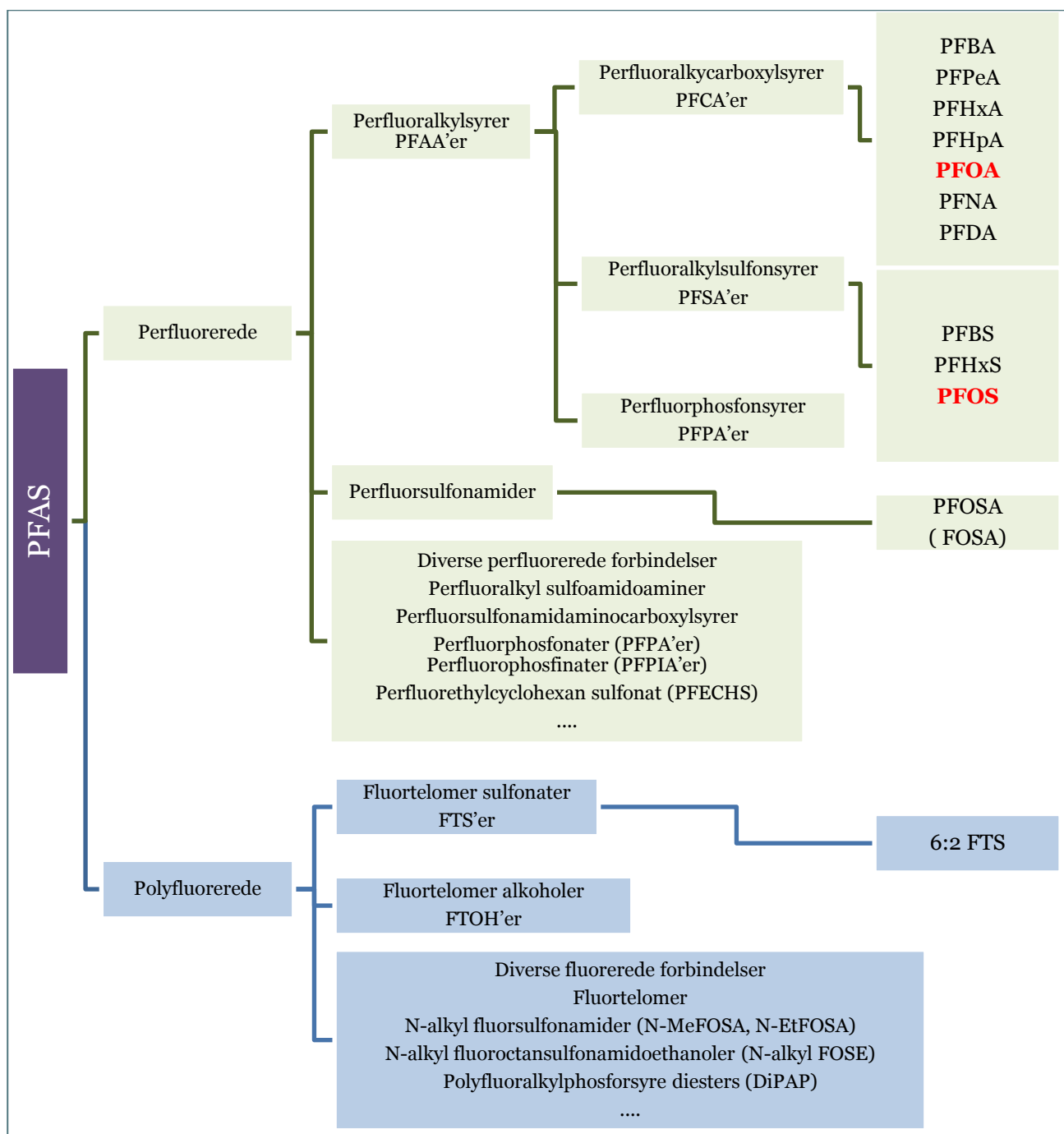
Der findes flere tusinde forskellige PFAS forbindelser med kulstofkæder fra 4 til over 16 kulstofatomer og med forskellige funktionelle grupper som sulfonsyrer, carboxylsyrer, alkoholer, phosphater og sulfonamider, m.fl. (Lassen et al. 2013) og (Kemikalieinspektionen 2015).

PFOS og PFOA tilhører en klasse PFAS-forbindelser, som kaldes perfluoralkylsyrer (PFAA-perfluoroalkyl acids) og omfatter blandt andet perfluorcarboxylsyrer (PFCA'er som f.eks. PFOA), og perfluorsulfonsyrer (PFSA'er som f.eks. PFOS). PFAA-forbindelser er persistente, dvs. ikke bionedbrydelige, toksiske og de langkædede PFAA-forbindelser kan bioakkumulere i mennesker, dyr og vandlevende organismer.

Øvrige PFAS-forbindelser kan opdeles i flere andre klasser/grupper afhængig af strukturer og egenskaber, blandt andet fluortelomersulfonater (FTS), fluortelomeralkoholer (FTOH) og perfluorsulfonamider (PFOSAs), jf. Figur 2-2.

Inden for hver gruppe findes en serie af homologe forbindelser med stigende længder af kulstofkæden, f.eks. 4:2 FTOH, 6:2 FTOH, 8:2 FTOH og 10:2FTOH.

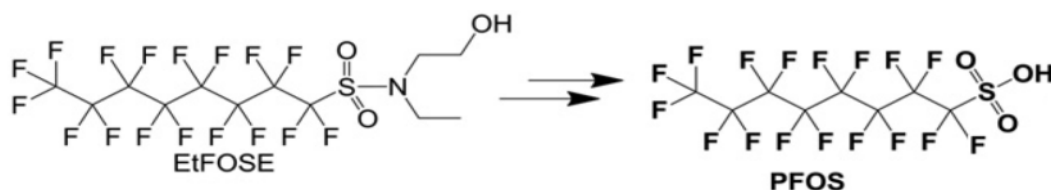
De 12 PFAS-forbindelser som indgår i det danske kvalitetskriterium består af 10 perfluoralkylsyrer (PFAA'er), én perfluorsulfonamid (PFOSA også kaldt FOSA) og én FTS (6:2 FTS). Disse er vist til højre på Figur 2-2.



FIGUR 2-2 OVERSIGT OVER OPDELING AF PFAS-FORBINDELSER. DE 12 PFAS-FORBINDELSER SOM INDGÅR I DET DANSKE KVALITETSKRITERIUM ER VIST TIL HØJRE

Såfremt alle brintatomer på kulstofkæden erstattes af fluor, er der tale om **“perfluor”** forbindelser. Det kræver et højt oxidationspotentiale at bryde den stærke kul-fluor binding (C-F) i fluorkulstofkæden, som er kernen i perfluorforbindelser. For reduktiv defluorinerings kræves et meget lavt potentiale, hvorved der sker en trinvis fjernelse af fluoratomer, som erstattes af brint. Dette betyder, at der hverken under anaerobe eller aerobe forhold sker nedbrydning af perfluoralkylkæder i jord og grundvand.

Såfremt perfluoralkylforbindelser er substitueret med mættede eller umættede funktionelle grupper kan disse grupper fraspaltes. F.eks. kan sulfonamid-grupper transformeres biotisk til sulfonsyrer, som illustreres af nedbrydningsvejen for N-ethylperfluorooctansulfonamido ethanol (EtFOSE) til PFOS, jf. Figur 2-3.

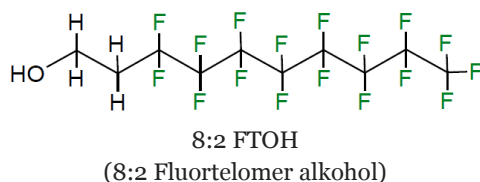


FIGUR 2-3 NEDBRYDNINGSVJEJEN FOR ETFOSE TIL PFOS. FRA (LIU & MEJIA AVENDAÑO 2013)

Herudover findes en lang række **polyfluor**alkylforbindelser, hvor kulstofkæden kun delvis er mættet med fluor, hvorved den ikke-fluorerede del af kulstofkæden kan brydes biotisk eller abiotisk (kemisk).

I den internationale litteratur meget fokus på de såkaldte PFAA-precursorer. PFAA-precursorer er PFAS-forbindelser, som kan transformeres (delvis nedbrydes) til persistente metabolitter, dvs. de "dead-end" PFAA-forbindelser.

Polyfluoralkylforbindelser og visse substituerede perfluoralkylforbindelser kan derfor være forstadier ("precursors") til perfluorforbindelser som f.eks. PFOS og PFOA (Lassen et al. 2013). Et eksempel er 8:2 FTOH, (8:2 fluortelomer alkohol – en C10-forbindelse), jf. Figur 2-4, som kan transformeres til PFOA (en C8-forbindelse) og PFNA (Perfluornonansyre – en C9-forbindelse) (Lassen et al. 2013).



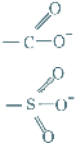

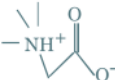
FIGUR 2-4 STRUKTUR FOR EN POLYFLUORALKYLFORBINDELSE, 8:2 FTOH, EN "PRECURSOR" TIL PFOA OG PFNA

Typisk defineres perfluoralkylcarboxylsyrer med 7 eller flere fluorkulstof-enheder på kæden (dvs. alkylkæder på 8 eller flere kulstofatomer) eller perfluoralkylsulfonsyrer med 6 eller flere fluorkulstof-enheder på kæden som PFAS-forbindelser med lange kæder. PFAS med lange kæder antages at have en større tendens til at bioakkumulere i dyreliv (Lassen et al. 2013), (Buck et al. 2011).

I bilag 2 er der angivet en oversigt over forkortelser for PFAS-forbindelser, og i Figur 2-2 ses en overordnet opdeling i stofgrupper. I Figur 2-2 angives desuden de 12 PFAS-forbindelser, som indgår i de danske kvalitetskriterier for drikkevand, grundvand og jord.

En udmærket oversigt over PFAS-forbindelsers nomenklatur og gruppeopdeling, såvel som anvendelsesområder, er givet i (Buck et al. 2011).

PFAS-forbindelser kan opdeles i anioniske, kationiske eller zwitterioniske (amfotære) tensider, idet de er overfladeaktive stoffer (Backe et al. 2013), jf. Tabel 2-1.

Tensider	Ladning		Eksempler
Anioniske	Negativ ladning		Perfluoralkylsyre (PFAA) Perfluor- og fluortelomer forbindelser med carboxylsyre, sulfonsyre grupper, m.fl. PFOS, PFOA, PFHpS, PFHpA, 6:2 FtS, 8:2 FtS
Kationiske	Positiv ladning		Perfluor- og fluortelomer sulfonamido aminer PFOSA 6:2 FtSaAm 8:2 FtSaAm
Zwitterionisk	Negativ og positiv ladning		Perfluor- og fluortelomer sulfonamido betaines 6:2 FtSaB 8:2 FtSaB

TABEL 2-1 EKSEMPLER PÅ OPDELING AF FORSKELLIGE PFAS-FORBINDELSER I TENSIDER TYPER FRA (BACKE ET AL. 2013)

Med undtagelse af PFOSA medtages kun de anioniske PFAA-tensider i det danske kvalitetskriterium for 12 PFAS-forbindelser (Miljøstyrelsen 2015a), se også Figur 2-2.

Flere af disse anioniske perfluoralkylsyre (PFAA) vil være dissocieret og findes som anioner i miljøet. I litteraturen omtales disse også som carboxylater eller sulfonater, men i denne rapport skelnes ikke ved navngivning om PFAS-forbindelser er dissocieret eller ej.

2.2 Syntesen og den historiske udvikling

Som nævnt i afsnit 2.1 udgør PFAS-forbindelser en meget stor familie af stoffer.

Indtil 2002 blev PFAS-forbindelser hovedsagelig produceret ved elektrokemisk fluorering (ECF), hvorved der dannes en blanding af homologe forbindelser med både lige og ulige antal kulstofatomer i kulstofkæden og både lineære og forgrenede isomere (Kato et al. 2011), (Moody & Field 2000), (Seow 2013), (Løland 2014), (Cortina 2009) og (Filipovic 2015). Elektrokemisk fluorering (ECF) blev anvendt til produktion af mange af de tidligere PFOS- og PFOA-holdige produkter.

PFAS-forbindelser kan desuden produceres ved "telomerization", hvor kulstofkæden opbygges trinvis af mindre byggesten af 2 kulstofatomer, således at der dannes PFAS-forbindelser med et lige antal kulstofatomer i en lineær kulstofkæde. Desuden er "telomerization"-processen anvendt ved produktion af fluortelomere, dvs. polyfluoralkylforbindelser, hvor kulstofkæden kun delvis er mættet med fluor (Filipovic 2015).

ECF og telomerization har været anvendt af forskellige producenter, således producerede firmaet 3M perfluorforbindelser ved ECF, men andre firmaer har anvendt telomerization (Filipovic 2015). Dette betyder, at PFAS "fingerprint" i brandslukningsskum (AFFF) er afhængig af producenten (Place & Field 2012).

2.3 Anvendelse i produkter

Årsagen til, at PFAS-forbindelser findes i så mange produkter, er deres særlige overfladeaktive egenskaber, idet de afviser både vand og fedt og er smudsafvisende. De funktionelle grupper for enden af kulstofkæden betyder, at stofferne er vandopløselige. Fluorkulstofkæden er dog både hydro- og lipofobe (skyr vand og fedt, dvs. snavs) og dette betyder, at stofferne samles ved grænseflader, f.eks. mellem vand og fedt (Lassen et al. 2013), (Tsitonaki et al. 2014), (Jensen et al. 2008) og (Jensen et al. 2008).

Disse særlige overfladeaktive og smudsafvisende egenskaber betyder at PFAS-forbindelser er blevet anvendt til imprægnering af tekstiler, tæpper og læder samt pap og papir (Lassen et al. 2013), (Tsitonaki et al. 2014), (Vestergren et al. 2015), (Holmquist et al. 2016) og (Strand et al. 2007). Anvendelse i andre produkter som maling, voks og fotografiske produkter skyldes, at de kan reducere viskositet og reducere overfladespænding samt statisk elektricitet (Tsitonaki et al. 2014), (Kissa 2001). Herudover har de været anvendt i hydraulikolie, som anvendes i bremsesystemer til fly og i de typer brandslukningsskum, som anvendes til oliebrande (jetfuel, benzin, dieselolie) (Tsitonaki et al. 2014).

PFAS-forbindelser har også været anvendt i en type brandslukningsskum som betegnes AFFF-skum (Aqueous Film-Forming Foams) (Backe et al. 2013), idet de medvirker til dannelse af et lav-densitet skum, som danner en hinde over brandbare væsker (olie).

Desuden nævnes i (Tsitonaki et al. 2014), at den brede anvendelse af PFAS-holdige produkter i perioden fra 1970 til 1990 kan medføre en risiko for udvaskning af PFAS-forbindelser fra fyldpladser for byggeaffald og ældre lossepladser for dagrenovation. Herudover kan PFAS-forbindelser findes i spildevand og spildevandsslam, som evt. udbringes på landbrugsjord og som herefter spreder sig til jord, grundvand og overfladevand (Strand et al. 2007).

De væsentligste kilder til PFAS-forbindelser i dansk grundvand er identificeret i Miljøstyrelsens rapporter (Tsitonaki et al. 2014), (Lassen et al. 2013) og (Poulsen et al. 2005). I Tabel 2-2 skelnes mellem kilder, hvorfra der sker direkte spild af PFAS-holdige væsker til jordmiljøet, og indirekte kilder, som skyldes udvaskning fra affaldsprodukter forurenet med PFAS-forbindelser.

Produkter	Spild til jordmiljø	Anvendelse	Bemærkning om PFAS-forbindelser
Brandslukningsskum (Op til 13.000 l/år anvendes udendørs over større arealer)	Direkte	AFFF (Aqueous Film-Forming Foams) Lav-densitet skum Danner en hinde over brandbare væske (olie)	Sammensætninger afhængig af producent, se Tabel 3-1 og Tabel 3-2. PFOS forbudt siden 2006 og ingen anvendelse efter 2011 (EU DIREKTIV 2006/122/EF). PFOS erstattet af kortkædede fluortelomere.
Hydraulikolie til fly	Direkte	Forhindrer antænding af olien Forhindrer rustdannelse	PFOS 0,05-0,1% i olien
Galvanisering (hard chromium)	Direkte	Reducerer overfladespænding	PFOSA → PFOS -10% opløsning (genanvendes indtil bortskaffelse)
Spildevand og slam på landbrugsarealer	Direkte	Ved udbringning af slam eller udledning af spildevand	Forskellige affaldstyper
Lossepladsperkolat	Direkte	Udvaskning fra PFAS-holdige affald	Forskellige affaldstyper
Tæpper Tekstil / Læder	Via affald	Imprægnering og smudsafvisning	Efter tørring 1% af luvvægten. PFOS ikke anvendt siden forbud.
Maling	Via affald	Forbedrer flydeevne	PFOS? Tidligere 0,01 – 0,3%, men i dag ikke registreret hvis <0,005%
Papir og pap	Via affald	Imprægnering og fedtafvisende	PFOS ikke anvendt siden forbud. Andre PFAS-forbindelser anvendt herefter, bla. DiPAP.
Voks og polish	Via affald	Reducerer overfladespænding	
Fotografisk produkter	Via affald	Reducerer statisk el. friktion og støv	PFOS-salte og polymer tilladt i EU. Op til 0,8 µg/cm ² .

TABEL 2-2 **OVERSIGT OVER KILDER TIL PFAS-FORBINDELSER I GRUNDVAND** (TSITONAKI ET AL. 2014)
OG (LASSEN ET AL. 2013)

Produkter med samme anvendelse indeholdt ikke nødvendigvis de samme PFAS-forbindelser, og PFOS og PFOA er langsomt udfaset siden 00'erne.

2.4 Regulering

PFAS-forbindelser er menneskeskabte stoffer, som er produceret siden 1949. De sundheds- og miljømæssige problemer ved disse stoffer, især PFOS, har dog været kendt i mange år og var årsagen til, at PFOS blev udfaset i mange produkter i begyndelsen af 00'erne. Efterfølgende er regulering af brugen optrappet på både internationalt og nationalt niveau:

- 2006 EU regulering (2006/122/EF) (PFOS m.fl. er udfaset i bl.a. brandslukningsskum).
- 2009 PFOS defineres som POP (Persistente Organiske miljøgifte) under Stockholm Konventionen og ved EU POP-forordningen (EU nr. 850/2004 med ændringer i EU nr. 757/2010).
- 2011 Anvendelse af restlagre af PFOS-holdigt brandslukningsskum forbydes efter 27. juni 2011.
- 2011 Dansk bekendtgørelse om kvalitetskrav til miljømålinger, nr. 231, af 05-03-2014, og den tidligere version, nr. 900, af 17-08-2011, stiller kvalitetskrav om analyse af 7 PFAS-forbindelser ved kontrol/overvågning af "anden biota", men PFAS-forbindelser i grundvand og drikkevand ikke nævnes.
- 2012 PFOS, PFOA og andre PFAS-forbindelser indgår i Miljøstyrelsens Liste Over Uønskede Stoffer (LOUS), pulje 1, hvor der er foretaget kortlægning og udarbejdet strategier for produkter / (Miljøstyrelsen 2016)/.
- 2012-13 PFOA og 4 andre perfluorcarboxylsyrer (C11, C12, C13 og C14) kommer på EU's kandidatliste som SVHC (Substances of Very High Concern).
- 2013-15 EU miljøkvalitetskrav for overfladevand som et årligt gennemsnit på hhv. 0,65 og 0,13 ng/l samt som korttids-maksimalt tilladelige værdier på 36.000 og 7.200 ng/l for PFOS og dens derivater i ferskvand og saltvand, (2013/39/EU). Disse krav til overfladevand implementeres og tages i anvendelse fra december 2018 ved den danske bekendtgørelse nr. 1070 af 09.09.2015.
- 2015 Miljøstyrelsen har fået udført en vurdering af sundhedsmæssige effekter af PFAS-forbindelser, og der er fastsat et kvalitetskriterie for sum af 12 PFAS-forbindelser i drikkevand (100 ng/l) og jord (0,4 mg/kg TS) (Larsen & Giovalle 2015), (Miljøstyrelsen 2015a). Da datagrundlaget kun tillader fastsættelse af sundhedsbaserede kvalitetskriterier for 3 PFAS-forbindelser (100 ng/l for PFOS, 100 ng/l for PFOA som transformeres til PFOS og 300 ng/l for PFOA) og der typisk optræder flere PFAS-forbindelser i en forurening, er der fastsat et administrativt sumkriterium for 12 PFAS-forbindelser, svarende til kriteriet for PFOS (Miljøstyrelsen 2015b).

Årsagen til de overnævnte reguleringer er, at der i slutningen af 90'erne blev fundet PFOS i blodplasma hos mennesker. De fleste toksikologiske vurderinger er baseret på data for PFOS og PFOA, der er kræftfremkaldende, reproduktionstoksiske og akut giftige samt mistænkte for at være hormonforstyrrende. Desuden sker der bioakkumulering i mennesker og dyr. Imidlertid er der kun begrænsede sundhedsmæssige og miljømæssige data på andre PFAS-forbindelser, og forbud mod PFOS og PFOA har ført til anvendelse af andre PFAS-forbindelser i produkter, dog ofte de kortkædede PFAS-forbindelser (C₄ og C₆-forbindelser). Det vil sige en tendens væk fra C₈-forbindelser. Overvågning af PFAS-forbindelser i blodserum hos mennesker har indikeret et faldende indhold af PFOS (Kato et al. 2011), se også Bilag 1-6.

PFAS-forbindelser indgår i en NOVANA screening fra 2012-2015 (7 PFAS-forbindelser i spildevand fra rensningsanlæg og PFOS i skrubber og ålekvabber), udført af Naturstyrelsen (Naturstyrelsen 2011).

Naturstyrelsen har i 2014 indskærpet over for kommunerne, at den regelmæssige kontrol af forsyningerne også skal omfatte PFAS-forbindelser, såfremt der inden for en vandforsynings indvindingsopland eksisterer, eller tidligere har eksisteret, en eller flere af brancher, som kan have

anvendt PFAS-forbindelser (Naturstyrelsen 2014b), (Naturstyrelsen 2015a), f.eks. de følgende brancher:

- Brandøvelsespladser for træning i slukning af oliebrande eller lignende
- Forkromningsindustri
- Tæppeindustri
- Malingsindustri
- Fyldpladser for byggeaffald og ældre lossepladser for dagrenovation. Særligt maling anvendt i byggeindustrien før 2002 kan have indeholdt PFAS-forbindelser.

Desuden har Naturstyrelsen i efteråret 2014 udført en screening for 11 PFAS-forbindelser i grundvandsovervågningsboringer (45 boringsindtag) (Naturstyrelsen 2015b). Undersøgelsen er udført før kvalitetskriteriet for PFAS-forbindelser blev fastsat af Miljøstyrelsen, og kun 9 af de 12 PFAS-forbindelser, som indgår i kriteriet, er medtaget i analyserne. Der er fundet PFAS-forbindelser i 6 ud af de 45 boringsindtag, men kun én havde et indhold over kvalitetskriteriet på 100 ng/l for sum af 9 PFAS-forbindelser (Naturstyrelsen 2015b).

Naturstyrelsen har ligeledes implementeret kvalitetskrav til de 12 PFAS-forbindelser i Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg (Naturstyrelsen 2014a) samt Vejledning om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg (Naturstyrelsen 2016). Ændringerne omfatter blandt andet den ovennævnte indskærpelse om PFAS-forbindelser ved kontrol af vandforsyninger (Naturstyrelsen 2014b).

På baggrund af det danske kvalitetskriterium er det i dag almindeligt i Danmark at analysere for de 12 PFAS-forbindelser, som er omfattet af det fastsatte kriterium (Larsen & Giovalle 2015), jf. Figur 2-2.

3. Stofsammensætning i vand

3.1 Analytiske udfordringer

Den største udfordring ved vurdering af litteratur om fund af PFAS-forbindelser i grundvandet er, at der traditionelt kun analyseres for et begrænset antal PFAS-forbindelser, og med fokus på PFOS og PFOA. Når der ses bort fra PFOS, som anvendtes i mange produkter, indtil regulering og udfasning i løbet af 00'erne kan det konstateres, at der ikke analyseres for de PFAS-forbindelser, som findes i produkterne, men derimod for persistente "dead-end" metabolitter, som omdannes ved transformation (delvis nedbrydning) af visse PFAS-forbindelser, især fluortelomere og perfluoralkylsulfonamider.

Grundvandsforurening med PFAS-forbindelser kan bestå af mange forskellige PFAS-forbindelser. Forskellige produkter kan have været anvendt gennem tiden, blandt andet er produkter med f.eks. PFOS og PFOA blevet udfaset, og de nyere produkter indeholder de kortkædede fluortelomer forbindelser, dvs. en tendens væk fra C-8 stoffer.

PFAS-sammensætningen i en grundvandsforurening kan evt. indikere noget om de anvendte produkter eller perioden for anvendelse. Ændringer i PFAS-sammensætningen i forhold til afstanden til kilden kan også indikere, om der foregår omsætning. Men hvis der kun analyseres for et begrænset antal PFAS-forbindelser, kan det være svært at drage klare konklusioner om de anvendte produkter eller potentiale for omsætning.

Usikkerheden om hvilke PFAS-forbindelser, der kan forventes i grundvandet og miljøet, har ført til en række analytiske tiltag:

- Identifikation af ukendte PFAS-forbindelser ved sofistikerede LC-MS/MS teknikker (Place & Field 2012), (D'Agostino & Mabury 2014).
- Identifikation af ukendte PFAS-forbindelser ved "Time of flight" LC-TOF-MS teknikker (Rotander et al. 2015), (Strynar et al. 2015).
- Bestemmelse af totalorganofluorforbindelser ved "Particle Induced Gamma Emission" (PIGE) Spektroskopi. (Lang et al. 2016), (Hashiguchi et al. 2013).
- Bestemmelse af adsorberbare organofluor forbindelser (AOF) ved "combustion" chromatografi TOF-CIC (D'Agostino & Mabury 2014).
- Bestemmelse af total oxiderbare precursorer (TOP), hvorved precursorer oxideres til PFAA (PFCA og PFSA), som analyseres ved standard LC-MS/LMS teknikker (Houtz & Sedlak 2012).

Disse analytiske tiltag har tydeliggjort, at der forekommer stor variation i antallet og arten af PFAS-forbindelser i PFAS-holdige produkter, samt at der ud over de forventelige hovedstoffer ofte findes flere andre PFAS-forbindelser i lavere koncentrationer, dannet som urenheder under produktionen. Den potentielle belastning i miljøet, herunder mulighed for omdannelse af precursorer til mere persistente PFAS-forbindelser, kan dermed ikke belyses ved analytiske standard teknikker.

Adskillelse af kilder, vurdering af PFAS-belastning og flux samt spredning i grundvandet kan ikke vurderes ved sammenligning af PFAS-forbindelser "fingerprints" ud fra en analyse standardpakke, men kræver flere analytiske tiltag.

3.2 AFFF - Brandslukningsaktioner og brandslukningsøvelsespladser

Der findes mange artikler om PFAS-forbindelser og brandslukningsskum (AFFF - Aqueous Film Forming Foams), jf. Bilag 1-2. Identifikation af PFAS-forbindelser og den historiske udvikling i produkter anvendt på en amerikansk militærflughavn fra 1976 – 2013 er blevet undersøgt (Place & Field 2012). En stor del af AFFF til militær anvendelse i USA var produceret af 3M eller Ansul. 3M-produkter var typisk PFOS-holdige blandinger produceret ved ECF, jf. afsnit 2.2 og Tabel 3-1. Ansul-produkter var typisk fluortelomer-holdige blandinger produceret ved telomerization, jf. afsnit 2.2. I (Harding-Marjanovic et al. 2015) angives følgende sammensætning i en Ansul-blanding, jf. Tabel 3-2.

3M - FC-203CF light water Aqueous film forming Foam Concentrate	Indhold
Diethylene glycol butyl ether (butyl carbitol)	20%
Amphoteric fluoroalkylamine derivative	1-5%
Alkyl sulfate salts	1-5%
Perfluoroalkyl sulfonate salts	0,5-1,5%
Triethanolamine	0,5-1,5%
Tolyltriazole (corrosion inhibitor)	0,5-1,5%
Vand	69-71%

TABEL 3-1 PFAS-SAMMENSÆTNING I EN 3M AFFF-BRANDSLUKNINGSSKUM
FRA (MOODY & FIELD 2000)

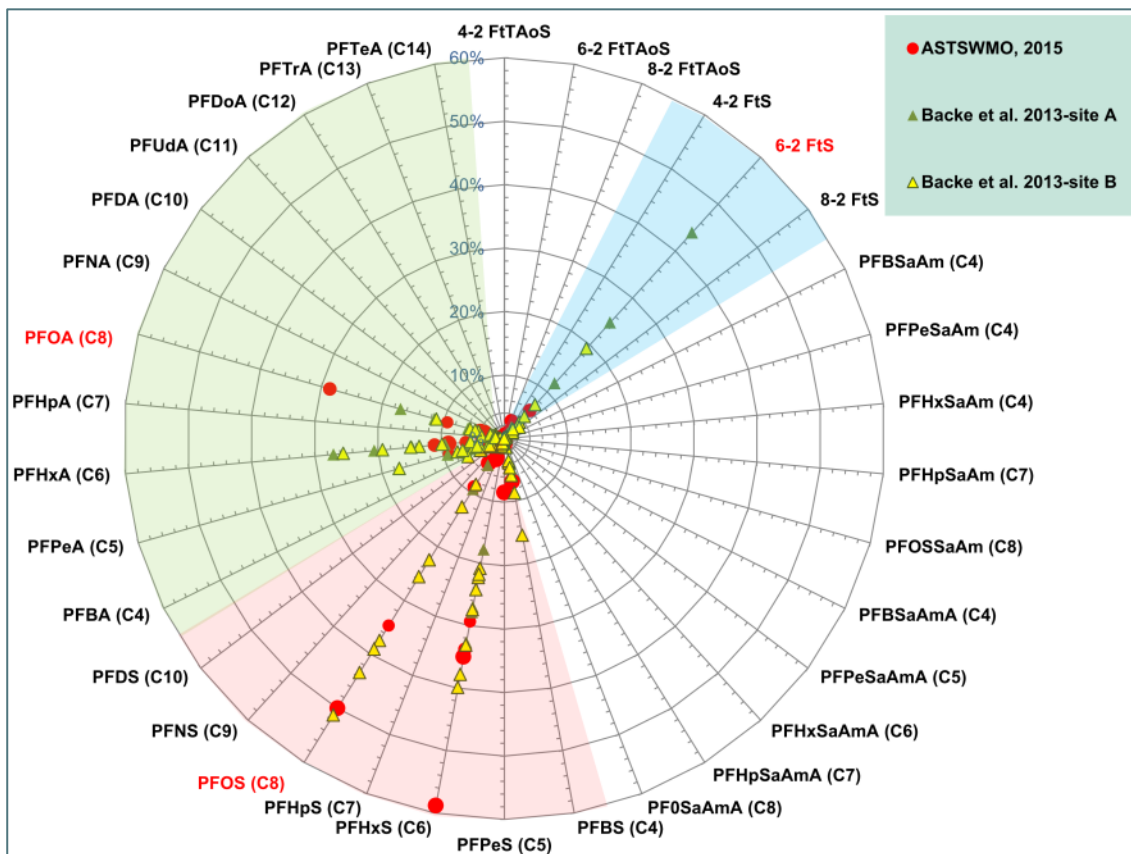
Ansul AFFF - MSDS	Indhold	Ved analyse	Resultater
Diethylen glycol monobutyl ether	17%	Diethylen glycol monobutyl ether	220 g/l
Blanding af kulbrinte- og fluortensider samt uorganiske salte	5-10%	4:2 FtAoS 6:2 FtAoS 8:2 FtAoS 6:2 FtSOAoS	0,0024 g/l 15,2 g/l 0,038 g/l ikke kvantificeret
1-propanol	0,4%	ikke analyseret	
Hexylene glycol	0,5%	ikke analyseret	
Vand	75-80%	ikke analyseret	

TABEL 3-2 PFAS-SAMMENSÆTNING I EN ANSUL AFFF-BRANDSLUKNINGSSKUM.
FRA (HARDING-MARJANOVIC ET AL. 2015)

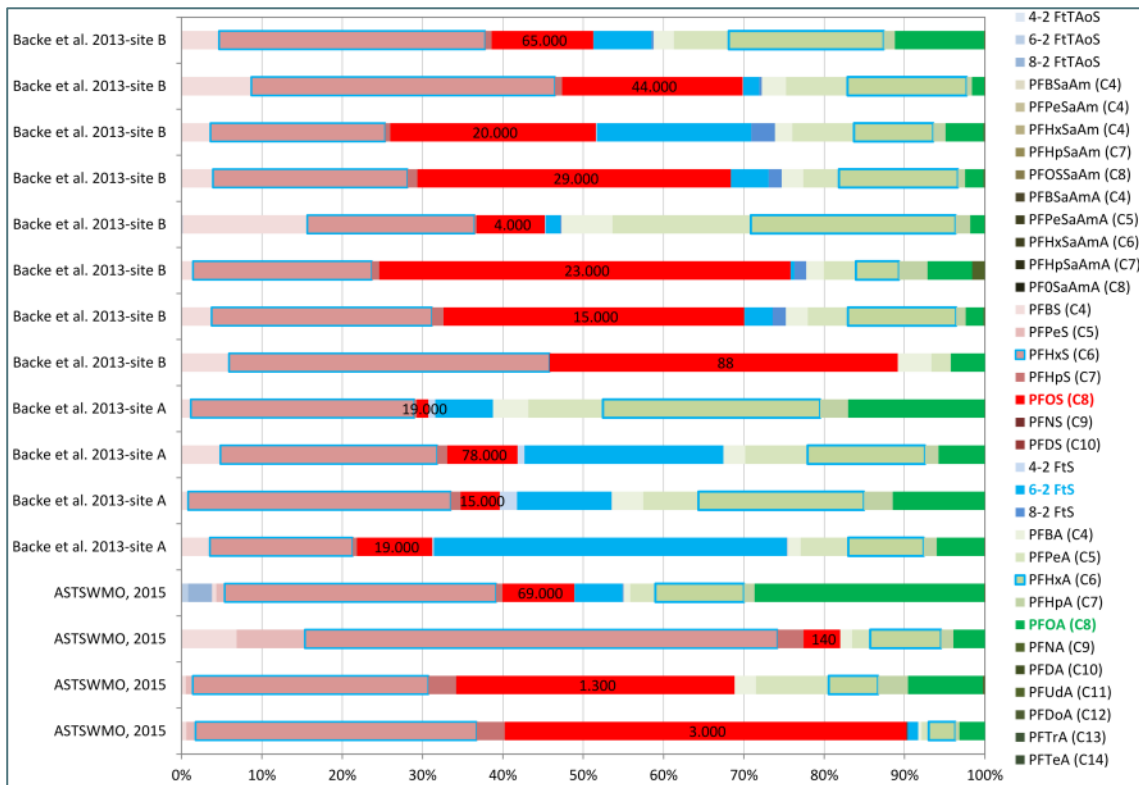
PFAS-sammensætninger i grundvandet nedstrøms for brandslukningsøvelsespladser på amerikansk militærflughavne er blevet undersøgt (Place & Field 2012), (Houtz et al. 2013), (Backe et al. 2013), (Barzen-Hanson & Field 2015), og (ASTSWMO 2015). Der er her tale om forurening med PFOS-holdigt AFFF-skum, og analyseret for i alt 49 forskellige PFAS-forbindelser. PFAS-forurening og transport i grundvand fra en svensk militærflughavn er undersøgt (Filipovic, Woldegiorgis, et al. 2015) og indhold af PFAA-forbindelser i grundvand og overfladevand var på henholdsvis 738-51.000 ng/l og fra under detektionsgrænsen til 79 ng/l.

Med henblik på at illustrere og sammenligne PFAS-sammensætninger i grundvand kan der anvendes diagrammer til at visualisere PFAS-mønstret ("fingerprint"). Såfremt undersøgelser fra andre lokaliteter eller andre lande skal sammenlignes skal der analyseres for de samme relevante

PFAS-forbindelser. Data fra undersøgelserne fra USA er visualiseret både som "radar", jf. Figur 3-1, og som "stabled bar" diagrammer, jf. Figur 3-2.



FIGUR 3-1 PFAS-FORBINDELSER "FINGERPRINT" I GRUNDTVAND - SPILD AF AFFF VED MILITÆRE LUFTHAVNE I USA



FIGUR 3-2 PFAS-FORBINDELSER “FINGERPRINT” I GRUNDVAND - SPILD AF AFFF VED MILITÆRE LUFTHAVNE I USA. PFOS KONCENTRATION [µG/L] ER VIST.

Data kan præsenteres med de aktuelle målte koncentrationer eller som det relative indhold, som dermed er uafhængigt af koncentrationerne. Ulemperne ved at vise det relative indhold er dog, at der ikke umiddelbart kan identificeres ændringer i sammensætningen, som skyldes faldende koncentrationer på afstanden til kilden. Såfremt der er tale om lave koncentrationer, kan nogle stoffer i en PFAS-blanding ligge under detektionsgrænsen, hvorved de resterende stoffer udgør en større procentdel af sammensætningen. F.eks. kan “fingerprint” af en blanding med et lavt samlet indhold, hvor flere stoffer er under detektionsgrænsen indikere, at PFOS udgør 100% af PFAS-sammensætning, mens PFOS udgør en mindre andel ved højere koncentration, fordi de mange øvrige PFAS-forbindelser udgør en signifikant andel.

Som det ses af Figur 3-1 og Figur 3-2, er det hovedsagelig PFHxS, PFOS, PFHxA, PFOA og 6:2 FTS, der findes i grundvand ved de pågældende amerikanske AFFF-forurene lokaliteter, dvs. de stoffer, som er omfattet af det danske kvalitetskriterium.

Blandt de mange nye PFAS-forbindelser, som er identificeret ved analyse af gl. lagerprøver af AFFF (Place & Field 2012) er det kun 6:2 og 8:2 fluortelomer thioamido sulfonat (6:2 FtTAoS og 8:2 FtTAoS), som er fundet i signifikante mængder i grundvand, og kun ved én af de tre AFFF-belastede lokaliteter (Backe et al. 2013) og (ASTSWMO 2015). FtTAoS-forbindelser er meget anvendt i de fluortelomer-baserede AFFF'er, dog er der i nyere produkter en tendens væk fra 10:2 og 8:2 FtTAoS og mod 6:2 FtTAoS (Harding-Marjanovic et al. 2015). Blandt andet er det i USA konstateret, at de meget kortkædede C2-C3 PFAS-forbindelser findes i både AFFF-produkter og i forureningsfaner fra brandslukningsaktioner eller brandslukningsøvelsespladser, og det antages, at disse vil dominere i spidsen af forureningsfanerne (Barzen-Hanson & Field 2015).

Ved mange undersøgelser konstateres det, at perfluoralkylcarboxylsyrer (PFCA) og perfluoralkylsulfonsyrer (PFSA), som tilsammen kaldes PFAA (perfluoralkylsyrer), dominerer i grundvandet nedstrøms for brandslukningsaktiviteter eller brandslukningsøvelsespladser, på trods af at disse stoffer ikke altid findes i de oprindelige AFFF-produkter (Place & Field 2012), (D'Agostino & Mabury 2014) og (McGuire et al. 2014). Forklaringen er, at AFFF-produkter kan indeholde PFAA-precursorer som transformeres i grundvandszonen.

Udover de ændringer i sammensætninger, som skyldes omsætning af precursorer, vil udvaskning fra jorden og retardation og transport i grundvandszonen være stofafhængig, idet et stof som PFOS kan være mindre mobilt end andre PFAS-forbindelser, især de mere kortkædede forbindelser (Løland 2014).

3.3 Lossepladsperkolat og spildevand

I litteraturen findes en række artikler om fund af PFAS-forbindelser i lossepladsperkolat, jf. Bilag 1-3. Der er i de beskrevne undersøgelser anvendt forskellige analysepakker, hvorfor konklusionerne vedrørende PFAS-sammensætning og -niveauer er afhængige af, hvilke PFAS-forbindelser, der er analyseret.

Perkolat fra en kommunal losseplads i Canada blev analyseret for 24 forskellige PFAS-forbindelser, herunder 10 precursorer (fluortelomere - FTA og N-alkyl perfluorooctansulfonamider) over en periode på 5 måneder (Benskin et al. 2012). Det samlede indhold varierede fra 2,5 til 36 µg/l, og det højeste indhold forekom, da indholdet af precursorer var mere end 50% af PFAS-sammensætningen. I perioden med højt indhold af precursorer målt desuden målt de højeste indhold af PFOS og PFOA. Blandt precursorerne var EtFOSAA, MeFOSAA samt 8:2 FTCA dominerende. De mest almindeligt forekommende PFAS-forbindelser var perfluoralkyl carboxylsyrer (f.eks. PFPeA, PFHxA og PFOA).

Udvaskning under biotiske og abiotiske forhold af op til 70 forskellige PFAS-forbindelser fra kommunal fast affald (MSW) opsamlet fra 7 lokaliteter er undersøgt af (McKay Allred et al. 2015). Udvaskning var størst for perfluoralkylcarboxylsyrer (f.eks. PFPeA, PFHxA, PFHpA og PFOA). Umiddelbart blev der ikke konstateret af dialkyl phosphater (PFPIA) og fluortelomer mercaptoalkyl phosphater (FTMAP) eller diverse andre PFAS-forbindelser som primært anvendes ved overfladebehandling af pap og papir (Gebink et al. 2013). PFAS-indholdet i perkolatet var fra 1- 10 ng/l for de enkelte PFAS-forbindelser.

PFAS-forbindelser i spildevandsslam i USA kan udvaskes til en dybde på op til 120 cm i den underliggende jord, dog aftager koncentrationerne til lave niveauer inden for de øverste 20 - 40 cm (Sepulvado et al. 2011). De langkædede PFAS-forbindelser er dog mindre mobile end de kortkædede. Det højeste indhold i spildevandsslam var på 80 - 219 µg PFOS/kg, men det samlede indhold af 10 PFAS-forbindelser (sum af PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA, PFDoA, MeFOSAA, EtFOSAA, PFHxS, PFOS, og PFDS) var på 433 ±121 µg/kg. Desuden var der tegn på omsætning af PFOS-precursorer; MeFOSAA (2-(N-methylperfluorooctane sulfonamido acetic acid) og EtFOSAA (-N-ethylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetic acid), idet disse precursorer blev fundet i forholdsvist lave indhold i jorden i forhold til indholdet i slammet.

Udledning af spildevand og udlægning af spildevandsslam kan medføre belastning af kystvand, vandløb og søer såvel som grundvand. Da mange tidligere undersøgelser kun har undersøgt for PFOS og PFOA, er den belastning som skyldes precursorer og andre PFAS-forbindelser ikke belyst.

Mellem 176 – 3.390 ng/g for sum af 12 PFAS-forbindelser inklusiv precursorer som FOSAA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA samt 14- 2.610 ng/g (dvs. 0,014- 2,6 mg/kg) PFOS, er målt i spildevandsslam af (Higgins et al. 2005). PFOS-precursorer, N-MeFOSAA og EtFOSAA, udgjorde op til

henholdsvis 36 og 62% af de samlede PFOS-ækvivalenter. Desuden er PFAS-forbindelser målt i sediment i vandløb nedstrøms udledninger (Higgins et al. 2005).

Desuden er der konstateret forhøjede indhold af PFAS-forbindelser herunder FTOH'er i luftprøver udtaget ved et renseanlæg og 2 lossepladser (Ahrens et al. 2011). Som nævnes i afsnit 3.4 kan afdampning af de flygtige fluortelomer alkoholer, f.eks. 6:2 FTOH og 8:2 FTOH og omsætning i atmosfæren være årsagen til den diffuse belastning med PFAS i overfladevand i områder langt fra industriel eller bynære kilder (Filipovic 2015) og (Filipovic & Berger 2015).

3.4 Grundvand, vandløb og overfladevand

I litteraturen findes en række artikler om fund af PFAS-forbindelser ved screening af grundvand, vandløb og overfladevand, jf. Bilag 1-4.

I Sverige er der foretaget en screening af 502 vandprøver med analyse for 26 PFAS-forbindelser, Der er analyseret for 13 PFCA-forbindelser (C4 – C18) og 4 PFSA-forbindelser (C4, C6, C8 og C10) samt en række precursorer, heraf 3 perfluoroktansulfonamider (FOSA/PFOSA, MeFOSA, EtFOSA), 3 perfluoroktan sulfonamido eddikesyrer (FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA), 2 forskellige N-alkylperfluoroktansulfonamidoethanoler (MeFOSE, EtFOSE) og 6:2 FTSA (6:2FtS). Vandprøverne er udtaget af svensk grundvand (n=164), overfladevand (n=285), søer uden væsentlige menneskelige påvirkninger (n=10), udledning fra spildevand fra rensningsanlæg (n=13), og lossepladsperskolat (n=10). Den højeste gennemsnitsindhold var i lossepladsperskolat (487 ng \sum 26 PFAS /l), efterfulgte af overfladevand (112 ng \sum 26 PFAS /l), grundvand (49 ng \sum 26 PFAS /l), udledning fra rensningsanlæg (35 ng \sum 26 PFAS /l) og baggrund for søer (3,4 ng \sum 26 PFAS /l). I grundvand var der en jævn fordeling mellem PFCA'er, PFSA'er og precursorer, mens PFCA'er dominerede i de andre vandtyper. De dominerede PFAS i drikkevand var PFOSA, PFNA, PFDA og 6:2 FtS, som alle sammen indgår i den danske administrative sum-kriterium. Med undtagelse af lave indhold af N-EtFOSAA, N-Me FOSAA og FOSAA i nogle få vandprøver er der ikke konstateret andre precursorer end PFOSA og 6:2FtS.

Flere artikler fra USA omhandler vandløb og overfladevand, som var påvirket af arealanvendelsen, dvs. tæt bebyggelse i byerne, eller af spildevandspåvirkning fra industrien (Strynar et al. 2015), (Houtz & Sedlak 2012).

Traditionel PFAS-analyse for i alt 10 PFAS-forbindelser (7 PFCA: C4- C10 og 3 PFSA: PFBS, PFHxS og PFOS) har vist koncentrationer på 100 – 51.000 ng/l i vandløb med høje indhold af især PFPeA, PFHpA og PFBA (Strynar et al. 2015). Detaljerede analyser med TOFMS indikerede, at det samlede PFAS-indhold nedstrøms én punktkilde var op til 2 størrelsesordener højere end målt ved den traditionelle analysepakke. Der blev identificeret 12 nye PFAS-forbindelser, blandt andet per- og polyfluoralkylethersulfonsyrer. I (Strynar et al. 2015) nævnes, at der i dag produceres nye PFAS-forbindelser, hvor fluorkulstofkæden brydes med flere ether-bindinger langs kæden (-CF₂-O-), herunder ADONA (4,8-dioxa-3H-perfluoronanoate).

Ved at sammenligne indhold af PFCA-forbindelser før og efter kraftig oxidation med hydroxylradikal (dannet ved thermolysis af persulfat -S₂O₈²⁻) blev det samlede precursorindhold i 33 vandprøver (overfladeafstrømning fra byområder fra 10 lokaliteter) evalueret (Houtz & Sedlak 2012). Ved standardanalyser for ca. 23 PFAS-forbindelser blev mindst 7 stoffer konstateret i de enkelte prøver, heraf 6-42 ng/l for sum af PFCA'er og 2,6-33 ng/l for PFSA'er, hvor det højeste indhold var for PFOS (2,6 – 26,3 ng/l). Indhold af C8-precursorer (FOSA, NEtFOSAA, NEtFOSE, NMeFOSAA og 8:2FtS) samt C6-precursorer (6:2FtS) var lavt eller under detektionsgrænsen og det højeste indhold for C8-precursorer var 1,8 ng/l for PFOSA (FOSA). Efter oxidation var der en signifikant stigning i PFPeA og PFHxA, og sum af PFCA'er steg til 2,8 – 56 ng/l. Data fra de 10 lokaliteter indikerede, at precursorindhold i afstrømmende vand fra byområder kan være signifikant. (Houtz & Sedlak 2012) nævner, at mens visse PFAA-precursorer (f.eks. perfluoralkyl-

sulfonamider) er omdannet til PFSA'er ved mikrobiologiske og biologiske processer, vil oxidation med hydroxylradikal under de anvendte forhold kun resultere i dannelse af PFCA-forbindelser.

Fra landbrugsområder i USA, hvor der i mere end 25 år er udlagt PFAS-forurenede slam på landbrugsjord, er der udtaget 51 vandprøver fra brønde og overfladevand som er analyseret for 10 PFAS-forbindelser (Lindstrom et al. 2011):

- 57% indeholdt PFOA i intervallet 10 - 11.000 ng/l, heraf 22% med en overskridelse af Alabamas drikkevandskriterium på 400 ng PFOA/l. De højeste indhold blev fundet i overfladevand.
- 29% indeholdt PFOS i intervallet 10 - 151 ng/l, dvs. ingen overskridelse af Alabamas drikkevandskriterium på 200 ng PFOS/l.

Desuden noteres i Sverige at et forhøjet indhold af PFAS i forurenede grundvand og drikkevand kan medføre en spildevandsbelastning, således at rensningsanlægget udgør selv en ny kilde og forurenere overfladevand (Naturvårdsverket 2016) og (Filipovic & Berger 2015).

Desuden er der i Sverige foretaget en kortlægning af PFAS-belastning (25 PFAS-forbindelser) i 44 vandløb. De 6 mest belastede vandløb (26- 690 ng/l for sum af PFAS) havde et ensartet "fingerprint" med høje indhold af PFBS, PFHxS, PFOS og PFNA (Ribeli 2014). Indholdet af PFOS var mindre end EU-miljøkvalitetskrav på 0,65 ng PFOS/l (EU 2013) for 32 lokaliteter ud af de 44, men i vandprøverne fra de andre 12 lokaliteter blev der målt mellem 0,71 og 6,9 ng PFOS/l (Ribeli 2014).

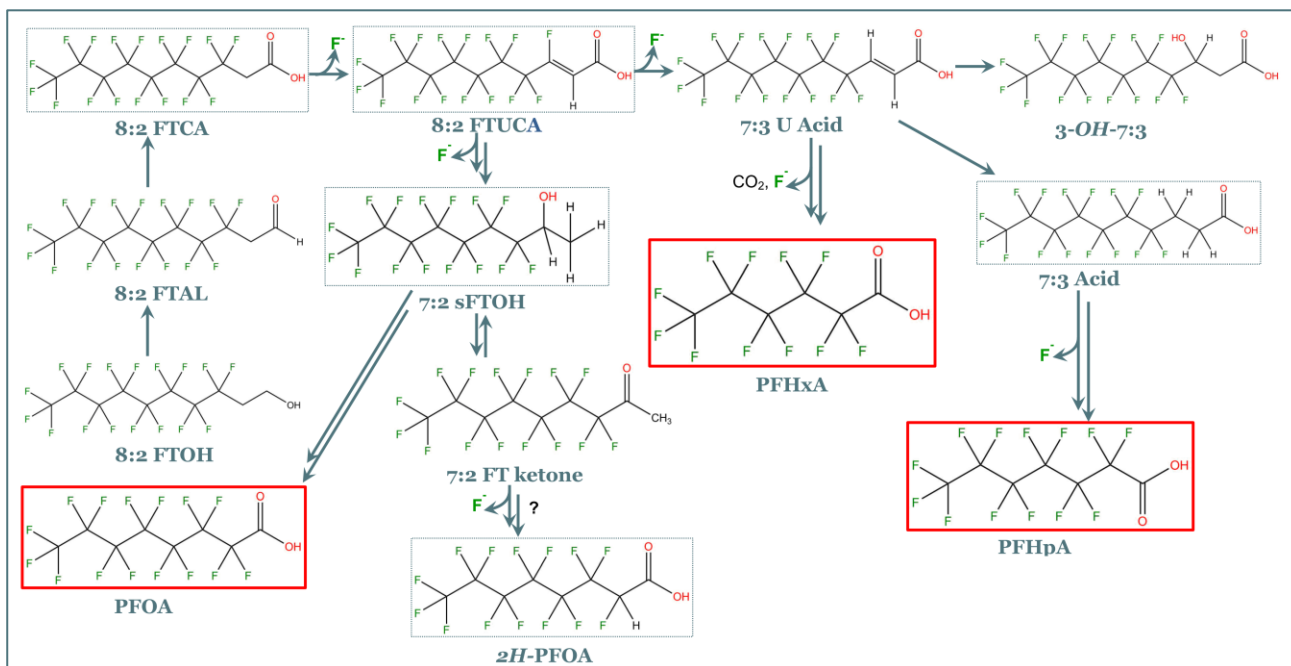
Desuden vurderes det, at atmosfærisk deposition i Sverige er årsagen til den diffuse belastning med PFAS i overfladevand i områder langt fra industriel eller bynære kilder (Filipovic, Laudon, et al. 2015) og (Filipovic et al. 2013). Atmosfærisk deposition af PFAA-forbindelser kan skyldes afdampning og af de flygtige fluortelomer alkoholer, f.eks. 6:2 FTOH og 8:2 FTOH og omsætning i atmosfæren, eller partikulært transport i atmosfæren af PFAA-forbindelser (Filipovic, Laudon, et al. 2015).

3.5 Precursorer og mulighed for transformation

PFAS-sammensætningen i de anvendte produkter ved kilden og muligheden for omsætning i jord og grundvand påvirker den sammensætning, som findes i grundvand og overfladevand. Som omtalt i de foregående afsnit, er der meget fokus på precursorer, dvs. PFAS-forbindelser som kan omdannes til f.eks. PFOS eller PFOA, eller øvrige PFAS-forbindelser. I bilag 1.5 er der givet en oversigt over litteraturkilder, som omtaler nedbrydningsveje.

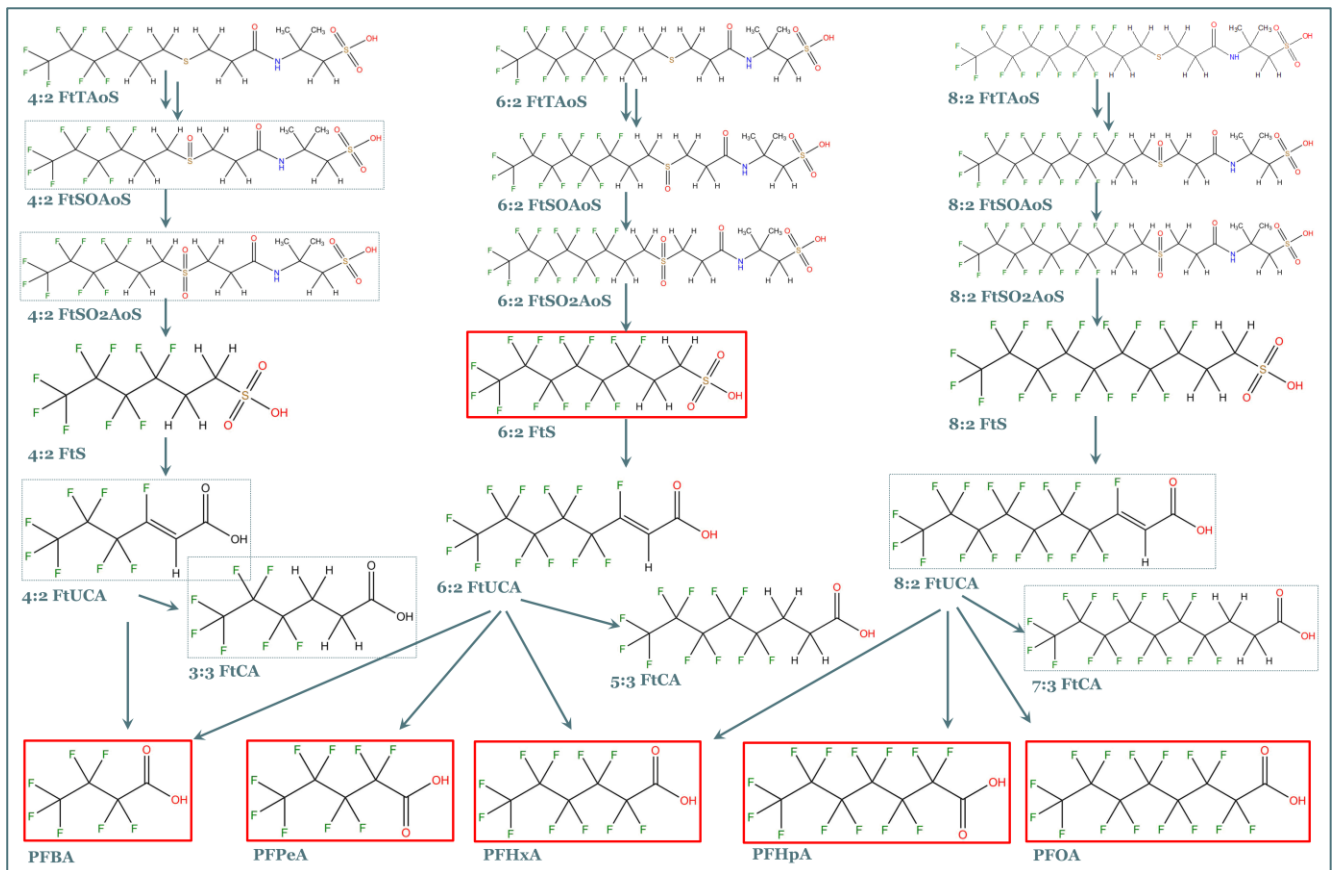
Liu og Mejia Avendaño, 2013, har udarbejdet en detaljeret litteraturvurdering af nedbrydningsmulighederne og nedbrydningsvejene for forskellige grupper af perfluor og polyfluoralkyl forbindelser, herunder diverse fluortelomere (Liu & Mejia Avendaño 2013).

Mange polyfluoralkylprodukter i AFFF og i produkter, som anvendes til imprægnering, kan transformeres under aerobe forhold til en række perfluoralkylforbindelser, herunder PFCA'er (carboxylsyrer). I Figur 3-3 er nedbrydningsveje for nedbrydning i jordmiljøet af 8:2 FTOH gengivet fra (Liu & Mejia Avendaño 2013), og de forbindelser, som måles ved analyse ift. til den danske Miljøstyrelses kvalitetskriterium (Miljøstyrelsen 2015a) er markeret med rødt (PFHxA, PFHpA og PFOA). Nedbrydningsveje i henholdsvis jord og spildevandslam (Liu & Mejia Avendaño 2013) for 6:2 FTOH medfører ligeledes en række "dead-end" metabolitter som PFBA, PFPeA og PFHxA som er omfattet af det danske kvalitetskriterium for 12 PFAS. Herudover er der forslag til dannelse af en række fluortelomersyrer som 5:3 FTCA, 4:3 FTCA og 3:3 FTCA.



FIGUR 3-3 AEROBE NEDBRYDNINGSEVEJE FOR 8:2 FTOH I JORD
 PFAS-FORBINDELSER SOM INDGÅR I SUMVÆRDIEN FOR DET DANSKE KVALITETSKRITERIUM ER
 MARKERET MED RØDT
 BASERET PÅ (LIU & MEJIA AVENDAÑO 2013) MODIFICERT FRA (WANG ET AL. 2009).
 (DOBBELT PIL INDIKERER MULTI-TRANSFORMATIONSTRIN. STABIL ELLER SEMISTABILT STOFFER
 ER VIST I DE STIPLEDE BOKSE.

Potentielle nedbrydningsveje for tre fluortelomere (4:2 FtAoS, 6:2 FtAoS, 8:2 FtAoS) er foreslået af (Harding-Marjanovic et al. 2015) og er gengivet i Figur 3-4. Disse tre fluortelomere findes i en fluortelomer-baseret AFFF (Ansul) og som det ses af Figur 3-4 kan transformeres til andre precursorer som 6:2 FTS og en række "dead-end" metabolitter som PFBA, PFPeA og PFHxA, PFHpA og PFOA som er omfattet af det danske kvalitetskriterium for 12 PFAS.



FIGUR 3-4 MULIGE AEROBE NEDBRYDNINGSVJE FOR 4:2 FTAOS, 6:2 FTAOS, 8:2 FTAOS I JORD
 PFAS-FORBINDELSER SOM INDGÅR I SUMVÆRDIEN FOR DET DANSKE KVALITETSKRITERIUM ER
 MARKERET MED RØDT
 BASERET PÅ (HARDING-MARJANOVIC ET AL. 2015)
 (DOBBELT PIL INDIKERER, AT REAKTIONEN KAN SKE BÅDE BIOTISK OG ABIOTISK. STOFFER I DE STIPLEDE
 BOKSE ER FORSLAG TIL METABOLITTER, MEN IKKE KONSTATERT I MIKROCOSMER.)

4. Konklusion

En gennemgang af den internationale litteratur om fund af PFAS-forbindelser i grundvand har vist følgende:

- Der er sket en løbende udvikling i, hvilke PFAS-forbindelser, der produceres og anvendes i produkter.
- PFAS-holdige produkter indeholder typisk flere forskellige PFAS-grupper, og i de tidligere år blev der også dannet fluorerede urenheder under produktionen.
- De mange forskellige PFAS-grupper, som findes i produkter, er sjældent omfattet af de analytiske pakker, som anvendes ved analyse af miljøprøver.
- Der findes flere forskellige PFAS-forbindelser i grundvand og overfladevand end der traditionelt analyseres for. Der pågår en løbende udviklingen i avancerede analyseteknikker. En række nye PFAS-forbindelser er identificeret i produkterne og disse kan muligvis også forurene vandressourcerne. Blandt kan nævnes 8:2 FTS, 8:2FTOH, 6:2FTOH, 8:2 FTC, N-MeFOSAA, N-ETFOSAA, 5:3 FTCA og C2 - C3 PFAS-forbindelser.
- Som konsekvens heraf, forventes det, at der vil være flere andre PFAS-forbindelser i grundvand og overfladevand end omfattet af det danske grundvandvands- og drikkevandskriterium for sum af 12 PFAS-forbindelser.
- Såfremt der analyseres for et større antal PFAS-forbindelser i vandprøver, findes næsten altid følgende stoffer, som også indgår i DK-sum-kriteriet:
 - perfluoralkylcarboxylsyre (PFCA'er) som PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA og PFOA
 - perfluoralkylsulfonsyre (PFSA'er) som PFBS, PFHxS og PFOS
 - fluortelomer som 6:2 FTS
- PFAA-precursorer som polyfluoralkyl-forbindelser og perfluoralkylsulfonamider m.fl., kan transformeres (en delvis nedbrydning) til de såkaldte "dead-end" persistente perfluoralkylsyre (PFAA-perfluoroalkyl acids). PFAA-forbindelser omfatter både perfluoralkylcarboxylsyre (PFCA'er som f.eks. PFOA) og perfluoralkylsulfonsyre (PFSA'er som f.eks. PFOS).
- Analyseteknikker som TOP (total oxiderbare precursorer) kan belyse, om vandprøven indeholder precursorer. Ved TOP udsættes vandprøven for en forbehandling, således at precursorer oxideres til en række PFAA-forbindelser, som kan måles ved standardanalyseteknikker. Den kemiske oxidation, som anvendes ved TOP- teknikken, medfører ikke nødvendigvis transformation til de samme PFAA-homologe, som opstår i naturen.
- Analyseteknikker, hvor der måles totalt organisk fluor i vandprøver, kan belyse, om der er mange ukendte PFAS-forbindelser, som ikke indgår i standard LC/MS/MS analysen.

5. Perspektivering

Undersøgelserne af PFAS-sammensætningen ("PFAS-fingerprint") i produkter eller i perkolat fra lossepladser har belyst, at mange af de identificerede stoffer ikke indgår i standard analysepakker.

I Danmark er kvalitetskriteriet for drikkevand og grundvand et administrativt sumkriterium for 12 specifikke per- og polyfluoralkyl-forbindelser (PFAS-forbindelser), som er almindeligt forekommende, såfremt der konstateres PFAS-forurening. Da der kun findes tilstrækkelige data til en sundhedsmæssig vurdering for 2 af PFAS-forbindelserne, PFOS og PFOA, er sum-kriteriet for de 12 PFAS-forbindelser sat til det laveste kriterium for det mest skadelige af dem, dvs. PFOS.

Udover de 12 PFAS-forbindelser i sum-kriteriet kan en vandprøve have et ukendt PFAS-indhold, som kan udgøre en sundhedsmæssig risiko. Selvom disse ukendte stoffer identificeres, vil det ikke være muligt at kvantificere risikoen, da de toksikologiske data endnu ikke findes. Umiddelbart vurderes det, at det danske administrative kriterium betyder, at der vil kunne identificeres væsentlige grundvandsforureninger med PFAS-forbindelser, idet de ukendte PFAS-forbindelser ikke forventes at optræde alene, men sammen med nogle af de 12 PFAS-forbindelser i sum-kriteriet.

En vandprøve kan ligeledes have et indhold af PFAA-precursorer, som ikke er kvantificeret ved standardanalyser og som med tiden kan transformeres til de persistente "dead-end" metabolitter som PFOS og PFOA. Analyse for de 12 PFAS-forbindelser i det danske sum-kriterium kan muligvis underestimere det potentielle fremtidige indhold af PFOS, PFOA og andre PFAA. Det danske administrative kvalitetskriterium er baseret på sum af 12 almindeligt forekommende PFAS-forbindelser. Kvalitetskriteriet er dog sat til det laveste kriterium for det mest skadelige af dem, dvs. PFOS. Da PFAA-precursorer ikke forventes at optræde alene, vil kriteriet for sum af 12 almindeligt forekommende PFAS sandsynligvis indikere, om der foreligger en potentiel grundvandsrisiko.

Derimod er vurderingen af PFAS-sammensætning, precursorindhold og kvantificering af ukendte PFAS-forbindelser (evt. ved bestemmelse af total organofluor) væsentlig ved vurdering af kildestyrke og forureningsfane, samt ved afværgetiltag og opstilling af succeskriterier for afværgeforanstaltninger.

Referencer

- Ahrens, L. et al., 2016. Screening of PFASs in groundwater and surface water. *SLU. Swedish University of Agricultural Sciences, Vatten och miljö: Rapport 2016:2*. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:915446/FULLTEXT01.pdf>.
- Ahrens, L. et al., 2011. Wastewater Treatment Plant and Landfills as Sources of Polyfluoroalkyl Compounds to the Atmosphere †. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8098–8105. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es1036173>.
- Ahrens, L. & Bundschuh, M., 2014. Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(9), pp.1921–1929. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/etc.2663>.
- ALS, 2015. Perfluorinated Compounds (PFCs) in Landfill leachate. *ALS Environmental EnviroMail #86*, (February 2015). Available at: www.alsglobal.com.
- ASTSWMO, 2015. Perfluorinated Chemicals (PFCs) : Perfluorooctanoic Acid (PFOA) & Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Information Paper. Remediation and Reuse Focus Group Federal Facilities Research Center. , (August). Available at: www.astsmo.org.
- Awad, E. et al., 2011. Long-Term Environmental Fate of Perfluorinated Compounds after Accidental Release at Toronto Airport. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8081–8089. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es2001985>.
- Backe, W.J., Day, T.C. & Field, J.A., 2013. Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from U.S. military bases by nonaqueous large-volume injection HPLC-MS/MS. *Environmental Science and Technology*, 47, pp.5226–5234.
- Barzen-Hanson, K.A. & Field, J.A., 2015. Discovery and Implications of C 2 and C 3 Perfluoroalkyl Sulfonates in Aqueous Film-Forming Foams and Groundwater. *Environmental Science & Technology Letters*, 2(4), pp.95–99. Available at: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00049>.
- Benskin, J.P. et al., 2012. Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Landfill Leachate: Patterns, Time Trends, and Sources. *Environmental Science & Technology*, 46(21), pp.11532–11540. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es302471n>.
- Bhatarai, B. & Gramatica, P., 2011. Prediction of Aqueous Solubility, Vapor Pressure and Critical Micelle Concentration for Aquatic Partitioning of Perfluorinated Chemicals. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8120–8128. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es101181g>.
- Buck, R.C. 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: <http://doi.wiley.com/10.1002/ieam.258>.
- Carmosini, N. & Lee, L.S., 2008. Partitioning of Fluorotelomer Alcohols to Octanol and Different Sources of Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science & Technology*, 42(17), pp.6559–6565. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es800263t>.
- Cortina, T., 2009. Aircraft rescue and firefighting requires the best foam available : AFFF. *Fire Fighting Foam Coalition (FFFC). ASIA PACIFIC FIRE*, pp.25–28.
- D'Agostino, L.A. & Mabury, S.A., 2014. Identification of Novel Fluorinated Surfactants in Aqueous

Film Forming Foams and Commercial Surfactant Concentrates. *Environmental Science & Technology*, 48(1), pp.121–129. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es403729e>.

Dinglasan, M.J.A. et al., 2004. Fluorotelomer Alcohol Biodegradation Yields Poly- and Perfluorinated Acids. *Environmental Science & Technology*, 38(10), pp.2857–2864. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0350177>.

Enevoldsen, R. & Juhler, R.K., 2014. Bilag 11. Afrapportering af NOVANA screeningsundersøgelse: Afklaring af mulig forekomst af PFOS, PFOA og lignende PFC forbindelser i grundvand. *GEUS. Grundvandsovervågning 2014. Status og udvikling 1989-2013*. Available at: www.geus.dk.

Eschauzier, C. et al., 2010. Perfluorinated Compounds in Infiltrated River Rhine Water and Infiltrated Rainwater in Coastal Dunes. *Environmental Science & Technology*, 44(19), pp.7450–7455. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es100471z>.

EU, 2013. *DIRECTIVE 2013/39/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12. august 2013 amending directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy*,

Ferrey, M.L. et al., 2012. Behavior and Fate of PFOA and PFOS in Sandy Aquifer Sediment. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 32(4), pp.63–71. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1745-6592.2012.01395.x>.

Filipovic, M., 2015. *Fate of perfluoroalkyl acids in the aquatic environment with a focus on mass balance studies*. Thesis. Stockholm University.

Filipovic, M., Woldegiorgis, A., et al., 2015. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. *Chemosphere*, 129, pp.39–45. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653514010650>.

Filipovic, M., Laudon, H., et al., 2015. Mass Balance of Perfluorinated Alkyl Acids in a Pristine Boreal Catchment. *Environmental Science & Technology*, 49(20), pp.12127–12135. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b03403>.

Filipovic, M. & Berger, U., 2015. Are perfluoroalkyl acids in waste water treatment plant effluents the result of primary emissions from the technosphere or of environmental recirculation? *Chemosphere*, 129, pp.74–80. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565351400945X>.

Filipovic, M., Berger, U. & McLachlan, M.S., 2013. Mass Balance of Perfluoroalkyl Acids in the Baltic Sea. *Environmental Science & Technology*, 47(9), pp.4088–4095. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es400174y>.

Gebbink, W.A. et al., 2013. Polyfluoroalkyl phosphate esters and perfluoroalkyl carboxylic acids in target food samples and packaging—method development and screening. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), pp.7949–7958. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-013-1596-y>.

Harding-Marjanovic, K.C. et al., 2015. Aerobic Biotransformation of Fluorotelomer Thioether Amido Sulfonate (Lodyne) in AFFF-Amended Microcosms. *Environmental Science & Technology*, 49(13), pp.7666–7674. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b01219>.

Hashiguchi, A. et al., 2013. Fluorine mass balance in electrolytic degradation of perfluorooctane sulfonate in aqueous solution. *International Journal of PIXE*, 23(03n04), pp.153–170. Available at: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0129083513410088>.

Higgins, C.P. et al., 2005. Quantitative Determination of Perfluorochemicals in Sediments and Domestic Sludge. *Environmental Science & Technology*, 39(11), pp.3946–3956. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es048245p>.

- Higgins, C.P. & Luthy, R.G., 2006. Sorption of Perfluorinated Surfactants on Sediments †. *Environmental Science & Technology*, 40(23), pp.7251–7256. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es061000n>.
- Holmquist, H. et al., 2016. Properties, performance and associated hazards of state-of-the-art durable water repellent (DWR) chemistry for textile finishing. *Environment International*, 91, pp.251–264. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016041201630071X>.
- Houtz, E.F. et al., 2013. Persistence of Perfluoroalkyl Acid Precursors in AFFF-Impacted Groundwater and Soil. *Environmental Science & Technology*, 47(15), p.130725144806004. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4018877>.
- Houtz, E.F. & Sedlak, D.L., 2012. Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff. *Environmental Science & Technology*, 46(17), pp.9342–9349. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es302274g>.
- Jensen, A.A., Poulsen, P.B. & Bossi, R., 2008. Kortlægning og miljø- og sundhedsmæssig vurdering af fluorforbindelser i imprægnerede produkter og imprægneringsmidler. *Miljøstyrelsen. Kortlægning af kemiske stoffer i forbrugerprodukter, nr. 99*.
- Kato, K. et al., 2011. Trends in Exposure to Polyfluoroalkyl Chemicals in the U.S. Population: 1999–2008 †. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8037–8045. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es1043613>.
- Kemikalieinspektionen, 2015. *Förekomst och användning av högfluorerade ämnen och alternativ, Rapport från ett regeringsuppdrag. Rapport 6/15*.
- Kissa, E., 2001. *Fluorinated Surfactants and Repellents (2nd edition). Surfactant Science series 97*, New York: Marcel Dekker.
- Lang, J.R. et al., 2016. Release of Per- and polyfluoroalkyl Substances (PFASs) from Carpet and Clothing in Model Anaerobic Landfill Reactors. *Environmental Science & Technology*, 50(10), pp.5024–5032. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b06237>.
- Larsen, P.B. & Giovalle, E., 2015. Perfluoroalkylated substances: PFOA, PFOS and PFOSA. Evaluation of health hazards and proposal of a health based quality criterion for drinking water, soil and ground water. *Danish Ministry of the Environment. Environmental project 1665*.
- Lassen, C. et al., 2013. Survey of PFOS, PFOA and other perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances. Lous-review. *Danish Ministry of the Environment. Environmental project 1475*.
- Lindstrom, A.B. et al., 2011. Application of WWTP Biosolids and Resulting Perfluorinated Compound Contamination of Surface and Well Water in Decatur, Alabama, USA. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8015–8021. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es1039425>.
- Liu, J. et al., 2007. Biotransformation of 8:2 Fluorotelomer Alcohol in Soil and by Soil Bacteria Isolates. *Environmental Science & Technology*, 41(23), pp.8024–8030. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0708722>.
- Liu, J. & Lee, L.S., 2007. Effect of Fluorotelomer Alcohol Chain Length on Aqueous Solubility and Sorption by Soils. *Environmental Science & Technology*, 41(15), pp.5357–5362. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es070228n>.
- Liu, J. & Mejia Avendaño, S., 2013. Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environment International*, 61, pp.98–114. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.08.022>.
- Løland, B., 2014. *Fate and Transport of PFCs in a Peat Bog Environment. Master Thesis*. University of Oslo.

- Martin, J.W. et al., 2010. PFOS or PreFOS? Are perfluorooctane sulfonate precursors (PreFOS) important determinants of human and environmental perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure? *Journal of Environmental Monitoring*, 12(11), p.1979. Available at: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/em/coem00295j>.
- McGuire, M.E. et al., 2014. Evidence of Remediation-Induced Alteration of Subsurface Poly- and Perfluoroalkyl Substance Distribution at a Former Firefighter Training Area. *Environmental Science & Technology*, 48(12), pp.6644–6652. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es5006187>.
- Mckay Allred, B. et al., 2014. Orthogonal zirconium diol/C18 liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of poly and perfluoroalkyl substances in landfill leachate. *Journal of Chromatography A*, 1359, pp.202–211. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2014.07.056>.
- Mckay Allred, B. et al., 2015. Physical and Biological Release of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) from Municipal Solid Waste in Anaerobic Model Landfill Reactors. *Environmental Science & Technology*, 49(13), pp.7648–7656. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b01040>.
- Meyer, T. et al., 2011. Fate of Perfluorinated Carboxylates and Sulfonates During Snowmelt Within an Urban Watershed. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8113–8119. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es200106q>.
- Miljøstyrelsen, 2015a. Datablade: Perfluorerede alkylsyreforbindelser (PFAS-forbindelser) incl. PFOA, PFOS og PFOSA. *Miljøstyrelsen*, pp.1–4. Available at: <http://mst.dk/virksomhed-myndighed/kemikalier/graensevaerdier-og-kvalitetskriterier/datablade-for-stoffer-med-jord-og-drikkevandskvalitetskriterier/>.
- Miljøstyrelsen, 2016. Miljøstyrelsens Liste over Uønskede stoffer (LOUS). Available at: <http://mst.dk/virksomhed-myndighed/kemikalier/fokus-paa-saerlige-stoffer/listen-over-uoenskede-stoffer/lous-status-pulje-1/>.
- Miljøstyrelsen, 2015b. Notat: Administrative overvejelser og fastlæggelse af grænseværdier for perfluorerede alkylsyreforbindelser (PFAS-forbindelser), inkl. PFOA, PFOS og PFOSA i drikkevand, samt jord og grundvand til vurdering af forurenede grunde. *Miljøstyrelsen*.
- Moe, M.K. et al., 2012. The structure of the fire fighting foam surfactant Forafac®1157 and its biological and photolytic transformation products. *Chemosphere*, 89(7), pp.869–875. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653512006091>.
- Moody, C. a & Field, J. a, 2000. Perfluorinated Surfactants and the Environmental Implications of Their Use in Fire-Fighting Foams. *Environmental Science & Technology*, 34(18), pp.3864–3870. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es991359u>.
- Murakami, M. et al., 2008. Occurrence and Sources of Perfluorinated Surfactants in Rivers in Japan. *Environmental Science & Technology*, 42(17), pp.6566–6572. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es800353f>.
- Naturstyrelsen, 2014a. *Bekendtgørelse nr. 1310 af 25/11/2015 om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg*, Available at: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=174907>.
- Naturstyrelsen, 2014b. Brev til Danske kommuner: Undersøgelse for perfluorerede stoffer i grundvand. *Naturstyrelsen*.
- Naturstyrelsen, 2015a. Hvad kontrolleres drikkevand for? *Naturstyrelsen*. Available at: <http://naturstyrelsen.dk/vandmiljoe/vand-i-hverdagen/drikkevand/kontrol-af-drikkevand/hvad-kontrolleres-drikkevandet-for/>.
- Naturstyrelsen, 2015b. Notat: Screening for perfluorforbindelser i grundvandsovervågningsboringer i efteråret 2014. *Naturstyrelsen*.

- Naturstyrelsen, 2011. *NOVANA - Det nationale program for overvågning af vandmiljøet og naturen 2011-2015. Programbeskrivelse del 1*,
- Naturstyrelsen, 2016. Vejledning: Vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. *Naturstyrelsen*.
- Naturvårdsverket, 2016. *Högfluorerade ämnen (PFAS) och bekämpningsmedel. En sammanfattning av förekomsten i miljön. Redovisning av ett regeringsuppdrag. Rapport 6709.*,
- Olsen, G.W. et al., 2012. Temporal Trends of Perfluoroalkyl Concentrations in American Red Cross Adult Blood Donors, 2000–2010. *Environmental Science & Technology*, 46(11), pp.6330–6338. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es300604p>.
- Place, B.J. & Field, J. a, 2012. Identification of Novel Fluorochemicals in Aqueous Film-Forming Foams Used by the US Military. *Environmental Science & Technology*, 46(13), pp.7120–7127. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es301465n>.
- Poulsen, P.B., Jensen, A.A. & Wallström, E., 2005. More environmentally friendly alternatives to PFOS-compounds and PFOA. *Danish Ministry of the Environment. Environmental project 1013*. Available at: <http://www.miljindflydelse.dk/udgiv/Publications/2005/87-7614-668-5/pdf/87-7614-669-3.pdf> \npapers2://publication/uuid/7BA54DD9-3279-491A-8B24-2400CF501640.
- Prevedouros, K. et al., 2006. Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates. *Environmental Science & Technology*, 40(1), pp.32–44. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0512475>.
- Quiñones, O. & Snyder, S.A., 2009. Occurrence of Perfluoroalkyl Carboxylates and Sulfonates in Drinking Water Utilities and Related Waters from the United States. *Environmental Science & Technology*, 43(24), pp.9089–9095. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9024707>.
- Rhoads, K.R. et al., 2008. Aerobic Biotransformation and Fate of N -Ethyl Perfluorooctane Sulfonamidoethanol (N -EtFOSE) in Activated Sludge. *Environmental Science & Technology*, 42(8), pp.2873–2878. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es702866c>.
- Ribeli, E., 2014. *Screening of endocrine disrupting compounds in Swedish rivers with focus on organic flame retardants and perfluoroalkylated substances*. Uppsala University.
- Rotander, A. et al., 2015. Novel Fluorinated Surfactants Tentatively Identified in Firefighters Using Liquid Chromatography Quadrupole Time-of-Flight Tandem Mass Spectrometry and a Case-Control Approach. *Environmental Science & Technology*, 49(4), pp.2434–2442. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es503653n>.
- Seow, J., 2013. Fire Fighting Foams with Perfluorochemicals - Environmental Review. *Department of Environment and Conservation Western Australia*, (June), pp.1–76. Available at: [Seow_WA-DEC_PFCs_Firefighting_Foam_final_version_7June2013.pdf](http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es103903d).
- Sepulvado, J.G. et al., 2011. Occurrence and Fate of Perfluorochemicals in Soil Following the Land Application of Municipal Biosolids. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.8106–8112. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es103903d>.
- De Silva, A.O. et al., 2012. Phosphorus-Containing Fluorinated Organics: Polyfluoroalkyl Phosphoric Acid Diesters (diPAPs), Perfluorophosphonates (PFPAs), and Perfluorophosphinates (PFPIAs) in Residential Indoor Dust. *Environmental Science & Technology*, 46(22), pp.12575–12582. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es303172p>.
- Sontake, R.A. & Wagh, M.S., 2014. The Phase-out of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and the Global Future of Aqueous Film Forming Foam (AFFF), Innovations in Fire Fighting Foam. *Chemical Engineering and Science*, 2(1), pp.11–14. Available at: <http://pubs.sciepub.com/ces/2/1/3/index.html>.

- Strand, J. et al., 2007. PFAS og organotinforbindelser i punktkilder og det akvatiske miljø. NOVANA screeningsundersøgelse. *Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU nr. 608NOVANA screeningsundersøgelse.*
- Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP), 2016. ER-201633 Characterization of the Nature and Extent of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Environmental Media at DoD Sites for Informed ER-201633 ER-201633 Page 2 of 2. Available at: <https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Environmental-Restoration/Contaminated-Groundwater/Emerging-Issues/ER-201633/ER-201633>.
- Strynar, M. et al., 2015. Identification of Novel Perfluoroalkyl Ether Carboxylic Acids (PFECAs) and Sulfonic Acids (PFESAs) in Natural Waters Using Accurate Mass Time-of-Flight Mass Spectrometry (TOFMS). *Environmental Science & Technology*, 49(19), pp.11622–11630. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b01215>.
- Tsitonaki, K., Jepsen, T.S. & Larsen, T.H., 2014. Screeningsundersøgelse af udvalgte PFAS-forbindelser som jord- og grundvandsforurening i forbindelse med punktkilder. *Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1600.*
- Vestergren, R. et al., 2015. Are imported consumer products an important diffuse source of PFASs to the Norwegian environment? *Environmental pollution*, 198, pp.223–30. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974911400534X>.
- Wang, N. et al., 2009. 8-2 Fluorotelomer alcohol aerobic soil biodegradation: Pathways, metabolites, and metabolite yields. *Chemosphere*, 75(8), pp.1089–1096.
- Wang, Z. et al., 2013. Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs), perfluoroalkane sulfonic acids (PFASs) and their potential precursors. *Environment International*, 60(2013), pp.242–248. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.08.021>.
- Washington, J.W. et al., 2014. Characterizing Fluorotelomer and Polyfluoroalkyl Substances in New and Aged Fluorotelomer-Based Polymers for Degradation Studies with GC/MS and LC/MS/MS. *Environmental Science & Technology*, 48(10), pp.5762–5769. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es500373b>.
- Yoo, H. et al., 2010. Concentrations, Distribution, and Persistence of Fluorotelomer Alcohols in Sludge-Applied Soils near Decatur, Alabama, USA. *Environmental Science & Technology*, 44(22), pp.8397–8402. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es100390r>.
- Yoo, H. et al., 2011. Quantitative Determination of Perfluorochemicals and Fluorotelomer Alcohols in Plants from Biosolid-Amended Fields using LC/MS/MS and GC/MS. *Environmental Science & Technology*, 45(19), pp.7985–7990. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es102972m>.
- Zhang, S. et al., 2013. 6:2 and 8:2 Fluorotelomer Alcohol Anaerobic Biotransformation in Digester Sludge from a WWTP under Methanogenic Conditions. *Environmental Science & Technology*, 47(9), pp.4227–4235. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4000824>.

Bilag 1: Oversigt over den anvendte litteratur

Indhold

Bilag 1-1.	Generelt om PFAS	39
Bilag 1-2.	AFFF-Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand.....	41
Bilag 1-3.	Spildevand og lossepladser	46
Bilag 1-4.	Grundvand, overfladevand og vandløb.....	49
Bilag 1-5.	Transformation af PFAS-forbindelser.....	53
Bilag 1-6.	Sammensætning i blodserum	54

Bilag 1-1. Generelt om PFAS

Generelt om PFAS-forbindelser		Reference
PFAS-nomenklatur	Detaljeret gennemgang af strukturer, nomenklatur og opdeling i grupper samt anvendelse af PFAS-forbindelser og fluorpolymer. Desuden forslag til navngivning, såfremt der henvises til salt- eller syreformer eller umættede sidekæder.	(Buck et al. 2011)
PFOS precursorer	Produktion af fluorkemiske stoffer var af 3M opdelt i 3 kategorier af produkter: Produkter til overfladebehandling – ofte de tunge N-MeFOSE-acrylater, f.eks. ScotchGard. Disse er anvendt som smudsafvisningsprodukter på tæpper, skind, tekstiler og møbelstoffer samt forbrugerprodukter. Mademballager og papirprodukter. F.eks. phosphatestere med blanding af mono-, di- og tri-phosphatestere, N-EtFOSE alkohol eller N-MeFOSE acrylat copolymers. Produkter med overfladeaktive egenskaber (tensider), som forbedrer ydeevnen. F.eks. de relativt lave molkylvægt forbindelser (C8), som anvendes i brandslukningsskum og som tensider i olie- og mineindustrier. I disse produkter er der mange stoffer, som kan omdannes til PFOS, dvs. PrePFOS-stoffer. I artiklen er der udarbejdet en oversigt over dannelse og fund af PrePFOS-stoffer i en række produkter ifm. monitorering af blodserum samt i miljøet.	(Martin et al. 2010)
PFAS Stofudvikling	Siden 2000 er der sket en løbende udvikling, i hvilke PFAS-forbindelser der anvendes i produkter. Tendensen er mod anvendelse af fluortelomere og de kortkædede forbindelser ($\leq C6$). 4 brancher og 20 PFAS-forbindelser er gennemgået.	(Wang et al. 2013)
PFAS Kilder, skæbne og transport	Den historiske udvikling i produktionen af perfluoralkylcarboxylsyrer (PFCA'er), især PFOA, er gennemgået. Ved pH 7 vil PFOA være til stede i ionform som octanat (PFO). Opløseligheden er ca. 4 g/l ved 22°C og stiger ved stigende temperatur. CMC (critical micelle concentration) er ca. 3,7 g/l. Koc for PFO er 52 l/kg. PFO er ikke nedbrydeligt og forventes at fordele sig i vandfasen. Blandt andet noteres at der er produceret ammoniumperfluoronanoat (APFN), hvorved der dannes lineære fluortelomer-forbindelser med et ulige antal kulstof i kulstofkæden.	(Prevedouros et al. 2006)
Fluortelomer polymer (FTP)	Fluortelomer polymer er anvendt i mange produkter og kan forventes at findes på lossepladser og i spildevand. Her kan der ske frigivelse af de residuale monomerer, som findes i de polymeriske produkter samt nedbrydning til PFAS-forbindelser.	(Washington et al. 2014)
PFAS-forbindelser i husstøv	Især de PFAS-forbindelser, som anvendes i overfladebehandling af papir og pap såsom polyfluoralkylphosphorsyre diesters (diPAP), perfluorophosphonater (PFPA), og perfluorophosphinater (PFPIA), såvel som perfluorethylcyclohexan sulfonat (PFECHS), kan konstateres i husstøv (102 prøver). DiPAP'er fandtes i alle husstøvprøver med et gennemsnitsindhold for Σ diPAP'er på 7.637 ng/g og en median på 2.215 ng/g.	(De Silva et al. 2012)
PFAS-forbindelser	Oversigt over forskellige PFAS-forbindelser, som udvaskes/frigives til miljøet. De langkædede forbindelser ($>C6$) har en tendens til at binde til	(Ahrens & Bundschuh 2014)

Generelt om PFAS-forbindelser		Reference
og fordeling i miljø	jorden og bioakkumulere, mens de kortkædede forbindelser har en øget tendens til at fordele sig i vandfasen.	
Log Koc	<p>Vurdering af Log Koc for anioniske PFAS-forbindelser.</p> <p>Log Koc stiger ved stigende antal kulstof i kulstofkæden, og PFAS-forbindelser med sulfonsyregrupper stiger lidt mere end carboxylsyre-forbindelser.</p> <p>log Koc for PFOS: 2,68 (2,57 – 3,1)</p> <p>log Koc for PFOA 2,1</p> <p>log Koc for PFUnA 3,47</p> <p>log Koc for PFDS 3,66</p>	(Higgins & Luthy 2006)
Log Kow	<p>log Kow for 4:2 FTOH 3,30</p> <p>log Kow for 6:2 FTOH 4,54</p> <p>log Kow for 8:2 FTOH 5,58</p> <p>Interval for sorption til forskellige media er typisk 2 størrelsesordner.</p>	(Carmosini & Lee 2008)
Koc og vand-opløselighed	Opløselighed og sorption til jord (Koc) stiger med stigende fluorkulstofkæde fra 4:2 FTOH til 10:2 FTOH.	(Liu & Lee 2007)
Fysisk-kemiske egenskaber	Modellering af opløselighed, damptryk og CMC (critical micelle concentration) for udvalgte PFAS-forbindelser.	(Bhhatarai & Gramatica 2011)

Bilag 1-2. AFFF-Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand

AFFF - Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand		Reference
AFFF USA militære lufthavne	<p>Detaljeret analyse af 30 PFAS-forbindelser i grundvandsprøver fra 2 amerikanske militærlufthavne.</p> <p>Analyse af 6 forskellige AFFF-produkter produceret i perioden 2005 – 2013.</p> <p>Analyse af 5 forskellige 3M-AFFF-produkter produceret i periode 1989 – 2001.</p>	(Backe et al. 2013)
AFFF militær lufthavn Sverige	<p>PFAS-forurening og transport i grundvand fra en tidligere svensk militærlufthavn (ikke i brug siden 1994) er undersøgt. Indhold af PFAA-forbindelser (PFHxA, PFOA, PFHxS og PFOS) var som følger:</p> <p>Grundvand 738-51.000 ng/l</p> <p>Overfladevand < det.gr. - 79 ng/l</p> <p>I jord blev der konstateret følgende indhold</p> <p>PFOS 2,18 – 8.520 ng/g TS</p> <p>PFOA <0,12 – 287 ng/g TS</p>	(Filipovic, Woldegiorgis, et al. 2015)
AFFF USA	<p>Sammensætningen i brandøvelsesskum er ændret efter udfasning af PFOS hos 3M. 3M produkter blev produceret ved elektrokemisk fluorering (ECF). Efter udfasning i 2000'erne er produktion af PFAS-forbindelser til AFFF typisk baseret på "telomerization", hvor PFAS-forbindelser består af et lige antal kulstofatomer i en lineær kulstofkæde, ofte som polyfluoralkylforbindelser, dvs. produkter hvor kulstofkæden kun delvis er mættet med fluor.</p>	(Cortina 2009)
AFFF	<p>Sammensætningen i AFFF afhænger af, om PFAS-produktionen sker ved elektrokemisk fluorering (ECF) eller ved "telomerization", hvor PFAS-forbindelserne består af et lige antal kulstofatomer i en lineær kulstofkæde. Denne egenskab kan evt. anvendes til at vurdere, hvilke produkter, der er anvendt.</p> <p>AFFF indeholder opløsningsmidler (typisk glycol ether), perfluoralkyl anioniske tensider, polyfluoralkyl amphoteriske (zwitterioniske) tensider og kulbrintetensider. AFFF-koncentrat kan desuden indeholde antikorrosionsmidler som tolytriazol. Perfluoralkyl sulfonater som f.eks. PFOS kan have udgjort 0,5-1,5% af AFFF-koncentrat.</p> <p>PFOS er en svag syre og overfladeaktiv. Når koncentrationen i vand overstiger en kritisk koncentration, vil de overskydende molekyler klumpe sammen som miceller.</p> <p>PFOS pka 2,8</p> <p>CMC (critical micelle conc.) 8,7-9 mmoles/l</p> <p>Overfladespændning 15,2 dynes/cm</p>	(Moody & Field 2000)
AFFF	<p>Fluortelomerization medfører, at der indsættes 2 methylenheder (-CH₂-CH₂-) mellem perfluoralkæden og funktionelle grupper som carboxylsyrer eller sulfonsyrer. Nomenklatur for fluortelomer er X:Y, hvor X er antal mættede fluoralkylstoffer og Y er antal kulstoffer i kulstofkæden uden fluor, f.eks. har 6:2 fluortelomer sulfonat (6:2 FTS), 6 fluorerede kulstoffer og 2 methylenheder. 6:2 FTS kan transformeres til PFHxA (C₆-perfluorhexansyre), PFPeA (C₅-perfluorpentansyre) og 5:3 fluortelomersyre (CF₃(CF₂)₄CH₂CH₂COOH, 5:3FTCA), se (Zhang et al. 2013). Fluortelomerforbindelser kan evt. transformeres under sulfat reducerende forhold. 6:2 FTS findes i mange af de nyere AFFF-produkter, men i ældre produkter kan 8:2, 10:2 og 12:2 homologe være til</p>	(Seow 2013)

stede.

Fluortelomer alkoholer produceres også ved telomerization.

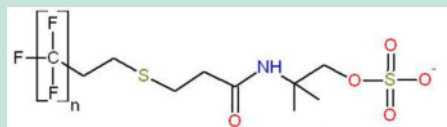
8:2 FTOH adsorberes til jord og kan transformeres til forskellige perfluoralkylcarboxylsyrer se (Liu & Mejia Avendaño 2013), herunder PFOA.

Forholdet mellem PFOA og 7:3 carboxylsyre kan evt. afklare, om PFOA skyldes transformation af 8:2 FTOH eller andre kilder.

AFFF

Den kemiske sammensætning i et fluorotelomer-baseret AFFF-produkt er analyseret og består af fluorotelomer thioamido sulfonater (FtTAoS):

(Harding-Marjanovic et al. 2015)



FtTAoS indgår i mange AFFF-produkter baseret på fluorotelomerization og kan have været anvendt siden 1984. Da 6:2 FtTAoS umiddelbart er den mest sædvanlige homolog i AFFF, kan de hyppige fund af 6:2 FtS og diverse PFCA'er (perfluoralkylcarboxylsyrer) i jord og grundvand ved lokaliteter, hvor der er anvendt AFFF, forklares ved, at der sker transformation til disse stoffer. Se Figur 3-4 i kapitel 3.5 i næværende rapport.

Da FtTAoS indgår i mange AFFF-produkter, kan den samlede PFAS-belastning ved kilden ikke afklares ved at kvantificere indhold af 6:2 FTS og PFCA'er. PFCA'er er de persistente "dead-end" metabolitter.

AFFF Omsætning af precursorer

Ved brandøvelsesområder ved Ellsworth militære lufthavn i USA var grundvandet forurenet med olieprodukter (brandstof), hvorfor der blev igangsat en række afværgeforanstaltninger (SVE, P&T, duel phase ekstraktion bioventing, iltinjicering m.fl.). Desuden var grundvandet forurenet med brandslukningsskum (AFFF).

(McGuire et al. 2014)

PFOS- og PFAA-precursorindhold i grundvand er højere opstrøms i den østlige del af undersøgelsesområdet, hvor der ikke er foretaget iltning af grundvand, end i det vestlige og nedstrøms område, hvor der er foretaget afværgeforanstaltninger, og hvor indhold af PFBA, PFPeA PFHxA, PFHpA og PFOA er højere end i det formodede kildeområde.

I artiklen og i "supporting material" findes illustration af indhold for flere PFAS-forbindelser før og efter oxidation.

Precursorer er ofte kationiske eller amphotere/zwitterioniske tensider, som forventes at være mindre mobile end deres nedbrydningsprodukter, men på grund af afværgeforanstaltning med iltning af grundvand blev dette emne ikke afklaret. Der er dog foretaget en vurdering af K_d -værdier for 8 PFAS-forbindelser.

AFFF-sammen- sætning

3M-AFFF-skumtyper udgør op til 75% af AFFF lagre på militærbaser i USA, hvor der ikke er restriktioner om anvendelse af disse lagre. Alle C8-baserede fluorerede PFAS-forbindelser vil dog blive udfaset før 2015.

(Place & Field 2012)

I alt blev 74 AFFF-produkter analyseret. Disse var produceret af forskellige producenter i perioden mellem 1984 og 2011

AFFF - Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand	Reference
--	-----------

Ti forskellige fluoralkylforbindelser var identificeret i 7 militær-certificerede AFFF-produkter og klassificeret i tre grupper som enten anioniske, kationiske eller zwitterioniske tensider med 4 til 12 kulstoffer i kulstofkæderne. Desuden blev der identificeret flere forskellige fluortelomer tensider.

I tabel S2 i "Supporting Information" er der angivet en oversigt over alle identificerede AFFF-fluoralkylforbindelser. Det er tydeligt, at de nyere AFFF-produkter indeholder en række fluortelomerforbindelser, men ingen PFCA'er (f.eks. PFOA) eller PFSA'er (f.eks. PFOS).

<p>AFFF Canada</p>	<p>Der er foretaget analyse af totalorganofluorforbindelser i 10 AFFF produkter. Da en signifikant del af det totale fluorindhold ikke kan forklares ved standard PFAS-analyser, er der foretaget en detaljeret analyse med LC-MS/MS. 12 nye og 10 forholdsvis sjældne grupper PFAS-forbindelser blev identificeret og omfattede 103 C₃ – C₁₅-forbindelser. Arbejdet tydeliggjorde den store variation i PFAS-sammensætningen i produkterne (samt at flere PFAS-forbindelser findes som urenheder i produkterne). Den potentielle belastning i miljøet, herunder mulighed for omdannelse af PFAA-precursorer til mere persistente PFAS-forbindelser, kan dermed ikke belyses ved analytiske standardteknikker.</p>	<p>(D'Agostino & Mabury 2014)</p>
<p>AFFF C2 og C3-PFSA</p>	<p>Dybdegående analyser (LC-MS/MS-TOF) af PFAS-forbindelser i historiske AFFF-produkter har medført identifikation af C₂ - perfluorethylsulfonat (PF₂ES) og C₃ - perfluorpropansulfonat (PF₃PrS), som udgør henholdsvis 0,22 og 3,5% af PFAS-indholdet. Efterfølgende er disse også fundet i AFFF-lagre og i grundvand ved 11 militære lufthavne i USA. Disse stoffer er meget vandopløselige og kan forventes at bevæge sig hurtigere i forureningsfanen end de andre PFAS-forbindelser, og evt. kunne vise hurtigere gennembrud på et aktivt kulfilter (GAC).</p>	<p>(Barzen-Hanson & Field 2015)</p>
<p>AFFF</p>	<p>Med henblik på at få en oversigt over, hvilke PFAS-forbindelser, der kan forventes ved brandslukningsområder, er det nødvendigt at vide hvilke produkter, der kan have været anvendt. De forskellige PFAS-sammensætninger i disse produkter kan have forskellige skæbner i jord og grundvand.</p> <p>Stofsammensætningen i AFFF (brandslukningsskum) har ændret sig gennem tiden. Da der kan være tale om alt for mange forskellige stoffer i forhold til et fornuftigt analytisk tiltag, er der anvendt oxidationstrin udviklet af (Houtz & Sedlak 2012), hvorved visse PFAS-forbindelser, f.eks. fluortelomere, kan transformeres til PFAA (PerFluoroAlkyl Acids). Disse stoffer kaldes PFAA-precursorer og kan kvantificeres ved den anvendte forbehandling med kemisk oxidation.</p> <p>Ved oxidationstrinnet produceres hovedsagelig PFCA-forbindelser (perfluoralkylcarboxylsyrer) også fra de perfluoralkylsulfonamider (PFOSA) som ellers i naturen kan transformeres biologisk eller mikrobiologisk til f.eks. PFOS. Teknikken kan anvendes ved estimering af den samlede PFAS-koncentration.</p> <p>Før 1976 har AFFF fra 3M ofte haft højt indhold af PFCA-forbindelser. PFCA-forbindelser kan dog også dannes ved transformation af fluortelomer precursorer (PFAA-precursorer) i AFFF-produkter fra andre leverandører produceret efter udfasning af 3M-PFOS-holdige produkter. For eksempel er hovedkomponenten i Forafac®1157, produceret af</p>	<p>(Houtz et al. 2013)</p>

AFFF - Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand		Reference
--	--	-----------

National Foam, 6:2 fluortelomer sulfonamid betain (6:2 FTAB) som kan transformeres til en række metabolitter (Moe et al. 2012).

Ved analyse af 10 forskellige PFAS-forbindelser i historiske AFFF-produkter (1988-2009) ses væsentlig PFAA- bidrag efter oxidation, især for de fluortelomer-holdige AFFF-produkter. Lignende stigninger ses for grundvand, jord og akvifermateriale.

Indholdet af PFAA-precursorer i en jordprøve, hvor forskellen mellem målt og forudsete mængder PFAA efter oxidation er sammenlignet med de målte mængder af precursorer viser, at der måles meget større mængder end forudset, og meget mere end der kan identificeres ved standardanalyser.

PFHxA konstateres ofte i grundvandet, og det antages, at dette skyldes transformation af precursorer, f.eks. C6 sulfonamid baserede forbindelser.

AFFF	Som erstatning for C8-PFOS-holdigt AFFF er der udviklet fluortelomer holdige skum og fluorfrit skum. Brandslukningsevner falder ved anvendelse af de kortkædede fluortelomere og brandslukningsskum indeholder ofte 6:2 FTS.	(Sontake & Wagh 2014)
-------------	--	-----------------------

AFFF Grundvand USA	7 grundvandsprøver fra den tidligere militære Wurtsmith lufthavn er analyseret for op til 47 PFAS-forbindelser ved en metode af (Houtz & Sedlak 2012). Andre grundvandsprøver er kun analyseret for 20 PFAS-forbindelser. De mest almindelige PFAS-grupper var PFCA'er (PFOA) og PFSA'er (PFOS, PFHxS).	(ASTSWMO 2015)
---------------------------	---	----------------

AFFF: Jord Grundvand Overfladevand	<p>Projektplan: Undersøgelser af tre PFAS-forurenedede lokaliteter med henblik på:</p> <ul style="list-style-type: none"> at bestemme PFAS "fingerprint" (den samlede PFAS-belastning inklusiv precursorer) ved analyse for totalfluor ved PIGE (Particle induced gamma ray) og identifikation ved LCMS/MS at afklare art og omfang af PFAS-forurening i kildeområder at identificere jord- og grundvandsegenskaber, som har betydning for transport af PFAS-forbindelser <p>Projektet vil tillade udarbejdelse af en vejledning om, hvordan forureningsfaner kan karakteriseres ved kilden og afgrænses med afstanden til kilden samt hvordan transformation og retardation påvirker transporten.</p>	(Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) 2016)
---	---	---

AFFF og Log Kd	<p>Sammensætning (kun analyse af 11 perfluoralkylforbindelser), spredning og stoffordeling i overfladevand og sediment efter et spild af AFFF ved Toronto Internationale lufthavn blev vurderet 3, 6 og 9 år efter spildet.</p> <p>Log Kd mellem sediment og vand samt bioakkumulering i fisk er malt (baseret på feltmålinger) og stiger med stigende antal kulstof i kulstofkæden.</p> <p>Log KD for perfluoralkyl sulfonater (PFSA'er): 0,54 – 1,65</p> <p>Log KD for perfluorcarboxylater (PFCA'er): 1,00-1,85</p> <p>Log BAFfish for PFSA'er: 1,85 - 3,24</p> <p>Log BAFfish for PFCA'er 0,88 – 3,47</p> <p>log BAFfish lever for PFSA'er 2,1 - 4,3</p> <p>log BAFfish lever for PFCA'er 1,0 – 5,0</p> <p>PFOS og PFOA udgjorde 58 – 88 % af det samlede PFAS-indhold, og</p>	(Awad et al. 2011)
-----------------------	--	--------------------

AFFF - Brandslukningsskum og PFAS-forbindelser i grundvand	Reference
	forholdet mellem PFOS/PFOA havde ikke ændret sig over tid og repræsenterede AFFF-kilden.
AFFF Norge	<p>Der er foretaget en undersøgelse af en forurening med PFAS-forbindelser omkring Evenes Lufthavn i Norge. Der er foretaget analyse af vand- og jordprøver samt batch- og søjleforsøg. Prøverne er analyseret for 12 PFAS-forbindelser og den væsentligste forureningskomponent ved lufthavnen viste sig at være PFOS. Det relative indhold af de kortkædede PFAS-forbindelser steg dog med afstanden fra kilden, idet de er mere mobile end PFOS, som sorberer til mosens tørvelag. Det samlede indhold af PFAS-forbindelser faldt med afstanden til lufthavnen (EVE 3 til EVE 6). EVE7 er udtaget i søen og der er kun konstateret PFOS i denne prøve (15,5 ng/l).</p> <p>Jordprøver med de laveste pH værdier har de højeste indhold af PFAS. Der er foretaget en vurdering af Kd-værdier for de 12 PFAS-forbindelser.</p> <p>(Løland 2014)</p>

Bilag 1-3. Spildevand og lossepladser

Spildevand og lossepladsperkolat		Referencer
Spildevand	N-EtFOSE er en PFAS-forbindelse, som anvendes ved overfladebehandling af papir m.m. N-EtFOSE er dog en precursor til PFOS og kan under aerobe forhold i aktiveret slam i rensningsanlæg omdannes til PFOS. Dog har modellering indikeret, at der kun forventes dannet meget små mængder af PFOS, og at det største nedbrydningsprodukt vil være N-EtFOSAA.	(Rhoads et al. 2008)
Lossepladser Australia	PFAS-forbindelser i perkolat fra lossepladser 6:2 FTS 9,25 µg/l PFHxA 0,99 µg/l	(ALS 2015)
Losseplads- perkolat Canada	Analyse af 4 perfluoralkylsulfonater (PFSA'er), 10 PFCA'er, 6 fluortelomersyrer (FTA'er), og 4 perfluorooctansulfonamider (FOSAM'er), dvs. i alt 24 per- og polyfluoralkylforbindelser (PFAS) i perkolat fra en kommunal losseplads over en periode på 5 måneder. FOSAM'er er precursorer for PFOS og FTA'er er precursorer for PFCA'er. Der blev konstateret signifikante ændringer i forholdet mellem precursorindhold og indhold af de perfluoralkylforbindelser. Endvidere er forholdet mellem forgrenede og lineære PFAS-forbindelser evalueret og vurderet.	(Benskin et al. 2012)
PFAS- forbindelser i losseplads- perkolat - USA	Identifikation og delvis kvantificering af op til 70 forskellige PFAS-forbindelser i lossepladsperkolat fra 7 lokaliteter. PFCA'er (perfluoralkylcarboxylsyrer); PFOA, PFHpA, PFHxA og PFPeA var blandt de stoffer, som måles i de højeste koncentrationer, men diverse fluoralkylsulfonamid eddikesyrer (FASAA'er) og N-methylfluoralkylsulfonamid eddikesyrer (MeFASAA'er) blev også fundet, blandt andet 5:3 FTCA (fluortelomercarboxylsyre) som havde den højeste koncentration. Generelt blev der ikke fundet PFPIA'er og FTMAP'er, som findes i de typer produkter, som ofte deponeres på deponier.	(Mckay Allred et al. 2014)
Losseplads	Laboratorieforsøg til undersøgelse af nedbrydning af PFOS og PFOA i anaerobe microcosm med akvifermateriale fra under en losseplads belastet med PFAS-forbindelser bekræftede, at der ikke sker nedbrydning. Derimod blev der konstateret væsentlig sorption. Retardationskoefficienterne for PFOA og PFOS var på henholdsvis 4,5 og 10. Retardationen blev dog reduceret til mindre end 1,5, da der over tiden skete en stigning i pH fra 7,2 til 8,1 - 8,8, hvorfor sorptionen antages at skyldes elektrostatiske sorption til jordens indhold af ferrioxider.	(Ferrety et al. 2012)
Spildevand og spildevands- slam USA	PFAS-forbindelser kan frigives til miljøet via påvirkning af sediment i vandløb, søer og ved kysten fra spildevandsudledninger samt ved udlægning af spildevandsslam på landbrugsarealer. PFAS-påvirkning kan skyldes såvel industri- såvel som byspildevand. Desværre blev der tidligere ofte kun analyseret for PFOS og PFOA, mens der i dag er meget fokus på PFAA-precursorer, især perfluorooctansulfonamid (PFOSA el. FOSA) som kan omdannes til PFOS. I spildevandsslam blev der målt mellem 176 - 3.390 ng/g (Σ 12 PFAS-forbindelser, herunder FOSAA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA), heraf mellem 14 - 2.610 ng PFOS/g slam. I sediment i områder nedstrøms for vandløb, hvor der udledes spildevand er der målt mellem 0,5 - 16 ng/g. heraf op til 3,8 ng PFOS/g sediment.	(Higgins et al. 2005)

Spildevand og lossepladsperkolat	Referencer
	<p>N-MeFOSAA og N-EtFOSAA blev fundet i koncentrationer svarende til eller højere end PFOS. Især i spildevandsslam udgjorde N-MeFOSAA og N-EtFOSAA op til henholdsvis 2-36% og 7-62% af de samlede PFOS ækvivalenter.</p>
<p>Losseplads-perkolat</p>	<p>Undersøgelse af biologisk nedbrydning og udvaskning fra affald ved laboratorieforsøg under henholdsvis anaerobe (metanogene) og abiotiske forhold. Mange husholdningsprodukter indeholder eller er behandlet med PFAS-forbindelser og ender på lossepladser i USA. Lossepladsperkolat indeholder signifikante mængder af PFAS-forbindelser og kan forurene overfladevand og grundvand. Forskel i perkolatsammensætning efter behandling under abiotisk og anaerobe forhold blev anvendt til at vurdere, om der foregik transformation af precursorer eller blot udvaskning fra fast affald. Da der forventes at PFAS-sammensætningen vil afhænge af affaldsfraktioner, f.eks. dialkyl phosphater i papir- og madindpkningsprodukter og C4-C12 PFCA-forbindelser i tensiderprodukter, blev affaldsarten ligeledes medtaget i vurderingen af udvaskning og potentiel nedbrydning. FTCA er angivet som mere toksisk over for ferskvandlevende organismer end de tilsvarende PFCA.</p>
<p>PFAS-forbindelser i jord fra spildevandsslam</p>	<p>PFAS-forbindelser i spildevandsslam kan udvaskes til en dybde på op til 120 cm i den underliggende jord, dog aftager koncentrationerne til lave niveauer inden for de øverste 20 - 40 cm og de lang-kædede PFAS-forbindelser er mindre mobile end de kortkædede. Det højeste indhold i spildevandsslam var PFOS (80 - 219 µg PFOS/kg, men det samlede indhold af 10 PFAS-forbindelser (sum af PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA, PFDaA, MeFOSAA, EtFOSAA, PFHxS, PFOS, og PFDS) var 433 ±121 µg/kg. Desuden er der tegn på omsætning af PFOS-precursorer; MeFOSAA (2-(N-methylperfluorooctansulfonamido eddikesyre) og EtFOSAA (-N-ethylperfluor-1-octansulfonamido eddikesyre), idet disse precursorer blev fundet i forholdsvis lave indhold i jorden i forhold til indholdet i slammet.</p>
<p>PFAS i landbrugsjord behandlet med spildevandsslam</p>	<p>Jordprøver fra seks områder, hvor spildevandsslam var blevet udlagt, og fra et område uden slambehandling blev analyseret for indhold af fluortelomeralkoholer (FTOH'er). 8: 2nFTOH kan nedbrydes til PFOS og blev fundet i forhøjede koncentrationer på 5 - 73 ng / g tørvægt, idet baggrundsniveauet var mindre end detektionsgrænsen. Det højeste indhold var dog for 10: 2nFTOH på <5,6-166 ng / g. Dette betyder, at slamtilførsel kan medføre en diffus belastning af landbrugsjord.</p>
<p>PFAS i planter dyrket på landbrugsjord behandlet med spildevandsslam</p>	<p>PFCA'er og PFOS) blev konstateret i planter dyrket på landbrugsjord med en diffus PFAS-belastning, men ikke ved kontrolmålinger for planter fra uforurenede marker.</p>
<p>PFAS som luftforurening omkring rensningsanlæg og lossepladser</p>	<p>PFAS-forbindelser er målt i luften omkring et spildevandsanlæg (renseanlæg) og to lossepladser i 2009. Luftprøverne blev analyseret for fem PFAS-klasser (dvs. fluortelomeralkoholer (FTOH'er), perfluorooctan sulfonamider (FOSA'er), sulfonamidoethanols (FOSE'er), perfluoralkylsulfonsyrer (PFAS'er), og perfluoralkylcarboxylsyrer</p>

Canada

(PFCA'er). PFAS-indholdet var 3 -15 gange højere i luftprøver over renseanlæggene (2.280 – 24.040 pg / m³) og 5 -30 gange højere i luftprøver på lossepladserne (2.780 – 26.430 pg / m³) sammenlignet med reference-steder (597 – 1.600 pg / m³). FTOH'er var de dominerende PFAS-forbindelser i luften ved både renseanlægget og lossepladserne, heraf 6: 2 FTOH dominerede ved renseanlægget (895 – 12.290 pg / m³) og 8: 2FTOH dominerede ved lossepladserne (1.290 – 17.380 pg / m³). PFOS var desuden dominerende ved renseanlægget (43 - 171 pg / m³), efterfulgt af perfluorbutansyre (PFBA) (55 - 116 pg / m³), mens PFBA var dominerende ved lossepladserne (101 - 102 pg / m³).

Bilag 1-4. Grundvand, overfladevand og vandløb

PFAS-forbindelser i grundvand, overfladevand og vandløb	Referencer	
Screening af grundvand og overfladevand Sverige	<p>I Sverige er der foretaget en screening af 502 vandprøver med analyse for 26 PFAS-forbindelser. Der er analyseret for 13 PFCA-forbindelser (C4 – C18) og 4 PFSA-forbindelser (C4, C6, C8 og C10) samt en række precursorer, heraf 3 perfluoroktansulfonamider (FOSA/PFOSA, MeFOSA, EtFOSA), 3 perfluoroktan sulfonamido eddikesyrer (FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA), 2 forskellige N-alkyl-perfluoroktansulfonamido-ethanoler (MeFOSE, EtFOSE) og 6:2 FTSA (6:2 FtS). Vandprøverne er udtaget af svensk grundvand (n=164), overfladevand (n=285), søer med uden væsentlige menneskelige påvirkninger (n=10), udledning fra spildevand fra rensningsanlæg (n=13), og lossepladsperskolat (n=10). Den højeste gennemsnitsindhold var i lossepladsperskolat (487 ng Σ26 PFAS /l), efterfulgte af overfladevand (112 ng Σ26 PFAS /l), grundvand (49 ng Σ26 PFAS /l), udledning fra rensningsanlæg (35 ng Σ26 PFAS /l) og baggrund for søer (3,4 ng Σ26 PFAS /l).</p> <p>I grundvand var der en jævn fordeling mellem PFCA'er, PFSA'er og precursorer, mens PFCA'er dominerede i de andre vandtyper. De dominerede PFAS i drikkevand var PFOSA, PFNA, PFDA og 6:2 FtS, som alle sammen indgår i den danske administrative sum-kriterium. Med undtagelse af lave indhold af N-EtFOSAA, N-MeFOSAA og FOSAA i nogle få vandprøver er der ikke konstateret andre precursorer end PFOSA og 6:2 FtS.</p>	(Ahrens et al. 2016)
Screening af grundvand Danmark	<p>Der er foretaget screeningsundersøgelser for forekomst af PFAS i grundvandet på udvalgte lokaliteter, herunder 8 brandøvelsespladser, 4 dagrenovationslossepladser, 2 forkromningsindustrier, en tæppeproducent og en malingsproducent. Screeningsundersøgelser har haft karakter af stikprøvekontrol. Der er påvist indhold af PFAS i grundvand på 5 ud af 8 brandøvelsespladser og i det terrænnære grundvand på fabriksområdet ved tæppeproducent. Ved de udførte undersøgelser er der ikke fundet høje niveauer af PFAS ved lossepladser, forkromningsindustrier eller malingsproducenter.</p>	(Tsitonaki et al. 2014)
PFAS i indløb, udløb og slam fra kommunale rensningsanlæg Danmark	<p>I de kommunale rensningsanlæg er der fundet PFAS i både indløb, udløb og slam og i nogenlunde samme koncentrationsniveauer i alle anlæg med 10 – 75 ng/l i indløb, 10 – 40 ng/l i udløb og 12 – 150 µg/kg tørstof i slam. Der er analyseret for sum af 7 PFAS-forbindelser; PFOS, PFOSA, PFHxS, PFO, PFNA, PFDA og PFUnA.</p>	(Strand et al. 2007)
PFAS i grundvand Danmark	<p>Naturstyrelsen har foretaget screeningen for PFAS-forbindelser i 45 udvalgte grundvandsovervågningsboringer i efteråret 2014. I screeningsundersøgelsen er der fundet indhold af PFOS (1,7 – 100 ng/l i 2/45 indtag), PFHxS (0,3- 10 ng/l i 4/45 indtag), PFOA 10- 29 ng/l i 3/45 indtag og PFHpA (7,5 ng/l i 1/45 indtag). I 6 ud af de 45 undersøgte boringsindtag blev fundet 1 eller flere af disse 4 perfluorforbindelser.</p>	(Naturstyrelsen 2015b)
PFAS i grundvand Danmark	<p>I 2010 blev der undersøgt i alt 57 prøver udtaget på 43 lokaliteter i Danmark. Prøverne er analyseret for 6 PFAS-forbindelser (PFBS, PFOS, PFHpA, PFOA, PFNA og PFDA). Ved planlægningen af prøvetagningen blev to boringer udvalgt</p>	(Enevoldsen & Juhler 2014)

PFAS-forbindelser i grundvand, overfladevand og vandløb	Referencer
<p>til screeningsundersøgelsen pga. deres beliggenhed nær forventede mulige punktkilder som brandslukningsøvelsesområder (Esbjerg brandskole samt beredskabsstyrelsens områder ved Hedehusene). Generelt blev der kun konstateret indhold omkring Hedehusene, dvs. at kilden antages at skyldes brandslukningsøvelser.</p> <p>Overfladevand og drikkevand USA</p>	<p>8 traditionelle PFAS-forbindelser (PFHxS, PFOS, PFHxA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA og PFDoA) er monitoreret 4 gange (hvert kvartal) i 2008 i både råvand og behandlet drikkevand fra 7 USA lokaliteter. Desuden blev prøver af behandlet spildevand og fra overfladekilder analyseret. De 7 drikkevandsanlæg producerede vand fra henholdsvis 1 grundvandsmagasin, 4 overfladekilder - herunder overfladekilder belastet med spildevand, og 2 anlæg med sekundær og tertiær behandling af spildevand. Drikkevand produceret af behandlet spildevand samt fra et vådområde (wetland) belastet med spildevand havde de højeste indhold af PFAS-forbindelser. De højeste indhold blev fundet for følgende stoffer: PFOA (maks. 115 ng/l), PFOS, PFHxS og PFHxA.</p> <p>(Quiñones & Snyder 2009)</p>
<p>Overfladevand Regnvand Tyskland</p>	<p>Analyse af 7 perfluoralkylforbindelser i infiltreret flodvand og renvand samt i flodvand, hvor det højeste indhold var for perfluorbutansulfonat (PFBS: 8-89 ng/l). Analyserne omfatter kun et begrænset antal PFAS-forbindelser og ingen precursorer.</p> <p>(Eschauzier et al. 2010)</p>
<p>Oxidation Overfladevand Afstrømning fra byområder USA</p>	<p>Der er udviklet en ny metode til bestemmelse af precursorer og den samlede belastning med PFAS-forbindelser i afstrømmende overfladevand fra omkring San Francisco, USA.</p> <p>PFAS-kilder kan omfatte mange forskellige PFAS-grupper, herunder C8-perfluoralkylsulfonamider (FOSA), 2-(N-methylperfluorocetan-sulfonamido) eddikesyre (N-MeFOSAA) og polyfluoroalkylphosphatmono og diesters (mono- og diPAP'er), fluortelomersulfonater og -alkohols, samt fluorerede polymer.</p> <p>Ved at sammenligne indholdet af PFCA'er før og efter kraftig oxidation med hydroxyl radikaler (dannet ved thermolysis af persulfat $-S_2O_8^{2-}$) kan det samlede precursorindhold evalueres.</p> <p>Ved standardanalyser for ca. 23 PFAS-forbindelser i 33 vandprøver fra 10 lokaliteter blev mindst 7 stoffer konstateret i de enkelte prøver, heraf 6-42 ng/l for sum af PFCA'er og 2,6-33 ng/l for PFSA'er, hvor det højeste indhold var for PFOS. Indholdet af C8-precursorer (FOSA, N-EtFOSAA, N-EtFOSE, N-MeFOSAA, 8:2 FtS og 6:2 FtS) var lavt 1 – 1,8 ng/l.</p> <p>Efter oxidation var der en signifikant stigning i PFPeA og PFHxA, og sum af PFCA-forbindelser steg til 2,8 – 56 ng/l. Data fra de 10 lokaliteter indikerede, at indholdet af precursorer i afstrømmende vand fra byområder kan være signifikant.</p> <p>Artiklen nævner, at mens visse PFAA-precursorer (f.eks. perfluoralkylsulfonamider) omdannes til PFSA'er ved mikrobiologiske og biologiske processer, vil oxidation med OH under de anvendte forhold kun resultere i dannelse af PFCA'er.</p> <p>(Houtz & Sedlak 2012)</p>

PFAS-forbindelser i grundvand, overfladevand og vandløb	Referencer
<p>Spildevands- slam og påvirkning af brønd- og overfladevand</p> <p>Spildevandsslam indeholder ofte PFAS-forbindelser, herunder PFOS og PFOA.</p> <p>I Alabama, USA, er der siden 1990 udlagt slam på landbrugsjord fra et spildevandanlæg (Decatur) for industrispildevand, blandt andet fra industri med produktion af PFAS-holdige materialer.</p> <p>Fra landbrugsområdet er der udtaget 51 vandprøver fra brønd- og overfladevand, som er analyseret for 10 PFAS-forbindelser.</p> <p>57% indeholdt PFOA i intervallet 10 - 11.000 ng/l, heraf 22% med en overskridelse af Alabama's drikkevandskriterium på 400 ng PFOA/l. De højeste indhold fundet var i overfladevand.</p> <p>29% indeholdt PFOS i intervallet 10 - 151 ng/l, dvs. ingen overskridelse af drikkevandskriteriet på 200 ng PFOS/l.</p> <p>Jordprøver indeholdt 30 - 410 ng PFOS/g og 50 - 320 ng PFOA/g, men de højeste indhold var henholdsvis 130 - 990 ng PFDA/g og 30 - 530 ng PFDoA/g.</p>	(Lindstrom et al. 2011)
<p>Overfladevand Floder Japan</p> <p>For flodvand, hvor der var en god korrelation mellem indhold af PFOS, PFHpA og PFNA samt indhold af crotamiton, en almindelig farmaceutisk forureningsparameter i husspildevand, er det vurderet, at PFAS-forbindelser stammer fra husspildevandet. Derimod var der høje indhold af PFOA i nogle af vandprøverne. Såfremt forholdet mellem PFOA og crotamiton var højt, var prøverne klassificeret som G1 og det blev antaget at PFAS-forureningen skyldtes industrikilder. Ved et lavt indhold af PFOA/crotamiton vurderedes kilden at skyldes en belastning med spildevand.</p>	(Murakami et al. 2008)
<p>Overflade- afstrømning til vandløb Canada</p> <p>Undersøgelse af PFCA i vandløb, sne og grundvand samt bidrag ved overfladevandafstrømning ifm. snesmeltning fra et tæt bebygget byområde. Hovedkomponenterne var PFHxA, PFOA og PFHxS på henholdsvis 4 - 14 ng/l, 2,2 - 7,9 ng/l og 2,1 - 6,5 ng/l. Forhold og sammensætning mellem PFAS-forbindelser i vandløb/overfladevand-afstrømning og grundvandsmagasinet var evalueret. Det afstrømmende vand/vandløb viser et forholdsvis højere indhold af de lang-kædede PFAS-forbindelser end i grundvand. Dette viser, at de kort-kædede PFAS-forbindelser udvaskes til større dybde i grundvandsmagasinet.</p>	(Meyer et al. 2011)
<p>PFAS- forbindelser i vandløb</p> <p>Identifikationen af PFAS-forbindelser i 9 vandprøver af overfladevand (vandløb) opstrøms og nedstrøms for lokaliteter forurenede med PFAS-forbindelser.</p> <p>Identifikation er foretaget med "time of flight mass spektrometry" (LC-ESI-TOFMS). Indledningsvis er der analyseret for 10 traditionelle PFAS-forbindelser: C4 - C10 PFCA'er samt PFOS, PFHxS og PFBS, hvor koncentrationsniveauerne var mellem 100 - 51.000 ng/l bestående af især PFPeA, PFHpA og PFBA. Herefter er der analyseret med TOFMS. For de lokaliteter, hvor der var store afvigelser mellem de traditionelle analyser for 10 PFAS-forbindelser og det samlede PFAS-indhold målt ved TOFMS, blev der foretaget identifikation af de dominerende ukendte stoffer. 12 nye perfluoralkylethercarboxylsyre og -sulfonsyrer blev identificeret.</p>	(Strynar et al. 2015)
<p>Vandløb Sverige</p> <p>Med henblik på en vurdering af PFAS-belastningen i svenske vandløb er vandprøver fra 44 lokaliteter analyseret for op til 25 stoffer.</p> <p>Stofsammensætningen ("Fingerprint") og stofniveauet i forskellige typer vandløb (geografiske, vandføring, bymæssige belastning, m.v.) er</p>	(Ribeli 2014)

sammenlignet.

De 6 mest belastede vandløb (26- 690 ng/l for sum af PFAS) havde et ensartet "fingerprint" med høje indhold af PFBS, PFHxS, PFOS og PFNA. Indhold af PFOS var mindre end EU-miljøkvalitetskrav på 0,65 ng PFOS/l (EU 2013) for 32 lokaliteter ud af de 44, men i vandprøver fra de andre 12 lokaliteter blev der målt mellem 0,71 og 6,9 ng PFOS/l.

Molekyleformel, CAS nr., molekylvægt, log Kow og damptryk for de 25 stoffer er angivet.

Bilag 1-5. Transformation af PFAS-forbindelser

Transformation af PFAS-forbindelser	Referencer
Transformation Redegørelse for nedbrydningspotentialer og nedbrydningsveje for især polyfluoralkylforbindelser. Detaljeret litteraturgennemgang og vurderinger. I tabel 1 i artiklen opsummeres nedbrydningsprodukter og -forhold (jord, slam, perkolat, aerobe, anaerobe), halveringstider og kildeangivelse for laboratorieforsøg m.v. for 17 forskellige PFAS-grupper.	(Liu & Mejia Avendaño 2013)
Transformation af FTOH Naturligt forekommende bakteriestammer i jordmiljøet kan medføre nedbrydning af 8:2 fluortelomer alkohol (8:2 FTOH) til perfluorooctansyre (PFOA) og andre PFCA'er ved cometabolisme, dvs. nedbrydning er afhængig af omsætning af andre letnedbrydelige kulstofkilder.	(Liu et al. 2007)
Transformation PFOA konstateres ofte i miljøprøver og kan skyldes transformation af fluortelomeralkoholer. Aerob omsætning af 8:2 FTOH til PFOA er dokumenteret og mulige nedbrydningsveje og mellemprodukter er skitseret.	(Dinglasan et al. 2004)

Bilag 1-6. Sammensætning i blodserum

Udvikling i belastning i blodserum		Referencer
Serum-niveauer og PFAS-sammensætning	<p>Analyse af PFAS i blodserum i perioderne 1999-2000, 2003-2004, 2005-2006 og 2007-2008.</p> <p>USA-registret for PFAS-forbindelser i blodserum indikerer et faldende indhold af forgrenede PFOA i forhold til lineære PFOA i perioden 1999-2000 til 2007-2008. Ændringerne i forholdet afspejler ændringer i produktionsmetoder for PFAS-forbindelser.</p> <p>Efter udfasning af PFOS-produktionen, som typisk sket ved elektrokemisk klorering (ECF) og medførte dannelse af både forgrenede og lineære isomere, er produktion af PFAS-forbindelser siden sket ved telomerization, hvorved kun dannes lineære isomere.</p> <p>Ligeledes er der konstateret faldende indhold af PFOS i blodserum på grund af udfasning af PFOS produktionen.</p>	(Kato et al. 2011)
Blodserum	<p>I perioden 2001 – 2010 har PFOS-niveauerne i blodserum i mennesker været faldende og indikerer en halveringstid i befolkningen på 4,3 år. Derimod er der ingen faldende tendenser for PFHxS (som ofte findes i husstøv).</p> <p>Eksponering, som skyldes de fluortelomer-baserede tensider som polyfluoralkylphosphatdiester (diPAPs) og 8:2 fluortelomer alkoholer, kan dog evt. medføre en fortsat belastning med PFCA'er, herunder PFOA.</p>	(Olsen et al. 2012)
Nye PFAS-forbindelser i blodserum på brandmænd	<p>Ud over de kendte PFAS-forbindelser, herunder PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS og PFNS, blev der også konstateret højere indhold af 4 ukendte PFOS- og PFHxS-forbindelser (substituerede med chlor-, ether- og keton-grupper) i blodserum på brandmænd, eksponeret for AFFF, end i blodserum på en kontrolgruppe.</p> <p>Quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry (QTOF-MS/MS) blev anvendt til at identificere tilstedeværelse af ukendte PFAS-forbindelser.</p>	(Rotander et al. 2015)

Bilag 2: Ordliste og forkortelser

Ordliste	Forklaring
Nedbrydning	Nedbrydning betyder, at et stof udsættes for en omdannelse til andre stoffer. Ofte forstås nedbrydning som en fuldstændig nedbrydning, hvor det organiske stof omdannes til kuldioxid, vand og salte. Ved delvis nedbrydning er der i dette rapport anvendt begreb transformation.
Transformation	Ved transformation af et organisk stof sker der en omdannelse til et nedbrydningsprodukt, som kan være stabilt eller omdannes videre. Transformation og nedbrydningsprodukter kan illustreres ved visualisering af de mulige nedbrydningsveje.

Forkortelse	Definition eller stofnavn	Gruppe (G) eller Stofnavn (S)	Formel	DK sum-kriteriet (Miljøstyrelsen 2015a)
10:2 FTOH	10:2 Fluorotelomer alcohol	S	$C_{10}F_{21} \cdot C_2H_4 \cdot OH$	
4:2 FTOH	4:2 Fluorotelomer alcohol	S	$C_4F_7 \cdot C_2H_4 \cdot OH$	
5:3 FTCA	5:3 Fluorotelomercarboxylic acid	S	$C_5F_{11} \cdot C_2H_4 \cdot CO_2H$	
6:2 FTOH	6:2 Fluorotelomer alcohol	S	$C_6F_{13} \cdot C_2H_4 \cdot OH$	
6:2 FTS	6:2 Fluorotelomer sulfonate	S	$C_6F_{13} \cdot C_2H_4 \cdot SO_3H$	✓
6:2 FtTAoS	6:2 Fluorotelomer thioamido sulfonate	S		
6:2FTAB	6:2 fluorotelomer sulfonamide betaine	S		
8:2 FTOH	8:2 Fluorotelomer alcohol	S	$C_8F_{17} \cdot C_2H_4 \cdot OH$	
8:2 FTS	8:2 Fluorotelomer sulfonate	S	$C_8F_{17} \cdot C_2H_4 \cdot SO_3H$	
8:2 FtTAoS	6:2 Fluorotelomer thioamido sulfonate	S		
AFFF	Aqueous Film-Forming Foams	-		
AFFN	Ammoniumperfluoronanoate	S		
DiPAP	Polyfluoroalkylphosphoric acid diesters	G		
ECF	Elektrokemisk fluorering	-		
FOSA	se PFOSA	S		
FASAA	Fluoroalkyl sulfonamide acetic acids	G		
FOSAM	Perfluorooctane sulfonamides	G		
FOSAA	Perfluorooctanesulfonamidoacetate	S	$C_8F_{17}SO_2N(CH_2CO_2H)H$	
MeFOSA	N-methylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetate	S	$C_8F_{17}SO_2N(CH_3)CH_2CO_2H$	
EtFOSAA	N-ethylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetate	S	$C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)CH_2CO_2H$	
FTA	Fluorotelomer acids	G		
FTCA	Fluorotelomercarboxylic acids	G		

Forkortelse	Definition eller stofnavn	Gruppe (G) eller Stofnavn (S)	Formel	DK sum-kriteriet (Miljøstyrelsen 2015a)
FTMAP	Fluorotelomer mercaptoalkyl phosphate esters	G		
FTP	Fluortelomer polymer	G		
FtTAoS	Fluorotelomer thioamido sulfonates	G		
H4PFUnA	2H,2H,3H,3H-perfluoroundecanoic acid	S	$C_8F_{17} \cdot C_2H_4 \cdot COOH$	
N-EtFOSAA	2-(N-ethylperfluorooctanesulfonamido acetic acid	S	$C_8F_{17} \cdot SO_2 N(C_2H_5)CH_2CO_2H$	
N-MeFOSAA	2-(N-methylperfluorooctanesulfonamido) acetic acid	S	$C_8F_{17} \cdot SO_2 N(CH_3)CH_2CO_2H$	
PFAS	Perfluoro and polyfluoroalkyl substances	G		
PFBA	Perfluorobutanoic acid	S	$C_3F_7 \cdot COOH$	✓
PFBS	Perfluorobutane sulfonic acid	S	$C_4F_9 \cdot SO_3H$	✓
PFCA	Perfluoroalkyl carboxylic acid	G		
PFDA	Perfluorodecanoic acid	S	$C_9F_{19} \cdot COOH$	✓
PFDoDA	Perfluorododecanoic acid	S	$C_{11}F_{23} \cdot COOH$	
PFDoDS	Perfluorododecane sulfonic acid	S	$C_{12}F_{25} \cdot SO_3H$	
PFDS	Perfluorodecane sulfonic acid	S	$C_{10}F_{21} \cdot SO_3H$	
PFECA	Perfluoroalkyl ether carboxylic acids	G		
PFECHS	Perfluoroethylcyclohexane sulfonate	S		
PFEtS	Perfluoroethylsulfonate (C2)	S	$C_2F_5 \cdot SO_3H$	
PFHpA	Perfluoroheptanoic acid	S	$C_6F_{13} \cdot COOH$	✓
PFHpS	Perfluoroheptane sulfonic acid	S	$C_7F_{15} \cdot SO_3H$	
PFHxA	Perfluorohexanoic acid	S	$C_5F_{11} \cdot COOH$	✓
PFHxS	Perfluorohexane sulfonic acid	S	$C_6F_{13} \cdot SO_3H$	✓
PFNA	Perfluorononanoic acid	S	$C_8F_{17} \cdot COOH$	✓
PFNS	Perfluorononane sulfonic acid	S	$C_9F_{19} \cdot SO_3H$	
PFO	Perfluorooctanate (ion form of PFOA)	S	$C_7F_{15} \cdot COO^-$	
PFOA	Perfluorooctanoic acid	S	$C_7F_{15} \cdot COOH$	✓
PFOS	Perfluorooctane sulfonic acid	S	$C_8F_{17} \cdot SO_3H$	✓
PFOSA (FOSA)	Perfluorooctane sulfonamide	S	$C_8F_{17} \cdot SO_2 \cdot NH_2$	✓
PFPA	Perfluorophosphonates	G		

Forkortelse	Definition eller stofnavn	Gruppe (G) eller Stofnavn (S)	Formel	DK sum-kriteriet (Miljøstyrelsen 2015a)
PFPeA	Perfluoropentanoic acid	S	$C_4F_9 \cdot COOH$	✓
PFPeS	Perfluoropentane sulfonic acid	S	$C_5F_{11} \cdot SO_3H$	
PFPIA	Perfluorophosphinates	G		
PFPrS	Perfluorpropansulfonate (C3)	S	$C_3F_7 \cdot SO_3H$	
PFTDA	Perfluorotetradecanoic acid"	S	$C_{13}F_{27} \cdot COOH$	
PFTrDA	Perfluorotridecanoic acid	S	$C_{12}F_{25} \cdot COOH$	
PFUnDA (PFUnA)	Perfluoroundecanoic acid	S	$C_{10}F_{21} \cdot COOH$	
PFUnDS	Perfluoroundecane sulfonic acid	S	$C_{11}F_{23} \cdot SO_3H$	
PFAA	Perfluoralkyl acids	G		

Spredning og sammensætning i grundvand ved PFAS-forureninger

Denne rapport indeholder en gennemgang og systematisering af relevant litteratur om grundvandsforurening med PFAS-forbindelser med henblik på at skabe overblik over stofsammensætningen i grundvandet ved forureningskilderne og nedstrøms for disse.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk