

# Laboratorieforsøg med soil-foam-fractionation på lerjorde - MUDP

Dorte Harrekilde m.fl.

**RAMBOLL**

Bright ideas.  
Sustainable change.





# DK PFAS-forurennet jord

- Modtages ikke på deponier i DK
- Nyttiggørelse ikke tilladt (en undtagelse)
- Forbrænding på Fortum ikke mulig, når indhold er < farligt affald
- Immobilisering/stabilisering traditionelt ikke en mulighed
- Ingen behandlingsmetoder pt. i DK
  
- → Hvordan skal vi håndtere PFAS-forurennet jord?



# MUDP-projekt: Udvikling af teknologi til rensning/behandling af PFAS forurennet jord



Julie K. Jensen (nu WSP)



Helena Hindrichsen, Robin Axelson



Peter B. Mortensen, Hans-Christian Greve, Gry Sander Janniche



Claus Benzin



Dorte Harrekilde, Helena Hjørringgaard, Julie Wanjiku, Bauke Zegers, Jette K. Olsen m.fl.

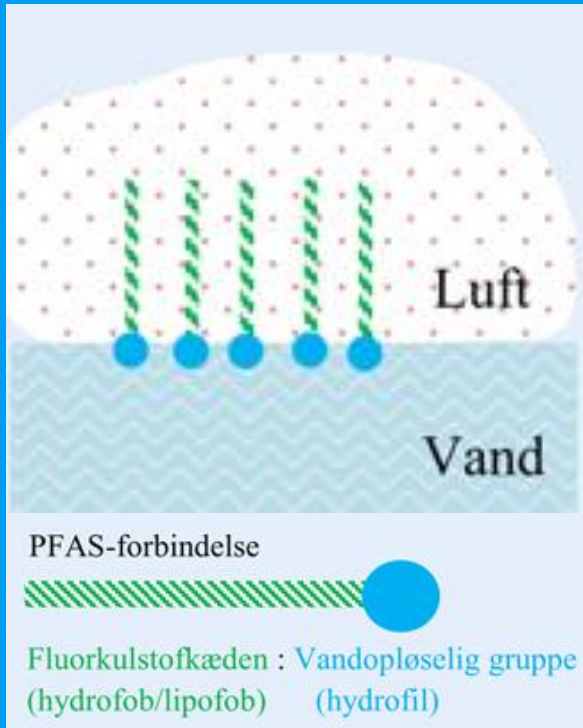


# Formål

At teste og udvikle en metode, der kan vaske PFAS-forurenede jord inkl. lerjorde

At teste og justere skumfraktionering til at nå optimale rensegrader

Undersøge mulighederne for at nyttiggøre jordfraktioner efter rensning



Kilde: PFAS-håndbogen 2022

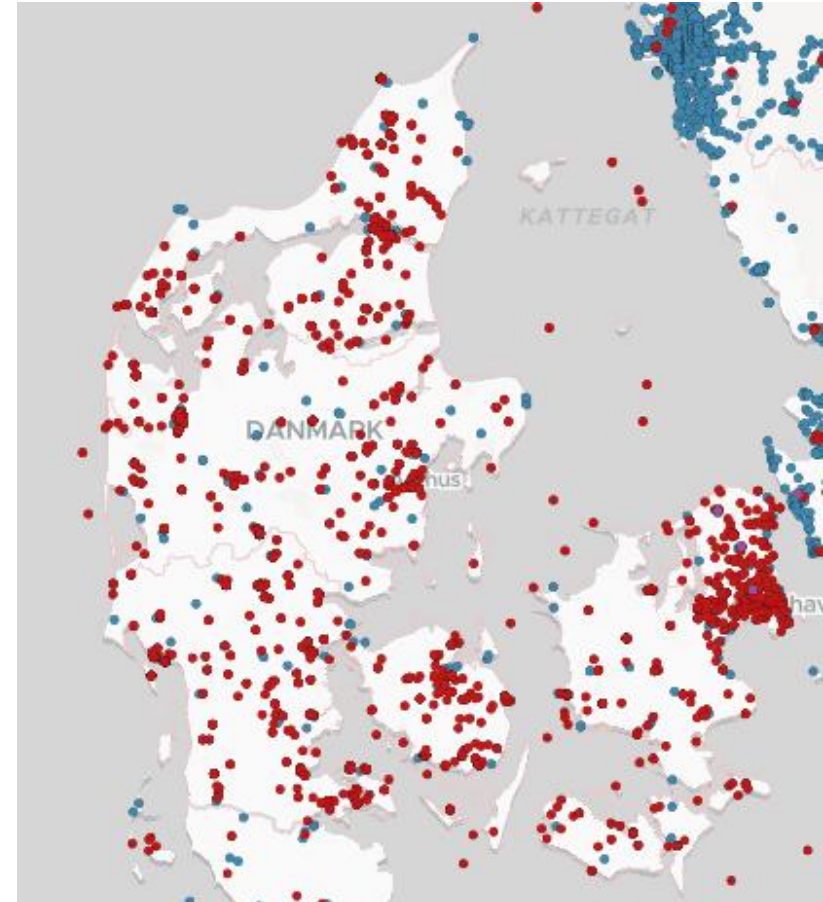
# Forsøgsjorde

PFAS forurennet jord fra 17 sites udpeget

→5 lokaliteter valgt ud fra indhold, jordtype og forureningskilde (aktivitet)

→PFAS-forurennet jord opgravet fra 4 lokaliteter: 3 brandøvelsespladser og 1 overfladebehandling af metaller

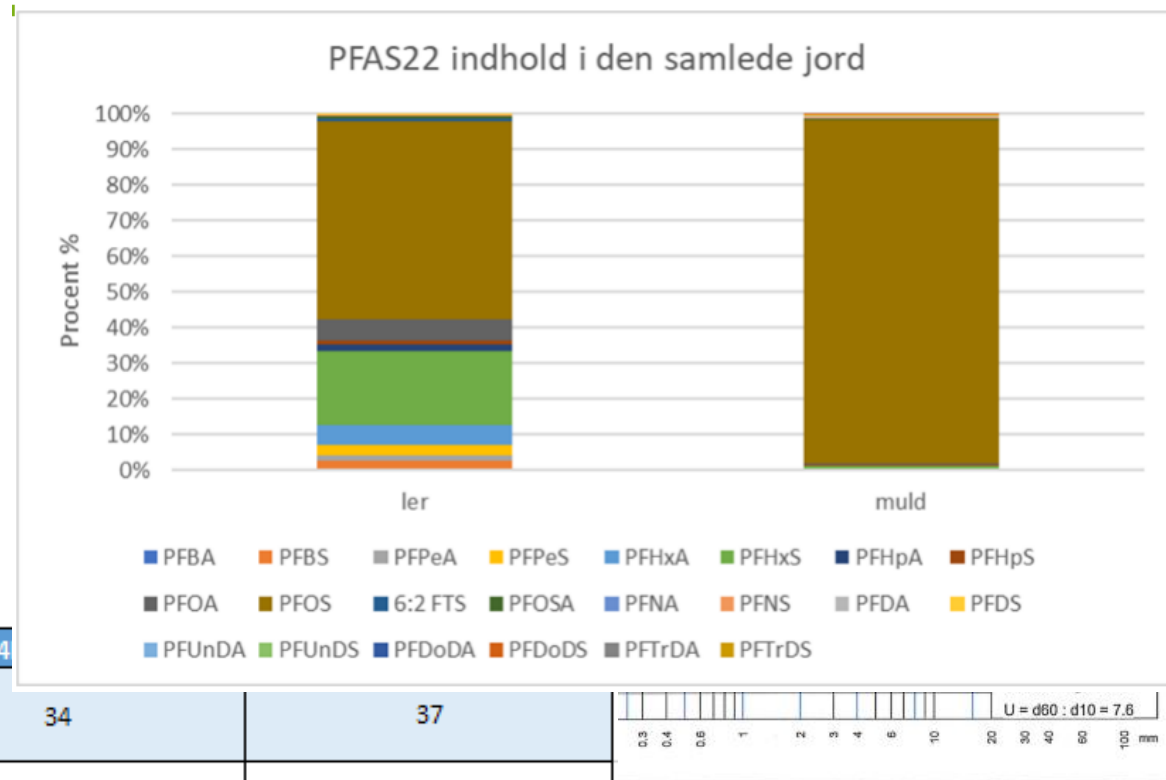
- Overfladenær jord
- Sandet jord
- Lerjord
  
- 2 bigbags pr. forsøgsjord



The Forever Pollution Project [https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination\\_6016905\\_8.html](https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination_6016905_8.html)

# PFAS jord analyse og kornstørrelsesfordeling

- Mileprøvetagning
- Standard analyse for 22PFAS



Lokation	Aktivitet	Jordtype	Sum 4	Sum 5
1	Brandslukning	Leret og sandet muldjord	34	37
2	Brandslukning	Muld	8100	8300
		Ler	380	470
3	Brandslukning	Sandet muldjord	99	100
4	Metal overfladebehandling	Sandet muldjord	1400	1400

- Neddeling af jorden
- Tørsigtning
- Krydskontaminering søgt undgået

## Forberedelse af forsøg med skumfraktionering



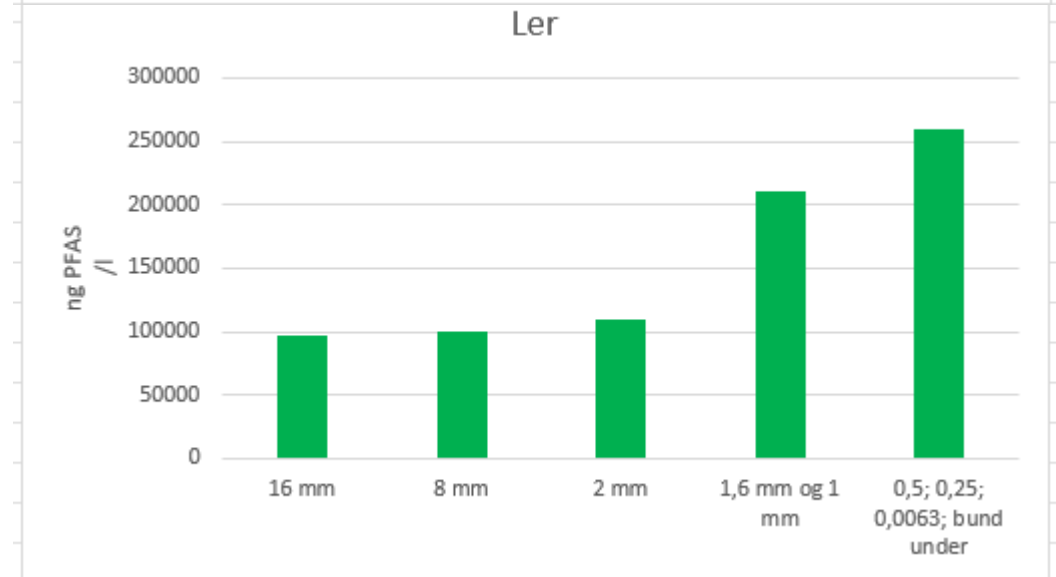
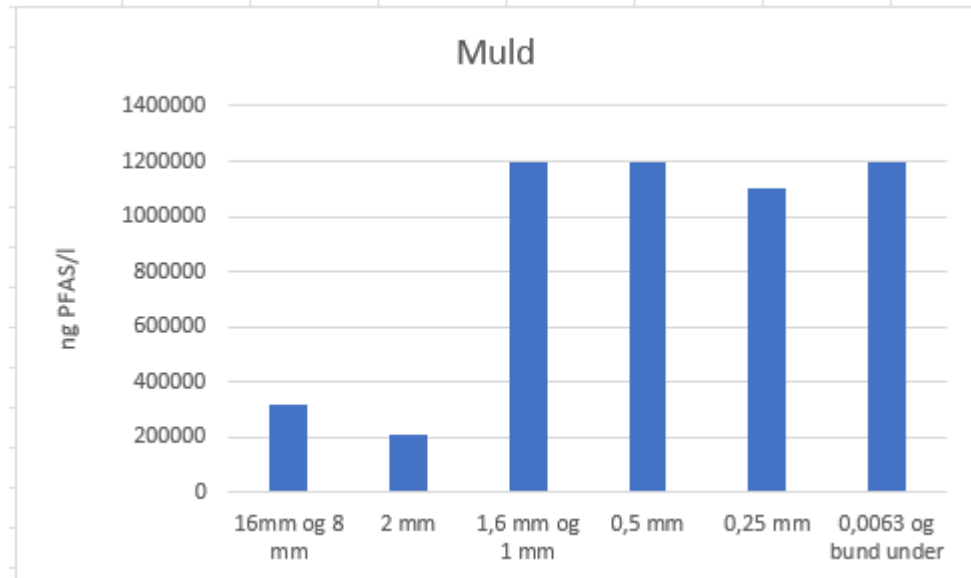
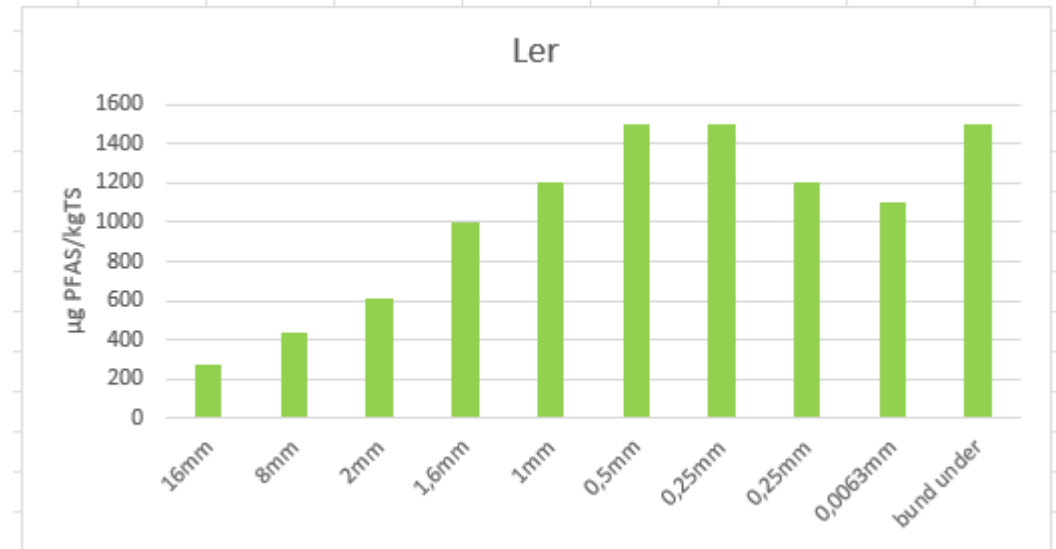
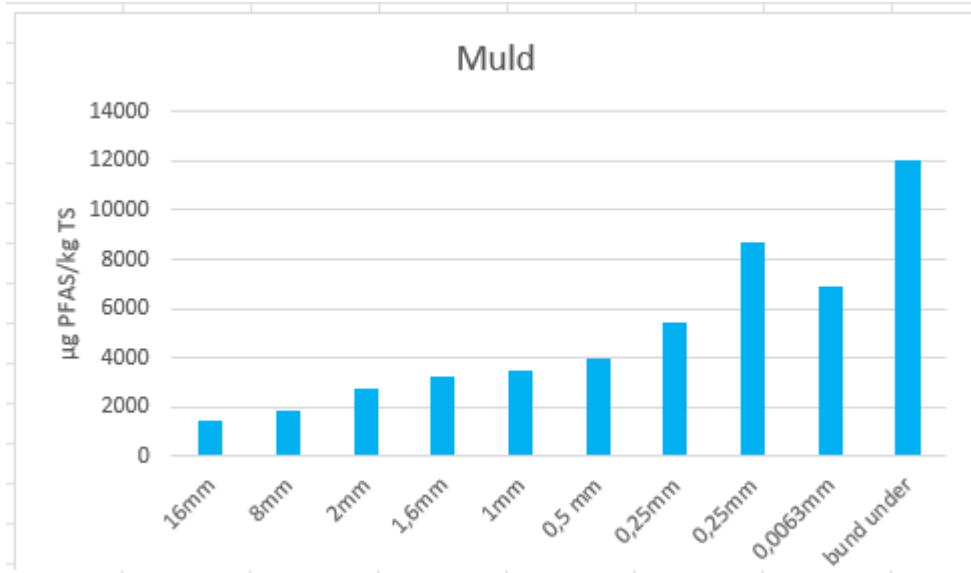
# PFAS i jordfraktioner

- Lok. 2 lerjord, efter tørsigtning og fraktionering

		16mm	8mm	2mm	1,6mm	1mm	0,5mm	0,25mm	0,25mm	0,0063mm	bund under
Tørstof	%	99,2	99,5	99,3	99	99,4	99,5	98,9	100	98,9	100
PFBA (Perfluorbutansyre)	µg/kg ts.	1,6	1,9	2,4	3,1	4,5	6,3	6,7	6,3	6,4	7,7
PFBS (Perfluorbutansulfonsyre)	µg/kg ts.	6,2	6,2	8,1	11	14	19	21	17	20	24
PFPeA (Perfluorpentansyre)	µg/kg ts.	3,2	3,4	4,1	5,9	7,3	11	12	11	11	14
PFPeS (Perfluorpentansulfonsyre)	µg/kg ts.	9	9,1	12	15	19	24	24	21	23	29
PFHxA (Perfluorhexansyre)	µg/kg ts.	16	17	21	25	32	38	41	35	39	53
PFHxS (Perfluorhexansulfonsyre)	µg/kg ts.	63	65	92	130	150	190	200	140	150	210
PFHpA (Perfluorheptansyre)	µg/kg ts.	5,6	6,1	8,1	11	14	17	16	12	15	18
PFHpS (Perfluorheptansulfonsyre)	µg/kg ts.	3,3	4,7	7,5	12	15	18	17	9,6	15	14
PFOA (Perfluoroktansyre)	µg/kg ts.	15	17	24	36	44	54	51	38	44	49
PFOS (Perfluoroktansulfonsyre)	µg/kg ts.	140	300	420	730	900	1100	1100	840	800	1000
6:2 FTS (Fluortelomersulfonat)	µg/kg ts.	1,9	2	3,1	4,8	5,3	6,6	6,4	4,7	5,5	8
PFOSA (Perfluoroktansulfonamid)	µg/kg ts.	1,2	2,9	5,5	8,9	11	12	10	7,5	9,2	11
PFNA (Perfluoronansyre)	µg/kg ts.	0,038	0,069	0,1	0,16	0,21	0,23	0,23	<1,8	0,2	<0,30
PFNS (Perfluoronansulfonsyre)	µg/kg ts.	0,49	1,2	2,2	3,3	4,3	5,2	5	<12	4,2	5,3
PFDA (Perfluordekansyre)	µg/kg ts.	<0,10	0,19	0,32	0,54	0,68	0,83	0,82	<5,9	0,69	<1,0
PFDS (Perfluordekansulfonsyre)	µg/kg ts.	0,35	0,8	1,3	2,2	3	3,6	3,4	7,9	3,1	8,6
Sum of PFAS4	µg/kg ts.	220	380	540	900	1100	1300	1400	1000	990	1300
Sum af PFAS22	µg/kg ts.	270	440	610	1000	1200	1500	1500	1200	1100	1500



# Udvaskningstests på jordfraktioner



# Udvaskningstests - lerjord

- Grad af udvaskelighed

	16 mm	8 mm	2 mm	1,6 mm og 1 mm	0,5; 0,25; 0,0063; bund under
PFBA	0,98	0,76	1,08	1,61	1,29
PFBS	0,84	0,74	0,89	1,40	1,21
PFPeA	0,94	0,82	1,17	1,59	1,45
PFPeS	0,87	0,84	0,88	1,29	1,05
PFHxA	0,96	0,82	1,05	1,36	1,13
PFHxS	0,86	0,98	0,96	1,09	1,07
PFHpA	1,04	0,98	1,06	1,25	0,99
PFHpS	0,85	0,72	0,56	0,58	0,64
PFOA	0,91	0,94	1,08	1,17	0,95
PFOS	0,59	0,26	0,12	0,16	0,22
6:2 FTS	0,93	1,20	1,10	1,13	1,02
PFOSA	0,40	0,12	0,02	0,01	0,01
PFNA	1,21	0,93	0,92	0,89	0,77
PFNS	0,06	-	-	-	-
PFDA	-	0,40	0,24	0,27	0,32
Sum af 4PFAS	0,68	0,42	0,31	0,33	0,36
Sum af 22PFAS	0,72	0,45	0,36	0,42	0,43

# Soil skumfraktioneringsenhed





# Soil skumfraktioneringsenhed

- Udført hos SGI i Linköping
- Effekt af kornstørrelse
- Effekt af PFAS-concentration/-sammensætning
- Kontakttid
- Forhold mellem vand/jord
- Effekt af booster tilsætning



# Skumfraktionering – udvalgte resultater

- Indhold af PFAS i jorden falder over tid
- Især fald i PFAS-koncentration i starten efter 15 min.

Lok.	Jordfraktion	Tid	Sum 22PFAS i jord $\mu\text{g}/\text{kg TS}$
Muld	<0,5 mm	Ind	4.700
		Efter 15 min	1.000
		Efter 45 min	700
		Efter 90 min	520



# Skumfraktionering – lerjord

- L/S=10 l/kg
- PFAS i jord reduceret
- Højt indhold af PFAS i skum

Lok.	Jordfraktion	Tid	Sum 22PFAS		
			Jord µg/kg TS	Vand ng/l	Skum ng/l
Ler	<0,5 mm	Ind	850		
		Efter 30 min.	27	860	380.000





# Skumfraktionering – konklusion pt.

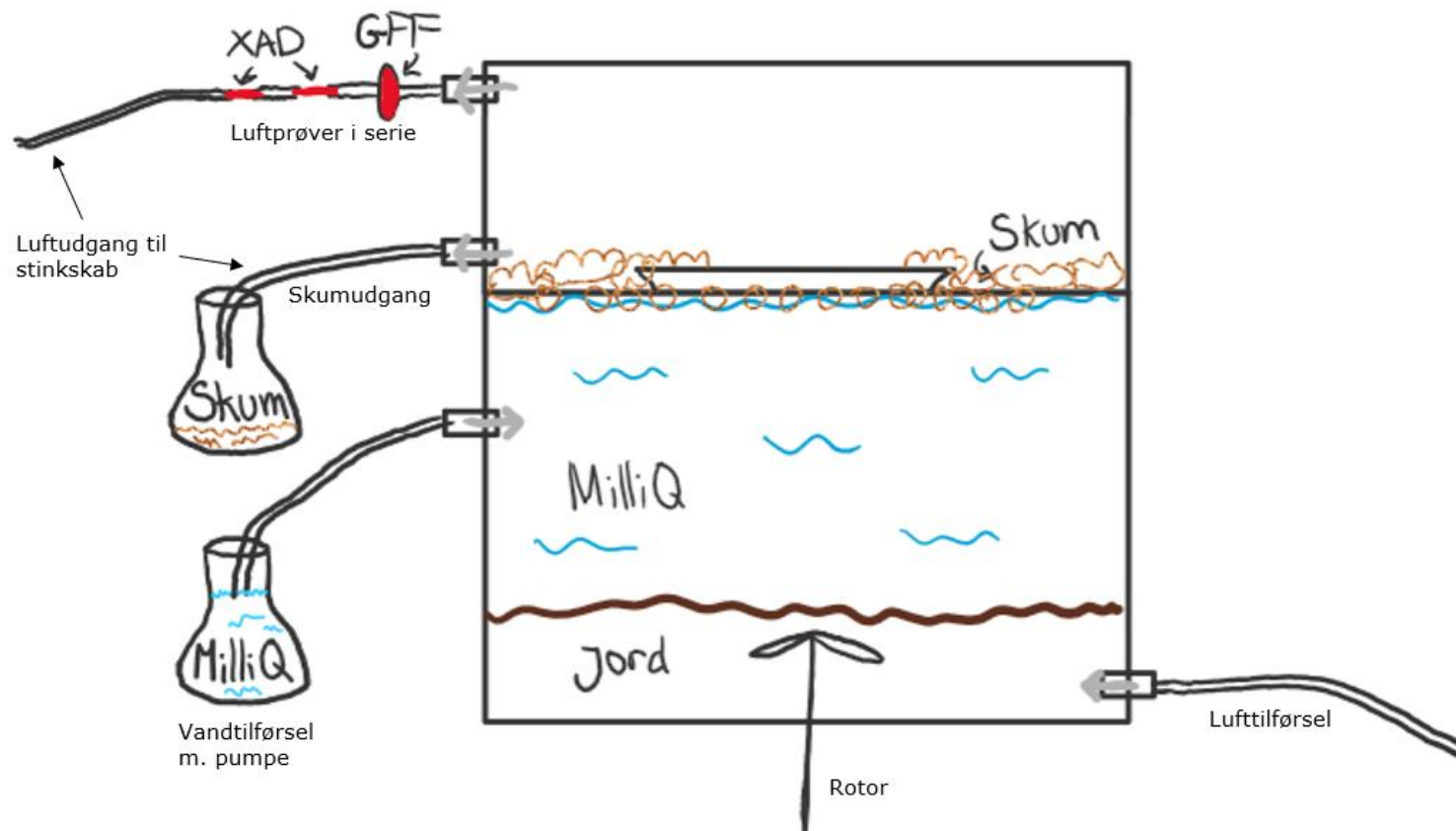
- PFAS akkumulerer i de fine fraktioner
- Også PFAS i de grovere fraktioner – skyldes formentlig dårlig fraktionering (ler klister fast på sten f.eks.)
- Soil skumfraktioneringsenheden kunne ikke helt skille lerfraktionen ad
- Tegn på at skumdannelse i jorde med lave PFAS konc er udfordrende, kræver længere tid
- Høje indhold af PFAS i skummet!
- Kræver optimering (kontakttid, evt. tilsætning af booster, mv.)



# Skumfraktionering – luft og aerosoler (TUP add-on)

## Formål:

- Hvor meget PFAS fjernes via luftfasen?
- Kan emitteret PFAS udgøre en arbejdsmiljømæssig risiko?
- Envytechs SAFF har kulfilter på luftafgang!

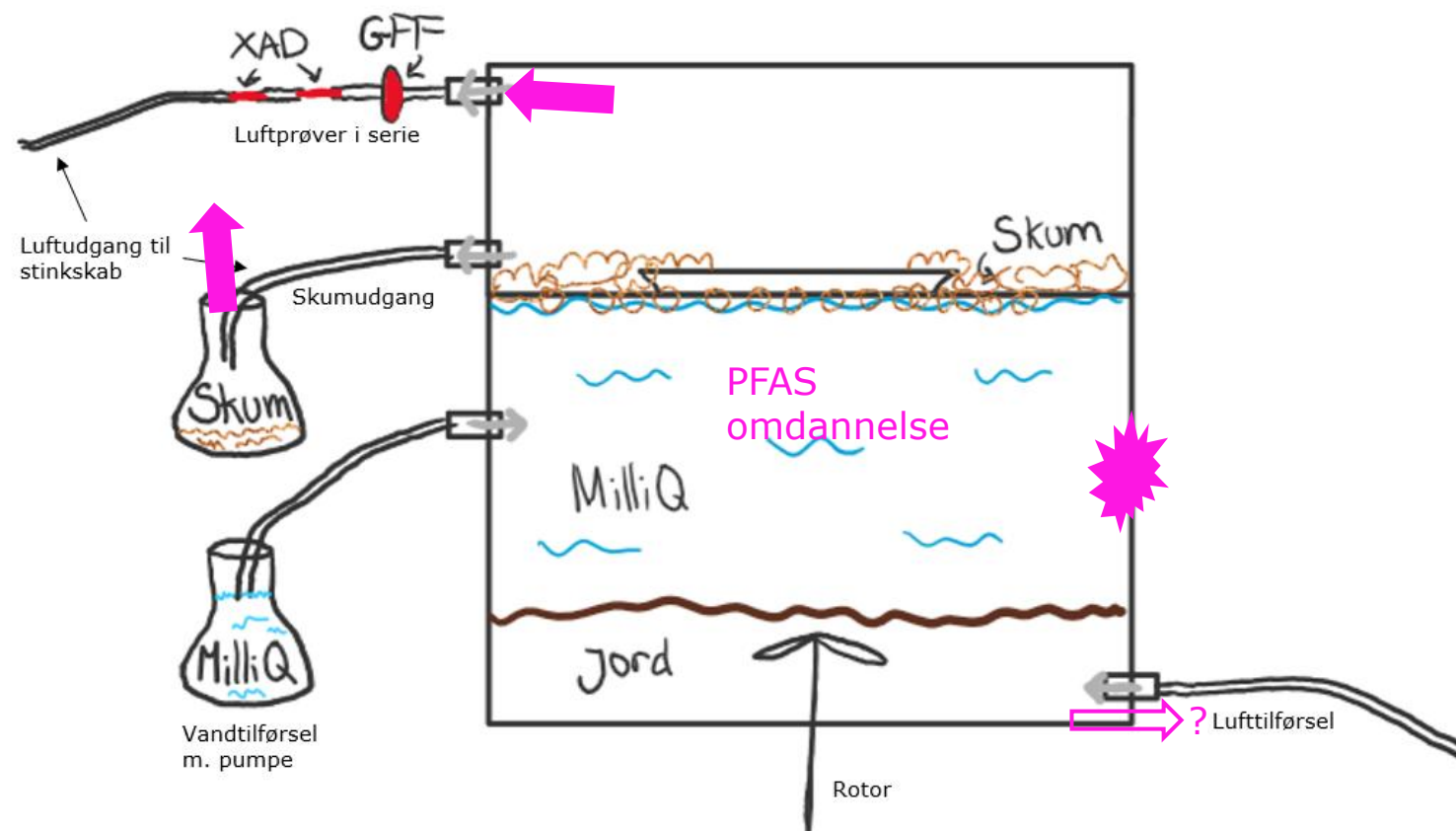


# Skumfraktionering – luft og aerosoler

Massebalance: Undersøgelser viser, at op til 36% mindre PFAS i skum end fjernet fra vandfasen

*McCleaf et al 2021*

*Smith et al 2022*





# PFAS i luften - resultater

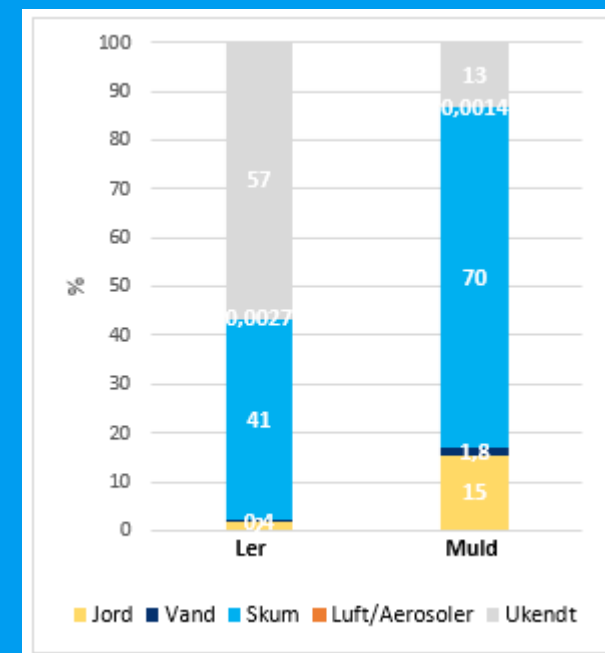
	Jord ind µg/kg TS	Jord 1 ud			
		Jord µg/kg TS	Vand ng/l	Skum ng/l	Luft ng/rør
PFHxA	27	1,1	3.100	6.000	<0,500
PFHxS	110	2,9	3.800	210.000	<0,500
PFOA	30	0,71	300	75.000	<0,500
PFOS	610	17	410	880.000	0,674-7,46
Sum 4 PFAS	750	21	4.500	1.200.000	
Sum PFAS	850	25	12.000	1.200.000	
EOF		400			
AOF mg/l			0,059	3	

Ler <0,5 mm

	Jord ind µg/kg TS	Jord 4 ud			
		Jord µg/kg TS	Vand ng/l	Skum ng/l	Luft ng/rør
PFHxA	18	1,4	2.100	<5.000	<0,500
PFHxS	95	6	5.500	49.000	<0,500
PFOA	40	2,6	1.400	45.000	<0,500
PFOS	3.300	590	11.000	5.500.000	4,4-10,9
Sum 4 PFAS	3.400	600	18.000	5.600.000	
Sum PFAS	3.600	650	24.000	5.700.000	
EOF		4.100			
AOF mg/l			0,038	2,6	

Muld 0,5-2 mm

- Forsøg med ca. 780 g jord, 8 liter vand, 1 bar, 450 omdrejninger
- Luftprøver udtaget efter 5 og 30 minutter
- De langkædede opkoncentreres i skummet (ca. 280 g)
- Kun PFOS påvist i luft



# Lab. Forsøg med skumfraktionering - sammenfatning

- Udvaskning af de kritiske PFAS falder med faldende kornstørrelse
- Lerjorde - god høj PFAS-koncentration i skummet – mere skum ønskes!
- Massebalancen udfordrer os, men er fornuftig→gå videre til pilotskala
- Der skal styr på luftemissionen!
- Skumfraktionering kræver optimering før vi kan få en jord, der kan nyttiggøres (kontakttid, evt. tilsætning af booster for at øge skumdannelsen, mv.)
- Hvordan vil det se ud, hvis vi vasker med bedre kontakt i lerjord? Hvad med "filterkagen"? Se næste indlæg



# Tak for opmærksomheden

Spørgsmål?

Kontakt Dorte Harrekilde [doh@ramboll.dk](mailto:doh@ramboll.dk)

