

Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam



Projekt navn	Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam
Kunde	Genanvend Biomasse
Projektleder	Katerina Tsitonaki
Projekt nummer	22001604
Udarbejdet af	Helene Draborg, Katerina Tsitonaki
Kvalitetssikret af	Katerina Tsitonaki, Kim Haagensen (WSP) Jakob Magid (Københavns Universitet),
Version	1
Versionsdato	15-12-2022
Første udgivelsesdato	15-12-2022

Indholdsfortegnelse

FORORD	2
SAMMENFATNING	3
1 BAGGRUND OG FORMÅL	5
1.1 FORMÅL.....	5
2 FELTLOKALITET	6
2.1 DATA OM DET UDBRAGTE SPILDEVANDSSLAM	6
3 UNDERSØGELSENS OMFANG	8
4 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI	10
5 RESULTATER	13
5.1 ANALYSERESULTATER FOR JORD	13
5.2 ANALYSERESULTATER FOR VAND	15
5.3 ANALYSERESULTATER FOR SPILDEVANDSSLAM.....	16
6 KONCEPTUEL MODELLER	18
7 DISKUSSION	21
7.1 SPILDEVANDSSLAM – TIDSLIG UDVIKLING.....	21
7.2 STOPSAMMENSÆTNING	22
SPILDEVANDSSLAM.....	22
JORD	22
GRUNDEVAND.....	23
7.3 BEREGNET KONCENTRATION I VAND.....	25
7.4 MASSEBALANCE FOR PFAS	26
8 KONKLUSION	27
9 REFERENCER	29

Bilag

Bilag 1	Konceptuel model med angivelse af forureningskoncentrationer i jord mv.
Bilag 2	Konceptuel model med angivelse af forureningskoncentrationer i grundvand mv.
Bilag 3	Boreprofiler
Bilag 4	Prøvetagningsskemaer
Bilag 5	Analyserapporter
Bilag 6	Beregninger for massebalancen

Forord

Dette projekt er finansieret af Brancheforening Genanvend Biomasse med støtte fra flere af foreningens medlemmer og andre organisationer.

Projektet er bl.a. finansieret af

- Fors A/S
- Fredericia Spildevand A/S
- Billund Energi A/S
- Hedensted Forsyning
- HedeDanmark a/s
- Miljøservice
- Marius Pedersen
- Vandcenter Syd
- Vandmiljø Randers
- Mariagerfjord Vand
- Hjørring vandselskab
- Vejle Spildevand
- Kalundborg Forsyning
- Miljøstyrelsen
- Danva
- Spildevandsteknisk forening

Projektet er udført WSP Danmark v. Katerina Tsitonaki, Helene Draborg og Kim Haagensen.

Københavns Universitet v. Jakob Magid har stillet CRUCIAL forsøgsarealet til rådighed samt bidraget med kvalitetssikring og sparring til projektet.

Formålet med projektet har været at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med PFAS. Desuden er projektets formål at tilvejebringe data om PFAS skæbne i jorden, der kan tages i betragtning i forbindelse med modelberegninger for nedsivningen og som input til arbejde med de kommende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til landbrugsformål.

Sammenfatning

Genanvendelse af spildevandsslam til jordbrugsformål er en vigtig del af den generelle affaldsstrategi og giver god samfundsøkonomi. Der er behov for mere viden om hvordan PFAS i spildevandsslam opfører sig i jorden og på vej ned til grundvandet. På nuværende tidspunkt findes der ikke mange data, der kan understøtte modelberegningerne for nedsivning af PFAS fra slambehandlede marker.

Dette arbejde har haft til formål at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med PFAS. Desuden var projektets formål at tilvejebringe data om PFAS transport i jorden, der kan tages i betragtning i forbindelse med modelberegninger for nedsivningen og som input til arbejde med de kommende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til landbrugsformål.

Der er udført feltundersøgelser på CRUCIAL markerne som har været intensivt behandlet med slam siden 2003

- Der er undersøgt tre typer af markplot relateret til udnyttelse af spildevandsslam; (1) slambehandlet mark, som har fået høj dosering, (2) slambehandlet mark, som har fået ekstremt høj dosering, og (3) kontrolområde, som ikke har fået tilført slam. Både type 1 og type 2 repræsenterer et worst-case scenarie ift. udbragte slammængder.
- Der er udført i alt 10 borer til varierende dybder (8-18 m u.t.), hvorfra der er udtaget jordprøver i 0,3, 0,5 og 1 m u.t og derefter for hver meter til boringernes slutdybde. Jordprøverne blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,5 µg/kg TS.
- Geologien på CRUCIAL består af en sandet, kalkholdig brun-grå moræneler mellem ca. 2-9 m u.t med våde sand-/gruslag samt sandslirer af varierende tykkelse. Moræneleren er underlejret af et vådt sand-/gruslag som starter i ca. 9-11 m u.t., hvorefter kalken starter ved en dybde på mellem 15,7-18,0 m.
- Der er udtaget vandprøver fra det terrænnære grundvand, knyttet til lokale sandslirer i moræneler og fra det primære magasin (sand/grusmagasinet) der overlejrer kalkmagasinet.
- Vandprøverne fra borerne blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,3 ng/l.
- Der er også analyseret arkivprøver af det udbragte slam fra 2003 og frem til 2022. Slamprøverne blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,5 µg/kg TS.
- ALS Global blev benyttet som hovedlaboratoriet, imens udvalgte duplikatprøver af jord, vand og slam også blev sendt til analyse hos Eurofins.

De vigtigste konklusioner er sammenfattet i det følgende:

- Der er ikke målt koncentrationer over Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier i nogle af jordprøverne.
- Jordforureningen med PFAS under slambehandlede marker vurderes at være afgrænset til den øverste 1 m u.t.
- Der påvises højere PFAS koncentrationer i mere intensiv behandlet jord, dvs. højere koncentrationer af PFAS i jordprøver fra plots der har fået ekstremt høj dosering, ift testplots som har fået høj dosering.
- PFOS og PFOA er de dominerende stoffer i jordprøver, dog træffes der også andre, mere langkædede stoffer med mere end otte C-F bindinger i molekylet.

- Der er udtaget i alt 14 vandprøver. Der påvises PFAS i kun 3 af vandprøverne. De to af vandprøverne repræsenterer det terrænnære grundvand, mens en enkelt vandprøve er udtaget i det primære grundvandsmagasin.
- Der er påvist op til 4,9 ng/l for sum af PFAS 4 i det terrænnære grundvand og 0,88 ng/l for sum af PFAS 4 i sandmagasinet. De påviste koncentrationer af PFAS i grundvand ligger under Miljøstyrelsens kvalitetskriterier for grundvand i 2/3 af prøverne. Kun en vandprøve overskrider drikkevandskvalitetskriteriet for sum af 4 PFAS med ca. en faktor 2. Vandprøven stammer fra en testplot som har modtaget høj dosis af spildevandsslam, svarende til 75 års lovlig udbringning.
- PFOS er det dominerende stof i vand.
- Der er en rimelig overensstemmelse mellem jord og vand, dog med overvægt at langkædede PFAS forbindelser i jord vs. kortere forbindelser i vand. Der er en god overensstemmelse i duplikater fra de to laboratorier i alle typer prøver (slam, vand og jord)
- Koncentrationsniveauet af PFAS 22 i det udbragte spildevandsslam er faldet fra år 2003 (113 µg/kg TS for PFAS 22) 42 µg/kg TS til 2020 og ned til 8,9 µg/kg TS i 2022, og det forventes at falde yderligere grundet øget opmærksomhed på PFAS, heraf yderligere restriktioner og udfasning af flere PFAS forbindelser.
- De påviste niveauer af PFAS i grundvandet er ca. 525-1650 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.
- Forureningsmasse af PFAS i jorden på CRUCIAL markerne på baggrund af de målte koncentrationer er op til 10 gange større end den tilførte mængde af PFAS, hvis man tager udgangspunkt i de målte PFAS koncentrationer i spildevandsslam. Det kan betyde at slam indeholder en række præcursorer til PFAS 22, som ikke kan måles ved standard metoden, eller en række ikke ekstraherbare PFAS 22, som derefter bliver frigivet/nedbrudt til nogle af PFAS 22 forbindelserne.

Der er fortsat behov for flere studier for at styrke grundlag for prognosen af nedsivning af PFAS på flere forskellige jordtyper og flere typer slam. Overordnet set kan det på baggrund af dette studie konkluderes, at der sker en udvaskning af PFAS til grundvand under de slambehandlede marker, som dog er meget mindre end det teoretisk forventede udvaskning.

1 Baggrund 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 /1/. Landbruget forvalter omkring 2/3 af Danmarks samlede areal, og potentialet for recirkulation af næringsstoffer fra bl.a. spildevandsslam er derfor stort. Da arealerne ofte er sammenfaldende med drikkevandsinteresser, er der behov for særlig agtpågivenhed i relation til mulige risici overfor grundvandskvaliteten ved udspredning af slam.

Miljøstyrelsen har sat en foreløbig vejledende grænseværdi for summen af de fire PFAS-stoffer (PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS) på 0,01 mg/kg TS samt en grænseværdi for summen af 22 PFAS-stoffer på 0,4 mg/kg TS. De vejledende grænseværdier tager udgangspunkt i det opdaterede jordkvalitetskriterium fra juli 2021. De opdaterede jordkvalitetskriterier bygger på et acceptabelt bidrag fra jord for et 1-3 årig barn ved direkte indtagelse af jord, hvor man antager, at barnet spiser 0,1 g jord dagligt /7/. Værdierne tager således ikke hensyn til risikoen for udvaskning til grundvandet, hvor der i juli 2021 også blev indført nye skærpede grænseværdier for grundvand på 0,002 µg/l for summen af 4 PFAS stoffer og 0,1 µg/l for summen af 22 PFAS stoffer.

Et amerikansk studie af PFAS under 4 forskellige slambehandlede jorde, hvor slam var udbragt i en periode på 6-15 år, viste indhold af PFAS over hele den umættede zone samt i det underliggende grundvand i 17 meters dybde i koncentrationer op til ca. 29 ng/l for PFOA /5/. I Tyskland ses et hyppigt påvisningsniveau (>90%) af PFAS i grundvandet under landbrugsarealer /6/. Dette kan være tegn på, at PFAS er blevet introduceret til grundvandet over store arealer, i lighed med pesticider i forbindelse med regelret anvendelse på landbrugsjord.

Der er behov for mere viden om hvordan PFAS i spildevandsslam opfører sig i jorden og på vej ned til grundvandet. På nuværende tidspunkt findes der ikke mange data, der kan understøtte modelberegningerne for nedsivning af PFAS fra slambehandlede marker.

Inden de vejledende grænseværdier blev indført i 2021, har der ikke været krav til indhold af PFAS i spildevandsslam. Det vil sige, at slam indeholdende PFAS kan være spredt på landbrugsjord tidligere, idet PFAS har været anvendt i adskillige produkter siden midten af 1960'erne. I slam fra kommunale rensningsanlæg i Danmark, er der tidligere målt 12-150 µg/kg TS af 7 PFAS-forbindelser; PFOS, PFOSA, PFHxS, PFOA, PFNA, PFDA og PFUnA /8/. I 2022 er det gennemsnitlige indhold af PFAS i dansk spildevandsslam 8,1 µg/kg TS PFAS 4 og 12,2 µg/kg TS PFAS 22 /11/

Det er således nødvendigt at belyse, hvordan indhold af PFAS i slam før og efter indtrædelse af de vejledende grænseværdier kan påvirke eller har påvirket grundvandet.

1.1 Formål

Formålet med nærværende projekt er at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med PFAS. Desuden er projektets formål at tilvejebringe data om PFAS opførelse i jorden, der kan tages i betragtning i forbindelse med modelberegninger for nedsivningen og som input til arbejde med de kommende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til landbrugsformål.

2 Feltlokalitet

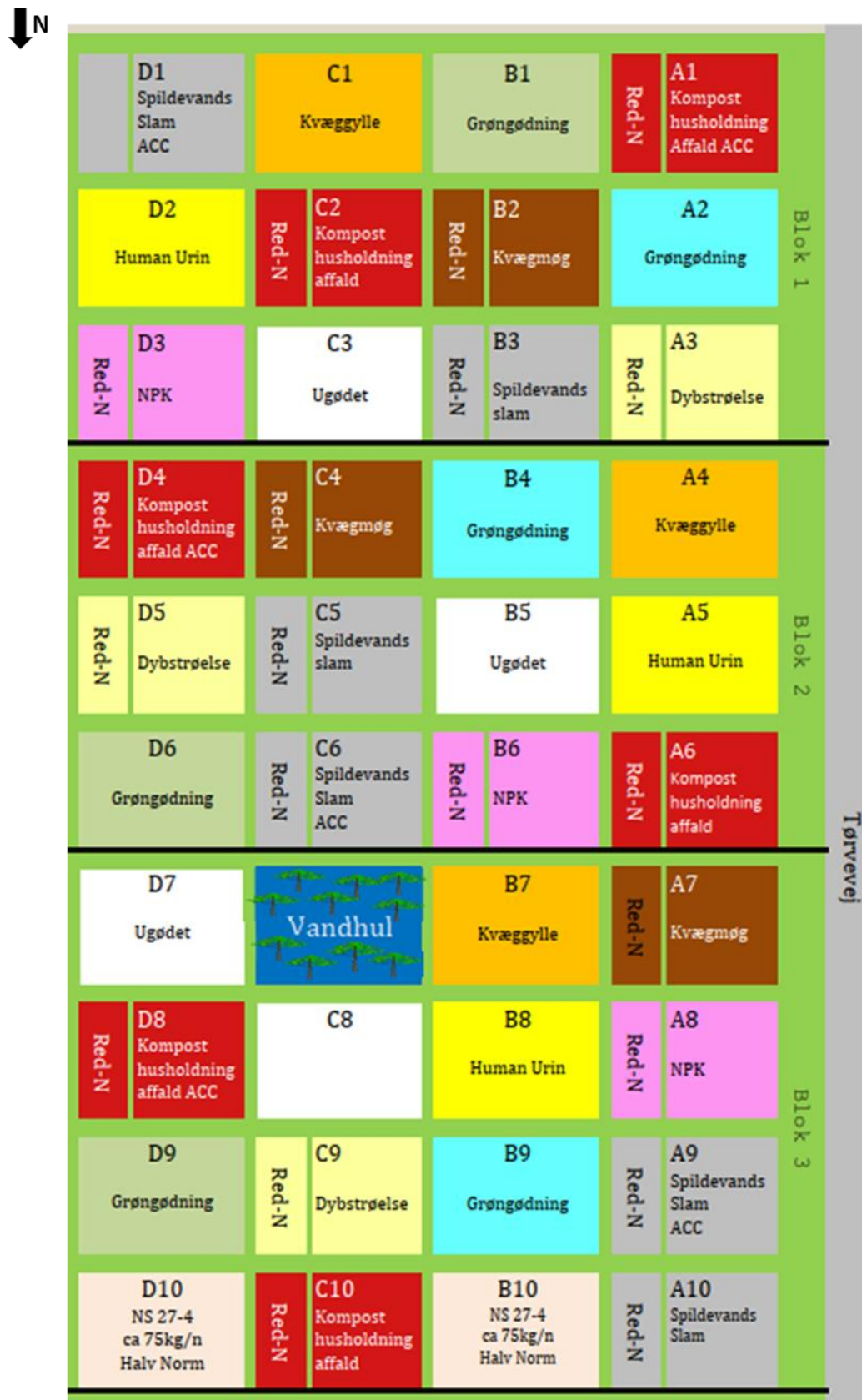
Projektet blev udført på forsøgsarealet CRUCIAL (Closing the Rural-Urban nutrient Cycle—Investigations through Agronomic Long-term experiments), som er drevet og ejet af Københavns Universitet /4,9/. Området består af en række testplots, hvor der er udbragt forskellige typer affald og animalsk gødning. På figur 2.1 ses et overblik over de forskellige testplots på CRUCIAL.

På seks testplots (A9, A10, B3, C5, C6, D1) har siden 2003 været udført et forsøg med årlig udbringning af spildevandsslam fra Avedøre rensningsanlæg i store mængder for at undersøge om der på lang sigt vil kunne ses skadevirkning på jordsystemet. I den ene gruppe plots (A10, C5 og B3) er der tilført spildevandsslam svarende til ca. 75 års lovlig udbringning. I den anden gruppe plots (A9, C6 og D1) er der udbragt meget store mængder, svarende til mere end 200 års lovlig udbringning. Disse testplot er således ikke repræsentative for almindelige landbrugsmarker, men repræsenterer henholdsvis et worst-case og et ekstremt worst-case scenarie. Det blev vurderet, at sandsynligheden for at finde forholdsvis høje niveauer af PFAS ved forsøgsmarkene var relativ stor, og dette kunne give bedre mulighed for også at forstå, hvordan PFAS-forbindelserne bevæger sig igennem jordlagene.

Københavns Universitet har oplysninger omkring mængden af slam, der er udbragt samt arkivprøver af det udbragte slam. Det er dermed muligt at forstå massebalancen i systemet.

2.1 Data om det udbragte spildevandsslam

Københavns Universitet har ført register over den udbragte mængde på testarealerne hvert år. Hver testplot har et areal på 1.000 m². Der blev hvert år i gennemsnit udbragt 1,6 tons spildevandsslam på de testplots med høj udbringning og 4,7 tons slam på plots med ekstremt høj udbringning (accelererede plots). De årlige mængder af tilført slam pr. plot fremgår af bilag 6.



Figur.2.1: Oversigt over de forskellige testplots på CRUCIAL forsøgsareal. Figuren anvendt med tilladelse fra Københavns Universitet.

3 Undersøgelsens omfang

Der er udført 10 boringer på ejendommen, B101-B110, i perioden d. 6.-15. september 2022. Boringerne er placeret i 4 markplots af tre forskellige typer; (1) slambehandlet mark, som har fået høj dosering hvert år, (2) slambehandlet mark, som har fået ekstremt høj dosering (accelereret plot), og (3) kontrolområde udenfor forsøgsmarkerne, som ikke har fået tilført slam. Derudover har det område af markplottet, hvor B101 er placeret, ikke være slamgødet siden 2013. Placeringen af boringerne er vist på figur 3.1. Boringerne vurderes repræsentative i forhold til at afdække evt. PFAS-forurening fra det udbragte slam.

Boringerne er udført som 6” forede tørrotationsboringer. Yderligere boringsoplysninger fremgår af Tabel 5.1. Boreprofiler for boringerne er vedlagt i bilag 3.

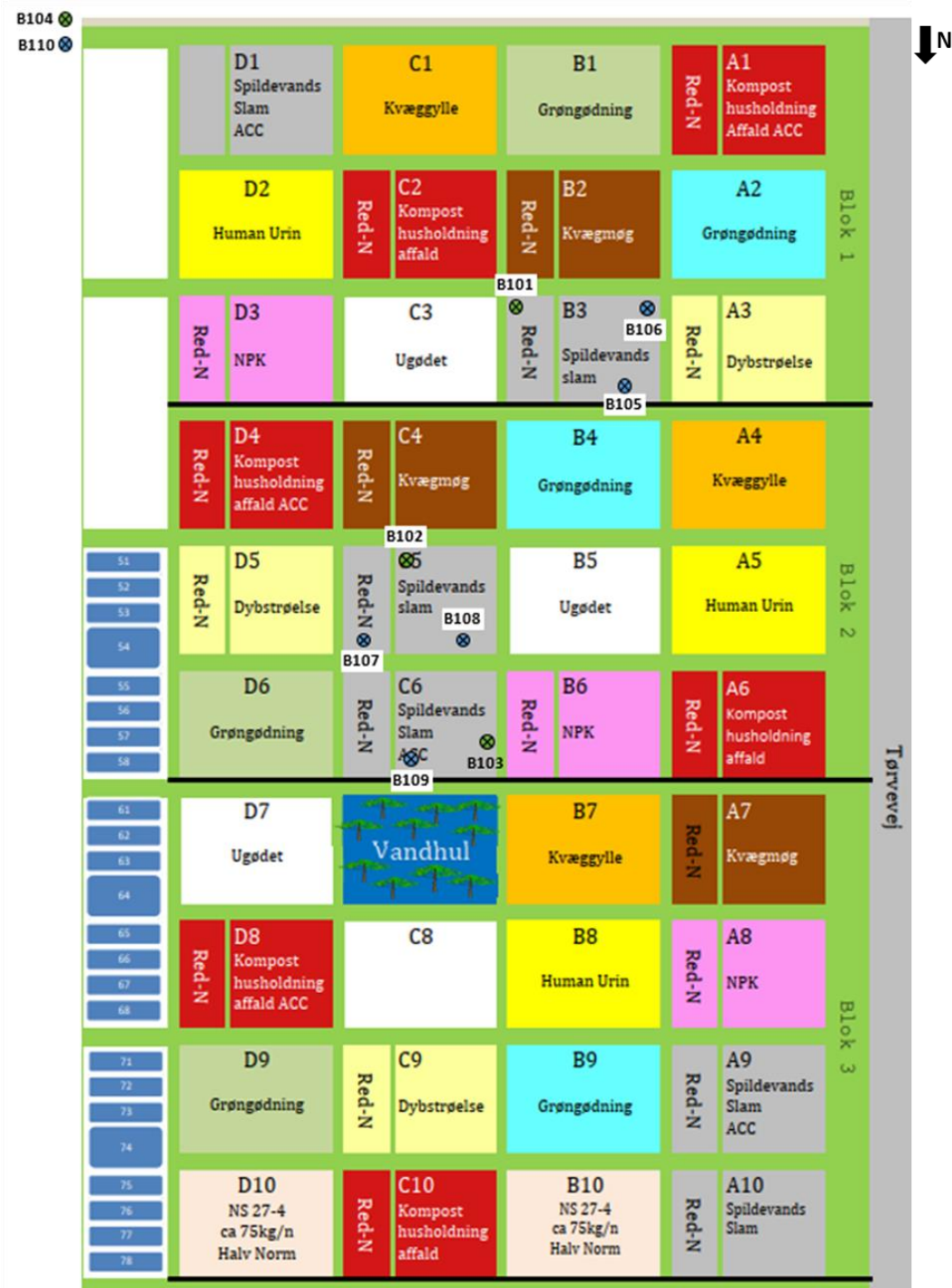
Tabel 3.1: Oplysninger for boringerne på CRUCIAL markerne.

Boring	Plot navn	Type	Dybde m u.t.	Filter dia. mm	Filtersætning m u.t.
B101	B3	Slambehandlet.*	15,7	63	13,7-15,7
B102	C5	Slambehandlet.	18	63	16-18
B103	C6	Slambehandlet Acc.	18,1	63	16-18
B104	-	Kontrol	17,4	63	15,4-17,4
B105	B3	Slambehandlet	13	25 63	4,5-5,5 11-13
B106	B3	Slambehandlet	11,5	25 63	5-6,4 9,5-11,5
B107	C5	Slambehandlet	14	25 63	5,5-6,5 12-14
B108	C5	Slambehandlet	14	25 63	4,5-5,5 12-14
B109	C6	Slambehandlet Acc.	8	63	4,5-6,5
B110	-	Kontrol	12	25 63	5,5-6,5 10-12

Slambehandlet :Slambehandlet mark med høj dosering, svarende til 75 års lovlig dosering.
 Acc. : Slambehandlet mark med ekstremt høj dosering
 Kontrol : Kontrolområde, som ikke har fået gødning
 * : Markplot har ikke været gødet siden 2013

For at undersøge indhold af PFAS i jorden og på vej ned til grundvandet er der udtaget både vand- og jordprøver. Jordprøverne blev udtaget i perioden d. 6-15. september 2022 ved dybderne 0,3 m u.t. 0,5 m u.t. og 1 m u.t. og derefter ca. hver meter til boringerens slutdybde. Jordprøverne blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,5 µg/kg TS. Vandprøverne fra boringerne blev udtaget d. 16. og 23. september 2022 og blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,3 ng/l. Vandprøveskemaerne for prøvetagningen findes i bilag 4.

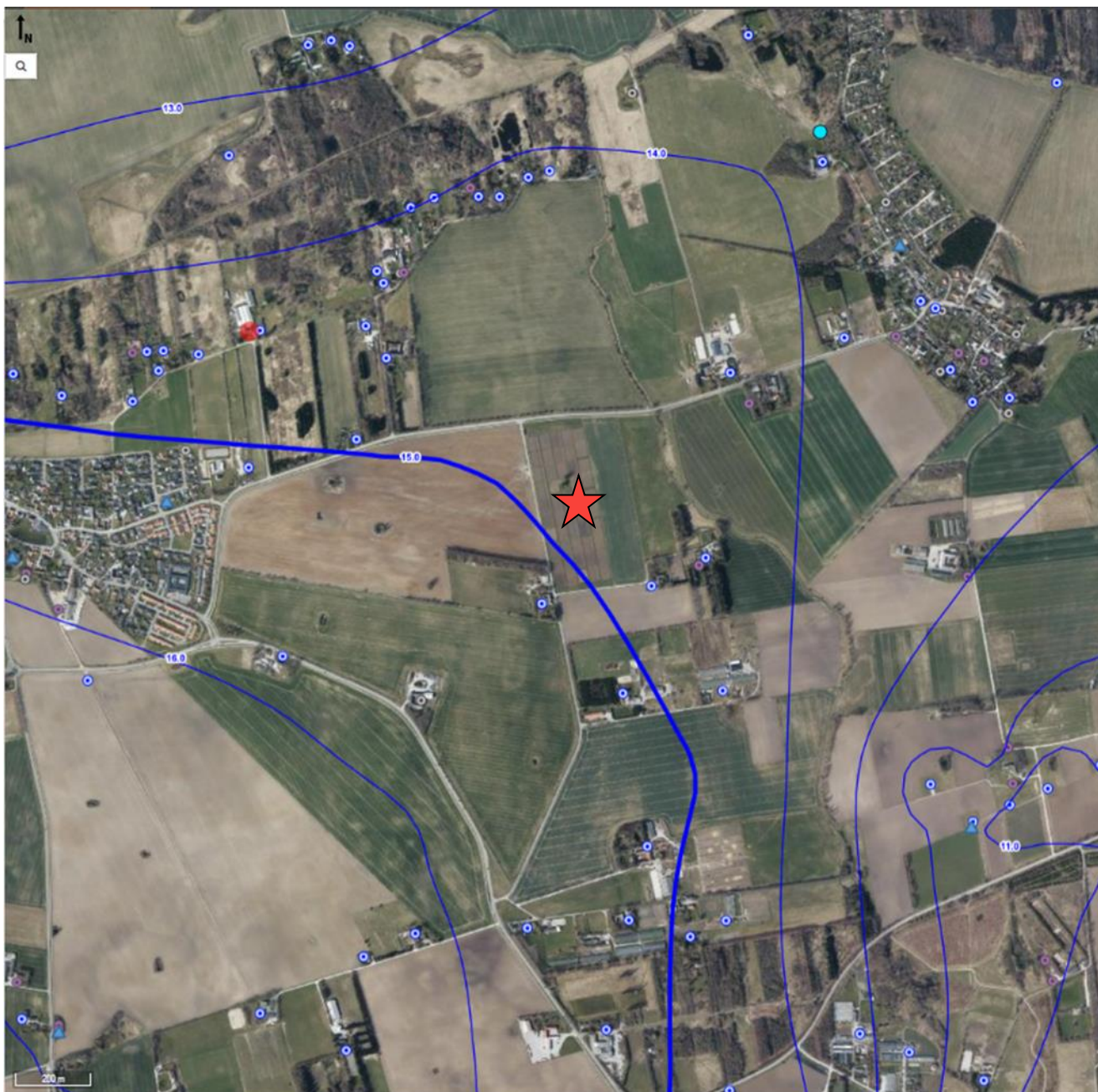
Med henblik på at forstå sammenhængen mellem de målte værdier i jord og grundvand under forsøgsmarkerne, analyseres der også udvalgte prøver fra det udbragte slam. Københavns Universitet råder over arkivprøver af slam tilbage til 2003, dvs. både før og efter bl.a. Slamprøverne blev analyseret for PFAS 22 med en detektionsgrænse på 0,5 µg/kg TS. ALS Global blev benyttet som hovedlaboratoriet, imens udvalgte duplikatprøver af jord, vand og slam også blev sendt til analyse hos Eurofins.



Figur 3.1: Oversigt over placeringen af B101-B110 i de forskellige testplots på CRUCIAL markerne.

4 Geologi og hydrogeologi

Områdets primære grundvandsmagasin starter imellem kote +10 til +5 m og udgøres af kalk. Dæklaget over magasinet består af omkring 10-15 m moræneler. Grundvandets strømningsretning i det primære grundvandsmagasin forventes at være vest/nordvest på baggrund af potentialekort fra GeoAtlas (se figur 4.1). Der ligger en række vandforsyningsboringer indenfor en radius af 500 m af CRUCIAL-markerne, som indvinder fra kalken (se figur 4.1).



Figur 4.1: Potentialekort for det primære grundvandsmagasin, kalken, i området omkring CRUCIAL markerne (rød stjerne). Det viste potentialekort er Høje Taastrup, 2020. Vandforsyningsboringer i nærområdet er markeret. Modificeret fra GeoAtlas.

De lokale geologiske forhold er beskrevet på baggrund af de udførte borer på lokaliteten i forbindelse med undersøgelsen. Den lokale geologi bestod generelt af en sandet, kalkholdig brun-grå moræneler med våde sand-/gruslag samt sandlirer af varierende tykkelse mellem ca. 2-9 m u.t. Moræneleren er underlejret af et vådt sand-/gruslag, hvorefter kalken starter ved en dybde på mellem 15,7-18,0 m. B101-B104 blev udført som de dybeste af borer til toppen af kalken og er filtersat i bunden af sand-/gruslaget. B104-B108 og B110 blev både filtersat i toppen af sand-/gruslaget, som starter ca. 9-10 m u.t., samt ved de våde indslag af sand og grus i moræneleren mellem 4,5-6,5 m u.t. B109 blev udført som den korteste boring til 8 m u.t. og blev filtersat fra 4,5-6,5 m u.t. ved fugtige sandlirer i moræneleren. Boreprofiler for borerne er vedlagt i bilag 3.

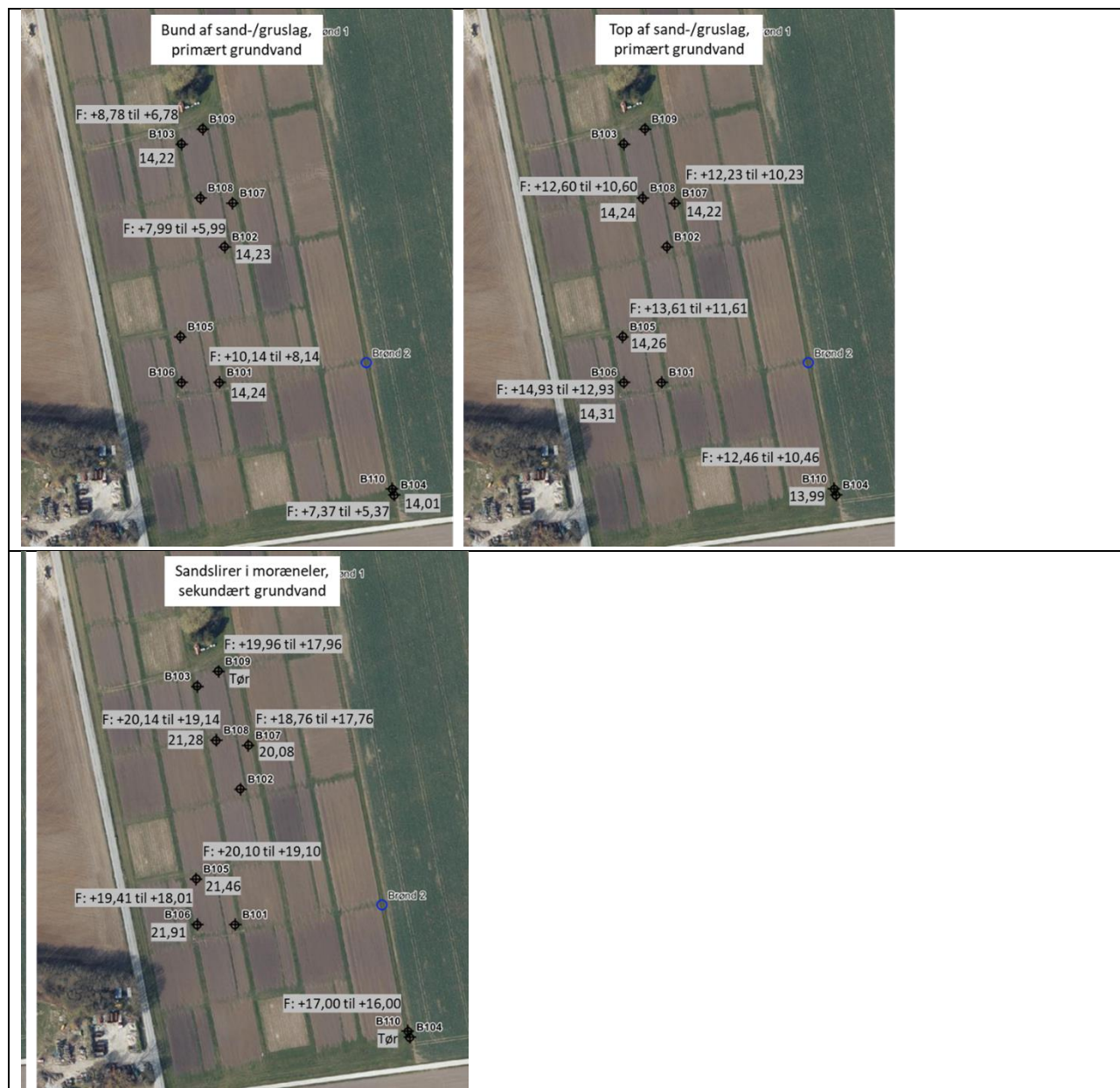
Boringerne blev indmålt med GPS, mens terræn og filtertop blev nivelleret med digitalt nivellement. Der blev foretaget en synkronpejling d. 20. oktober 2022, samt i forbindelse med vandprøvetagningen. Resultatet fra indmålingen og synkronpejlingen er angivet i Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Pejlinger og absolut vandspejlskote fra synkronpejlingen den 20. oktober 2022.

Boring	Filtersætning m under terræn	Terrænkote m DVR90	Filterkote m DVR90	Pejling m under filterrør	Vandspejlskote m DVR90
B101	13,7-15,7	+23,84	+10,14 til +8,14	9,87	14,24
B102	16-18	+24,08	+7,99 til +5,99	9,76	14,23
B103	16-18	+24,68	+8,78 til +6,78	10,56	14,22
B104	15,4-17,4	+22,66	+7,37 til +5,37	8,76	14,01
B105-1	11-13	+24,51	+13,61 til +11,61	10,35	14,26
B105-2	4,5-5,5	+24,51	+20,10 til +19,10	3,15	21,46
B106-1	9,5-11,5	+24,44	+14,93 til +12,93	10,13	14,31
B106-2	5-6,4	+24,44	+19,41 til +18,01	2,50	21,91
B107-1	12-14	+24,04	+12,23 til +10,23	10,01	14,22
B107-2	5,5-6,5	+24,04	+18,76 til +17,76	4,18	20,08
B108-1	12-14	+24,58	+12,60 til +10,60	10,37	14,24
B108-2	4,5-5,5	+24,58	+20,14 til 19,14	3,36	21,28
B109	4,5-6,5	+24,33	+19,96 til +17,96	Tør	-
B110-1	10-12	+22,48	+12,46 til +10,46	8,46	13,99
B110-2	5,5-6,5	+22,48	+17,00 til +16,00	Tør	-

Boringerne B106 og B108 var lavt ydende, imens B109 og B110-2 var helt tørre og derfor ikke kunne pejles. De øvrige borer var normalt ydende.

Figur 4.2 viser situationsplan med pejleresultaterne samt filterkoten for B101-B110.



Figur 4.2 Oversigt over vandspejlskote og kote for filterstrækningen i B101-B110 på CRUCIAL markerne. Fra venstre til højere (Potentiale for bunden af sandmagasinet, potentiale for toppen af sandmagasinet, potentiale i sandslirerne)

Det bekræftes på baggrund af det målte vandspejl i boringer filtersat umiddelbart over kalken og boringer filtersat i toppen sand-/gruslaget, at der er hydraulisk kontakt mellem kalken og sand-/gruslaget. Desuden bekræftes der en strømning i retning mod øst og syd, da det laveste potentiale er målt i den sydøstlige boring B110 og B104. Der er også indikationer på et grundvandskel ved det sydlige del af CRUCIAL marken. Det kan ikke bestemmes en strømningretning for sandslirerne i moræner da disse vurderes ikke at være sammenhængende. Potentiale i sandslirerne ligger i omkring kote +20, og dermed er der nedadrettet gradient til det primære magasin.

5 Resultater

5.1 Analyseresultater for jord

Resultaterne af PFAS analyser i jordprøver fra B101-B110 er vist i tabel 5.1. Der er indsendt duplikatprøver til Eurofins fra B102, B103 og B104. I tabellen er der kun medtaget de jordprøver, hvor der er påvist PFAS forbindelser, og de stoffer, hvor der er konstateret fund over detektionsgrænsen. De samlede analyseresultater er vedlagt i bilag 5.

Tabel 5.1: Analyseresultater fra ALS/Eurofins for PFAS i jordprøver fra B101-B110, hvor der var fund over detektionsgrænsen. I de øvrige jordprøver er der ikke konstateret fund over detektionsgrænsen. Der kun medtaget påviste PFAS-forbindelser. Boringer hvor der blev sendt duplikater er markeret med fedt.

Boring nr.	B101	B102			B103			B104	B105	B106	B107	B108	B109		Jordkvalitets-kriterium ¹
Dybde (m u.t.)	0,3	0,3	0,5	1,0	0,3	0,5	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5		
Type af forsøgs-mark	Slam-be-hand-let.*	Slambehandlet			Slambehandlet-Acc.			Kontrol	Slambehandlet				Slambehandlet-Acc.		
Værdier i µg/kg TS															
PFOS	0,59	2,6/2,1	0,74/0,26	-/-	3,8/4,1	-/0,33	-/0,18	-/0,11	0,92	1,24	1,76	2,44	3,9	3,6	i.f.
PFOA	-	1,1/1,1	-/0,15	0,06/0,08	1,7/1,9	-/0,23	-/0,10	-/0,09	-	0,72	0,74	1,06	1,3	1,4	i.f.
PFOSA	-	-/-	-/-	-/-	-/0,11	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
PFPeA	-	0,53/0,64	-/-	-/-	0,91/0,81	-/0,13	-/-	-/-	-	-	-	0,66	0,62	0,87	i.f.
PFHxA	-	-/0,3	-/-	-/-	0,54/0,50	-/0,13	-/-	-/-	-	-	0,52	-	-	0,52	i.f.
PFHpA	-	-/0,32	-/-	-/-	0,55/0,53	-/0,12	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
PFBA	-	-/ 0,28	-/-	-/-	-/0,30	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	-	0,60	i.f.
PFBS	-	-/-	-/-	-/-	-/0,16	-/0,11	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
PFDA	-	0,53/0,46	-/-	-/-	1,1/1,1	-/-	-/-	-/-	-	-	-	0,55	0,79	0,71	i.f.
PFDoDA	-	-/0,12	-/-	-/-	-/0,38	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
PFNA	-	-/0,20	-/-	-/-	-/0,50	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
PFTTrDA	-/	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	0,51	-	i.f.
PFUnDA	-	-/0,12	-/-	-/-	-/0,21	-/-	-/-	-/-	-	-	-	-	-	-	i.f.
Sum af 4 PFAS	0,59	3,6/3,3	0,74/0,41	0,06/0,08	5,5/6,5	-/0,56	-/0,28	-/0,2	0,92	2,0	2,5	3,5	5,3	5,0	10
Sum af 22 PFAS	0,59	4,7/5,5	0,74/0,41	0,06/0,08	8,6/11	-/1,1	-/0,28	-/0,2	0,92	2,0	2,5	4,7	7,2	7,7	400

¹ : Miljøstyrelsens vejledende jordkvalitetskriterier /10/, , i.f.: Ikke fastsat, Slam: Slambehandlet mark med høj dosering, Acc. : Slambehandlet mark med ekstremt høj dosering, Kontrol: Kontrolområde, som ikke har fået gødning, *: Markplot har ikke været gødet siden 2013, (-) : Under detektionsgrænsen

Der blev påvist PFAS-forbindelser indenfor den øverste 1 m jord i alle borerne, hovedsageligt ved 0,3 m u.t. De højeste koncentrationer blev påvist i B103 og B109, hvor summen af 22 PFAS var 8,6-11 µg/kg TS ved 0,3 m u.t. fra B103 og 7,7 µg/kg TS i 0,5 m u.t. fra B109. Dette er i god overensstemmelse med, at B103 og B109 er placeret på en forsøgsmark, hvor der er udbragt meget store mængder spildevandsslam. Summen af 22 PFAS varierer mellem 0,92-3,7 µg/kg TS i overfladejorden ved 0,3 m u.t. fra borerne B102, B105, B106, B107 og B108 på forsøgsmarker med høj dosering, imens der blev påvist 0,53 µg/kg TS i B101 på den del af marken, der ikke har modtaget gødning siden 2013. De laveste koncentrationer (<0,2 µg/kg TS) blev, som forventet, påvist i B104 og B110 placeret i kontrolområdet udenfor forsøgsmarkerne.

Der er ikke målt koncentrationer over Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier.

5.2 Analyseresultater for vand

Resultaterne af PFAS analyser i vandprøver fra B101-B110 er listet i tabel 5.2. Der er udtaget duplikatprøver til Eurofins fra B101, B103, B104, B105-2, B106-1, B106-2, B107,2, B108-2 samt B110-1. I tabellen er kun medtaget PFAS forbindelser, hvor der er konstateret fund over detektionsgrænsen og borer hvor der er konstateret PFAS. De samlede analyseresultater er vedlagt i bilag 5.

Det fremgår af tabel 5.2, at der blev påvist PFAS-forbindelser i B107-2, B108-1 og B108-2. Summen af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS i B108-2 overskrider Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium på 2 ng/l. Overskridelsen skyldes indhold af især PFOA. Summen af de 4 PFAS-forbindelser er under kvalitetskriteriet i de øvrige borer

Tabel 5.2: Analyseresultater fra ALS/Eurofins for PFAS i vandprøver fra B101-B110 med fund over detektionsgrænsen. For de øvrige PFAS-forbindelser er der ikke konstateret fund over detektionsgrænsen.

Boring nr.		B107-1	B107-2	B108-1	B108-2	B110-1	Grundvandskvalitetskriterium ¹
Filtersætning (m u.t.)		12,0-14,0	5,5-6,5	12,0-14,0	4,5-5,5	10,0-12,0	
Type af forsøgsmark		Slambehandlet-høj dosering				Kontrol	
PFOS	ng/l	-	- / -	0,53	1,28 / 0,75	- / -	i.f.
PFOA	ng/l	-	0,38 / 0,40	0,35	1,41 / 1,40	- / -	i.f.
PFPeA	ng/l	-	- / -	-	0,67 / 0,88	- / -	i.f.
PFHxA	ng/l	-	- / -	-	0,68 / 0,62	- / -	i.f.
PFHpA	ng/l	-	- / -	-	0,54 / 0,52	- / -	i.f.
PFBA	ng/l	-	- / -	-	- / 0,71	- / -	i.f.
PFBS	ng/l	-	- / -	-	0,35 / -	- / -	i.f.
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	ng/l	-	0,38 / 0,40	0,88	2,69 / 2,15	- / -	2
Sum af 22 PFAS	ng/l	-	0,38 / 0,40	0,88	4,93 / 4,88	- / -	100

¹ : Miljøstyrelsens vejledende grundvandskvalitetskriterier /10/

- : Under detektionsgrænsen

i.p. : Ikke prøvetaget til pågældende analyselaboratorie

i.f. : Ikke fastsat

5.3 Analyseresultater for spildevandsslam

Resultaterne af PFAS analyser i det udbragte spildevandsslam fra udvalgte årstal er præsenteret i tabel 5.3. Der er indsendt duplikatprøver til Eurofins for år 2004, 2013 og 2022. I tabellen er kun medtaget PFAS forbindelser, hvor der er konstateret fund over detektionsgrænsen. De samlede analyseresultater er vedlagt i bilag 5.

Der er påvist indhold over Miljøstyrelsens vejledende grænseværdi for summen af 4 PFAS på 10 µg/kg TS i slamprøver fra alle år undtagen fra 2022, hvor summen er 4,4-5,4 µg/kg TS.

Tabel 5.3: Analyseresultater fra ALS/Eurofins for PFAS i prøver af det spildevandsslam, som er blevet udbragt på CRUCIAL markerne i perioden 2003-2022. Der er kun medtaget PFAS-forbindelser, hvor der er konstateret fund over detektionsgrænsen.

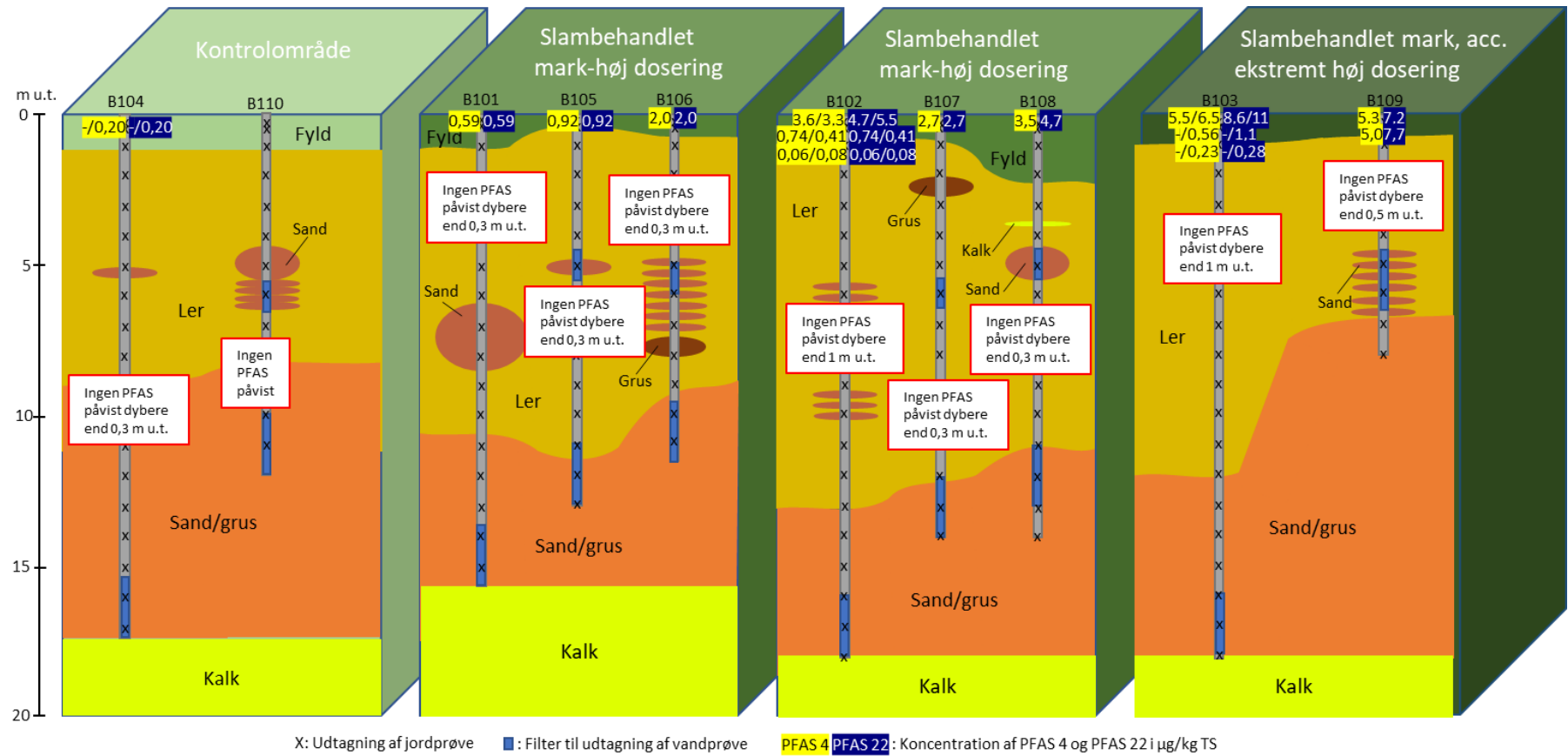
Årstal		2003	2004	2005	2006	2007	2009	2012	2013	2017	2018	2020	2022	Jord-kvalitets-kriterium ¹
PFOS	µg/kg TS	64,9	40,8/45	44,3	30,0	32,8	14,0	14,2	12,3/13	7,24	22,0	31,1	4,39/5,1	i.f.
PFOA	µg/kg TS	4,19	3,61/3,2	3,91	3,56	2,30	2,82	3,08	2,24/2,1	1,16	1,03	-	-/0,31	i.f.
PFNA	µg/kg TS	3,37	1,36/1,1	1,43	1,45	1,01	1,14	1,36	4,62/4,5	2,29	0,77	-	-/-	i.f.
PFHxS	µg/kg TS	-	-/-	-	1,42	0,99	-	-	-/-	-	-	-	-/-	i.f.
PFBA	µg/kg TS	-	-/-	-	-	-	-	-	-/0,27	-	-	-	-/-	i.f.
PFHxA	µg/kg TS	-	-/0,61	-	-	-	-	-	-/0,77	-	-	-	-/0,61	i.f.
PFHpA	µg/kg TS	-	-/-	-	-	-	-	-	-/0,27	-	-	-	-/-	i.f.
PFPeA	µg/kg TS	-	-/0,25	-	-	-	-	-	-/-	-	-	-	-/-	i.f.
PFDA	µg/kg TS	11,9	6,72/7,4	6,92	8,82	6,52	10,2	8,63	6,70/7,7	5,74	3,49	2,27	0,83/0,96	i.f.
PFUnDA	µg/kg TS	9,51	3,06/2,3	3,08	2,68	2,55	3,44	2,42	3,43/2,5	2,46	1,62	1,38	0,62/0,34	i.f.
PFDoDA	µg/kg TS	4,56	3,59/3,1	3,61	4,03	3,68	5,56	3,80	3,32/2,5	3,50	2,63	2,09	1,34/0,65	i.f.
PFTTrDA	µg/kg TS	2,51	1,88/0,74	1,74	2,02	1,85	2,26	1,66	1,97/1,2	2,04	-	-	-/0,2	i.f.
PFDS	µg/kg TS	6,61	2,90/-	3,09	2,48	1,44	1,17	0,91	1,05/-	-	0,69	-	-/-	i.f.
6:2 FTS	µg/kg TS	-	-/-	-	-	-	1,02	1,08	1,84/1,9	-	-	5,16	-/0,27	i.f.
PFOSA	µg/kg TS	5,38	1,92/5,3	2,03	1,61	0,95	1,19	1,11	-/1,9	-	-	-	0,35/0,44	i.f.
Sum af PFOA, PFOS, PFNA og PFHxS	µg/kg TS	72,5	45,8/49	49,6	36,4	37,1	18,0	18,6	19,2/20	10,7	23,8	31,1	4,4/5,4	10
Sum af 22 PFAS	µg/kg TS	113	65,8/73	70,1	58,1	54,1	42,8/	38,2	37,5/39	24,4	32,2	42,0	7,2/8,9	400

- ¹ : Miljøstyrelsens vejledende grundvandskvalitetskriterier /10/
 - : Under detektionsgrænsen
 i.p. : Ikke prøvetaget til pågældende analyselaboratorie
 i.f. : Ikke fastsat
Fed : Værdier over jordkvalitetskriteriet

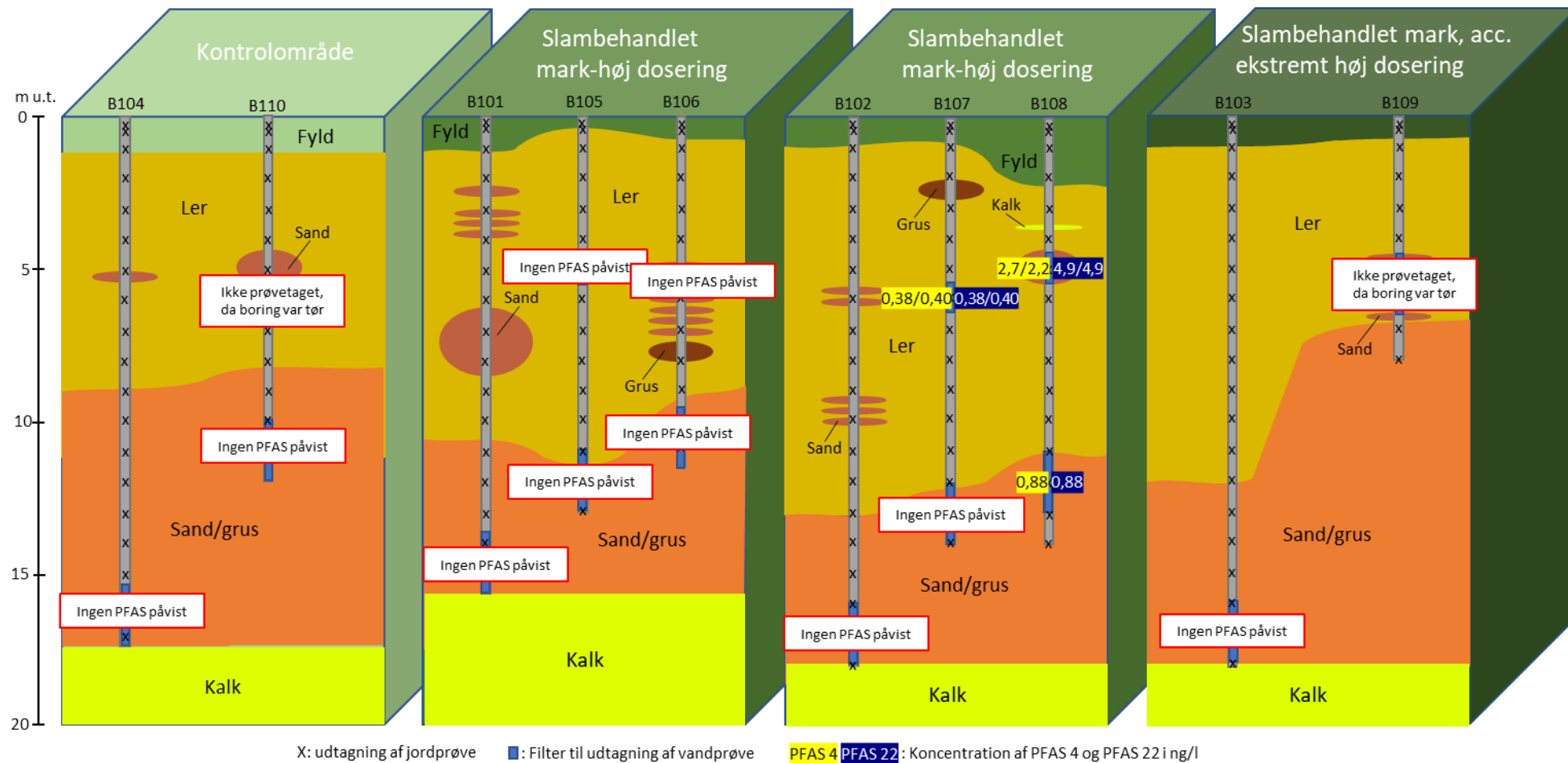
6 Konceptuel modeller

Der er opstillet konceptuelle modeller for hhv. jord- og vandkoncentrationer af PFAS for de fire markplots, hvor B101-B110 er udført. Modeller er vist i Figur 6.1 og Figur 6.2 samt vedlagt i bilag 1 og 2.

Undersøgelser af CRUCIAL forsøget for PFAS påvirkning fra spildevandsslam



Figur 6.1: Konceptuel model for summen af 4 PFAS (gul) og 22 PFAS (blå) påvist af ALS/Eurofins i jordprøver fra de fire markplots, hvor B101-B110 er placeret. Bemærk at x-aksen ikke er målfast.

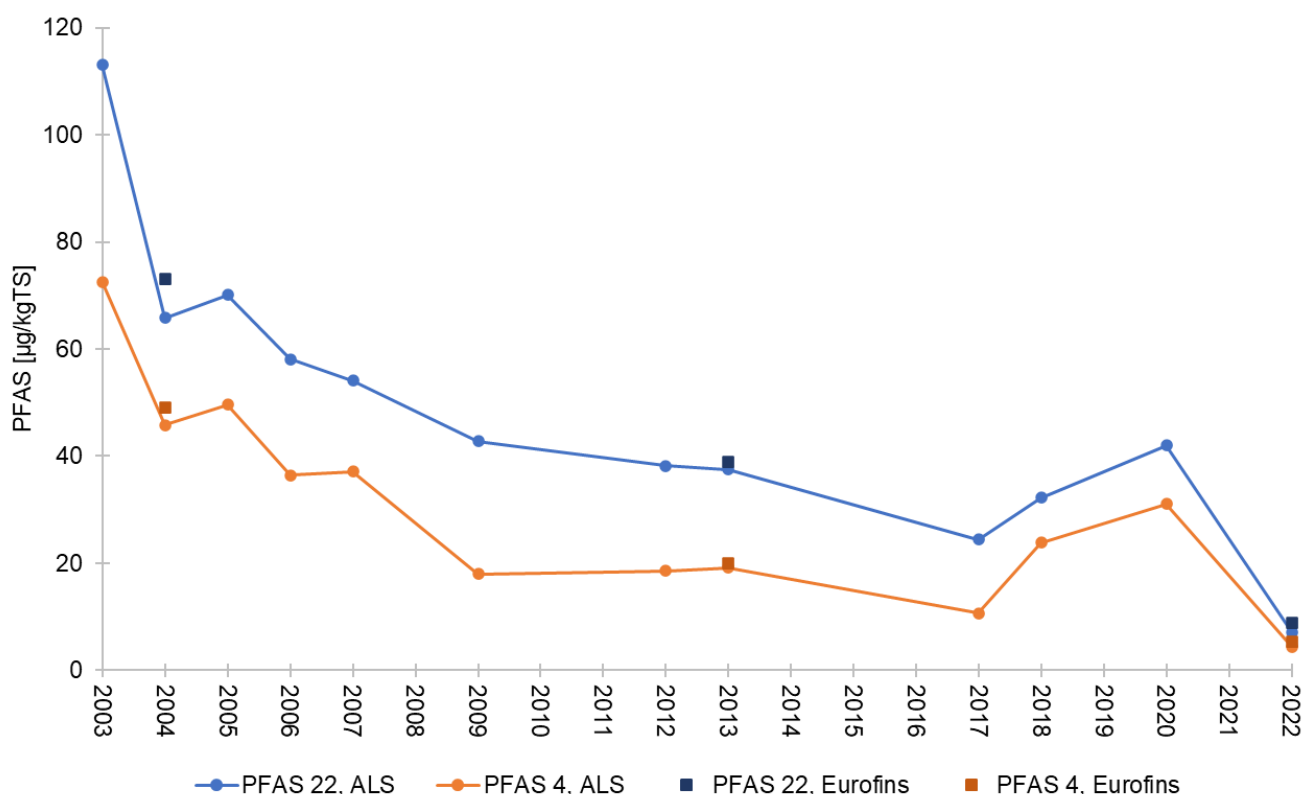


Figur 6.2: Konceptuel model for summen af 4 PFAS (gul) og 22 PFAS (blå) påvist af ALS/Eurofins i vandprøver fra B101-B110, som er placeret i de fire mark-plots. Bemærk at x-aksen ikke er målfast.

7 Diskussion

7.1 Spildevandsslam – Tidslig udvikling

Den tidlige udvikling i koncentrationsniveauet af PFAS forbindelser i det udbragte spildevandsslam fra Avedøre rensningsanlæg er præsenteret i figur 7.1. Summen af PFAS var højest i 2003, hvorefter niveauet generelt var faldende til det laveste niveau i 2022. Der var en mindre stigning fra 2017 til 2020. Summen af 22 og 4 PFAS følges generelt ad. Det faldende indhold af PFAS i spildevandsslammet stemmer overens med, at der fra år 2000 kom øget opmærksomhed på PFAS-stoffernes sundhedsskadelige effekter og dermed begyndelse på restriktion og udfasning af udvalgte PFAS-stoffer, herunder PFOS og PFOA.



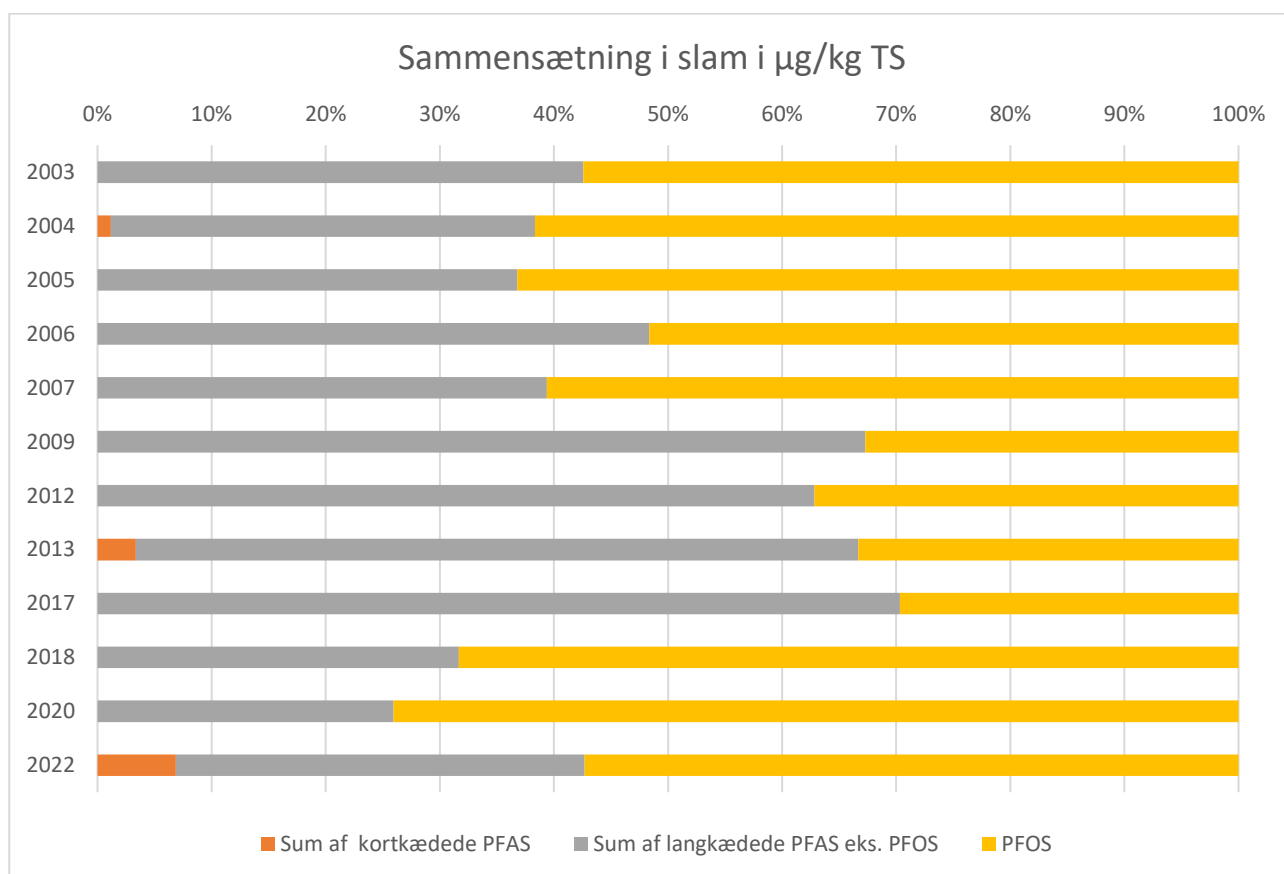
Figur 7.7.1: Summen af 22 og 4 PFAS i spildevandsslam udbragt på CRUCIAL markerne i perioden 2003-2022.

Duplikatprøverne fra 2004, 2013 og 2022, som blev analyseret hos Eurofins, understøtter, at koncentrationsniveauet af PFAS forbindelser i det udbragte slam var faldende mellem år 2004 til 2022. Generelt er der desuden overensstemmelse mellem de påviste koncentrationsniveauer ved analyse hos hhv. ALS og Eurofins.

7.2 Stofsammensætning

Spildevandsslam

Figur 7.2 viser sammensætningen af PFAS-forbindelser i det udbragte spildevandsslam. PFOS er klart dominerende, især før år 2009 samt fra år 2018 og frem. Derudover indeholder spildevandsslammet hovedsageligt langkædede forbindelser, primært PFDA, PFUnDA, PFDoDA og PFDS, samt op til 7 % kortkædede forbindelser.

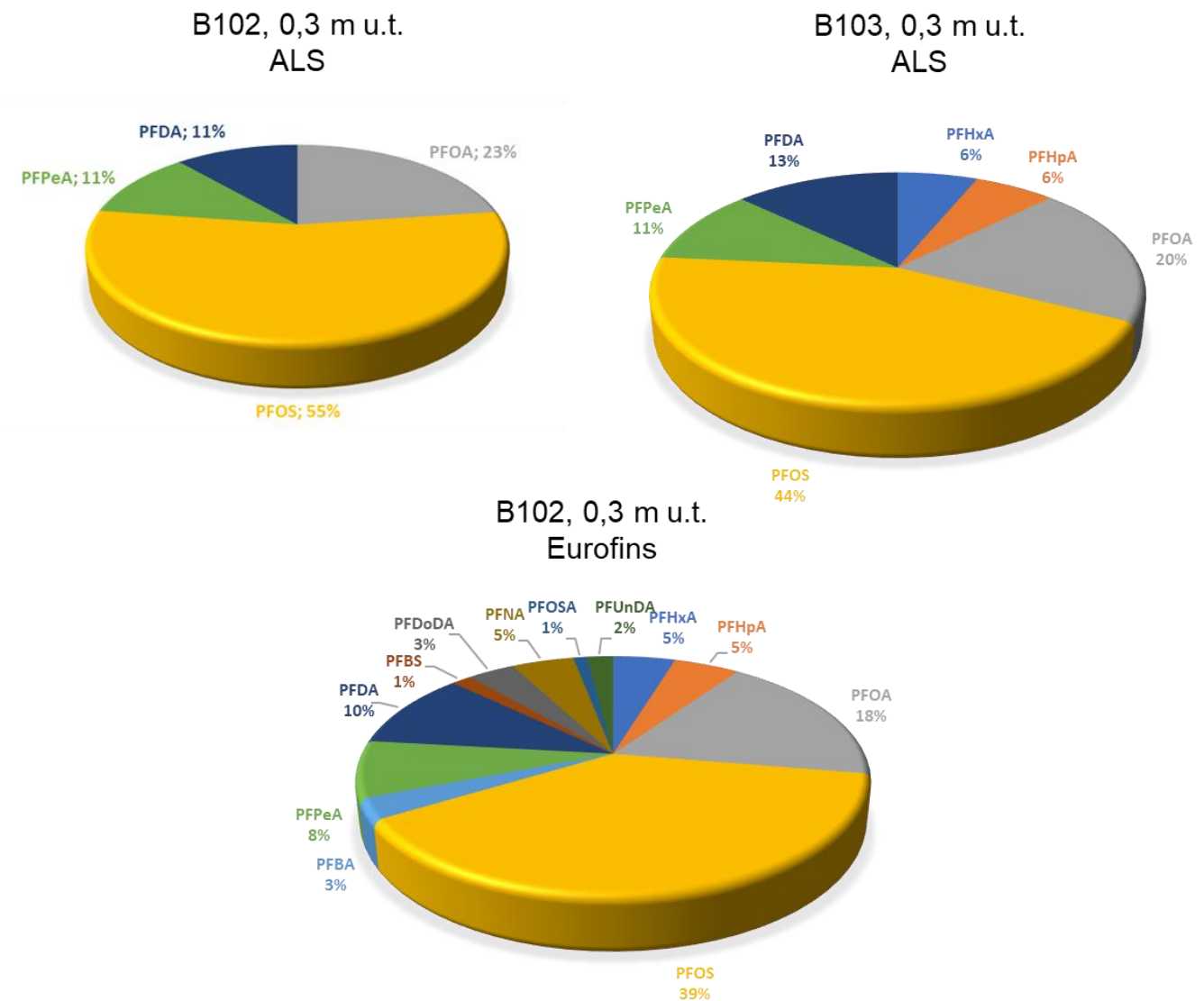


Figur 7.2: Den procentvise fordelingen mellem PFOS, øvrige kortkædede PFAS og langkædede PFAS i det udbragte spildevandsslam i perioden 2003-2022. Data stammer fra ALS, med undtagelsen af data for 2004, 2013 og 2022 hvor data fra Eurofins er vist

Der er generelt overensstemmelse mellem stofsammensætningen påvist ved analyse hos hhv. ALS og Eurofins, dog blev der påvist koncentrationer af PFDS op til 6,6 µg/kg TS ved analyse hos ALS, imens forbindelsen ikke påvises i nogen slamprøver ved analyse hos Eurofins. Omvendt påvises der flere kortkædede PFAS forbindelser såsom PFBA og PFPeA ved analyse af Eurofins, som ikke påvises af ALS (se også afsnit 5.3).

Jord

PFOS er ligeledes meget dominerende i overfladejorden. Figur 7.3 viser stofsammensætningen ved 0,3 m u.t. i B102 og B103. Generelt påvises flere PFAS forbindelser i overfladejord fra B103 og B109 på den slambehandlet mark, som har fået ekstremt høj dosering, sammenlignet med markerne, som har fået høj dosering. Dette skyldes sandsynligvis, at flere PFAS forbindelser har et koncentrationsniveau over detektionsgrænsen ved den meget høje dosering.



Figur 7.3: Den procentvise fordelingen af PFAS forbindelser i jordprøver fra 0,3 m u.t. i B102 og B103.

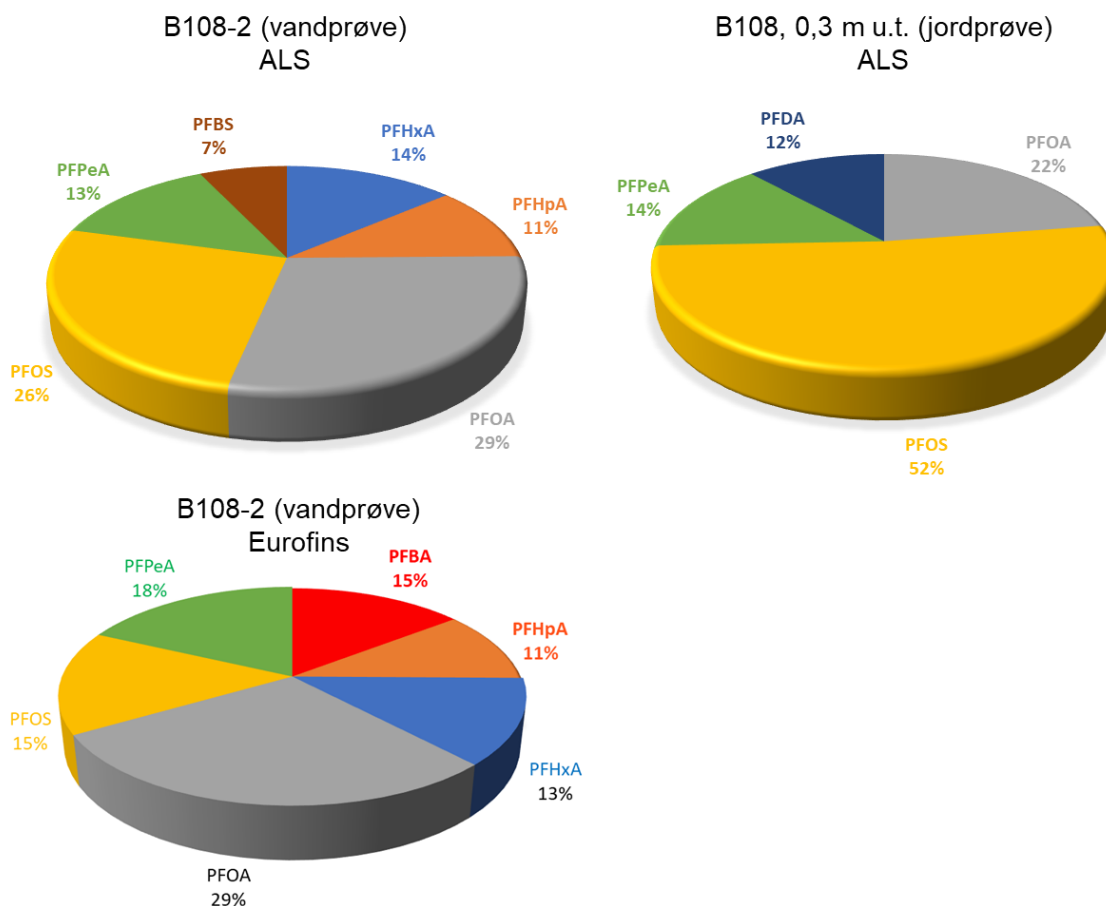
Der er generelt overensstemmelse mellem stofsammensætningen påvist ved analyse hos hhv. ALS og Eurofins. Der påvises dog flere forbindelser ved analyse hos Eurofins f.eks. ved 0,3 m u.t. i B103 hvor der påvises 12 forskellige forbindelser ved Eurofins, imens ALS kun påviser 6 forbindelser (se figur 7.3).

Grundvand

De dominerende PFAS forbindelser i vandprøverne er PFOA og PFOS. Der er overensstemmelse mellem de påviste forbindelser og koncentrationsniveauerne ved analyse hos hhv. ALS og Eurofins, med undtagelse af forbindelserne PFBA og PFBS i B108-2.

I vandprøven fra B108-2 (4,5-5,5 m u.t.) påvises 6 PFAS forbindelser, imens der er i jordprøven ved 0,3 m u.t. i B108 kun påvises 4 af disse forbindelser ((se figur 7.4). Det ses at der grundvandsprøver findes flere af de mere kortkædede PFAS forbindelser såsom PFBS som dog ikke detekteres i jordprøverne fra hverken Eurofins eller ALS. Det tyder på at det sker en binding af de landkædede forbindelser til jordsøjlen hvorimod de kortkædede forbindelser nedsiver i højere grad. Der er i vandprøverne fra CRUCIAL ikke påvist indhold

af PFNA og PFHxS. PFNA er påvist i samtlige slam prøver før 2018, mens PFHxS kun påvises i enkelte ældre slamprøver. Hvad angår jordprøverne er der påvist lave niveauer af PFNA i enkelte prøver, mens der ikke er fundet PFHxS i nogle af jordprøverne.



Figur 7.3: Den procentvise fordelingen af PFAS forbindelser i vandprøven fra B108-2 (4,5-5,5 m u.t.) og jordprøven fra 0,3 m u.t. i B108.

Det skal afslutningsvis bemærkes at forsøgsmarkerne ved CRUCIAL er drænet, men dræn blev først etableret i 2019. Det betyder at der kun er i de seneste år at vandtransporten påvirkes af dræn, hvorfor det ikke skulle have noget betydning for nedsivning af PFAS fra slam udbragt i perioden 2003-2019.

7.3 Beregnet koncentration i vand

I dette afsnit foretages en sammenligning af de målte feltværdier på CRUCIAL med de forventede koncentrationer på baggrund af teoretiske beregninger.

Baseret på den fundne jordkoncentration af PFOS og PFOA kan beregnes en vandkoncentration baseret på ligning 1.

$$C_v = C_t \cdot \rho_b / (K_d \cdot \rho_b + \epsilon_v) \quad [1]$$

Hvor: C_v er vandkoncentrationen i $\mu\text{g/l}$.
 C_t er total koncentrationen i jord i $\mu\text{g/kg TS}$.
 ρ_b er jordens tørrumvægt i kg TS/l jf. JAGG /12/.
 ϵ_w er den vandfyldte porøsitet jf. JAGG /12/.
 K_d er en fordelingskoefficient i l/kg , der angiver forholdet mellem koncentrationen i fast fase og koncentrationen i vand

I tabel 7.1 ses de beregnede koncentrationer i porevand for PFOS og PFOA ved en jordkoncentration på hhv. $3,93 \mu\text{g/kg}$ PFOS påvist ved 0,3 m u.t. i B109 og $1,71 \mu\text{g/kg}$ PFOA påvist ved 0,3 m u.t. i B103. De anvendte K_d -værdier er fra /13, 14/.

Tabel 7.1: Overblik over anvendte parametre for samt beregnede vandkoncentrationer for PFOS og PFOA.

		Sand	Ler
C_t , PFOS	$\mu\text{g/kg TS}$	3,93	
C_t , PFOA	$\mu\text{g/kg TS}$	1,71	
ρ_b	kg/L	1,72	1,89
ϵ_w		0,35	0,3
foc for nedenstående K_d værdier	%	0,4	0,17
K_d , PFOS*	l/kg	3,22	5,66
K_d , PFOA*	l/kg	0,53	0,86
C_v, PFOS	ng/l	1148	675
C_v, PFOA	ng/l	2331	1679

* Kilde: Nguyen et al., 2020 /14/

De beregnede vandkoncentrationer for PFOS i sand og ler er hhv. omkring en faktor 900 og 525 over den højest påviste vandkoncentration på $1,28 \text{ ng/l}$ PFOS i B108-2. Den højest påviste vandkoncentration for PFOA er $1,41 \text{ ng/l}$ i B108-2, og de beregnede vandkoncentrationer for forbindelsen i sand og ler er derfor hhv. omkring en faktor 1650 og 1200 over det påviste.

Der er efterfølgende analyseret for indhold af organisk kulstof i Crucial markerne, se analyserapporten sidst i bilag 5. Her ses foc værdier mellem 0,15-0,93 % med en gennemsnitsværdi på 0,46 % for de udtagne prøver. Dette svarer godt til foc værdien for sand i Tabel 7.1, hvorfor det vurderes at de anvendte K_d værdier fra /14/ er brugbare på Crucial markerne.

7.4 Massebalance for PFAS

Det er forsøgt at redegøre for massen af det udbragte PFAS ift. fund på CRUCIAL markerne. Med udgangspunkt i mængderne af spildevandsslam angivet på Tabel 2.1, og de målte koncentrationer af PFAS i slamprøverne, er mængden af tilført PFAS beregnet. Det er valgt at lave en beregning for summen af PFAS 22 og for PFOS, som er det dominerende stof. Den tilførte mængde af PFOS og PFAS22 i de forskellige plots kan ses på nedenstående tabel. Det ses at der er tilført 0,74-2,14 gram PFOS og 1,45-4,16 gram PFAS 22. Alle beregninger kan ses i bilag 6.

Tabel 7.1 Beregnede mængde af tilført PFOS og PFAS22 pr. testplot for de to testplotstyper.

	Tilført PFOS i perioden 2003-2020	Tilført PFAS 22 i perioden 2003-2020
Testplot med høj dosering	0,74 gram	1,45 gram
Acc- testplot med ekstremt høj dosering	2,14 gram	4,16 gram

Der er udført en masseberegning for mængden af fundet PFAS i de to typer testplots med baggrund i de målte koncentrationer af PFAS i jordprøverne. Der er taget udgangspunkt i de højeste koncentrationer af PFOS og PFOA i jordprøverne og et forurenede volumen på 1000 m² x 1 meter, som er den maksimale dybde-udbredelse for påvist forurening. Der er udført supplerende beregninger af evt. mængde i vand og jord som med koncentrationer under detektionsgrænsen med den beregnede masse er så lille at det kan ses bort fra disse bidrag. Resultater for masseberegningen kan ses i nedenstående tabel. Beregningen er foretaget på baggrund af nedenstående ligning.

$$\text{Forureningsmasse } [\mu\text{g}] = \text{Koncentration i jord } [\mu\text{g/kg TS}] * \text{Jordvolumen } [\text{m}^3] * \text{jordens bulk densitet } [\text{kg TS/m}^3] \quad [2]$$

Hvor jordens densitet er 1620 kg/m³ for lerjorde jf. /13/

Tabel 7.2 Beregnede mængde af PFOS og PFAS 22 i jorden for hver type plot.

Parameter	Enhed	Testplot med høj dosering	Acc. Testplot med ekstremt høj dosering
Areal	m ²	1000	
Tykkelse af forurening	m	1	
Forurenede jordvolumen	m ³	1000	
Jordens tørrumvægt (ler)	kg TS/m ³	1890	
Forurenede Jordmasse (beregnet)	kg	1890000	1890000
Koncentration i jord PFOS	µg/kg TS	2,6	4,1
Masse PFOS (beregnet)	gram	4,9-6,3	7,7-9,1
Koncentration i jord PFAS 22	µg/kg TS	5,5	11
Masse PFAS 22 (beregnet)	gram	10-13	20-23

Som det fremgår af Tabel 7,2 kan massen af PFOS og PFAS 22 opgøres til ca. 4,9-6,3 gram for PFOS og 10-13 gram PFAS22 for de testplots som har fået høj dosering. Dette er en faktor 7-10 over det tilførte mængde. Tilsvarende er der en faktor 4 - 5 forskel for den beregnede masse i jorden vs. den tilførte masse på de accelererede plots.

Resultatet for massebalancen viser at der formentlig er en række uidentificerbare eller ikke ekstraherbare PFAS i spildevandsslam som ved udbringning omdannes til PFOS og andre af de PFAS 22 stoffer.

8 Konklusion

Dette arbejde har haft til formål at undersøge om udnyttelsen af spildevandsslam på landbrugsjord kan medføre en påvirkning af grundvandet med PFAS. Desuden var projektets formål at tilvejebringe data om PFAS transport i jorden, der kan tages i betragtning i forbindelse med modelberegninger for nedsivningen og som input til arbejde med de kommende grænseværdier for PFAS i spildevandsslam til landbrugsformål.

Der er udført feltundersøgelser på CRUCIAL markerne som har været intensivt behandlet med slam siden 2003

- Der er undersøgt tre typer af markplot relateret til udnyttelse af spildevandsslam; (1) slambehandlet mark, som har fået høj dosering, (2) slambehandlet mark, som har fået ekstremt høj dosering, og (3) kontrolområde, som ikke har fået tilført slam. Både type 1 og type 2 repræsenterer et worst-case scenarie ift. udbragte slammængder.
- Der er udført i alt 10 boringer til varierende dybder (8-18 m u.t.), hvorfra der er udtaget jordprøver i 0,3, 0,5 og 1 m .u.t og derefter for hver meter til boringernes slutdybde.
- Der er udtaget vandprøver fra det terrænnære grundvand, knyttet til lokale sandslirer i moræneler og fra det primære magasin (sand/grusmagasinet) der overlejrer kalkmagasinet.
- Der er også analyseret arkivprøver af det udbragte slam fra 2003 og frem til 2022.
- ALS Global blev benyttet som hovedlaboratoriet, imens udvalgte duplikatprøver af jord, vand og slam også blev sendt til analyse hos Eurofins.

De vigtigste konklusioner er sammenfattet i det følgende:

- Der er ikke målt koncentrationer over Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier i nogle af jordprøverne.
- Jordforureningen med PFAS under slambehandlede marker vurderes at være afgrænset til den øverste 1 m u.t.
- Der påvises højere PFAS koncentrationer i mere intensiv behandlet jord, dvs. højere koncentrationer af PFAS i jordprøver fra plots der har fået ekstremt høj dosering, ift. testplots som har fået høj dosering. PFOS og PFOA er de dominerende stoffer i jordprøver, dog træffes der også andre, mere langkædede stoffer mere end otte C-F bindinger i molekylet.
- Der påvises PFAS i kun 3 af vandprøverne. De to af vandprøverne repræsenterer det terrænnære grundvand, mens en enkelt vandprøve er udtaget i det primære grundvandsmagasin.
- Der er påvist op til 4,9 ng/l for sum af PFAS 4 i det terrænnære grundvand og 0,88 ng/l for sum af PFAS 4 i sandmagasinet. De påviste koncentrationer af PFAS i grundvand ligger under Miljøstyrelsens kvalitetskriterier for grundvand i 2/3 af prøverne. Kun en vandprøve overskrider drikkevandskvalitetskriteriet for sum af 4 PFAS med ca. en faktor 2. Vandprøven stammer fra en testplot som har modtaget høj dosis af spildevandsslam, svarende til 75 års lovlig udbringning.
- PFOS er det dominerende stof i vand.
- Der er en rimelig overensstemmelse mellem jord og vand, dog med overvægt at langkædede PFAS forbindelser i jord vs. kortere forbindelser i vand. Der er en god overensstemmelse i duplikater fra de to laboratorier i alle typer prøver (slam, vand og jord).
- Koncentrationsniveauet af PFAS 22 i det udbragte spildevandsslam er faldet fra år 2003 (113 µg/kg TS for PFAS 22) 42 µg/kg TS til 2020 og ned til 8,9 µg/kg TS i 2022, og det forventes at falde yderligere grundet øget opmærksomhed på PFAS, heraf yderligere restriktioner og udfasning af flere PFAS forbindelser.

- De påviste niveauer af PFAS i grundvandet er 525-1650 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.
- Forureningsmasse af PFAS i jorden på CRUCIAL markerne på baggrund af de målte koncentrationer er op til 10 gange større end den tilførte mængde af PFAS, hvis man tager udgangspunkt i de målte PFAS koncentrationer i spildevandsslam. Det kan betyde at slam indeholder en række precursorer til PFAS 22, som ikke kan måles ved standard metoden, eller en række ikke ekstraherbare PFAS 22, som derefter bliver frigivet/nedbrudt til nogle af PFAS 22 forbindelserne.

Der er forsat behov for flere studier for at styrke grundlag for prognosen af nedsivning af PFAS på flere forskellige jordtyper og flere typer slam. Overordnet set kan det på baggrund af dette studie konkluderes, at der sker en udvaskning af PFAS til grundvand under de slambehandlede marker, som dog er meget mindre end det teoretisk forventede udvaskning.

9 Referencer

- /1/ Miljøstyrelsen (2021): Miljøstyrelsen anbefaler loft over PFAS i spildevandsslam (mst.dk) Nyhedsbrev 18-10-2021
- /2/ Danish EPA (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-
- /3/ 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
- /4/ 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
- /5/ Gwynn R. Johnson (2022): PFAS in soil and groundwater following historical land application of biosolids, *Water Research*, Volume 211, , 118035,ISSN 0043-1354,
- /6/ 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.
- /7/ Miljøstyrelsen (2019): Perfluorerede alkylsyreforbindelser (PFAS-forbindelser) incl. PFOA, PFOS og PFOSA, [datablad-pfas-2019.pdf](#) (mst.dk)
- /8/ 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
- /9/ Magid, J., Luxhøi, J., Jensen, L. S., Møller, J., & Bruun, S. (2006). Establishment of a long-term field trial with urban fertilizers - is recycling of nutrients from urban areas to peri-urban organic farms feasible? I J. Raupp, C. Pekrun, M. Oltmanns, & U. Köpke (red.), *Long-term field experiments in organic farming* (s. 59-78). Stollfuß Medien. Scientific Series / ISOFAR
- /10/ Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord, opdateret juni 2018, Miljø- og Fødevarerministeriet
- /11/ Miljøstyrelsen 2022b: Gennemførelse og anvendelse af slam-direktivet, Afrapportering - Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 57, 29-08-2022
- /12/ JAGG 2. 1 - til risikovurdering af forurenede lokaliteter. JAGG står for Jord, Afdampning, Gas og Grundvand. Miljøstyrelsen 2016

/13/VMR 2022, Håndbog om undersøgelse og afværge af forurening med PFAS-forbindelser Teknik og Administration Nr 1 2022

/14/Nguyen, T.M.H., Bräunig, J., Thompson, K., Thompson, J., Kabiri, S., Navarro, D.A., et al., 2020. Influences of Chemical Properties, Soil Properties, and Solution pH on Soil–Water Partitioning Coefficients of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs). *Environmental Science & Technology*, 54(24), pp.15883–15892. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c05705>.