



PFAS-påvirkning fra hav til land Del 1

Teknologiprogrammet for
jord- og grundvandsforurening

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Anne Bomann Henriksen, NIRAS A/S

Søren Rygaard Lenschow, NIRAS A/S

Anders G. Christensen, NIRAS A/S

Fotos:

Søren Rygaard Lenschow, NIRAS A/S (fotos/tegninger)

Rasmus Bülow Hansen, NIRAS A/S (fotos)

ISBN: 978-87-7564-029-4

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Sammenfatning og konklusioner	6
3.	Summary and conclusion	8
4.	Indledning	10
5.	Litteraturstudie	11
5.1	Baggrund	11
5.2	PFAS er surfaktanter	11
5.3	Opkoncentrering i havoverfladen	11
5.4	Opkoncentrering ved bølger	13
5.5	Erfaringer og viden fra undersøgelser	14
5.5.1	Spredning af PFAS ved kyster og strande på lokal eller regional skala med særlig fokus på skumdannelse	14
5.5.1.1	Lemvig Kommune, Region Midtjylland	14
5.5.1.2	Miljøstyrelsen - badevandsundersøgelser og havvand samt havskum	20
5.5.1.3	Undersøgelser Hirtshals	22
5.5.1.4	Holstebro Kommune	24
5.5.1.5	Hanstholm Kildeplads	25
5.5.1.6	Naturstyrelsens arealer langs vestvendte kyster	26
5.5.1.7	Påvirkning ved rekreativt ophold i havet, Thy	27
5.5.1.8	Belgien	27
5.5.1.9	Holland	29
5.5.1.10	USA	32
5.5.2	Spredning af PFAS på global skala fra havvand med fokus på Sea Spray Aerosols	33
5.5.2.1	Indhold af PFAS i havvand	33
5.5.2.2	Dannelse af SSA fra havvand	34
6.	Feltundersøgelser i Husby Klitplantage	37
6.1	Udvælgelse af lokalitet og omfang af undersøgelse	37
6.2	Metodeverifikation	37
6.2.1	Analyseresultater for metodeverifikation	38
6.3	Prøvetagning	38
6.3.1	Boringer	38
6.3.2	Overfladejord	40
6.3.3	Grundvand	40
6.3.4	Overfladevand	40
6.3.5	Havvand og havskum	40
6.4	Analyser	41
7.	Geologiske og hydrogeologiske forhold	42
7.1	Regional geologi og hydrogeologi	42
7.2	Lokalitetens geologi og hydrogeologi	43

7.2.1	Pejlinger og grundvandsstrømning	45
8.	Analyseresultater	46
8.1	Analyseresultater for jord	46
8.2	Analyseresultater for grundvand	47
8.2.1	Vertikal udbredelse grundvand	49
8.3	Analyseresultater for overfladevand	50
8.4	Havvand og havskum	52
9.	Vurdering af undersøgelsesresultater	53
9.1	Sammenstilling af analyseresultater med tilsvarende undersøgelser	53
9.2	Konceptuel forståelse af opkoncentrering og spredning af PFAS i havvand til jord, grundvand og overfladevand	55
9.3	Vurdering af, om der forekommer PFAS-signaturer, som kan skelne mellem diffus PFAS-forurening fra havet og fra punktkilder	58
10.	Risikovurdering	60
11.	Diskussion	62
12.	Konklusion	65
13.	Referencer	67
14.	Forkortelser	70
15.	Bilag	71

Bilagsoversigt

Bilag 1	Situationsplan med angivelse prøvetagningssteder og naturforhold
Bilag 2	Situationsplaner med forureningsindhold
	Bilag 2.1 Situationsplan, resultater vandprøver
	Bilag 2.2 Situationsplan, resultater jordprøver
Bilag 3	Oversigtskort grundvand
Bilag 4	Geologisk profilsnit
Bilag 5	Konceptuel model
Bilag 6	Borejournaler
Bilag 7	Feltjournaler - Vandprøvetagningsskemaer
Bilag 8	Analyseresultater, tabeller
Bilag 9	Analyserapporter
	9.1 Analyserapporter: Jord
	9.2 Analyserapporter: Grundvand
	9.3 Analyserapporter: Overfladevand
	9.4 Analyserapporter: Havvand og havskum
Bilag 10	Datablade – prøvetagning af skum og havvand
Bilag 11	Fotos
Bilag 12	Beregninger med GSI Mann-Kendall Toolkit

1. Forord

Denne rapport er resultatet af et projekt under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening. NIRAS er kontraktholder og har gennemført projektet med Region Midtjylland og Lemvig Kommune som medfinansierende af projektet. Der er sideløbende udført tilsvarende undersøgelser på Fanø i Region Syddanmark. Denne undersøgelse er finansieret af Region Syddanmark under den Syddanske Udviklingspulje for Jord og Grundvand og er afleveret i en særskilt rapport (Region Syddanmark, 2023).

Projektet har til formål at afdække, hvorvidt lave indhold af PFAS i havet kan opkoncentreres i strandzonen og spredes via havskum og aerosoler til kystnære områder og påvirke grundvand, overfladevand og jord. Viden fra projektet vil kunne anvendes af regioner, kommuner og rådgivende ingeniørfirmaer i forbindelse med kystnære forureningsundersøgelser af punktkilder, hvor der skal være opmærksomhed på, at PFAS kan stamme fra opkoncentreret, diffus forurening i havvand. Der kan således forekomme høje koncentrationer af PFAS i primært grundvand og overfladevand, som ikke har relation til den undersøgte punktkilde. Viden fra projektet kan desuden være relevant for forsyninger og private med kystnære indvindingsboringer, ved jordflytninger og grundvandssænkninger i forbindelser med kystnære byggeprojekter og for kystnære markarealer/naturarealer med afgræsning.

Projekt- og følgegruppe bestod af følgende personer:

Region Midtjylland – Halfdan R. Sckerl og Thomas Ljungberg

Lemvig Kommune – Morten Corneliusen

Miljøstyrelsen – Maiken Lundstad Nielsen og Jesper Jensen

NIRAS – Anne Bomann Henriksen, Søren Rygaard Lenschow og Anders G. Christensen

2. Sammenfatning og konklusioner

Projektet har omfattet et litteraturstudium, som beskriver teori og resultater fra undersøgelser vedrørende den kystnære forekomst af PFAS i ind- og udland. Der er foretaget flere undersøgelser, som har påvist PFAS i bl.a. jord og grundvand, overfladevand, aerosoler, hav og havskum. Projektet har også omfattet feltundersøgelser ved Husby Klitplantage i Region Midtjylland med henblik på at vurdere spredning af PFAS fra hav til land i dette område. Undersøgelserne omfatter prøvetagning af jord, grundvand og overfladevand samt havvand og havskum. Prøverne er udtaget i et transekt med varierende afstand fra havet.

Litteraturgennemgangen har bestyrket hypotesen om, at der kan forekomme forureningsspredning af PFAS over land som følge af opkoncentrering fra lave koncentrationer i havet. Denne opkoncentrering er påvist i aerosoler og skum i laboratorieforsøg, og PFAS i aerosoler er påvist på strande i Belgien og på fjeldet i Norge. Der er udtaget adskillige havvandsprøver, der alle viser indhold af PFAS, i størrelsesordenen pikogram til nanogram, og der er udtaget skumprøver fra både Nordsøen, søer og åer, der alle viser opkoncentrerede niveauer af PFAS. Endelig er der i studier fra Holland påvist indhold af PFAS i terrænnært grundvand, der tilskrives diffus forurening fra havet.

Undersøgelserne af jord, grundvand og overfladevand i Husby Klitplantage viser, at der kan påvises PFAS i alle de tre undersøgte medier:

- Der er i jordprøver påvist indhold af sum af 22 PFAS i 11 ud af 23 analyserede jordprøver med indhold fra 0,7 µg/kg TS og op til 7 µg/kg TS.
- Der er i samtlige borer udført i det sydvest-nordøstgående transekt påvist PFAS i grundvandet. Koncentrationerne er aftagende fra vest mod øst, og der er således påvist indhold af sum af 22 PFAS på op til 45 ng/l i borerne mod vest og ned til 5,9 ng/l i borer mod øst. Der er påvist indhold af sum af 4 PFAS, der overskrider grundvandskvalitetskriteriet i alle borer.
- Der er i samtlige vandprøver fra overfladevand (søer og vandhuller) påvist indhold af PFAS med et indhold af sum af 22 PFAS på op til 110 ng/l. Miljøkvalitetskravet for PFOS i fersk overfladevand (0,65 ng/l) er overskredet i alle analyserede vandprøver (med op til en faktor ca. 100).

Der blev som forventet påvist aftagende koncentrationer af PFAS i grundvandsprøverne des længere væk fra kysten prøverne blev udtaget. Det var kun muligt at finde overfladevand i nærheden af fire borer, og de fire overfladevandprøver er ikke tilstrækkelige til at sige noget om en tendens for PFAS-koncentration i forhold til afstand til havet. For jordprøverne ses der ingen tydelig sammenhæng mellem PFAS-koncentrationer og afstand til havet.

Der ses i grundvandsprøver og overfladevandsprøver overvejende forbindelserne PFOA, PFOS og PFHxS.

Resultaterne for PFAS i jordprøver, grundvand og overfladevand fra Husby Klitplantage er sammenlignelige med resultater fra andre kystnære projekter. Der forekommer dog forskelle i størrelsesordenen af forureningsgraden. Det vurderes, at graden, hvormed et kystnært

område kan være påvirket af diffus forurening fra havet, enten kan være afhængig af ikke-lokaliserede lokale kilder til PFAS-forurening eller af kystmorfologiske, geologiske og hydrogeologiske forhold.

Viden fra projektet vil kunne anvendes i forbindelse med kystnære forureningsundersøgelser af punktkilder, hvor der skal være opmærksomhed på, at PFAS kan stamme fra opkoncentreret, diffus forurening i havvand. Der kan således forekomme høje koncentrationer af PFAS i primært grundvand og overfladevand, som ikke har relation til den undersøgte punktkilde. Den kystnære påvirkning fra aerosoler kan derfor udgøre en risiko for offentlige og private drikkevandsbrønde samt forårsage problemer med forurening af vilde dyr (vildt og fisk) og husdyr i kystområder. Viden fra projektet kan desuden være relevant ved jordflytninger og grundvands-sænkninger i forbindelse med kystnære byggeprojekter.

3. Summary and conclusion

The project included a literature review that describes the theory and results from studies regarding the coastal occurrence of PFAS, both domestically and internationally. Several studies have been conducted that have detected PFAS in soil and groundwater, surface water, aerosols, sea water, and sea foam. The project also included field studies at Husby Klitplantage (nature area with dunes and pine trees) in the Central Denmark Region to assess the spread of PFAS from sea to land in this area. The investigations included sampling of soil, groundwater, surface water, sea water and sea foam. Samples were taken along a transect at varying distances from the sea.

The literature review has strengthened the hypothesis that PFAS contamination can spread over land due to concentration from low levels in the sea. This concentration has been demonstrated in aerosols and foam in laboratory experiments, and PFAS in aerosols has been detected at beaches in Belgium and in the mountains in Norway. Numerous sea water samples have been taken, all showing PFAS content in the range of picograms to nanograms, and foam samples have been taken from both the North Sea, lakes, and rivers, all showing enriched levels of PFAS. Finally, studies from the Netherlands have detected PFAS in near-surface groundwater, attributed to diffuse contamination from the sea.

The investigations of soil, groundwater, and surface water at Husby Klitplantage show that PFAS can be detected in all three media examined:

- PFAS was detected in 11 out of 23 analyzed soil samples, with contents ranging from 0.7 µg/kg TS to 7 µg/kg TS.
- PFAS was detected in all groundwater samples from shallow monitoring wells in the southwest-northeast transect. Concentrations decrease from west to east, with PFAS levels up to 45 ng/l in the western boreholes and down to 5.9 ng/l in the eastern boreholes. PFAS levels exceeding the Danish groundwater quality criteria were detected in all samples for wells, and there was a significant decreasing trend for PFHxS, PFOS and sum of PFAS (4/22 PFAS). For PFOS there was no trend in concentration.
- PFAS was detected in all samples from surface waters (lakes and ponds), with PFAS levels up to 110 ng/l. The environmental quality standard for PFOS in fresh surface water (0.65 ng/l) was exceeded in all analyzed water samples (by up to a factor of approximately 100).

As expected, decreasing PFAS concentrations were detected in groundwater samples the further away from the coast the samples were taken. It was only possible to find surface water (lakes and ponds) near four of the monitoring wells for groundwater, and the four surface water samples are not sufficient to determine a trend for PFAS concentration in relation to distance from the sea. No clear correlation between PFAS concentrations and distance from the sea was observed in the soil samples.

The groundwater and surface water samples predominantly contained the compounds PFOA, PFOS, and PFHxS.

The results for PFAS in soil, groundwater, and surface water at Husby Klitplantage are comparable to results from other coastal projects. However, there are differences in the magnitude of contamination. It is assessed that the degree to which a coastal area can be affected by diffuse contamination from the sea may depend on coastal morphological, geological, and hydrogeological conditions.

Knowledge from the project can be used in investigations of point sources in the coastal zone, where attention should be paid to the fact, that PFAS may originate from concentrated, diffuse contamination (sea spray aerosols and sea foam) from sea water. High concentrations of PFAS may therefore occur primarily in groundwater and surface water in coastal zones, which are not related to the investigated point source. The coastal impact of sea spray aerosols has impact on ground water, and will therefore be a risk for public and private drinking water wells. The impact may also cause problems with contamination of wildlife (game and fish) and livestock in coastal zones. Knowledge from this project may also be relevant for soil relocations and groundwater lowering in connection with coastal construction projects.

4. Indledning

Undersøgelser udført i april til juni 2022 i Lemvig Kommune viste indikationer af, at PFAS kan opkoncentreres og spredes via havskum til jord, græs, grundvand og overfladevand i områder langs Vestkysten. Undersøgelserne blev iværksat på baggrund af fund af relativt høje koncentrationer af PFAS-forbindelser ved en losseplads og prøver fra drænsystemet under Thyborøn By (Lemvig Kommune, 2022). Undersøgelsen blev udført af Lemvig Kommune, Region Midtjylland, Lemvig Vand og Naturstyrelsen Vestjylland ved hjælp fra de rådgivende virksomheder WSP og NIRAS.

Undersøgelserne viser, at der fra relativt lave indhold af PFAS i havvand kan ske opkoncentrering og spredning af PFAS til kystnære områder. Spredningen sker via havskum og aresoler, som transporteres med vestenvind ind over kystnære landområder. Undersøgelserne viste påvirkning over en 35 km lang kyststrækning. Undersøgelserne omfattede prøvetagning fra kystlinjen og indtil 550 m ind i landet. Der blev observeret en aftagende påvirkning med afstand til kystlinjen, hvor der fortsat var væsentlig påvirkning 550 m fra kysten (Lemvig Kommune, 2022)

På baggrund af disse resultater har Miljøstyrelsen, Region Midtjylland og Lemvig Kommune igangsat et Teknologi Udviklings Projekt benævnt "PFAS påvirkning fra hav til land" med henblik på at undersøge og dokumentere denne påvirkning yderligere. Som del af TUP-projektet udarbejdes et litteraturstudie, som beskriver teori og resultater fra andre undersøgelser i ind- og udland. I forbindelse med litteraturstudiet er der udarbejdet procedurer for prøvetagning af havvand og skum. Litteraturstudiet fremgår af rapportens afsnit 5.

Projektet har også omfattet feltundersøgelser ved Husby Plantage i Region Midtjylland med henblik på at vurdere spredning af PFAS fra hav til land i dette område. Undersøgelserne omfatter prøvetagning af overfladevand, grundvand og jord. Prøverne er udtaget i et transekt med varierende afstand fra havet. Beskrivelse af udførte undersøgelser og resultater fremgår af rapportens afsnit 6 og 8. Der er sideløbende udført tilsvarende undersøgelser af PFAS-påvirkning af grundvand, overfladevand og jord på Fanø i Region Syddanmark. Denne undersøgelse er finansieret af Region Syddanmark under den Syddanske Udviklingspulje for Jord og Grundvand og er afrapporteret i en særskilt rapport (Region Syddanmark, 2023)

Det er desuden planlagt at udføre undersøgelser af luften og PFAS bundet til aerosoler ved målinger af deposition via nedfald (tør) og nedbør (våd). Denne sidste del af projektet udføres i samarbejde med Stockholms Universitet og mangler udførelse af feltmålinger. Resultater herfra vil derfor blive afrapporteret i en særskilt rapport, når disse målinger foreligger.

Denne rapport er del 1 af "PFAS påvirkning fra hav til land" og omfatter litteraturstudie og udførelse af feltundersøgelser for jord, grundvand, overfladevand, hav og havskum ved Husby Plantage.

Rapportens afsnit 14 indeholder en liste med forkortelser anvendt i indeværende rapport.

5. Litteraturstudie

5.1 Baggrund

PFAS er en samlebetegnelse for en gruppe af flere tusinde stoffer og en række forskellige stofgrupper. Grupperne betegnes som PerFluorAlkyl- og PolyFluorAlkyl-forbindelser, dvs. fluorerede organiske stoffer, hvor kulstofkædens brintatomer helt (per) eller delvist (poly) er erstattet af fluor (VMR, 2022). Ved denne litteraturgennemgang har der været fokus på de 22 stoffer, som indgår i de danske kvalitetskriterier for jord og grundvand; primært perfluoralkylsyrer (PFAA'er) samt yderligere 2 PFAA precursere. Stofferne kan yderligere inddeles i:

Perfluorcarboxylsyrer (PFCA'er): PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA; PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFTrDA

Perfluorosulfonsyrer (PFSA'er): PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDODS, PFTrDS

Perfluorsulfonamider: PFOSA

Polyfluoralkylforbindelser: 6:2 FTS

Der henvises yderligere til listen med forkortelser i afsnit 14.

5.2 PFAS er surfaktanter

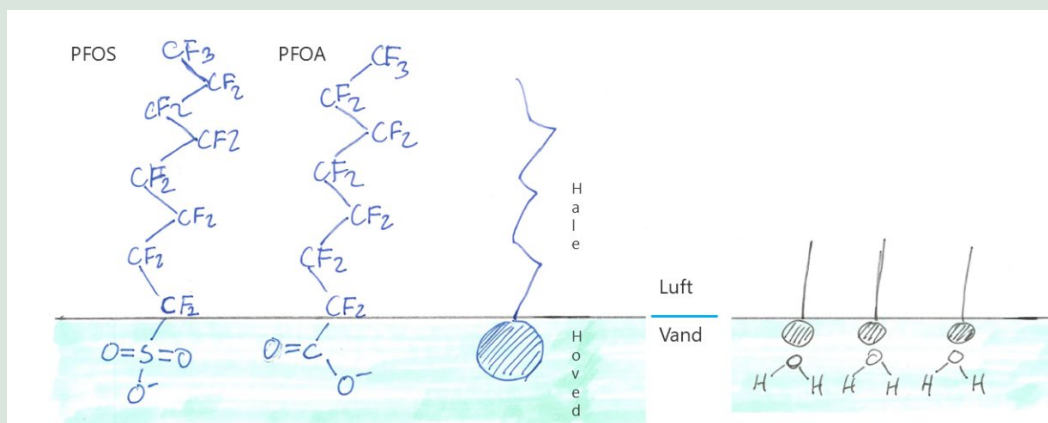
Disse stoffer er overfladeaktive stoffer benævnt tensider eller surfaktanter (SurfaceActive-Agents). Surfaktanter har specielle fysisk-kemiske egenskaber, der gør dem både fedt- og vandskyende, og de er tilmed varme- og kemisk resistente, hvorfor de været brugt/bruges inden for mange industrielle områder, f.eks. i brandslukningsskum, elektronik, tekstiler og fødevareemballage (VMR, 2022).

Surfaktanter er en gruppering af stoffer, der har en apolær del (hale) og en polær del (hoved), evt. flere haler eller hoveder. Surfaktanter kan være naturlige stoffer (biosurfaktanter) f.eks. lipider og humusstoffer eller kunstigt fremstillede/miljøfremmede surfaktanter, som fremstilles og bruges til f.eks. sæbestoffer, tandpasta, maling og medicin, bl.a. LAS (LinærAlkylSulfat), og nonylphenol. Blandt de kunstige surfaktanter hører PFAS (benævnes fluorosurfaktanter).

Surfaktanter inkl. fluorosurfaktanter har en apolær del, som kan være nonionisk, anionisk (negativ ladet ion) eller kationisk (positivt ladet ion) samt yderligere også zwitterionisk, hvor der er forskellige grupper med hhv. negativ og positiv ladning. En række forskellige PFAS-forbindelser er surfaktanter: PFCA'er, PFSA'er, FASA'er, FASE'er, FTCA'er, FTSA'er og FTOH'er. For de 22 PFAS, som er omfattet af de danske kvalitetskriterier, er de 21 stoffer anioniske fluorosurfaktanter (PFCA'er, PFSA'er og 6:2 FTS) og et stof kationisk (PFOSA). PFOSA er en precursor, som kan nedbrydes til PFOS (anionisk) (VMR, 2022). Et nyt kriterie for overfladevand (baseret på PFOA ækvivalenter for 24 PFAS-forbindelser), som er indført i november 2023 (Miljøstyrelsen, 2023c), omfatter primært anioniske fluorosurfaktanter (PFCA'er og PFSA'er samt GenX, Adona og C6O4) samt enkelte nonioniske fluorosurfaktanter (6:2 FTOH og 8:2 FTOH).

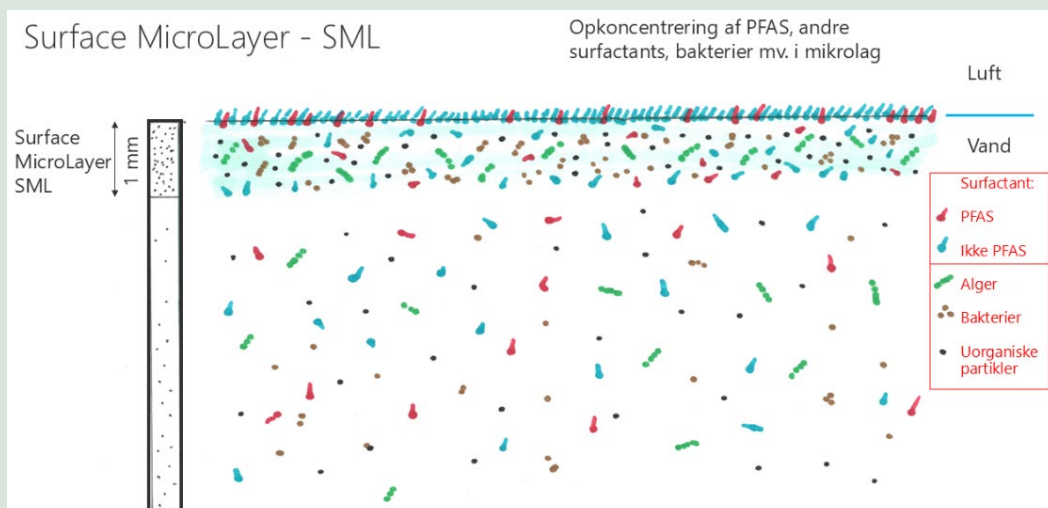
5.3 Opkoncentrering i havoverfladen

Surfaktanter (inkl. PFAS) har egenskaber, som medfører, at stofferne vil opkoncentreres i grænsefladen mellem vand og luft, da stofferne er termodynamisk stabile i denne grænseflade, hvor stoffernes polære del (syre med negativ ladning) vil være i vandfasen og blive fastholdt af polære vandmolekyler, mens stoffernes upolære del (kæde af fluorerede kulbrinter) vil bindes i luftfasen illustreret ved FIGUR 5.1 herunder.



FIGUR 5.1. Konceptuel fordeling af PFAS-forbindelser i grænsefladen mellem vand og luft (Kilde: NIRAS)

Der vil således kunne ske en opkoncentrering i havoverfladen. Havoverfladen er benævnt Surface Micro Layer (SML) og udgør op til 1 mm af vandoverfladen. SML har fysisk-kemiske og biologiske egenskaber samt kemisk og biologisk aktivitet, som adskiller sig fra det underliggende vandvolumen, hvilket har betydning for miljø og klima på lokal og globalt plan (havoverfladen dækker 70 % af jordens overflade). SML er grænsefladen mellem vandet og atmosfæren, hvor der sker en opkoncentrering af bakterier, alger, furealger, kiselalger og uorganiske stoffer, som forekommer i aggregat biofilm, og SML kan betragtes som en bioreaktor, der er grundlag for livet i havet. SML kan yderligere opdeles i flere enheder, bl.a. de øverste ca. 50 µm, hvor den primære opkoncentrering sker. Ved grænsefladen mellem vand og luft vil der forekomme biosurfaktanter, primært lipider, men også miljøfremmede surfaktanter (Wurl et al, 2017). På grund af dets unikke fysisk-kemiske egenskaber samt grænsefladen mellem havet og atmosfæren fungerer SML ved at binde og afgive mange forurenende stoffer, herunder mikroplast, sodpartikler, medicinalstoffer, flammehæmmere, pesticider, tungmetaller, oliestoffer, PAH-forbindelser og miljøfremmede surfaktanter (Wurl et al, 2017). PFAS-forbindelser opkoncentreret i SML er illustreret i FIGUR 5.2 (modificeret fra Wurl et al, 2017).



FIGUR 5.2. Fordeling af surfaktanter inkl. PFAS, alger, bakterier og uorganiske partikler i SML og underliggende vandsøjle (Kilde: NIRAS – modificeret fra Wurl et al. 2017).

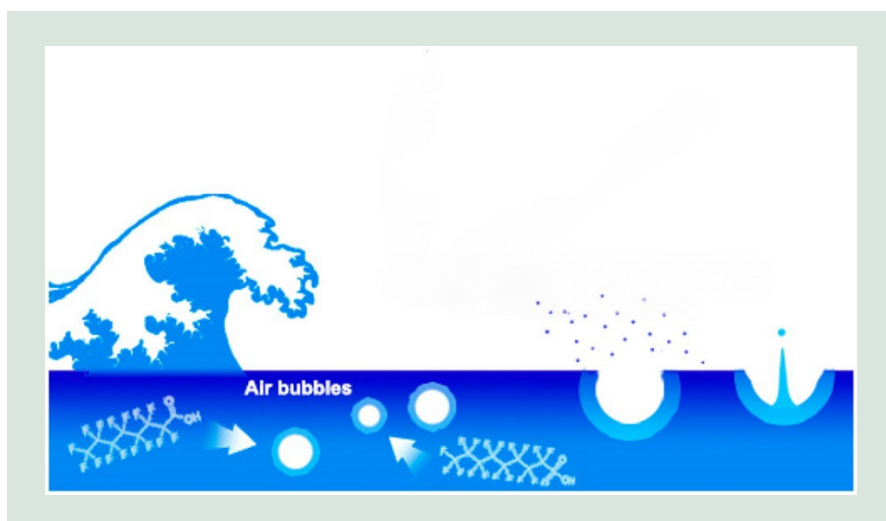
5.4 Opkoncentrering ved bølger

Fysiske processer ved bølger i havet medfører interaktion mellem vand og luft med udveksling af varme, fugt, gasser samt organiske og uorganiske stoffer. Bølgeprocesser m.v. er en betydende proces i forhold til udveksling mellem vand- og luftfase ved en urolig vandoverflade. Ved bølgeprocesserne dannes aerosoler (luftbårne partikler) benævnt Sea Spray Aerosols (SSA), som kan bestå af organisk materiale og uorganiske stoffer, bl.a. jern, natrium og magnesium (Wurl et al, 2021). SSA forekommer i forskellige størrelse fra nanometer til mikrometer. De større SSA vil falde ned i havet eller kystnære områder, mens de mindre SSA kan spredes langt i atmosfæren.

Ved bølgeprocesser dannes luftbobler, som stiger op mod overfladen. Luftbobler har en grænseflade (SML) med havvandet, og ved opstigning vil bobler opsamle PFAS, der kommer i kontakt med boblerne - benævnt "PFAS-scavenging" i litteraturen (Casas et al, 2020, Johanson et al, 2019, Sha et al, 2021).

Opstigende bobler med PFAS kan ved overfladen:

1. Briste og danne SSA, som indeholder PFAS-forbindelser, som kan transporteres med atmosfæren (illustreret ved FIGUR 5.3).
2. Forblive i overfladen og samles til havskum. Skummet kan kollapse og genopløses i det underliggende vand eller ved kysten transporteres ind over land. Skum kan billedligt betegnes som lag på lag af havets overflade (SML).



FIGUR 5.3. Illustration af bølgeprocessers opkoncentrering af PFAS (PFAA) ved dannelse af sea spray aerosols (modificeret fra Sha et al, 2021)

Dannelse af SSA er dokumenteret i laboratoriet, hvor kunstigt havvand (3,5 ‰ salinitet) tilsat PFAS (PFAA'er) ved gennembobling (i et Sea Spray Chamber) danner SSA, som kan måles i luftfasen bl.a. ved tilstedeværelse af natrium. Ved processen dannes forskellige størrelser af SSA med forskelligt indhold af PFAS (Johansson et al 2019, Sha et al, 2021). Umiddelbart har indhold af PFAS i havvand (0,3-150 ng/l) ikke betydning for opkoncentrering af PFAS i aerosolerne.

Ved dannelse af både SSA og skum kan der ske en opkoncentrering fra det underliggende havvand. Opkoncentrering sker fra havvand via SML til SSA eller skum. Opkoncentreringen kan vurderes ved den såkaldte opkoncentreringsfaktor - Enrichment Factor (EF), som kan udregnes mellem koncentrationerne i havvand (SW) og i SML, SSA og Skum (SF) ved:

$$EF_{SML} = C_{SML}/C_{SW}$$

$$EF_{SSA} = C_{SSA}/C_{SML}$$

$$EF_{SF} = C_{SF}/C_{SML}$$

Opkoncentrering er også observeret i verdenshave langt fra den betydelige civilisation, f.eks. ved Antarktis, hvor der forekommer lave indhold af PFAS i havvandet, hvor der blev målt gennemsnitlige indhold af PFAS i havvand og havvandets overflade på hhv. 0,313 ng/l og 0,447 ng/l og beregnet en opkoncentreringsfaktor på mellem 1,2 – 5 (Casas et al, 2020).

Den kemiske struktur af PFAS-forbindelser har betydning for opkoncentreringen i skum og SSA, idet opkoncentreringen stiger med kædelængde. Forskellen i EF kan være op til flere størrelsesordener fra PFPeA til PFUnDA. Desuden har størrelse af partikler af SSA betydning for opkoncentrering, hvor EF er størst for de mindste SSA (0,02-0,99 µm) og falder med stigende partikelstørrelse for SSA (op til > 10,16 µm). Laboratorieforsøg (sea spray chamber) viser, at for partikler mindre end 1,6 µm er der en opkoncentrering på op til 62.000 gange indholdet i (kunstigt) havvand (Johansson et al., 2019).

Opkoncentrering af PFAS i skumfasen udnyttes desuden ved rensning af vand, hvor skum dannes ved gennembobling med luft eller ozon, således at PFAS opkoncentreres i en skumfraktion, som kan bortskaffes. Metoden er benævnt "foam fractionation" og bruges bl.a. til at rense perkolat fra lossepladser/depoter og grundvand fra forurenede brandøvelsespladser. Virksomheden OPEC har udviklet metoden SAFF® (Surface Active Foam Fractionation), som ved gennembobling/afskumning gennem flere trin kan opkoncentrere PFAS med op til en faktor 1.200.000. Metoden er primært anvendelig til langkædede PFAS-forbindelser, hvor der for PFHpS og større PFAS-forbindelser ses reduktion/fjernelse tæt på 100 %, mens der for PFHpA og kortere PFAS-forbindelser ses lavere reduktioner på 80-40 % (OPEC, 2024), (Burns et al., 2021).

5.5 Erfaringer og viden fra undersøgelser

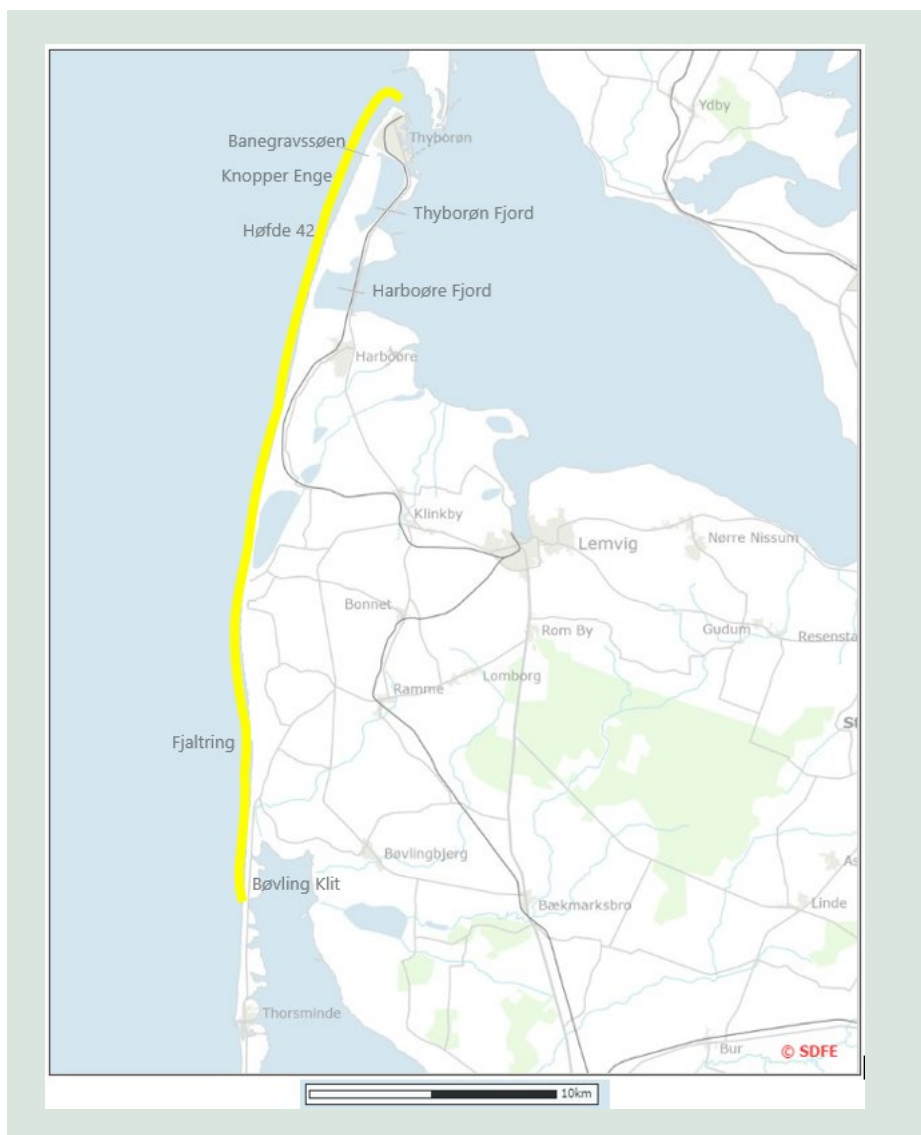
Undersøgelser af spredningen af PFAS som følge af opkoncentrering i SML deler sig generelt i to fokusområder: (1) Spredning af PFAS ved kyster og strande på lokal eller regional skala med særlig fokus på skumdannelse eller SSA, og (2) Spredning af PFAS på global skala fra havvand med fokus på SSA.

I de følgende underafsnit er erfaringer og viden for de to fokusområder refereret.

5.5.1 Spredning af PFAS ved kyster og strande på lokal eller regional skala med særlig fokus på skumdannelse

5.5.1.1 Lemvig Kommune, Region Midtjylland

Undersøgelser udført i Lemvig Kommune i 2022 viste forurening med PFAS, primært PFOS og PFOA, i terrænnært grundvand og drænvand under Thyborøn by. Undersøgelserne gav mistanke om, at diffus forurening i havvand kunne opkoncentreres og spredes til nærliggende landområder. Undersøgelserne blev primært udført på Harboøre Tange og i Thyborøn, men omfattede også et referenceområde ved Bøvling Klit på landtangen ved Nisum Fjord i den sydlige del af Lemvig Kommune (se FIGUR 5.4 herunder). Undersøgelserne blev udført af Lemvig Kommune, Naturstyrelsen, Lemvig Vand og Region Midtjylland med hjælp fra WSP og NIRAS. Prøvetagning og analyser for PFAS omfattede grundvand, drænvand, jord, græs, overfladevand (vandhuller, fjorde og havet) samt havskum og skimmeprov (prøvetagning af havets mikrolag). Alle resultater er tidligere afleveret, (Lemvig Kommune, 2022).



FIGUR 5.4. Undersøgelsesområde markeret med gul streg (Lemvig Kommune, 2022). Kilde: *Indeholder data fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering*

Prøver af havvand, havskum og mikrolag

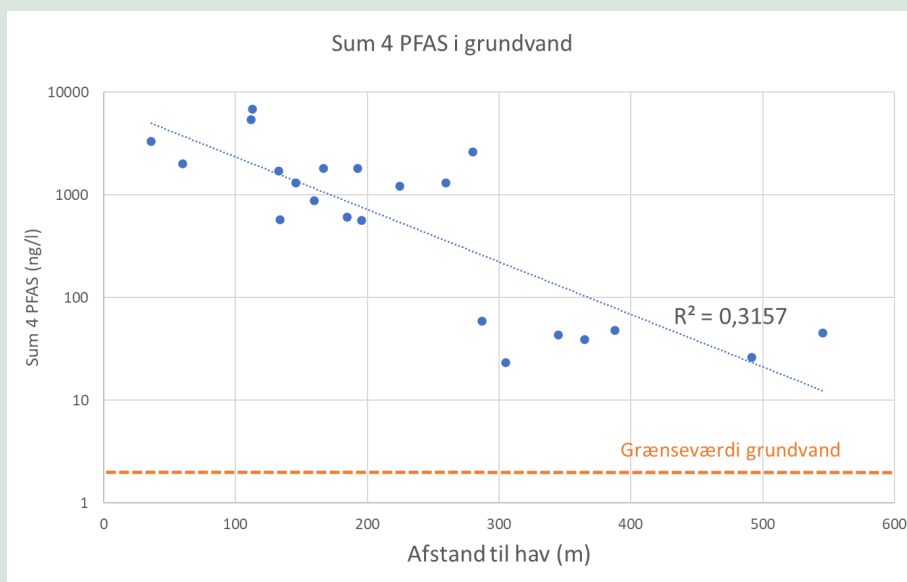
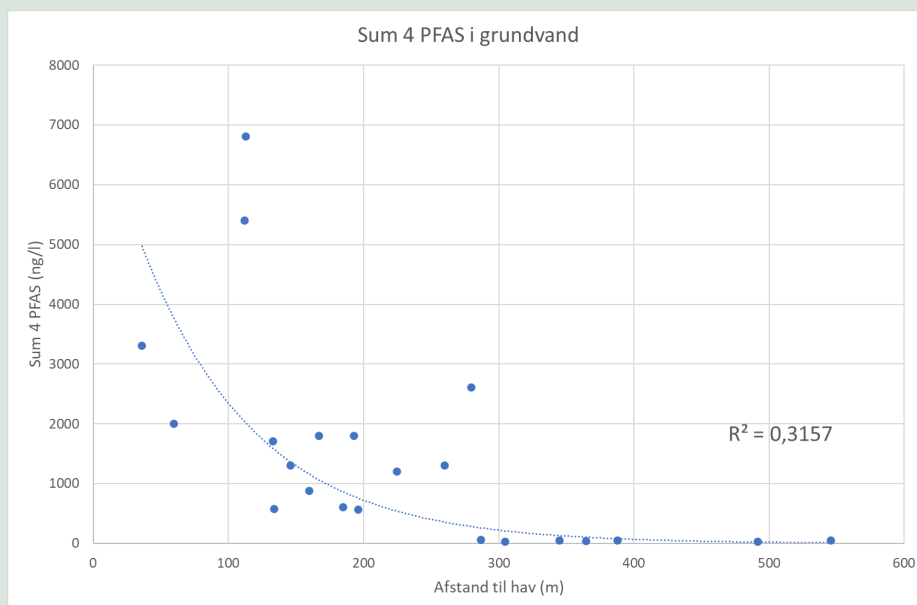
Prøver af havvandet viser indhold af sum af 4 PFAS fra 0,55 ng/l til 6,9 ng/l. Indholdet udgøres primært af PFOS og PFOA. Højeste indhold er påvist ved referencelokaliteten ved Bøvling Klit i syd. Prøver udtaget ved stille vejr viser lavere indhold af PFAS end prøver udtaget ved pålandsvind og bølger (Lemvig Kommune, 2022).

Under en storm i april 2022 er der udtaget en prøve af havskum på stranden ved Thyborøn, hvor der er påvist indhold af PFAS på 120.000 ng per liter kollapsed skum (sum af 4 og sum af 22 PFAS) – primært PFOS og PFOA. Der var endvidere planlagt yderligere prøvetagning af havskum (sammen med vandprøver af havvand) i maj 2022, men der var ikke tilstrækkeligt skum til opsamling af prøve. I stedet blev det forsøgt at udtage skimmeprøver af havoverfladen (SML) ved at holde prøvetagningsflaskerne i havoverfladen mhp. at prøvetage den øverste mm af havoverfladen. På grund af bølger var prøvetagningen besværlig og forbundet med usikkerhed. Skimmeprøverne indeholdt sum af 4 PFAS på 9,0 - 1.000 ng/l, primært PFOS og i mindre omfang PFOA. For alle prøver udtaget den 10. maj 2022 ses der generelt højere indhold i skimmeprøven end i en tilsvarende prøve af havvandet fra samme lokalitet. Ved prøvetagningen blev de højeste indhold i skimmeprøverne påvist på lokaliteter ved Fjaltring og Thyborøn Nordstrand, hvor der var roligt vand, som medførte en bedre skimning af havoverfladen.

Figur 1: Fund af PFAS i havvand, mikrolag (skimmeprøver) og havskum. Bemærk y-aksen er logaritmiske skala

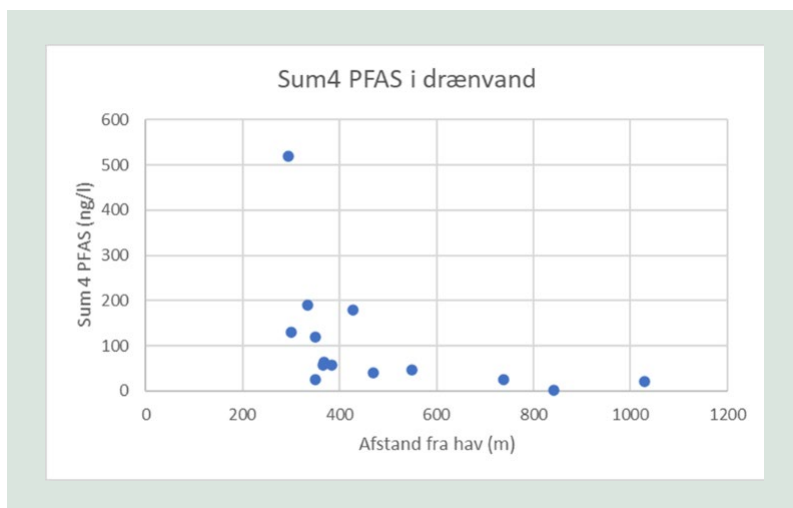
Prøver fra kystnære områder

16 Miljøstyrelsen / PFAS påvirkning fra hav til land Del 1



FIGUR 5.6. Indhold i terrænnært grundvand (afstand til havet). Lineær (øverst) vs. logaritmisk (nederst) Y-akse (Modificeret fra Lemvig Kommune, 2022)

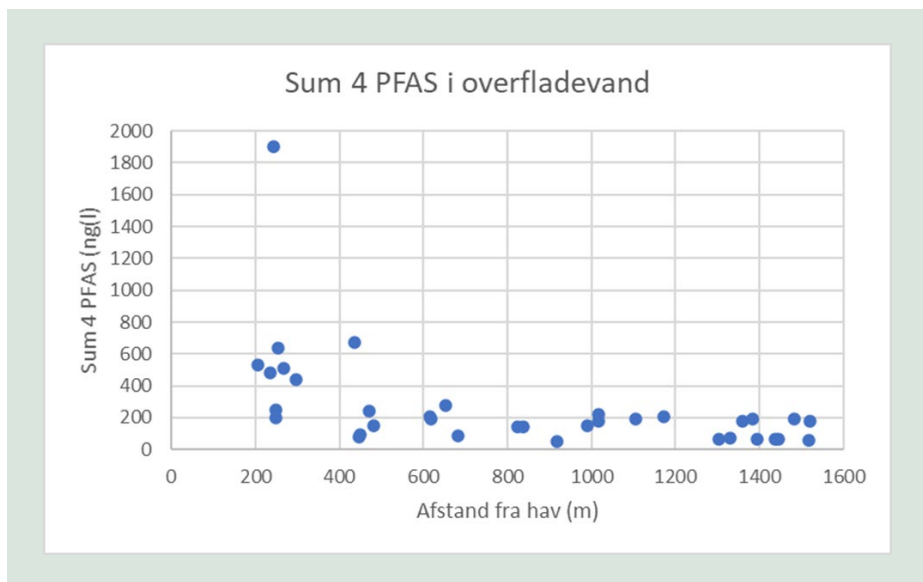
Indhold af PFAS i drænvand fra Thyborøn by er illustreret i FIGUR 5.7. For drænvand ses også, at indholdet af PFAS falder med afstanden til stranden. Indholdet er kraftigt aftagende for drænbrønde beliggende mere end 500 fra havet. For drænvand er der flere faktorer som kan påvirke indholdet, da drænvand repræsenterer vand fra opstrøms beliggende drænrør/strenger, og det er således blandeprøver af indstrømmende grundvand fra større arealer. Endvidere forekommer der i drænsystemet strækninger med glatte rør uden dræn (blindrør), således at vandet i en given vandprøve kan stamme fra et område, der ligger betydeligt opstrøms. Vandprøver fra drænbrønde kan således stamme fra arealer, som er beliggende både vest og øst for målepunktet, og afstanden til Vesterhavet er således ikke præcis (Lemvig Kommune, 2022).



FIGUR 5.7. Indhold PFAS i drænvand (Lemvig Kommune, 2022)

Indholdet af PFAS i overfladevand udtaget i Lemvig Kommune er illustreret i FIGUR 5.8 (indeholder ikke analyser af havvand). For overfladevand ses det, at indholdet af PFAS overordnet falder med afstanden til Vesterhavet. Der er en række andre faktorer, som også kan påvirke indholdet af PFAS i overfladevandet. Overfladevand omfatter data fra mindre vandhuller, søer og fjordssystemer med forskellige karakteristika. Data vil bl.a. være afhængig af vanddybde, opholdstider, vindpåvirkning og påvirkning fra udpumpning af drænvand (Thyborøn Fjord) samt evt. bidrag fra lokale punktkilder (depoter m.v.).

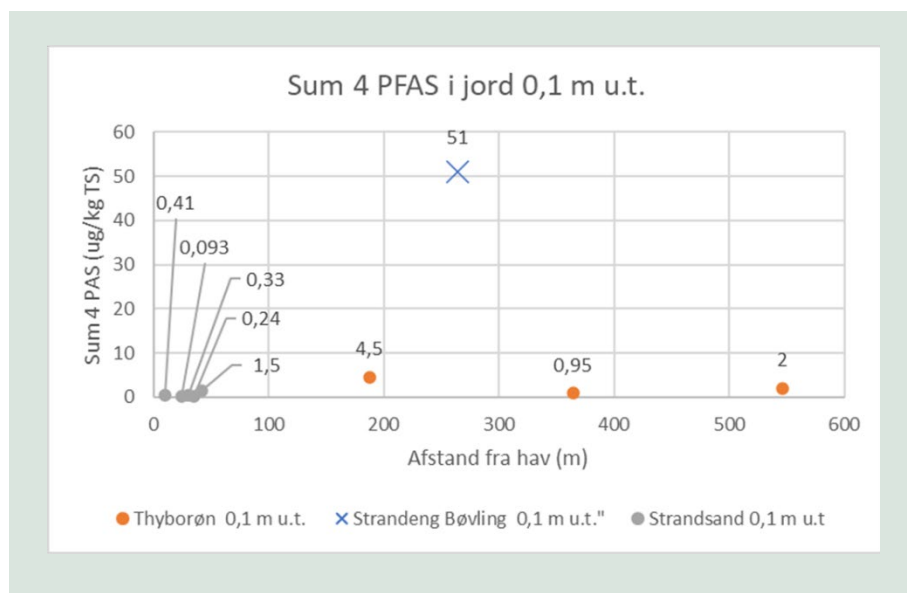
Højeste indhold påvises inden for 450 m fra Vesterhavet. Indholdet af PFAS ligger på et stabilt niveau mellem 50-300 ng/l i en afstand fra ca. 450 til 1.500 m fra Vesterhavet (omfatter primært prøver fra Thyborøn og Harboøre Fjord inkl. kanalen, der forbinder disse). Det ses, at indholdet aldrig falder til et lavt niveau, hvilket formodes at hænge sammen med en relativ lille vandudskiftning i fjordsystemerne via slusen ved Thyborøn med udløb til Limfjorden (Lemvig Kommune, 2022).



FIGUR 5.8. Indhold af PFAS i overfladevand (Lemvig Kommune, 2022)

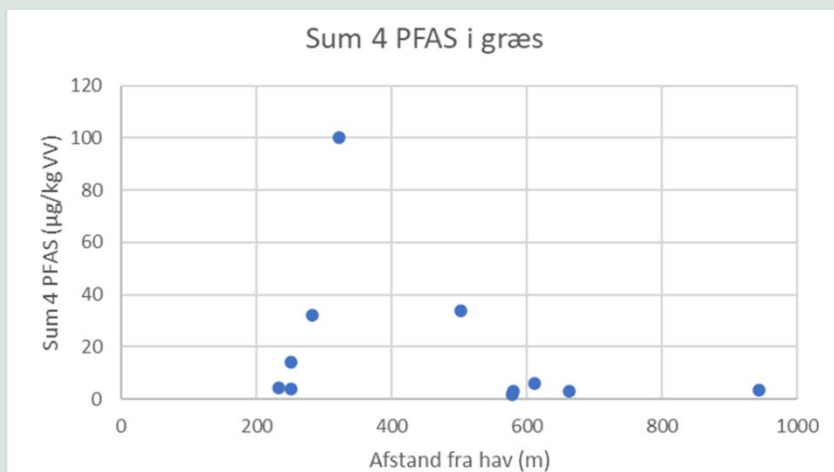
Indholdet af PFAS i jord er illustreret i FIGUR 5.9. Umiddelbart ses der ikke tydelige sammenhænge mellem indholdet i jord (0,1 m u.t.) og afstanden til havet. Jordprøverne præsenterer et

relativt lille datasæt. Jordprøverne omfatter desuden forskellige jordtyper, herunder fyld, muld, gytje og strandsand (kvarssand), som kan have betydning for kapaciteten for binding af PFAS på grund af varierende indhold af organisk stof, kornstørrelsesfordeling, vandindhold m.v. Disse forhold kan bl.a. være afhængige af dybden, hvorfor der ved databehandling sker en opdeling efter dybde. Der ses lignende resultater for prøverne fra 0,4 m u.t. med generelt lavere indhold af PFAS. Prøverne fra 0,4 m er ikke medtaget i figuren herunder. Jordprøver fra stranden (10-42 m fra havet) viser generelt de laveste indhold, hvilket vurderes at være forårsaget af, at strandsandet (kvarssand) har en lav kapacitet for binding af PFAS (Lemvig Kommune, 2022).



FIGUR 5.9. Indhold af PFAS (sum 4) i terrænnær jord som funktion af afstand til havet (Lemvig Kommune, 2022)

Indholdet af PFAS i græs er illustreret i FIGUR 5.10. For græs ses det, at de højeste indhold af PFAS forekommer inden for 500 m fra Vesterhavet, men der ses umiddelbart ikke en entydig sammenhæng. For græs er der formodentlig flere andre forhold, som har betydning for det målte indhold. Græs omfatter formodentlig forskellige græsarter, forskellige underliggende jordtyper samt prøvetagning på varierende væksttidspunkter (prøvetaget februar 2022 – maj 2022), som vurderes at kunne have betydning for indhold af PFAS. Endvidere vurderes det, at resultaterne for græs kan være påvirket af PFAS fra deposition af aerosoler m.v. i forbindelse med stormvejr (f.eks. ved prøvetagning den 5. april 2022, hvor de højeste indhold i græsset er påvist). Det vurderes, at der kan afsættes aerosoler på planternes overflade, som efterfølgende skylles af græsset ved nedbør m.v. Derved kan planternes optag af PFAS overestimeres (Lemvig Kommune, 2022).

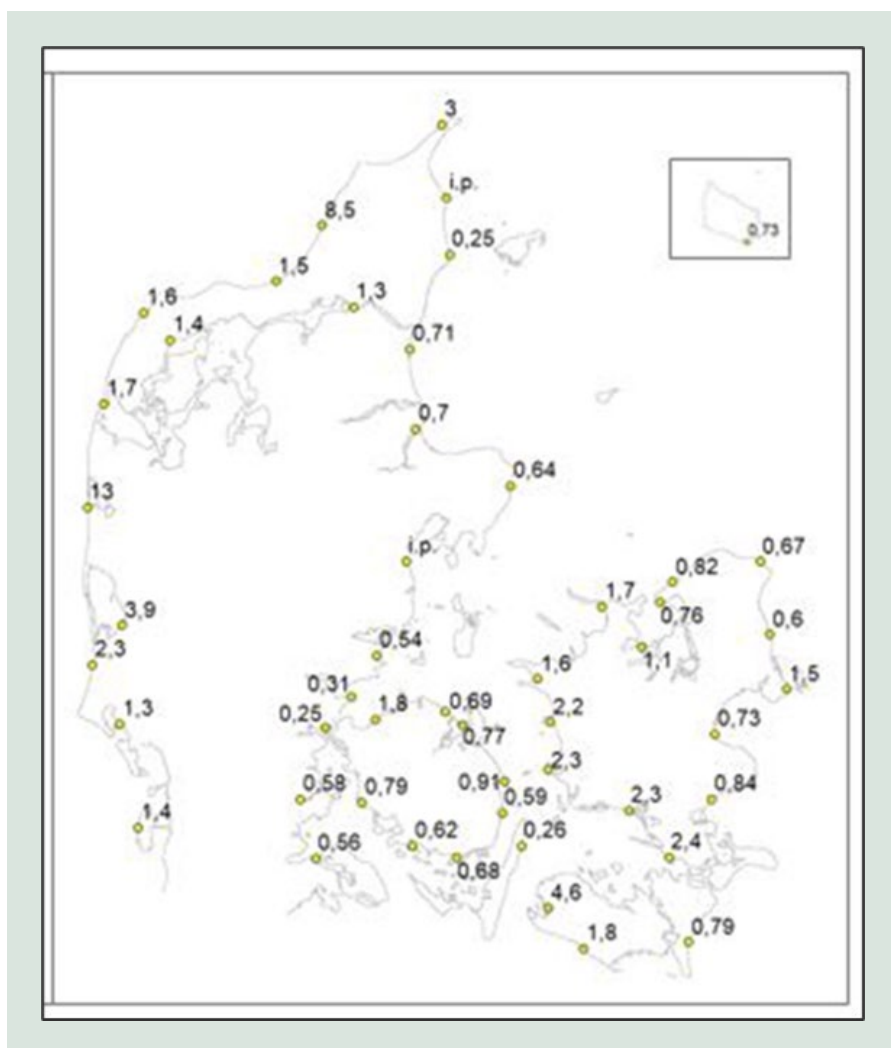


FIGUR 5.10. Indhold af PFAS (sum 4 PFAS) i græsprøver som funktion af afstand til havet (Lemvig Kommune, 2022)

Undersøgelser udført i 2022 i Lemvig Kommune viser en tendens til, at de højeste niveauer i grundvand, drænledninger og overfladevand forekommer i den vestlige del af det undersøgte område, og at afstanden til Vesterhavet har betydning for de påviste indhold. Endvidere er der måske også en sammenhæng for jord og græs, men her kan der være andre lokale forhold, som også har betydning for indholdet af PFAS. Overordnet ses dog, at indholdet af PFAS aftager med afstanden til Vesterhavet. På denne baggrund vurderes det, at en mulig kilde til PFAS-forureningen kan være havskum og aerosoler, der ved stormvejr blæser ind over land fra vest og afsættes til jord, grundvand, overfladevand m.v. (Lemvig Kommune, 2022).

5.5.1.2 Miljøstyrelsen - badevandsundersøgelser og havvand samt havskum

Miljøstyrelsen gennemførte i juli 2022 prøvetagning af badevand/havvand. Resultaterne er offentliggjort på Miljøstyrelsens hjemmeside (Miljøstyrelsen, 2022). Data for sum af 4 PFAS er fremstillet i FIGUR 5.11.

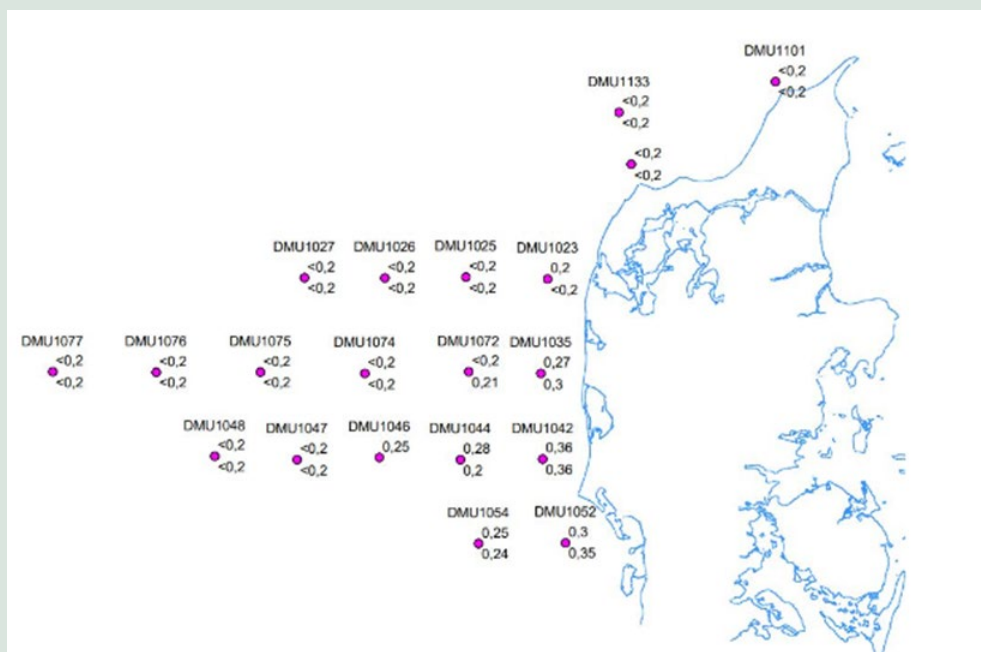


FIGUR 5.11. Indhold SUM 4 PFAS (ng/l) i badevand, juli 2022 (Miljøstyrelsen, 2022)

Højeste indhold forekommer ved vestvendte kyster hhv. Vestkysten (1,3-13 ng/l), Vestsjælland og Lolland (1,2-4,6 ng/l). Ved grænseværdier for badevand anvendes et WHO-princip på 20 x drikkevandskriterier for badevand (hav- og ferskvand) svarende til 40 ng/l for sum af 4 PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS). Kriterierne for badevand var overholdt i forbindelse med Miljøstyrelsens prøvetagning i juli 2022 (Miljøstyrelsen, 2022).

Miljøstyrelsen har i 2023 prøvetaget og analyseret havvand, soppevand og havskum ved 11 lokaliteter langs Vestkysten. Der blev påvist indhold af sum af 4 PFAS i havvand på mellem 1,3 og 8 ng/l, i havskum på mellem 17.000 og 250.000 ng/l. Prøvetagning af vand fra soppesøer (fem lokaliteter) viste indhold af sum af 4 PFAS på 3,1 -120 ng/l (Miljøstyrelsen, 2023a).

Miljøstyrelsen har endvidere som del af den marine overvågning i 2022 udført prøvetagning af havvand i Nordsøen (prøver udtaget fra Miljøstyrelsens miljøskib). Prøvetagningen omfatter prøvetagning 6-300 km fra Vestkysten. På otte ud 20 lokaliteter blev der fundet en eller flere PFAS-forbindelser. Der er udtaget prøver fra to dybder på hver lokalitet, i cirka fem meters dybde og i 17-75 meters dybde, men der blev ikke fundet tydelige forskelle på indholdet i de to dybder. Ved undersøgelserne er der påvist 7 PFAS-forbindelser: PFBS, PFBA, PFHxA, PFOSA, PFOS, PFOA og PFPeA (Miljøstyrelsen, 2023n). Analyseresultater for PFOS er fremstillet i FIGUR 5.12.



FIGUR 5.12. PFOS i havvand. Der blev udtaget prøver i to dybder, hhv. 5 meters dybde, som er vist ved den øverste række resultater, og 17-75 meters dybde, som er vist ved den nederste række resultater (Miljøstyrelsen, 2023b)

Resultaterne viser de højeste koncentrationer for PFOS på målestationer ca. 30 kilometer fra kysten (0,27 -0,36 ng/L), lavere koncentrationer på målestationer 65 til 123 kilometer væk fra kysten (omkring 0,25 ng/L) og længere ude end 123 kilometer fra kysten er der ikke fundet PFAS over analysemetodens detektionsgrænse (Miljøstyrelsen, 2023b).

Detektionsgrænserne ved Miljøstyrelsens undersøgelser er 0,2 ng/l. Ved undersøgelser udført i forbindelse med forskningsprojekter, bl.a. (Savvidou et al, 2023), er der udført analyser af PFAS i havvand fra Atlanterhavet (både nord og syd for Ækvator) ved lavere detektionsgrænser (mindre end 0,001 ng/l), hvor der blev påvist indhold af PFAS i alle analyserede vandprøver fra de øvre vandlag. Det må derfor formodes, at PFAS generelt vil være forekommende, som minimum i lave niveauer under kommercielle detektionsgrænser, i Nordsøen og i de indre danske farvande. Se endvidere afsnit 5.5.2.1.

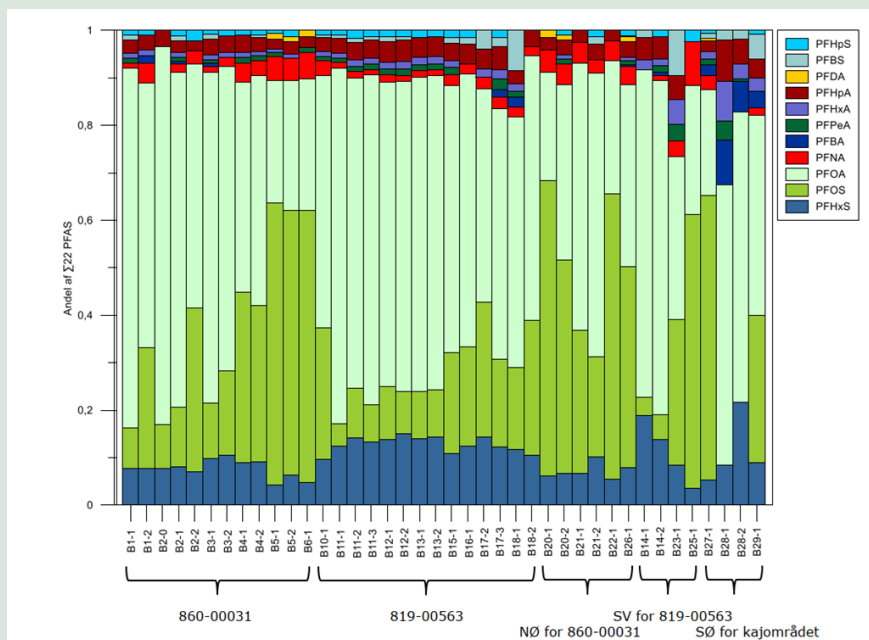
5.5.1.3 Undersøgelser Hirtshals

Region Nordjylland har i 2022-2023 udført en forureningsundersøgelse ved to lokaliteter beliggende på kaj anlæg i Hirtshals, hvor der bl.a. har været et maskinværksted. Undersøgelserne omfattede i alt 22 prøvesteder bestående af 1-3 boringer. Undersøgelsen er suppleret med vandprøver fra boringer på nærliggende lokalitet samt med vandprøver fra havnebassin og Skagerrak i to omgange. Grundvand/overfladevand er analyseret for 22 PFAS (Region Nordjylland, 2023). Vandprøver af grundvand er udtaget 60-120 m fra Skagerrak ved de to lokaliteter, mens referenceprøver er udtaget 123-170 m fra kysten. Området for undersøgelsen er vist på FIGUR 5.13.



FIGUR 5.13. Område for undersøgelser på kaj anlæg i Hirtshals (Region Nordjylland, 2023)

Der er påvist høje indhold af PFAS i grundvand fra kajområdet, hvor der er påvist indhold af sum af 4 PFAS og sum af 22 PFAS op til hhv. 4.600 og 4.900 ng/l. Indholdet i borerne i kajområdet er meget forhøjet ift. det baggrunds niveau, som er fundet i området på op til 100 ng/l. Ligeledes er indholdet markant højere end påvist i havstokken, vest for kajområdet. (Region Nordjylland, 2023). Sammensætningen af PFAS i de enkelte borer er fremstillet i FIGUR 5.14



FIGUR 5.14. Kemisk fingerprint af PFAS for undersøgelser på Hirtshals Havn (Region Nordjylland, 2023)

Sammensætningen er primært PFOA, PFOS og PFHxS samt en række øvrige stoffer i mindre andele/koncentrationer.

Der er i havnebassinet (øst for lokaliteten) og i Skagerrak ikke påvist indhold af PFAS i maj måned 2022, mens der ved prøvetagningen i juli måned 2022 konstateredes et PFAS indhold i de tre prøver udtaget i brændingszonen. Her blev der fundet et indhold af PFOS på mellem 1,91 og 25,4 ng/l (Region Nordjylland, 2023).

Med baggrund i erfaringer fra bl.a. Thyborøn (Lemvig Kommune, 2022, og Watertech, 2022), Fanø (Region Syddanmark, 2023) og indeværende projekt ved Husby vurderes det påviste baggrunds niveau af PFAS i grundvandet i området at kunne stamme fra diffus forurening fra havet, ligesom opkoncentrering og mobilisering af diffus PFAS fra havvandet via havskum og SSA kan have givet et bidrag til den påviste PFAS-forurening på kaj anlægget.

5.5.1.4 Holstebro Kommune

NIRAS har for Holstebro Kommune i juli 2022 udtaget prøve af havvand og havskum ved Spidsbjerg Strand. Skum og vandprøve blev taget ved pålandsvind. Vandprøve af havvand blev opsamlet ved dykket flaske, og skummet blev opsamlet med hænderne (med nitrilhandsker). Data er afrapporteret i mail dateret 15. august 2022 til Holstebro Kommune. Analyse af vand- og skumprøver er fremstillet i TABEL 5.1.

TABEL 5.1. Analyseresultater, PFAS i havvand og havskum vedr. Spidsbjerg Strand, Holstebro Kommune, (Holstebro Kommune juli 2022)

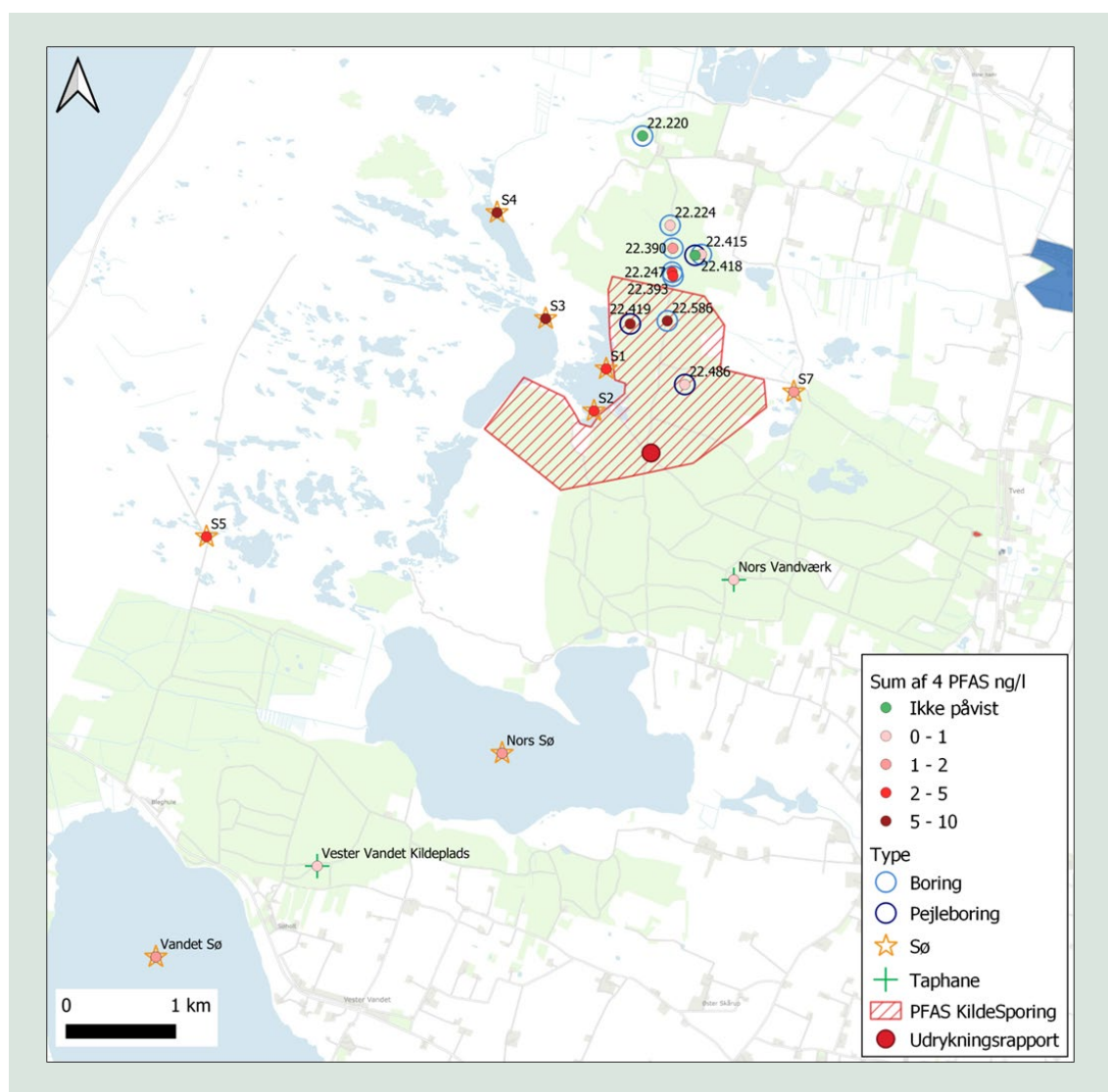
Komponent	Enhed	Havskum	Havvand
PFBA (Perfluorbutansyre)	ng/l	<20	0,95
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	ng/l	<10	0,35
PFPeA (Perfluorpentansyre)	ng/l	<10	0,38
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30
PFHxA (Perfluorhexansyre)	ng/l	<10	0,49
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	ng/l	40	0,62
PFHpA (Perfluorheptansyre)	ng/l	24	0,56
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30
PFOA (Perfluoroktansyre)	ng/l	350	3,3
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	ng/l	1400	3,9
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	ng/l	<10	<0,30
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	ng/l	110	<0,30
PFNA (Perfluornonansyre)	ng/l	90	0,59
PFNS (Perfluornonansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30
PFDA (Perfluordekansyre)	ng/l	490	<0,30
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	ng/l	<10	<0,30
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	ng/l	150	<0,30
PFUnDS (Perfluorundekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	ng/l	40	<0,30
PFDoDS (Perfluordodekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0
PFTTrDA (Perfluortridekansyre)	ng/l	<10	<1,0
PFTTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	ng/l	<10	<1,0
Sum af PFOA,PFOS,PFNA og PFHxS	ng/l	1.900	8,4
Sum af 22 PFAS	ng/l	2.700	11

Det påviste indhold i havvand og havskum viser, at der sker en betydelig opkoncentrering (faktor 250), som dog er i den lave ende af, hvad der er set ved andre prøvetagninger. De primære PFAS-komponenter i havskummet er PFOS, PFOA, PFNA, PFDA og PFUnDA.

5.5.1.5 Hanstholm Kildeplads

I 2022 blev der påvist PFAS i flere indvindingsboringer ved Hanstholm Kildeplads. I indvindingsboringerne blev der påvist PFAS i niveauer fra "ikke påvist" til 13/16 ng/l for hhv. sum af 4 og sum af 22 PFAS. Der blev primært påvist indhold af PFOS, PFOA og PFHxS, med et generelt lidt højere indhold af PFOA. I en boring blev der desuden påvist indhold af PFBA og PFNA. De højeste indhold af PFAS forekommer i boringer på den sydlige del af kildepladsen, mens der er lavere indhold af PFAS på den nordlige del af kildepladsen. Boringerne til Hanstholm kildeplads er beliggende ca. 4,5 km fra havet (Thisted Vand, 2022).

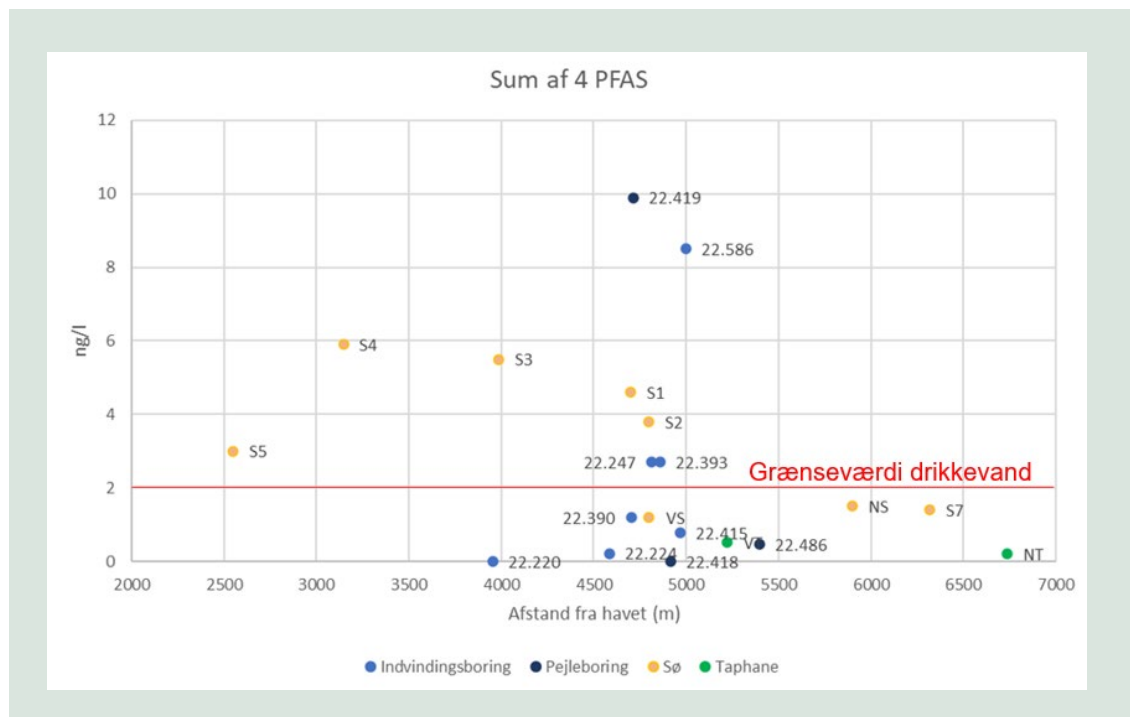
På baggrund af fundene har NIRAS i 2022 udført undersøgelse for Thisted Vand. I september 2022 er der udtaget vandprøver til analyse for 22 PFAS-forbindelser fra seks søer, tre pejleboringer samt Thisted Vands syv indvindingsboringer på Hanstholm Kildeplads. Kort med prøvetagning er fremstillet i FIGUR 5.15. Endvidere indgår analyseresultater fra Thisted Kommune fra taphanen på Nors Vandværk og på Vester Vandet Vandværk samt fra vandprøver udtaget i Nors Sø og Vester Vandet Sø udtaget i forbindelse med en badevandskontrol i juli 2022.



FIGUR 5.15. Undersøgelser ved Hanstholm Kildeplads (Thisted Vand, 2022).

Geologien er generelt forskellige tørvelag, underlejret i visse områder af sandlag, som så bliver efterfulgt af kalk. Kildepladsens indvinding sker fra kalken. Der er generelt en stor umættet zone på 10-25 m.

FIGUR 5.16 viser indhold af sum af 4 PFAS som funktion af afstand fra havet.

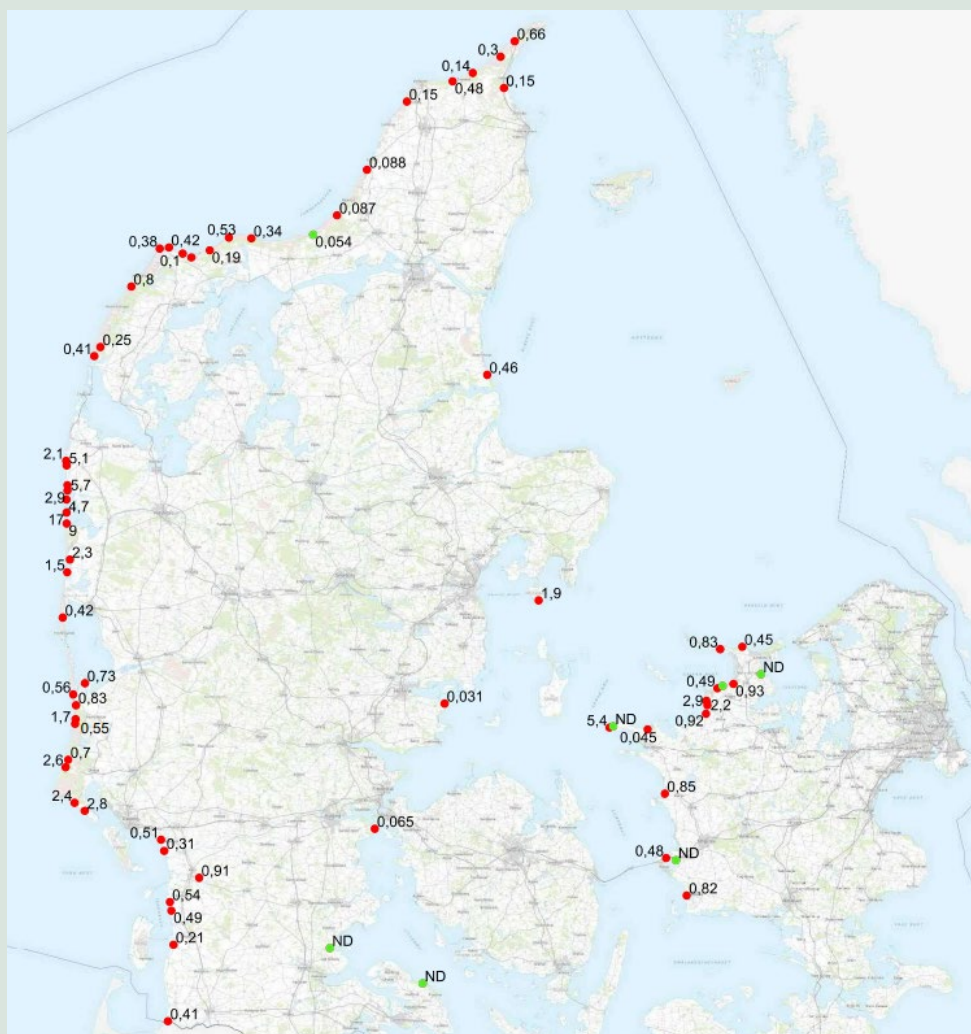


FIGUR 5.16. Sum af 4 PFAS i vandprøver, vist som funktion af afstanden til havet. Grundvandskvalitetskriteriet for sum af 4 PFAS er markeret med en rød linje (Thisted Vand, 2022)

Data giver ikke et entydigt svar på, om forureningen er diffus spredning af PFAS fra havet. Overordnet kunne de gennemførte undersøgelser indikere, at de påviste PFAS-forbindelser på Hanstholm Kildeplads kan have ophav i diffus spredning af PFAS fra havet, som er beliggende 4-5 km vest for kildepladsen. Samtidig vil terrænforholdene måske medføre, at der vil være et øget input af PFAS til grundvandet, som det særligt ses i de sydlige borer. Der er højere indhold af PFAS i grundvandet fra DGU 22.586 og DGU 22.419 end i de andre indvindingsboringer, hvilket kan skyldes, at borerne ligger tættere på søerne, og at strømningsforholdene er specielle for disse borer (Thisted Vand, 2022). I de nordlige borer har borerne ikke i samme omfang hydraulisk kontakt til overfladevand, og forureningsspredning skal ske vertikalt gennem umættet zone, hvor PFAS kan bindes til grænsefladen mellem porevand og poreluft, således at der ikke ses samme påvirkning af PFAS.

5.5.1.6 Naturstyrelsens arealer langs vestvendte kyster

Naturstyrelsen gennemførte i 2022 undersøgelser af kystnære engarealer med henblik på at screene for påvirkning med PFAS fra diffus forurening fra havet (Naturstyrelsen, 2023). Arealerne, der blev screenet, er bortforpagtede til dyrehold som del af naturpleje. Rapporten viste, at indholdet af PFAS i græs overskred Fødevarestyrelsens indikatorværdier (for græsføde til kvæg til konsum) på 54 ud af 67 undersøgte engarealer (80 %). Endvidere viste analyser af overfladevand overskridelser af Fødevarestyrelsens indikatorværdier (for vand til kvæg til konsum) for 9 ud af 47 undersøgte lokaliteter (20 %). Et kort over screeningsundersøgelsen fremgår af Figur 5.17. Ved undersøgelsen blev der udtaget ekstra græsprøver, som blev vasket i PFAS-frit vand. Resultaterne af de kemiske analyser viste, at halvdelen eller mere af det påviste PFAS i græsprøverne kunne vaskes af græsprøverne, hvilket peger på, at PFAS-indholdet stammer fra deposition på græsset.



Figur 5.17. Kort over screeningsundersøgelse og resultater ($\mu\text{g}/\text{kg}$ vv). Rød prik = græsprøve med PFAS over indikatorværdi. Grøn prik = græsprøve med PFAS under indikatorværdi.

5.5.1.7 Påvirkning ved rekreativt ophold i havet, Thy

Et dansk studie har i 2023 undersøgt, om der er sammenhænge mellem opkoncentrering af PFAS i havskum og menneskers PFAS-niveauer i blodet. Undersøgelsen omfattede PFAS-analyser af blodprøver fra 36 personer (24 mænd og 12 kvinder), som er bosat og surfer ved kysterne i Thy (Vestkysten, Jylland). Undersøgelsen viser, at indhold af PFAS (primært PFOS) i de undersøgte blodprøver er på niveau med eller lavere end det gennemsnitlige niveau for den danske befolkning. Undersøgelsen finder ingen sammenhæng mellem rekreativt ophold (surfing) i vand med havskum og et øget PFAS-niveau i blodet (Madsen et. al, 2025).

5.5.1.8 Belgien

I Belgien har den uafhængige forskningsinstitution VITO udført undersøgelser af PFAS i havvand og havskum. Undersøgelsen er udført for de belgiske sundhedsmyndigheder (AZG). Undersøgelsen omfatter prøvetagning på to vilkårlige lokaliteter på den belgiske nordsøskyst ved hhv. Knokke og De Haan. Lokaliteterne er beliggende ca. 80-100 km vest for Antwerpen. Ved undersøgelsen blev der i 2021 og 2022 udtaget prøver af havskum og havvand med henblik på analyse for forekomst af PFAS. Endvidere er der analyseret prøver af strand- og klitsand (Vito, 2023). Vand og skumprøver er blevet analyseret for 51 PFAS-forbindelser, hvor

der for en række stoffer opdeles i lineære og forgrenede isomerer (modsat de danske undersøgelser, der kun har afrapporteret totalindholdene). Resultater af prøvetagning af havvand og havskum fremgår af TABEL 5.2 herunder.

TABEL 5.2. Resultater af analyser af havvand og havskum ved Knokke og De Haan, Belgien 2021-2022. Modificeret efter (Vito, 2023a).

Lokalitet	Knokke	De Haan	Knokke	De Haan	De Haan	Knokke	Enhed
Prøvemedia	Vand	Vand	Skum	Skum	Kontrol	Kontrol	
Lineær PFAS, i alt	<10	250	1.500.000	40.000	<10	<10	ng/L
PFAS, i alt	<10	250	2.400.000	51.000	<10	<10	ng/L
Lineære SUM 4 PFAS, i alt	<10	<10	1.400.000	36.000	<10	<10	ng/L
SUM 4 PFAS, i alt	<10	<10	2.200.000	47.000	<10	<10	ng/L

Der blev påvist en række meget høje koncentrationer af PFAS i havskumprøverne (fra 8.700 ng/l til 2.400.000 ng/l for sum af alle påviste PFAS-forbindelser). PFOS og PFOA var de dominerende komponenter i prøver af havskummet. Summen af 4 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS) tegnede sig for 90 % af de samlede PFAS-koncentrationer i de mest forurenede havskumprøver. Der blev stort set ikke fundet PFAS i havvandsprøverne (koncentrationerne af de fleste PFAS-forbindelser lå under kvantificeringsgrænsen med undtagelse af PFBA i havvand fra De Haan). Vandanalyserne har en relativ høj detektionsgrænse (<10 ng/l) i forhold til undersøgelser udført i Danmark m.fl. (Vito, 2023a).

Prøver af sand (overfladeprøver) fra strand og klit ved lokaliteten Knokke viste indhold af sum af 4 PFAS på op til 3,7 µg/kg TS og 9,8 µg/kg TS for hhv. sum af 4 PFAS og total PFAS. Analyserne af jorden viste indhold under belgiske kvalitetskriterier for naturreservat og rekreativt område (Vito, 2023). De målte indhold i Belgien er på niveau med danske undersøgelser, hvor indhold af PFAS i strandsand er under danske jordkvalitetskriterier (Lemvig Kommune, 2022).

Projektet i Belgien omfatter risikovurdering ved ophold i havvand med havskum med høje indhold af PFAS. Der er ingen gældende standarder for vurdering af eksponering eller vejledende værdier beskrevet i litteraturen ift. en potentiel sundhedsrisiko ved kontakt med havskum. Risikovurdering tager udgangspunkt i vurdering udført i ferskvand i Michigan, USA (Michigan Department of Health and Human Service, 2018; Schwichtenberg et al., 2020). VITO's vurdering omfatter indtagelse (oral kontakt) af havskum og havvand og desuden kontakt gennem huden (dermal kontakt). Risiko ved oralt indtag og optag gennem hud i forbindelse med fritidsaktiviteter i vand er baseret på koncentration og mængde i havskum og havvand, hvor kropsvægt har betydning for eksponering. Desuden indgår en række antagelser, herunder mængden af havvand/-skum, som indtages ved badning (oral), opholdstid i vandet ved badning (dermal) samt antallet af badedage på en sommer (Vito, 2023). Risiko er vurderet i forhold til EU-anbefalinger (EFSA) for maksimalt ugentlig indtag (TWI) af sum af 4 PFAS. Beregningerne viser, at oralt indtag af skum er den største påvirkning, og at denne udgør en risiko for primært børn på grund af børnenes mindre kropsvægt (Vito, 2023a).

I Belgien har VITO desuden gennemført undersøgelser af indhold af PFAS i luften (aerosoler) samt målinger af deposition (samlet våd og tør deposition). Målingerne er udført ved nordsø-kysten ved Knokke vest for Antwerpen. Målinger af deposition er udført på to forskellige lokationer (benævnt Zoute 2 og Duinbergen) i perioden april-september 2022. Prøver af luft (aerosoler) og deposition er blevet analyseret af VITO for indhold af PFAS ved kvantitative bestemmelser (Vito 2023b). Målinger af aerosoler i luft er udført med high volume sampler med et flow 2,5-4,5 m³/h, hvor partikler opsamles på et kvartfilter i opsamlingsperioder fra 12-15 dage (Vito, 2023b). Prøverne er analyseret for sum af 4 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS). Indhold af PFAS i luften ved udførte målinger fremgår af TABEL 5.3.

TABEL 5.3. Gennemsnitlig koncentration (i ng/m³) af total PFAS og sum af 4 PFAS i aerosoler på de to overvågningssteder (modificeret fra Vito 2023b).

Indhold af PFAS	Total PFAS	Sum af 4 PFAS	Total PFAS	Sum af 4 PFAS
Målelokation	Zoute 2	Zoute 2	Duinbergen	Duinbergen
Gennemsnit (ng/m ³)	0,219	0,082	0,136	0,035
Minimum (ng/m ³)	0,145	0,065	0,101	0,020
Maksimum (ng/m ³)	0,387	0,105	0,221	0,075
Median (ng/m ³)	0,167	0,078	0,117	0,022
Antal målinger over LOQ (i alt)	6 (6)	6 (6)	5 (5)	5 (5)

Deposition er bestemt ved måling af både våd- og tørdeposition i en samlet prøvetagning, dvs. der kan ikke skelnes mellem våd- og tørdeposition. Prøvetagning er udført ved opsamling i glaskrucker med diameter på 9,5 cm og et volumen på 1,5 l. Glaskruckerne har været opsat 1,5 m over terræn i 28 dage, hvorefter de er blevet forseglet inden transport til laboratorium.

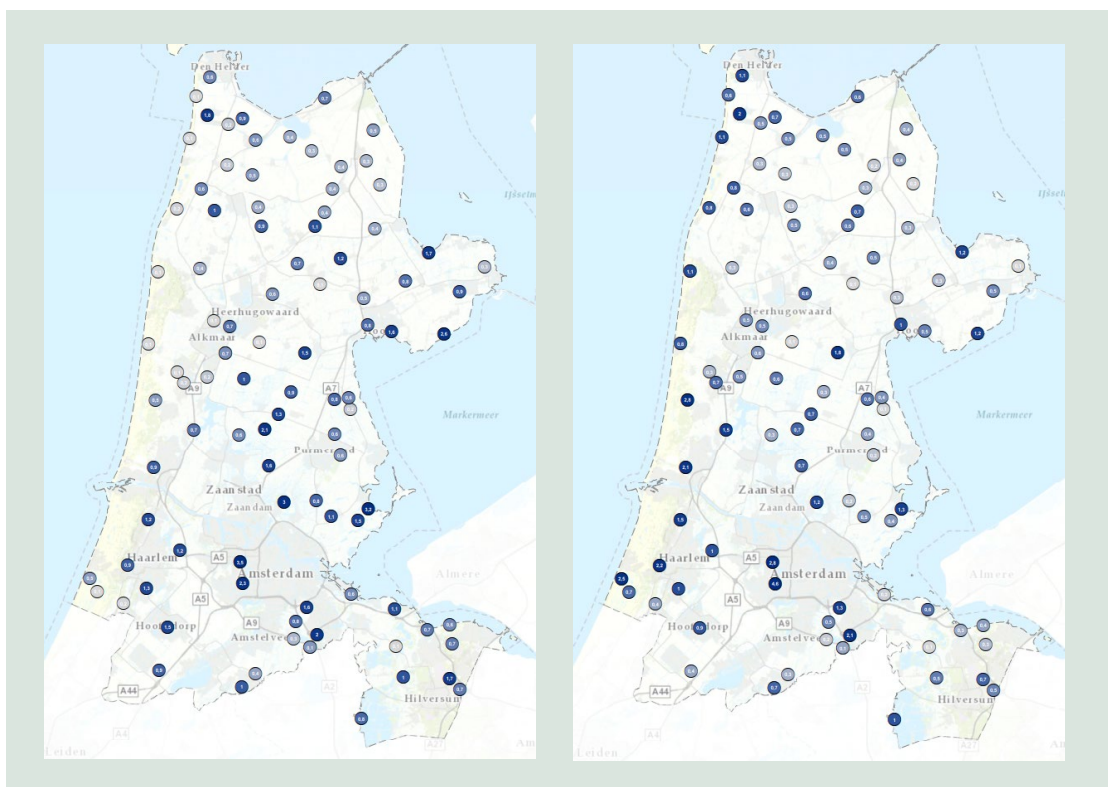
TABEL 5.4. Gennemsnitlig deposition i ng/m²/dag for total PFAS og summen af PFOA, PFNA, PFHxS og PFOS på de to målesteder. Modificeret fra Vito 2023b.

Indhold af PFAS	Total PFAS	Sum af 4 PFAS	Total PFAS	Sum af 4 PFAS
Målelokation	Zoute 2	Zoute 2	Duinbergen	Duinbergen
Gennemsnit (ng/m ² /dag)	80	61	68	56
Minimum (ng/m ² /dag)	28	4	21	11
Maksimum (ng/m ² /dag)	185	160	165	144
Median (ng/m ² /dag)	71	61	43	34
Antal målinger over LOQ (i alt)	4 (4)	4(4)	4 (4)	4 (4)

5.5.1.9 Holland

Sweco Nederland B.V. har for provinsen Noord-Holland udført undersøgelser af påvirkning af jord og grundvand (Sweco, 2019; Sweco, 2021b). Ved studierne har Sweco indsamlet data for PFAS i jorden med henblik på at vurdere indhold af PFAS, primært PFOA og PFOS, fra diffuse kilder i Noord-Holland. Ved undersøgelsen blev der målt PFAS i jorden på ca. 100 lokaliteter, hvoraf de 10 lokaliteter ligger ved provinsens vestkyst. Ved disse lokaliteter, som primært var naturreservat, blev der mod forventning påvist forhøjet indhold af PFAS i jordprøverne i forhold til områder længere væk fra kysten (Sweco, 2019).

Undersøgelsen kigger desuden på betydning af jordparametre, herunder vandindhold, lerindhold og organisk stof. Data viser, at indholdet af PFOA generelt er påvirket af jordparametrene vandindhold, lerindhold og organisk stof. Der kan således forventes højere indhold af PFOA i organiske jorde, hvor der også er et højere vandindhold. Data viser ikke samme relation for PFOS. På baggrund af data korrigeres indhold af PFOA for indhold af organisk stof med henblik på at vurdere diffus påvirkning fra nedfald fra luften (Sweco, 2019). Indhold af PFOA (tv.) og PFOS (th.) i jorden er illustreret i FIGUR 5.18.



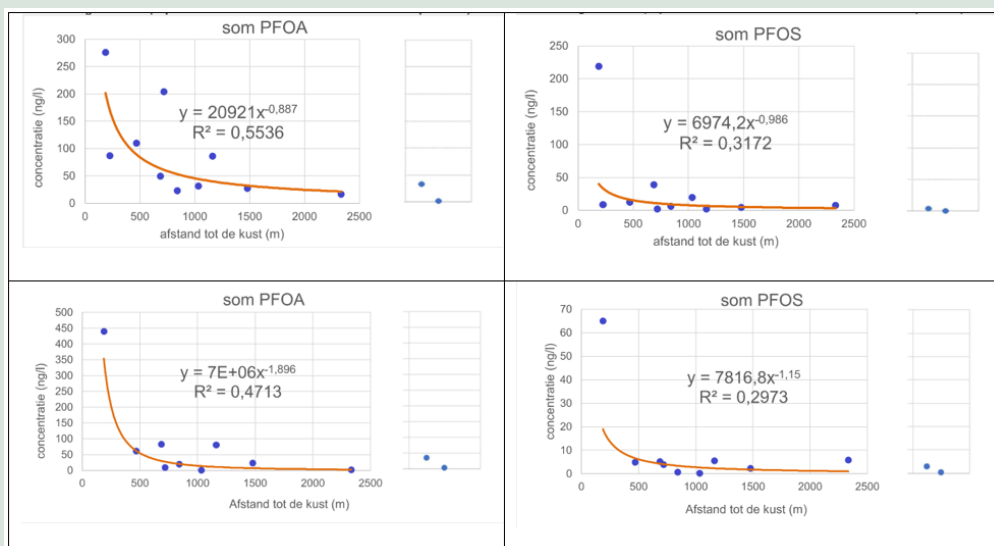
FIGUR 5.18: Indhold af PFOA tv. (0,1 – 4,7 µg/kg TS) og PFOS th. (0,1 – 8,6 µg/kg TS) i toplag jord 0,0-0,1. Des mørkere blå farve i prøvepunkt, des højere indhold af PFOA/PFOS (Sweco, 2019).

For PFOA er der en tendens til, at niveauerne ser ud til at stige fra vest til øst. Der er relativt lave niveauer af PFOA på kysten, hvor jordtypen er sand, mens indhold af ler og tørv stiger mod øst, hvorfor det vurderes at indholdet af PFOA primært er styret af jordparametre. Fordeling af PFOS er det omvendte billede i forhold til PFOA. Relativt høje niveauer af PFOS måles generelt på kysten. Dette er et ret konsistent billede fra nord til syd. Mod øst falder niveauerne i det gennemsnitlige indhold. Indhold af PFOA og PFOS i området ved Amsterdam vurderes at være påvirket af by og industri (Sweco, 2019).

Højeste indhold af PFOA og PFOS, hhv. 4,7 µg/kg og 8,6 µg/kg TS, er påvist kystnært på øen Texel i den nordlige del af provinsen. Det vurderes, at de forhøjede værdier af PFOS ved kysten kan være forårsaget af opkoncentrering og spredning af PFAS i havvandet via Sea Spray Aerosols (Sweco, 2019).

De påviste indhold i jorden vurderes at være problematiske, da de kystnære områder i Holland bruges til produktion af drikkevand. På denne baggrund er der udført en screeningsundersøgelse af PFAS i grundvandet 10 steder langs kysten samt to referencemålinger længere inde i landet. De to referencelokaliteter havde en lignende geologi (sand med terrænnært grundvand) og er beliggende hhv. 8 og 22 km fra kysten (Sweco, 2021).

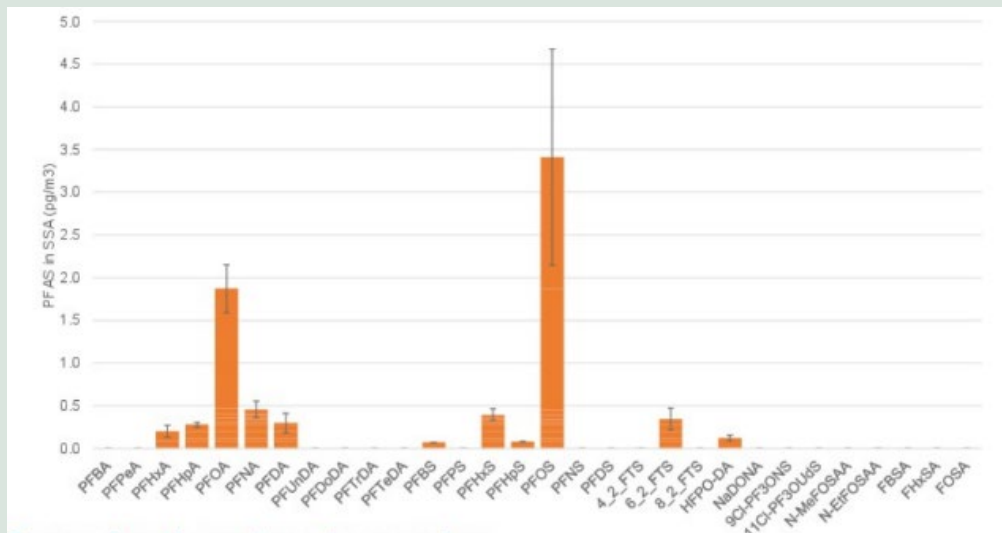
Prøvetagning er inddelt i øvre grundvand (0,5-1,5 m under vandspejl) og nedre grundvand (4-5 m under vandspejl). Der er påvist en række PFAS-forbindelser i grundvand, hvor PFOA og PFOS forekommer i næsthøjeste koncentrationer. FIGUR 5.19 viser indhold af PFOA (tv.) og PFOS (th.) i grundvand (Sweco, 2021).



FIGUR 5.19 Indhold af PFOA (tv.) og PFOS (th.) i øvre (øverst) og nedre (nederst) grundvand (Sweco, 2021). De to referencelokaliteter fremgår yderst til højre i alle graferne.

Data viser, at indholdet af PFOA og PFAS falder med afstanden til kysten. Tendensen er mest udbredt for PFOA. Indhold i det øvre grundvand er generelt højere end i det nedre grundvand. Generelt vurderes det, at grundvand i kystnære områder kan påvirkes af PFAS via Sea Spray Aerosols (Sweco, 2021).

En forskergruppe med deltagelse af bl.a. KWR har udført målinger af PFAS i SSA ved den hollandske kyst. Prøvetagning af PFAS-aerosoler i luften med high volumen sampler viser indhold af PFAS, primært PFOS og PFOA, i luften ved kysten. Gennemsnitlige indhold af PFAS-forbindelser fremgår af FIGUR 5.20 (Almato et al., 2021)



FIGUR 5.20: Indhold af PFAS i målinger i luften (Sea Spray Aerosols) i kystnære luftmålinger Holland (Almato et al, 2021).

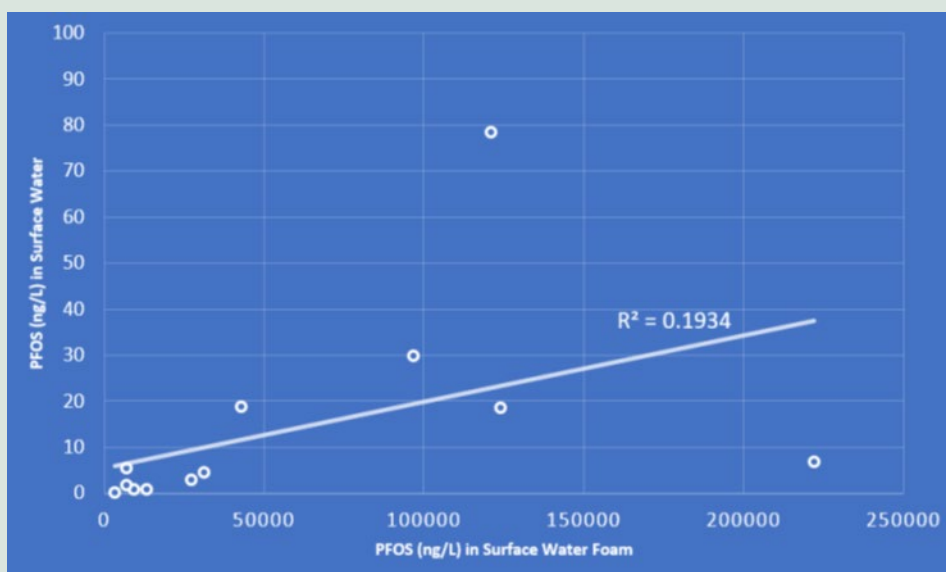
Undersøgelserne viser desuden, at kunstigt grundvand produceret ved infiltration af ferskvand i klitter ved Nordsøkysten generelt indeholder højere indhold af PFAS end naturligt grundvand i længere afstand fra kysten, hvilket vurderes at være påvirkning fra SSA.

5.5.1.10 USA

I USA er der gennemført undersøgelser i bl.a. staterne Michigan, Wisconsin og South Carolina. Undersøgelserne har fokus på opkoncentrering via skumdannelse og omfatter både ferskvand (store søer og vandløb) og saltvand, hvor der er fokus på områder med kendte forureninger fra PFAS-produktion, brandøvelsespladser m.v.

I staten Michigan har statens miljøstyrelse (Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, forkortet EGLE) igangsat projekter i forbindelse med opkoncentrering af PFAS i skum fra vandløb og søer, herunder udarbejdet procedure for prøvetagning af skum med henblik på analyse for PFAS (EGLE, 2019).

Et studie udført af AECOM for EGLE omfatter prøvetagning af vand (bulk water) og viser sammenhæng mellem indhold af vandfase (ferskvand) og skumfase. Prøverne er udtaget i vandløb (Rogue River, Thornapple River og Huron River) og søer (Van Etten Lake, Lake Margrethe og Cedar Lake) og analyseret for 41 PFAS-forbindelser (EGLE, 2021). Sammenhæng mellem PFOS i vandfase (Surface Water) og skumfase (Surface Water Foam) er illustreret i FIGUR 5.21.



FIGUR 5.21 Sammenhæng mellem PFOS i vandfase (Surface Water – Y-akse) og skumfase (Surface Water Foam – X-akse) (EGLE 2021).

Målingerne viser, at der kan påvises høje indhold af PFOS i skum på over 200.000 ng/l fra vandløb og søer. I studiet vurderes det (på baggrund af FIGUR 5.21), at der ikke er lineær sammenhæng mellem indhold af PFAS (PFOS) i overfladevand og skum (EGLE, 2021).

Et andet studie omfatter undersøgelser udført ved en sø for EGLE. Søen har flere kilder til forurening med PFAS, herunder brandøvelsespladser i forbindelse med lufthavn og perkolat fra losseplads. Prøvetagning omfatter otte sammenhørende prøver af overfladevand (bulk water) og skum fra bredzonen ved søen. Endvidere er der udført prøvetagning af "baggrunds niveau" ved en nærliggende sø, hvor der ikke er kendte punktkilder. Ved undersøgelsen er vand- og skumprøver blev analyseret for en række PFAS-forbindelser, herunder PFAA'er og precursors

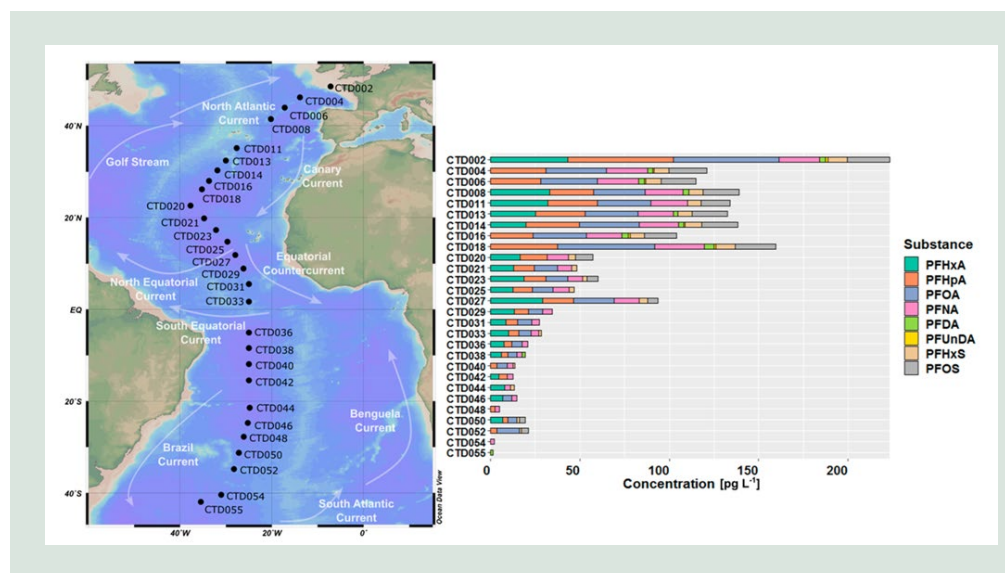
samt nyere PFAS-forbindelser (HFPO-DA/Gen-X, ADONA, F53-B). Desuden blev vand- og skumprøver analyseret for organisk stof (Dissolved Organic Carbon – DOC). Resultaterne for skumprøver viser, at 16 PFAS-forbindelser (PFAA'er og disses precursors) blev påvist i koncentrationer op til 97.000 ng/l (for PFOS), mens kun 5 PFAS-forbindelser blev påvist i analyser af det underliggende vand (bulk water). Der blev observeret opkoncentreringsfaktorer (EF) fra en faktor 10 (PFHxA) til faktor 2830 (PFOS). Skumprøver udtaget ved bredzonen ud for brandøvelsespladser (AFFF-sites) viser det højeste indhold af PFAS. Indhold af PFAS i skumprøverne udgjorde mindre end 0,1 % af det samlede organiske stof (DOC). Skumprøver for baggrunds niveau fra en nærliggende sø viser indhold på op til 1.500 ng/l (PFOS). På baggrund af undersøgelserne er der opstillet en risikovurdering for rekreativ anvendelse af søen (badning), hvor PFAS-eksponering kan ske ved optag gennem huden (dermal) samt indtag af vand og skum gennem munden (oral). Det vurderes, at oral indtagelse af skum er den væsentligste eksponeringsvej (Schwichtenberg et al., 2020).

5.5.2 Spredning af PFAS på global skala fra havvand med fokus på Sea Spray Aerosols

PFAS er påvist over alt på jordkloden, herunder øde områder som Arktis, Antarktis og Tibet. Det vurderes, at spredning over lange distancer foregår ved aerosol transport. Spredning kan ske fra lave indhold af PFAS i havvand, der via bølger og opstigende bobler omdannes til SSA. SSA er en væsentlig kilde til den globale spredning af PFAS og er påvist i Europa, Asien, Afrika, Arktis og Antarktis (Fast, 2022) (Cousins et al, 2022).

5.5.2.1 Indhold af PFAS i havvand

I forbindelse med videnskabelig sørejse i oktober-november 2019 fra Southampton, UK til Punta Arenas, Chile (29th Atlantic Meridional Transect - ATM 29) er der udtaget prøver fra havvandet fra 28 lokationer i et nord-sydgående transekt. Vandprøverne er analyseret for PFAS med lav detektionsgrænse (<1 pg/l). Ved undersøgelsen er der påvist PFAS i alle analyserede vandprøver fra øvre vandlag (0-500 m), hvor indholdet af PFAS aftager med afstand til kysten, og der er et markant fald i indhold af PFAS syd for Ækvator. Resultater er fremstillet i FIGUR 5.22 (Savvidou et al, 2023).



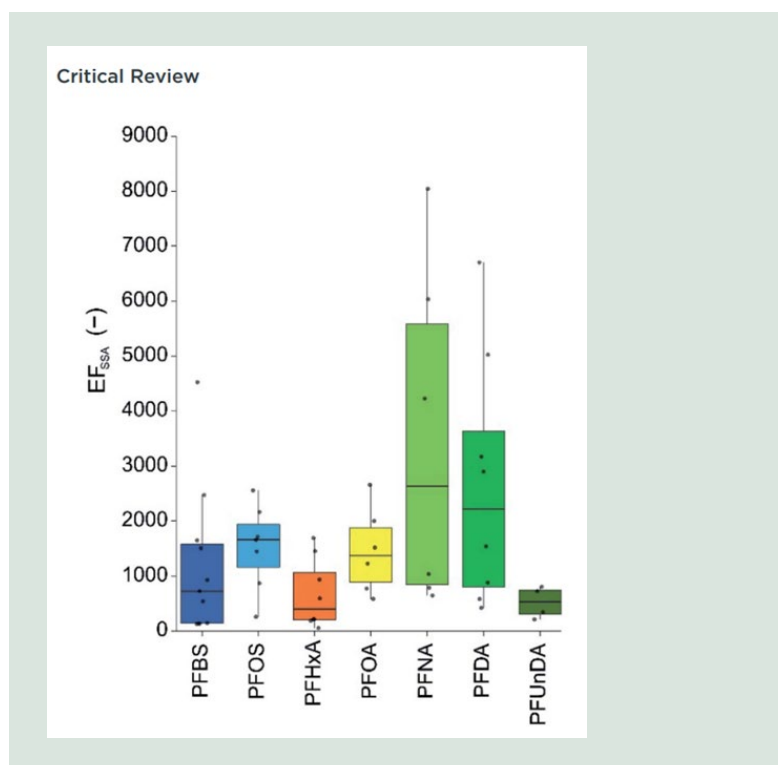
FIGUR 5.22 Kort med prøvetagningssteder langs transekt samt indhold og sammensætning af PFAS i analyserede vandprøver (udtaget 2 og 5 m under havoverfladen) (Savvidou et al, 2023).

Data viser desuden, at PFNA oftest blev påvist (89 % analyserede prøver) efterfulgt PFHpA (86 %) og PFOA (78 %). Undersøgelsen omfattede desuden prøvetagning i forskellige dybder ned til 2.000 m. I den nordlige del af transektet er PFAS påvist i alle analyserede vandprøver ned til 2.000 m. I den sydlige del af transektet er PFAS ikke påvist i de dybere vandprøver (Savvidou et al, 2023).

5.5.2.2 Dannelse af SSA fra havvand

Flere studier har kigget på opkoncentrering og spredning af PFAS via dannelse af SSA ved bølgeprocesser i oceanerne.

Et studie udført i 2018 omfattede prøvetagning af havvand (SW – i alt 17 prøver), Surface Mikro Layer (SML – i alt 17 prøver) og Sea Spray Aerosoler (SSA – 7 prøver) ved Livingston Island ved Antarktis. Indhold i havvand viste et gennemsnitligt indhold af PFAS på 313 pg/l, mens prøver af SML havde et gennemsnitligt indhold på 447 pg/l, og SSA viste et gennemsnitligt indhold 0,67 pg/m³. Opkoncentrering af PFAS i SML og SSA varierede mellem 1,2 og 5 samt mellem 522 og 4690 for hhv. SW-SML og SML-SSA. Den største opkoncentrering sker således ved dannelse af aerosoler, dvs. fra SML til SSA. Studiet viser, at der forekommer PFAS i det øvre havvand på selv meget øde lokationer (Antarktis), og at der sker en opkoncentrering i mikrolaget og ved dannelse af aerosoler ved selv meget lave indhold af PFAS i havvand (Casas et al, 2020). Data for opkoncentrering af forskellige PFAS ved dannelse af SSA fremgår af FIGUR 5.23 herunder (Casas et al, 2020).



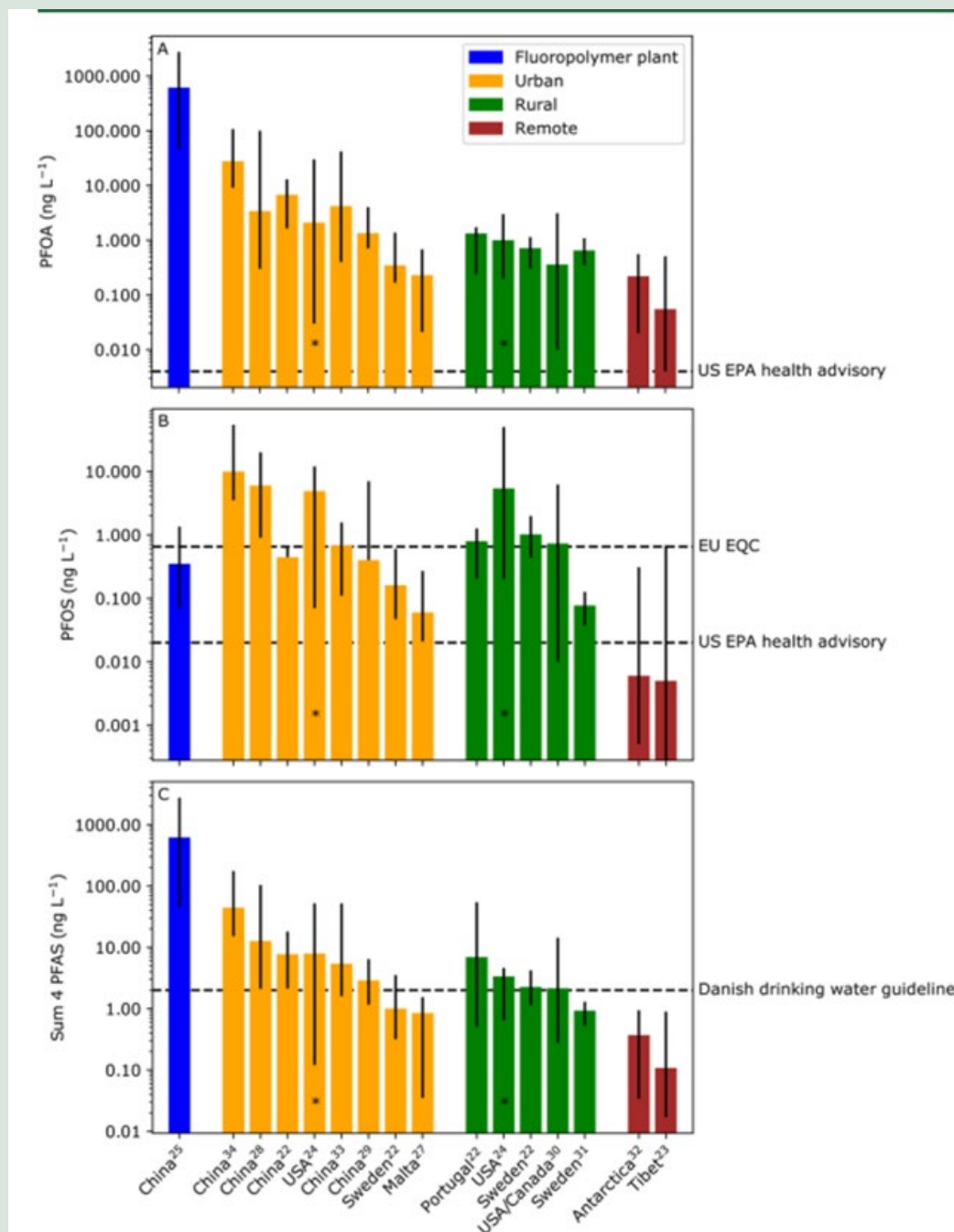
FIGUR 5.23 Opkoncentreringsfaktorer ved dannelse af SSA for forskellige PFAS-forbindelser (Casas et al, 2020).

Et andet studie har i perioden 2018-2020 omfattet prøvetagning af SSA på to lokaliteter i Norge (Andøya og Birkenes), som er beliggende hhv. 1,3 og 20 km fra åbent hav, på fjeldet hhv. 180 og 380 m over havet. Prøvetagning af SSA er sket med high volume samplere (1.500 m³/prøvetagning), og prøverne er analyseret for PFAS (PFAA'er) samt natrium og magnesium, som er tracere for SSA. Indholdet af PFAA i luften korrelerer med indholdet af natrium, hvilket

indikerer, at indholdet af PFAS i luften skyldes dannelse og transport af SSA. Det gennemsnitlige indhold af PFCA'er (primært PFOA, PFNA og PFDA) var 0,46 og 0,22 pg/m³ ved hhv. Andøya og Birkenes, mens det gennemsnitlige indhold af PFSA'er (primært PFOS) var 0,033 og 0,045 pg/m³ for hhv. Andøya og Birkenes (Sha et al. 2022).

Et studie med udførte laboratorietest på oceanvand fra Atlanterhavet udtaget i et nord-sydgående transekt i forbindelse med videnskabelig sørejse (se afsnit 5.5.2.1) viste opkoncentrering (EF) af PFAA'er op til en faktor 100.000. På baggrund af undersøgelsesresultaterne er det estimeret, at global emission af PFOS og PFOA fra havene til atmosfæren udgør hhv. 49 og 26 tons/år. Heraf udgør emissioner i kystnære områder ca. 30 %. Det vurderes på baggrund af disse estimater, at der forekommer en "sekundær emission" af en række PFAA'er (primært PFOS og PFOA) fra de globale oceaner via SSA til atmosfæren i en størrelsesorden, som er sammenlignelig med eller større end estimater for andre kendte globale kilder af PFAA til atmosfæren, herunder emissioner fra PFAS-produktion og nedbrydning af precursors (Sha et al., 2024)

Processer med spredning af PFAS fra lave forureningsniveauer i havvand via bl.a. SSA til atmosfæren har medført, at de planetære grænser for udbredelse af PFAS er overskredet, og det således er en af årsagerne til fund af PFAS-forbindelser i regnvand på øde lokaliteter uden væsentlig industriel produktion såsom Tibet og Antarktis. Dette er vurderingen i artikel fra 2022 fra Stockholm Universitet (Cousins et al, 2024). FIGUR 5.24 herunder viser indhold af PFOA (A), PFOS (B) og sum af 4 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA og PFHxS) (C) i nedbør indsamlet forskellige steder på Jorden. Indhold er opdelt i fire kategorier, som er sorteret efter indhold af sum af 4 PFAS. "Fluoropolymer plant" er prøver udtaget ved fabrik med fluoropolymer (PFAS) produktion. "Urban" er prøver udtaget i byer og urbaniserede regioner. "Rural" er prøver udtaget i lavt befolkede områder. "Remote" er prøver udtaget i regioner med meget lav eller ingen menneskelig beboelse (Cousins et al, 2022).



6. Feltundersøgelser i Husby Klitplantage

6.1 Udvalgelse af lokalitet og omfang af undersøgelse

Der er udvalgt et område i Husby Klitplantage i Midtjylland, hvor der er et stort sammenhængende naturområde, der er offentlig ejet, uden kendte kilder til PFAS (industri, landbrug, spildevand fra f.eks. sommerhusområde, slamudlægning m.v.) og med et forventet højt grundvandsspejl.

I området er der udført en feltundersøgelse omfattende prøvetagning af jord (overfladeprøver), grundvand og overfladevand i et transekt fra kysten i retning mod nordøst (primære vindretning, jf. DMI, 2023a) ind i landet – i alt over en strækning på ca. 4 km. Grundvand er prøvetaget ved etablering af i alt 11 borer med filter i det øvre terrænnære grundvand. Undersøgelsen har desuden omfattet prøvetagning af havvand og havskum ved stranden.

6.2 Metodeverifikation

Vedr. PFAS-kontaminering

Forud for feltarbejde er alt udstyr børstet fri for snavs og skyllet med PFAS-frit vand. Mellem hver boring er udstyr, håndboregrej såvel som maskinboregrej, børstet og skyllet. Det er ved feltarbejdet sikret, at intet udstyr er i kontakt med forurenede flader (såsom jorden). Boringerne og prøvetagning er udført fra nordøst mod sydvest, således at områder med forventet lavt forureningsniveau er prøvetaget først og forventet højt forureningsniveau sidst (formodning om aftagende koncentrationsgradient langs transekt fra sydvest mod nordøst). For at undgå evt. kontaminering fra pejl ved vandprøvetagning, er der kun pejlet i overfladen af grundvandet før prøvetagningen, og pejlet er før brug vasket med PFAS-frit vand. For kontrol af metode er der udtaget fire vandprøver, som fremgår af TABEL 6.1.

TABEL 6.1. Oversigt over vandprøver udtaget for kontrol af PFAS-kontaminering

PrøveID	Beskrivelse
VA-KONTR-VASK-1	Udtaget vandprøve af vaskevand fra boresnegl i forbindelse med vask af udstyr ved boring B3
KONTR-ENTR-1	Kontrol af vand medbragt af entreprenør
VA-KONTROL-270623	'Blindprøve', som består af PFAS-frit vand, som er påfyldt prøvetagningsflaske i felten, og som har været transporteret sammen med de øvrige prøver.
VA-KONTROL-300723	'Blindprøve', som består af PFAS-frit vand, som er påfyldt prøvetagningsflaske i felten, og som har været transporteret sammen med de øvrige prøver.

Vedr. overfladeprøver

For at undersøge om de terrænnære blandeprøver af overfladejord, som er udtaget på et område på ca. 10 m², er repræsentative for et større område langs Vestkysten, er der udtaget en kontrolprøve i et felt på ca. 200 m². Denne er taget i dybden 0-0,1 m ved boring B5 og er udtaget ved 50 nedstik spredt på arealet. Denne ekstra overfladeprøve er benævnt BL5-ekstra/0-0,1 og er analyseret for de samme parametre som de øvrige jordprøver fra 0-0,1 m u.t. Prøven med de 50 nedstik ved B5 sammenlignes med prøven med fem nedstik ved B5. Hvis de to resultater er sammenlignelige, vurderes det, at prøver med fem nedstik er repræsentative for jorden i området.

6.2.1 Analyseresultater for metodeverifikation

Analyseresultater for vandprøver udtaget i forbindelse med kontrol af metode og kontaminering fremgår af tabel 1 i bilag 8, og det fremgår af tabellen, at der ikke er påvist indhold af PFAS over analysemetodens detektionsgrænse i tre af de fire analyserede kontrolprøver. I vandprøven, udtaget af vaskevand efter at boresnegl er blevet vasket, er der påvist 16 ng PFOS/l samt mindre indhold af PFOA, PFNA og PFDA, hvilket bekræfter, at afvaskningen potentielt kan minimere kontaminering mellem borehullerne. Der er dog ikke foretaget en ekstra skylning af boresneglen, der kan bekræfte sneglens renhed efter den første vask. Niveauerne af PFOS i vaskevandet er i størrelsesordenen 100 gange mindre end det, der er påvist i jordprøverne (ca. 1,6 µg/kg TS). For grundvandsprøverne har der været foretaget en grundig renpumpning/forpumpning inden prøvetagning af grundvand. Kontaminering fra bore-snegl vurderes således ikke at have betydning for tolkning af resultaterne.

Der er ikke påvist indhold af PFAS i de øvrige kontrolprøver, og der vurderes ikke at være risiko for kontaminering ved transport eller på laboratoriet. Vaskevand medbragt af bore-entreprenør var ligeledes PFAS-frit (22 testede forbindelser).

Resultat af BL5-ekstra/0-0,1, som er udtaget i et område på 200 m², fremgår af tabel 2 i bilag 8. Resultatet af kontrolprøven afviger fra prøven udtaget inden for et areal på 10 m², idet der i kontrolprøven fra arealet på 200 m² (udtaget som blandeprøve á 50 nedstik) ikke er påvist indhold af PFAS over analysemetodens detektionsgrænse, mens der i prøven fra arealet på 10 m² (udtaget som blandeprøve á 5 nedstik) er påvist indhold af sum 22 PFAS på 7 µg/kg TS. Indholdet af tørstof varierer for de to prøver og er for 200 m² og 10 m² hhv. 95,1 % og 81,5 %, ligesom indholdet af organisk indhold (glødetab) varierer mellem hhv. 5,4 % af TS og 43,4 % af TS. Der er således i kontrolprøven fra det store område et lavt indhold af organisk materiale, mens der i prøven fra det lille område er et højt indhold af organisk materiale, som i højere grad kan binde PFAS, hvilket kan forklare det højere indhold påvist i prøven. Blandeprøven á fem nedstik fra områder på 10 m² vurderes således ikke nødvendigvis at være repræsentativ for større områder, idet påvist indhold af PFAS i jord kan afhænge af parametre som f.eks. organisk indhold. Denne konklusion er dog i modstrid med lignende prøvetagning udført på Fanø i 2023 (Den Syddanske Udviklingspulje, 2023), hvor der var god overensstemmelse mellem prøver fra områder á 10 m² og referenceprøve fra område á 200 m².

6.3 Prøvetagning

6.3.1 Boringer

Der er den 27.-28. juni 2023 udført borearbejde i forbindelse med undersøgelsen i Husby Klitplantage. Boringerne er udført af Boreteknik A/S med NIRAS som tilsyn.

Undersøgelsen omfatter 11 filtersatte boringer (B1-B11), som udgør et transekt, der strækker sig fra B1 udført på stranden til B11 ca. 3,9 km nordøst herfor udført i markareal. B1-B7 og B9-B11, er udført med henblik på prøvetagning af terrænnært grundvand, mens B8 er udført med henblik på prøvetagning af både terrænnært samt dybere grundvand.

- På grund af begrænsede adgangsforhold for borerig er boringerne B1, B4, B6 og B7 udført som forede filtersatte håndboringer til 2,5 m u.t. Boringerne er filtersat med 2 m filter i toppen af grundvandsmagasinet og er afsluttet med ekspanderende toppropper (T6 propper).
- Boringerne B2, B3, B5, B9, B10, B11 er udført som forede filtersatte tørboringer ned til 3 m u.t. og filtersat med 2 m filter i toppen af grundvandsmagasinet og er afsluttet med T6 propper.
- For at undersøge den vertikale spredning af PFAS er der udført to ekstra boringer i selve transektet ved B8. Boring B8 er udført som en foret tørboring med tre separate borehuller, der er filtersat i tre niveauer. Det højeste niveau er filtersat 1-3 m u.t., herunder er der filtersat i et niveau umiddelbart over et lerlag fra 6-7 m u.t. Det dybeste

niveau er filtersat med 3 m filter fra 8,4-11,4 m u.t., idet der fra 7,5 m u.t. og til planlagt bund af boring 11 m u.t. forekom ler, men med sandslirer. Filtrene er afsluttet med T6 propper.

Ved hver filtersat boring er der udtaget terrænnære jordprøver med håndbor i et område på ca. 10 m². Jordprøverne er udtaget som blandeprøver á fem nedstik, og der er udtaget jordprøver til kemisk analyse fra hhv. 0-0,1 og 0,4-0,5 m u.t. Der er kun udtaget én blandeprøve ved B8.

Boringernes placering, samt top af filterrør, er indmålt med dGPS og kan ses på situationsplanen i bilag 1. Efter borearbejdet er jorden blevet udspredd og revet, således at der ikke forekommer terrænregulering grundet feltarbejdet. Fotodokumentation af udført borearbejde fremgår i bilag 11. Oversigt over udførte borer fremgår af TABEL 6.2.

TABEL 6.2. Oversigt over udførte borer

Borings-navn	Dato	DGU-nr.	Dybde (m u.t.)	Filtersætning (m u.t.)	Matrikel	Ejer	Afstand til havet [m]
B1	28-06-2023	72. 926	2,5	0,5-2,5	Strand	NST	73
B2	28-06-2023	72. 927	3	1-3	113a	NST	212
B3	28-06-2023	72. 928	3	1-3	113a	NST	288
B4	28-06-2023	72. 929	2,5	0,5-2,5	113a	NST	499
B5	28-06-2023	72. 930	3	1-3	113a	NST	724
B6	28-06-2023	72. 931	2,5	0,5-2,5	113a	NST	1.000
B7	28-06-2023	72. 932	2,5	0,5-2,5	90a	NST	1.497
B8_3	28-06-2023	72. 935	3	1-3	90a	NST	1.896
B8_2	28-06-2023	72. 934	7	6-7	90a	NST	1.896
B8_1	27-06-2023	72. 933	11,5	9,5-11,5	90a	NST	1.896
B9	27-06-2023	72. 936	3	1-3	90a	NST	2.700
B10	27-06-2023	72. 937	3	1-3	226	NST	3.163
B11	27-06-2023	72. 925	3	1-3	7000h	Kommune	4.059

Der blev ført fuldtidstilsyn med alt borearbejdet og udarbejdet borejournal. Der er i felten ikke observeret nogen forurening på baggrund af jordens udseende og lugt. Borejournaler for alle borerne er vedlagt i bilag 6.

I perioden, hvor borearbejdet er udført, har vejret været tørt og overvejende skyfrit med frisk til hård vind fra nordvest den første dag og svag vind fra vest den anden dag. I TABEL 6.3 fremgår en oversigt over vejrforholdene.

TABEL 6.3. Vejrforhold i periode med prøvetagning. Data fra feltjournal og (DMI, 2023b)

Dato	Lokation	Vejr aktuelt	Temp. (°C)	Tryk (hPa)	Vindretning fra	Vindstyrke
28. juni	B1	Skyfrit, tørt	20	1015	V	Svag
28. juni	B2	Skyfrit, tørt	21	1015	V	Svag
28. juni	B3	Skyfrit, tørt	21	1015	V	Svag
28. juni	B4	Skyfrit, tørt	21	1015	V	Svag
28. juni	B5	Skyfrit, tørt	20	1015	V	Svag
28. juni	B6	Skyfrit, tørt	20	1015	V	Svag
28. juni	B7	Skyfrit, tørt	20	1015	V	Svag

Dato	Lokation	Vejr aktuelt	Temp. (°C)	Tryk (hPa)	Vindretning fra	Vindstyrke
28. juni	B8_3	Skyfrit, tørt	19	1012	V	Svag
28. juni	B8_2	Skyfrit, tørt	19	1012	V	Svag
27. juni	B8_1	Enkelte skyer, tørt	18	1012	NV	Frisk - hård
27. juni	B9	Enkelte skyer, tørt	19	1012	NV	Frisk - hård
27. juni	B10	Enkelte skyer, tørt	17	1015	NV	Frisk - hård
27. juni	B11	Enkelte skyer, tørt	18	1015	NV	Frisk - hård

6.3.2 Overfladejord

Fra borerne B1-B11 er der som beskrevet ovenfor ved hver boringsplacering udtaget to blandeprøver i 0-0,1 m u.t. og 0,4-0,5 m u.t. Der er således udtaget i alt 23 jordprøver benævnt BL1–BL11 (inkl. BL5 ekstra/0-0,1). Feltskemaer vedrørende prøveudtagningen er vedlagt i bilag 7.

6.3.3 Grundvand

Der er udtaget i alt 13 grundvandsprøver fra de 11 etablerede borer, hvoraf B8 er etableret med tre separate borehuller og indgår med tre filtre.

Vandprøverne er udtaget med nye Eco-pumper samt nye PE-slanger efter forpumpning. Ved vandprøvetagningen er der målt feltparametre (pH, ledningsevne, iltindhold, redoxpotentiale samt temperatur). Borerne er forpumpet ca. 50-400 liter afhængig af filterdybde, til der blev opnået stabile niveauer for feltparametrene. Alle filtrene havde kontinuerligt flow ved prøvetagningen, undtagen B8_1 og B10, som begge pumpede tørre. Det var derfor ikke muligt at måle feltparametre i B8_1, mens det var muligt at foretage én målerunde i B10.

I forbindelse med vandprøvetagning er der udført en pejlerunde af de udførte borer. Borerne B4-B11 er pejlet den 3. juli 2023, mens B1-B3 er pejlet den 4. juli. Samtlige pejleresultater fremgår af TABEL 7.1 i kapitel 7 samt af potentialekort i bilag 3. Feltskemaer vedrørende prøveudtagningen er vedlagt i bilag 7.

6.3.4 Overfladevand

I områder, hvor der er udført en boring, er der blevet indsamlet overfladevand, hvis der var vandhuller eller lignende i nærheden. Vandprøver er udtaget som dykkede prøver, hvor prøvetagningsflasken med låg føres under vand, hvorefter flasken åbnes for prøvetagningen og lukkes igen, inden flasken løftes op af vandet. Der er blevet udtaget i alt fire overfladevandsprøver benævnt VA-1, VA-3, VA-4 og VA-5. Det var ikke muligt at udtage vandprøver ved B2 (VA-2) og B6-B11 (VA-6 - VA-11), da der ikke var overfladevand i nærheden af borerne.

6.3.5 Havvand og havskum

Der er den 27. juni og den 4. juli 2023 udtaget prøver af havskum – hhv. 'skum-1-husby' og 'skum-2-husby'. Skumprøverne er, jf. bilag 10, opsamlet med hænderne (påført nitrilhandsker) og opbevaret i rilsanposer, hvorefter de, efter at skummet er kollapsede, er overhældt til prøvetagningsflasker.

Der er den 29. juni 2023 udtaget en vandprøve fra havet. Vandprøven er udtaget ved flaskedyk.

6.4 Analyser

Alle jordprøverne er analyseret for 22 PFAS ved metoden DIN 38414-14 og organisk indhold af ALS Denmark A/S. Jordprøver fra 0-0,1 m u.t. er endvidere analyseret for magnesium og natrium.

Alle grundvandsprøver er analyseret for 22 PFAS hos Eurofins Miljø A/S ved metoden M 0441 med LC-MS/MS.

Alle overfladevandprøver er analyseret for 22 PFAS ved metoden M 0441 med LC-MS/MS samt natrium, magnesium og klorid hos Eurofins Miljø A/S.

Skumprøver er analyseret for hhv. 49 PFAS (SKUM-1) ved metoden DIN 38407-42 med LC-MS/MS og 22 PFAS (SKUM-2) ved metoden M 0441 med LC-MS/MS, mens havvand er analyseret for 22 PFAS ved metoden M 0441 med LC-MS/MS samt natrium, magnesium og chlorid hos Eurofins Miljø A/S.

Analyseresultater fremgår af tabeller i bilag 8, og laboratoriets analyserapporter er vedlagt i bilag 9.

For PFAS er der analyseret både lineære og forgrenede forbindelser. Detektionsgrænser for de 22 PFAS fremgår af Tabel 6.4. Detektionsgrænser for analysen af 49 PFAS fremgår af analyserapporten vedlagt i bilag 9.

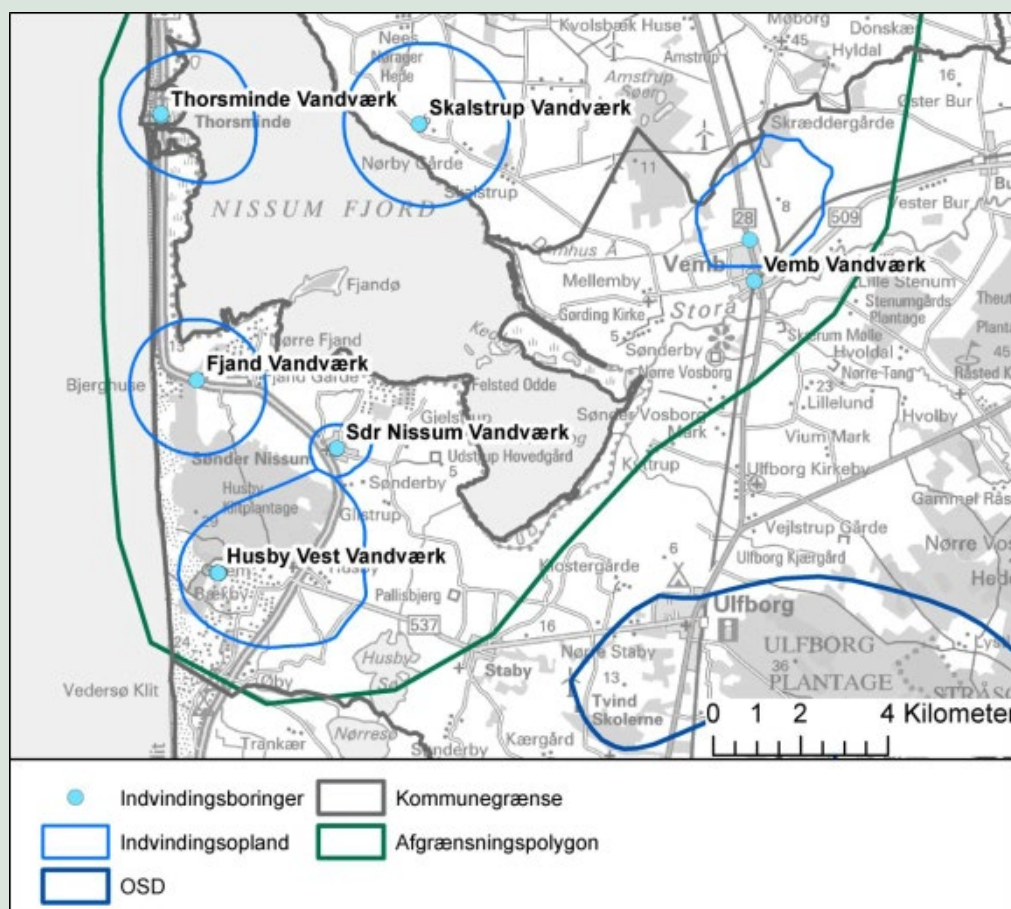
Tabel 6.4: Oversigt over analyserede PFAS og detektionsgrænser

Medie	Vand (ng/l)	Jord (µg/kg TS)
PFBA (Perfluorbutansyre)	0,6	0,5
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	0,3	0,5
PFPeA (Perfluorpentansyre)	0,3	0,5
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	0,3	0,5
PFHxA (Perfluorhexansyre)	0,3	0,5
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	0,3	0,5
PFHpA (Perfluorheptansyre)	0,3	0,5
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	0,3	0,5
PFOA (Perfluoroktansyre)	0,3	0,5
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	0,2	0,5
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	0,3	0,5
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	0,3	0,5
PFNA (Perfluornonansyre)	0,3	0,5
PFNS (Perfluornonansulfonsyre)	0,3	0,5
PFDA (Perfluordekansyre)	0,3	0,5
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	0,3	0,5
PFUnDA (Perfluorundekansyre)	0,3	0,5
PFUnDS (Perfluorundekansulfonsyre)	1	2,5
PFDoDA (Perfluordodekansyre)	0,3	0,5
PFDoDS (Perfluordodekansulfonsyre)	1	0,5
PFTTrDA (Perfluortridekansyre)	1	0,5
PFTTrDS (Perfluortridekansulfonsyre)	1	2,5

7. Geologiske og hydrogeologiske forhold

7.1 Regional geologi og hydrogeologi

Der er i 2015 udarbejdet en grundvandskortlægning i området omkring Nissum Fjord og den sydlige del af Lemvig Små Værkers Kortlægningsområde (Naturstyrelsen, 2015). I nærhed af det undersøgte transekt i Husby Klitplantage ligger tre indvindingsoplande: Fjand Vandværk, Sdr. Nissum Vandværk og Husby Vest Vandværk. Vandværkerne fremgår af FIGUR 7.1 og bilag 3.



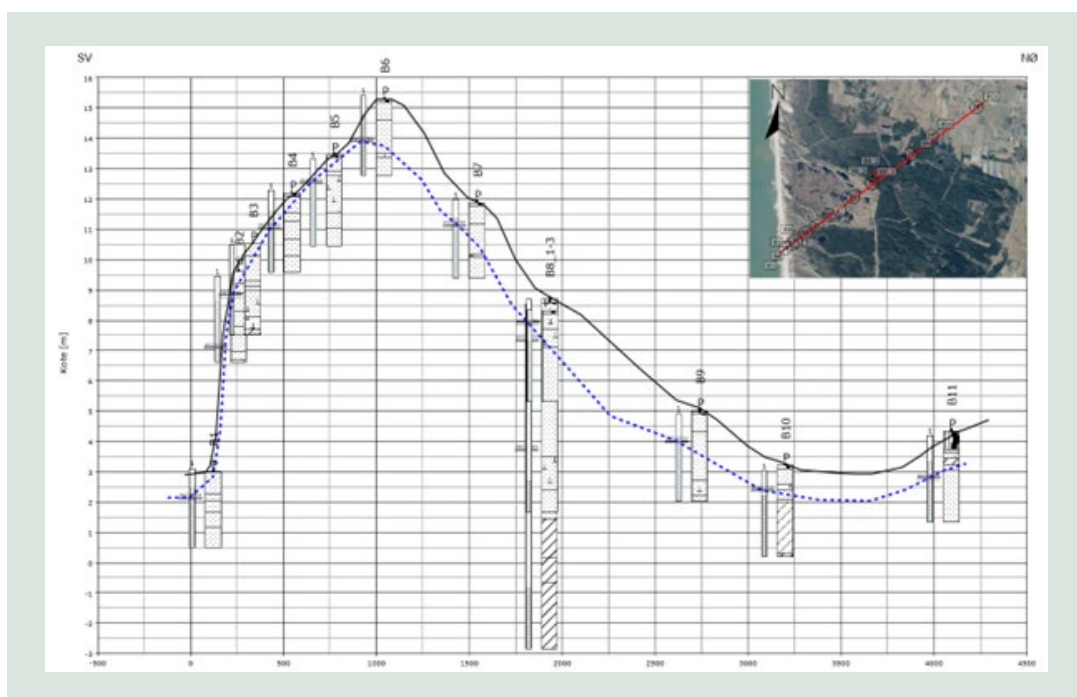
FIGUR 7.1. Beliggenhed af Fjand Vandværk, Sdr. Nissum Vandværk og Husby Vest Vandværk. Udklip fra (Naturstyrelsen, 2015).

Indvindingsoplandet til Sdr. Nissum Vandværk udgøres udelukkende af sandbundsdomineret morænelandskab dannet under Saale. Samme landskabstype findes ligeledes inden for indvindingsoplandet til Husby Vest Vandværk, hvor der endvidere også er marskområder samt områder med klitlandskab. I området omkring oplandene til Fjand, Sdr. Nissum og Husby Vest består de kvartære aflejringer overvejende af smeltevandssand med mindre mægtigheder af moræneler i bakkeøen mod syd og dækket af lerede og siltede glaciale og postglaciale aflejringer mod nord i barrieren mellem Vesterhavet og Nissum Fjord. De terrænnære aflejringer i Husby Klitplantage består overvejende af flyvesandsaflejringer.

7.2 Lokalitetens geologi og hydrogeologi

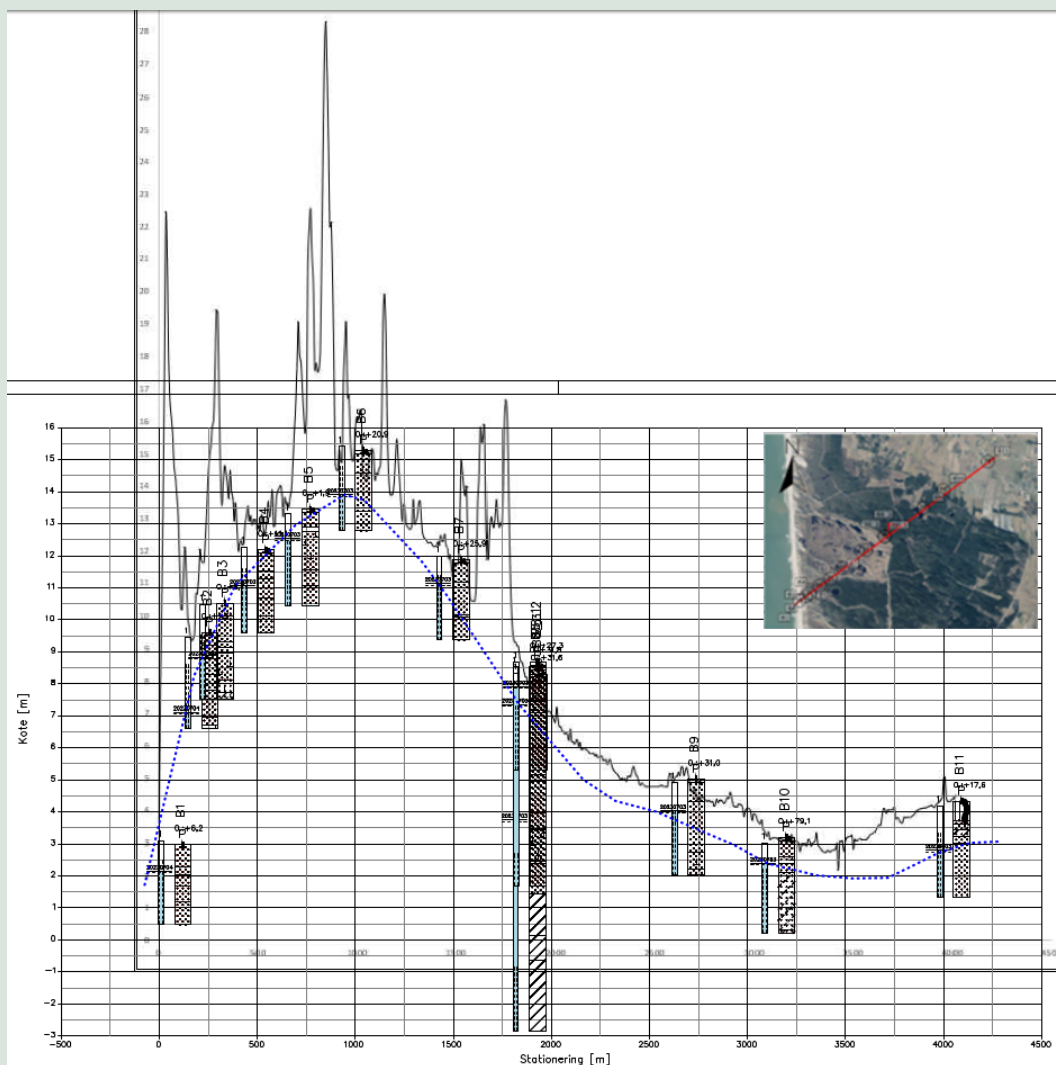
Ved nærværende undersøgelse er der udført 11 borer til 2,5-3 m u.t. i transektet samt yderligere to borer (B8_2 og B8_1) til hhv. 7 og 11,5 m u.t. På baggrund af de udførte borer er der hovedsageligt tale om sandjord beskrevet som fint til mellemkornet. I de fleste borer er der truffet lag med indslag af tørv, der varierer fra 10 cm til 1,2 m, og som optræder i varierende dybder.

På FIGUR 7.2 vises et tværsnit fra sydvest til nordøst med borerne, hvoraf det fremgår, at der er en terrænforskel på ca. 12 meter fra B1, som er udført på stranden og er det laveste punkt i transektet, ind til B6, som er udført i den vestlige del af klitplantagen og udgør det højeste punkt i transektet. Fra B6 og videre mod nordøst falder terrænet igen knap 12 meter mod B10, som ligger omtrentlig i samme kote som B1. Herfra stiger terrænet igen ca. 1,5 m i retning mod den sidste boring B11 i transektet.



FIGUR 7.2. Tværsnit gennem borerne B1-B11 med geologiske tolkninger (overhøjning ca. 1:160). Blå stiplede linje angiver vandspejl, som er pejlet i borerne.

På FIGUR 7.3 fremgår samme tværsnit gennem borerne B1-B11, men med højdeprofil for terrænet tilføjet (Scalgo, 2023). Figurene er endvidere vedlagt i bilag 4. Højdeprofilen fra Scalgo er medtaget for at illustrere, at terrænet i området for transektet er meget varierende på grund af de høje klitter. Borerne er af praktiske årsager udført i lavninger m.v. Særligt for de første 2.000 m viser profilet en betydelig umættet zone som følge af de kystnære klitter.



FIGUR 7.3. Tværsnit gennem borerne B1-B11 med geologiske tolkninger samt højdeprofil (overhøjning ca. 1:160). Blå stiplede linje angiver vandspejl, som er pejlet i borerne.

Den dybere geologi i området er beskrevet i DGU-boring nr. 72.695, 72.261 og 72.444. Boringernes placering fremgår af bilag 3. I boringen 72.695 er der øverst truffet 6 meter mellemkornet sand (postglacial saltvandsand), herunder 1 meter ler og finkornet smeltevandssand fra 4-6,5 m u.t. Fra 6,5 m u.t. til boringens afslutning 12 m u.t. er der overordnet truffet smeltevandssand med enkelte indslag af silt og sand på samlet 1,5 meter.

I boring DGU-nr. 72.261 er der noteret sand (uden prøvebeskrivelse) for de øverste 3,4 m. Herunder er der truffet flyvesand og glimmerholdigt sand til 9,2 m u.t., efterfulgt af moræner til 13,4 m u.t., smeltevandssand til 16,6 m u.t. og ler fra 16,6 m u.t. til boringens afslutning 20,3 m u.t.

Mod nordøst er der i DGU-nr. 72.444 truffet et øvre lag på 0,7 m uden beskrivelse (beskrevet som brunt sand i brøndborerrapport). Herunder er der smeltevandssand fra 0,7 til 2,8 m u.t., moræner fra 2,8 til 9,3 m u.t. og herunder grus fra 9,3 m u.t. til boringens afslutning 10,7 m u.t., hvor der er registreret smeltevandssand.

7.2.1 Pejlinger og grundvandsstrømning

I TABEL 7.1 fremgår aktuelle pejlinger, og grundvandskoter er endvidere indtegnet på FIGUR 7.2. Det ses på TABEL 7.1 og FIGUR 7.2., at grundvandspotentialet generelt følger terrænet (når der ses bort fra høje klitter) og går fra det højeste punkt i transektet (ca. kote 14 i B6) og falder ned til kote ca. 2 m DVR90 i B1 på stranden og kote ca. 2,4 m DVR90 i B10, som er næstsidste boring i transektet mod nordøst, hvorfra grundvandspotentialet stiger igen i retning mod B11. Vandspejlskoter og potentialelinjer er indtegnet på bilag 3, hvoraf det fremgår, at der i B6 er et lokalt højdepunkt med fald ud mod Vesterhavet mod vest og et fald i østlig retning. Der er således et vandskel beliggende omkring placeringen af boring B6. Vandet øst for B6 afledes via grøfter og vandløb til Nissum Fjord.

Ved B8 er der udført tre boringer: B8_3 (filter fra 1-3 m u.t.), B8_2 (filter fra 6-7 m u.t.) og B8_1 (filter fra 8,4-11,4 m u.t.). Vandspejlet ligger i de tre boringer i hhv. kote ca. 7,9, 7,4 og 3,8 m DVR90 og filtrerne vurderes heraf at være placeret i hver deres magasin med nedadrettet gradient.

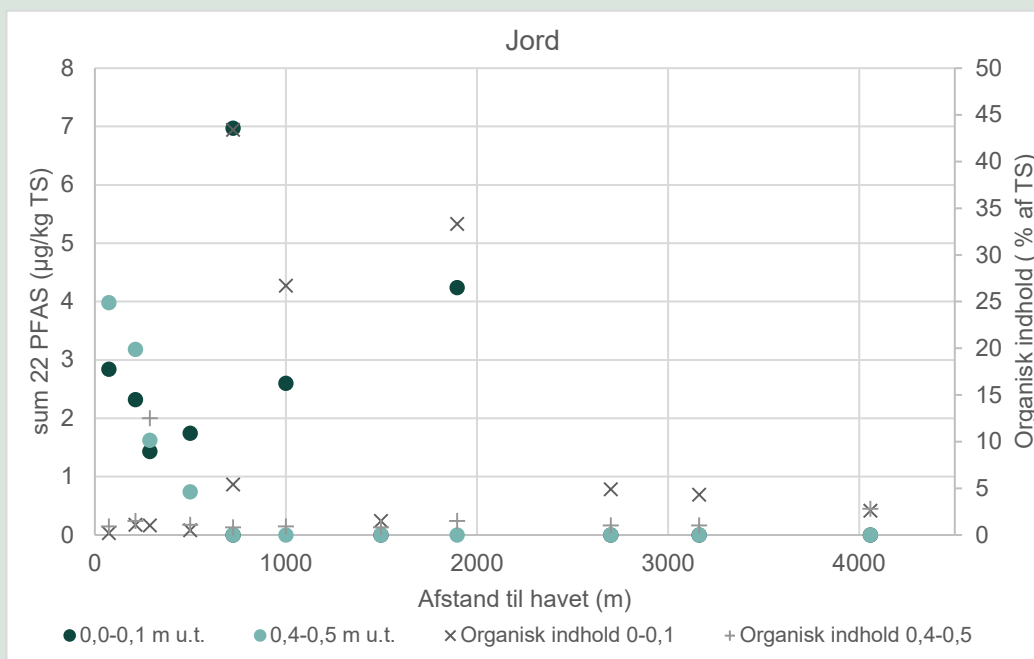
TABEL 7.1. Pejlinger og vandstandskote

Boring nr.	Filtersætning [m u.t.]	Topkote af blind-rør [m DVR90]	Terræn kote [m DVR90]	Pejling [m u.t.]	Vandspejlskote 3.- 4. juli 2023 [m DVR90]
B1	0,5-2,5	3,11	2,99	1,08	2,15
B2	1-3	9,44	9,61	2,16	7,11
B3	1-3	10,48	10,52	1,61	8,83
B4	0,6-2,6	12,28	12,19	1,31	11,06
B5	1-3	13,31	13,46	0,62	12,54
B6	0,5-2,5	15,41	15,29	1,63	13,9
B7	0,5-2,5	11,99	11,87	0,97	11,14
B8_3	1-3	8,32	8,31	4,79	7,91
B8_2	6-7	8,70	8,69	1,35	7,36
B8_1	8,4-11,4	8,53	8,55	0,39	3,75
B9	1-3	4,91	5,03	0,77	4,02
B10	1-3	3,03	3,20	0,47	2,39
B11	1-3	4,18	4,33	1,24	2,79

8. Analyseresultater

8.1 Analyseresultater for jord

Resultater af de kemiske analyser for jordprøver fremgår af tabel 2 i bilag 8. Der er påvist indhold af PFAS i 11 ud af 23 jordprøver, og koncentrationerne af sum 22 PFAS spænder mellem 0,74-6,97 µg/kg tørstof (TS). Tørstofindholdet varierer mellem 54 og 99 %, og det organiske indhold varierer mellem 0,2 % af TS (nærmest stranden) og 43,4 % af TS. FIGUR 8.1 illustrerer indhold af sum 22 PFAS i dybderne 0,1 m u.t. og 0,5 m u.t sammen med det organiske indhold.



FIGUR 8.1. Analyseresultater for jordprøver udtaget 0,1 m u.t. (mørkegrønne prikker) og 0,4-0,5 m u.t. (grønne prikker). Krydser angiver mængden af organisk indhold (% af TS) i jordprøverne.

For jordprøverne er der primært påvist PFOS, der binder bedre til organisk stof end f.eks. PFOA (VMR, 2022).

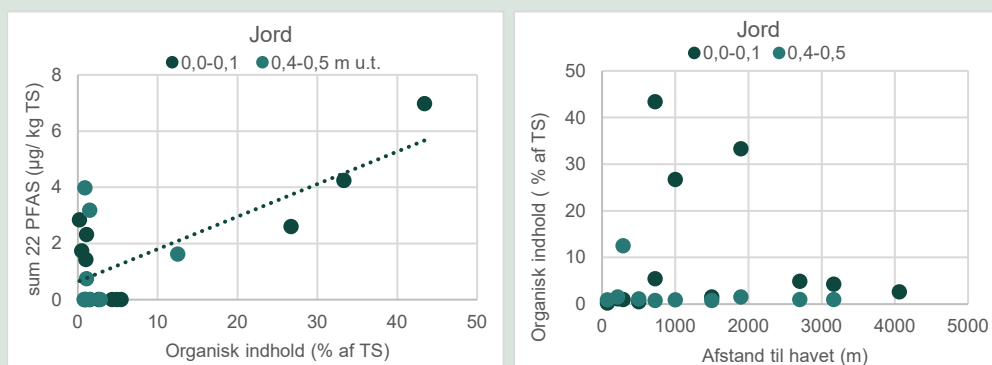
Der ses generelt aftagende koncentrationer over dybden (fra 0,0-0,1 til 0,4-0,5 m u.t.) på nær i de tre mest kystnære jordprøver. Det vurderes, at prøverne fra 0,0-0,1 nærmest strand (B1-B3) overvejende består af sand, hvortil PFAS binder dårligt. Dette understøttes af det organiske indhold, som først stiger ved B4. Indholdet af organisk stof er meget varierende med store lokale forskelle, der muligvis kan skyldes lavninger med mere organisk indhold (pga. tidligere sø/mose dannelse). Generelt ses der højere organisk indhold i dybden 0,0-0,1 m u.t. end i dybden 0,4-0,5 m u.t.

Der ses af data for jordprøverne udtaget 0,0-0,1 m u.t. ingen tendens til aftagende indhold af PFAS med afstand til havet. Data indikerer, at indhold af PFAS i prøverne 0,0-0,1 m u.t. primært er styret af indholdet af organisk stof frem for afstand til havet. Det ses, at de højeste indhold af PFAS er påvist i prøver med højt indhold af organisk stof. For prøven BL-5 blev der udtaget en ekstra jordprøve (BL5 ekstra), som dækker et større areal (200 m²) prøvetaget ved

50 nedstik. Prøve udtaget ved fem nedstik (10 m³) viste indhold af sum 22 PFAS på 7,0 µg/kg TS og et relativt højt indhold af organisk stof (glødetab på 43 % TS), mens der i ekstraprøven ikke blev påvist PFAS samt et lavt indhold af organisk stof (glødetab på 5 % TS), hvilket yderligere indikerer, at det er indholdet af organisk stof, der styrende for PFAS-koncentrationen for prøverne 0,0-0,1 m u.t.

For prøverne 0,4-0,5 m u.t. ses en aftagende tendens med afstand til kysten indtil ca. 700 m fra kysten, hvorefter der ikke påvises PFAS i jordprøverne.

På FIGUR 8.2 tv. er indhold af sum 22 PFAS vist mod organisk indhold. For jordprøver med organisk indhold under 10 % ses der ingen sammenhæng, men for de fire jordprøver med organisk indhold over 10 % ses der stigende indhold af sum 22 PFAS, des mere organisk indhold. Andre jordparametre som kornstørrelse, vandindhold (tørstof) samt afstand til havet, vurderes også at have betydning for indholdet af PFAS i jorden. På FIGUR 8.2 th. ses det, at der i dette datasæt ikke forekommer nogen tendens ift. organisk indhold og afstand til kysten.



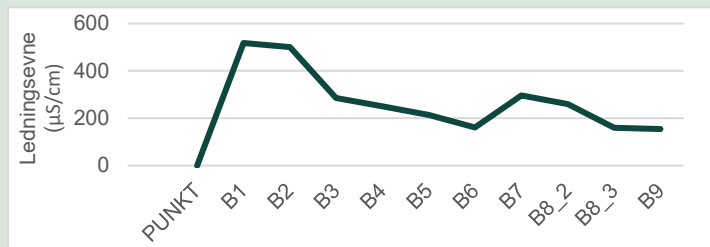
FIGUR 8.2. Sammenhæng mellem indhold af sum 22 PFAS og organisk indhold i jordprøver (tv) og sammenhæng mellem organisk indhold i jordprøver og afstand til havet (th.).

8.2 Analyseresultater for grundvand

Resultater for ledningsevne fremgår af feltjournaler vedlagt i bilag 7 og af FIGUR 8.3.

Ledningsevnen er højest i B1 og B2, hvilket kan skyldes indtrængende havvand de første 200 m ind i land. Herefter falder ledningsevnen fra B3-B6, men stiger i både B7 og B10+B11.

Stigningen kan ikke umiddelbart forklares, men kan skyldes tilstedeværelse af andre opløste salte, der kan øge ledningsevnen.

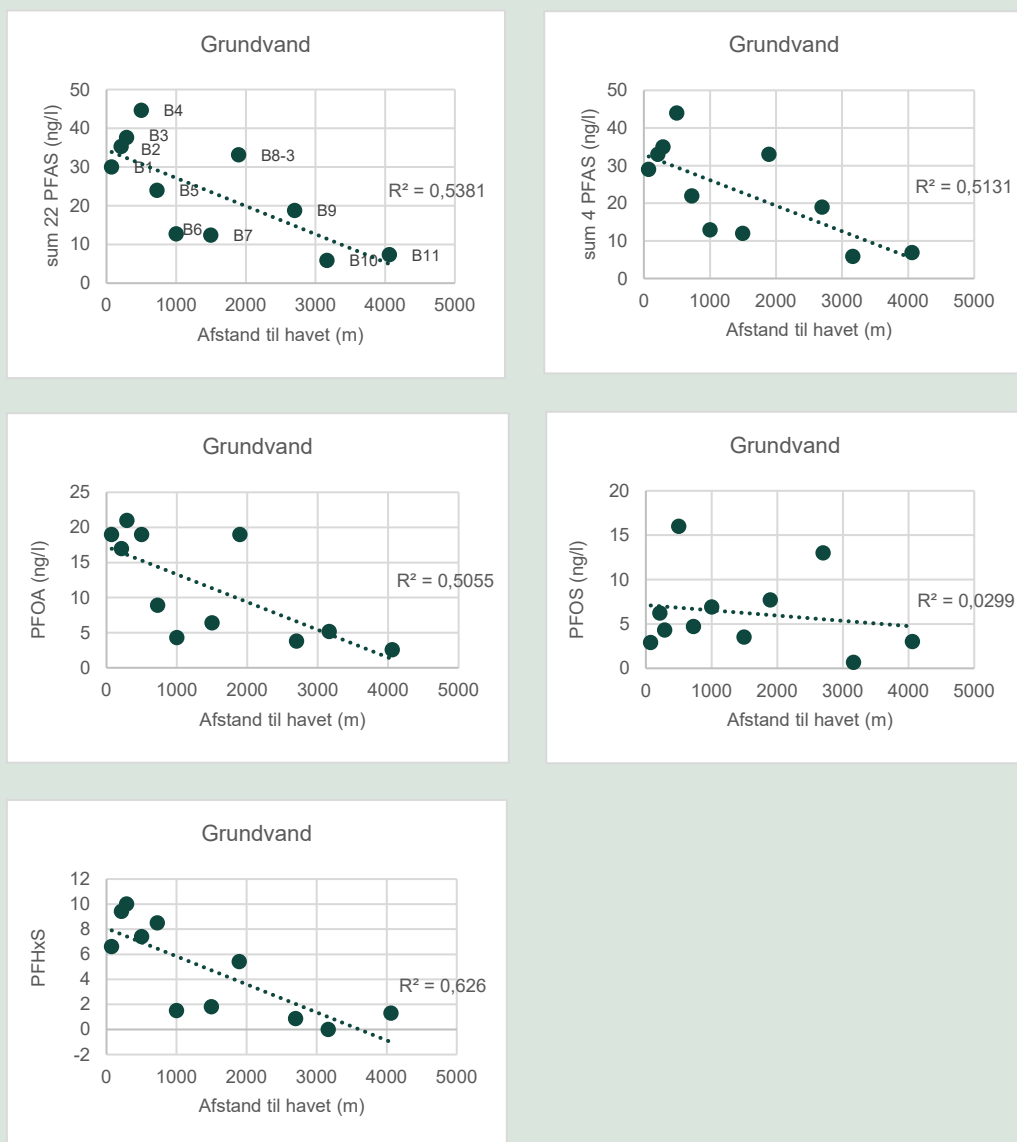


FIGUR 8.3. Ledningsevne målt i grundvand i borer

Resultater af de kemiske analyser for 22 PFAS i grundvand fremgår af tabel 4 i bilag 8. Der er truffet indhold af sum 22 PFAS i alle borer. Indholdene er mellem 3,2 og 45 ng/l, hvor de højeste indhold er påvist i de fire borer nærmest kysten (B1-B4) samt det midterste filter i

B8. Ingen af indholdene overskrider Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium på 100 ng/l. Der er påvist indhold af sum 4 PFAS på mellem 2,8 og 44 ng/l. Alle påviste indhold overskrider Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium på 2 ng/l. Der er overvejende påvist indhold af PFOA, PFHxS og PFOS i vandprøverne.

FIGUR 8.4 illustrerer indhold af sum 22, sum 4, PFOA, PFOS og PFHxS i det terrænnære grundvand som funktion af afstand til havet. For alle graferne ses der aftagende indhold med afstand til kysten. For indholdet af PFOS i vandprøverne ses der dog kun en svag, eller ingen, tendens ift. afstand til havet. Generelt ses det, at der er en svag sammenhæng i forhold til matematisk korrelation for den aftagende sammenhæng (både for den eksponentielle model og for den lineære model, som er vist på figuren). Samme svage tendens ses også for undersøgelser udført ved Thyborøn og Holland beskrevet i kapitel 5.

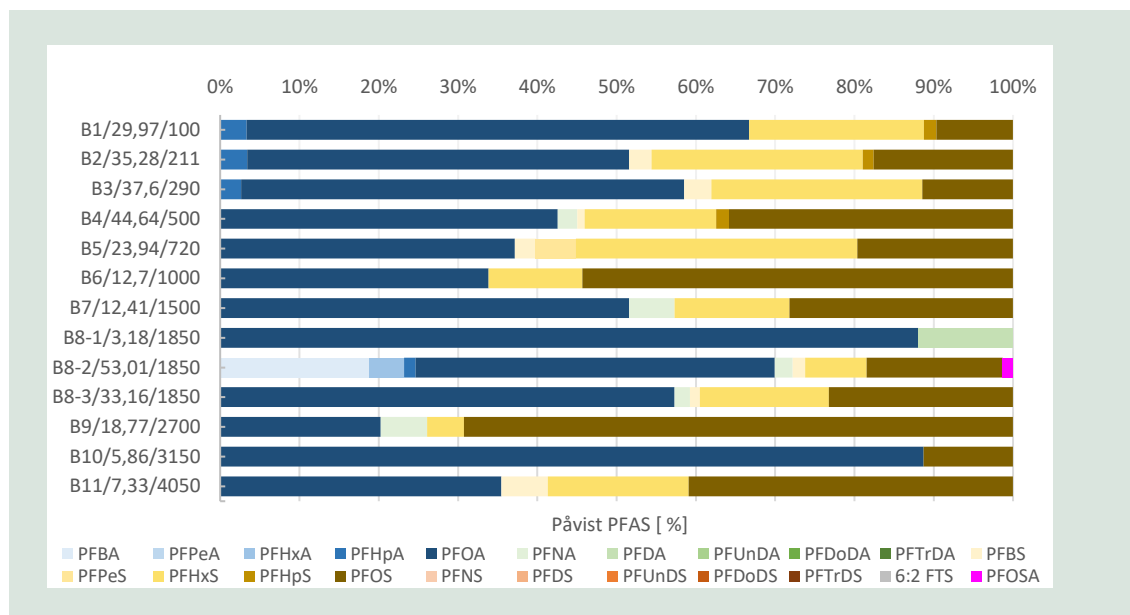


FIGUR 8.4. Indhold af sum 22 PFAS og sum 4 PFAS samt PFOA, PFOS og PFHxS i ng/l som funktion af afstand til havet (m) for terrænnært grundvand.

For at undersøge, om der er tale om stigende, faldende eller stabile tendenser i datasættene, er der anvendt en statistisk test, Mann-Kendall. Der er anvendt et værktøj udviklet af GSI, og beregninger er vedlagt i bilag 12. Værktøjet bruges normalt til analysere tendenser i tidsserier

(f.eks. for en boring), men testen kan også bruges til at vurdere tendenser i en rummelig dimension (her afstand til havet). Testen viser, at der er signifikant aftagende tendens med afstand til havet for PFHxS, PFOA, Sum af 4 PFAS og sum af 22 PFAS med konfidensfaktor > 98%. For PFOS ses "ingen Tendens" med en konfidensfaktor på 72,6%.

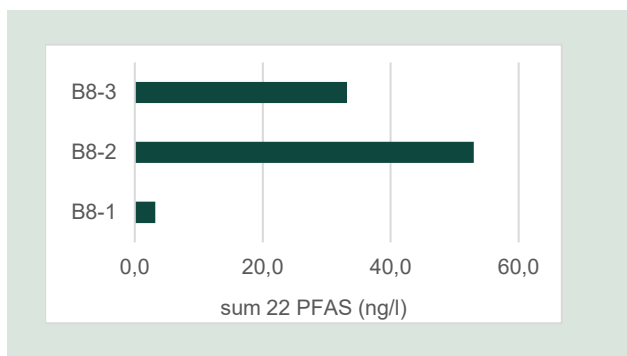
På FIGUR 8.5 fremgår den relative fordeling mellem de påviste PFAS-forbindelser i grundvandsprøverne. Herpå ses det, at det overvejende er PFOA, PFOS og PFHxS, der påvises.



FIGUR 8.5. Relativ fordeling mellem påviste PFAS-forbindelser i grundvandsprøver. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 (ng/l)/ afstand til havet (m).

8.2.1 Vertikal udbredelse grundvand

Den vertikale udbredelse er illustreret på FIGUR 8.6. Heraf fremgår det, at det højeste indhold af PFAS er påvist i filter 2 med et indhold på 53 ng/l. Filtret er placeret fra 6-7 m u.t., som er umiddelbart over et lerlag, og det høje indhold i filter 2 indikerer en opkoncentrering enten over lerlaget eller i grænsefladen mellem ler og sand. Filter 1 er placeret i dybden 8,4-11,4 m u.t., i fed ler med sandslirer. Der er målt et lavt indhold af PFAS (3,2 ng/l), hvilket indikerer, at lerlaget begrænser, men ikke forhindrer PFAS i at sprede sig ned i dybden. Fingerprintet for de tre filtre, som er vist i FIGUR 8.5, viser, at sammensætningen af PFAS er forskellig mellem de tre filtre. I den mest terrænnære prøve ses indhold af PFOS og PFHxS, men enkeltstofferne bliver tilbageholdt i jorden, og kun det mest vandopløselige PFOA ses i det dybeste filter. I det dybe filter ses også enkeltstoffet PFDA, som ikke er påvist i filtrene over. Dette skyldes sandsynligvis, at værdien (0,38 ng/l) ligger lige omkring detektionsgrænsen på 0,3 ng/l.

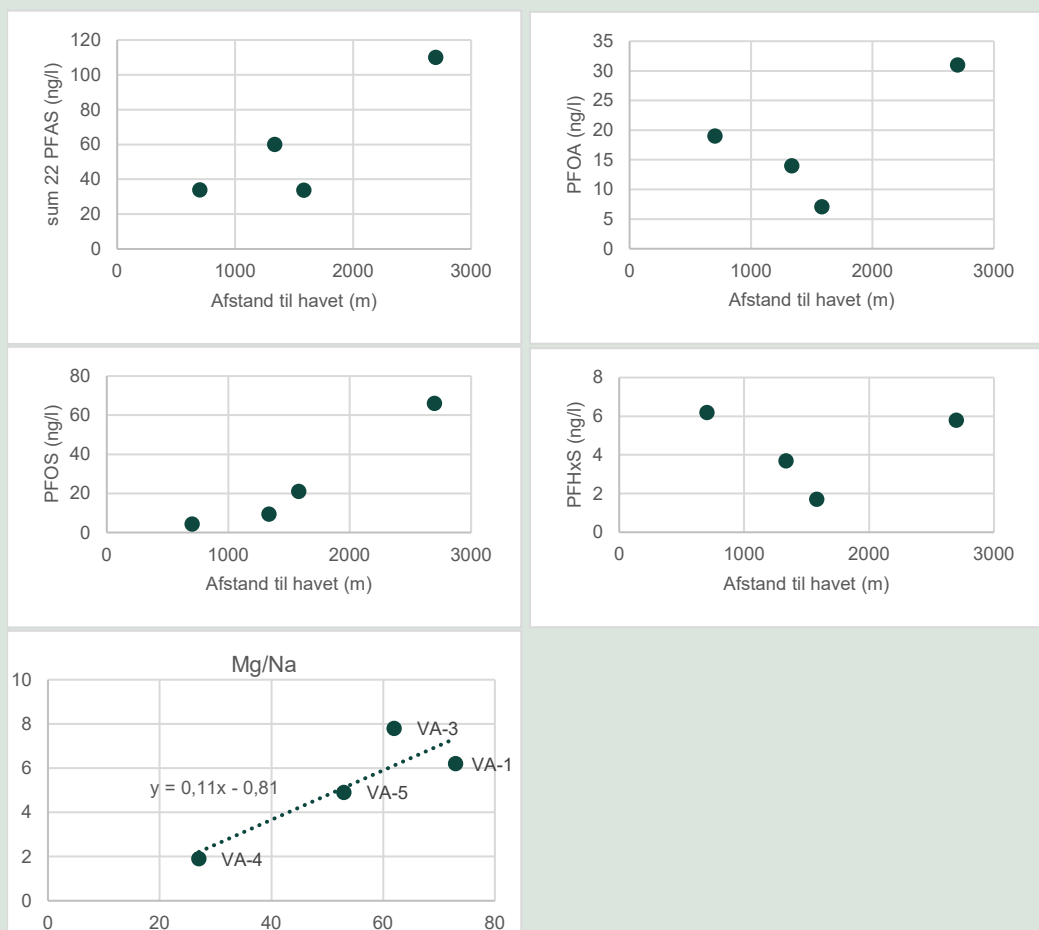


FIGUR 8.6. Vertikal udbredelse af PFAS i B8.

8.3 Analyseresultater for overfladevand

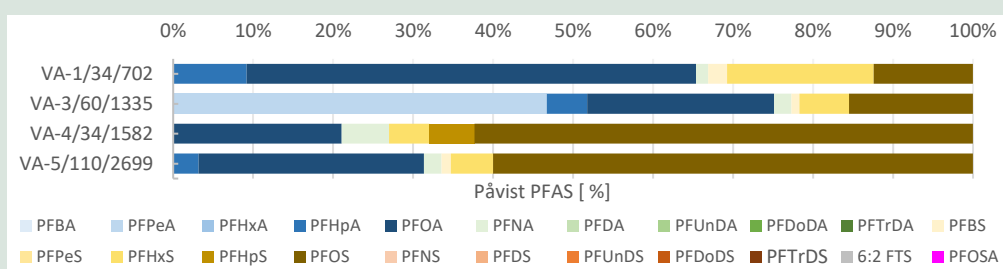
Resultater af de kemiske analyser for 22 PFAS samt Na, Mg og Cl i overfladevand fremgår af tabel 5 i bilag 8. Der er påvist PFAS i alle analyserede prøver af overfladevand (VA1 og VA3-VA5) med et indhold af sum 22 PFAS fra 34-110 ng/l, og der er overvejende påvist indhold af PFOA og PFOS i prøverne af overfladevand. Miljøkvalitetskravet for PFOS i overfladevand (årsgennemsnit) er overskredet i alle vandprøver med op til en faktor ca. 100. Der er desuden analyseret for magnesium, natrium og chlorid for at undersøge relation til havet/aerosoler. FIGUR 8.7 illustrerer indhold af sum 22 PFAS, PFOA, PFOS og PFHxS i overfladevand som funktion af afstand til havet og forholdet mellem Mg og Na.

Med et lille datasæt på fire prøver skal der tages forbehold i forhold til at udlede tendenser. Forholdet mellem Mg og Na er for de udtagne overfladevandsprøver forholdsvis ensartet og stemmer godt overens med et forhold på 0,12 registreret i havet (målt indhold af magnesium på 1.100 og natrium på 9.300 i 'Hav-1'). Det stabile forhold kan tyde på påvirkning af overfladevand fra aerosoler (via deposition).



FIGUR 8.7. Indhold af sum 22 PFAS samt PFOA, PFOS og PFHxS som funktion af afstand til havet for overfladevand samt forholdet mellem Mg og Na i overfladevandprøver.

På FIGUR 8.8 fremgår den relative fordeling mellem de påviste PFAS-forbindelser i overfladevandsprøverne. Heraf ses det, at det overvejende er PFOA, PFOS og lidt PFHxS, der påvises.



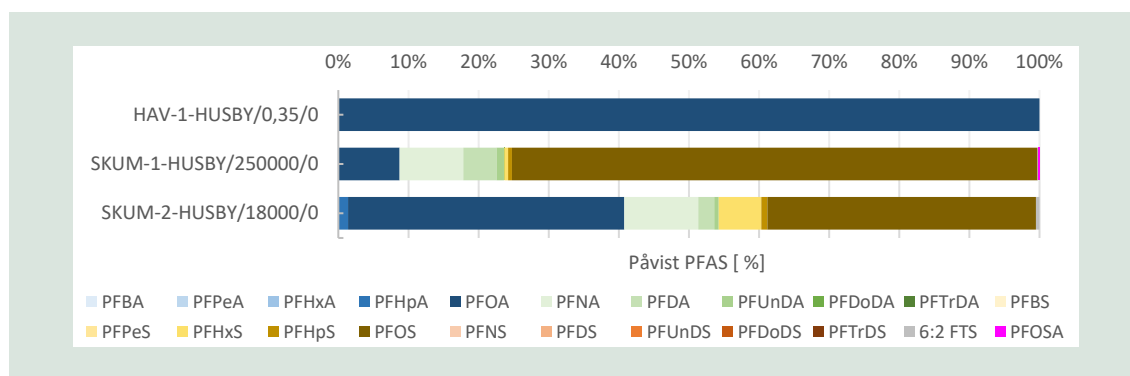
FIGUR 8.8. Relativ fordeling mellem påviste PFAS-forbindelser i overfladevandsprøver. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 (ng/l)/ afstand til havet (m).

8.4 Havvand og havskum

Resultater af de kemiske analyser for PFAS i havvand og skum samt Na, Mg og Cl i havvand fremgår af tabel 6 i bilag 8. Der er i havskummet påvist indhold af 22 PFAS på mellem 18.000 ng/l i skumprøve 2 fra den 4. juli 2023 og 250.000 ng/l i skumprøve 1 fra den 27. juni 2023. Der forekommer erfaringsmæssigt store udsving på PFAS-indhold i skum, hvilket f.eks. skyldes enten vejrforhold forud for skummets dannelse, skummets udseende (f.eks. luftigt/klistret) eller prøvetagningsforhold i forhold til, om der kommer overfladevand med i skumprøven.

Der er i skumprøve 1 endvidere analyseret for yderligere 27 PFAS-komponenter, og der er påvist indhold af yderligere fem komponenter: PFECHS, PFHxSA, MeFOSAA, EtFOSAA og 8:2 FTS.

I prøven af havvand, som er udtaget den 29. juni 2023, er der påvist indhold af 22 PFAS på 0,35 ng/l, som udelukkende består af PFOA. På FIGUR 8.9 fremgår den relative fordeling mellem de påviste PFAS-forbindelser i havprøve og skumprøver. Her ses det, at det i skumprøverne overvejende er PFOS, der påvises, sammen med blandt andre PFHxS, PFOA, PFNA og PFDA.



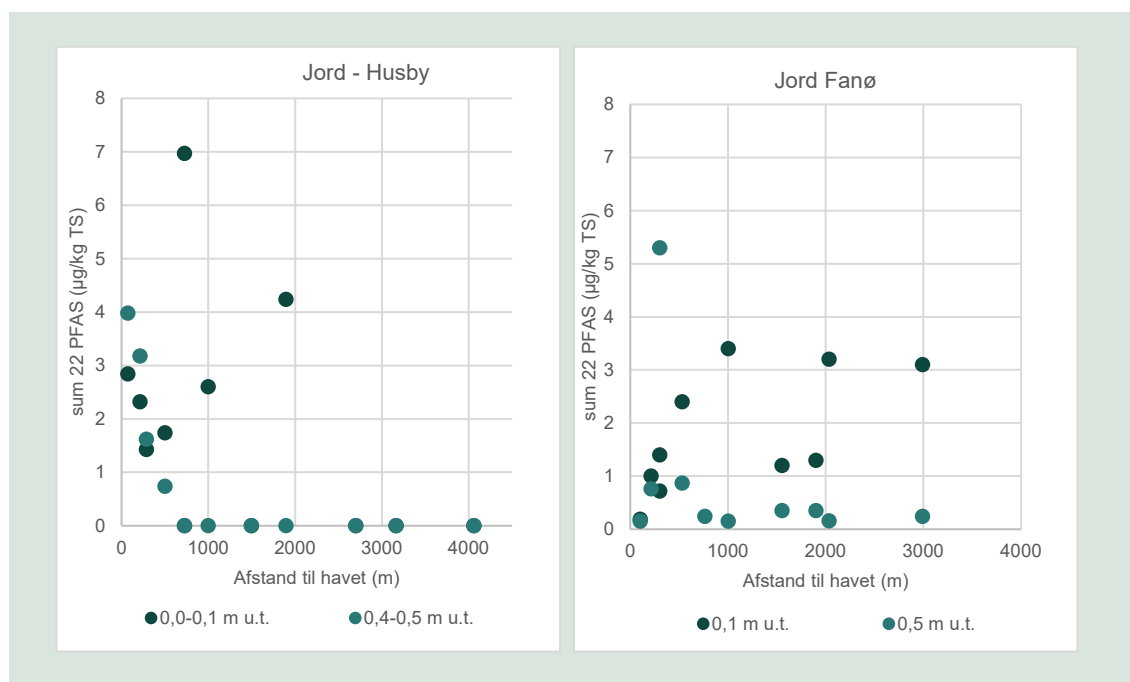
FIGUR 8.9. Relativ fordeling mellem påviste PFAS-forbindelser i skum- og havvandsprøver. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 (ng/l)/ afstand til havet (m).

9. Vurdering af undersøgelsesresultater

9.1 Sammenstilling af analyseresultater med tilsvarende undersøgelser

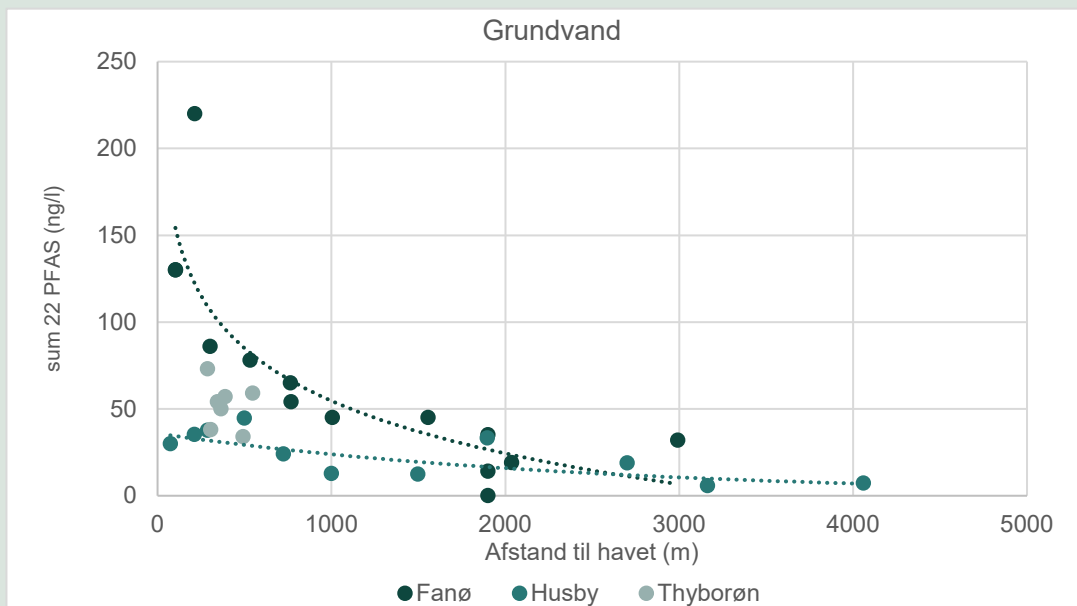
Der er i 2023 udført en tilsvarende undersøgelse af havets påvirkning af kystnært jord og grundvand på Fanø (Den Syddanske Udviklingspulje, 2023). Undersøgelsens hovedresultater er sammenfattet i dette afsnit, og figurer med resultater fra Fanø er sammenstillet med figurer med resultater fra Husby i bilag 8.2. Der er desuden inddraget resultater fra undersøgelserne ved Thyborøn og Harboøre Tange (Lemvig Kommune, 2022) og Hanstholm (ikke udgivet).

I FIGUR 9.1 er resultater for jordprøver sammenstillet. For jordprøverne ses der ensartede niveauer for PFAS med indhold omkring 1-7 µg/ kg TS. På Fanø blev der dog målt ca. 30 µg/kg TS i en enkelt jordprøve, men denne vurderes at være et enkeltstående tilfælde.



FIGUR 9.1. Sammenligning af resultater for jordprøver fra Fanø og fra Husby

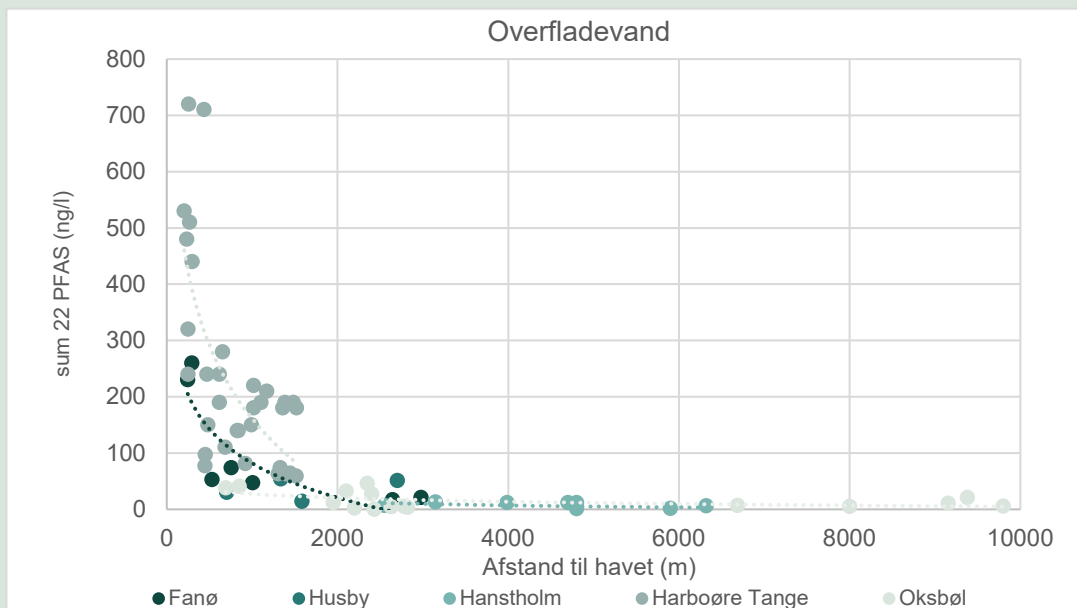
I FIGUR 9.2 er resultater for grundvandsprøver sammenstillet. For grundvandsprøverne ses der forskellige niveauer for PFAS-indhold afhængig af geografisk undersøgelsesområde. På Harboøre Tange ved Thyborøn er der målt de højeste indhold (op til 1.900 ng/l), som ikke er medtaget i nedenstående graf. I Husby Klitplantage er der målt de laveste indhold. Fælles for områderne er dog, at der ses aftagende indhold med afstand til havet.



FIGUR 9.2. Sammenligning af resultater for grundvandsprøver fra Fanø, Husby og Thyborøn.

Mann-Kendall trendanalyse for datasættene for både Fanø, Husby og Thyborøn viser, at der statistisk set forekommer aftagende tendenser i de tre datasæt med stor signifikans (konfidensfaktor > 98%). Undtaget er dog indholdet af PFOS i vandprøverne fra Husby, der ikke viser nogen trend (konfidensfaktor 72,6%).

I FIGUR 9.3 er resultater for overfladevandsprøver sammenstillet. For overfladevandsprøverne ses der ligeledes forskellige niveauer for PFAS-indhold afhængig af geografisk undersøgelsesområde. Fælles for områderne er, at der, ligesom for grundvand, ses et aftagende indhold af PFAS i overfladevand med afstand til havet. Indholdene varierer betydeligt mellem de forskellige lokaliteter, hvilket vurderes at skyldes variationer i terræn og hydrologi (dybde af vandhuller, volumen og hydraulisk opholdstid i vandhuller/søer) samt tidslig variation. Endvidere kan der også være forskel på dannelse af aerosoler imellem de forskellige lokaliteter som følge af forskelle i kystmorfologi, herunder bølgeenergi.



FIGUR 9.3. Sammenligning af resultater for overfladevandsprøver fra Fanø, Husby, Hanstholm og Harboøre Tange.

9.2 Konceptuel forståelse af opkoncentrering og spredning af PFAS i havvand til jord, grundvand og overfladevand

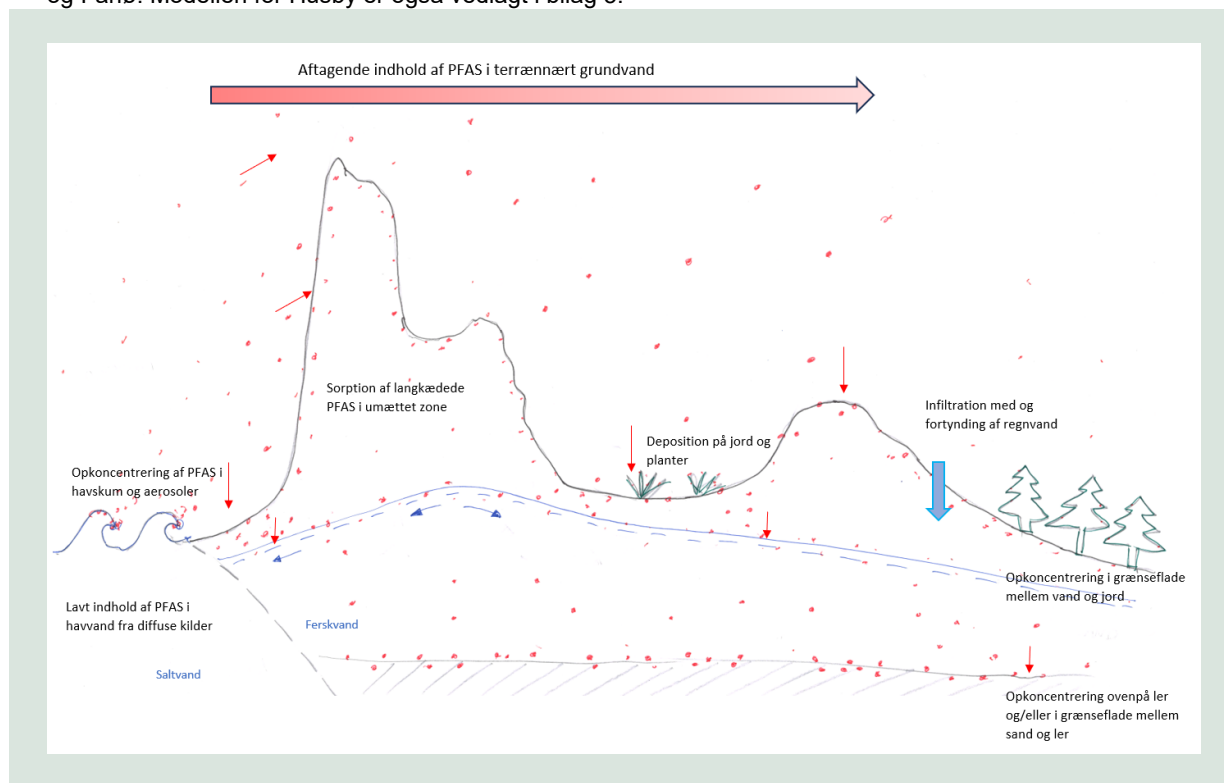
Analyseresultaterne for PFAS i grundvand og overfladevand, FIGUR 9.2 og FIGUR 9.3, viser alle aftagende indhold af PFAS fra vest mod øst, dvs. fra Vestkysten (Vesterhavet/Nordsøen) og ind i landet. PFAS-forureningen i grundvand og overfladevand vurderes at skyldes spredning af aerosoler, hvori PFAS fra havet er opkoncentreret. Mann-Kendall statistisk trend analyser for grundvandsanalyser for lokaliteterne Fanø, Husby og Thyborøn viser generelt en signifikant tendens til faldende indhold af PFAS i grundvand med anstanden med konfidensfaktor > 98 %. For Husby ses dog ingen tendens for PFOS med afstand til havet, hvilket vurderes at være forårsaget af sorption til en relativ mægtig overliggende umættet zone. Generelt ses for grundvand en svag tendens ift. matematiske sammenhænge (eksponentiel eller lineært aftagende) for de aftagende koncentrationer i forhold til afstand til havet. Samme svage matematiske sammenhæng er også observeret for grundvand i Holland (Sweco, 2021). Det vurderes på denne baggrund, at der er andre faktorer end afstand til havet, som også har betydning for den matematiske sammenhæng, bl.a. mægtighed af umættet zone. For jord er billedet mere uklart, men da der ses aftagende indhold i det underliggende terrænnære grundvand, er det vurderingen, at der også sker nedfald af PFAS via SSA på jordoverfladen.

At indholdet af PFAS i grundvandet stammer fra PFAS deponeret med SSA understøttes også af feltmålingerne, der ved nærværende undersøgelse ligeledes viser et fald i ledningsevnen (indhold af ioner fra havet) i grundvandet, jo længere væk fra kysten prøverne udtages. Ledningsevnen peger desuden på, at B1 og B2 er påvirket/fortyndet af havvand med relativt lavt indhold af PFAS, hvilket forklarer de lavere PFAS-indhold (relativt til B3 og B4).

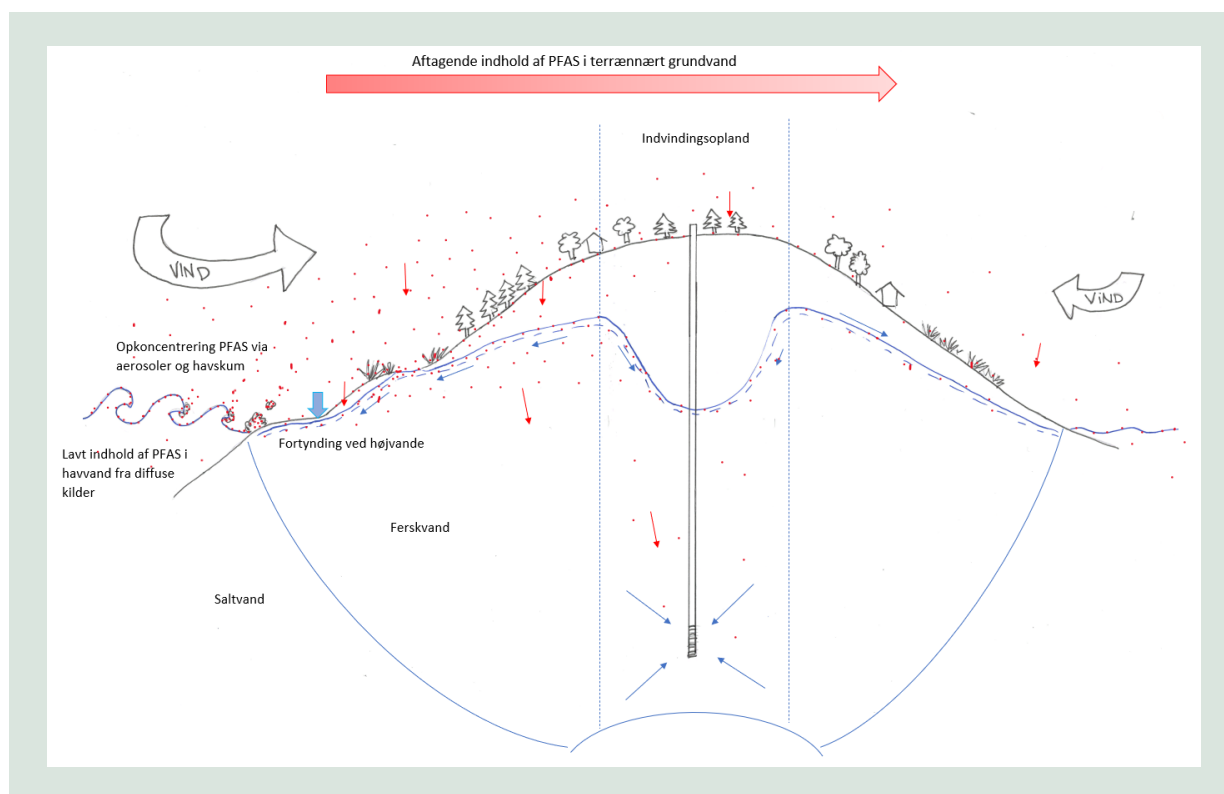
Der ses forskelle i niveauerne for den diffuse PFAS-belastning i de tre undersøgte områder (FIGUR 9.2 og FIGUR 9.3). Forskellene kan skyldes forskelle i kildestyrke fra ikke-kortlagte kilder. Forskellene kan også skyldes størrelsen af umættet zone og kystmorfologiske forskelle for hvert område. På FIGUR 7.3 ses, at der ved Husby er en stejl klint med en højde på ca. 20 m, som vurderes at skærme for en del af aerosolerne, der spredes ind over land. På Harboøre Tange er højdeprofilen ca. 10 meter, og på Fanø er der ingen klinger.

Størrelsen på den umættede zone i transektet udført på Fanø er mellem 0 (vandspejl i terræn) og op til 2,5 m, hvor grundvandet ligger højest nærmest kysten. Ved Husby Klitplantage er størrelsen på den umættede zone mellem 0,5 m og 2,5 m, hvor der i borerne nærmest kysten ses en umættet zone på ca. 1-2 m. Den mindste umættede zone på 0,5 m er observeret i B8, der ligger ca. 2 km fra kysten. Forskellen på størrelsen af den umættede zone vurderes at have betydning for sorption, hvilket kan forklare, hvorfor der i grundvandsprøver udtaget i Husby er lavere PFAS-indhold.

I FIGUR 9.4 og FIGUR 9.5 fremgår konceptuelle modeller af denne spredning for både Husby og Fanø. Modellen for Husby er også vedlagt i bilag 5.



FIGUR 9.4. Konceptuel model for Husby Klitplantage. Røde prikker er PFAS fra havet, der opkoncentreres i grænselaget mellem luft og vand og bæres via aerosoler ind over land, hvor PFAS deponeres.



FIGUR 9.5. Konceptuel model for Fanø. Røde prikker er PFAS fra havet, der opkoncentreres i grænselaget mellem luft og vand og bæres via aerosoler ind over land, hvor PFAS deponeres. Samme mekanisme kan muligvis i mindre omfang ske fra østlig retning

Ved undersøgelserne blev de højeste PFAS-koncentrationer generelt observeret i jordprøver fra 0-0,1 m u.t., hvilket stemmer overens med, at PFAS er diffust deponeret over land og ned-siver fra terræn til dybere jordlag og grundvand. Det skal bemærkes, at de laveste PFAS-koncentrationer ses i jordprøver udtaget på eller nærmest stranden, hvor prøverne er udtaget i strandsand med ringe sorptionsevne. Samme forhold blev observeret i kontrolprøven ved boring B5 i Husby Klitplantage. Resultaterne af de to prøver i dybden 0,0-0,1 m u.t. fra hhv. et område på 10 m² og et område på 200 m² i Husby Klitplantage var ikke sammenlignelige, som det ellers var forventet. Dette peger på, at der er parametre, som f.eks. organisk indhold, i jorden, der er afgørende for, hvor meget PFAS bindes til jorden. Andre parametre, der ikke er undersøgt ved denne undersøgelse, men som kunne forestilles at påvirke PFAS-sorption til jorden, kan være permeabiliteten, kornstørrelsesfordeling, vandindholdet (da PFAS bindes i grænsefladen mellem vand og luft), jordbundsudvikling m.fl.

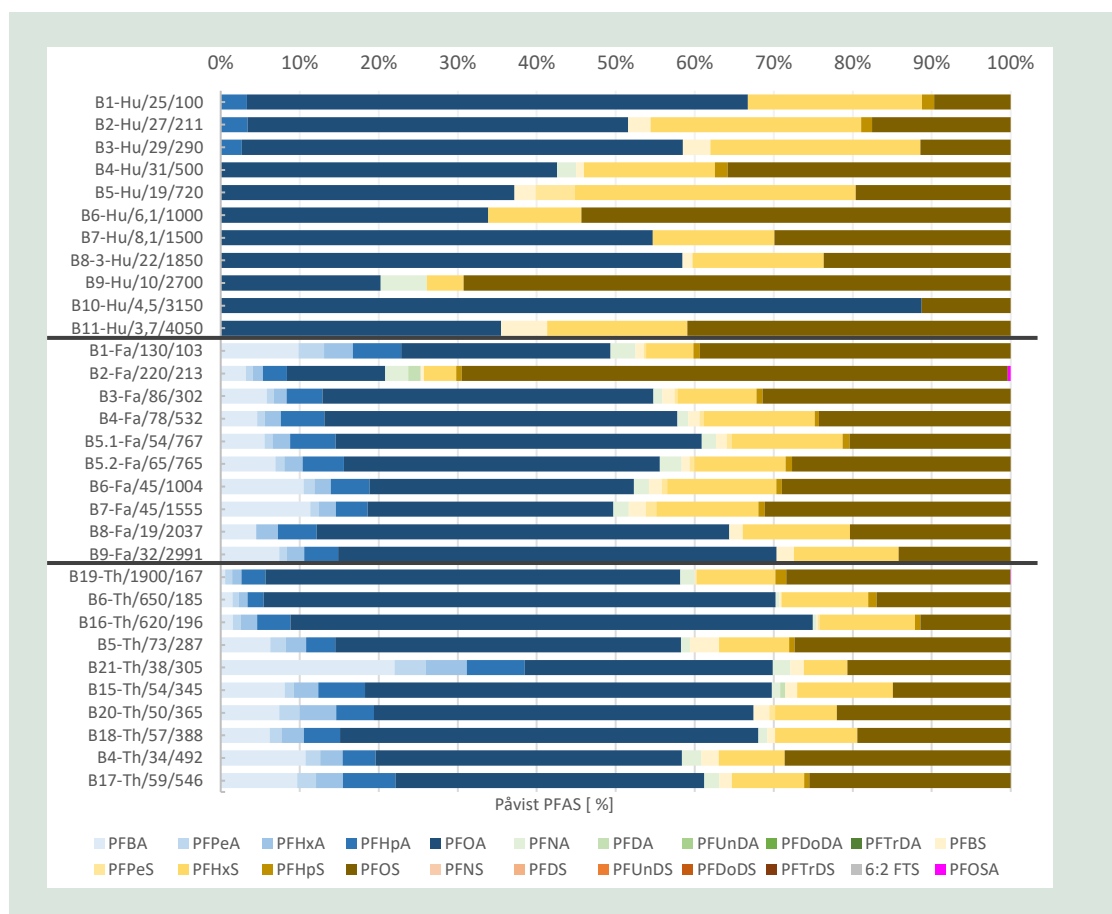
Resultater for PFAS i grundvand og overfladevand bekræfter den indledende hypotese om, at lave indhold af PFAS i havet kan opkoncentreres og spredes ind over land med aerosoler og forårsage forurening af jord og overfladevand samt nedsive med regnvand til grundvandet.

I forhold til overfladevand må det også antages, at der forekommer årstidsvariation. Det kan f.eks. forventes, at de højeste PFAS-koncentrationer forekommer om sommeren, hvor vand-mængden i søer og vandløb svinder ind. Omvendt kan det forventes, at mængden af aerosoler fra havet er større om efteråret, hvor der er mere blæst.

9.3 Vurdering af, om der forekommer PFAS-signaturer, som kan skelne mellem diffus PFAS-forurening fra havet og fra punktkilder

Der er ved denne undersøgelse analyseret for 22 PFAS i jord, grundvand og overfladevand. I grundvand og overfladevand er der overvejende påvist enkeltstofferne PFOA, PFOS og PFHxS. I jordprøverne er der overvejende påvist PFOS samt til dels også PFOA og PFPeA. Der påvises ved de kemiske analyser generelt flere af de 22 analyserede forbindelser i vandprøverne end i jordprøverne. Dette kan skyldes, at jordanalyserne har højere detektionsgrænser end vandanalyserne.

På nedenstående FIGUR 9.6 er den relative fordeling af PFAS i grundvandsprøver fra Husby Klitplantage sammenlignet med den relative fordeling af PFAS-stoffer i grundvandsprøver fra undersøgelser ved Fanø (Den Syddanske Udviklingspulje, 2023) og ved den kystnære by Thyborøn (Lemvig Kommune, 2022). De tre diagrammer ser overvejende ens ud, idet alle undersøgelser har dominans af enkeltstofferne PFOA, PFOS og PFHxS. Dog ses der ved undersøgelsen i Husby et fravær af de korte carboxylsyre-forbindelser (PFBA, PFPeA og PFHxA), som ellers er påvist i undersøgelserne ved Fanø og Thyborøn. Dette kan muligvis skyldes de lavere indhold, der påvises i Husby, og at de korte carboxylsyre-forbindelser ikke findes i koncentrationer over analysemetodens detektionsgrænse.



FIGUR 9.6. PFAS-fingerprint for grundvandsprøver fra Husby (benævnt prøve-ID-Hu), Fanø (prøve-ID-Fa), Thyborøn (prøve-ID-Th). Boringerne har dog ikke helt sammenlignelig filtersætning. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 (ng/l)/ afstand til havet (m).

Den procentuelle fordeling kan variere alt afhængig af de fysiske forhold, hvor vandprøverne er udtaget (dybde, afstand til havet, jordtype osv.). Ved lave indhold af enkeltstoffer (formentlig

indhold omk. 1-10 ng/l) kan diagrammet blive misvisende, da nogle enkeltstoffer vil være under detektionsgrænsen og ikke fremgå i fordelingsplottet.

Sammenfattende for de kystnære undersøgelser ved Husby, Fanø og Thyborøn er, at der i grundvandsprøver overvejende påvises enkeltstofferne PFOS og PFOA samt til dels også PFHxS og PFBA. I jordprøverne påvises der overvejende PFOS og PFOA.

10. Risikovurdering

Der er opstillet en række kvalitetskriterier, kvalitetskrav og indikatorværdier, som kan bruges for at vurdere risiko over for bl.a. drikkevandsindvinding, miljø og fødevarer. Nedenfor er der i TABEL 10.1 samlet relevante grænseværdier.

TABEL 10.1. Samling af relevante kvalitetskriterier, kvalitetskrav og indikatorværdier

Medie der beskyttes	Lovgivning	Grænseværdi
Jord	Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord, Miljøstyrelsen juli 2021.	0,4 mg/kg TS for sum af 22 PFAS ¹ 0,01 mg/kg TS for sum af 4 PFAS ²
Drikkevand/Grundvand	Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg, BEK nr 810 af 18/06/2024, Miljøministeriet. Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord, Miljøstyrelsen juli 2021.	0,1 µg/l for sum af 22 PFAS ¹ 0,002 µg/l for sum af 4 PFAS ²
Badevand	Vejledende kvalitetskriterium til brug for vurdering af badevandskvaliteten beregnet som 20 * kvalitetskravet i Drikkevand. Baseret på WHO's (8.2.1 Guideline values) screening metode for kemikalier i badevand.	0,04 ng/l for sum af 4 PFAS ²
Fisk	Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. BEK nr. 796 af 13/06/2023, Miljøministeriet	Generelle kvalitetskrav for PFOS: 6,5x10 ⁻⁴ µg/l i ferskvand 1,3 x10 ⁻⁴ µg/l i saltvand Kvalitetskriterium for 24 PFAS ^{3,4} i overfladevand (både ferskvand og saltvand) 0,0044 µg/l
Kødkvæg til konsum	Fødevarestyrelsens indikatorværdier (Fødevarestyrelsen, 2024)	0,02 µg PFOS/l drikkevand 0,08 µg PFAS ¹ /l drikkevand 0,03 µg PFOS/ kg foder 0,12 µg PFAS ¹ / kg foder
Får til konsum	Fødevarestyrelsens indikatorværdier (Fødevarestyrelsen, 2024)	0,11 µg PFOS/l drikkevand 0,44 µg PFAS ¹ /l drikkevand 0,15 µg PFOS/ kg foder 0,60 µg PFAS ¹ / kg foder

¹ PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnS, PFDoS, PFTs, PFOSA, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, FhxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTDA,

² PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS.

³ Sum af 24 PFAS (sat som PFOA-ækvivalenter): PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA/PFUnDA, PFDoDA/PFDoA, PFTDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFDS, 6:2 FTOH, 8:2 FTOH, HFPO-DA (Gen X), ADONA, C6O4

⁴ PFOA-ækvivalenter: Værdien er fastsat som PFOA-ækvivalenter, hvilket betyder, at man har sammenlignet stoffernes toksicitet i forhold til PFOAs og på baggrund af denne udarbejdet en Relativ Potens Faktor (RPF), som skal ganges med den fundne værdi i miljøet for det enkelte stof.

Generelt vurderes det, at der kan være risiko for påvirkning af kystnære borer/kildepladser til vandværker, hvor det grundvandsdannende opland ligger kystnært. Der vurderes desuden at være risiko for enkeltindvindere i kystnære områder, da deres borer/brønde ofte er korte og uden væsentlig beskyttelse, og ligeledes vurderes der at kunne være risiko ved anvendelse af kystnære borer til vanding af dyrehold.

Aerosol transport af PFAS og deposition i kystnære områder (på græs og i overfladevand) vurderes at kunne udgøre en risiko over for dyreliv, som overvejende opholder sig i kystnære områder og som kan drikke af vandhullerne og spise græs i de kystnære områder. Dette kunne være kvægbesætninger på kystnære markarealer eller vildt. Der vurderes desuden i områder med lav vandudskiftning eller områder, hvor fiskene ikke kan flytte sig langt, at være en potentiel risiko for ophobning af PFAS i fisk, som kan føre til risiko for at anvende fiskene til konsum.

De påviste indhold af PFAS i jorden (og strandsandet) ved Husby er alle under jordkvalitets-kriterierne, hvorfor der ikke vurderes at være risiko for ophold (og børns leg) på stranden eller ved kystnære arealer.

11. Diskussion

Overordnet set forekommer der overensstemmelse mellem resultater fra de kystnære undersøgelser, hvor forekomsten af PFAS er undersøgt i jord, grundvand og overfladevand. Resultaterne viser, at der langs den jyske vestkyst sker en opkoncentrering og spredning af PFAS fra havvand via aerosoler og havskum til kystnære områder, hvor det medfører forurening af overfladevand, jord og grundvand. Det vurderes, at kilden til påvirkning er et diffust indhold af PFAS i havvandet (fra en lang række forskellige kilder langs Nordsøen). Påvirkning fra havet er dokumenteret ved de aftagende indhold af PFAS i overflade- og grundvand med stigende afstand til kysten samt forholdet mellem indhold af natrium og magnesium i prøver fra overfladevand, som indikerer, at der sker spredning af aerosoler med salte (og PFAS). Endvidere viser de kemiske fingeraftryk (PFAS-fingerprint) generelt et ensartet billede af sammensætning i overflade- og grundvand på de undersøgte lokaliteter, hvor PFOA, PFOS og PFHxS er de dominerende stoffer. Der ses dog for grundvand og overfladevand størrelsesordener i forskel mellem koncentrationerne påvist ved hhv. Fanø, Husby og Thyborøn. Årsagen til forskelle i koncentrationsniveau kan være flere:

- Indhold af PFAS i havvand
- Saltindhold (grundlæggende for dannelse af SSA)
- Bølgeprocesser
- Kystmorfologi
- Geologi og hydrologi

Indhold af PFAS i havvand

Med baggrund i litteratur og tidligere undersøgelser er det dokumenteret, at opkoncentrering af PFAS i skum og aerosoler kan ske fra vand med indhold af PFAS i meget lave koncentrationer (sporniveau under almindelige detektionsgrænser). Med fremherskende vestlige vindretninger kan aerosoler og havskum blive dannet og vil i et vist omfang blive transporteret med vinden, hvor aerosoler og skumdele kan falde ned på vandet og blive genopløst. Derved vil indholdet af PFAS stige og derved give potentiale for dannelse af yderligere stigende indhold af PFAS i skum og aerosoler. I forbindelse med vedvarende lavtrykspassager (vestenvind) vil der ske transport af PFAS ind mod kysten, således at der ses stigende indhold i det kystnære havvand, som derved giver yderlige potentiale for opkoncentrering og transport af PFAS ind mod land, som Miljøstyrelsens transekter i Nordsøen dokumenterer. Transporten af PFAS kan således ske over havoverfladen, hvorved spredningen og påvirkningen af PFAS er uafhængig af havstrømme m.v. I perioder med højtryk (overvejende østenvind) vil der være en lufttransport væk fra kysten. Overfladevand skubbes ud fra kysten, mens bundvand tilsvarende trækkes ind mod kysten. Derved vil de forhøjede koncentrationer i kystvandet fortyndes, således at PFAS-indholdet i det kystnære vand falder. Indholdet af PFAS i havvandet i forskellige dele af Nordsøen vurderes derfor ikke at være årsagen til de forskellige niveauer påvist i grundvandet langs Vestkysten.

Saltindhold

Saltindholdet er grundlaget for dannelse af SSA. Laboratorieforsøg viser, at dannelsen af PFAS-holdige aerosoler er afhængig af saltindholdet. Saltindholdet kan derfor have betydning for størrelsesordenen af PFAS, der opkoncentreres fra diffus forurening i havvand og føres ind over land via aerosoler. Det vurderes, at der forekommer et højt saltindhold langs hele Vestkysten (ca. 30 ‰) svarende til svagt fortyndet havvand (35 ‰ i Atlanterhavet/ydre Nordsø), og at det høje saltindhold resulterer i dannelse af aerosoler langs hele kysten ud mod Nordsøen. I de indre danske farvande, hvor saltindholdet er lavere, forekommer der formentlig mindre aerosoldannelse og mindre PFAS-spredning.

Bølgeprocesser der danner aerosoler og havskum

Dannelse af havskum og aerosoler sker ved bølgeprocesser, hvor bølgeenergien er styrende for mængden af bobler, der tvinges under vandoverfladen og derved producerer aerosoler og havskum, hvor PFAS opsamles i grænsefladen mellem vand og luft for de opstigende bobler. Bølgeenergi er styret af bølgehøje, som er afhængig af bl.a. vanddybde og "det fri stræk", som er den afstand, der er fra en landmasse til en anden i en given vindretning. Et langt frit stræk er desuden fordrende for at opkoncentrere og opsamle PFAS på en lang havstrækning.

Fanø har en bølge- og vindpåvirket vestside, mens øen mod øst er beliggende ud mod en lav-vandet lagune (Vadehavet) med et lille frit stræk (få km mellem Esbjerg og Fanø) og lav vind-påvirkning fra øst. Data viser, at der sker en påvirkning fra vest, men ingen påvirkning fra Vadehavet på østsiden af Fanø, skønt der også er PFAS påvist i Vadehavet, og skønt der er flere kendte punktkilder og udledninger, som bidrager til PFAS i Vadehavet mellem Fanø og Esbjerg.

Kystmorfologi

Det vurderes, at kystmorfologiske forhold kan have en betydning for, hvordan PFAS spredes. Ved lave strande som på Fanø er der fri passage for aerosoler ind over land, mens de høje klitter ved Husby måske kan virke som en skærm. Ved Thyborøn er der generelt klitter med lav højde som på Fanø.

Geologi og hydrologi

For grundvand kan forskellene også skyldes forskellige mægtigheder af den umættede zone, hvor PFAS kan bindes til porevand i grænsefladen mellem vand og luft. Des større umættet zone, des større mulighed for tilbageholdelse af PFAS, således at transporten til mættet zone reduceres. Særligt PFOS kan bindes i umættet zone på grund af stoffets fysiske-kemiske egenskaber. Generelt er den umættede zone mindre på Fanø og ved Thyborøn i forhold til Husby. Andre betydende forhold kan f.eks. være vandsystemer, hvor større kystnære søer kan have forbindelse til dybere grundvandsforekomster, som bliver en 'smutvej' for PFAS gennem den umættede zone (her er der ingen umættet zone, der kan tilbageholde PFAS).

For de terrænnære jordprøver forekommer koncentrationerne meget uensartede, og forskellene skyldes formentlig flere parametre som f.eks. afstand til havet og organisk indhold samt muligvis også sorption til jorden, permeabiliteten, kornstørrelsesfordeling, vandindholdet (da PFAS bindes i grænsefladen mellem vand og luft), jordbundsudvikling m.fl. Det vurderes dog, at påvirkning via aerosoler er en kilde til påvirkning af PFAS-indholdet i den terrænnære jord i kystnære områder. Denne vurdering bygger på, at der påvises PFAS i det underliggende grundvand i et område hvor der ellers ikke er nogen kilder til PFAS forurening. Påvirkningen medfører dog generelt indhold under jordkvalitetskriterierne.

Data viser, at lave indhold af PFAS i havvand kan spredes via havskum og aerosoler til kystnære områder langs hele den jyske vestkyst. Lignende resultater ses fra undersøgelser i bl.a. Holland og Belgien, hvorfor det vurderes, at det er en generel problemstilling langs hele Nord-søkysten. Påvirkningen af kyster i de indre danske farvande har ikke været omfattet i dette projekt, men prøvetagning af bl.a. badevand samt vand og græs fra kystnære enge med dyrehold viser, at der også kan være en påvirkning her. Her vil saltindhold samt bølge- og vindpåvirkning forventes at være betydende for påvirkningen. Således er der potentiale for kystnær PFAS-påvirkning af kystnære områder ved bl.a. Kattegat herunder Østjylland, Nordfyn, Vestsjælland og Nordkysten, mens påvirkning af kystnære områder længere inde i de danske farvande forventes at være mindre.

Påvirkning med PFAS i kystnære områder medfører en række miljø- og sundhedsmæssige problemer, herunder:

- Påvirkning af grundvand kan medføre risiko ved indvinding af grundvand til drikkevand. Der er er påvist forurening med PFAS i flere vandværker/kildepladser bl.a. Fanø, Hanstholm og Skagen. Påvirkningen udgør en særlig risiko for private indvindingsboringer, som ofte er korte og indvinder vand fra terrænnære magasiner.
- PFAS-kontaminering af græs og overfladevand i forbindelse med kystnære enge, som giver problemer med afgrænsning og naturpleje, da PFAS optages i får og kreaturer, hvilket er påvist i flere områder bl.a. på Harboøre Tange.
- Kontaminering af biota i kystnære områder. Der er påvist høje indehold i andefugle, hvilket bl.a. har medført forbud mod jagt på Harboøre og Agger Tange. Desuden kan det potentielt påvirke indhold af PFAS i fisk i vestjyske søer og fjorde, bl.a. helt, gedde og aborre.
- Hvis det terrænnære grundvand i kystnære områder er forurenet med PFAS, kan det medføre indsivning af PFAS-forurenet grundvand i kloakker, hvilket medfører påvirkning af rensningsanlæg, herunder PFAS i slammet, så det ikke kan anvendes til jordbrugsformål.
- Endelig kan PFAS i terrænnært grundvand medføre, at udledning af vand fra grundvandssænkninger bliver problematisk og kan medføre større omkostninger til rensning i forbindelse med anlægsprojekter.

12. Konklusion

Opsummering jord

- Der er påvist indhold af sum af 22 PFAS over analysemetodens detektionsgrænse i 11 ud af 23 analyserede jordprøver med indhold fra 0,7 µg/kg TS og op til 7 µg/kg TS.
- Nærmest stranden ses de højeste PFAS-koncentrationer i prøven fra 0,4-0,5 m u.t., mens der fra 500 m fra stranden og længere ind i land ses de højeste PFAS-koncentrationer i prøverne fra 0,0-0,1 m u.t.
- Der ses ingen tydelig sammenhæng mellem PFAS-koncentrationer og afstand til havet. Der ses en svag tendens til, at der ved høje indhold af organisk materiale også ses høje indhold af PFAS.

Opsummering grundvand

- Der er i samtlige boringer udført i det sydvest-nordøst gående transekt påvist PFAS i grundvandet. Koncentrationerne er aftagende fra vest mod øst, og der er således påvist indhold af sum af 22 PFAS på op til 45 ng/l i boringerne mod vest og ned til 5,9 ng/l i boringer mod øst.
- Der er påvist indhold af sum af 4 PFAS, der overskrider grundvandskvalitetskriteriet i alle boringer.
- I den østligste boring, 4 km fra kysten, er grundvandskvalitetskriteriet for sum af 4 PFAS overskredet ca. 4 gange.
- Der ses vertikalt aftagende indhold i boring B8, som er filtersat i tre dybder, hvor der i de to øverste filtre (1-3 m u.t. og 6-7 m u.t.) er påvist PFAS-indhold (sum af 22) på mellem 33-53 ng/l. I et filter placeret 9,5-11,5 m u.t. er der påvist 3,2 ng/l, hvilket indikerer, at lerlaget over det dybeste filter begrænser, men ikke forhindrer PFAS i at sprede sig ned i dybden.
- Der ses en mindre opkoncentrering over lerlaget eller i grænsefladen mellem ler og sand i filter placeret umiddelbart over lerlag (6-7 m u.t.), hvor der er påvist sum af 22 PFAS på 53 ng/l.
- Der ses overvejende forbindelserne PFOA og PFOS.

Opsummering overfladevand

- Der er i samtlige vandprøver fra overfladevand (søer og vandhuller) påvist indhold af PFAS.
- Der er påvist indhold af sum af 22 PFAS på op til 110 ng/l.
- Miljøkvalitetskravet for PFOS i overfladevand (0,65 ng/l) er overskredet i alle analyserede vandprøver (op til en faktor ca. 100)
- Der er kun udtaget fire vandprøver, og der ses ingen tendens i dataserien i forhold til PFAS-koncentrationer og afstand til havet.
- Der ses overvejende forbindelserne PFOA og PFOS.

Der er flere undersøgelser og artikler, der peger på, at PFAS kan opkoncentreres i aerosoler og skum fra lave niveauer i havet. Feltundersøgelser udført i Husby Klitplantage viser, at der kan påvises PFAS i jordprøver, grundvand og overfladevand, som er sammenlignelige med resultater fra andre kystnære projekter. Der forekommer dog forskelle i størrelsesordenen af forureningsgraden. Det vurderes, at graden, hvormed et kystnært område kan være påvirket af diffus forurening fra havet, afhænger af kystmorfologiske, geologiske og hydrogeologiske forhold.

Dette projekt, sammen med andre projekter udført ved Fanø, Thyborøn m.fl. samt erfaringer fra litteraturen, indikerer, at der med stor sandsynlighed kan findes PFAS i jord, grundvand og overfladevand på kystnære lokaliteter, som stammer fra diffus forurening fra havet. Potentielt kan denne diffuse belastning udgøre en risiko over for:

- Kystnære borer/kildepladser (op til 5-10 km fra havet) til vandværker og enkelt-indvindere, hvor det grundvandsdannende opland ligger kystnært.
- Dyreliv, som overvejende opholder sig i kystnære områder (op til 5-10 km fra havet), og som kan drikke af vandhuller og spise græs i de kystnære områder. Samt potentielt for fisk til konsum fra områder med lav vandudskiftning eller områder, hvor fiskene ikke kan flytte sig langt.

Viden fra projektet vil kunne anvendes i forbindelse med kystnære forureningsundersøgelser af punktkilder, hvor der skal være opmærksomhed på, at PFAS kan stamme fra opkoncentreret, diffus forurening i havvand. Der kan således forekomme høje koncentrationer af PFAS i primært grundvand og overfladevand, som ikke har relation til den undersøgte punktkilde.

Viden fra projektet kan desuden være relevant ved jordflytninger og grundvandssænkninger i forbindelse med kystnære byggeprojekter samt for vandforsyninger og planlægning af indvinding i kystnære områder.

13. Referencer

Amato et al, 2021: Frederic Been, Dennis Vught, Elvio Amato, Susanne Brekelmans, Francesca Cappelli, Nienke Meekel, Stefan Kools, Milou Dingelmans, Thomas ter Laak.

Towards developing a comprehensive PFAS monitoring strategy for the Dutch water sector. Poster, KWR, 2021.

Burns et al., 2021: David J. Burns, Paul Stevenson, Peter J. C. Murphy. PFAS removal from groundwaters using Surface-Active Foam Fractionation. Remediation, Volume 31, Issue 4, 2021.

Casas et al, 2020: Enrichment of perfluoroalkyl substances in the sea-surface microlayer and sea-spray aerosols in the Southern Ocean. Gemma Casas, Alícia Martínez-Varela, Jose L. Roscales, Maria Vila-Costa, Jordi Dachs, Begoña Jiménez. Environmental Pollution, Volume 267, December 2020,

Cousins et al, 2022: Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Ian T. Cousins, Jana H. Johansson, Matthew E. Salter, Bo Sha, and Martin Scheringer. Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 11172–11179
EGLE, 2019: Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy (EGLE), juli 2019. Surface Water Foam PFAS Sampling

DMI, 2023a: Frie Data, DMI, <https://www.dmi.dk/kontakt/frie-data/>. Hentet januar 2023.

DMI, 2023b: DMI vejarkiv, <https://www.dmi.dk/vejarkiv>. Hentet september 2023.

EGLE, 2019: Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy (EGLE), juli 2019. Surface Water Foam PFAS Sampling.

EGLE, 2021: Surface Water Foam Study Report. Udarbejdet af AECOM for Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, January 2021.

Faust, 2022: PFAS on atmospheric aerosol particles: a review. Jennifer A. Faust. Environmental Science Processes & Impacts, Royal Society of Chemistry, April 2022.

Lemvig Kommune, 2022: PFAS undersøgelse ved Vestkysten. Lemvig Kommune, 15. juni 2022.

Fields et al, 2021: Assessing the Potential for Bias in PFAS Concentrations during Groundwater and Surface Water Sampling. Field, J., Schwichtenberg, T., Deeb, R. A., Hawley, E. L., Sayler, C., Bogdan, D., Scafer, C., DiGuseppi, B., Struse, A. Department of Defence Strategic Environmental Research and Development Program, 2021.

Fødevarestyrelsen 2024: [PFAS \(fluorstoffer\) i dyr](#). Besøgt juni 2024

GeoAtlas, 2024: www.geoatlas-live.dk

GEUS, 2024: GEUS, National boringsdatabase: <https://www.geus.dk/produkter-ydelser-og-faciliteter/data-og-kort/national-boringsdatabase-jupiter>. Besøgt marts 2024

Johansson et al, 2019: Global transport of perfluoroalkyl acids via sea spray aerosol.

J. H. Johansson, M. E. Salter, J. C. Acosta Navarro, C. Leck, E. D. Nilsson and I. T. Cousins. Environmental Science: Processes and Impacts, Issue4, 2019.

Lemvig kommune, 2022: PFAS Undersøgelse ved Vestkysten. Notat udarbejdet af NIRAS for Lemvig Kommune. Rev.1 den 15. juni 2022.

Madsen et. al 2025: PFAS concentrations in the blood of Danish surfers. Mette Hyllegaard Madsen, Janne Julie Møller, Niels Erik Ebbenhøj, Flemming Nilsen, Marianne Tang Severinsen, Jonas Faardtoft Jensen, Søren Rygaard Lenschow, Jakob Hjort Bønløkke. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 264.

Miljøstyrelsen, 2022: [Resultater fra PFAS-målinger i badevand](#), nyhed på Miljøstyrelsens hjemmeside 11.08.2022.

Miljøstyrelsen, 2023a: [Nye fund af havskum med højt indhold af PFAS](#). Nyhed publiceret på Miljøstyrelsens hjemmeside 4. oktober 2023.

Miljøstyrelsen, 2023b: [Fund af PFAS i Nordsøen](#). Nyhed på Miljøstyrelsen hjemmeside d. 17-04-2023:

Miljøstyrelsen, 2023c: Fastsættelse af kvalitetskriterier for vandmiljøet - Per- og Polyfluoralkylstoffer (PFAS). Notat udarbejdet af Miljøstyrelsen, november 2023.

Miljøstyrelsen, 2024: PFAS prøvetagningsprocedurer og tests af feltudstyr. For jord, grundvand, overfladevand og luft. Miljøprojekt nr. 2257, februar 2024.

Naturstyrelsen, 2015: Redegørelse for Nisum Fjord og den sydlige del af Lemvig Små Værker. Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning, Naturstyrelsen, 2015.

Naturstyrelsen, 2023: Screening af forekomsten af PFAS på Naturstyrelsens kystnære og vestvendte arealer i Jylland og på Sjælland. Naturstyrelsen, 11. januar 2023.

Nielsen et al. 2014: Risikovurdering af overfladevand , som er påvirket af punktkildeforurenede grundvand. Nielsen, S., Tuxen, N., Frimodt, O., Bjerg, P., Sonne, A., Binning, P. Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1575, (1575), 2014.

OPEC, 2024: [Surface Activation Foam Fractionation \(SAFF®\)](#). OPEC Systems, 2024.

Rahlff et al., 2020: Janina Rahlff, Christian Stolle, Helge-Ansgar Giebel, Nur Ili Hamizah Mustafa, Oliver Wurl, Daniel P. R. Herlemann, Marine foams represent compressed sea-surface microlayer with distinctive bacterial communities.

Region Nordjylland, 2023: Undersøgelse af jordforureningers påvirkning af overfladevand. Hirtshals Havn, Skagerrak. Maskinværksted. Nordvestkajen 1, 9850 Hirtshals, Hjørring Kommune. Rapport udarbejdet af WSP for Region Nordjylland, juli 2023.

Den Syddanske Udviklingspulje, 2023: Undersøgelser af kystnær PFAS-forurening af jord- og grundvand. Den Syddanske Udviklingspulje, Oktober 2023.

Savvidou et al. 2023: Horizontal and Vertical Distribution of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) in the Water Column of the Atlantic Ocean. Eleni K. Savvidou, Bo Sha, Matthew E. Salter, Ian T. Cousins, and Jana H. Johansson. Environ. Sci. Technol. Lett. 2023, 10, 418–424.

Scalco, 2023: <https://scalco.com/>, besøgt september 2023.

Schwichtenberg et al., 2020: PFAS and Dissolved Organic Carbon Enrichment in Surface Water Foams on a Northern U.S. Freshwater Lake. Trever Schwichtenberg, Dorin Bogdan, Courtney C. Carignan, Patrick Reardon, Justin Rewerts, Thomas Wanzek, and Jennifer A. Field. Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 14455–14464

Sha et al, 2021: Influence of Water Concentrations of Perfluoro Acids (PFAAs) in Their Size Resolved Enrichment in Nascent Sea Spray Aerosols. Bo Sha, Jana J. Johansson, Jonathan P. Benskin, Ian T. Cousins and Matthew E. Salter. Environ. Sci. Technol. 2021, 55, 9489–9497.

Sha et al. 2022: Sea Spray Aerosol (SSA) as a Source of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) to the Atmosphere: Field Evidence from Long-Term Air Monitoring. Bo Sha, Jana H. Johansson, Peter Tunved, Pernilla Bohlin-Nizzetto, Ian T. Cousins and Matthew E. Salter. Environmental Science and Technology 2022, 56, 228–238.

Sha et al. 2024: Constraining global transport of perfluoroalkyl acids on sea spray aerosol using field measurements. Bo Sha, Jana H. Johansson, Matthew E. Salter, Sara M. Blichner, Ian T. Cousins. Science Advanced 10, ead1026 (2024). April 2024.

Sweco, 2019: Bepaling achtergrondconcentratieniveau PFAS in Noord-Holland. Rapport, Sweco Nederland B.V. 13-11-2019.

Sweco, 2021: Onderzoek naar PFAS in het grondwater in de kuststrook van Noord-Holland. Rapport, Sweco Nederland B.V. 05-10-2021.

Thisted Vand, 2022: Thisted Vand, Hanstholm Kildeplads, Undersøgelse for PFAS i grundvand og overfladevand, Rapport udarbejdet af NIRAS for Thisted Vand, november 2022.

Vito, 2023a: PFAS in zeewater en zeeschuim EINDRAPPORT, Studie uitgevoerd in opdracht van: Agentschap Zorg en Gezondheid, Referentie: 2022/SCT/R/2837, Januari 2023

Vito 2023b: [PFAS Vlaanderen](#). Overzicht van PFAS metingen in zwevend stof en deposities aan de kust. Studie uitgevoerd in opdracht van: Departement Omgeving Referentie: 2023/HEALTH/R/2948. April 2023.

VMR, 2022: PFAS håndbogen, Håndbog om undersøgelse og afværgelse af forurening med PFAS-forbindelser. Teknik og Administration nr. 1 2022. Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer, 2022.

WaterTech, 2022: [Er PFAS i havet en kilde til forurening på landjorden?](#) Søren Rygaard Lenschow, Anders g. Christensen, Morten Corneliusen og Halfdan R. Sckerl. Synspunktartikel i Water Tech, 24.06.2022.

Weiss et al, 2015: [PFAS analysis in water for the Global Monitoring Plan of the Stockholm Convention: Set-up and guidelines for monitoring](#). Weiss, J., Boer, J. De, Berger, U., Muir, D., Ruan, T., Torre, A., et al., 2015. UNEP Chemicals Branch, (April), pp.1–26.

Wurl et al, 2017: [Sea surface microlayer in a changing ocean - A Perspective](#). Oliver Wurl, Werner Ekau, William M. Landing, Christopher J. Zappa. Science of the Anthropocene (2017) 5: 31.

14. Forkortelser

Herunder ordliste med forkortelser anvendt i rapporten

C	Koncentration
C _{SSA}	Koncentration Sea Spray Aerosols
C _{SML}	Koncentration Surface micro layer
C _{SW}	Koncentration sea water (havvand)
C _{SF}	Koncentration havskum
EF	Efficient factor (opkoncentreringsfaktor)
EF _{SF}	Efficient factor havskum
EF _{SML}	Efficient factor surface micro layer
EF _{SSA}	Efficient factor Sea Spreay Aerosols
FTCA	Fluorotelomercarboxylsyre
FTOH	Fluorotelomeralkohol
FASA	Perfluoralkansulfonamid
FASE	Perfluoralkansulfonamidoethanol
FTSA	Fluorotelomersulfonsyre
PFAS	PerFluorAlkyl- og PolyFluorAlkyl-forbindelser
PFBA	Perfluorbutansyre
PFBS	Perfluorbutan sulfonsyre
PFCA	Perfluorcarboxylsyre
PFDA	Perfluordekansyre
PFDS	Perfluordekansulfonsyre
PFD _{Da}	Perfluordodekansyre
PFD _{DS}	Perfluordodekansulfonsyre
PFHxA	Perfluorhexansyre
PFHxS	Perfluorhexansulfonsyre
PFHpA	Perfluorheptansyre
PFHpS	Perfluorheptan sulfonsyre
PFNA	Perfluornonansyre
PFNA	Perfluornonansyre
PFOA	Perfluoroktansyre
PFOS	Perfluoroktansulfonsyre
PFPeA	Perfluorpentansyre
PFPeS	Perfluorpentan sulfonsyre
PFSA	Perfluorsulfonsyre
PFT _{TrDA}	Perfluortridekansyre
PFT _{TrDS}	Perfluortrikansulfonsyre
PFUn _{Da}	Perfluorundekansyre
PFUn _{DS}	PerfluorUndekan sulfonsyre
SF	Sea Foam (havskum)
SML	Surface MikroLayer (vandets overflade)
SSA	Salt Seaspray Aerosol
SW	Sea Water (havvand)

15. Bilag

PFAS-påvirkning fra hav til land – Del 1

Et litteraturstudie har samlet nationale og internationale undersøgelser, der viser, at PFAS i havet kan opkoncentreres via bølger, havskum og aerosoler og derefter spredes til kystnære områder. Her kan det medføre forhøjede niveauer af PFAS i jord, grundvand, overfladevand og græs.

Feltundersøgelser ved Husby Plantage i Vestjylland har omfattet prøver af havvand, havskum, jord, terrænnært grundvand og overfladevand. Resultaterne viser blandt andet:

- PFAS22 er fundet i 11 ud af 23 jordprøver (op til 7 µg/kg TS), uden tydelig sammenhæng med afstand til havet.
- I grundvandsboringer på tværs af et transekt ses aftagende PFAS-koncentrationer med øget afstand fra kysten. Indholdet af PFAS overstiger GKK i alle boringer, især PFOA og PFOS.
- I overfladevand (søer og vandhuller) er PFAS påvist i koncentrationer op til 110 ng/l. Miljøkvalitetskravet for PFOS (0,65 ng/l) er overskredet markant i alle prøver.

Sammen med andre undersøgelser, bl.a. fra Fanø og Thyborøn, indikerer resultaterne, at diffus PFAS-forurening fra havet kan påvirke jord og vand i kystnære områder.

Denne belastning kan udgøre en risiko for kystnære drikkevandsboringer og dyreliv op til 5–10 km fra kysten. Projektets viden kan anvendes i forureningsundersøgelser, jordflytninger, byggeprojekter og ved planlægning af vandindvinding i kystnære områder.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk