

Undersøgelser af kystnær PFAS-forurening af jord- og grundvand

Den Syddanske Udviklingspulje

Journal nr. 22/52316

Oktober, 2023

Projektet er finansieret med puljemidler fra Den Syddanske Udviklingspulje for rent vand og jord

Ansvarsfraskrivelse:

Region Syddanmark vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporten som er finansieret med puljemidler fra "Den Syddanske Udviklingspulje for rent vand og jord".

Det skal bemærkes, at offentliggørelse af rapporten ikke nødvendigvis betyder, at Region Syddanmark er enig i rapportens indhold og konklusioner, men er udelukkende med henblik på at dele viden om teknologiudviklingen på jordforureningsområdet.

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	6
2	Indledning	8
2.1	Baggrund	8
2.2	Formål	9
2.3	Potentielle forureningskilder i området for undersøgelsen	10
2.4	Tidligere undersøgelser	11
2.5	Fysiske forhold	11
3	Feltundersøgelsen	12
3.1	Udvælgelse af lokalitet	12
3.2	Metodeverifikation	12
3.3	Prøvetagning af skum	12
3.4	Boringer	12
3.5	Prøvetagning overfladejord	14
3.6	Prøvetagning grundvand	14
3.7	Tryktransducere	14
3.8	Overfladevand	14
4	Geologiske forhold	16
4.1	Regional geologi og hydrogeologi	16
4.2	Vandindvinding	18
4.3	Lokalitetens geologi og hydrogeologi	20
4.4	Pejlinger og grundvandsstrømning	21
5	Analyseresultater	23
5.1	Analyseresultater for metodeverifikation	23
5.2	Analyseresultater for jord	23
5.3	Analyseresultater for grundvand	26
5.4	Analyseresultater for overfladevand	27
6	Vurdering af undersøgelsesresultater	29
6.1	Konceptuel forståelse af opkoncentrering og spredning af PFAS i havvand til jord, grundvand og overfladevand	29
6.2	Vurdering af om PFAS fra havet kan være årsag til PFAS i Fanø Vands indvindingsboringer	30
6.3	Vurdering af om der forekommer PFAS-fingerprint, som kan skelne mellem diffus PFAS-forurening fra havet og fra punktkilder	31
7	Konklusion	34
7.1	Sammenfatning	34
8	Referencer	36

Bilagsoversigt

Bilag 1	Situationsplan med angivelse prøvetagningssteder og naturforhold
Bilag 2	Situationsplan med forureningsindhold
Bilag 3	Oversigtskort grundvand
Bilag 4	Geologisk profilsnit
Bilag 5	Konceptuel model
Bilag 6	Borejournaler
Bilag 7	Feltjournaler Vandprøvetagningskemaer Tidevandsamplitude og vandprøvetagning
Bilag 8	Analyseresultater 8.1 Kemiske analyser, tabeller
Bilag 9	Analyserapporter 9.1 Analyserapporter: Jord 9.2 Analyserapporter: Grundvand 9.3 Analyserapporter: Overfladevand
Bilag 10	Fingerprints
Bilag 11	Fotos
Bilag 12	Notat – Tryktransducere

Stamdata

Ejendomsoplysninger	
Adresse	-
Matr. nr. og ejerlav	292a og 292b Rindby By, Nordby
Lokalitetsnummer	-
Regionens journal nr.	
Grundejer	Staten/ Naturstyrelsen
Kommune	Fanø
Aktivitet	Udviklingsprojekt
Nuværende anvendelse	Strand, mark, hede og skov
Ejendommens vandforsyningsforhold	-

Grundvand og overfladevand	
Grundvandsinteresser	Beliggende udenfor OSD
Indvindingsopland	3 boreriger indenfor indvindingsopland til Fanø Vandværk
Overfladevand	100-3.000 m fra Vesterhavet

Offentlig indsats	
Grundvand	-
Arealanvendelse	-
Overfladevand	-
Natur	-

Udførelse af undersøgelsen	
Rådgivers sagsnr.	10417278
Sagsbehandler	Anne Bomann Henriksen
Kvalitetskontrol udført af	Anders G. Christensen
Borentreprenør	Boret teknik
Analyselaboratorium	Eurofins

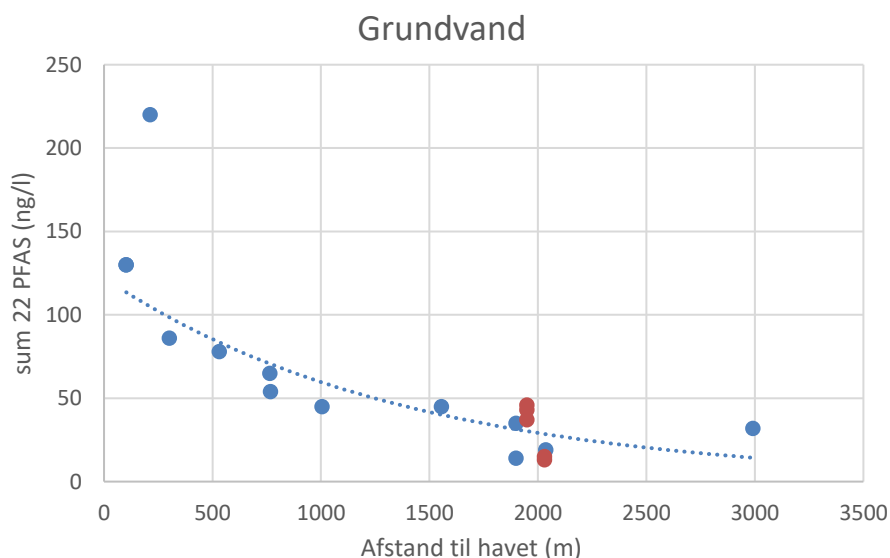
1 Sammenfatning

Med henblik på at undersøge om diffus forurening med PFAS fra havet kan opkoncentreres og spredes til land og forårsage forurening af jord og grundvand, er der udført en undersøgelse på Fanø, hvor der er påvist PFAS-forurening i øens vandforsyning.

Undersøgelsen har baggrund i en arbejdshypotese om, at PFAS kan opkoncentreres i grænsefladen mellem vand og luft (i overfladen af havet og i havskum) og forårsage en diffus spredning med havskum og aerosoler fra havets brænding ind over land. I den forbindelse er Fanø aktuel, da der er påvist forurening med PFAS i indvindingsboringerne til Fanø vandværk. Der er ingen umiddelbare kilder (flade- eller punktkilder) til den påviste forurening af vandværkets indvindingsboringer.

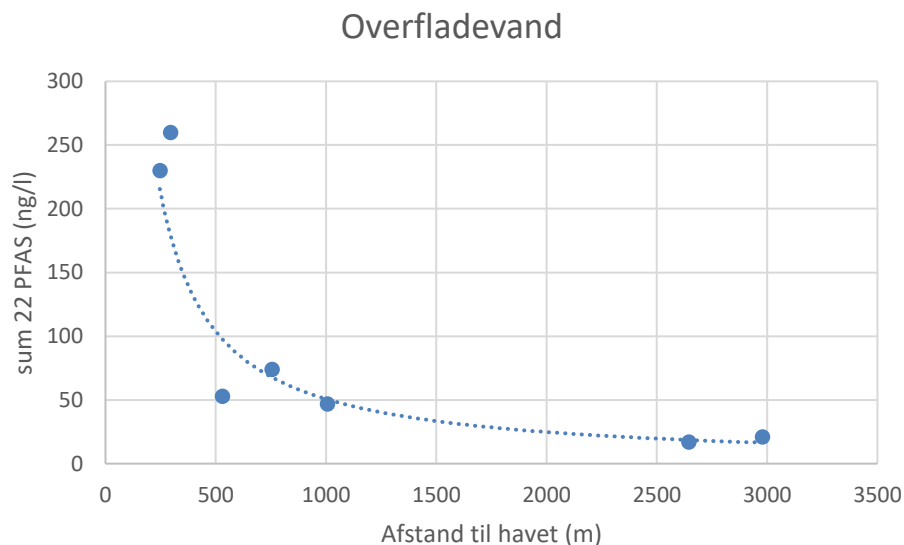
Undersøgelsen er udført under den Syddanske Udviklingspulje og omfatter et transekt af borer og overfladeprøver på tværs af øen, som forløber fra stranden på vestkysten og 3 km ind i landet i nordøstlig retning, langs fremherskende vindretning. Fra borerne er der udtaget prøve af grundvand, og der er i et område omkring hver boring udtaget blandeprøver af overfladejorden i dybderne 0-0,1 og 0,4-0,5 m u.t. Jordprøver er analyseret for 22 PFAS, organisk indhold, natrium og magnesium og grundvandsprøverne for 22 PFAS. Langs transektet er der, hvor det var muligt, udtaget vandprøver af overfladevand til analyse for 22 PFAS, chlorid, natrium og magnesium. Endvidere er der ved kildepladsen til Fanø vandværk udført borer med prøvetagning af grundvand fra terræn og ned til indtag for indvindingsboringer ca. 20 m u.t.

Arbejdshypotesen er blevet bekræftet ved denne undersøgelse, idet der i grundvand og overfladevand er påvist faldende PFAS-koncentrationer med afstand til vestkysten, som illustreret på figur 1.1 og 1.2.



Figur 1.1: Indhold af sum af 22 PFAS (ng/l) som funktion af afstand til havet (m) for terrænnært grundvand. De røde prikker på graf med grundvand er målinger foretaget af COWI i 2022 /5/.

Der er i grundvandet påvist indhold af sum af de 22 analyserede PFAS (herefter benævnt Sum 22) på op til 220 ng/l i borerne mod vest og ned til 19 ng/l i borer mod øst. Der ses således en klar tendens med aftagende koncentrationer fra vest mod øst. Endvidere observeres en aftagende koncentration af PFAS i grundvandet over dybden. Der er påvist indhold af summen af fire analyserede PFAS (PFOA, PFOS, PFNA og PHxS, herefter benævnt Sum 4), der overskrider grundvandskvalitetskriteriet i alle borer (med op til en faktor ca. 100), og for Sum 22 overskrides grundvandskvalitetskriteriet i de to vestligste borer (med op til en faktor ca. 2).



Figur 1.2: Indhold af sum af 22 PFAS (ng/l) som funktion af afstand til havet (m) for overfladevand.

I vandprøverne fra overfladevand er der påvist indhold af Sum 22 på op til 260 ng/l længst mod vest og ned til 17 ng/l i overfladevand længst mod øst. Der observeres således også for overfladevand aftagende koncentrationer med stigende afstand fra kysten. Miljøkvalitetskriteriet for PFOS er overskredet i alle overfladevandsprøverne (med op til en faktor ca. 260).

Der er påvist indhold af Sum 22 i alle analyserede jordprøver, og én enkelt jordprøve overskrider jordkvalitetskriteriet for Sum 4 (med en faktor ca. 3). Der kan for jordprøverne ikke umiddelbart ses nogen sammenhæng mellem koncentrationer og afstande til kysten som for grundvand og overfladevand. Prøver af strandsand viser lave indhold af PFAS.

Indhold af PFAS enkeltkomponenter i Fanø Vands indvindingsboringer er i store træk sammenlignelige med de PFAS forbindelser påvist i boringer nær vandværket udført i nærværende undersøgelse, hvor der overvejende ses PFOA og PFHxS samt til dels PFBA og PFOS. Det vurderes derfor sandsynligt, at PFAS påvist i indvindingsboringer kan stamme fra PFAS deponeret på jorden via atmosfærisk våd- og tørdeposition fra havskum og aerosoler fra havet.

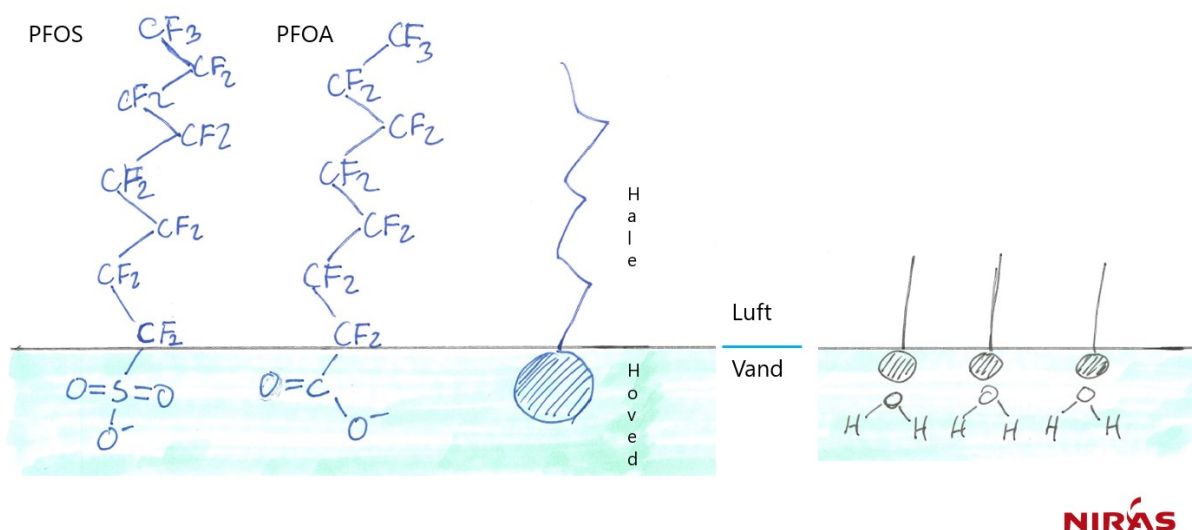
Der er udarbejdet figurer, der viser den relative fordeling (PFAS-fingerprint) af de omtalte PFAS forbindelser, som er påvist ved denne undersøgelse i både jord, grundvand og overfladevand. Figureerne kan f.eks. anvendes ved andre kystnære undersøgelser, og kan bruges som værktøj til skelnen mellem diffus forurening fra havet og andre punktkilder.

2 Indledning

Tidligere undersøgelser udført i Lemvig Kommune i foråret 2022 /1/ indikerer, at forurening med PFAS af jord, grundvand, overfladevand mv. kan stamme fra Vesterhavet, hvor lave indhold af diffus PFAS i havvandet opkoncentreres i bølger mv. ved pålandsvind og spredes via havskum og aerosoler til kystnære områder. Nærværende projekt udføres med henblik på at vurdere, i hvilket omfang der sker en lignende spredning af PFAS fra havet ved den sydlige del af Vestkysten. Endvidere har undersøgelsen som delmål at vurdere, om spredning af diffus forurening fra havvand kan være kilde til forurening af indvindingsboringerne til Fanø Vandværk.

2.1 Baggrund

PFAS er overfladeaktive stoffer, hvis egenskaber medfører, at stofferne vil opkoncentreres i grænsefladen mellem vand og luft. Stofferne er stabile i denne grænseflade, da stoffernes polære del (syre med negativ ladning) vil være i vandfasen og blive fastholdt af polære vandmolekyler, mens stoffernes upolære del (kæde af fluorerede kulbrinter) vil bindes i luftfasen. Dette er illustreret ved figur 2.1 herunder, med en detaljeret model af PFOS og PFOA til venstre og en simpel model til højre. Der vil således kunne ske en opkoncentrering i vandoverfladen og følgelig i skum og i aerosoler, som dannes når bølger brydes.



Figur 2.1: Konceptuel fordeling af PFAS-forbindelser i grænsefladen mellem vand og luft.

Undersøgelserne udføres på Fanø, da råvandet fra Fanø Vand siden 2021, hvor Miljøstyrelsen den 9. juni sænkede grænseværdien fra 100 nanogram pr. liter til to nanogram pr. liter, har overskredet grænseværdien for summen af PFAS-stofferne PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS (Sum 4). Undersøgelsesområdet beliggende fremgår af figur 2.2

Undersøgelsen er udført for Region Syddanmark i februar og marts 2023 af NIRAS A/S.



Figur 2.2 Undersøgelsens placering. Boringer er placeret ved røde prikker og Fanø Vandværk ved den blå prik.

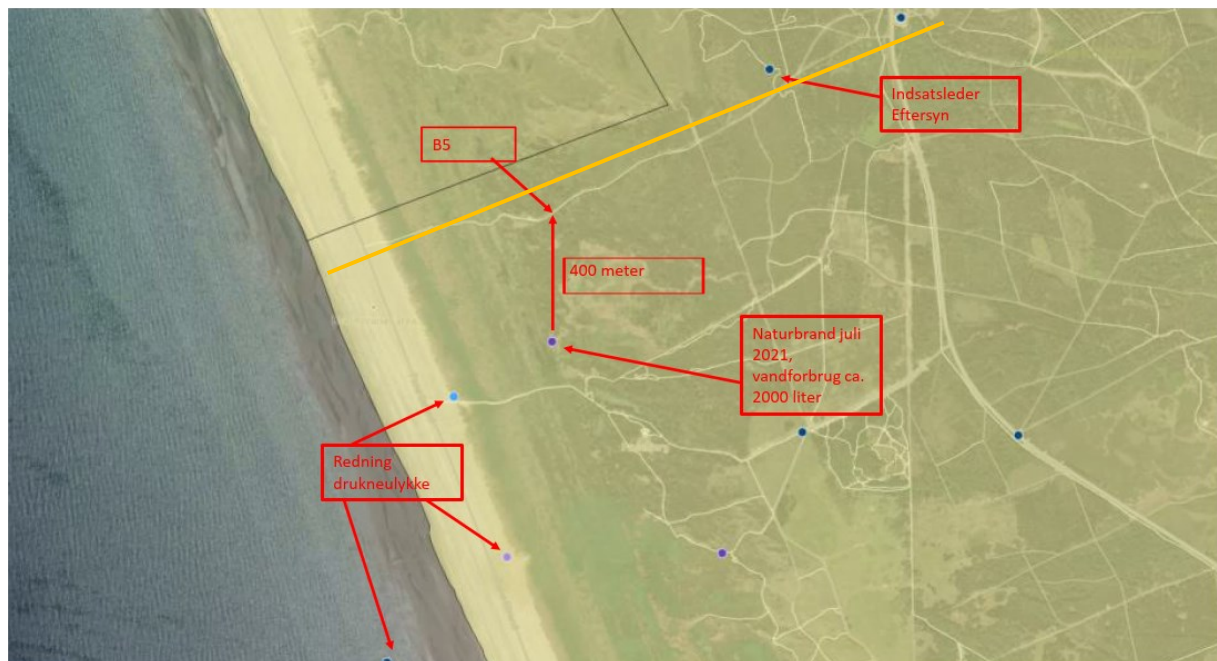
2.2 Formål

Det er ønsket med dette projekt, at få viden om, hvorvidt PFAS fra havet kan resultere i en diffus forurening, som kan give væsentlig påvirkning af jord og grundvand, samt undersøge i hvilken afstand dette evt. er gældende. Dette kan have betydning for fremtidige forureningsundersøgelser, der udføres tæt på kysten, eller fremtidige projekter, hvor der skal foretages jordflytning og/eller genanvendelse i forbindelse med kystnære byggeprojekter og projekter, hvor der skal håndteres grundvand ved fx grundvandssænkninger. Endvidere kan denne viden have betydning for beslutningsgrundlaget ved fund af PFAS i kystnære indvindingsboringer, som det er tilfældet på Fanø, og være en faktor der skal indgå ved udpegnen af nye kilderplaser mv. Yderligere kan betydelige indhold af PFAS i terrænnært grundvand medføre forsinkelser og forhøjede omkostninger ved grundvandssænkninger. Projektets formål er således at undersøge følgende:

- Konceptuel forståelse af opkoncentrering og spredning af PFAS fra havvand til jord, grundvand og overfladevand.
- Vurdere om PFAS fra havet kan være den egentlige årsag til de påviste indhold i indvindingsboringerne på øen.
- Undersøge om der forekommer PFAS fingerprint, som kan skelne mellem diffus PFAS-forurening fra havet og fra punktkilder som f.eks. brandøvelsespladser, lossepladser mv.

2.3 Potentielle forureningskilder i området for undersøgelsen

Den dominerende arealanvendelse i området er skov, hede og områder med overfladevand/marsk. Der forekommer indimellem naturbrande. Disse har dog altid været slukket med vand /15/, men der kan potentielt have været anvendt kontamineret brandslukningsudstyr. I figur 2.3 fremgår registrerede udrykninger i området /15/. Her ses det, at der 400 m fra undersøgelsestransektet (B5) har været en naturbrand i 2021, hvor der har været anvendt 2.000 l vand til slukning. Afstanden til boringer i undersøgelsestransektet vurderes dog at være for stor til, at slukningen kan påvirke resultaterne.



Figur 2.3: Figur over Sydvestjysk Brandvæsens registrerede indsatsområder /15/. Orange streg markerer omtrentlig placering af transekt med undersøgelsesboringer og prikkerne markerer områder med udrykning.

Ca. 1,5 km nord for transektet er der placeret et sommerhusområde, hvor nedsivning af husspildevand potentielt kan udgøre en kilde til PFAS. Sommerhusområdet udleder spildevand til grøfter /11/, der afvander til vådområdet beliggende nord for transektet.

Ca. 170 m syd for B8 ligger en tidligere udplantningsplanteskole (Skovplanteskole 1900-1970).

Placering af sommerhusområde og planteskole fremgår på bilag 1. Potentielle forureningskilder er opsummeret i tabel 2.1.

Tabel 2.1 Oversigt over potentielle kilder til PFAS forurening nær vandværk og nær transekt

Tidspunkt / periode	Matrikel	Aktiviteter / begivenheder	Bemærkninger	Reference
1900-1970	292b Rindby By, Nordby	Planteskole	Undersøgt i 2022.	/5/
Før 2014-2021 og efter		Brand (natur eller bygning)		/7/
1960'erne – i dag		Spildevand fra sommerhusområde		/11/

2.4 Tidligere undersøgelser

Ved den tidligere planteskole er der i 2022 udført fem filtersatte borer og udtaget blandeprøver af overfladejorden ved de fem borer samt i et sjette område ved planteskolen. Der er i jordprøver fra de seks områder påvist PFAS-indhold for Sum 4 mellem 0,12 µg/kg TS og 0,82 µg/kg TS og for Sum 22 mellem 0,12 µg/kg TS og 0,87 µg/kg TS. Det påviste indhold af PFAS består med en enkelt undtagelse af PFOS og PFOA.

I grundvandet er der i borerne B201-B205 påvist indhold af Sum 4 mellem 11 ng/l og 38 ng/l og for Sum 22 mellem 13 ng/l og 46 ng/l. Det påviste indhold af PFAS består overvejende af PFOA. Det blev vurderet, at det påviste indhold af PFAS ikke har relation til driften af planteskole /5/.

2.5 Fysiske forhold

Den nuværende arealanvendelse er klitplantage (Fanø Klitplantage), hvorfor der er tale om et rekreativt område med både strand, lysåben natur samt nåle- og løvskov. Fotos fra området fremgår af bilag 11.

3 Feltundersøgelsen

3.1 Udvalgelse af lokalitet

Der er udvalgt et område på Fanø, hvor øen er bredest mulig, så undersøgelsestransektet kunne blive så langt som mulig. Området i plantagen midt på øen er således udvalgt, da det er offentligt ejet samt ligger i nærheden af Fanø Vands indvindingsboringer. Transektet er placeret syd for sommerhusområdet og syd for området, hvortil der udledes spildevand.

3.2 Metodeverifikation

Vedr. PFAS-kontaminering

Forud for feltarbejdet, er al 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 (udover boregrej) er i kontakt med forurenede flader (såsom jorden). Boringerne og prøvetagning er udført fra øst mod vest, således at områder med forventet lavt forureningsniveau er prøvetaget først og forventet højt forureningsniveau sidst. For at undgå evt. kontaminering fra pejl ved vandprøvetagning, er der kun pejlet i overfladen af grundvandet før prøvetagningen, og pejl er før brug vasket med PFAS frit vand.

For kontrol af metode er der udtaget tre vandprøver:

Tabel 3.1: Oversigt over vandprøver udtaget for kontrol af PFAS-kontaminering

PrøveID	Beskrivelse
Vask	Udtaget vandprøve af vaskevand fra boresnegl i forbindelse med vask af udstyr ved boring B3
Kontrol1	'Blindprøve', som består af PFAS-frit vand som er påfyldt prøvetagningsflaske i felten, og som har været transporteret sammen med de øvrige prøver.
Kontrol entr.2	Kontrol af vand medbragt af entreprenør

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 cm ved boring B3 og er udtaget ved 50 nedstik spredt på arealet. Denne ekstra overfladeprøve er benævnt BL3-ekstra-Fa/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 (200 m²) ved B3 sammenlignes med prøven med 5 nedstik (10 m²) ved B3. Hvis de 2 resultater er sammenlignelige, vurderes det, at prøver med 5 nedstik er repræsentative for jorden i området.

3.3 Prøvetagning af skum

Det var planlagt at udtage skumprøver fra havet og evt. indlandsvand, men perioden hvor feltarbejdet er udført, har været præget af et højtryk og et tørt og vindstille vejr med en svag vind fra nord til nordvest. Der har således ikke været gunstige forhold for udtagning af skumprøver, hvorfor disse er udgået. En oversigt over registrerede vejrforhold fremgår af tabel 7.1 i bilag 7.

3.4 Boringer

Borearbejdet på Fanø er udført i perioden fra den 27. februar til den 3. marts 2023. Boringerne er udført af Boret teknik A/S med NIRAS som tilsyn.

Undersøgelsen omfatter 13 boringer, hvoraf boring B1-B4, B5-1, B5-2 og B6-B9 udgør et transekt med 9 forede og filtersatte tørboringer (hhv. håndboringer hvor terrænet var svært fremkommeligt og maskinboringer for resten). Boringerne er placeret uden forudgående besigtigelse, hvorfor det viste sig at flere af boringsplaceringerne ikke var mulige at tilgå med borerig. Under feltarbejdet sad køretøjerne flere gange fast i sandet og på de små stier, og larvefødder gik i stykker. Derfor blev det besluttet af NIRAS at udføre en stor del af boringerne som håndboringer.

Boringerne er udført med henblik på prøvetagning af terrænnært grundvand. De resterende 3 filtersatte tørboringer, B10-B12, er udført nær kildepladsen til Fanø Vandværk med henblik på prøvetagning af grundvand i forskellige dybder.

- Boring B1-B7 er udført som forede filtersatte håndboringer udført ned til 3 m u.t. – B7 dog ned til 4 m u.t. og B5-2 ned til 5 m u.t. Boringerne er filtersat med 2 m Ø63 mm filter i toppen af grundvandsmagasinet og er afsluttet med T6 kaffekandeopper.
- Boring B8-B10 er udført som forede filtersatte tørboringer (6") ned til 3 m u.t. og filtersat med 2 m Ø63 mm filter i toppen af grundvandsmagasinet og er afsluttet med T6 kaffekandeopper.
- Boring B11 og B12 er udført som forede filtersatte tørboringer (6") ned til hhv. 10 m u.t. og 18 m u.t. og er filtersatte med Ø63 mm filter fra hhv. 8-10 m u.t. og 16-18 m u.t. og er afsluttet med T6 kaffekandeopper.
- For at undersøge den vertikale spredning af PFAS, ud over boringerne B10-B12 ved kildepladsen, er der lavet en ekstra boring i selve transektet ved B5. Boringen er filtersat med to meter filter 3-5 m u.t., svarende til to meter under det øverste filter. Den dybe boring er ved en fejl benævnt B5-2. Af hensyn til feltjournaler og analyserapporter, er navngivningen af boringerne B5-1 og B5-2 ikke rettet.

Ved hver filtersat boring er der udtaget terrænnære jordprøver med håndbor i et område på ca. 10 m². Jordprøverne er udtaget som blande-prøver á 5 nedstik, og der er udtaget jordprøver til analyse af 22 PFAS fra hhv. 0-0,1 og 0,4-0,5 m u.t. Der er kun udtaget én blandeprøve ved de tre boringer nær kildepladsen. Boringernes placering er afsat med dGPS og kan ses på situationsplanen i bilag 1. Transektet er udført i en sydvestlig-nordøstlig retning, som er den fremherskende vindretning i området /10/. Top af filterør er ligeledes indmålt med dGPS.

Efter borearbejdet er jorden efter krav fra Fanø/Esbjerg Kommune blevet udspreddt og revet, således at der ikke forekommer terrænregulering grundet feltarbejdet. Se fotodokumentation af boringer i bilag 11, som viser, at der ikke forekommer bunker af opboret jord ved afslutning af borearbejde, som forudsat i kommunens tilladelse.

Oversigt over udførte boringer fremgår af tabel 3.2.

Tabel 3.2 Oversigt over udførte boringer.

Boringsnavn	Dato	DGU-nr.	Dybde (m u.t.)	Filtersætning (m u.t.)	Matrikel	Ejer	Afstand til havet [m]
B1	02-03-2023	130. 2255	3	1-3	Strand	Staten/ NST	103
B2	02-03-2023	130. 2256	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	213
B3	03-03-2023	130. 2257	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	302
B4	03-03-2023	130. 2258	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	532
B5-1	01-03-2023	130. 2259	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	767
B5-2	01-03-2023	130. 2260	5	3-5	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	765
B6	01-03-2023	130. 2261	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	1004
B7	01-03-2023	130. 2262	4	2-4	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	1555
B8	28-02-2023	130. 2263	3	1-3	292a Rindby By, Nordby	Staten/ NST	2037
B9	28-02-2023	130. 2264	3	1-3	292b Rindby By, Nordby	Staten/ NST	2991
B10	28-02-2023	130. 2265	3	1-3	292b Rindby By, Nordby	Staten/ NST	1900
B11	27-02-2023	130. 2266	10	8-10	292b Rindby By, Nordby	Staten/ NST	1900
B12	27-02-2023	130. 2267	18	16-18	292b Rindby By, Nordby	Staten/ NST	1900

Der blev ført fuldtids tilsyn 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.

3.5 Prøvetagning overfladejord

Fra borerne B1-B10 er der ved hver boringsplacering udtaget to blandeprøver i 0-0,1 m u.t. og 0,4-0,5 m u.t. Der er således analyseret i alt 21 jordprøver benævnt BL1-Fa – BL10-Fa (inkl. BL3-ekstra-Fa/0-0,1).

Alle jordprøverne er analyseret for 22 PFAS og organisk stof af Eurofins. Jordprøver fra 0-0,1 m u.t. er endvidere analyseret for magnesium og natrium.

Analyseresultater for jordprøver kan ses i tabel 2 i bilag 8. Laboratoriets analyserapporter er vedlagt i bilag 9.

3.6 Prøvetagning grundvand

Der er udtaget i alt 14 grundvandsprøver fra de 13 etablerede borer. B5 er etableret som to separate borehuller (B5-1 og B5-2). Der er for boringen tættest på kysten udtaget to prøver samme dag i forbindelse med lavvande og højvande benævnt B1-lavv-fa og B1-hojv-fa. B1-hojv-fa er udtaget kl. 09:34, hvor havet var på sit højeste kl. 07:29. B1-lavv-fa er udtaget kl. 13:49, hvor havet var på sit laveste kl. 13:50. En oversigt over tidevandsamplituden (som er ca. 1,5 m) og tidspunkt for vandprøvetagning fremgår af bilag 7.

Vandprøverne er udtaget med nye eco pumper samt nye PE slanger efter forpumpning. Ved vandprøvetagningen er der desuden målt feltparametre (pH, ledningsevne, iltindhold, redoxpotentiale samt temperatur), og borerne er forpumpet, til der blev opnået stabile niveauer (ca. 70-400 l grundvand alt afhængig af dybde). Alle filtrene var velydende ved prøvetagningen.

Borerne er pejlet i forbindelse med vandprøvetagning. Der er udført pejling af boring B1 (både ved højvande kl. 09:18 og lavvande kl. 13:27) samt for boring B2-B3 den 15. marts 2023. Der er for borerne B4-B12 udført pejlinger den 14. marts 2023. Samtlige pejleresultater fremgår af tabel 4.2 i kapitel 4 samt af oversigtskort i bilag 3. Feltskemaer vedrørende prøveudtagningen er vedlagt i bilag 7.

Alle grundvandsprøver er analyseret for 22 PFAS hos Eurofins. Resultater af de analyserede vandprøver fremgår af tabel 5.3 i resultatafsnittet. Laboratoriets analyserapporter er vedlagt i bilag 8.

3.7 Tryktransducere

Der har i perioden fra udførelse af borerne B1 og B3 (hhv. d. 2. marts og 3. marts) frem til vandprøvetagning d. 15. marts været placeret en tryktransducer i vandsøjlen i filterrøret i hver af de to borer, for at logge vandstandsvariationer/tidevandsvariationen. Derudover har der i B1 været placeret en barometer logger i luftsøjlen i filterrøret for at logge atmosfæretryk i perioden. Loggerene i vandsøjlen i B1 og B3 har logget tryk hvert 10. minut, og barometerloggeren i luftsøjlen i B1 hver time. Begge borer har i toppen været aflukket med lufttætte propper. Vandstanden i borerne er pejlet i forbindelser med nedtagning af loggerne, for at kunne kotesætte vandstanden. Idet resultaterne fra tryktransducerne ikke var som forventet, grundet forsejling af borerne med T6 kaffekandepropper (og dermed ingen trykudligning i filterrørene), er resultaterne ikke medtaget i rapporten, men kan findes i bilag 12.

3.8 Overfladevand

Langs transektet, i nærheden af hver boring, er der blevet indsamlet overfladevand, når der har været vandhuller o.l. i nærheden. Vandprøver er udtaget som dykkede prøver, hvor prøvetagningsflasken med låg føres under vand, hvorefter flasken åbnes for prøvetagningen og lukkedes igen, inden flasken løftes op igen af vandet.

Der er blevet udtaget i alt 7 overfladevandprøver, benævnt VA2-VA6, VA9, VA10. Det var ikke muligt at udtage vandprøver ved B1 (VA-1), B7 og B8 (VA-7 og VA-8).

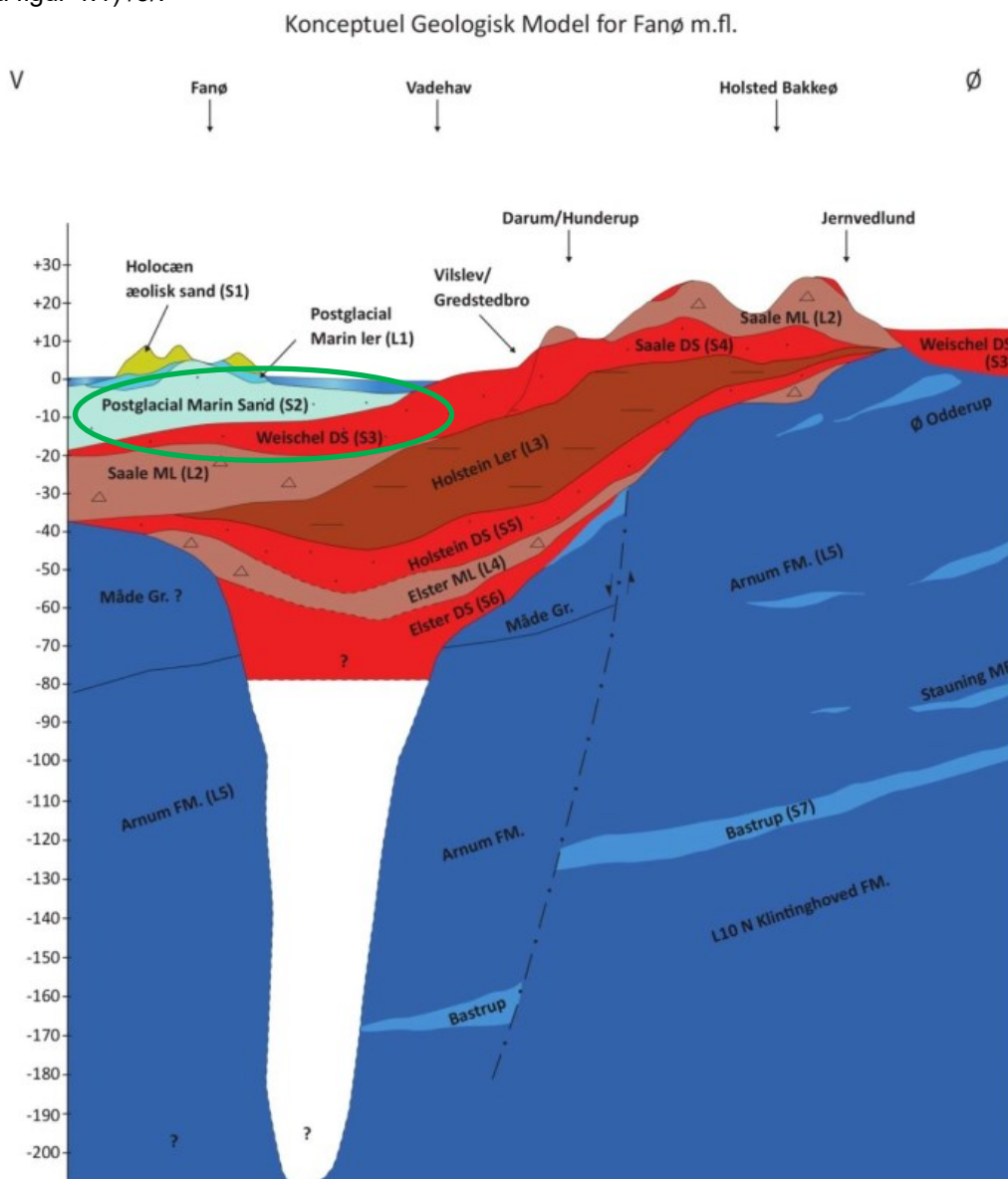
Alle overfladevandprøver er analyseret for 22 PFAS samt natrium, magnesium og klorid hos Eurofins. Resultater af de analyserede vandprøver fremgår af tabel 5.3 i resultatafsnittet. Laboratoriets analyserapporter er vedlagt i bilag 9.

4 Geologiske forhold

4.1 Regional geologi og hydrogeologi

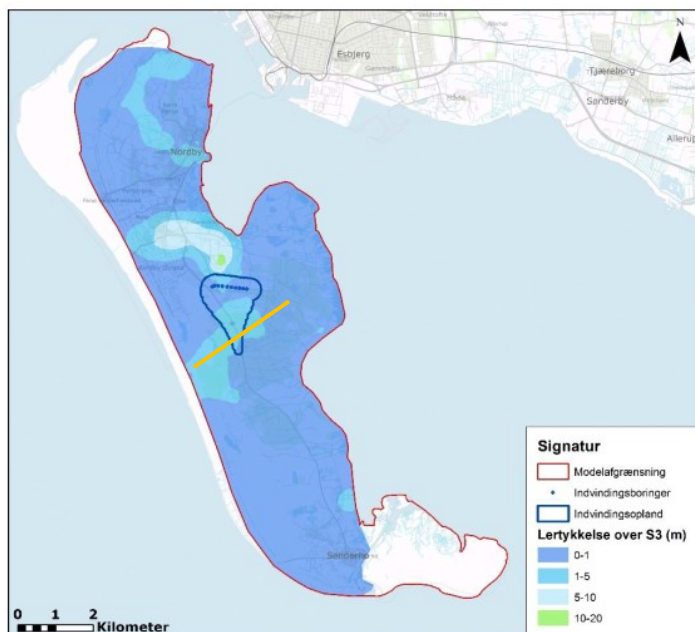
Observationer af lokal geologi ved borearbejde for indeværende undersøgelse fremgår af afsnit 4.3

På figur 4.1 fremgår en geologiske tolkning præsenteret i indsatsplan for grundvandsbeskyttelse fra 2018 /3/. Herpå ses Fanø til venstre i modellen, med et holocæn æolisk sandlag (flyvesand) (S1) ca. kote. +10 til 0, et mindre lag med postglacial marin ler (L1) omkring kote 0 efterfulgt af et postglacialt marint sandlag (S2) fra kote ca. 0 til -20 samt Weischel smeltevandssand (S3) omkring kote -15 til -20. Geologien i modelområdet domineres af de mod vest dykkende kvartære glaciale aflejringer og af den begravde dal, der gennemskærer de Miocæne lag mellem Fanø og fastlandet. Fanø Vandværk indvinder fra magasinet S2 og S3, som er et lag af kvartært smeltevandssand (markeret med grøn cirkel på figur 4.1) /3/.



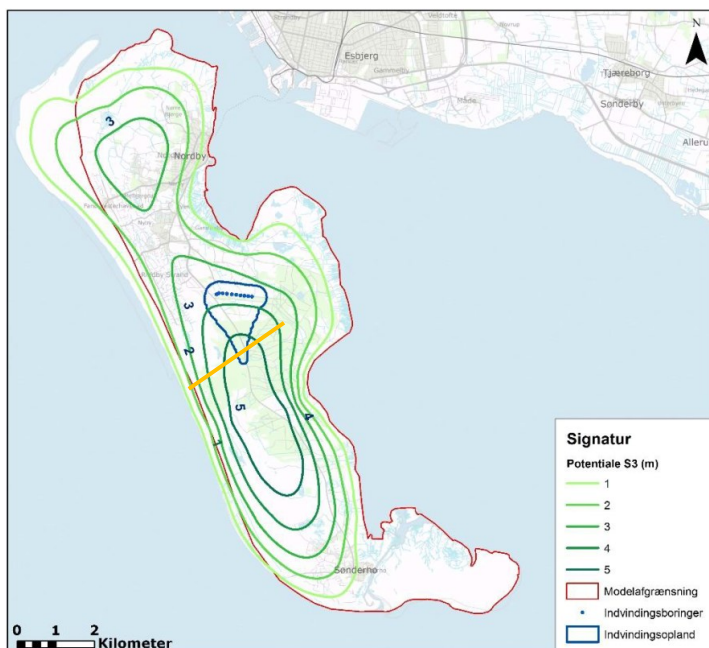
Figur 4.1: Konceptuel geologi for Fanø m.fl. Udklip fra /3/.

Dæklaget over S3 udgøres udelukkende af det postglaciale, marine lerlag, L1. Den akkumulerede lertykkelse over magasinet S3 er vist på figur 4.2 og er mellem 1 og 5 m centralt og i den sydlige del af indvindingsoplandet, hvor transektet er udført. Ved kildepladsen og i den vestlige del er der generelt mindre end 1 m ler.



Figur 4.2: Akkumuleret lertykkelse over magasinet S3 samt ca. placering af undersøgelsestransekt (orange streg). Udklip fra /3/.

Simulerede potentialeforhold for det øverste primære magasin, S3, fremgår af figur 4.3 og viser, at grundvandet strømmer mod kysten fra to potentialetoppunkter centralt på den nordlige og sydlige del af Fanø og fra syd mod nord ved indvindingsoplandet /3/. Det ses på figuren, at potentialeforholdene forventes at være mod vest i den første halvdel af transektet og mod øst i den anden halvdel.



Figur 4.3: Simuleret potentiale i magasinet S3 samt ca. placering af undersøgelsestransekt (orange streg). Udklip fra /3/.

Tabel 4.1 Data for nærliggende indvindingsboringer- Data fra /3/ og /4/.

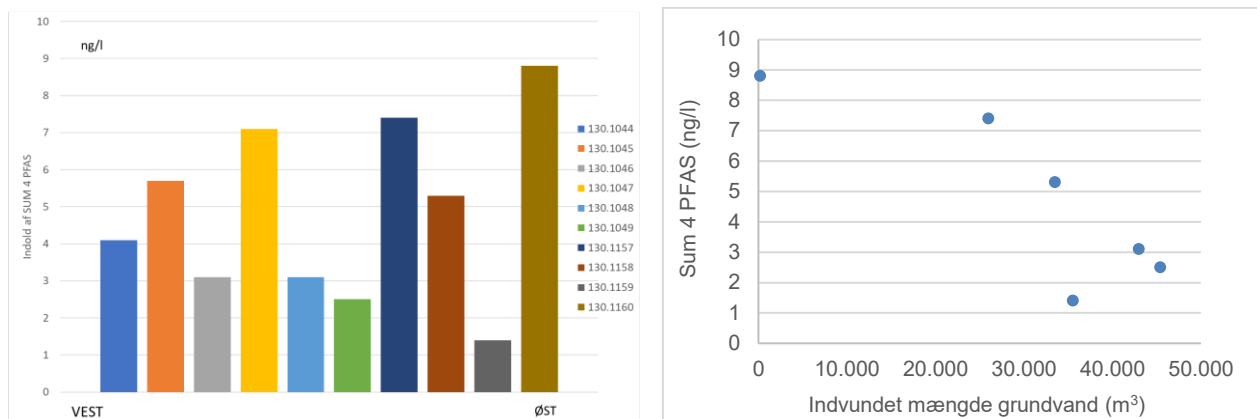
DGU nr.	Dybde	Filter [m u.t.]	Vandspejl [m u.t.]	Magasin	Indvundet mængde 2022 [m ³]	PFAS sum 4 [ng/l]
130.1044	31	24-30	4,49	Saltvandssand	37.954	4,1
130.1045	32,5	25-31	5,26	Saltvandssand	40.231	5,7
130.1046	31	22,5-28,5	4,89	Saltvandssand	45.028	3,1
130.1047	34	27-33	4,60	Saltvandssand	25.294	7,1
130.1048	34	27-33	4,43	Saltvandssand	42.966	3,1
130.1049	31	24-30	3,85	Saltvandssand	45.402	2,5
130.1157	31	24-30	3,33	Saltvandssand	25.994	7,4
130.1158	30	22,5-28,5	2,85	Saltvandssand	33.502	5,3
130.1159	31	24-30	2,05	Smeltevandssand	35.522	1,4
130.1160	30	23-29	1,91	Smeltevandssand	185	8,8



Figur 4.5: Transektets placering i forhold til vandindvinding, områder med drikkevandsinteresser og overfladevand

Indhold af PFAS sum 4 varierer imellem indvindingsboringerne fra 1,4 til 8,8 ng/l ved prøvetagning i 2023, hvor 7 ud af 8 boringer har indhold, som overskrider drikkevandskvalitetskriteriet for Sum 4 (2 ng/l). Figur 4.6 (tv.) viser indhold af Sum 4 i de enkelte boringer fra vest mod øst, og der ses ikke et mønster i indhold af PFAS i forhold til afstand til vestkysten. Figur 4.6 (th.) viser indhold af Sum 4 PFAS i forhold til indvundne vandmængder (data for 2022 fra GEUS Jupiter) for de enkelte boringer. Figur 4.6 (th.) viser, at højeste indhold af PFAS forekommer ved lav indvinding, og at indholdet af

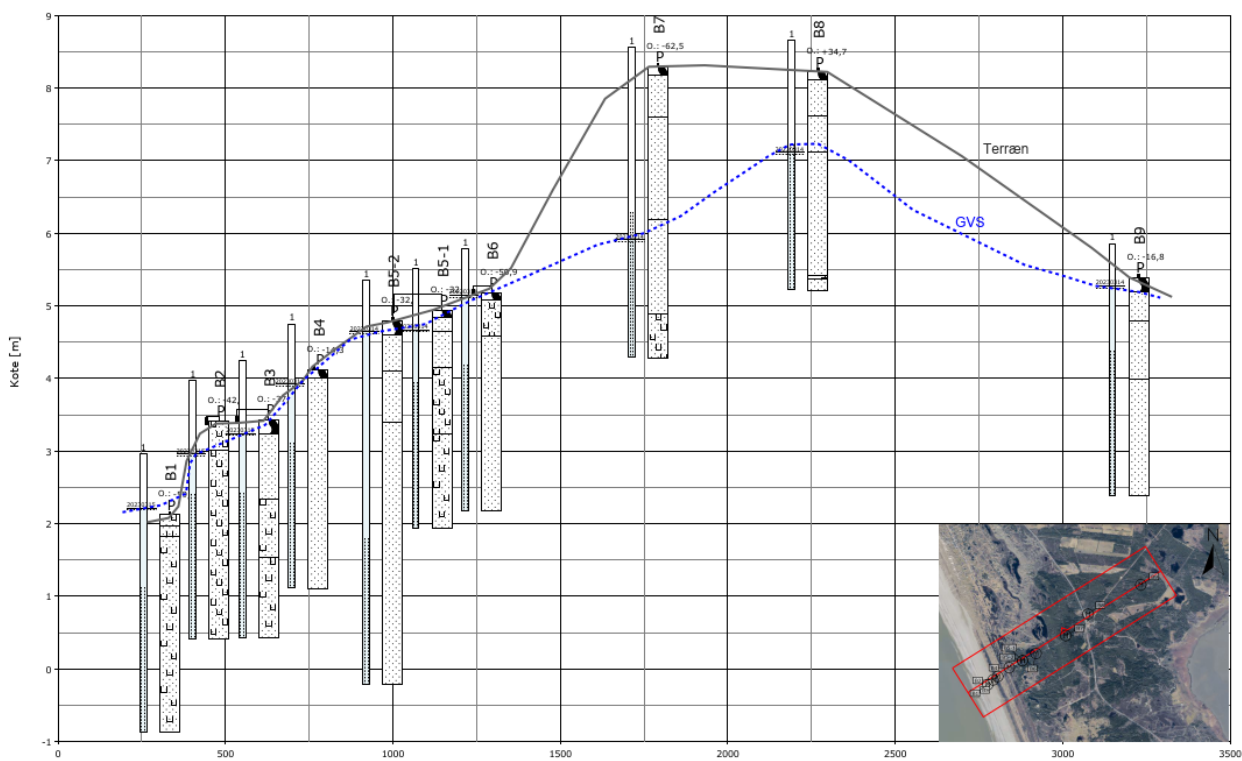
PFAS afhænger af den indvundne vandmængde, hvor fortynding har betydning for indhold PFAS for boreriger med indvinding af en stor vandmængde (signifikant fald >30.000 m³/år).



Figur 4.6: Indhold af sum af 4 PFAS i indvindingsboringer fordelt fra vest mod øst (tv.) samt sammenhæng mellem PFAS indhold (Sum 4) og indvundet mængde grundvand (th.).

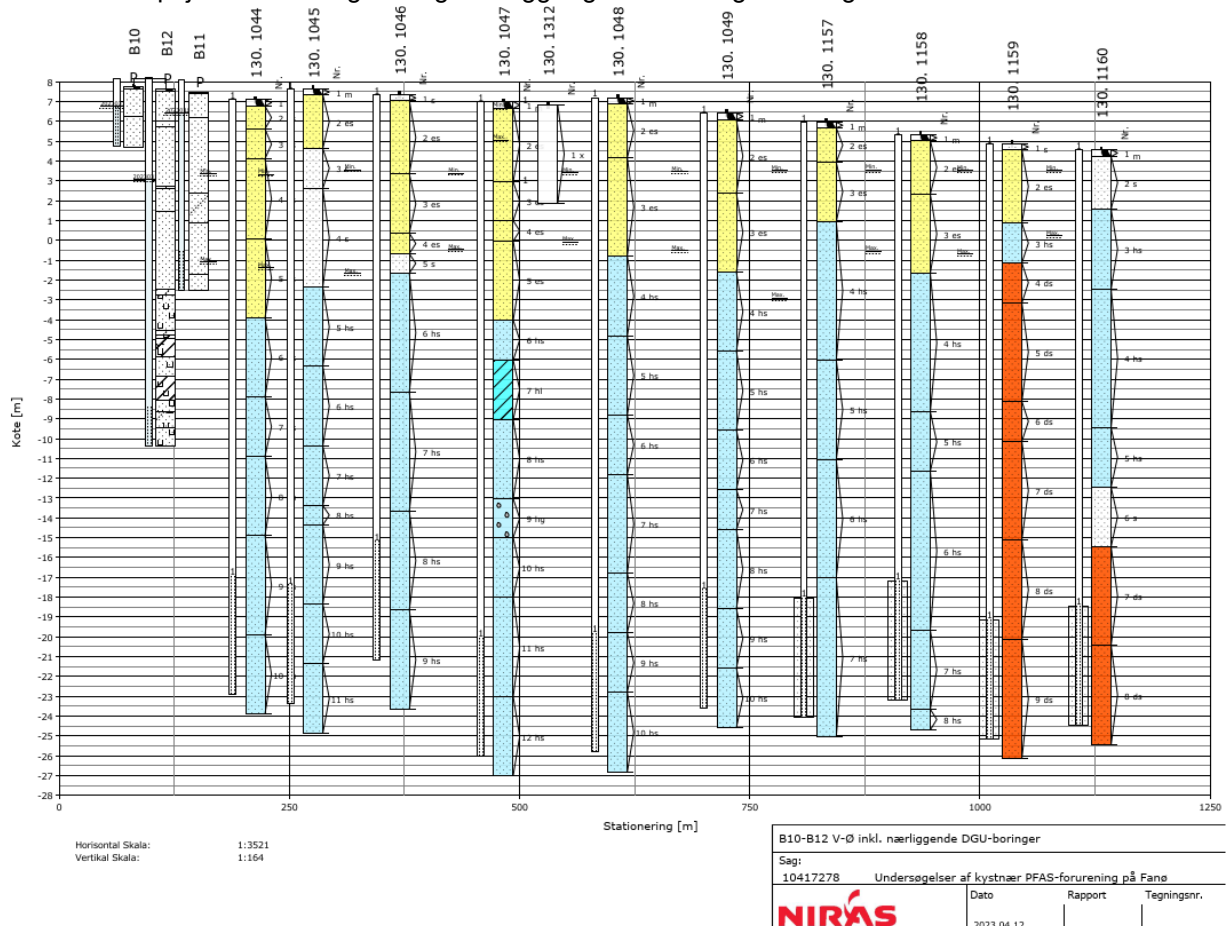
4.3 Lokaltetens geologi og hydrogeologi

Ved nærværende undersøgelse er der udført boreriger til 3-5 m u.t. i transektet. Borerigerne er hovedsageligt udført i sandaflejringer, hvor der ved borerigerne tættest på kysten forekommer marint sand med skaller ned til 3 m u.t. Længere inde i land ses æolisk sand, og hvor der tillige i højere grad forekommer organisk indhold og muld i toppen af borerigerne. På figur 4.7 fremgår et tværsnit med borerigerne, hvorpå det fremgår, at der er en terrænforskel på ca. 6 meter fra stranden og ind til B7 placeret midt på øen, og at grundvandet står meget terrænnært tæt ved kysten (endda med grundvandsspejl over terræn i B1).



Figur 4.7: Tværsnit med geologiske tolkninger fra borerigerne B1-B9.

På figur 4.8 fremgår Fanø Vandværks indvindingsboringer samt de tre boringer ved vandværket udført ved nærværende undersøgelse, hvor den dybeste er ført til 18 m u.t. Af prøvebedømmelsen fremgår, at der i den dybe boring (B12) er påvist sand, med enkelt indslag af silt, tørv og skaller ned til 12 m u.t. Herefter er der observeret ler samt marintsand ned til ca. 16 m u.t.. Boringerne stemmer godt overens med den geofysiske kortlægning, der viser sand ned til ca. 40 m u.t. og et lerlag i dybden 10-20 m u.t. Grundvandsspejlet i indvindingsboringerne ligger gennemsnitligt omkring kote ca. 1.



Figur 4.8: Profil med Fanø Vandværks indvindingsboringer samt boringer udført ved nærværende undersøgelse (B10-B12). Gul farve på indvindingsboringerne angiver postglacialt flyvesand. Blå farve angiver postglacial saltvandssand og -grus. Mørkeblå angiver postglacialt saltvandsler. Rød angiver glacialt smeltevandssand.

4.4 Pejlinger og grundvandsstrømning

I tabel 4.2 fremgår aktuelle pejlinger, og grundvandskoter er endvidere indtegnet på figur 4.7. Grundvandskoterne er beregnet på baggrund af dGPS-indmåling af filterrør, og der kan således forekomme en vis usikkerhed på koterne. Det ses af figuren, at grundvandspotentialiet går fra det højeste punkt midt på øen (ca. kote 7 i B8) og falder ned til kote ca. 2 i B1 på stranden, hvilket er i overensstemmelse med det simulerede potentialeforhold præsenteret i figur 4.3 /3/ på side 16.

Ved B1 er der både pejlet ved lavvande og ved højvande, og i begge tilfælde er grundvandet pejlet til 0,75 m under målepunkt, svarende til 9 cm over terræn. Der blev pejlet en ekstra gang, for at være helt sikker på, at pejlingerne var korrekte, og at der ingen forskel var. Det var forventet, at der ville være en forskel på grundvandsspejlet ved højvande og lavvande, og årsagen til de ens pejlinger, samt at trykniveauet er over terræn, kan ikke forklares.

Ved B5 er der udført to borer: B5-1 (filter fra 1-3 m u.t.) og B5-2 (filter fra 3-5 m u.t.). Vandspejlet ligger i de to borer i kote ca. 4,6, og filtrene vurderes at være placeret i samme magasin uden op eller nedadrettede gradienter.

Ved kildepladsen for Fanø Vand, er der udført tre borer (B10, B11 og B12) til hhv. til 3 m u.t., 10 m u.t. og 18 m u.t. Vandspejlet i den korte boring med filter fra 1-3 m u.t., B10, ligger højest ved kote 6,75. I boringen med filter omk. 8-10 m u.t., B11, ligger vandspejlet lidt lavere ved kote 6,42. I den dybe boring, B12, med filter fra 16-18 m u.t., ligger vandspejlet endnu lavere omk. kote 3. Samlet set kan forskellen i grundvandskoter skyldes en nedadrettet gradient grundet indvinding i området, idet vandspejlet i indvindingsboringerne ligger omkring kote 1.

Tabel 4.2 Pejlinger og vandstandskote

Boring nr.	Filtersætning [m u.t.]	Magasin	Absolut topkote af blindrør [mDVR90]	Terræn kote [mDVR90]	Vandspejlskote 15-03-2023 [mDVR90]
B1-lavvande	1-3	S1	2,96	2,12	2,21
B1-højvande	1-3	S1	2,96	2,12	2,21
B2	1-3	S1	3,97	3,42	2,96
B3	1-3	S1	4,24	3,43	3,24
B4	1-3	S1	4,75	4,12	3,92
B5-1	1-3	S1	5,51	4,94	4,67
B5-2	3-5	S1	5,35	4,80	4,64
B6	1-3	S1	5,79	5,18	5,15
B7	2-4	S1	8,56	8,29	5,91
B8	1-3	S1	8,65	8,22	7,11
B9	1-3	S1	5,85	5,39	5,27
B10	1-3	S1	8,19	7,73	6,75
B11	8-10	S1/S2	8,11	7,49	6,42
B12	16-18	S2	8,22	7,64	3,06

5 Analyseresultater

5.1 Analyseresultater for metodeverifikation

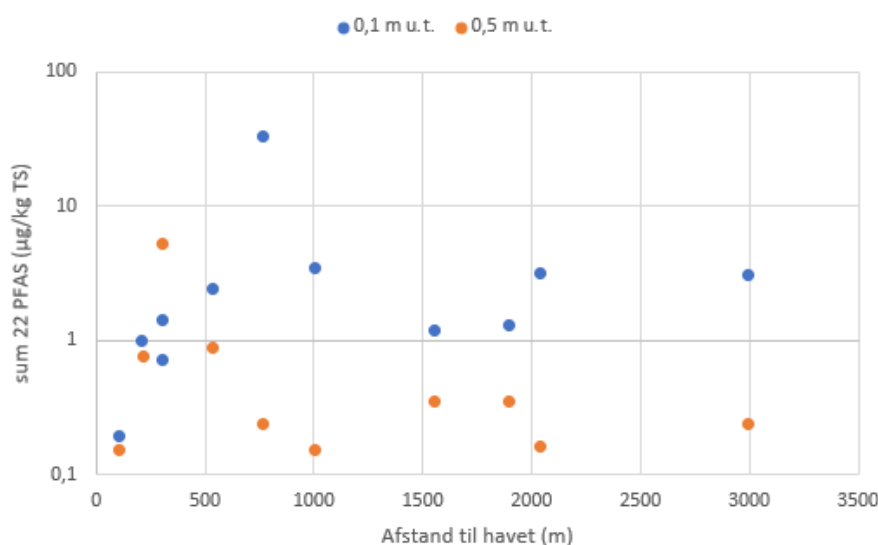
Analyseresultater for vandprøver udtaget i forbindelse med kontrol af metode og kontaminering fremgår af tabel 1 i bilag 8, og det fremgår af tabellen, at der ikke er påvist indhold af PFAS over analysemetodens detektionsgrænse i de tre analyserede kontrolprøver. Der er således ikke påvist anledning til, at der under feltarbejdet har været nogle kontamineringer. Hverken som følge af en kontamineret håndbor og boresnegl mellem borehullerne, eller som følge af kontaminering ved transport eller på laboratoriet. Vaskevand medbragt af boreentreprenør var ligeledes PFAS-fri (22 testede forbindelser).

Resultat af jordprøven BL3-ekstra-Fa/0-0,1, som er udtaget á 50 delprøver i et område på 200 m², fremgår af tabel 2 i bilag 8. Med analyseusikkerheder taget i betragtning, ligger resultaterne for jordprøverne, udtaget inden for et areal på 10 m² og et areal på 200 m², i samme størrelsesorden, og metoden med udtagning af overfladeprøver i felter á 10 m² vurderes at være repræsentativ for påvirkning af jorden i en specifik afstand til kysten i forhold til undersøgelsens formål.

5.2 Analyseresultater for jord

Resultater af de kemiske analyser for jordprøver fremgår af tabel 2 i bilag 8. Resultater for PFAS indhold i tidligere analyserede jordprøver /5/ er desuden medtaget i tabel 3 i bilag 8, hvor kun indhold over detektionsgrænsen er medtaget i tabellen. Boringerne i /5/ ligger i samme afstand fra kysten som B8, eller lidt nærmere. De terrænnære jordprøver er udtaget i 0-0,2 m u.t. og kan derfor ikke sammenlignes direkte med prøver fra nærværende undersøgelse, der er udtaget i 0-0,1 m u.t. De dybere jordprøver er udtaget fra 0,4-0,5 m u.t., og de påviste PFAS-indhold (på mellem 0,1-0,5 µg/kg TS) svarer til indholdet påvist i BL8-Fa/0,4-0,5.

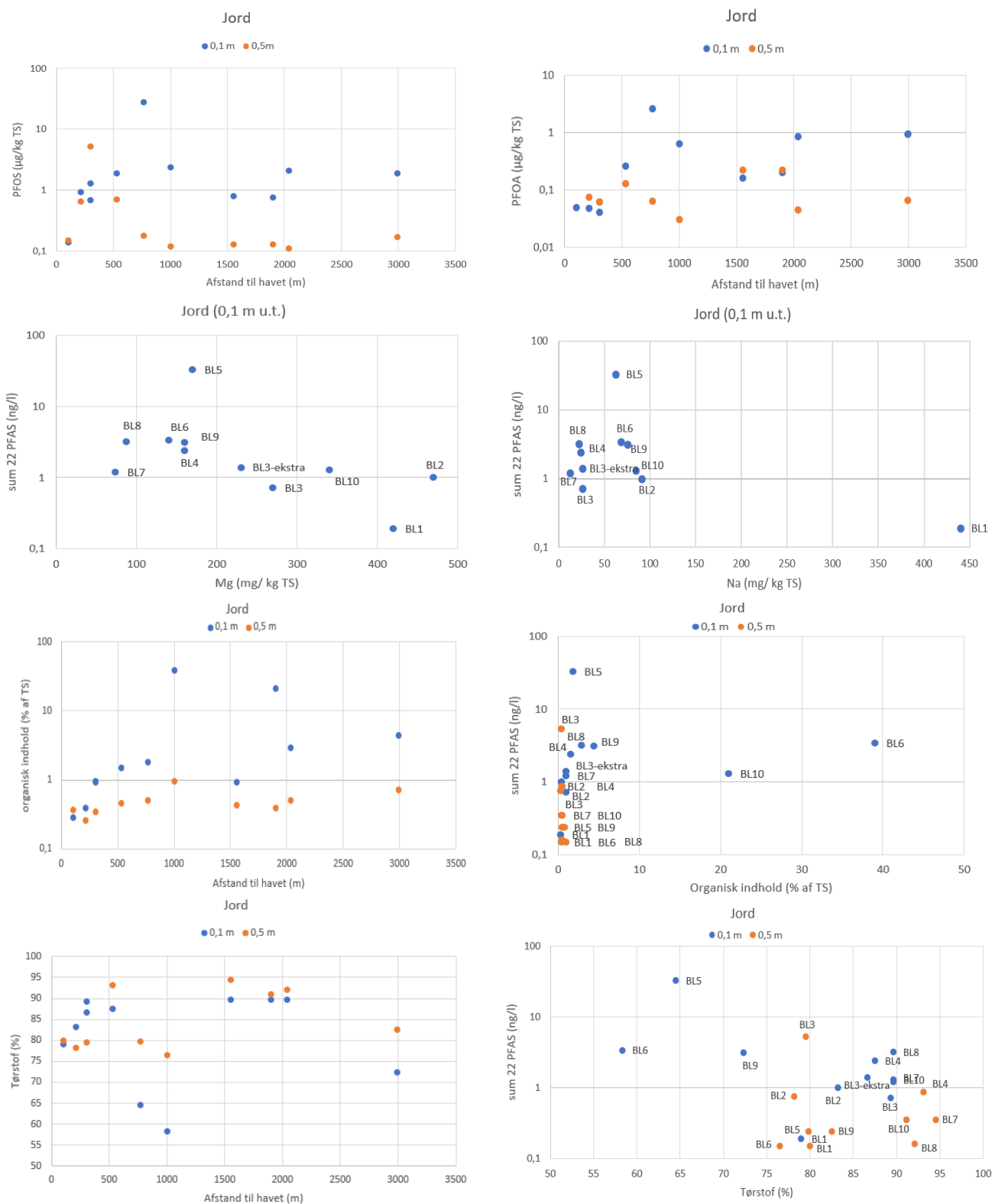
Der er ved nærværende undersøgelse påvist indhold af PFAS i alle udtagne jordprøver, og koncentrationerne af Sum 22 spænder mellem 0,15-33 µg/kg TS. Tørstofindholdet varierer mellem ca. 58-95 %, og det organiske indhold varierer mellem 0,26 % af TS (nærmeste stranden) og 39 % af TS. Figur 5.1 illustrerer indhold af Sum 22 i dybderne 0-0,1 m u.t. og 0,4-0,5 m u.t. Der er valgt en logaritmisk skala på y-aksen, af hensyn til det høje indhold i BL5 og lave indhold i nogle af de øvrige prøver. Det er primært PFOS, der binder bedre til organisk stof end PFOA /ref.14/, der bidrager til forureningen med PFAS-forbindelser.



Figur 5.1: Analyseresultater for Sum 22 for jordprøver udtaget 0,1 m u.t. (blå prikker) og 0,5 m u.t. (orange prikker)

Der er påvist indhold af Sum 4 i BL5-Fa i 0-0,1 m u.t. på 32 µg/kg TS, hvilket overskrider jordkvalitetskriteriet med en faktor ca. 3. BL5 er udtaget tæt på en sti og bestod af sandet muld, og samme jordtype som de omkringliggende prøver (BL4-Fa og BL6-Fa). Der ses generelt aftagende koncentrationer over dybden (fra 0,0-0,1 til 0,4-0,5 m u.t). Der ses ingen tendens til aftagende indhold af PFAS med afstand til havet, som det ellers var forventet. Dog er PFAS indholdet i prøverne udtaget nær stranden (i sand) lavere end de øvrige.

I figur 5.2 ses forskellige sammenstillinger for at undersøge PFAS-indhold i forhold til forskellige parametre, som afstand til havet, tørstof, organisk indhold mv. Det var forventet, at der kunne ses en sammenhæng mellem organisk indhold og PFAS-indhold, idet særligt PFOA og PFOS binder godt i jord med højt organisk indhold. Det var ligeledes forventet, at der ville være en sammenhæng mellem salte fra havet (Na og Mg) og PFAS indhold. Som det fremgår af graferne i figur 5.2, ses der ingen tydelige sammenhænge for de undersøgte parametre (afstand til havet, tørstof, organisk indhold, Na, Mg). Det vurderes, at datasættet enten er for lille til at vise en sammenhæng, eller at der er en række yderligere parametre, som har indflydelse på koncentration og fordeling af PFAS, såsom aflejringernes sorptions-evne, permeabiliteten, kornstørrelsesfordeling, vandindholdet (da PFAS bindes i grænsefladen mellem vand og luft), jordbundsudvikling, nedbrydning m.fl.

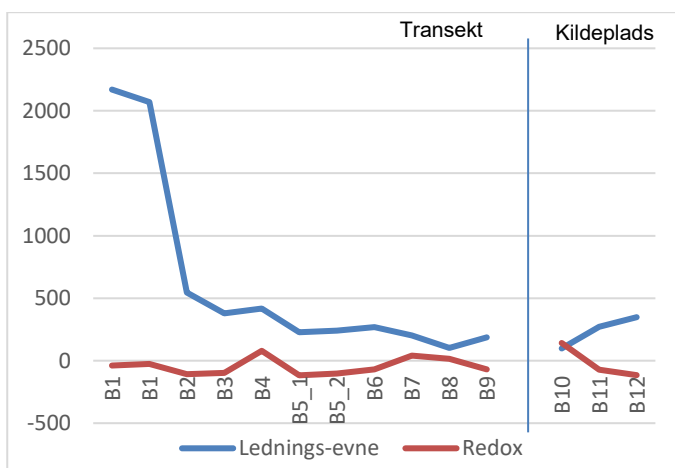


Figur 5.2: Forskellige sammenstillinger af undersøgte parametre for jordprøver. Bemærk af grafen for tørstof mod afstand til havet (nederst til venstre) er fremstillet med almindelig y-akse.

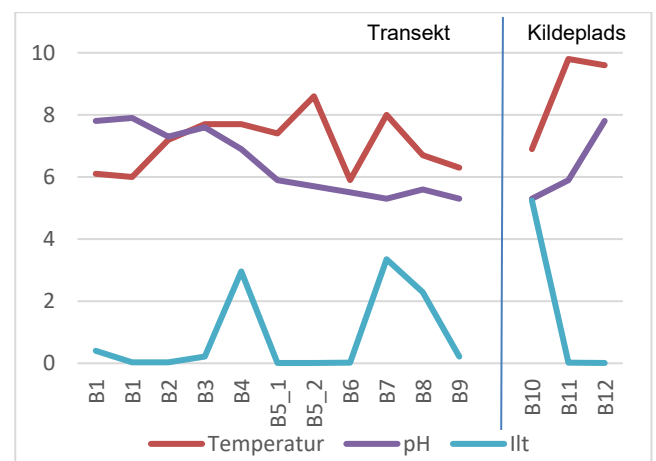
5.3 Analyseresultater for grundvand

Resultater for ledningsevne, temperatur, redox og ilt fremgår af feltjournaler vedlagt i bilag 7 og af figur 5.3 og 5.4. De største variationer for feltparametrene ses for ledningsevne, hvor den i B2-B12 ligger mellem 98 og 545 $\mu\text{S}/\text{cm}$ og i B1 på ca. 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Niveaulet vurderes at skyldes, at grundvandet i B1 er påvirket af havvand. På foto 2 og 3 ses det, at B1 er påvirket af tidevandet ved flod, men ikke ved ebbe. Der ses dog ens resultater for feltparametre (bl.a. ledningsevne) og kemiske analyser (tabel 4, bilag 8.1), hvilket ikke umiddelbart kan forklares.

Temperaturen på grundvandsprøver ligger mellem 5,9 og 7,7 grader i det terrænnære grundvand og op til 9,8 grader i det dybere grundvand (B11 og B12). pH indholdet varierer mellem 7,9 i de mest kystnære borer og 5,2 i borer inde i land, hvilket indikerer at de kystnære borer kan være påvirket af svagt basisk havvand (med pH lidt over 8), og borer inde i land er påvirket af ferskvand og svag sur grundvand som følge af jordbundsudviklingen under hedeearealer og nåleskov. Redoxmålinjerne varierer meget fra vandprøve til vandprøve og ligger mellem -115 og 142.



Figur 5.3: Ledningsevne og redoxforhold målt i borer

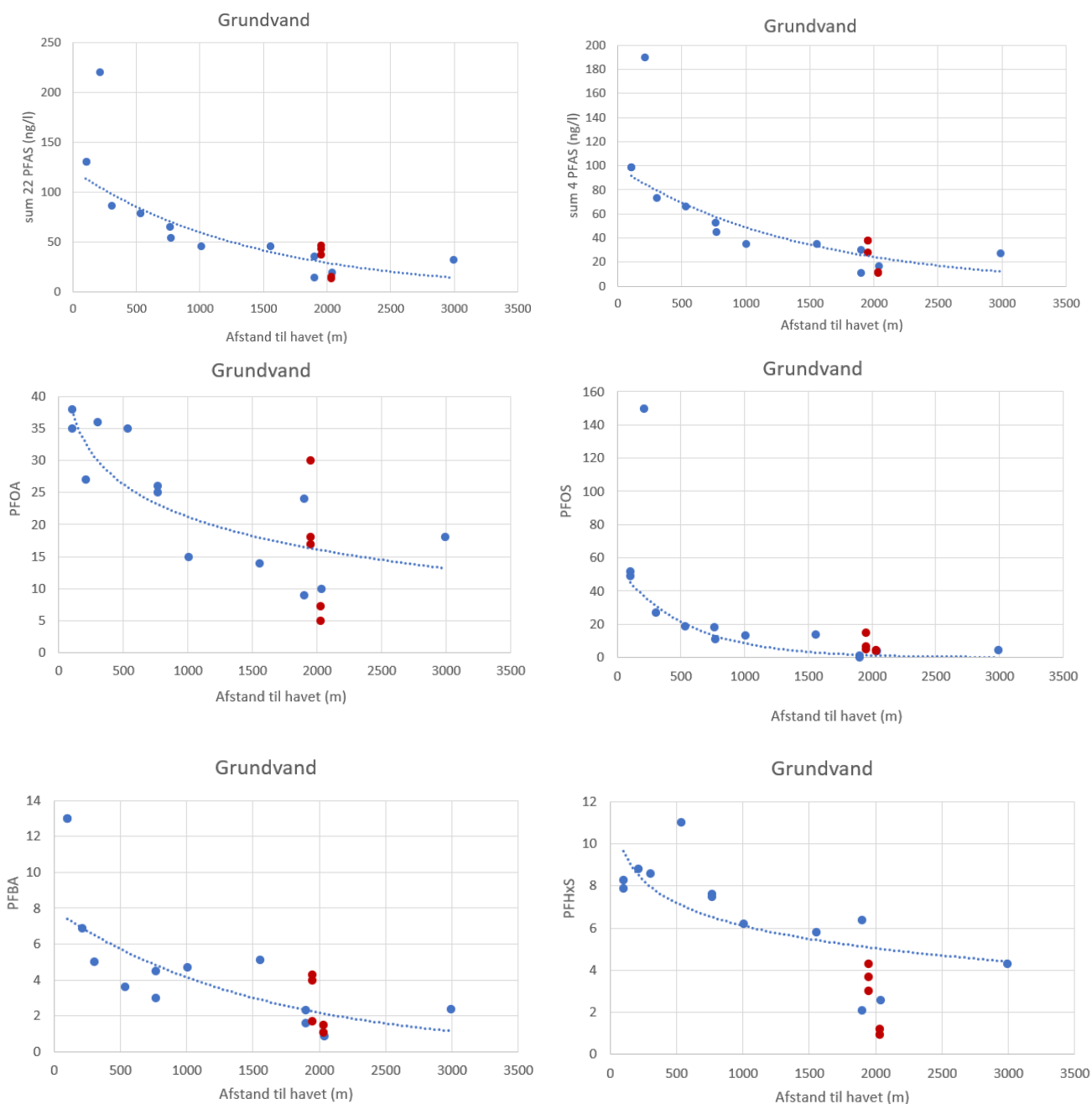


Figur 5.4: Temperatur, pH og ilt målt i borer

Resultater af de kemiske analyser for 22 PFAS i grundvand fremgår af tabel 4 i bilag 8. Der er truffet forurening med indhold af Sum 22 i alle borer på nær B12 (med filter 16-18 m u.t.). Indholdene er mellem 14 og 220 ng/l, hvor det højeste indhold er fundet i boring B2. Der er overvejende påvist indhold af PFOS og PFOA samt til dels også PFHxS og PFBA. Grundvandskvalitetskriteriet for Sum 22 er overskredet i B1 og B2, og for Sum 4 er det overskredet i alle borer på nær B12.

Resultater for PFAS indhold i tidligere analyserede grundvandsprøver /5/ er desuden medtaget i tabel 5 i bilag 8.1, hvor kun indhold over detektionsgrænsen er medtaget. Boringerne er filtersat i toppen af grundvandsmagasinet fra 1-3 m u.t (B203-2 fra 5-7 m u.t.). Boringerne ligger i samme afstand fra kysten som B8, eller lidt nærmere. De påviste PFAS-indhold for Sum 22 (på mellem 13-46 ng/l) svarer til indholdet påvist i B8.

Figur 5.5 illustrerer indhold af Sum 22, Sum 4, PFOA, PFOS, PFBA og PFHxS i det terrænnære grundvand som funktion af afstand til havet. For alle graferne ses der aftagende indhold med afstand til kysten



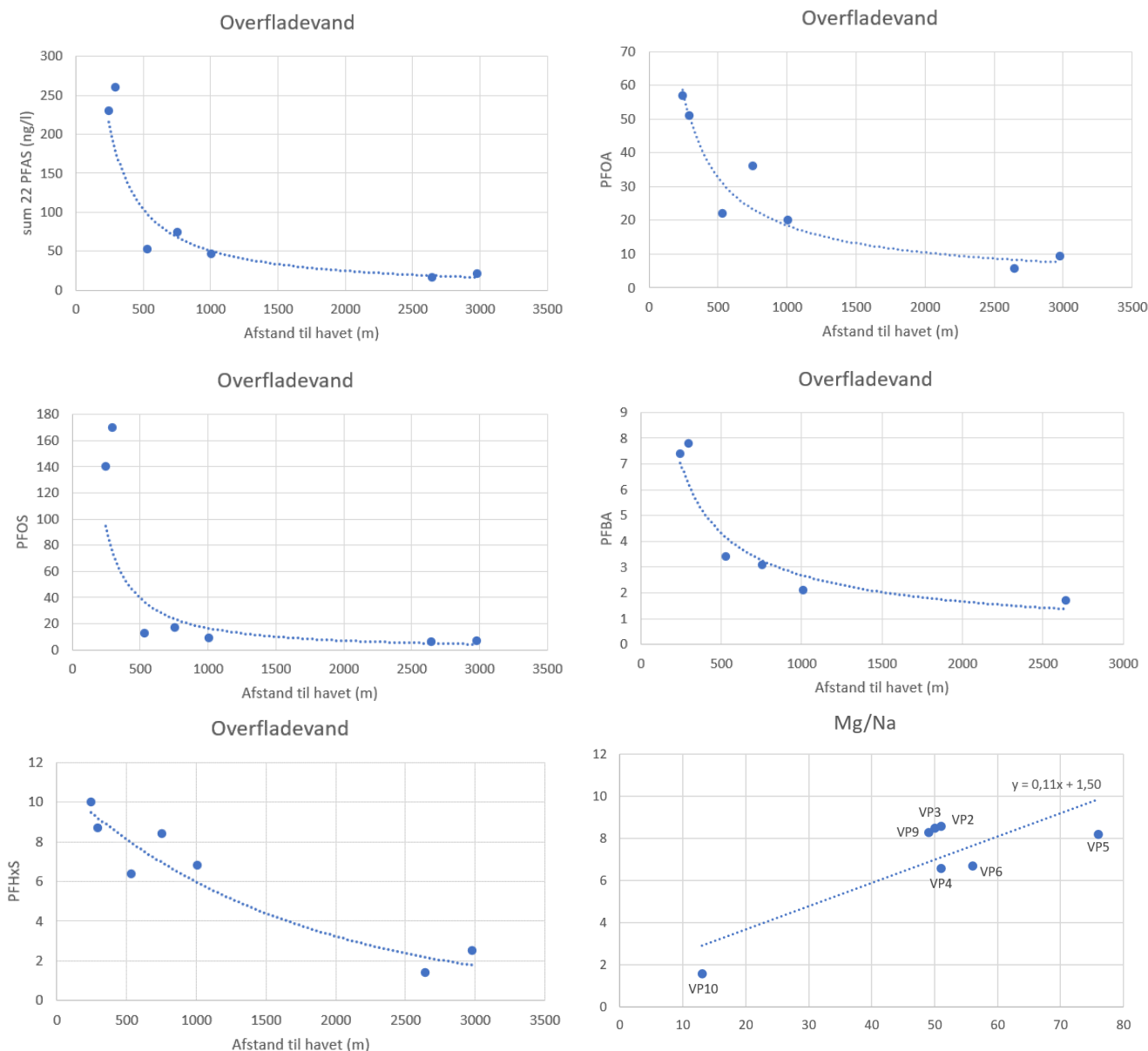
Figur 5.5: Indhold af PFAS Sum 22 og 4 samt PFOA, PFOS, PFBA og PFHxS i ng/l som funktion af afstand til havet (m) for terrænnært grundvand. De røde prikker på graf med grundvand er målinger foretaget af COWI i 2022 /5/.

5.4 Analyseresultater for overfladevand

Resultater af de kemiske analyser for 22 PFAS samt Na, Mg og Cl i overfladevand fremgår af tabel 6 i bilag 8. Der er påvist PFAS i alle analyserede prøver af overfladevand med et indhold af Sum 22 fra 17-260 ng/l, og der er overvejende påvist indhold af PFOS og PFOA i prøverne af overfladevand. Miljøkvalitetskravet for PFOS i overfladevand (årgennemsnit) er overskredet i alle vandprøver med op til en faktor ca. 260. Der er desuden analyseret for magnesium, natrium og chlorid, for at undersøge relation til havet/aerosoler. Figur 5.6 illustrerer indhold af Sum 22, PFOA, PFOS, PFBA og PFHxS i overfladevand som funktion af afstand til havet og forholdet mellem Mg og Na. I VP6 ses endvidere

PFOSA (som er en precursor til PFOS), som ellers ikke fremgår i de øvrige analyserede vandprøver. Der er ingen kendte punktkilder til PFAS i området for VP6.

Forholdet mellem Mg og Na er for de udtagne overfladevandsprøver (VA2-VA6 og VA9-VA10) forholdsvis ensartet og stemmer godt overens med et forhold på 0,12 registreret i havet i /9/. Det stabile forhold kan tyde på påvirkning af overfladevand fra aerosoler (tørdeposition). Desværre mangler der en referencemåling af Mg og Na fra havet for at understøtte hypotesen.



Figur 5.6 Indhold af PFAS sum 22 samt PFOA, PFOS, PFBA og PFHxS som funktion af afstand til havet for overfladevand, samt forholdet mellem Mg og Na i overfladevandsprøver.

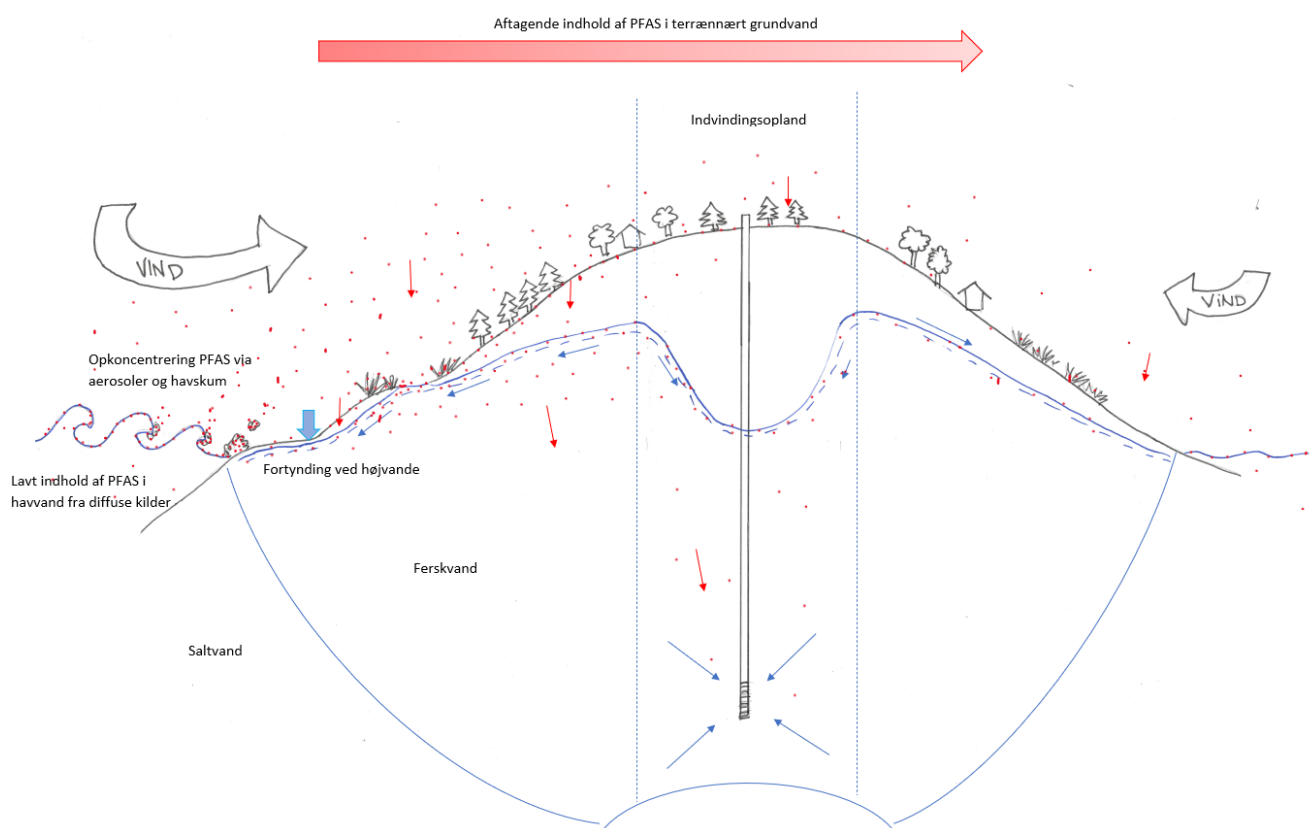
6 Vurdering af undersøgelsesresultater

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

Analyseresultaterne for PFAS i grundvand og overfladevand viser alle tydelig tendens med aftagende indhold fra vest mod øst, dvs. fra vestkysten (Vesterhavet/Nordsøen) og ind i landet. Med undtagelse af grundvandet fra boringen på stranden, B1, er den generelle tendens, at jo længere væk fra kysten prøven er taget, jo mindre er indholdet af PFAS. Dette understøttes af feltmålingerne, der 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 i høj grad er påvirket/fortyndet af havvand, med relativt lavt indhold af PFAS, hvilket forklarer det lavere PFAS indhold (relativt til B2, som er placeret 200 m fra kysten).

Derudover er der observeret de højeste PFAS-koncentrationer i jordprøver fra 0-0,1 m u.t., hvilket stemmer overens med, at PFAS er diffust deponeret over land og nedsiver fra terræn til dybere jordlag og grundvand. Det skal også bemærkes, at de laveste PFAS koncentrationer ses i B1, hvor prøverne er udtaget i strandsand med ringe sorptionsevne.

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 figur 6.1 fremgår en konceptuel model af denne spredning. Modellen er også vedlagt i bilag 5.



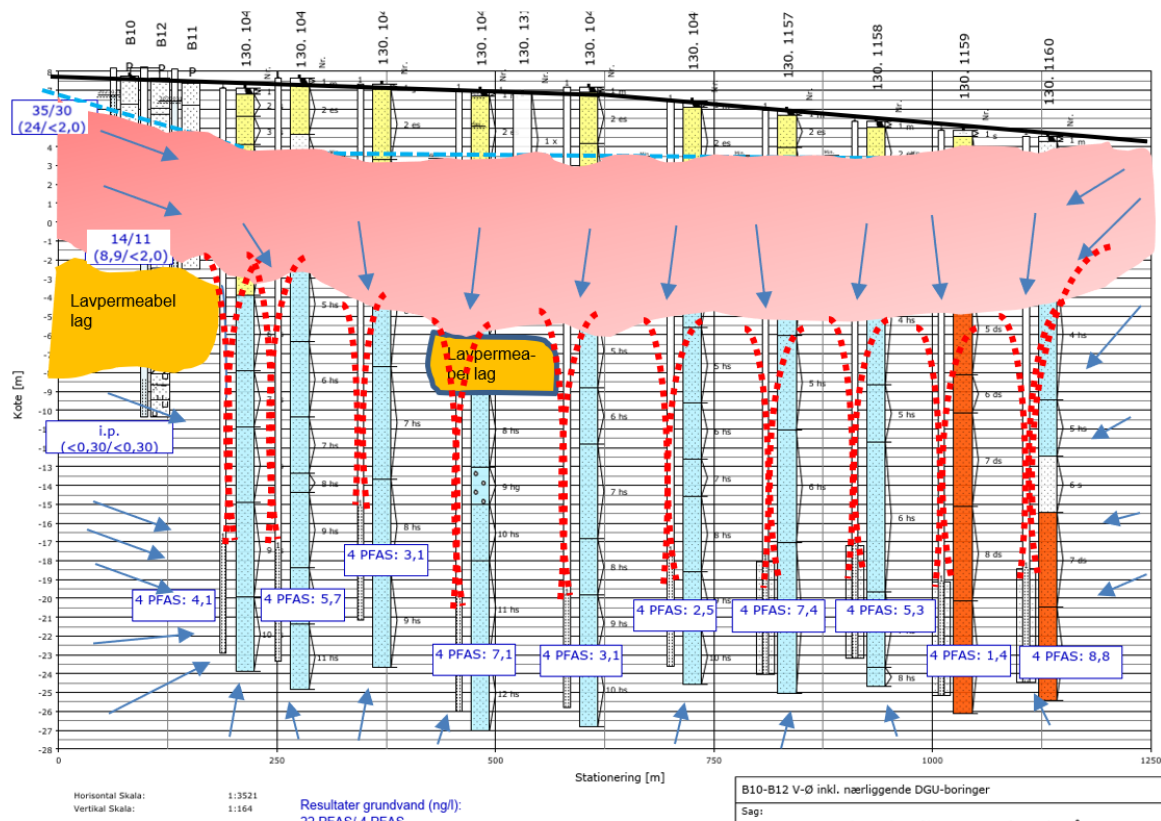
Figur 6.1: Konceptuel model. Røde prikker er PFAS fra havet der opkoncentreres i grænselaget mellem luft og vand og bæres via aerosoler ind over land, hvor PFAS deponeres. Samme mekanisme kan muligvis i mindre omfang ske fra østlig retning.

Samme mekanisme kan muligvis også forekomme fra øst mod vest, men er ikke undersøgt. Idet den fremherskende vindretning er SV-NØ, og fordi området mellem Esbjerg og Fanø er lavlandet med generelt mindre bølger (lavere bølgeenergi), vurderes denne spredningsvej at være af mindre betydning.

I forhold til overfladevand må det også antages, at der forekommer årstidsvariation, hvor de højeste PFAS koncentrationer forventes at forekomme om sommeren, hvor vandmængden i søer og vandløb svinder ind.

6.2 Vurdering af om PFAS fra havet kan være årsag til PFAS i Fanø Vands indvindingsboringer.

Ved kildepladsen til Fanø Vand (2 km fra havet) er der udført boringer (B10-B12) i tre niveauer ned til 18 m u.t. Boringer og påvist indhold af PFAS (sum 22, sum 4, PFOA og PFOS) fremgår af figur 6.2.

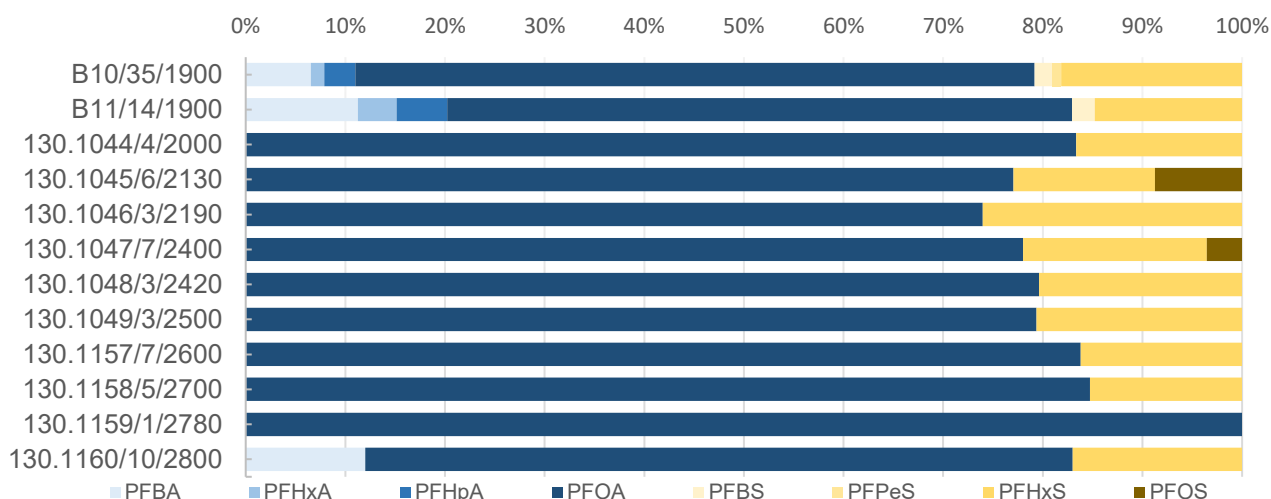


Figur 6.2: Konceptuel model af forureningsspredning af PFAS fra terræn til indvindingsboringer. Rød plamage er PFAS i grundvand og røde prikker er PFAS spredning til indvindingsboringer. Blå pile viser grundvandsstrømningsretninger. Gul farve på indvindingsboringerne angiver postglaciale flyvesand. Blå farve angiver postglaciale saltvandssand og -grus. Rød angiver glacial smeltevandssand.

Der ses af analysedata udtaget i forskellige dybder i boringerne en vertikal aftagende tendens af PFAS, hvilket peger på, at PFAS spredes fra terræn og ned i grundvandsmagasinet genereret ved pumpning under indvinding. Omkring kildepladsområdet er der begrænset dæklag over magasinerne S2 og S3, som der indvindes fra. PFAS fra havet, båret via aerosoler og deponeret på terræn, vurderes derfor med tiden at kunne nedrive gennem sandet (S1 og S2) til grundvandsmagasinet. Årsagen til, hvorfor der ikke er påvist PFAS i prøven fra 18 m u.t. (B12), er ikke klarlagt. En mulig årsag kunne være, at boring B12 er filteret under lerlag, og at grundvandet derfor kan være betydeligt ældre end overliggende grundvand knyttet til postglaciale aflejringer. Der ses lerlag i én af vandværkets boringer (130.1047), men ellers forekommer der ikke ler. Spredning af PFAS fra toppen af grundvandspejlet til indvindingsboringerne kan således ske via spredningsveje i lavpermeable aflejringer, som ikke er repræsenteret ved B12. Indhold af PFAS i indvindingsboringer er således muligvis en blanding af dybereliggende rent grundvand og PFAS forurenet grundvand, som trækkes ned til filteret via

spredningsveje, som styres af permeabilitet, samt at der skabes en sænkningstragt i forbindelse med indvindingen. Et bud på spredning af PFAS fra grundvandsspejlet til indvindingsboringerne er fremstillet i konceptuel model figur 6.2.

Fordelingen af PFAS i indvindingsboringerne fremgår af nedenstående figur 6.3 sammen med fordelinger påvist ved kildepladsen i nærværende undersøgelse.



Figur 6.3: Relativ fordeling mellem påviste PFAS forbindelser i grundvandsprøver nær Fanø Kildeplads. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 (ng/l)/ afstand til havet (m).

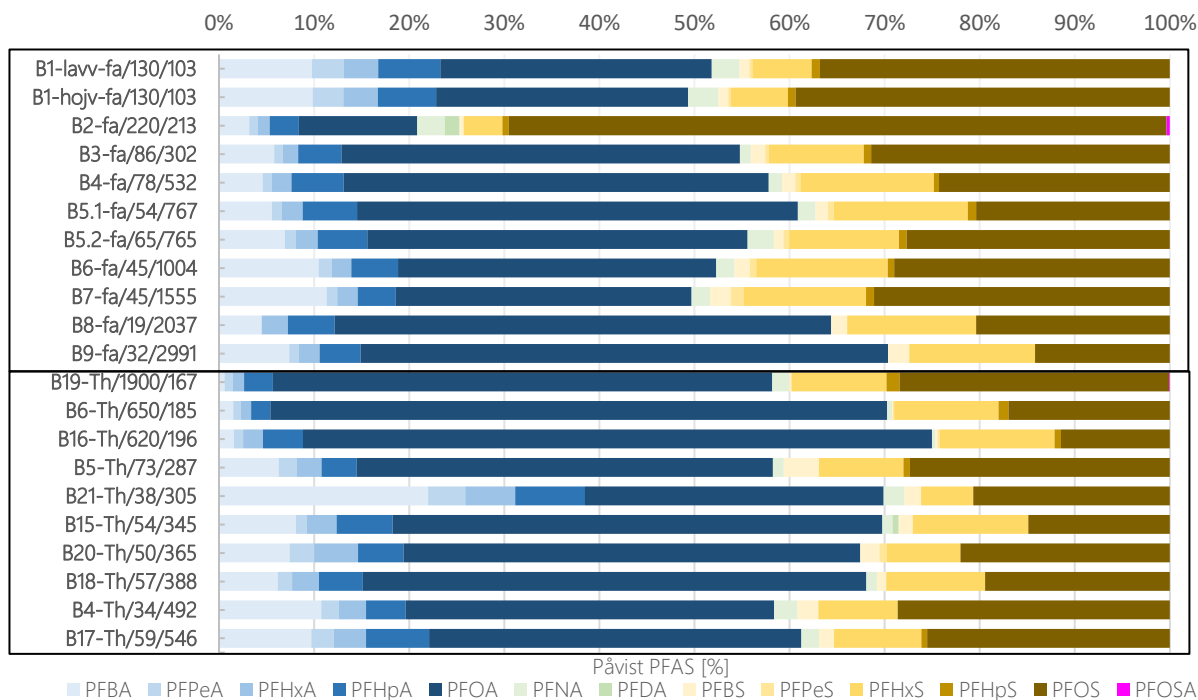
Der ses et sammenfald mellem indhold af PFOA og PFHxS i Fanø Vands indvindingsboringer og boringer ved kildepladsen, som er udført ved denne undersøgelse (dog med filtre placeret højere). Da der påvises de samme enkeltstoffer i indvindingsboringer og i terrænnære boringer, samt at der observeres aftagende indhold vertikalt i grundvandsmagasinet, vurderes det sandsynligt, at PFAS i Fanø Vands indvindingsboringer stammer fra infiltration af regnvand, som er forurenet med PFAS på grund af nedfald af aerosoler på jorden.

Der er i boringerne B10 og B11 ikke påvist indhold af PFOS, som der ellers er påvist i boringerne (B1-B9) i transektet syd for, hvilket ikke kan forklares.

6.3 Vurdering af om der forekommer PFAS-fingerprint, 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 PFOS og PFOA samt til dels også PFHxS og PFBA. I jordprøverne er der overvejende påvist PFOS og PFOA. 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.

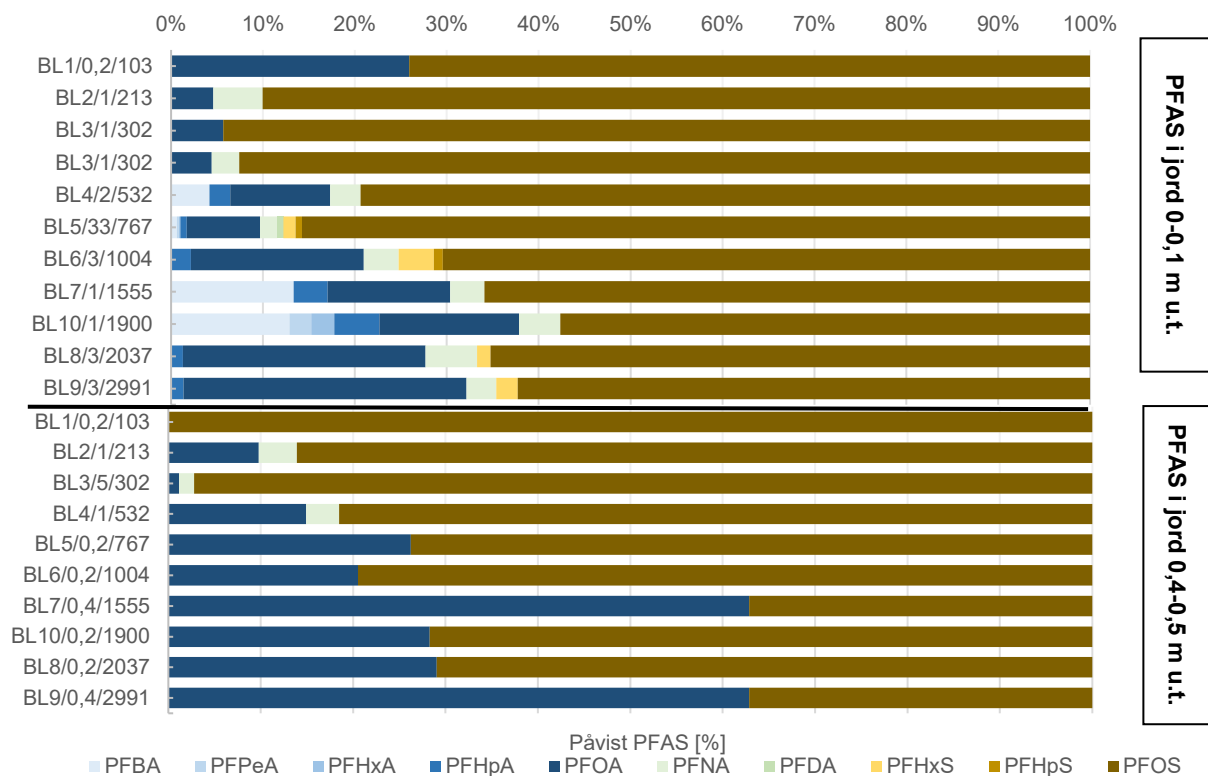
På nedenstående figur 6.4, er den relative fordeling af PFAS i grundvandsprøver fra Fanø sammenlignet med den relative fordeling af PFAS stoffer i grundvandsprøver fra undersøgelser ved den kystnære by Thyborøn /1/, og de to diagrammer ser overvejende ens ud, idet begge undersøgelser har dominans af enkeltstofferne PFOA og PFOS samt PFHxS og PFBA. 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 Sum 22 (formentlig < 100 ng/l) kan diagrammet blive misvisende, da nogle forbindelser vil være under detektionsgrænsen og ikke fremgå i fordelingsplottet.



Figur 6.4: PFAS fingerprint for grundvandsprøver fra Fanø (øverste boks) og grundvandsprøver fra Thyborøn (nederste boks). Boringerne har dog ikke helt sammenlignelig filtersætning. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 PFAS (ng/l)/ afstand til kyst (m).

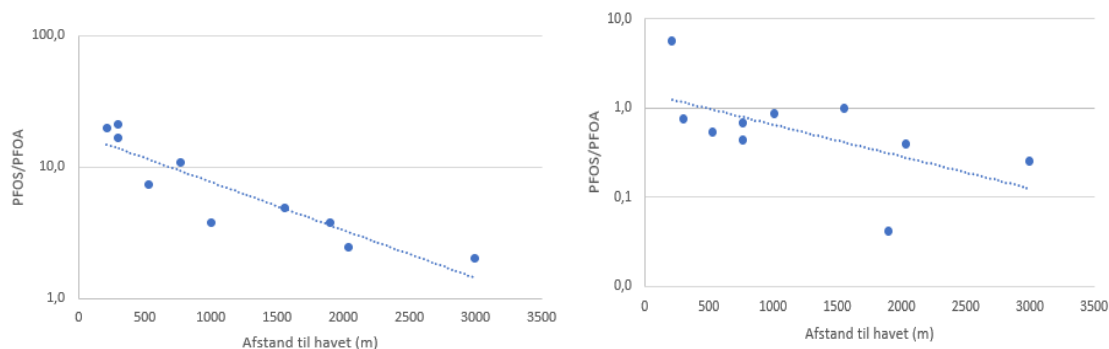
I B2, som er den første boring i transektet, der ikke vurderes påvirket af havvand i ligeså høj grad som B1, ses der en stor andel af PFOS, hvor der i de efterfølgende boringer påvises mindre andele PFOS og større andele PFOA. I boringer udført ved Fanø Vands kildeplads (B10 filtersat 1-3 m u.t. og B11, som dog er filtersat 8-10 m u.t.), udført ca. 2 km fra havet, ses der dog ingen PFOS i vandprøverne, hvilket ellers ville være forventet sammenlignet med B7-B9, som er udført i nogenlunde samme afstand.

Den samme tendens med faldende PFOS koncentrationer relativt til PFOA ses også for jordprøverne, og på figur 6.5 er den relative fordeling mellem de påviste PFAS forbindelser hhv. 0-0,1 m u.t. og 0,4-0,5 m u.t. illustreret. Figuren er desuden vedlagt i bilag 10. På y-aksen i figuren fremgår prøve ID/ sum 22 ($\mu\text{g}/\text{kg TS}$)/ afstand til havet (m). Ved lave indhold af Sum 22 (formentlig $< 10\text{-}100 \mu\text{g}/\text{kg TS}$) kan diagrammet blive misvisende, da nogle forbindelser vil være under detektionsgrænsen og ikke fremgå i fordelingsplottet.



Figur 6.5: Relativ fordeling mellem påviste PFAS forbindelser i jordprøver udtaget 0,1 m u.t. og 0,4 m u.t. På y-aksen fremgår prøve ID/ sum 22 ($\mu\text{g}/\text{kg}$ TS)/ afstand til havet (m)

Faldende PFOS koncentrationer relativt til PFOA er yderligere illustreret på figur 6.6



Figur 6.6: Forholdet mellem PFOS og PFOA i jordprøver fra 0-0,1 m u.t. (tv). og i grundvandsprøver (th).

Sammenfattende for denne kystnære undersøgelse er, at der i vandprøver overvejende påvises enkeltstofferne PFOS og PFOA samt til dels også PFHxS og PFBA. I jordprøverne påvises der overvejende PFOS og PFOA. Desuden ses der en tendens til, at forholdet mellem PFOS og PFOA falder med afstanden til kysten, hvilket også er set i andre undersøgelser /1, 13 og 16/.

7 Konklusion

På baggrund af data vurderes det, at der er en udbredt diffus forurening på Fanø, hvor PFAS fra Vesterhavet (Nordsøen) er blevet spredt ind over land med aerosoler dannet ved bølgeprocesser og har forårsaget målbar påvirkning af jord og forurening af overfladevand og grundvand. Det vurderes, at lignende forhold kan findes langs kystarealer – i særlig grad langs vestvendte kyster på Vestkysten med meget vindpåvirkning og høj bølgeintensitet.

PFAS-fingerprint for Fanø Vands indvindingsboringer er sammenlignelige med PFAS-fingerprint fra boringer udført nær kildepladsen i nærværende undersøgelse, hvor der overvejende ses forbindelserne PFOA og PFHxS samt til dels PFBA og PFOS. Det vurderes derfor sandsynligt, at PFAS påvist i indvindingsboringer, og ved undersøgelsen ved den tidligere udplantningsplanteskole, kan stamme fra infiltration af regnvand, som er forurenede med PFAS på grund af nedfald af aerosoler på jorden. Det kan derfor blive en udfordring at finde en kildeplads på Fanø, hvor grundvandet ikke er påvirket af PFAS.

Generelt vurderes det, at der kan være risiko for påvirkning af kystnære boringer/kildepladser til vandværker, hvor det grundvandsdannende opland ligger kystnært. Der vurderes desuden at være risiko for enkeltindvindere i kystnære områder, da deres boringer/brønde ofte er korte og uden væsentlig beskyttelse, og ligeledes vurderes der risiko ved anvendelse af kystnære boringer til vanding af dyrehold (skal holdes op mod Fødevarerstyrelsens indikatorværdier).

PFAS-forurenede overfladevand vurderes at kunne udgøre en risiko overfor dyreliv, som overvejende opholder sig i kystnære områder, og som kan drikke af vandhullerne i de kystnære områder.

Endeligt vurderes der at være risiko ved grundvands sænkning og afledning af grundvand til enten overfladevand eller kloak i forbindelse med byggeri og anlægsprojekter i kystnære områder, hvor der kan forekomme høje indhold af PFAS i det terrænnære grundvand.

Der er udarbejdet diagrammer med fingerprint for fordeling af de PFAS forbindelser, der er påvist ved denne undersøgelse. Diagrammerne kan på sigt indgå som værktøj, sammen med diagrammer fra andre undersøgelser og diagrammer for enkeltstoffer i aerosoler, til at skelne mellem diffus forurening fra havet og andre punktkilder.

7.1 Sammenfatning

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 op til 220 ng Sum 22 i boringerne mod vest og ned til 19 ng/l i boringer mod øst.
- Der ses en vertikal aftagende tendens i boringer udført i flere dybder nær Fanø Vands kildeplads med 35 ng Sum 22/l i filter fra 1-3 m u.t., 14 ng/l i filter placeret 8-10 m u.t. og ikke påvist i filter placeret 16-18 m u.t., som kan skyldes et lavpermeabelt lag over filtret.
- Der er påvist indhold af Sum 4, der overskrider grundvandskvalitetskriteriet i alle boringer på nær B12, med filter placeret 16-18 m u.t.
- Der ses overvejende forbindelserne PFOS og PFOA.

Opsummering overfladevand

- Der er i samtlige vandprøver fra overfladevand (søer og vandhuller) påvist indhold af PFAS. PFAS-koncentrationerne er aftagende fra vest mod øst. Der er påvist op til 260 ng/l i overfladevand længst mod vest og ned til 17 ng/l i overfladevand længst mod øst.
- Der ses overvejende forbindelserne PFOS og PFOA.
- Miljøkvalitetskravet for PFOS i overfladevand er overskredet i alle analyserede vandprøver (op til en faktor ca. 260)
- Der er god sammenhæng mellem PFAS i overfladevand og resultaterne fra boringerne i transektet, som overvejende er filtersat i 1-3 m u.t. Prøvetagning af overfladevand (søer og vandhuller) kan således være en billig metode til at screene, om der er påvirkning af diffus forurening fra havet i

kystnære områder med høj grundvandsstand og sandet geologi mellem jordoverfladen og grundvandspejlet.

Opsummering jord

- Der er påvist indhold af Sum 22 i alle analyserede jordprøver med indhold fra 0,15 µg/kg TS og op til 33 µg/kg TS.
- De højeste PFAS koncentrationer ses terrænnært.
- Der ses ingen tydelig sammenhæng mellem PFAS-koncentrationer og afstand til havet, ligesom der ikke kan ses nogle tendenser ift. PFAS og tørstof, organisk indhold, Na og Mg.
- I et enkelt punkt er jordkvalitetskriteriet for Sum 4 overskredet.
- Der ses en tendens til, at forholdet mellem PFOS og PFOA falder med afstanden til kysten.
- Prøver af strandsand viser lave indhold af PFAS forbindelser, hvilket også er erfaring fra undersøgelse udført for Lemvig Kommune /1/.

Regioner kan bruge erfaringerne til:

- Ved kystnære forureningsundersøgelser af punktkilder skal der 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.
- Erfaringsmæssigt /1/ kan koncentrationerne i grundvand, overfladevand og jord forekomme i højere niveauer end påvist på Fanø ved nærværende undersøgelse. Det vurderes, at vindpåvirkning og bølgeintensitet muligvis kan have indvirkning på omfanget af spredning af PFAS fra havvand til kystnære områder. Dertil kommer, at aflejringernes sorptionsevne, permeabilitet, kornstørrelsesfordeling, vandindhold (grænsefladen mellem vand og luft), organisk indhold, jordbundsudvikling, nedbrydning m.m. har indflydelse på koncentration og fordeling af PFAS.

8 Referencer

- /1/ Lemvig Kommune, PFAS undersøgelse ved Vestkysten, 15. juni 2022.
- /2/ Fanø Vand, Ttem kortlægning Fanø, Datarapport, maj 2022
- /3/ Esbjerg Kommune, Indsatsplan for grundvandsbeskyttelse, Fanø Vandværk, september 2018
- /4/ GEUS, Jupiter
- /5/ Region Syddanmark, Planteskole – Postevejen 40 6720 Fanø, Indledende Forureningsundersøgelse – Teknisk rapport, September 2022
- /6/ <http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis-raastofferhavet>, besøgt d. 8. maj 2023.
- /7/ Sydvestjysk Brandvæsen, Risikobaseret dimensionering, februar 2019
- /8/ Sydvestjysk Brandvæsen, Risikobaseret dimensionering, februar 2022
- /9/ Inland transport of marine aerosols in southern Sweden, Atmospheric Environment, 2020
- /10/ Frie Data, DMI, <https://www.dmi.dk/kontakt/frie-data/>. Hentet januar 2023.
- /11/ Oplyst af Esbjerg Kommune Teknik og Miljø, telefonsamtale januar 2023
- /12/ <http://www.mitfanoe.dk/index.php/da/fanos-historie/handel-handvaerk-og-industri-pa-fano/handel/117-handel-og-erhverv-omkring-1960/454-set-og-sket-omkring-1960>, tilgået d. 9. august 2023.
- /13/ Bepaling achtergrondconcentratieniveau PFAS in Noord-Holland. Rapport, Sweco Nederland B.V. 13-11-2019
- /14/ Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS-forbindelser (PFAS-håndbogen). Teknik og Administration Nr. 1 2022. Regionernes Videncenter for Miljø og Ressourcer, 2022. https://www.miljoegressourcer.dk/media/lix/5319/PFAS-h_ndbogen_08122022.pdf.
- /15/ Telefonsamtale og emailkorrespondence med Sydvestjysk Brandvæsen d. 4. og 26. september 2023
- /16/ Onderzoek naar PFAS in het grondwater in de kuststrook van Nord-Holland. Rapport, Sweco Nederland B.V. 05-10-2021.
- /17/ <https://www.ru.rm.dk/klima-og-miljo/jordforurening/pfas-pa-harboore-tange/>, tilgået d. 26. september 2023.

Miljø og Råstoffer
Damhaven 12, 7100 Vejle
Tlf. 76631000

www.rsyd.dk