



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# Påvirkning af grundvandet fra spildevandsslam

Miljøprojekt nr. 2280

Oktober 2024



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Katerina Tsitonaki, WSP Danmark  
Karen Andreasen, WSP Danmark  
Eline Begtrup Weeth, WSP Danmark  
Jakob Magid, Københavns Universitet  
Anne Esbjørn, VandCenter Syd  
Helle Ugilt Sørensen, HOFOR  
Martin Hansen, Aarhus Universitet  
Liselotte Clausen, HOFOR

Fotos:

WSP Danmark

ISBN: 978-87-7038-668-5

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

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>Sammenfatning</b>	<b>5</b>
<b>1. Indledning og formål</b>	<b>8</b>
<b>2. Erfaringer fra tidligere undersøgelser af CRUCIAL forsøgsmarker i 2023</b>	<b>11</b>
2.1 Forurening med PFAS i miljøet	11
2.2 Erfaringer fra tidligere undersøgelser af CRUCIAL forsøgsmarker i 2022	12
<b>3. Projektaktiviteter</b>	<b>16</b>
3.1 Kortlægning af kommunal praksis	16
3.2 Udvælgelse af undersøgelseslokaliteter	16
3.3 Feltundersøgelser	18
3.3.1 Drænprøve fra mark ved Kornerup	18
3.3.2 Installation af sugeceller ved Vejrup	18
3.3.3 Supplerende grundvandsprøvetagning ved CRUCIAL	20
3.4 Analyseprogram	20
<b>4. Praksis vedr. spildevandsslam</b>	<b>22</b>
4.1 Lovgivning	22
4.2 Kommunernes praksis	23
<b>5. Resultater fra feltundersøgelser</b>	<b>27</b>
5.1 Analyseresultater for PFAS i vandprøver	27
5.2 Analyseresultater for andre stoffer ved akkrediterede analyser	28
5.3 Suspect screening resultater	29
<b>6. Diskussion</b>	<b>33</b>
6.1 Forventede indhold af PFAS i spildevandsslam	33
6.2 Andre miljøfremmede stoffer i spildevandsslam	35
6.3 Andre kilder til medicinrester i grundvandet	38
<b>7. Konklusion og anbefalinger</b>	<b>39</b>
<b>8. Referencer</b>	<b>41</b>
<b>9. Bilag</b>	<b>44</b>

# Forord

Denne rapport udgør en samlet teknisk opsamling og dokumentation for TUP-projektet: "Påvirkning af grundvandet fra spildevandsslam". Projektet er et samarbejde mellem WSP, VandCenter Syd og HOFOR.

Projektet er udført i perioden fra juli 2022 til juli 2024, og er udført med støtte fra Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening 2022.

Projektgruppen har bestået af:

- Katerina Tsitonaki, Karen Andreasen og Eline Begtrup Weeth, WSP Danmark
- Jakob Magid, Københavns Universitet
- Martin Hansen, Aarhus Universitet
- Anne Esbjørn, VandCenter Syd
- Liselotte Clausen og Helle Ugilt Sø, HOFOR

Projektet har haft en følgegruppe, som har bestået af:

- Rikke Rud Christiansen, May Ling Choong Knudsen og Sanne Ravnholt Poulsen, MST
- Dorte Skræm og Anders Hansen, DANVA
- Julie Lykke Jacobsen, Genanvend Biomasse

# Sammenfatning

## Baggrund for igangsættelse af projektet

Genanvendelse af spildevandsslam til jordbrugsformål er en vigtig del af den generelle affaldsstrategi og giver god samfundsøkonomi. Det estimeres, at ca. 76% af det producerede spildevandsslam genanvendes som gødning på marker, mens 15% genanvendes via direkte kompostering (Miljøstyrelsen, Affaldsstatistik 2021) og bidrager dermed til recirkulering af næringsstoffer. Udover næringsstoffer kan spildevandsslam potentielt indeholde en række miljøfremmede stoffer, som kan udgøre en risiko for grundvandsressourcen. Da landbrugsarealer ofte er sammenfaldende med vandindvindingsområder, er der behov for særlig agtpågivenhed i relation til mulige risici overfor grundvandskvaliteten ved udsprengning af spildevandsslam. Der er imidlertid i Danmark ikke klare retningslinjer for, på hvilke arealer man accepterer udbringning af spildevandsslam, og kommunernes praksis for dette er vidt forskellig.

De fleste studier vedr. miljørisici fra spildevandsslam fokuserer på risikoen gennem fødeindtagelse eller risiko for jordorganismer. De eksisterende grænseværdier for slamudbringning af udvalgte miljøfremmede stoffer (LAS, NPE, PAH'er, DEHP og PCB'er) og metaller er således baseret på vurdering af risikoen for jord, jordmiljøet eller mennesker gennem fødevarer/eller direkte jordindtagelse. Risikoen for grundvandet er således underbelyst. Et studie fra 2012 omfattede en kortlægning og vurdering af hvilke miljøfremmede stoffer, der kan udgøre en grundvandsrisiko i forbindelse med udbringning af spildevandsslam på landbrugsjord. Ved denne indledende screening blev der identificeret 360 kemiske stoffer i spildevandsslam. De stofgrupper, som dengang blev vurderet mest kritiske i forhold til grundvandet var bl.a. medicin, pesticider og PFAS.

Bekymringen for udvaskning af PFAS fra spildevandsslam til grundvandet er blevet forstærket af, at vi i Danmark i 2021 fik en skærpet kravværdi til PFAS i drikkevand. Samme år fastsatte Miljøstyrelsen for første gang en vejledende grænseværdi for indhold af PFAS i spildevandsslam til jordbrugsformål (hhv. 400 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4). Aarhus Universitet har i 2023 udført en undersøgelse af, hvordan PFAS fra slam kan udgøre en risiko for mennesker og miljøet, der danner det faglige grundlag for at fastlægge grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til jordbrugsformål. På baggrund af undersøgelsen har Aarhus Universitet anbefalet slamgrænseværdier på 50-100 µg/kg TS for PFAS22 og 15 µg/kg TS for PFAS4. Aftaleparterne i PFAS handlingsplanen udgivet i maj 2024 er enige om, at fastsætte bindende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til jordbrugsformål på 50 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4. For PFAS 22 er der således tale om en stramning, der følger det forarbejde, som Aarhus Universitet udarbejdede i 2023.

## Formål

Formålet med dette projekt er at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med miljøfremmede stoffer. Oprindeligt har der været særlig fokus på risikoen for udvaskning af PFAS, men projektet har også omfattet andre miljøfremmede stoffer. Dette er undersøgt ved at udføre feltundersøgelser på to lokaliteter, der har fået tilført lovæssige korrekte mængder af spildevandsslam, samt ved supplerende analyser i en forsøgsmark (CRUCIAL), der har modtaget meget store mængde slam.

## Projektaktiviteter

Projektet har omfattet interviews til belysning af praksis for udbringning af spildevandsslam i Danmark, undersøgelser af porevandet på en feltlokalitet ved hjælp af sugeceller og efterfølgende laboratorieanalyser ved "traditionelle" og mere avancerede suspekt screening og non-targetet analysemetoder. Derudover er der udtaget stikprøver og supplerende analyser i arkivprøver fra forsøgsmarken CRUCIAL, samt en drænprøve fra anden lokalitet.

### **Forskellige praksis i kommunerne vedr. udbringning af spildevandsslam**

Der er udført en spørgerunde hos en række kommuner i Danmark for at få et overblik over, hvordan anmeldelser af udbringning af spildevandsslam bliver håndteret i kommunerne. Der er valgt kommuner indenfor VandCenter Syd og HOFORs indvindingsoplande, samt enkelte andre kommuner for at dække hele Danmarks geografi. Der er udført interview med fire kommuner i Jylland, tre på Fyn og otte kommuner på Sjælland. Herudover er der udført interview med to af de store formidlere af spildevandsslam i Danmark, HedeDanmark og Miljøservice. Der er store forskelle mellem de interne procedurer for, på hvilke arealer man accepterer udbringning af spildevandsslam i kommunerne. Forskellene er til frustration for både kommuner, virksomheder der formidler udbringning af spildevandsslam og ikke mindst landmændene. BNBO'er er de arealer de fleste kommuner nævner, hvor der enten ikke accepteres udbringning af spildevandsslam, eller hvor anmeldelserne som minimum vil blive gransket nærmere. Her nævner 3 ud af 15 kommuner, at en anmeldelse indenfor BNBO vil blive særligt vurderet, og ofte vil ende med et afslag, mens 6 ud af de 15 kommuner fortæller, at en anmeldelse indenfor BNBO vil give et direkte afslag. Kun 5 af kommunerne har interne retningslinjer omkring håndtering af anmeldelserne og inddragelse af grundvand/drikkevandsafdelingen.

### **Kun mindre fund af PFAS i grundvand under slambehandlede marker**

Det er ved dette studie, og ved tidligere studier (Draborg og Tsitonaki 2022; Jensen et al., 2023) vist, at niveauerne af PFAS22 i grundvand under marker behandlet med spildevandsslam er forholdsvis lave.

Dette vurderes at have flere årsager:

- Sammensætning af spildevandsslam, historisk og i dag, indeholder flest af de langkædede PFAS, som overordnet set må anses for at være meget lidt mobile. Dette kan forklare hvorfor der, trods PFAS i jordprøver fra de øverste meter, kun findes lave koncentrationer i det underliggende grundvand.
- Sammensætning af PFAS i spildevandsslam er domineret af stoffer såsom diPAP og FTSA (Kärrman et al., 2019), der ikke er inkluderet i PFAS22 pakken. Disse stoffer kan på sigt omdannes til nogle af PFAS22 stofferne. Det vurderes, at denne omdannelse sker tilpas langsom, eller i en grad som ikke har givet anledning til høje koncentrationer af PFAS22, selv i testmarker, hvor der er udbragt ekstrem store mængder spildevandsslam i over 20 år (Draborg og Tsitonaki, 2022).

### **Bekymrende fund af medicinrestoffer og industrikemikalier i slam og i grundvand under slambehandlede marker**

Udover PFAS-analyser er der i dette projekt udført suspect screening analyser af grundvandsprøver fra de slambehandlede marker. Der blev påvist mange miljøfremmede stoffer i prøverne, herunder lægemidler som tramadol og venlafaxine. Der er desuden påvist indhold af flere pesticider, som vurderes at stamme fra den regelrette landbrugsanvendelse, samt indhold af flere industrikemikalier, som må antages at stamme fra spildevandsslam. Resultaterne er sammenstillet med resultater fra andre projekter, som har udført suspect screening analyser af prøver af spildevandsslam fra danske anlæg, GRUMO-boringer og drikkevandet (afgangsvand fra vandværk). Der ses flere gengangere mellem de stoffer, der påvises i de fire datasæt, hvilket tyder på, at spildevandsslam er en sandsynlig kilde til en række medicinrestoffer i grundvandet. Der påvises desuden enkelte industrikemikalier, som også kan stamme fra spildevandsslammet. Et enkelt stof (1,3'-diphenylguanidine) er påvist i spildevandsslam, det terrænære grundvand under slambehandlede marker, i GRUMO-boringer og i drikkevandet. Det viser, hvordan stoffer kan transportere sig fra spildevandsslammet igennem jorden til vandhøjen. Niveauerne er ikke kvantificeret i dette studie, men fundene viser, at der er behov for flere studier som skal undersøge omfang af påvirkning af grundvandet med bl.a. humane lægemidler som findes i spildevandsslam.

## **Anbefalinger**

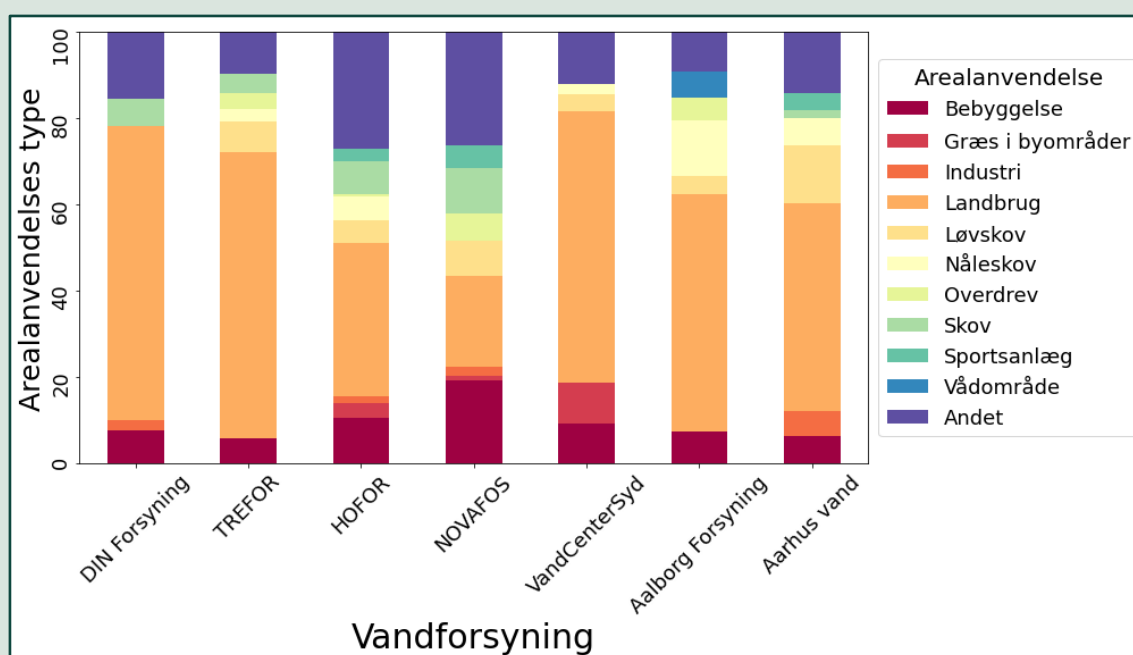
Det anbefales derfor:

- at det overvejes om analysepakken for miljøfremmede stoffer i spildevandsslam, der udbringes på landbrugsjord, udvides til også at omfatte relevante medicin stoffer og industrikemikalier. Nærværende studie er kun et første trin i den retning, og der er behov for, at der igangsættes flere studier for at identificere, hvilke stoffer der er relevante at monitorere for.
- at der udføres en risikovurdering af relevante medicin stoffer og industrikemikalier for at afgøre, om der forsat skal udbringes spildevandsslam på sårbare grundvandsdannende oplande. En lignende vurdering er nødvendig for andre typer gødning såsom husdyrgødning.
- at der arbejdes videre med at kvantificere niveauerne af miljøfremmede stoffer under de slambehandlede marker og med sammenligningsstudier, hvor der også udføres målinger i referencemarket, som ikke har modtaget spildevandsslam.
- at kommuner opfordres til brug af et GIS baseret registreringssystem, så der kan skabes et bedre og nemmere overblik over udbringningerne.

# 1. Indledning og formål

Genanvendelse af spildevandsslam til jordbrugsformål er en vigtig del af den generelle affaldsstrategi og giver god samfundsøkonomi. Det estimeres, at ca. 65% af det producerede spildevandsslam genanvendes som gødning på marker (Miljøstyrelsen 2021). Især recirkulering af fosfor er vigtig, da fosfor i dag anses for at være en begrænset ressource. Udover næringsstoffer kan spildevandsslam potentielt indeholde en række miljøfremmede stoffer, som potentielt kan udgøre en risiko for grundvandsressourcen (Tsitonaki, 2012).

Landbruget forvalter omkring 2/3 af Danmarks samlede areal, og potentialet for recirkulation af næringsstoffer fra bl.a. spildevandsslam er derfor stort. Da landbrugsarealer ofte er sammenfaldende med vandindvindingsområder jf. FIGUR 1, er der behov for særlig agtpågivenhed i relation til mulige risici overfor grundvandskvaliteten ved udspredning af spildevandsslam. Der er imidlertid i Danmark ikke klare retningslinjer for, på hvilke arealer man accepterer udbringning af spildevandsslam, og kommunernes praksis for dette er vidt forskellig.



**FIGUR 1.** Normaliseret procent af arealanvendelse for 7 vandforsyninger. Typer af arealanvendelse der udgør mindre en 7.5% af den totale arealanvendelse for hver forsyning aggregeres til kategorien "Andet" (Udarbejdet af DTU v. Bjerg et al., 2024 for InSa-Drikkevand).

De fleste studier vedr. miljørisici fra spildevandsslam fokuserer på risikoen gennem fødeindtagelse eller risiko for jordorganismer (Miljøstyrelsen 2012; Pedersen et al. 2019; Magid et al., 2020). De eksisterende grænseværdier for slamudbringning af udvalgte miljøfremmede stoffer (LAS, NPE, PAH'er, DEHP og PCB'er) og metaller er således baseret på vurdering af risikoen for jord, jordmiljøet eller mennesker gennem fødevarer/eller direkte jordindtagelse. Risikoen for grundvandet er således underbelyst. Miljøstyrelsen fastsatte i 2021 en vejledende grænseværdi på hhv. 400 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4. Inden de vejledende grænseværdier blev indført i 2021, har der ikke været krav til indhold af PFAS i spildevandsslam.



I 2012 udarbejdede Orbicon (nu WSP) et skrivebordsstudie, som omfattede en kortlægning og vurdering af hvilke miljøfremmede stoffer, der kan udgøre en grundvandsrisiko i forbindelse med udbringning af spildevandsslam på landbrugsjord (Tsitonaki, 2012). Ved denne indledende screening blev der identificeret 360 kemiske stoffer i spildevandsslam jf. FIGUR 2. Listen er udarbejdet i 2012 og baseret på 10 referencer, der samlet omtaler mere end 100 studier om spildevandsslam fra 15 forskellige lande. De stofgrupper, som er vurderet mest kritiske i forhold til grundvandet er bl.a. medicinoffer, pesticider og PFAS.

Stofgruppe	Antal fund	Antal stoffer	Antal Studier	Antal undersøgelser*	Koncentration		
					Range	Median	Enhed
<b>Medicinoffer</b>							
<i>Almen medicin</i>	17	17	2	2	39,3	1,19	
<i>Antibiotika</i>	58	40	5	18	nd-97500	118	µg/kg
<i>Neuromedicin</i>	5	5	1	1	nd-2,3	0,72	mg/kg
<i>Hormonoffer</i>	17	12	3	9	nd-217	12,9	mg/kg
<i>Pesticider</i>	51	51	2	23	nd-70	0,387	mg/kg
<b>PCB'er</b>	31	12	4	24	nd-1960	0,8	mg/kg
<b>Dioxiner/furaner</b>	22	10	7	16	nd-59,3	0,00104	mg/kg
<b>Parfumestoffer</b>	20	20	2	12	99,6	3,5	mg/kg
<b>Phthalater</b>	30	8	7	40	58300	70	mg/kg
<b>Sæbestoffer (LAS, NPE osv.)</b>	25	6	2	3	560000	1100	mg/kg
<b>Monocykliske forbindelser</b>							
<i>Chlorbenzener</i>	31	24	5	17	nd-5850	23,7	mg/kg
<i>Chlorbenzener</i>	7	11	2	15	nd-1650	515	mg/kg
<i>Phenoler</i>	13	11	4	15	nd-8490	361	ng/kg
<i>Chlorphenoler</i>	2	2	2	2	nd-324	162	mg/kg
<b>PAH'er</b>	96	32	8	46	nd-15300	9,4	mg/kg
<b>Alifatiske forbindelser (inkl. Chloraliphater)</b>	45	38	5	24	nd-7600	60,75	mg/kg
<b>Øvrige stoffer</b>							
<i>Nitrosaminer</i>	24	24	1	2	nd-19,7	0,0092	mg/kg
<i>Organotin</i>	7	7	3	10	nd-237	0,35	mg/kg
<i>Polybrommerede flammehæmmere</i>	17	7	1	1	nd-3322	0,8	mg/kg
<i>PFOS relaterede stoffer</i>	3	3	3	2	nd-2154	2046	ng/kg
<i>Fluorescerende Blegemidler (Fluorescent whitening agents)</i>	3	3	1	1	5-112	50	mg/kg
<i>Polymerstoffer</i>	2	2	8	16	5155	5155	mg/kg
<i>Triaryl/alkyl phosphate</i>	7	7	1	1	2420	12	mg/kg
<b>SUM</b>	<b>541</b>	<b>360</b>					

**FIGUR 2.** Oversigt over miljøfremmede stoffer fundet i spildevandsslam. Listen er udarbejdet i 2012 og baseret på 10 referencer, der samlet omtaler mere end 100 studier om spildevandsslam fra 15 forskellige lande (Tsitonaki, 2012).

Bekymringen for udvaskning af PFAS fra spildevandsslam til grundvandet er blevet forstærket af, at vi i Danmark i 2021 har fået en skærpet kravværdi til PFAS i drikkevand, da kravværdien er nedsat fra 100 ng/l for Sum af 12-PFAS<sup>1</sup> til 2 ng/l for sum af 4 PFAS (sum af PFOA, PFOS,

<sup>1</sup> PFBS (perfluorbutansulfonsyre), PFHxS (perfluorhexansulfonsyre), PFOS (perfluoroctansulfonsyre), PFOSA (perfluoroctansulfonamid), 6:2 FTS (6:2 flu- orotelomersulfonsyre), PFBA (perfluorbutansyre),

PFNA og PFHxS) (BEK nr. 2361 af 26/11/2021). Aarhus Universitet har i 2023 udført en undersøgelse af, hvordan PFAS fra slam kan udgøre en risiko for mennesker og miljøet, der dannede det faglige grundlag for at fastlægge grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til jordbrugsformål. På baggrund af undersøgelsen har Aarhus Universitet anbefalet slamgrænseværdier på 50-100 µg/kg TS for PFAS22 og 15 µg/kg TS for PFAS4 (Jensen et al, 2023, Miljøprojekt 2232). Aftaleparterne i PFAS-handlingsplanen udgivet i maj 2024 er enige om at fastsætte bindende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til jordbrugsformål på 50 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4. For PFAS 22 er der således tale om en stramning, der følger det forarbejde, som Aarhus Universitet udarbejdede i 2023.

### **Formål**

Formålet med dette projekt er at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med miljøfremmede stoffer. Oprindeligt har der været særlig fokus på risikoen for udvaskning af PFAS, men projektet har også omfattet andre miljøfremmede stoffer. Dette er undersøgt ved at udføre feltundersøgelser på to lokaliteter, der har fået tilført lovmæssige korrekte mængder af spildevandsslam, samt ved supplerende analyser i en forsøgsmark (CRUCIAL), der har modtaget meget store mængder slam.

---

PFPeA (perfluoropentansyre), PFHxA (perfluorhexansyre), PFHpA (perfluorheptansyre), PFOA (perfluoroc-tansyre), PFNA (perfluoronansyre) og PFDA (perfluordecansyre))

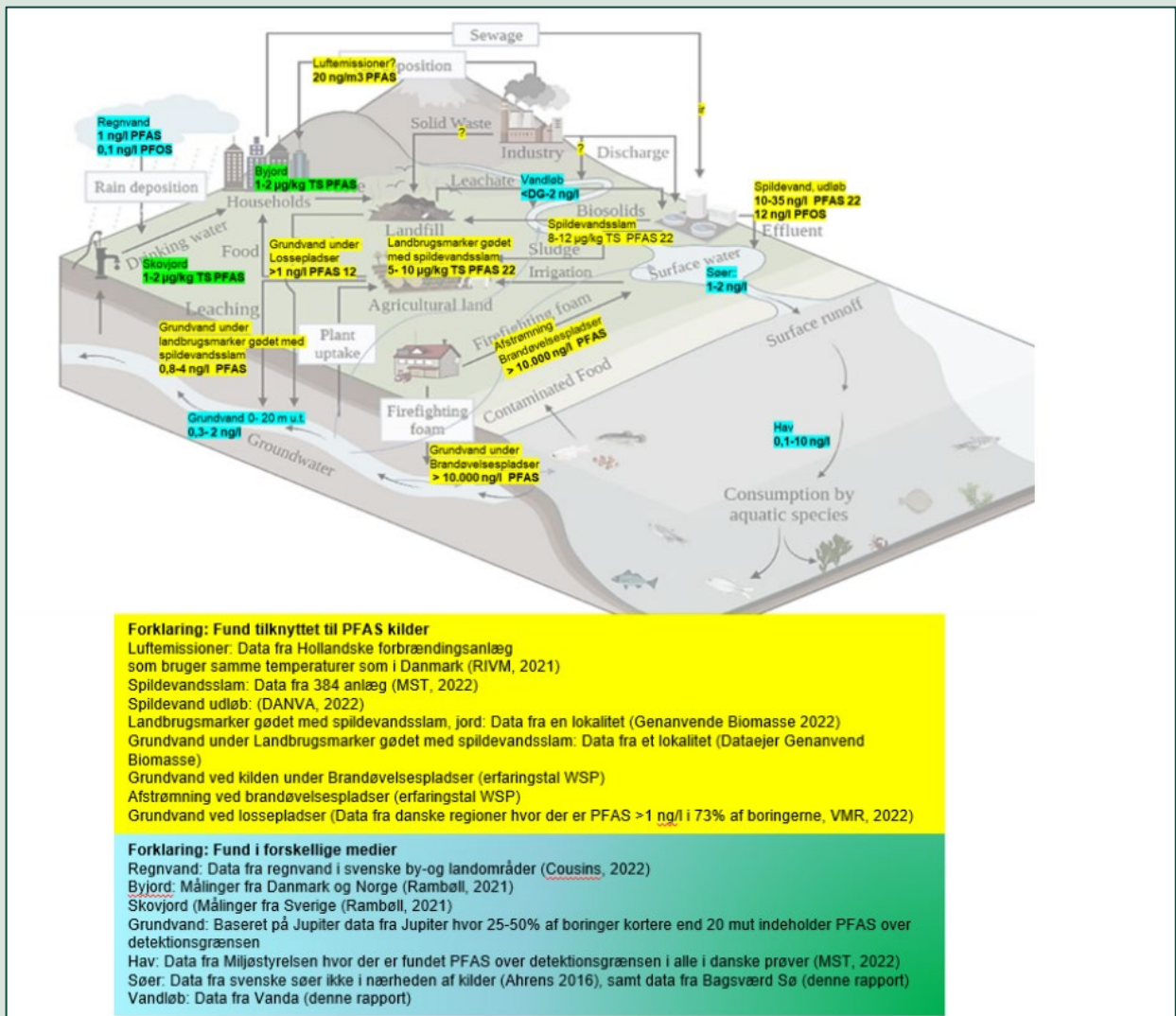
## 2. Erfaringer fra tidligere undersøgelser af CRUCIAL forsøgsmarker i 2023

### 2.1 Forurening med PFAS i miljøet

Per- og polyfluorede alkyl stoffer (PFAS) er en stor gruppe af mere end 10.000 syntetiske kemikalier, der bliver anvendt industrielt og i en bred vifte af forbrugerprodukter. Gennem de seneste år har fund af PFAS i miljøet givet anledning til bekymring (Baun et al., 2024). Tsitonaki et al. (2023) har udført en opsamling omkring PFAS-kilder og deres mulige spredningsveje, hvor danske og udenlandske data er præsenteret inden for forskellige medier som spildevand og spildevandsslam, emissioner fra forbrændingsanlæg, regnvand, vandløb, søer, kyst og fjorde, grundvand og jord. Resultaterne fra undersøgelsen er opsamlet på FIGUR 3, som sammenfatter i hvilken størrelsesorden PFAS findes i de forskellige medier.

Af FIGUR 3 fremgår tydeligt, at PFAS brede anvendelse har ført til en udbredt tilstedeværelse af PFAS i miljøet. De primære punktkilder af PFAS stammer fra brugen af brandslukningsskum på brandøvelsespladser, udslip fra industrier, der har anvendt PFAS i produktionen og udslip fra deponier. Sekundære kilder kan stamme fra udbringning af slam med PFAS-indhold, vanding med PFAS forurenet vand eller bidrag fra store forureninger i nærheden (transporteret gennem vind/atmosfæren). Derudover kan der også findes PFAS indhold i jord, hvor der umiddelbart ikke er en kilde til forurening i nærheden. Dette kan fx. skyldes atmosfærisk deposition af luftbåren forurening med PFAS eller hav-aerosoler (Abou-Khalil et al, 2022; Madsen og Lenschow 2024). Aarhus Universitet (DCE) har i 2024 udført et pilotprojekt, hvor der er påvist ca. 3 ng/l PFAS i regnvand ved Roskilde, hvoraf PFOS og PFOA udgjorde mellem 0,25 og 0,3 ng/l (Bossi et al., 2024). Derudover kan PFAS også spredes via vandløb, havvand og bølgeskum (Tsitonaki et al., 2023; NIRAS, 2023).

Som det ses af FIGUR 3 påvises der i spildevandsslam typisk PFAS i koncentrationer på 8-12 µg/kg TS PFAS 22. Indholdet er faldet kraftigt i de seneste 20 år (se Figur 4). I grundvand under jorde, som er gødet med spildevandsslam, påvises PFAS-forbindelser i størrelsesorden 0,8-4,0 ng/l PFAS 22. Disse data stammer fra kun én lokalitet (CRUCIAL), som blev undersøgt i 2022-2023 af Genanvend Biomasse (Draborg og Tsitonaki, 2023). CRUCIAL forsøgsmarkerne som har været intensivt behandlet med slam siden 2003. Erfaringerne fra undersøgelsen på CRUCIAL i 2022 (Draborg og Tsitonaki 2023) har dannet baggrund for noget af nærværende projekts tilgang og konklusioner og er derfor beskrevet mere detaljeret i det efterfølgende afsnit.



**FIGUR 3.** Observerede koncentrationer af PFAS for forskellige medier og i tilknytning til forskellige kilder. Af figuren fremgår i hvilke størrelsesorden PFAS findes i forskellige medier. Data stammer fra mange forskellige kilder, som fremgår af figuren. Der er generelt foretrukket danske data medmindre disse var utilstrækkelige eller ikke til stede. (Tsitonaki et. al., 2023).

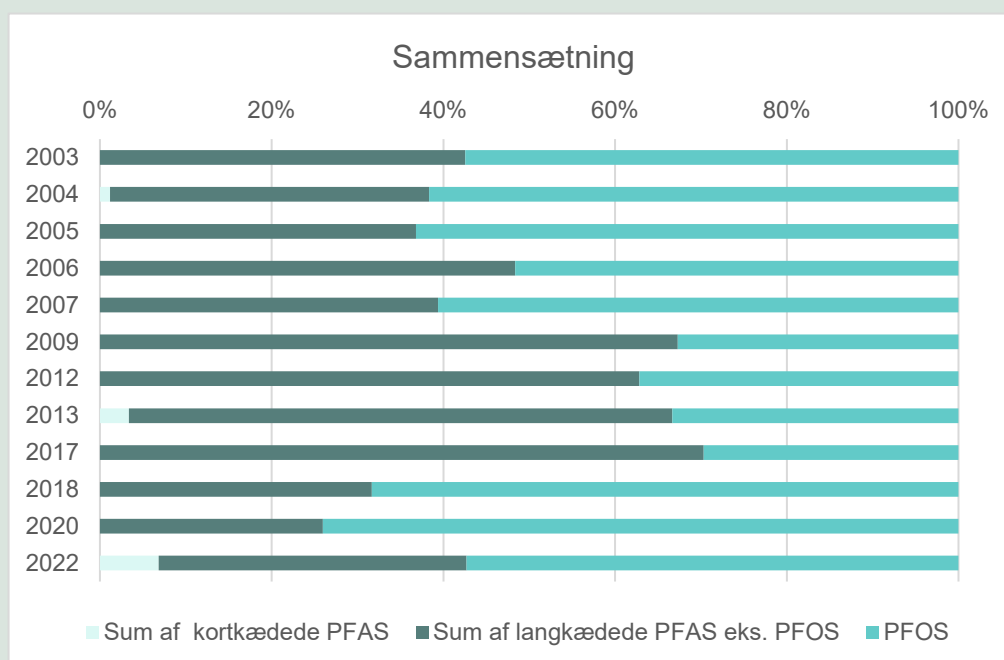
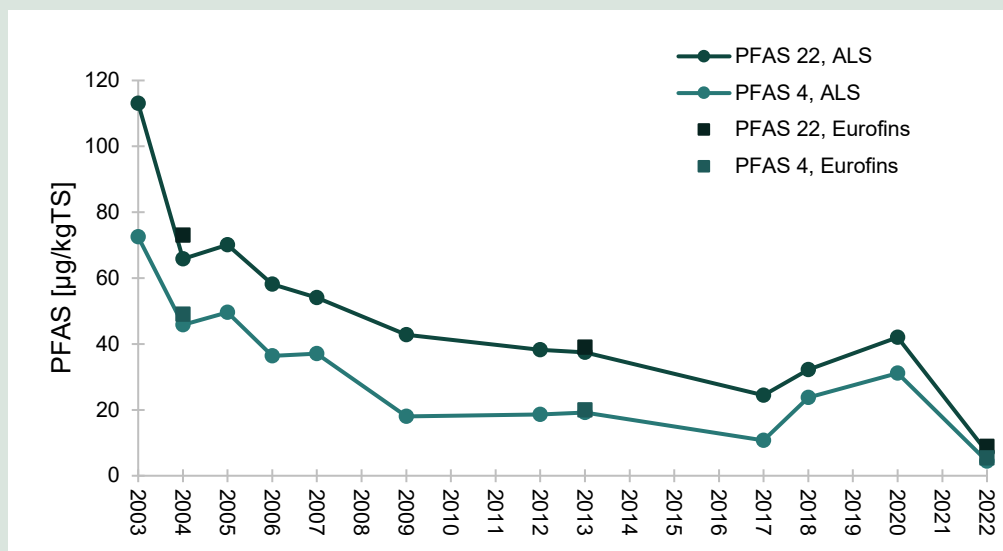
## 2.2 Erfaringer fra tidligere undersøgelser af CRUCIAL forsøgsmarker i 2022

I perioden 2022-2023 har brancheforeningen Genanvendt Biomasse udført undersøgelser af PFAS-indhold i jord og grundvand på Københavns Universitets forsøgsmarker ved Taastrup (CRUCIAL). De undersøgte forsøgsmarker har været intensivt behandlet med slam siden 2003 (Draborg og Tsitonaki 2022).

Det udbragte slam har udelukkende stammet fra Avedøre rensningsanlæg (BIOFOS), som renser spildevand fra omkring 275.000 borgere og virksomheder i 10 kommuner. Anlægget modtager bl.a. spildevand fra industrikvarteret ved Avedøre Holme og perkolat fra AC-miljø, samt procesvand fra Ørsted Avedøreværket (Hvidovre Kommune 2023).

Prøver fra den udbragte slam fra KU's slamarkiv er i projektet analyseret for PFAS, og resultaterne herfra viser tydeligt, at PFAS i spildevandsslam har været faldende over de seneste 20 år, muligvis pga. erstatning og udfasning af PFOS jf. FIGUR 4. Koncentrationsniveauet af

PFAS22 i det udbragte spildevandsslam er således faldet fra år 2003, hvor der blev målt indhold på 113 µg/kg TS for PFAS22, og ned til 42 µg/kg TS i 2020 og yderligere ned til 8,9 µg/kg TS i 2022. Koncentrationsniveauet af PFAS4 falder fra 73 µg/kg TS i 2003 til 5,4 µg/kg TS i 2022. Koncentrationsniveauet forventes at falde yderligere grundet øget opmærksomhed på PFAS, heraf skærpet restriktioner og udfasning af flere PFAS-forbindelser. Miljøstyrelsen fastsatte i 2021 en vejledende grænseværdi på hhv. 400 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4. Inden de vejledende grænseværdier blev indført i 2021, har der ikke været krav til indhold af PFAS i spildevandsslam. Analyserne på slamprøverne fra Avedøre Rensningsanlæg viser således, at slamprøverne historisk har overholdt den vejledende kravværdi til PFAS22, men at slamkoncentrationerne historisk har været højere end den nuværende vejledende kravværdi til PFAS4.

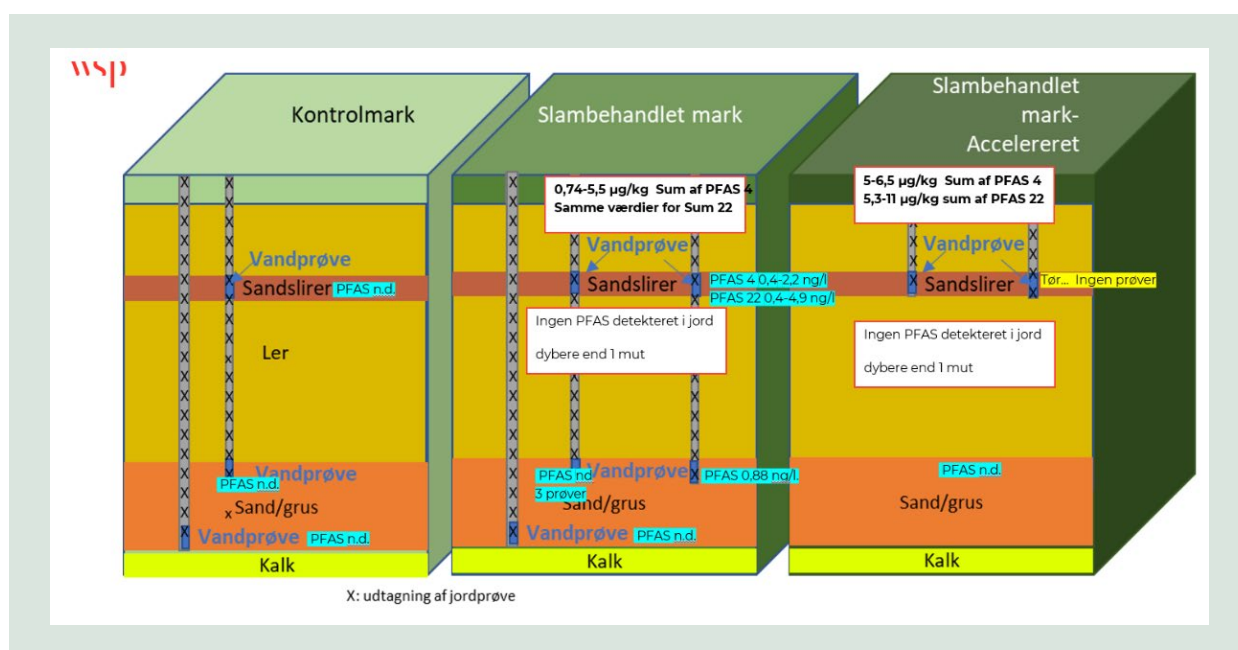


**FIGUR 4.** Sum af PFAS22 og PFAS4 i spildevandsslam fra Avedøre renselanlæg udbragt på CRUCIAL marken i perioden 2003 til 2022. Enkelte prøver er analyseret af to forskellige laboratorier, som det fremgår af den øverste figur. Der er god overensstemmelse i værdierne. Nederst: Andel af kort- og

langkædede PFAS-forbindelser. PFOS er det dominerende komponent og angives særskilt. Figurene er modificeret fra (Draborg og Tsitonaki, 2023).

For at undersøge påvirkningen af grundvandet under CRUCIAL markerne har Genanvend Biomasse fået undersøgt tre typer af markplot relateret til udnyttelse af spildevandsslam; (1) slambehandlet mark, som har fået høj dosering svarende til ca. 75 års lovlig udbringning (plot B3 og C5); (2) slambehandlet mark (plot C6), som har fået ekstremt høj dosering svarende til ca. 200 års lovlig udbringning på 20 år, og (3) kontrolområde (mod sydøst), som ikke har fået tilført slam. En oversigt over markplotterne kan ses i bilag 2B. (Draborg og Tsitonaki, 2023). Der blev udtaget jordprøver for hver meter ned til ca. 18 meters dybde og vandprøver fra terrænnært grundvand ca. 4-5 meter under terræn og det primære grundvandsmagasin ca. 15 m u.t. jf. FIGUR 5.

En grafisk oversigt over resultaterne kan ses i FIGUR 5



**FIGUR 5.** Fund af PFAS i jord og grundvand ved CRUCIAL (Kilde: Draborg og Tsitonaki, 2023). "Slambehandlet mark" har modtaget spildevandsslam i mængder svarende til 75 års lovlig udbringning på 20 år, mens "Accelereret" har modtaget mængder svarende til 200 års lovlig udbringning på 20 år.

Resultaterne viste at:

- I jordprøverne blev der målt koncentrationer på op til 6,5 µg/kg PFAS4 og 11 µg/kg PFAS22 under de slambehandlede marker i den øverste meter. I alle prøver udtaget dybere end 1 meter u.t var koncentrationerne under detektionsgrænsen på 0,5 µg/kg. PFOS og PFOA er de dominerende stoffer i jordprøverne, dog findes der også andre og mere langkædede stoffer med mere end otte C-F bindinger i molekylet.
- I vandprøverne påvises der PFAS22 i kun 3 ud af 14 prøver. Den højeste koncentration blev påvist i det terrænnære grundvand og var på 2,2 ng/L for PFAS4 og 4,9 ng/L PFAS22. Vandprøven stammede fra den testmark, som har modtaget høj dosis af spildevandsslam, svarende til 75 års lovlig udbringning, beregnet på baggrund af total fosfor mængde. PFOS er det dominerende stof i det analyserede grundvand.

- De påviste niveauer af PFAS i grundvandet er ca. 525-1.650 gange lavere end de forventede værdier, der kan beregnes på baggrund af de målte jordkoncentrationer. Det kan skyldes, at der forekommer en meget større binding i jord end forventet.

Resultaterne fra undersøgelserne på CRUCIAL forsøgsmarkerne viste, at der sker en udvaskning af PFAS til grundvandet under de slambehandlede marker, som dog var meget mindre end den teoretisk forventede udvaskning. Forfatterne påpegede, at der fortsat var behov for flere studier for at styrke grundlag for prognosen af nedsivning af PFAS på flere forskellige jordtyper og flere typer slam (Draborg og Tsitonaki, 2023).

Formålet med det aktuelle teknologiprojekt er derfor at undersøge påvirkningen af grundvandet på 2 andre lokaliteter, der har fået den lovmæssige korrekte mængde spildevandsslam, dvs. ikke er overbehandlet som markerne på CRUCIAL, for at styrke vidensgrundlaget. Resultaterne er derfor et supplement til den viden, der er opnået ved undersøgelserne på CRUCIAL markerne. Derudover er der i dette projekt udført analyser med en udvidet analysepakke og med suspect screenings analysemetoder, så undersøgelsen omfatter andre miljøfremmede stoffer end PFAS. Desuden er arkiv prøver fra undersøgelserne på CRUCIAL analyseret med en udvidet analysepakke.

# 3. Projektaktiviteter

Projektaktiviteterne er skematisk vist på FIGUR 6, og har omfattet interviews til belysning af praksis for udbringning af spildevandsslam i Danmark, undersøgelser af porevandet på en feltlokalitet ved hjælp af sugeceller (Vejrup) og efterfølgende laboratorieanalyser ved "traditionelle" og mere avancerede metoder. Derudover er der udtaget stikprøver og supplerende analyser i arkivprøver fra CRUCIAL og en drænprøve fra anden lokalitet (Kornerup).



FIGUR 6. Oversigt over projektaktiviteter.

## 3.1 Kortlægning af kommunal praksis

I tilknytning til projektet, men med særskilt finansiering, har HOFOR og VandCenter Syd bedt WSP foretage en spørgerunde hos en række kommuner i Danmark for at få et overblik over, hvordan anmeldelser af udbringning af spildevandsslam bliver håndteret i kommunerne. Der er valgt kommuner indenfor VandCenter Syds og HOFORs indvindingsoplande, samt enkelte andre kommuner for at dække hele Danmarks geografi. Der er udført interview med fire kommuner i Jylland, tre på Fyn og otte kommuner på Sjælland. Herudover er der udført interview med to af de store formidlere af spildevandsslam i Danmark hhv. HedeDanmark og Miljøservice. De vigtigste konklusioner fra denne aktivitet er beskrevet i kapitel 4.

## 3.2 Udvælgelse af undersøgelseslokaliteter

Som supplement til undersøgelser på CRUCIAL markerne (jf. kapitel 2) har der i denne undersøgelse været fokus på at udføre undersøgelser på marker med almindelig landbrugsdrift og mangeårig slamudbringning, så længere tids påvirkning kunne undersøges. Derudover har der fra VandCenter Syd og HOFOR været et ønske om, at markernes beliggenhed var indenfor deres indvindingsoplande. Endelig har det været nødvendigt, at grundejer indvilligede i undersøgelse af markerne.

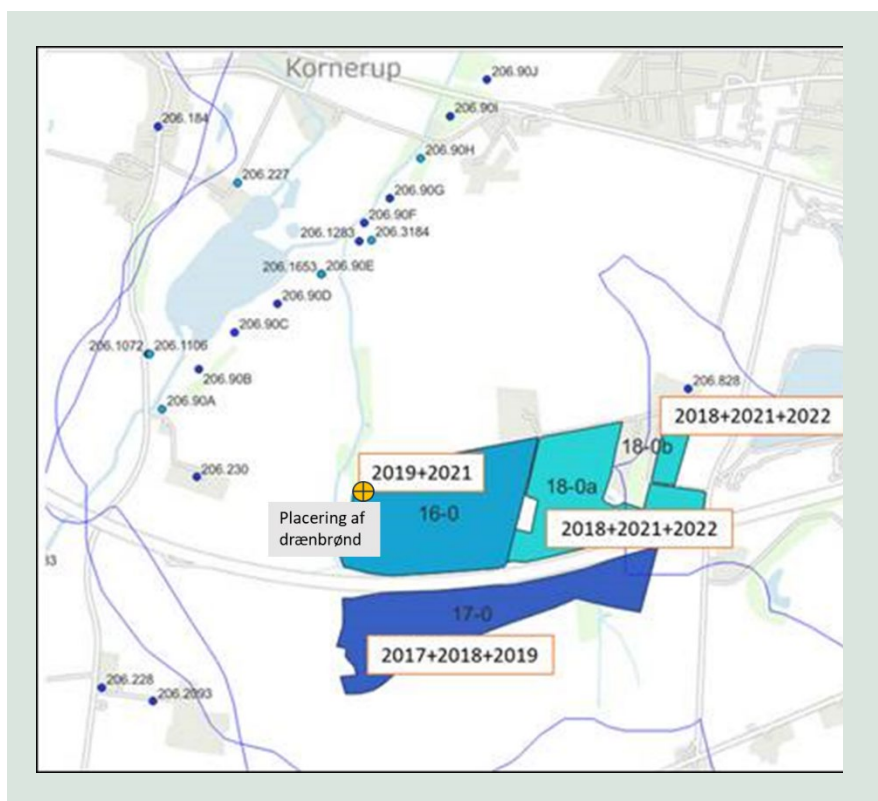
Det viste sig imidlertid særdeles vanskeligt at identificere et egnet landbrugsareal, idet de fleste kommuner ikke har et digitalt arkiv jf. kapitel 4, og det var derfor vanskeligt at finde marker, hvor der var dokumentation for mangeårig slamudbringning jf. kapitel 4.

Efter interviewundersøgelserne hos udvalgte kommuner blev der dog identificeret to marker; en lokalitet ved Kornerup Kildeplads (HOFOR) på Sjælland og en lokalitet syd for Vejrup på Fyn (VandCenter Syd). På grund af vanskelighederne med at finde egnede marker til feltundersøgelser, blev det desuden besluttet at udføre supplerende vandprøvetagning på CRUCIAL markerne i Taastrup.



Marken ved Kornerup har været drænet siden 1936, og har modtaget slam i perioden fra 2017-2022 og ikke tidligere, dvs. en relativ kort periode, hvor PFAS-indholdet i perioden forventes at være relativt lavt jf. FIGUR 4. Marken har primært modtaget slam fra FORS-Sæby rensesanlæg. Der er i det udbragte slam fra Sæby rensesanlæg i 2022 udført analyse for PFAS, som påviste indhold på 10 µg/kg PFAS4 og 16 µg/kg PFAS22 i slammet. Der foreligger ikke andre analyser for PFAS. Placering af marken kan ses på FIGUR 7.

Da marken således ikke opfyldte kriteriet om en mangeårig slamudbringning og samtidig er drænet, blev det besluttet, kun at udtage en enkelt prøve fra en drænbrønd beliggende nord for marken jf. FIGUR 7, og ikke udføre ressourcekrævende porevandsundersøgelser.

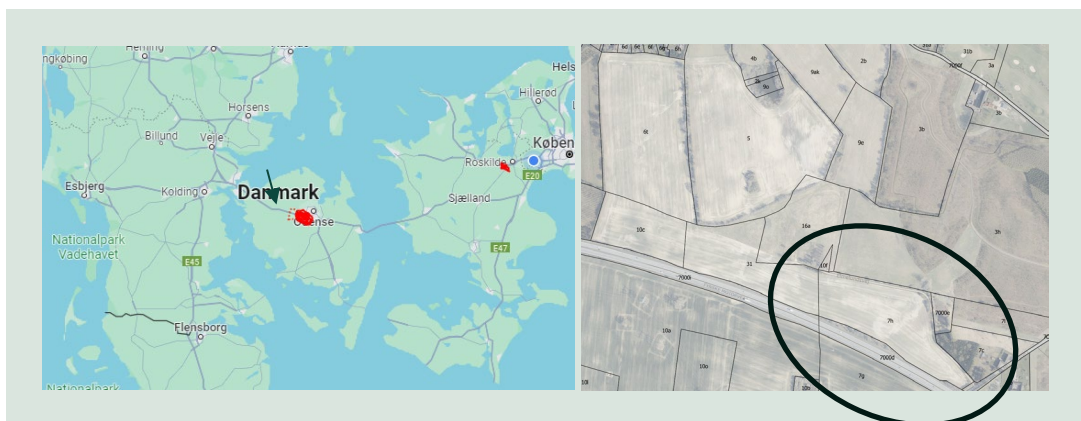


**FIGUR 7.** Placering af mark ved Kornerup, hvor der er udtaget en prøve fra dræn.

Der blev identificeret en mark syd for Vejrup vest for Odense. Placeringen af marken fremgår af FIGUR 8. Marken er siden 2022 ejet af Vejdirektoratet og udgøres af flere matrikler. Frem til 2022 har der på marken været almindeligt landbrugsdrift. Undersøgelserne blev udført på matr.nr. 7h Elmelund By, Sanderum. Der er viden om, at der på marken i årene 2007, 2011, 2014 og 2022 er udbragt spildevandsslam fra Holstebro rensesanlæg.

Spildevand til Holstebro Renselanlæg fordeler sig med ca. 33% husspildevand og 67% industrispildevand. Anlægget var med et gennemsnit i perioden fra 2007-2011 belastet med ca. 133.000 PE. Der er ikke registreret indhold af PFAS i det udbragte slam. På marken er der ingen registreringer af gylle eller husdyrgødning udbringning på marken frem til 2022. Der er i Odense kommunes arkiv registreret gødning med NS-27-3 og NS27-4 i 2013, 2014 og 2016. I 2015 er der registreret NS28-5. Marken har været konventionel dyrket med vinterhvede og vårbyg og spinat frø.

Geologien i Vejrup består af muldrag, hvorunder der træffes moræneler til boringens bund 6 meter u.t. Under morænelerslaget træffes smeltevandssand, der udgør et regionalt grundvandsmagasin (sand 2). Der er ikke dræn ved marken.



**FIGUR 8.** Beliggenhed af undersøgelseslokaliteten ved Vejrup. Undersøgelserne blev udført på matr. 7h markeret med cirkel.

### 3.3 Feltundersøgelser

#### 3.3.1 Drænprøve fra mark ved Kornerup

På marken ved Kornerup Kildeplads blev der udtaget en drænprøve (DB2) fra samlebrønden ved marken i Kornerup ved Roskilde. Vandprøven blev udtaget d. 13. december i blueCap glasflaske efter en periode med 14 mm regn over tre døgn.

#### 3.3.2 Installation af sugeceller ved Vejrup

For at undersøge påvirkningen af grundvandet fra spildevandsslam udbragt på Vejrup marken blev der installeret sugeceller under marken til udtagning af porevandsprøver. I alt blev der installeret sugeceller 10 steder fordelt på marken. På hver lokation blev der installeret en sugecelle hhv. 3 og 5 m u.t, herefter benævnt PVX-3 og PVX-5. Et kort over placering af sugeceller på marken kan ses på FIGUR 9.

Sugecellerne blev i november 2023 installeret med Geoprobe og installationen blev udført af Niras. Sugecellens slange er monteret gennem låget til en 5 liters prøvetagningsflaske (som ses på FIGUR 10) og porevand udtages ved at påføre vakuum. Sugeceller og prøvetagningsudstyr blev leveret af Dansk Miljørådgivning (DMR). Udstyret består af sugecelle med POM-pakning, PE-slange samt opsamlingsflaske af polypropylen. Udstyret er testet for afsmitning af PFAS og fundet uproblematisk.

På grund af frostvejr ved installation blev vakuum først påført den 7. december 2023. De første 100 ml vand, der blev opsamlet, blev bortskaffet for at sikre, at porevandet ikke indeholdt vand tilført kvartsmelet ved installation. Idet der var forskel på hvor meget vand, der kunne opsamles, blev prøvetagningen foretaget over 2 dage hhv. den 20. december 2023 og den 4. januar 2024. Detaljer om prøvetagning fremgår af bilag 2.



**FIGUR 9.** Kort over placering af sugeceller på Vejrup, også vedlagt i BILAG 2.



**FIGUR 10.** Fotos af sugecelle i stål © DMR A/S samt sugeceller monteret på stålør, der er ført indeni i forerør til Geoprobe. Til højre ses opsamlingsflaske som placeres over jorden.

### 3.3.3 Supplerende grundvandsprøvetagning ved CRUCIAL

Der er i november 2022 udtaget supplerende vandprøver fra borerer på CRUCIAL markerne. Der blev udtaget vandprøver fra alle 14 filtre, men kun tre af prøverne blev sendt til yderligere suspect screening analyser hos Eurofins. Det drejer sig om prøven fra kontrolmark (B110-1) samt fra områderne B107-2 og B108-2, som begge ligger i forsøgsplot med meget høj dosering af slam (svarende til ca. svarende til 75 års lovlig udbringning). Udover suspect screening for lægemidler og pesticider blev prøverne analyseret for fem udvalgte lægemidler hos Eurofins. Analyseprogrammet kan ses i TABEL 1. Analyserapporter er vedlagt i bilag 1 og 3. Placering af borerer fremgår af bilag 2B. Prøverne B107-2 og B108-2 repræsenterer det terrænnære grundvand på lokaliteten (ca. 4-5 meter dybde), og blev udvalgt på baggrund af, at der i disse borerer blev truffet de højeste PFAS niveauer på hhv. 0,4 og 4,88 ng/l for PFAS22. Kontrolprøven i B110-1 blev udvalgt som referenceprøve.

De øvrige vandprøver blev gemt i -18 °C i Københavns Universitets arkiv. I december 2023 er der udtaget en prøve fra arkivet B107-2 som er sendt til suspect screening analyse på Aarhus Universitet (se afsnit 3.4).

## 3.4 Analyseprogram

En oversigt over de udførte analyser kan ses i TABEL 1. Der har i analyseprogrammet været fokus på de stofgrupper, som litteraturstudiet udført i 2012 er vurderet kritiske i forhold til grundvandet, dvs. medicinoffer, pesticider og PFAS (Tsitonaki, 2012). Endvidere er der screenet for stoffet 2,5-dichlorobenzensulfonsyre (2,5-DCBSA), da der er mistanke om, at dette stof kan komme fra farvestoffer i gødning eller er et pesticidnedbrydningsprodukt jf. Haagen (2024). Derudover er det valgt at screene for et stort antal stoffer med suspect screening hos Eurofins og Aarhus Universitet. Der er her tale om ikke akkrediterede metoder, som er under udvikling.

**TABEL 1.** Oversigt over sugecellernes dybde, prøvetagning og analyseprogram.

Lokalitet (medie)	Prøve	Dybde (m u.t.)	Analyseprogram					
			PFAS22	2,5- DCBSA <sup>F</sup>	Udvalgte pestici- der <sup>E</sup>	Suspect screening		Udvalgte lægemidler <sup>a</sup>
						Eurofins	AU	
Vejrup (porevand)	PV1	3	X					
		5 <sup>b</sup>						
	PV2	3	X	X			X	
		5	X					
	PV3	3	X		X			
		5	X		X			
	PV4	3	X					
		5	X					
	PV5	3	X					
		5	X					
	PV6	3	X		X			
		5	X		X			
	PV7	3	X					
		5	X					
	PV8	3	X		X			
		5	X		X			
	PV9	3	X					
		5	X					
	PV10	3	X	X			X	
		5 <sup>c</sup>					X	
Kornerup (dræn- vand)	DB2	-	X	X		X		
CRUCIAL (terræn- nær grund- vand)	B107-2	-	X <sup>D</sup>			X	X	X
	B108-2		X <sup>D</sup>			X		X
CRUCIAL (primær grund- vand)	B110-1		X <sup>D</sup>			X		X

A: Koffein, Saccharin, Azithromycin, Diclofenac, Tributylphosphat

B: Intet vand, prøve ikke udtaget

C: Prøve til PFAS og 2,5-DCBSA forsvundet

D: Er tidligere analyseret for PFAS (Tsitonaki og Draborg 2022)

E: Desphenyl-chloridazon, Methyl-desphenyl-chloridazon, DMS og 1,2,4- Triazol

F: 2,5-dichlorobenzensulfonsyre

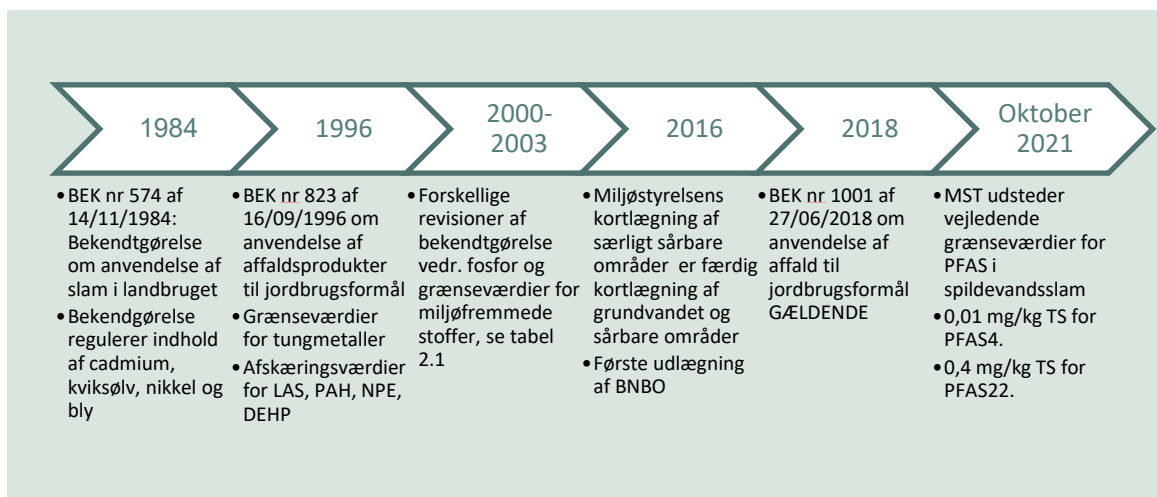
Analyserne til PFAS22, 2,5-dichlorobenzensulfonsyre samt udvalgte pesticider er udført af Eurofins A/S. Analyserne til suspect screening analyse er udført af Aarhus Universitet, Environmental Metabolomics Lab og Eurofins.

## 4. Praksis vedr. spildevandsslam

I tilknytning til projektet har HOFOR og VandCenter Syd bedt WSP foretage en spørgerunde hos en række kommuner i Danmark for at få et overblik over, hvordan anmeldelser af udbringning af spildevandsslam bliver håndteret i kommunerne. Der er valgt kommuner indenfor VandCenter Syd og HOFORs indvindingsoplande, samt enkelte andre kommuner for at dække hele Danmarks geografi. Der er udført interview med fire kommuner i Jylland, tre på Fyn og otte kommuner på Sjælland. Herudover er der udført interview med to af de store formidlere af spildevandsslam i Danmark, HedeDanmark og Miljøservice. Spørgerunden er rapporteret i et særskilt notat til HOFOR og VandCenter Syd (WSP 2024), men de vigtigste konklusioner opsummeres her.

### 4.1 Lovgivning

Udbringning af spildevandsslam reguleres bl.a. efter bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål BEK nr. 1001 af 27/06/2018 /3/, herudover er det op til de enkelte kommuner, hvorvidt der stilles yderligere krav. I oktober 2021 udsendte Miljøstyrelsen en vejledning om grænseværdier for PFAS i spildevandsslam. En tidslinje for de vigtigste udviklinger i lovgivningen kan ses i FIGUR 11. Den første bekendtgørelse vedr. spildevandsslam blev indført i 1984.



FIGUR 11. Tidslinje for lovgivning

Der er løbende kommet ændringer til grænseværdier for tungmetaller og miljøfremmede stoffer, som har ført til revisioner af affald til jord bekendtgørelsen fra 1984 til 2018, samt tilføjelse til vejledning om PFAS-indholdet i oktober 2021. En oversigt over udvikling i grænseværdierne kan ses i TABEL 2.

Det er producenten af spildevandsslammet, der skal udtage og analysere repræsentative prøver af alle anmeldte produkter ift. om grænseværdierne for stofferne. Producenten skal anmelde til Landbrugsstyrelsen (LBST) senest en uge før første levering.

**TABEL 2.** Udvikling i grænseværdier for udbringning af slam på landbrugsjord (vigtigste ændringer)

BEK	1984	1996	Frem til 30. juni 2000	fra 1. juli 2000	1. juli 2002	BEK 2003	BEK 2006	BEK 2017	BEK 2018	Vejl okt 2021 /3/	
mg pr. kg. tørstof											
TUNGMETALLER	Cd	8	0,8	-	-	-	0,8	0,8	0,8	0,8	-
	Hg	6	0,8	-	-	-	0,8	0,8	0,8	0,8	-
	Pb	50	120	-	-	-	120	120	120	120	-
	Ni	50	30	-	-	-	30	30	30	30	-
	Cr	-	100	-	-	-	100	100	100	100	-
	Zn	-	4000	-	-	-	4000	4000	4000	4000	-
	Cu	-	1000	-	-	-	1000	1000	1000	1000	-
	mg pr. kg. total fosfor										
	Cd	-	200	100	-	-	100	100	100	100	-
	Hg	-	200	200	-	-	200	200	200	200	-
Pb	-	10000	10000	-	-	10000	10000	10000	10000	-	
Ni	-	2500	2500	-	-	2500	2500	2500	2500	-	
mg pr. kg. tørstof											
MILJØFREMMEDE STOFFER	LAS	-	2600	1300	1300	1300	1300	1300	1300	-	
	sum PAH	-	6	3	3	3	3	3	3	-	
	NPE	-	50	30	10	10	10	10	10	-	
	DEHP	-	100	50	50	50	50	50	50	-	
	sum PCB (7)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	
	4 PFAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01
	22 PFAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4

LAS: Lineære alkylbenzensulfonater.

PAH: Polycykliske, aromatiske hydrocarboner.  $\Sigma$  PAH =  $\Sigma$  Acenaphthen, Phenathren, Fluoren, Fluoranthen, Pyren, Benzfluoranthener (b+j+k), Benz(a)pyren, Benz(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-cd)pyren.

NPE: Nonylphenol (+ethoxylater). NPE omfatter selve stoffet nonylphenol og nonylphenoethoxylater med 1-2 ethoxygrupper.

DEHP: di(2-ethylhexyl)phthalat.

PCB(7): Sum af PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB153 og PCB180.

## 4.2 Kommunernes praksis

Flere kommuner er indenfor de seneste år begyndt at registrere anmeldelserne i GIS, Con-Terra/MarkReg<sup>2</sup> o.l. med et ønske om at skabe et bedre og nemmere overblik over udbringningerne.

Anmeldelse om udbringning af spildevandsslam skal ske 8 dage før levering. Hvis kommunen ikke besvarer anmeldelsen indenfor de 8 dage, kan slammet udbringes. Den korte svarfrist kan godt være en udfordring for flere kommuner. Anmeldelsen skal indeholde et markkort med

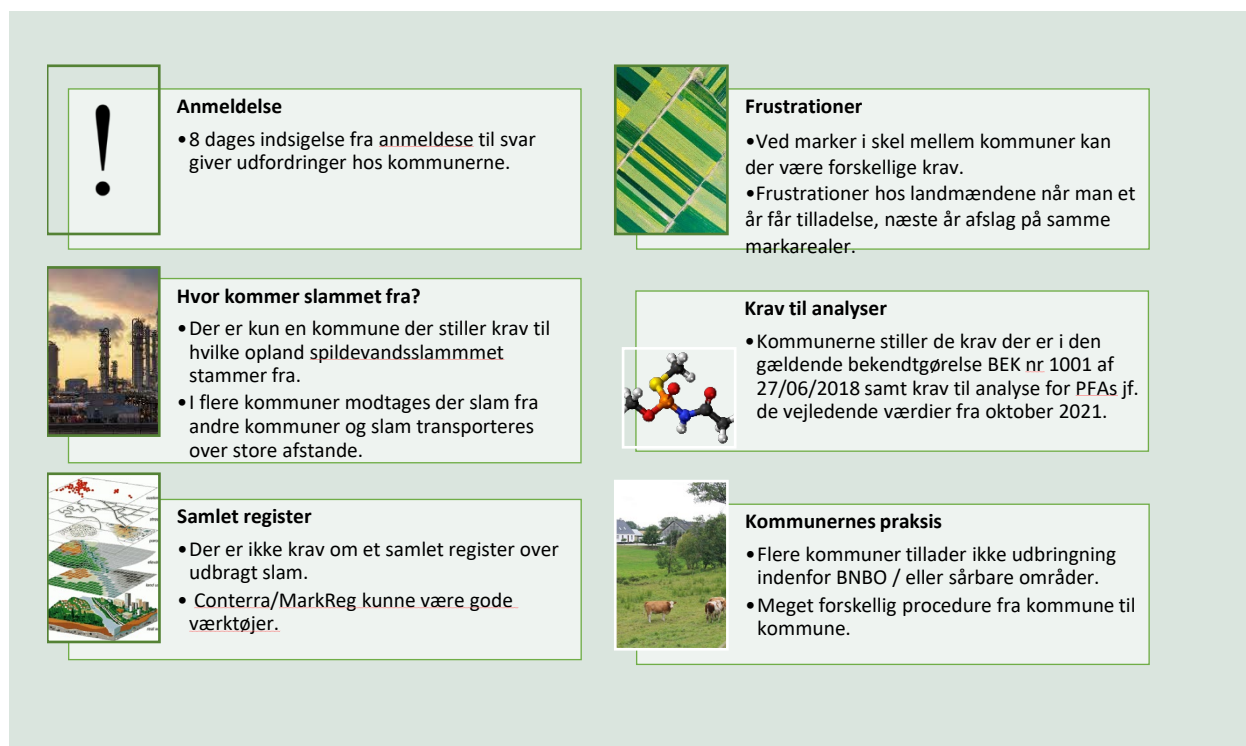
<sup>2</sup> MarkReg som ejes af ConTerra er et system, der let kan hente og vise anmeldte udspretningsarealer på kort, gemme oplysninger omkring udspretning af organiske restprodukter og analysere leveringsmeddelensens arealer i forhold til arealets historik og placering.

mark nr., en deklaration af spildevandsslammet, der fortæller, hvor spildevandsslammet kommer fra, samt en analyse af spildevandsslammet, der skal overholde grænseværdierne angivet i bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål. Herudover skal der foreligge en skriftlig leveringsaftale mellem lodsejer og spildevandsanlægget. Denne aftale er oftest håndteret af en spildevandsslamformidler. I mange af kommunerne ligger opgaven om håndtering af anmelderne hos én medarbejder, hvilket betyder, at viden går tabt når vedkommende er syg, på ferie eller stopper.

Der er ingen af de 15 kommuner, der stiller krav til analyse for andre parametre end de, i bekendtgørelsen om anvendelse af affald til landbrugsjord, fremsatte grænseværdier, med undtagelse af PFAS-stoffer som alle kommunerne også stiller krav til. Der foreligger således ingen analyser for f.eks. medicinoffer. Det er samtidig gældende for alle 15 kommuner, at kravet om analyse for PFAS-stoffer kom umiddelbart efter, at Miljøstyrelsen i november 2021 udsendte vejledningen om grænseværdier for PFAS. Der er et par af kommunerne, der kigger på, hvilket opland spildevandsslammet kommer fra, da det vurderes, at der er en risiko for, at spildevandsslammet indeholder andre miljøfremmede stoffer, der ikke analyseres for (Nanusha et al., 2024).

Der er store forskelle mellem de interne procedurer for, på hvilke arealer man accepterer udbringning af spildevandsslam i kommunerne. Dette kan delvis forklares pga. geografiske forskelle, da kommunerne også skal forholde sig til habitatbekendtgørelsen. Der er dog også store forskelle i, hvorvidt kommunerne har en konkret intern procedure for håndtering af slam-anmeldelser. Det er til frustration for både kommuner, formidlere af spildevandsslam og ikke mindst landmændene, at der opleves så store forskelle. BNBO'er er de arealer, som de fleste kommuner nævner, hvor der enten ikke accepteres udbringning af spildevandsslam eller anmeldelserne som minimum vil blive gransket nærmere. Her nævner tre ud af 15 kommuner, at en anmeldelse indenfor BNBO vil blive særligt vurderet, og ofte vil ende med et afslag, mens seks ud af de 15 kommuner fortæller, at en anmeldelse indenfor BNBO vil give et direkte afslag. Fem af kommunerne har interne retningslinjer omkring håndtering af anmeldelserne og inddragelse af grundvand/drikkevandsafdelingen.

Ovenstående er opsummeret visuelt i FIGUR 12. Kommunernes svar på de vigtigste spørgsmål kan ses af oversigten i TABEL 3.



FIGUR 12. Oversigt over praksis/erfaringer fra spørgerunde i 15 kommuner



**TABEL 3.** Oversigt over de enkelte kommuners svar på de vigtigste spørgsmål

	Har I et samlet register?	Journalisering på matrikel niveau	Modtager spildevands- slam fra andre kommuner?	Inddragelse af grundvand/drikkevandsafdeling	Udbringes indenfor BNBO	Udbringer indenfor særlig sårbare områder	Andre bemærkninger fra de interviewede medarbejdere
1	Nej			Oplyses ikke			Ny medarbejder havde desværre ikke så meget viden
2	Nej			Oplyses ikke			Der udbringes kun afgasset biomasse de sidste 10 år
3	Nej	ja	Ja	Se kommentar	Ja	Ja	Kommunen er udfordret ift. til tid og den korte svarefrist. Kommunen har aldrig afvist en udbringning. Statslig regulering
4	Ja, til Conterra hvis udbragt af HedeDanmark	Ja, og GIS siden 2022	ja	Ja	Ja, efter høring	Oplyses ikke	Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne
5	Oplyses ikke			Ja	Ikke længere	Ikke længere	Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne. Der skelnes imellem om oplandet er større by med industri, sygehus osv. eller et mindre byområde. Hvis oplandet er større byer, så gives der sjældent accept til udbringning, da kommunen vurderer at det medfører for stor en risiko for indhold af miljøfremmede stoffer (der ikke analyseres for). Kommunen oplever stort frustrationer hos landmand grundet de ekstra krav
6	Oplyses ikke	Oplyses ikke	Ja	Ja	Nej/	Ja efter grundig vurdering	Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne. Alle anmeldelser bliver derfor nøje gransket før der enten gives accept eller afslag. Kommunen oplever frustrationer fra landmænd og udfordringer med den korte svarfrist. Det er et ønske om mere ensartede procedurer kommunerne imellem.
7	Ja, Conterra siden 2007	Ja	Ja	Ja	Nej /oplyses ikke		Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne
8	Ja Conterra	Ja			Oplyses ikke	Ja, efter granskning	Alle anmeldelse vurderes individuelt

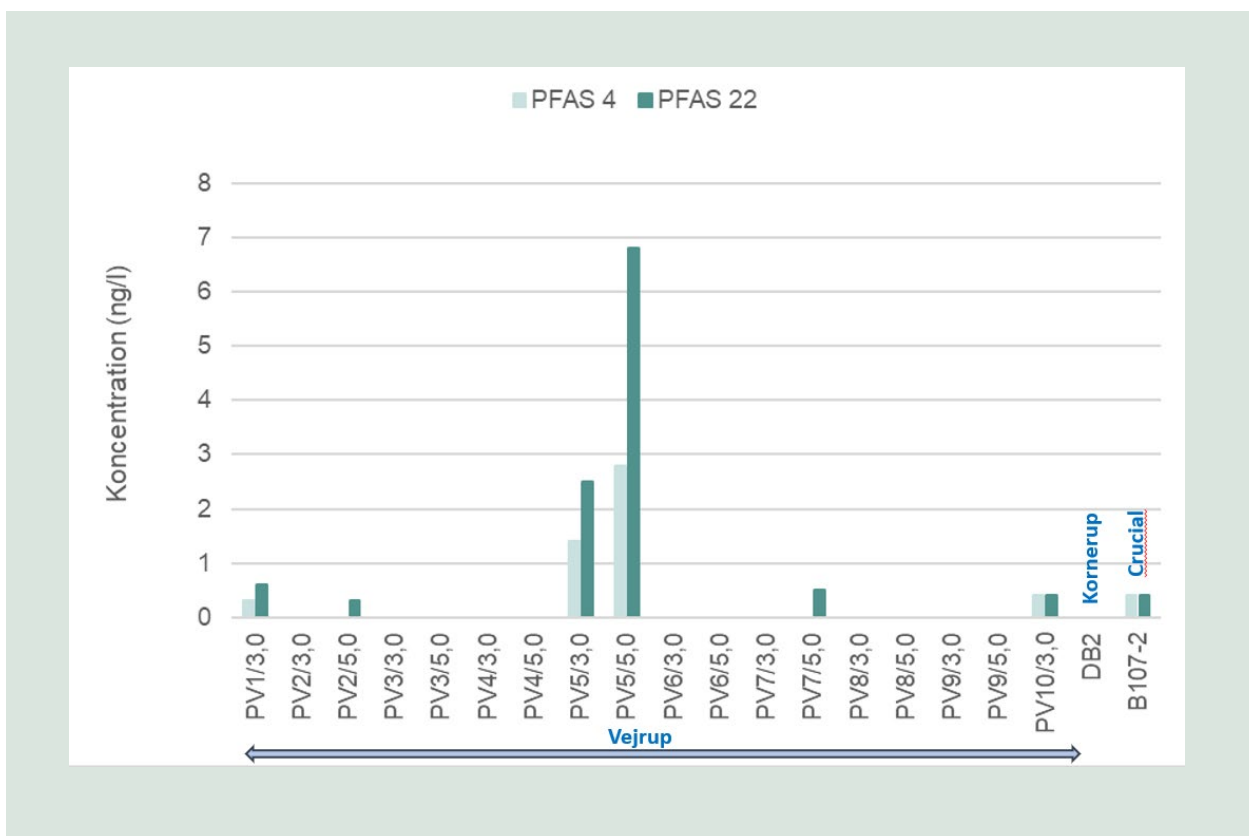
	Har I et samlet register?	Journalisering på matrikel niveau	Modtager spildevandsslam fra andre kommuner?	Inddragelse af grundvand/drikkevandsafdeling	Udbringes indenfor BNBO	Udbringer indenfor særlig sårbare områder	Andre bemærkninger fra de interviewede medarbejdere
9	Ja, Conterra siden 2012	Ja, før 2012	Ja	Ja	Nej	Ja, efter granskning	Alle anmeldelse vurderes individuelt. Kommunen udtrykker bekymring om uensartede procedure og mangler på ressourcer i andre (nabo-)kommuner
10	Ja siden 2020			Ja	Nej		Der er kun modtaget 4-5 anmeldelser de sidste 17 år
11	Ja Conterra siden 2022	Ja, før 2022 og siden 1990	Ja		Ja efter konkret vurdering	Ja	Kommunen oplevere frustrationer hos landmænd grundet de store forskelle fra kommune til kommune
12	Nej	Ja, siden 1980'erne			nej	Ja	Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne. Ved hver indvindingsboringer har man i kommunen lagt en 300 m bufferzone, og indenfor denne er det ikke tilladt at udbringe spildevandsslam.
13	Nej						Kommunen modtager ingen anmeldelser om udbringning af spildevandsslam, men at de har kendskab til at landmænd i kommunen får udbragt spildevandsslam på markerne, idet naboerne klager om lugtgener
14	Ja	Ja		Ja	Nej	Nej heller ikke indenfor GDO25 (Grundvandsdannende opland med 25 års transporttid)	Kommunen har interne retningslinjer for håndtering af anmeldelserne. Kommunen er udfordret med 8- dages fristen, men prioriterer altid at svare.
15	Ja	Ja		ja	Ja, se kommentar	Ja	Kommunemedarbejderen mener ikke at de har lovhjemmel til at afvise udbringning af spildevandsslam hvis analyserne overholder grænseværdierne i bekendtgørelsen, det betyder at så længe analyserne overholder grænseværdierne, så vil en anmeldelse altid accepteres af kommunen. Ligger markarealet indenfor BNBO eller nitratfølsomindvinding, så vil kommunen sammen med accepten medsende et ønske om at man ikke udbringer på de pågældende arealer.

## 5. Resultater fra feltundersøgelser

Feltundersøgelser i nærværende projekt har, som beskrevet i kapitel 3, omfattet undersøgelser på 3 lokaliteter: Kornerup på Sjælland, hvor der er udtaget en enkelt vandprøve fra en drænbrønd (DB2), Vejrup på Fyn, hvor der er udført omfattende porevandsundersøgelser (PV1-10) og endelig supplerende vandprøver fra borerne på CRUCIAL markerne i Taastrup (B107, B108 og B110). Resultaterne fra de tre lokaliteter præsenteres i det følgende. Diskussion og perspektivering af resultaterne fremgår af kapitel 6.

### 5.1 Analyseresultater for PFAS i vandprøver

Der er udført kommercielle target analyser for PFAS22 af Eurofins. De angivne koncentrationer fra Eurofins er sum af forgrenede og lineære PFAS. Resultaterne for sum af PFAS4 og sum af PFAS22 er vist i FIGUR 13 og indhold af de enkelte PFAS er vist i TABEL 4.



**FIGUR 13.** PFAS fund: Sum PFAS4 og Sum PFAS22 i vand fra sugeceller ved Vejrup (PV1-10, dybde 3 og 5 m u.t., drænprøve ved Kornerup (DB2) og CRUCIAL (B107-2). Prøven fra B107-2 er analyseret i forbindelse med projektet i 2022 (Tsitonaki og Draborg 2022).

Som det fremgår af FIGUR 13 er der kun påvist indhold af PFAS i 6 ud af de 18 analyserede prøver fra de installerede sugeceller på marken ved Vejrup. Kun i én prøve (PV5-5) blev der påvist indhold, der overskrider Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterier på 2 ng/L (PFAS4), med en værdi på 2,8 ng/L for PFAS4 og 6,8 ng/L for PFAS22. Grundvandskvalitetskriteriet for PFAS22 (100 ng/L) er ikke overskredet i nogen af de analyserede prøver. Der ses umiddelbart

ingen sammenhæng mellem PFAS indhold og hhv. dybden for udtagning af prøven, mængden af vand der var opsamlet i sugecellen eller tidspunktet for prøvetagning.

I drænprøven fra Kornerup blev der ikke påvist indhold af PFAS, og i vandprøven fra boringen på CRUCIAL marken (B107-2) blev der kun påvist PFAS4 i en koncentration på 0,4 ng/L, som udelukkende var fund af PFOA (Tsitonaki og Draborg 2023).

Udvalgte prøver fra både Vejrup, Kornerup og CRUCIAL markerne (PV2-3, PV10-5, PV10-3, DB2, og B107-2), er analyseret ved suspect screening hos Aarhus Universitet, hvor der er søgt specifikt efter PFAS forbindelser. Der er ikke fundet PFAS ved suspect screening analyser selv om target analyser hos Eurofins fandt PFOA i PV10-3 og B107-2 i en koncentration på 0,4 ng/l (jf. TABEL 4). Fravær af PFAS ved suspect screening kan forklares ved en højere detektionsgrænse samt sorption til jordpartiklerne, da prøven var ret grumset.

**TABEL 4.** Påviste indhold af PFAS (ng/l) i de analyserede prøver hos Eurofins, hvor der blev påvist indhold af PFAS. Prøver markeret med fed skrift er også analyseret ved suspect screening på Aarhus Universitet.

	Prøve	PFBA	PFBS	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFOS	PFDA	Sum PFAS4	Sum PFAS22
Vejrup	PV1-3	<	0,31	<	<	0,3	<	<	0,3	0,61
	PV2-5	<	<	0,3	<	<	<	<	<	0,3
	PV5-3	<	<	0,68	<	1,4	<	0,4	1,4	2,5
	PV5-5	1,2	0,36	1,2	0,46	2,3	0,45	0,81	2,8	6,8
	PV7-5	<	<	0,5	<	<	<	<	<	0,5
	<b>PV10-3</b>	<	<	<	<	0,4	<	<	0,4	0,4
CRUCIAL	<b>B107-2*</b>	<	<	<	<	0,4	<	<	0,4	0,4

\* Analyseret i 2022 (Draborg og Tsitonaki, 2022).

## 5.2 Analyseresultater for andre stoffer ved akkrediterede analyser

Som en tillægsaktivitet til projektet er det valgt at analysere udvalgte prøver fra Vejrup for specifikke pesticid metabolitter (Desphenyl-chloridazon, Methyl-desphenyl-chloridazon, DMS; og 1,2,4-Triazol). Desuden er der analyseret for 2,5-DCBSA jf. TABEL 1. Som det fremgår af TABEL 5 er der påvist spor af Desphenyl-chloridazon, Methyl-desphenyl-chloridazon og 1,2,4-Triazol men der påvises ikke DMS og 2,5-DCBSA. De påviste stoffer stammer fra brug af pesticider på landbrugsmarken, og kommer ikke som følge af udbringning fra slam.

Tre prøver fra CRUCIAL er i forbindelse med nærværende projekt analyseret for udvalgte lægemidler ved akkrediterede analyser hos Eurofins. Resultaterne fremgår af TABEL 6. Det ses, at der ikke er påvist nogle af de udvalgte forbindelser over detektionsgrænsen. De 5 parametre var blevet udvalgt på baggrund af viden om stoffer, der ofte findes i spildevandsslam (Danish EPA, 2022).

**TABEL 5.** Resultater af analyser for metabolitter af Chloridazon ( $\mu\text{g/l}$ ) samt andre udvalgte pesticider mv. i udvalgte prøver fra sugecellerne i Vejrup.

Sugecelle	Dybde (m u.t.)	Desphenyl-chloridazon	, Methyl-desphenyl-chloridazon	DMS	1,2,4-Triazol	2,5-DCBSA
PV3	3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
PV3	5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
PV6	3	0,11	0,012	<0,01	<0,01	
PV6	5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
PV8	3	0,038	<0,01	<0,01	0,012	
PV8	5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
PV2-3	3					<0,01
PV10	3					<0,01
PV10	5					<0,01

**TABEL 6.** Resultater af analyser for udvalgte lægemidler i prøver fra CRUCIAL.

Stof	Enhed	B107-2	B108-2	B110-1
<b>Filtersætning</b>	<b>Meter u.t.</b>	<b>5,5-6,5</b>	<b>4,5-5,5</b>	<b>10-12</b>
<b>Slam modtaget</b>		<b>Høj dosis (75 år)</b>	<b>Høj dosis (200 år)</b>	<b>Kontrol</b>
Koffein	$\mu\text{g/l}$	< 1	< 1	< 1
Saccharin	$\mu\text{g/l}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Azithromycin	$\mu\text{g/l}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Diclofenac	$\mu\text{g/l}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Tributylphosphat	$\mu\text{g/l}$	< 0,02	< 0,02	< 0,02

### 5.3 Suspect screening resultater

I starten af 2023 blev der udført supplerende vandprøvetagning i tre boringer på CRUCIAL, hvor resultater er sendt til suspect screening analyse hos Eurofins. Der er her analyseret på to platforme og screenet for lægemidler og pesticider, men ikke for PFAS. Resultaterne er sammenfattet i bilag 3. Der blev identificeret spor af flere pesticider og metabolitter, men ingen lægemidler. Alle identifikationer er på Level 2, dvs. at der foreligger en sandsynlig "stofkandidat" på baggrund af viden om eksakt masse, fragmentationsmønstre og information i databaser, men stofferne er ikke bekræftet med referencestandarder (Level 1 identifikation). Da stofferne kun er identificeret på Level 2, er der stor usikkerhed mht. stofidentifikationen og der er brug for yderligere undersøgelser for at bekræfte stofidentifikationerne. Level 2 identifikationer tillægges derfor mindre betydning end Level 1 stoffer i nærværende projekt.

Ca. 1½ år senere i projektperioden er 3 prøver fra Vejrup (PV2-3, PV10-3 og PV10-5) samt drænprøven fra Kornerup (DB2) og vandprøven fra CRUCIAL (B107-2) sendt til suspect screening analyser på Aarhus Universitet. Da suspect screening analyseværktøjerne er under kraftig udvikling, har analyserne på Aarhus Universitet omfattet 5 HRMS-platforme, og resultaterne kan derfor ikke sammenlignes med de tidligere suspect screenings resultater (bilag 3).

Der er ved analyserne på Aarhus Universitet fundet signal for mange tusinde stoffer, og der er sat navn på 46 stoffer. Der er identificeret 25 stoffer på Level 1, hvor stofferne er bekræftet med referencestandarder svarende til target analyser jf. TABEL 7,

**TABEL 7.** Oversigt over stoffer, der er påvist ved suspect screening udført af Aarhus Universitet i december 2023 på de tre prøvelokaliteter på Level 1 (Relativ signalstyrke +++ >0,5-1, ++ >0,1-0,5, + >0 -0,1, -: ikke påvist).

		CRUCIAL	Vejrup	Kornerup	
Slam fra renselanlæg		Avedøre	Holstebro	Fors/Sæby	
Periode for udbringning		2002-2022	2007-2022	2018-2022	
Medie		Porevand (1 prøve triplikat)	Terrænnært grundvand (3 prøver i triplikat)	Drænvand (1 prøve i triplikat)	
STOFGRUPPE	STOF	SIGNALSTYRKE			LEVEL
Kunstigt sødestof	Saccharin	+++	+	+	1
Endogene metabolitter	Cytosine	++	+++	+++	1
	Tyrosine	+++	-	-	1
Fungicid	Fluopyram	-	-	+++	1
Fungicider metabolit	1,2,4 Triazol	-	-	+++	1
Herbicid	Dinoterb	-	+++	-	1
	Chloridazon	-	+++	-	1
Herbicid metabolitter	Atrazine-2-hydroxy	-	++	+++	1
	Desphenyl-chloridazon	-	+++	-	1
	Methyl-desphenyl chloridazon	-	+++	-	1
	Terbumeton-desethyl	-	+	+++	1
Industrikemikalie	Bisphenol S	+++	+	+	1
	1,3-Diphenylguanidine	+++	++	+	1
	1H-Benzotriazol	-	+++	-	1
	5-Methyl-1H-benzotriazol	+++	+	+	1
Naturlige stoffer	Theobromine	+++	+	+	1
	3-Hydroxybenzoic acid	+++	-	-	1
	N-Benzylformamide	+++	+	+	1
Farmaceutiske stoffer	Koffein	+++	+	+	1
	Nicotin	+++	++	++	1
	Theophyllin	+++	+	+	1
	Tramadol	-	+++	-	1
	Venlafaxine	-	-	+++	1
	Pregabalin	-	+++	-	1
Vitamin	Nicotinamide	+++	+	-	1

Derudover er der identificeret 21 stoffer på Level 2, hvor der foreligger en sandsynlig "stofkandidat" jf. TABEL 8. For yderligere information om suspect screening henvises til f.eks.

Nanusha et al. (2023). Resultaterne er også vedlagt i bilag 4. Hvert stof er normaliseret til prøven, hvor det pågældende stof er fundet i den højeste forekomst. Alle prøver er analyseret i triplikater. I bilag 4 kan man desuden se hvordan der er god overensstemmelse mellem triplikaterne for de enkelte lokaliteter.

**TABEL 8.** Oversigt over stoffer, der er påvist ved suspect screening udført af Aarhus Universitet i december 2023 på de tre prøvelokaliteter på Level 2 (Relativ signalstyrke +++ >0,5-1, ++ >0,1-0,5, + >0 -0,1, -: ikke påvist).

Stofgruppe	Stof	CRUCIAL	Vejrup	Kornerup	Level
Endogene metabolitter	Creatinine	+++	++	-	2
	D-(+)-Proline	+++	-	-	2
	D-(+)-Pyroglutamic Acid	+++	-	+	2
	DL-Stachydrine	+++	+	++	2
	Decanamide	+++	-	-	2
	L-Phenylalanine	+++	-	+	2
	3-tert-Butyladipic acid	+++	-	-	2
	Hexanoylglycine	+++	-	-	2
Herbicid metabolit	3,5-Dichlorobenzoic acid*	+++	+	-	2
	Terbutylazine-2-hydroxy	+	-	+++	2
Industrikemikalie	1-Naphthylamine	+++	+	+	2
	2,2,6,6-Tetramethyl-4 piperidone	++	+++	++	2
	N,N-Diethylethanola- mine	-	+++	-	2
	N-Methyl-2-pyrrolidone	+++	+++	++	2
	Adipic acid	+++	+	-	2
	NP-013538	+++	+	+	2
Naturlige stoffer	Trigonelline	+++	-	+	2
	Panthenol	+++	++	+	2
Personlige pleje- produkter	N-Desmethyltramadol	+	+++	+	2
Farmaceutiske stof- fer metabolitter	2-Phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid	+++	++	-	2
Solcreme	8-(4-Sulfophenyl) oc- tanoic acid	-	+++	-	2

\* måske 2,5-dichlorobenzoic acid

På Level 1 er identificeret følgende stoffer jf. TABEL 7:

- 1 sødestof (Saccharin). Saccharin kan være et nedbrydningsprodukt fra en række forskellige pesticider (bl.a. tribenuron-methyl og metsulfuron-methyl), men stoffet kan også stamme spildevandsslam eller gylle.
- 2 endogene metabolitter (cytosine og tyrosine). Endogene stoffer, er stoffer, der naturligt forekommer i kroppen på dyr og mennesker og dermed findes i høje koncentrationer i spildevand.

- 8 pesticider og pesticidmetabolitter. Alle de påviste pesticider og metabolitter har været anvendt i landbruget. Da alle de undersøgte marker har været dyrket konventionelt gennem årene, vil de påviste stoffer med stor sandsynlig stamme fra regelret anvendelse af pesticider på de dyrkede marker.
- 4 industrikemikalier. Kilden til disse stofferne er ukendt, men det er sandsynligt, at stofferne stammer fra spildevandsslam. Nogle af stofferne som 1,3, diphenylguanidine og benzotriazolene findes også i vejvand, da de anvendes i bildæk og antirustmidler.
- 6 farmaceutiske stoffer, som alle formodes at stamme fra spildevandsslam
- 1 vitamin (Nicotinamide, (B3) kan stamme fra forskellige afgrøder (kartofler, ærter, svampe).
- 3 naturligt forekommende stoffer, Theobromine (som forekommer bl.a. naturligt i kakao-bønner, 3-Hydroxybenzoic acid (som både forekommer naturligt og bliver brugt i kemisk syntese og N-Benzylformamide som forekommer i mange madvarer<sup>3</sup>.

Sammenlignes fund af stoffer på Level 1 på tværs af de tre lokaliteter tegner der sig følgende billede:

- På alle lokaliteter påvises saccharin, og det kraftigste signal påvises på prøver fra CRUCIAL, som har modtaget den største mængde spildevandsslam over en længere periode. Det er estimeret, at vandkoncentrationen af saccharin i prøven fra CRUCIAL marken er ca. 0,1 µg/l, hvilket er højt nok til, at target analyser hos Eurofins burde have fundet det, hvilket dog ikke er tilfældet jf. TABEL 6.
- På alle lokaliteter påvises det endogene stof cytosine, der findes i både DNA og RNA fra dyr og mennesker. Data tyder derfor på, at dette stof - ligesom saccharin – kan være en indikator for en overfladepåvirkning fra spildevandsslam, idet markerne ikke har modtaget husdyrgødning.
- På alle lokaliteter påvises 3 af de 4 påviste industrikemikalier. De drejer sig om stofferne: Bisphenol-S, 1,3-diphenylguanidine og 5-methyl-1-H-benzotriazole. Det kraftigste signal påvises i prøven fra CRUCIAL, som har modtaget meget store mængder spildevandsslam. Dog kan stofferne også have andre kilder, som vejvand.
- På alle lokaliteter påvises 3 ud af 6 farmaceutiske stoffer. Det drejer sig om stofferne: koffein, nicotin og theophylline. Det kraftigste signal påvises i prøven fra CRUCIAL, som har modtaget meget store mængder spildevandsslam. Det er estimeret, at vandkoncentrationen af koffein i prøven fra CRUCIAL er ca. 1 µg/l, hvilket er detektionsgrænsen ved target analyser jf. TABEL 6.

På en lokalitet (Vejrup) påvises det farmaceutiske stof Tramadol (en opioid der bruges som smertestillende) i et kraftigt signal. Stoffets metabolit (n-desmethyltramadol) er også påvist blandt Level 2 stofferne i samtlige prøver fra alle tre lokaliteter (Vejrup, Kornerup og CRUCIAL). På Kornerup findes det farmaceutiske stof Venlafaxine (et antidepressionsmiddel som dog også kan bruges som narkotika) i et kraftigt signal.

Som tidligere nævnt er det overraskende, at der ikke blev fundet spor af PFAS ved suspect screening, da PFAS blev detekteret ved target analyserne jf. TABEL 4. Det skyldes sandsynligvis den lille prøvemængde eller sorption af PFAS til partikulærtstof i prøven. Der blev udført TOP-assay<sup>4</sup> analyser som heller ikke resulterede i detektion af PFAS.

<sup>3</sup> [Human Metabolome Database: Showing metabocard for N-benzylformamide \(HMDB0304423\)](#)

<sup>4</sup> TOP assay analyser består af en kraftig oxidation af en prøve som kan gøre at PFAS-forbindelser som ikke er omfattet af PFAS22 analysepakken bliver omdannet de nogle af de målbare PFAS22 forbindelser Antell et al., 1024



# 6. Diskussion

## 6.1 Forventede indhold af PFAS i spildevandsslam

Miljøstyrelsen har i 2023 udgivet data vedr. en opsamling af PFAS-koncentrationer i spildevandsslam i 2021. Data viser en middelkoncentrationen på 15,3 µg/kg TS for PFAS22 og 10 µg/kg TS for PFAS4. 25-75- fraktiler for værdierne kan ses i TABEL 9 og spænder i intervallet 7,6 -18 µg/kg for PFAS22 og 4,1-12 µg/kg TS for PFAS4.

**TABEL 9.** Koncentrationer af PFAS i slamprøver fra 2021 fra Lassen et al. (2024)

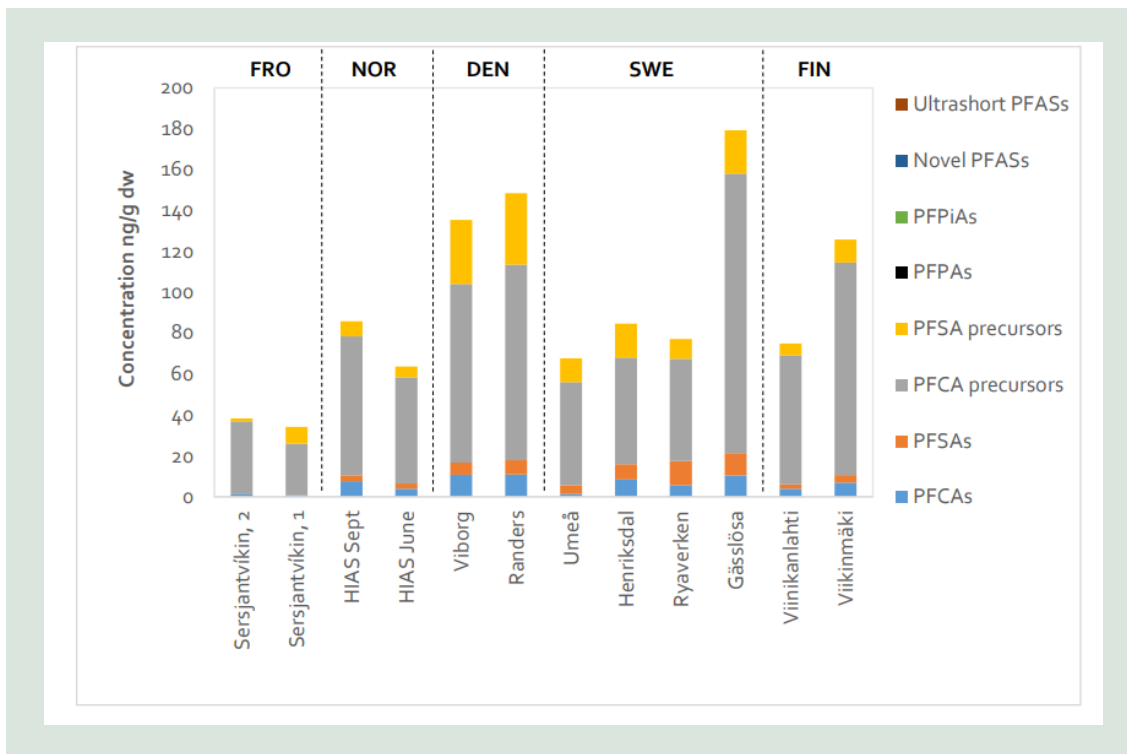
Stof	Koncentration i slam µg/kg		Antal analyser
	Gennemsnit	25-75 % fraktil	
PFAS22	15,3	7,6-18,0	346
PFAS4	10,0	4,1-12,0	374

Tsitonaki og Draborg undersøgte i 2022 arkivprøver fra Avedøre anlæg siden 2003, som nævnt i kapitel 1. Resultaterne viste faldende indhold af PFAS22 fra ca. 120 µg/kg i 2003 til omkring 5 µg/kg TS i 2022 (som vist på FIGUR 4).

### Spildevandsslam indeholder ikke kun PFAS22 stoffer

Jf. et review af litteraturen udført af Lassen et al., 2024 må der forventes et højere indhold af PFAS udover de 22 i analysepakken, hvis man sammenligner EOF værdier (Extractable organic fluorine) med PFAS-indhold. Jf. Lassen et al., 2024, er der ikke udført EOF analyser i prøver fra danske spildevandsanlæg. Et svensk studie (Spaan et al 2023a) fandt, at en stor del (ca. 22%) af EOF i spildevandsslam potentielt set stammer fra farmaceutiske produkter. Spaan et al (2023) vurderede, at ca. 27 % af EOF stammede fra PFAS, mens kun 0,3% stammede fra fluorpesticider. Der blev kun identificeret et fluorpesticid, fludioxonil, hvilket også indikerede, at størstedelen af EOF stammede fra PFAS. Studiet nævner ikke ultra korte PFAS stoffer som TFA (som indeholder kun to kulstofatomer) i deres opgørelse.

Et andet studie udført af Kärman et al., 2019 har udført target analyser for 99 PFAS-forbindelser i spildevandsslam og sammenlignet disse med EOF analyser i prøver fra finske, danske (2), svenske og norske samt færøske renselanlæg. Koncentrationen af  $\sum 99$  PFAS i slamprøver fra to de danske renselanlæg (Viborg og Randers) var 141,9 µg/kg (135,3-148,4), hvilket er cirka 10 gange de påviste koncentrationer af PFAS22 jf. Miljøstyrelsens data fra 2021 (TABEL 9). Prøverne fra Viborg og Randers var udtaget august 2017. Resultater fra Kärman et al viser dermed også, at spildevandsslam generelt indeholder andre typer PFAS end de forbindelser, der udgør PFAS22 analysepakken. Kärman et al. viste, at sammensætningen var domineret af precursorer til PFCA såsom diPAP. Der blev også fundet signifikant indhold af PFSA precursorer som MeFoSAA og EtFoSAA. PFSA og PFCA udgjorde ca. 10 % af den samlede PFAS-mængde med indhold på omkring 15 µg/kg TS. Resultaterne af ovenstående studie er illustreret i FIGUR 14. Vi har i forbindelse med denne rapport gennemgået hvilke stoffer, der er fundet i Kärman et al., 2019. En oversigt over prøverne kan ses i FIGUR 15, hvor stoffer, der er truffet i de højeste koncentrationer, er markeret med rødt. Stoffer der indgår i PFAS 22 pakken er markeret med fed skrift. Figuren viser, at de stoffer, der optræder i højeste koncentrationer (markeret med orange/røde farver) som diPAP- Mousa og EtFoSAA samt 5:3 FTCA, ikke er blandt PFAS22. Det betyder, at de gængse analysepakker (PFAS22), der anvendes i Danmark i 2024 undervurderer indholdet af PFAS-forbindelser i spildevandsslam.



**FIGUR 14.** Koncentration af PFAS fordelt efter kategori i ng/g i prøver fra spildevandsslam i forskellige renselanlæg fra Færøerne, Norge, Danmark, Sverige og Finland. Kilde: Kärman et al., 2019.

Da sammensætning af PFAS-stoffer i spildevandsslam afviger væsentligt fra PFAS22, er der risiko for, at udbringning af slam på landbrugsareal kan føre til påvirkning af grundvandet med andre PFAS-forbindelser end de PFAS22, som vi har analyseret for i dette projekt, og for hvilke, der findes grundvandskvalitetskriterier for i dag. Dog skal det bemærkes, at der ikke er truffet nogle PFAS-forbindelser (hverken PFAS 22 eller andre) i de udførte suspect screening analyser, hverken i prøver fra dette studie, eller i prøver fra GRUMO-boringer (Nanusha et al., 2023). Taget i betragtning at spildevandsslam indeholder nogle af de mest immobile PFAS; forventes en evt. omdannelse til andre mere mobile PFAS-forbindelser også at ske langsomt. Derfor forventes en forholdsvis lav udvaskning af evt. PFAS mod grundvandet.

PFSA og PFCA			PFCA precursorer			PFPIA/PFPA		
	VIBORG	RANDERS		VIBORG	RANDERS		VIBORG	RANDERS
PFPrA	<3,7	<3,7	4:2 FTSA	<0,04	<0,04	PFHxPA	<4	<4
PFBA	<0,04	<0,04	<b>6:2 FTSA</b>	0,11	0,18	PFOPA	<4	<4
PFPeA	i.m.	<0,04	8:2 FTSA	1,82	1,80	PFOPA	<4	<4
PFHxA	1,57	0,69	5:3 FTCA	11,50	16,30	6:6 PFPIA	<0,4	<0,4
PFHpA	<0,2	<0,2	6:2 FTUCA	<0,04	<0,04	6:8 PFPIA	<4	<4
L-PFOA	0,79	0,87	7:3 FTCA	<0,04	3,72	8:8 PFPIA	<4	<4
Br-PFOA	<0,24	<0,24	8:2 FTUCA	i.m.	<0,04	<b>Novel PFAS</b>		
PFNA	0,61	1,92	10:2 FTUCA	i.m.	<0,04		VIBORG	RANDERS
PFDA	5,59	5,15	SAmPAP	i.m.	i.m.	PFECHS	<0,04	<0,04
PFUnDA	2,18	2,15	diSAmPAP	0,15	0,21	ADONA	<0,2	<0,2
PFBS	<0,04	<0,04	4:2 diPAP	<0,04	<0,04	HFPO-DA	<0,4	<0,4
PFPeS	<0,04	<0,04	4:2/6:2 diPAP	<0,04	<0,04	6:2 Cl-PFESA	<0,04	<0,04
L-PFHxS	<0,04	<0,04	2:2/8:2 diPAP	<0,04	<0,04	8:2 Cl-PFESA	<0,04	<0,04
Br-PFHxS	<0,1	<0,1	6:2 diPAP	4,97	4,46	<b>PFSA precursors</b>		
PFHpS	<0,04	<0,04	4:2/8:2 diPAP	<0,04	<0,04		VIBORG	RANDERS
L-PFOS	5,98	7,00	2:2/10:2 diPAP	<0,04	<0,04	PFOSAA	4,11	7,12
Br-PFOS	<0,5	<0,5	8:2 diPAP	7,25	4,89	MeFOSAA	13,50	16,40
PFNS	<0,04	<0,04	6:2/10:2 diPAP	7,47	3,56	EtFOSAA	13,50	11,30
PFDS	<0,04	<0,04	4:2/12:2 diPAP	<0,04	<0,04			
PFDoDS	<0,04	<0,04	6:2/8:2 diPAP	6,17	6,89			
			4:2/10:2 diPAP	<0,04	<0,04			
			8:2/10:2 diPAP	5,26	1,63			
			6:2/12:2 diPAP	4,47	2,52			
			10:2 diPAP	7,79	22,70			
			8:2/12:2 diPAP	17,90	26,20			
			6:2/14:2 diPAP	12,60	<0,2			
			10:2/12:2 diPAP	<0,2	0,83			
			8:2/14:2 diPAP	<0,2	<0,2			
			12:2 diPAP	<0,2	<0,2			
			10:2/14:2 diPAP	<0,2	<0,2			
			8:2/16:2 diPAP	<0,2	<0,2			

**FIGUR 15.** Indhold af PFAS-forbindelser inklusiv precursorer, samt nyere PFAS i prøver fra renseanlæg i Viborg og Randers udtaget i 2017. Data stammer fra Kärman et al., 2019. Farvekoderne er blot for at hjælpe visualiseringer, hvor de højeste koncentrationer i hver kategori er markeret med rødt, og de laveste med grønt. Stoffer der er i PFAS22 pakken er markeret med **fedt**.

## 6.2 Andre miljøfremmede stoffer i spildevandsslam

Ved suspect screening udført på Aarhus Universitet er der i dette projekt identificeret 46 organiske stoffer i prøver fra grundvand under slambehandlede marker, heraf er 25 stoffer identificeret på Level 1 og dermed bekræftet med referencestandard jf. TABEL 7. I dette afsnit sammenholdes fund fra dette studie med fund af miljøfremmede stoffer fra andre relevante studier af spildevandsslam, grundvand og drikkevand for dermed at vurdere, hvorvidt der er en kobling mellem udbringning af spildevandsslam og fund af miljøfremmede stoffer i grundvandet.

### **Sammenfald mellem stoffer fundet i dette studie og tidligere studier af spildevandsslam**

Nanusha et al. (2024) har udført suspect screening analyser, samt ICP-MS analyse i prøver fra spildevandsslam fra 5 danske spildevandsanlæg i Roskilde, Måløv, Ejby Mølle, Egå, og Herning. Der blev udtaget 15 prøver fra hvert anlæg i 2021. Der er fundet spor af 21.000 kemiske forbindelser. Efter en detaljeret dataanalyse er der identificeret 120 organiske forbindelser bestående af lægemidler, pesticider, flammehæmmere, andre industrikemikalier og en række naturligt forekommende forbindelser. Heraf er 63 af stofferne identificeret på Level 1, svarende til target analyser. Ni af stofferne, der er påvist i slamprøverne fra de fem danske spildevandsanlæg, er genfundet i prøver fra grundvand under de slambehandlede marker i dette projekt. Af dem er seks stoffer påvist i både dansk spildevandsslam og i grundvand under slambehandlede marker på Level 1 (dvs. svarende til target analyser). Disse stoffer er koffein, nicotin, benzotriazol, lægemidlerne tramadol og venlafaxine, samt industrikemikallet 1,3 diphenylguanidine, som kan stamme fra gummi og bildæk. Derudover er tre stoffer påvist i Level 2, det drejer sig om tramadols nedbrydningsprodukt (n-desmethyltramadol), samt industrikemikalierne 1-naphthylamine og bisphenol S.

Stofferne koffein, og venlafaxine, fundet i grundvandet under Vejrup og CRUCIAL i dette studie, er også fundet i tidligere suspect screening analyser af jordprøver fra CRUCIAL, i forsøgsmarker gødet med spildevandsslam og human urin (Gravert et al., 2021). Dette sammenfald understreger sammenhængen mellem stofferne i spildevandsslam- jord gødet med spildevandsslam og det underliggende grundvand. Det bemærkes desuden, at venlafaxine ligesom tramadol er lægemidler, der anvendes af mennesker (og dermed ikke forventes at være tilstedet i andre organiske gødninger som eksempelvis gylle).

8 ud af de 9 stoffer, der påvises i både slam og grundvandsprøver, er påvist i slamprøver fra alle 5 af de undersøgte rensesanlæg. Det kan derfor forventes, at stofferne vil være tilstede i al spildevandsslam fra danske rensesanlæg. Stoffet 1-naphthylamine er det eneste stof, som blev fundet i kun 2 af de 5 rensesanlæg jf. Nanusha et al. (2024). Koncentrationerne af de påviste stoffer i slamprøverne har varieret mellem 6,8 ng/g for venlafaxine til over 500 ng/g for koffein (se TABEL 10).

I nærværende studie er der kun analyseret prøver fra marker som har modtaget spildevandsslam. Markerne har ikke modtaget husdyrgødning. Det er en svaghed ved projektet, at det ikke var muligt at udføre målinger ved nærliggende referencemarkere for at kunne sammenligne om stofferne kan stamme fra andre kilder (industri, forurening med mere). Det bemærkes, at ud af de seks stoffer som er påvist på level 1 i både spildevandsslam fra danske anlæg og i grundvand under slambehandlede marker, er der 2 stoffer (1,3, diphenylguanidine og benzotriazol), der kan stamme fra andre kilder, (vejvand/ motorvejen), idet stofferne bruges hhv. i bildæk og i antirust middel. Det understreges, at koffein, nicotin, tramadol, og venlafaxine kun bruges af mennesker.

### **Vurdering af stoffernes sandsynlighed for at blive udvasket til grundvandet**

I dette studie har vi med baggrund i de log P værdier fra Nanusha et al (2024) for de 120 identificerede stoffer i spildevandsslam udført en indledende vurdering af stoffernes mobilitet i jord, og dermed risiko for nedsivning til grundvandet. Der er lavet en grov antagelse om at ligning

$\log K_{oc} = 0,69 \cdot \log P + 0,22$  (jf. Piwoni et al., 1990),

er gældende for alle stoffer, velvidende at der kan være undtagelser. På baggrund af denne antagelse, er det vurderet, at 103 af de 120 fundne stoffer i spildevandsslam er mobile i jord (og kan dermed udvaskes til overfladevand og grundvand) ( $\log K_{oc} < 3$ ), hvoraf 24 må vurderes at være meget mobile ( $\log K_{oc} < 1$ ). En tabel med de relevante beregninger er vedlagt i bilag 5. Blandt de meget mobile stoffer finder man koffein og nicotin, begge påvist i Level 1. Alle

9 stoffer, som er fundet i prøver fra spildevandsslam og genfundet i grundvandet ved slambehandlede marker, er mobile. I TABEL 10 ses en oversigt over, i hvilke niveauer disse 9 stoffer er fundet i spildevandsslam.

### **Sammenfald mellem stofferne påvist i dette studie, i spildevandsslam og i andre studier af grundvand og drikkevand**

Flere af ovenstående 9 stoffer er også truffet i suspect screening analyser af grundvand fra GRUMO-boringer udført i 2023 af Aarhus Universitet og Miljøstyrelsen (Nanusha et al. 2023). I GRUMO-boringer er stofferne venlafaxine, 1,3-diphenylguanidine, nicotinamide og atraziner, samt flere pesticidmetabolitter (terbutylazines og terbumetons nedbrydningsprodukter) påvist, som også er truffet i dette studie. Pesticider og pesticidmetabolitterne kan stamme fra den regelrette anvendelse af pesticider i landbruget. Lægemidlet venlafaxine og industrikemikaliet 1,3 diphenylguanidin stammer fra udbringning af spildevandsslam, da stofferne ikke har andre oplagte kilder.

InSa-Drikkevand har udført suspect screening analyser til karakterisering af drikkevand (afgang vandværk) fra et bredt udsnit af 17 danske vandværker (Jakobsen/InSa-Drikkevand, 2024). Der er identificeret 39 stoffer på Level 1 (bekræftet), 28 stoffer på Level 2 og 256 på Level 3. Alle stoffer findes i niveauer under 0,1 µg/l. Blandt de stoffer, der er truffet i vandværkerne, er nedbrydningsprodukter fra terbutylazine, nicotinamide, lægemidler som phenazone, primidone, topiramate og carbamezapine, et PFAS stof perfluorobutylsulphonamide, og industrikemikalierne 1,3 diphenylguanidine og 5-Methyl-1H-benzotriazole. De sidste 2 er blandt de 9 stoffer fundet i både spildevandsslam (Nanusha et al., 2023) og grundvand under slambehandlede marker (dette projekt). Derfor må spildevandsslam formodes at være en overvejende sandsynlig kilde til disse stoffer i drikkevandet.

I TABEL 10 er der samlet oplysninger om alle 9 stoffer, som er truffet i både spildevandsslam og i grundvand fra slambehandlede marker ved dette studie. De påviste koncentrationer er angivet for de stoffer, der var tilgængelige. Derudover kan man i tabellen se, om stofferne også er påvist i prøver fra GRUMO-boringer (Nanusha et al., 2023) eller i prøver fra InSa-Drikkevands vandværker (Nanusha et al., in prep). Det skal bemærkes, at dataanalyser i de forskellige datasæt har været forskellige, hvilket betyder, at der kan være andre stoffer i begge datasæt, som ikke umiddelbart fremgår af de nuværende resultater. Af tabellen fremgår bl.a., at stoffet 1,3'-Diphenylguanidine er i spildevandsslam, det terrænære grundvand under slambehandlede marker, i GRUMO-boringer og i drikkevandet. Det viser, hvordan stoffer kan transportere sig igennem jorden til vandhanen. Derudover ses det tydeligt, at flere stoffer fra spildevandsslam genfindes i grundvandet under de slambehandlede marker. Niveauerne er ikke kvantificeret i dette studie, men fundene viser, at der er behov for flere studier som skal undersøge omfang af påvirkning af grundvandet med bl.a. humane lægemidler, som findes i spildevandsslam.

**TABEL 10.** Stoffer påvist i både prøver fra slam (jf. Nanusha et al., 2024) og prøver fra grundvand under de 3 slambehandlede marker (dette projekt), samt angivelse om hvorvidt stoffer også er påvist i prøver fra GRUMO eller drikkevand. **Fed skrift** angiver om stoffer er bekræftet i det konkrete datasæt (Level 1).

Stof	Gennemsnitlig Koncentration i slamprøver ng/g (Nanusha et al. 2024)	Fundet i dette projekt			Fundet i GRUMO Gennemsnitlig Koncentration /Fundhyppighed (Nanusha et al. 2023)	Fundet i drikkevand afgang vandværk Gennemsnitlig Koncentration /Fundhyppighed  (Jakobsen/InSa-Drikkevand, 2024)	Log Koc <sup>1</sup>
		CRUCIAL	Vejrup	Kornerup			
Koffein	<b>X</b> 564,0 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			-0,16
Nicotin	<b>X</b> 18,5 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			1,02
1H-Benzotriazole	<b>X</b> 340 ng/g			<b>X</b>			1,12
5-Methyl-1H-benzotriazole	<b>X</b> 281 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b> 0,7 ng/l (29%)	1,47
N-Desmethyl-tramadol	<b>X</b> 26,9 ng /g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			1,65
1-Naphthylamine	<b>X</b> 489 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			1,69
Bisphenol S	<b>X</b> 37,3 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>(X) bisphenol A</b> 66,5 ng/l (4,9 %)		1,82
Tramadol	<b>X</b> 58,1 ng/g		<b>X</b>				1,91
Venlafaxine	<b>X</b> 6,8 ng/g			<b>X</b>	<b>X*</b> (nedbrydningsprodukt Venlafaxine Oxide 7,7 ng/l (23,5%))		2,11
1,3'-Diphenylguanidine	<b>X</b> 73,4 ng/g	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b> 13ng/l (80%)	<b>X</b> 0,0008 ng/l (59%)	2,38

*LogKoc er beregnet efter Piwoni et al 1990*

### 6.3 Andre kilder til medicinrester i grundvandet

I dette studie har der ikke været fokus på medicinrester fra husdyrgødning. Husdyrgødning kan indeholde veterinære medicinrester, som potentielt kan udgøre en risiko for grundvandsressourcen. Der er tidligere udført et sammenlignende studie af risici forbundet med udbringning af husdyrgødning og spildevandsslam (Magid et al., 2020). Her identificerede forfatterne manglende data vedrørende rester af veterinærmedicin i husdyrgødning og disse resters overførsel til afgrøder som et væsentligt videnshul.

Der udbringes langt mere husdyrgødning end spildevandsslam, og til forskel fra spildevandsslammet udbringes husdyrgødning 'urensset'. Der er derfor behov for at undersøge udvaskning af veterinærmedicin til grundvandet.

## 7. Konklusion og anbefalinger

I dette studie er det undersøgt hvorvidt spildevandsslam kan være en kilde til forurening af grundvandet med miljøfremmede stoffer. Oprindeligt var der særlig fokus på PFAS, men undervejs i projektet er der kommet mere fokus på andre stoffer, som f.eks. lægemidler.

Det er ved dette studie, og ved tidligere studier (Draborg og Tsitonaki 2022; Jensen et al., 2023) vist, at niveauerne af PFAS22 i grundvand under marker behandlet med spildevandsslam er forholdsvis lave.

Dette vurderes at have flere årsager:

- Sammensætning af spildevandsslam, historisk og i dag, indeholder flest af de langkædede PFAS, som overordnet set må anses for at være meget lidt mobile. Dette kan forklare hvorfor der, trods fund af PFAS i jordprøver fra de øverste meter, kun findes lave koncentrationer i det underliggende grundvand.
- Sammensætning af PFAS i spildevandsslam er domineret af stoffer såsom diPAP og FTSA (Kärrman et al., 2019), der ikke er inkluderet i PFAS22 pakken. Disse stoffer kan på sigt omdannes til nogle af PFAS22 stofferne. Det vurderes, at denne omdannelse sker tilpas langsom, eller i en grad som ikke har givet anledning til høje koncentrationer af PFAS22, selv i marker, hvor der er udbragt ekstrem store mængde spildevandsslam i over 20 år (Draborg og Tsitonaki, 2022).

Udover PFAS-analyser er der i dette projekt udført suspect screening analyser af grundvandsprøver fra de slambehandlede marker. Der blev påvist mange miljøfremmede stoffer i prøverne, herunder lægemidler som tramadol og venlafaxine. Der er desuden påvist indhold af flere pesticider, som vurderes at stamme fra den regelrette landbrugsanvendelse, samt indhold af flere industrikemikalier, som kan stamme fra vejvand og/eller fra spildevandsslam. Resultaterne er sammenstillet med resultater fra andre projekter, som har udført suspect screening analyser af prøver af spildevandsslam fra danske anlæg, GRUMO-boringer og drikkevandet (afgangsvand fra vandværk). Der ses flere gengængere mellem de stoffer, der påvises i de fire matricer, hvilket tyder på, at spildevandsslam formodes at være kilden til en række medicinstoffund i grundvandet. Derudover ses det tydeligt, at flere stoffer fra spildevandsslam genfindes i grundvandet under de slambehandlede marker. Niveauerne er ikke kvantificeret i dette studie, men observationerne viser, at der er behov for flere studier, som skal undersøge omfang af påvirkning af grundvandet med bl.a. humane lægemidler som findes i spildevandsslam.

Projektet har også undersøgt, hvordan forskellige kommuner håndterer forespørgsler om udbringning af spildevandsslam. Der er store forskelle mellem de interne procedurer for, på hvilke arealer man accepterer udbringning af spildevandsslam i kommunerne. Forskellene er til frustration for både kommuner, formidlere af spildevandsslam og ikke mindst landmændene. BNBO'er er de arealer de fleste kommuner nævner, hvor der enten ikke accepteres udbringning af spildevandsslam, eller hvor anmeldelserne som minimum vil blive gransket nærmere. Her nævner 3 ud af 15 kommuner, at en anmeldelse indenfor BNBO vil blive særligt vurderet, og ofte vil ende med et afslag, mens 6 ud af de 15 kommuner fortæller, at en anmeldelse indenfor BNBO vil give et direkte afslag. Kun 5 af kommunerne har interne retningslinjer omkring håndtering af anmeldelserne og inddragelse af grundvand/drikkevandsafdelingen.

Det anbefales derfor:

- at det overvejes om analysepakken for miljøfremmede stoffer i spildevandsslam, der udbringes på landbrugsjord, udvides til også at omfatte relevante medicin stoffer og industrikemikalier. Dette studie er kun et første trin i den retning, og der er behov for, at der igangsættes flere studier for at identificere hvilke stoffer, der er relevant at monitorere for.
- at der udføres en risikovurdering af relevante medicin stoffer og andre industrikemikalier for at afgøre, om der forsat skal udbringes spildevandsslam på sårbare grundvandsdannende oplande. En lignende vurdering er nødvendig for andre typer gødning såsom husdyrgødning.
- at der arbejdes videre med at kvantificere niveauerne af miljøfremmede stoffer under de slambehandlede marker og med sammenligningsstudier, hvor der også udføres målinger i referencemarken som ikke har modtaget spildevandsslam.
- at kommuner opfordres til brug af et GIS baseret registreringssystem, så der kan skabes et bedre og nemmere overblik over udbringningerne.



## 8. Referencer

Antell, E. H., Yi, S., Olivares, C.I., Ruyle, B.J., Kim, J.T., Tsou, K., Dixit, F., Alvarez-Cohen, L., Sedlak, D.L., (2024): The Total Oxidizable Precursor (TOP) Assay as a Forensic Tool for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Source Apportionment. ACS EST Water 4, 948–957 (2024).

Baun, A., Bjerg, P.L., Jensen, J., Jensen, T.K., Lyngberg, A., Strobel, B.W., Vinggaard, A.M., Vorkamp, K., Trier, X. (2023): *Begrænsning af menneskers og miljøets eksponering for PFAS i Danmark – Del 1: Identifikation af videnshuller*. Rapport fra Videnstaskforce for PFAS-forurening

Bossi, Rossana, (2024): *Målinger af PFAS i luft og nedbør*. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s. - Teknisk rapport nr. 313

Danish EPA (2022): *Non-targeted and suspect screening of sewage sludge HITLIST4*, Environmental Project 2212, September 2022

Draborg og Tsitonaki (2023): *Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam*. WSP: Projektnummer 22001604

Gassmann, M., Falk, S., Brunn, H., Liebenehm-Axmann, A., Rückert, H., Berthold, G., Stahl, T., (2019): *PFAS – a new class of emerging agrochemicals?* Geophysical Research Abstracts 2019, Vol. 21, p1-1

Gravert, T. K. O.; Vuaille, J.; Magid, J.; Hansen, M. (2021): *Non-target analysis of organic waste amended agricultural soils: Characterization of added organic pollution*. Chemosphere 2021, 280, 130582, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130582

Haagensen, K. (2023): *Redegørelse for kilder til 2,5-dichlorbenzen-sulfonsyre*. Rapport udarbejdet for HOFOR A/S af WSP ([Redegørelse for kilder til \(insa-drikkevand.dk\)](#))

Hvidovre kommune (2023): *Spildevandsplan spildevandsplan-tilgængelig-sep-2023.pdf* (hvidovre.dk)

Jakobsen, Ida B. (2024): *Non-target analyse af drikkevand*, Præsentation på Vintermøde om Jord og Grundvandsforurening marts 2024, ATV Jord og Grundvand

Jensen, J., Fauser, P., Sanderson H., Vorkamp, K., Andersen, R., Rasmussen, D., (2023): *Derivation of cut-off values for PFAS in sewage sludge* Revised edition, March 2023, Danish EPA Environmental project 2023. ISBN: 978-87-7038-497-1

Johnson G.R: (2022): *PFAS in soil and groundwater following historical land application of bio-solids*, Water Research, Volume 211, 118035,ISSN 0043-1354,

Kärrman, A., Wang, T., Kallenborn, R. (2019). *PFASs in the Nordic environment. Screening of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and extractable organic fluorine (EOF) in the Nordic environment*. TemaNord 2019:515. Nordic Council of Ministers.

Lassen, C., Maag, J., Krag, A., and Dau, M.S (2024): *Substance flow analysis for PFAS*, COWI A/S, Final Report, Published by Ministry of Environment Denmark

Madsen, H. M og Lenschow S. R.: (2024): *Er der sammenhæng mellem opkoncentrering af PFAS i havskum og menneskers PFAS-niveauer i blod?*, Præsentation i ATV Vintermøde for jord og Grundvandsforurening, marts 2024 <https://www.atv-jord-grundvand.dk/wp-content/uploads/2024/03/Modul-1-spor-3-Mette-H.-Madsen-og-Soeren-Rygaard-Lenschow-PFAS-i-havskum.pdf>

Magid, J., Pedersen K.E., Hansen, M., Cedergreen N., Brandt, K.K., (2020): *Chapter Six - Comparative assessment of the risks associated with use of manure and sewage sludge in Danish agriculture*, Advances in Agronomy, Volume 164 pp. 289–334.  
doi:10.1016/bs.agron.2020.06.006

Miljøstyrelsen (2012): Environmental Project No. 1406 2012, *Risk evaluation of five groups of persistent organic contaminants in sewage sludge*. <http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2012/05/978-87-92779-69-4.pdf> 978-87-92779-69-4

Miljøstyrelsen, Affaldsstatistik 2021, Revideret udgave Miljøprojekt nr. 2247 Oktober 2023

Miljøstyrelsen (2021): *Miljøstyrelsen anbefaler loft over PFAS i spildevandsslam* (mst.dk) Nyhedsbrev 18-10-2021

Nanusha, M. Y., Frøkjær, E. E., Søndergaard, J., Mørk Larsen, M., Schwartz Glottrup, C., Bruun Nicolaisen, J. & Hansen, M. (2024): *Quantitative Non-targeted Screening to Profile Micropollutants in Sewage Sludge Used for Agricultural Field Amendments*, Environ. Sci. Technol. 2024, 58, 22, 9850–9862, <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c01441>

Nanusha, M. Y., Frøkjær, E. E., Rüz Hansen, H., Bonde Rasmussen, S., Bruun Nicolaisen, J. & Hansen, M.. (2023): *Explorative Quantitative Nontarget Analysis Reveals Micropollutants in Danish Groundwater*, I: ACS EST Water. 3, 12, s. 3992-4003

NIRAS (2023): *Undersøgelser af kystnær PFAS-forurening af jord- og grundvand*, Den Syddanske Udviklingspulje, oktober 2023

Pedersen, K.E., Brandt, K.K., Hansen, M., Cedergreen, N., Magid, J., (2019): *Assessment of risks related to agricultural use of sewage sludge, pig and cattle slurry – knowledge synthesis*, December 2019, DTU Food og Københavns Universitet

Piwoni MD, Keeley JW. (1990); *Basic concepts of contaminant sorption at hazardous waste sites*. EPA/540/4-90/053 October 1990 Groundwater Issue, pp. 1–7. 1990, [https://www.epa.gov/sites/production/files/201506/documents/basic\\_concepts\\_sorption\\_haz\\_site.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/201506/documents/basic_concepts_sorption_haz_site.pdf)

Spaan, K.M., Seilitz, F., Plassmann, M.M., de Wit, C.C., Benskin, J.P. (2023): *Pharmaceuticals account for a significant proportion of the extractable organic fluorine in municipal wastewater treatment plant sludge*. Environ. Sci. Technol. Lett., 10, 4, 328-336.

Strand, J., Bossi, R., Sortkjær, O., Landkildehus, F. & Larsen, M.M. (2007): *PFAS og organotinforbindelser i punktkilder og det akvatiske miljø. NOVANA screeningsundersøgelse*. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU nr. 608NOVANA screeningsundersøgelse

Tsitonaki (2012): *Kortlægning af risikostoffer i spildevandsslam med fokus på evt. uacceptabel påvirkning af grundvandet*, Udarbejdet af Orbicon for Københavns Energi, 3. januar 2012

Tsitonaki et al. (2023): *Overblik over viden om PFAS til vurdering af grundvandets mulige påvirkning af overfladevand*. Rapport udarbejdet af WSP for Miljøstyrelsen.

WSP (2024): *Kommunernes praksis vedr. Spildevandsslam*. Notat, udarbejdet af WSP for HOFOR og Vandcenter Syd, 26-1-2024

# 9. Bilag

[Bilag 1: Analyserapporter fra akkrediterede analyser](#)

[Bilag 2A: Prøvetagningsskemaer og kort over Veirup](#)

[Bilag 2B: Kort over markplots på CRUCIAL](#)

[Bilag 3: Analyserapporter fra suspect screening analyser \(Eurofins\)](#)

[Bilag 4: Analyserapport fra suspect screening analyser \(Aarhus University\)](#)

[Bilag 5: Tabel med beregning af logKoc værdier for stoffer fundet i spildevandsslam jf. Nanusha et al. 2024](#)

### **Påvirkning af grundvandet fra spildevandsslam**

Formålet med dette projekt er at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med miljøfremmede stoffer. Der er udført undersøgelser af det terrænnære grundvand vha. sugeceller på almindelige landbrugsmarker der har modtaget spildevandsslam og der er desuden analyseret prøver af det terrænnære grundvand fra forsøgsmark CRUCIAL der har modtaget meget store mængde spildevandsslam. Der er udført kemiske analyser ved kommercielle laboratorier og suspect screening analyser ved Århus Universitet.

Det er ved dette studie, og ved tidligere studier vist, at niveauerne af PFAS22 i grundvand under marker behandlet med spildevandsslam er forholdsvis lave. Ved suspect screening analyser af grundvandsprøver fra de slambehandlede marker er der påvist mange miljøfremmede stoffer i prøverne, herunder lægemidler som tramadol og venlafaxine. Resultaterne er sammenstillet med resultater fra andre projekter, som har udført suspect screening analyser af prøver af spildevandsslam fra danske anlæg, GRUMO-boringer og drikkevandet (afgangsvand fra vandværker). Der ses flere gengangere mellem de stoffer, der påvises i de fire datasæt, hvilket tyder på, at spildevandsslam er en sandsynlig kilde til en række medicin-stoffer i grundvandet. Niveauerne er ikke kvantificeret i dette studie, men fundene viser, at der er behov for flere studier som skal undersøge omfang af påvirkning af grundvandet med bl.a. humane lægemidler som findes i spildevandsslam.



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)