

Risikovurdering af PFAS

Praktiske erfaringer

Kirsten Rügge, Tage V. Bote,
Tanja J. Christensen



Grundvand undersøges for PFAS

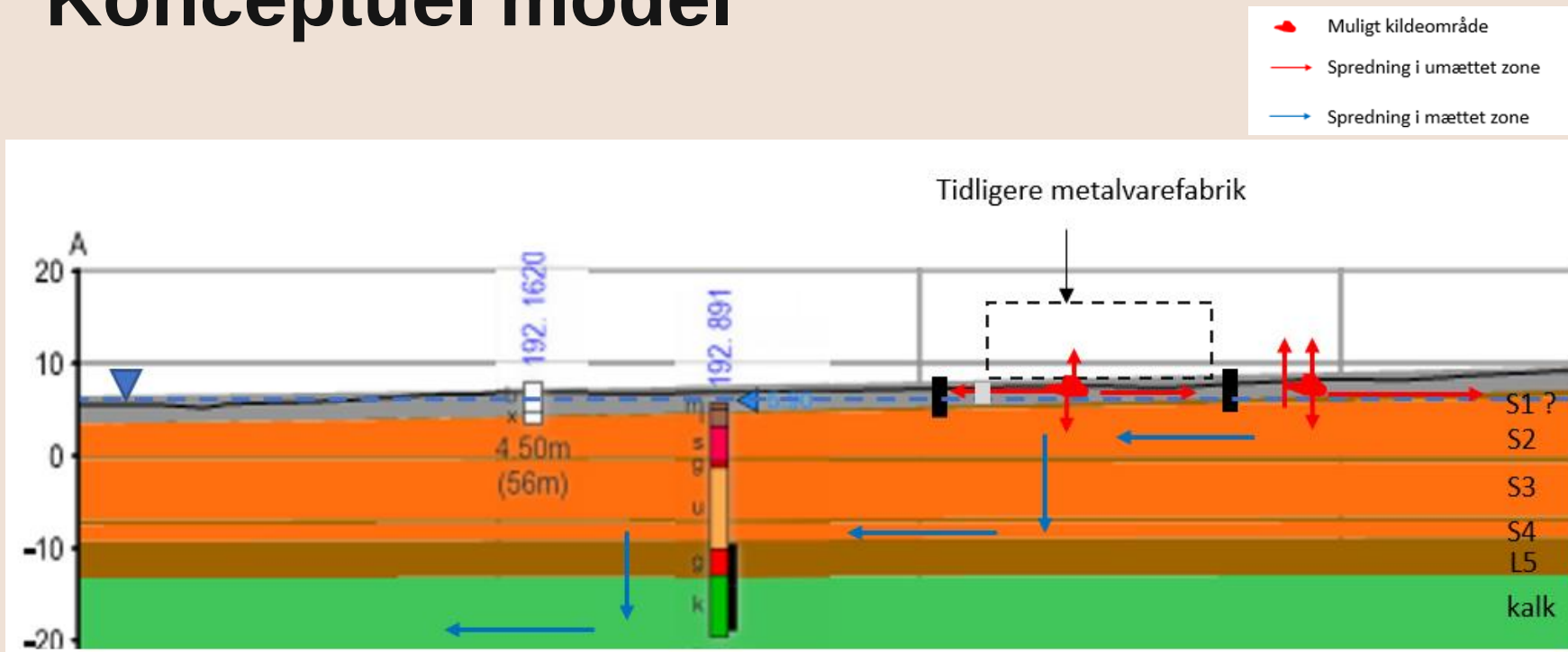
I medfør af jordforureningsloven undersøges for PFAS ved punktkilder.

Naturstyrelsen har i 2014 indskærpet over for kommunerne, at den regelmæssige kontrol af forsyningerne også skal omfatte PFAS-forbindelser, såfremt der kan være en kilde i oplandet.

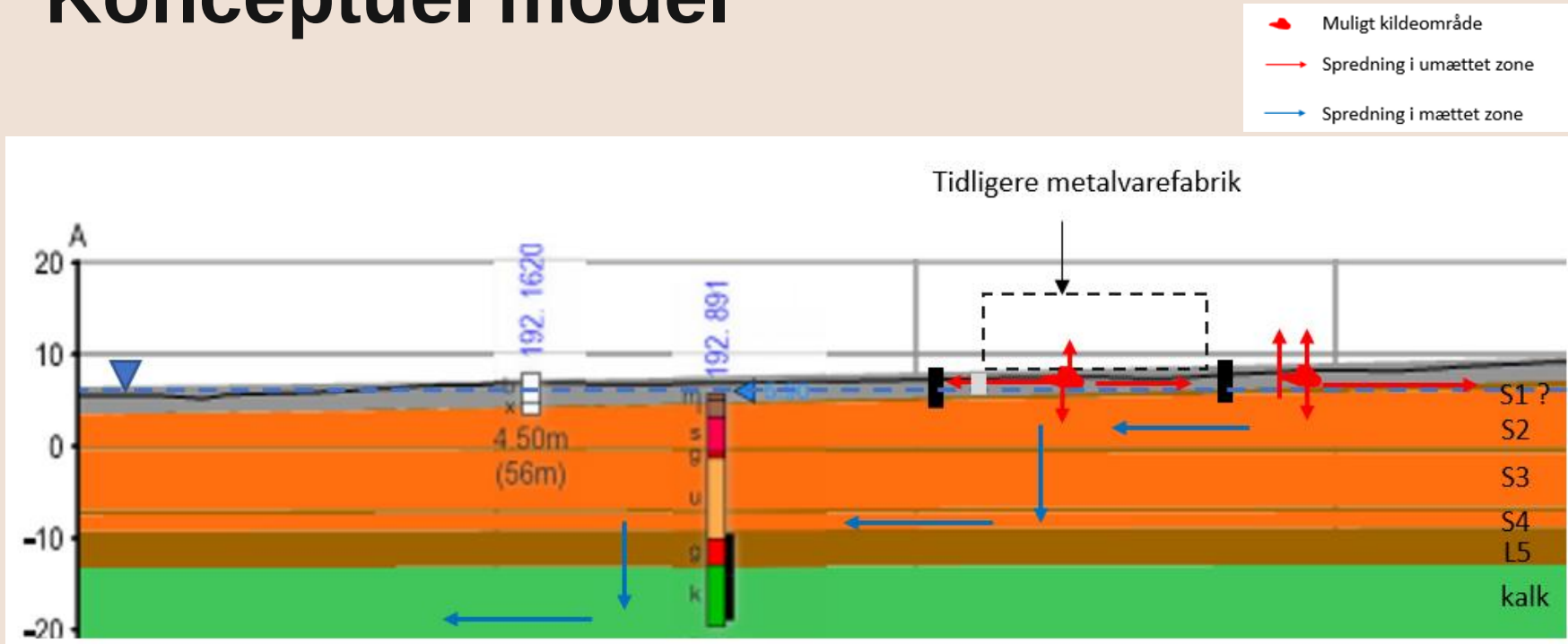
PFAS-forbindelser indgår i NOVANA's screeningsprogram.

(Falkenberg, J., Olsen, J.K., Törnemann, N, 2017)

Konceptuel model



Konceptuel model



Hvad ser vi typisk?

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	GR1	GR2	GR4	R16	R18	R19
		GV	GV	GV	GV	GV	GV	GV	GV	GV	Overfladev	Overfladev	Overfladev	GV	GV	GV
	Antal C i kæden	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
PFBS	3	1,9		1,4	3,7	3,4	2,1	2,1		2,5	5,5	7,1	2,5	3,3	2,2	1,0
PFPeS	5						0,8				0,9	0,9				
PFHxS	6			1,4	1,8	0,8	3,4			0,8	1,1	1,5	0,6			
PFHpS	7			0,9												
PFOS	8	0,5	1,6	56	6,4	3,9		3,8	2,5	0,3	2,9	4,9	1,9		0,4	1,4
PFNS	9															
PFDS	10															
PFUnS	11															
PFDoS	12															
PFTTrS	13															
PFBA	3		1,8	6,1	17	1,9	10	11		7,5	7,1	10	4,3	3,1	1,6	4,4
PFPeA	4			3,1	4,9		2,0	3,0		2,1	5,2	4,5	2,5	2,4	0,7	0,8
PFHxA	6			3,3	4,3		2,2	3,3		1,7	9,7	12	4,6	3,8	1,5	
PFHpA	6			3,4	3,6	0,3	1,0	2,0	3,9	1,3	2,9	4,1	1,5	1,6	0,5	
PFOA	7	1,9	2,6	15	8,4	4,9	3,7	6,5	8,3	6,2	5,7	10	3,5	3,3	0,6	
PFNA	8			0,4	1,1	0,6		0,8								
PFDA	9							0,8								
PFUnDA	10															
PFDoDA	11															
PFTTrDA	12															
6:2 FTS	8															
PFOSA	8			1,7	0,7			0,4							0,4	

Hvad ser vi typisk?

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	GR1	GR2	GR4	R16	R18	R19
		Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Muld	Muld	Muld	Sand	Sand	Sand
	Antal C i kæden	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
PFBS	3	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFPeS	5	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFHxS	6	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00004	0,00004	0,00004	<0,00003	<0,00003	<0,00003
PFHpS	7	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFOS	8	0,00021	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00020	<0,00003	<0,00003	0,00005	<0,00003	0,00074	0,00074	0,00081	<0,00003	<0,00003	<0,00003
PFNS	9	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFDS	10	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFUnDS	11	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFDoS	12	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFTrS	13	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFBA	3	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0003	0,00010	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFPeA	4	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFHxA	6	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0004	0,0004	0,00010	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFHpA	6	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFOA	7	0,00004	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00012	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00027	0,00027	0,00027	<0,00003	<0,00003	<0,00003
PFNA	8	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00011	0,00011	0,00014	<0,00003	<0,00003	<0,00003
PFDA	9	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFUnDA	10	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFDoDA	11	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFTrDA	12	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
6:2 FTS	8	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PFOSA	8	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Risikoguide

Lokalitetsnummer	1234	Kommentar
Lokalitetsnavn	Teflonvej	
Dato og revisionsnummer	07-03-2023	
Sagsbehandler	KIRU	

RESUME	Resultat	Kommentar
Skal fanebladet udfyldes?	Ja	
Er fanebladet udfyldt korrekt?	Ja	Angiv masse hvis estimeret
Resultat for ressourcen:	$0,1 \leq \text{flux/risikoflux} \leq 10$	Risiko/ikke risiko kan ikke afklares pba. flux
Resultat for indvindingen:	$\text{flux/risikoflux} < 0,1$	Der er mindre sandsynlighed for risiko for indvindingen
Særligt vedr. omfang af risikovurdering:		

Parameter	Værdi	Kommentar	Kommentar
Primært forureningsstof	PFOS		
Q (m ³ /år), opblandingsmængde for ressourcen	200.000	m ³ /år. Standardvandmængde er 200.000 m ³ /år, kan overskrives efter behov	
Q (m ³ /år), pumpet mængde på vandværk	500.000	m ³ /år. Samlet indvinding for hele vandværket. I nogle tilfælde kan det dog være relevant at angive en mindre del af den samlede indvinding.	
Estimeret flux (bedste bud), J	0,04	g/år, sammenlignes med risikofluxen	0,04 g/år = 40 mg/år
Masse i kildeområdet		kg	
Masse i fane		kg. Benyttes til estimering af årstal for start af flux på fanebladet "Varighed af flux".	
Årstal for undersøgelsen der ligger til grund for fluxberegningen	2023	Angives som årstal, fx 2018. Hvis undersøgelsen strækker sig over flere år, angives fx det seneste.	Sum 4 stk.
Grundvandskvalitetskriteriet, GVK	0,002	µg/L	
Beregnet risikoflux, J _{risiko} ressourcen	0,4	g/år	
Beregnet risikoflux, J _{risiko} aktuel indvindingen	1	g/år	
Flux/risikoflux for ressourcen	0,10	Faktor	
Flux/risikoflux for indvindingen	0,04	Faktor	

Lidt beregninger



- $K_d = \frac{C_l}{C_v}$
- $M_{tot} = C_j * V_j * \partial_j + C_v * V_v * \partial_v + C_l * V_l * \partial_l$
- $C_{tot} = \frac{M_{tot}}{V_{tot}}$
- $C_{tot} = C_j * V_j * \partial_j + C_v * V_v * \partial_v$
- $C_j = \frac{(C_{tot} - C_v * V_v * \partial_v)}{V_j * \partial_j}$

Typiske værdier

- $V_l = 0$ (mættede forhold)
- $V_v = 0,4$
- $V_j = (1 - 0,4)$
- $\partial_v = 1 \text{ kg/l}$
- $\partial_j = 2,7 \text{ kg/l}$

K_d-værdier

Kemiske navn	Perfluor butansyre	Perfluor butan-sulfonsyre	Perfluor pentansyre	Perfluor pentan sulfonsyre	Perfluor hexansyre	Perfluor hexan sulfonsyre	Perfluor heptansyre	Perfluor heptan sulfonsyre	Perfluor oktansyre
Forkortelse	PFBA	PFBS	PFPeA	PFPeS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFHpS	PFOA
Molekyleform	C ₃ F ₇ COOH	C ₄ F ₉ SO ₃ H	C ₄ F ₉ COOH	C ₅ F ₁₁ SO ₃ H	C ₅ F ₁₁ COOH	C ₆ F ₁₃ SO ₃ H	C ₆ F ₁₃ COOH	C ₇ F ₁₅ SO ₃ H	C ₇ F ₁₅ COOH
K _d litteratur		0,0011- 0,011			0,06-0,6	0,028- 0,28	0,3- 10,7		0,6- 2511
Kd-Sandmuld	0,47	0,5	0,44	0,81	0,52	2,12	1,41	7,48	2,84
Kd-Sand	0,06	0,05	0,04	0,1	0,05	0,28	0,3	0,95	0,53
Kd-Lermuld	0,31	0,34	0,31	0,37	0,31	0,52	0,55	1,08	0,74
Kd-Ler	0,3	0,31	0,28	0,35	0,28	0,63	0,84	2,73	0,86

Kemiske navn	Perfluor oktan sulfonsyre	6:2 Fluorotelomer sulfonate	Perfluor oktan sulfonamid	Perfluor nonansyre	Perfluor nonan sulfonsyre	Perfluor dekansyre	Perfluor dekan sulfonsyre	Perfluor undekansyre	Perfluor dodekansyre
Forkortelse	PFOS	6:2 FTS	PFOSA	PFNA	PFNS	PFDA	PFDS	PFUnDA/ PFUnA	PFDoDA
Molekyleform	C ₈ F ₁₇ SO ₃ H	C ₈ H ₄ F ₁₃ O ₃ S ⁻	C ₈ F ₁₇ SO ₂ NH ₂	C ₈ F ₁₇ COOH	C ₉ F ₁₉ SO ₃ H	C ₉ F ₁₉ COOH	C ₁₀ F ₂₁ SO ₃ H	C ₁₀ F ₂₁ COOH	C ₁₁ F ₂₃ COOH
K _d litteratur	0,67- 35		15 - 155	7,1 - 72					
Kd-Sandmuld	34,3	1,77	47,29	10,69	119,7	45,75	325	45,75	45,75
Kd-Sand	3,22	0,19	15,58	1,27	6,26	93,1	27,3	11,7	93,1
Kd-Lermuld	3,71	0,47	3,14	2,1	13,73	905	66,5	20,7	905
Kd-Ler	5,66	0,87	12,82	2,46	9,57	187,8	16,3	45,1	187,8

(PFAS-håndbogen 2022)

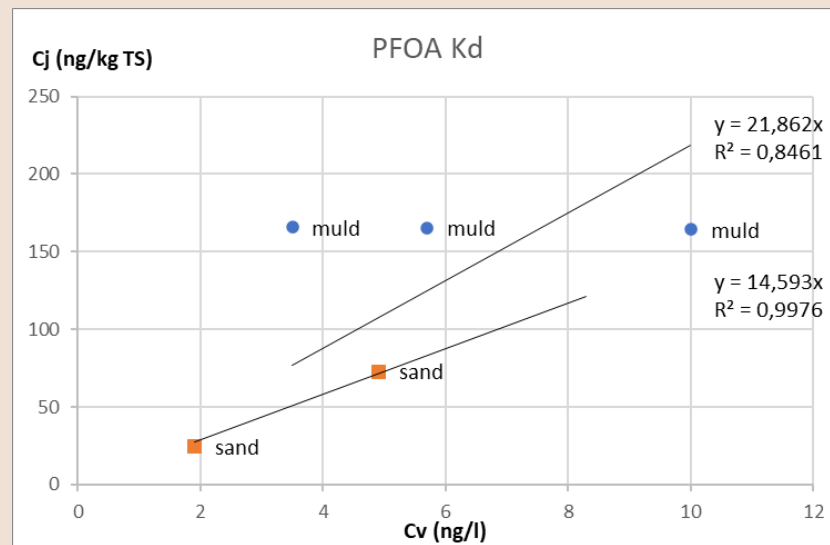
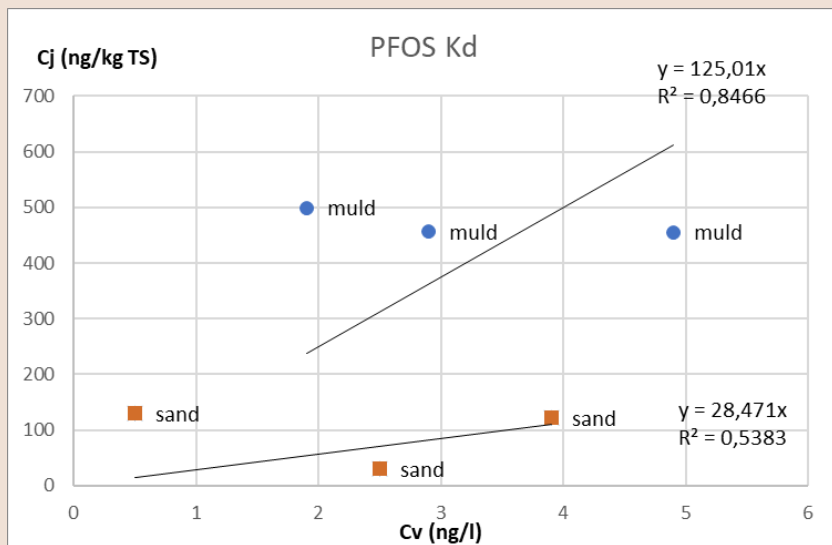
Passer det så, at jordkonc. er <dg? Ja!

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	GR1	GR2	GR4	R16	R18	R19
		Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Muld	Muld	Muld	Sand	Sand	Sand
	Antal C i kæden	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
PFBS	3	9,139E-07		6,734E-07	1,7797E-06	1,6354E-06	1,0101E-06	1,0101E-06		1,2025E-06	6,655E-06	8,591E-06	3,025E-06	1,5873E-06	1,0582E-06	0,000000481
PFPeS	5						4,5522E-07			0	1,541E-06	1,541E-06				
PFHxS	6			1,195E-06	1,5365E-06	6,8288E-07	2,90224E-06			6,48736E-07	4,218E-06	5,752E-06	2,301E-06			
PFHpS	7			1,668E-06												
PFOS	8	2,8082E-06	8,98624E-06	0,0003145	3,5945E-05	2,1904E-05		2,13423E-05	0,000014041	1,46026E-06	0,0001623	0,0002742	0,0001063		2,24656E-06	7,86296E-06
PFNS	9															
PFDS	10															
PFUnS	11															
PFDoS	12															
PFTTrS	13															
PFBA	3		8,9496E-07	3,033E-06	8,4524E-06	9,4468E-07	0,000004972	5,4692E-06		0,000003729	8,246E-06	1,161E-05	4,994E-06	1,54132E-06	7,9552E-07	2,18768E-06
PFPeA	4			1,441E-06	2,2775E-06		9,296E-07	1,3944E-06		9,7608E-07	5,787E-06	5,008E-06	2,782E-06	1,11552E-06	3,2536E-07	3,7184E-07
PFHxA	6			1,587E-06	2,0683E-06		1,0582E-06	1,5873E-06		8,177E-07	1,205E-05	1,491E-05	5,715E-06	1,8278E-06	7,215E-07	
PFHpA	6			3,012E-06	3,1896E-06	3,0124E-07	8,5056E-07	0,000001772	3,4554E-06	1,1518E-06	7,784E-06	1,101E-05	4,026E-06	1,4176E-06	0,000000443	
PFOA	7	0,000002	3,27236E-06	1,888E-05	1,0572E-05	6,1671E-06	4,65682E-06	8,1809E-06	1,04464E-05	7,80332E-06	2,85E-05	5,001E-05	1,75E-05	4,15338E-06	7,5516E-07	
PFNA	8			1,057E-06	2,7031E-06	1,4499E-06		1,96592E-06								
PFDA	9							9,82691E-06								
PFUnDA	10															
PFDoDA	11															
PFTTrDA	12															
6:2 FTS	8															
PFOSA	8			6,8E-07	2,72E-07			0,000000144							0,00000016	

Hvad skal konc. være i vand for at det kan ses i jord?

		Ctot, dg	Sandmuld	Sand	Overfladevand	Grundvand	Overfladevand	Grundvand	Grundvand
	Antal C i kæden	mg/kg TS	Kd	Kd	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
PFBS	3	0,00010	0,5	0,1	57	187	5,50	1,4	3,4
PFPeS	5	0,00010	0,8	0,1	39	149	0,90	<0,30	<0,30
PFHxS	6	0,00003	2,1	0,3	4,9	26	1,10	1,4	0,8
PFHpS	7	0,00010	7,5	1,0	4,9	34		0,86	<0,30
PFOS	8	0,00003	34,3	3,2	0,3	3,3	2,90	56	3,9
PFNS	9	0,00010	119,7	6,3	0,3	5,8		<0,30	<0,30
PFDS	10	0,00010	325,0	27,3	0,1	1,3		<0,30	<0,30
PFUnS	11	0,00010							
PFDoS	12	0,00010							
PFTrS	13	0,00010							
PFBA	3	0,00010	0,5	0,1	60	178	7,10	6,1	1,9
PFPeA	4	0,00010	0,4	0,0	63	197	5,20	3,1	<0,30
PFHxA	6	0,00010	0,5	0,1	55	187	9,70	3,3	<0,30
PFHpA	6	0,00010	1,4	0,3	24	83	2,90	3,4	0,34
PFOA	7	0,00003	2,8	0,5	3,7	16	5,70	15	4,9
PFNA	8	0,00003	10,7	1,3	1,0	7,8		0,43	0,59
PFDA	9	0,00010	45,8	7,5	0,8	4,8		<0,30	<0,30
PFUnDA	10	0,00010	45,8	11,7	0,8	3,1		<0,30	<0,30
PFDoDA	11	0,00010	45,8	93,1	0,8	0,4		<0,30	<0,30
PFTrDA	12	0,00010							
6:2 FTS	8	0,00010	1,8	0,2	19,3	109,5		<0,30	<0,30
PFOSA	8	0,00010						1,7	<0,30

K_d fra faktiske målinger

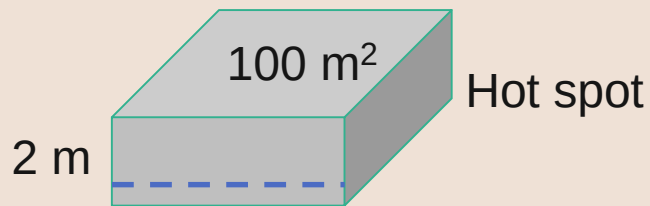


K_d-værdier

Kemiske navn	Perfluor butansyre	Perfluor butan-sulfonsyre	Perfluor pentansyre	Perfluor pentan sulfonsyre	Perfluor hexansyre	Perfluor hexan sulfonsyre	Perfluor heptansyre	Perfluor heptan sulfonsyre	Perfluor oktansyre
Forkortelse	PFBA	PFBS	PFPeA	PFPeS	PFHxA	PFHxS	PFHpA	PFHpS	PFOA
Molekyleform	C ₃ F ₇ COOH	C ₄ F ₉ SO ₃ H	C ₄ F ₉ COOH	C ₅ F ₁₁ SO ₃ H	C ₅ F ₁₁ COOH	C ₆ F ₁₃ SO ₃ H	C ₆ F ₁₃ COOH	C ₇ F ₁₅ SO ₃ H	C ₇ F ₁₅ COOH
K _d litteratur		0,0011- 0,011			0,06-0,6	0,028- 0,28	0,3- 10,7		0,6- 2511
Kd-Sandmuld	0,47	0,5	0,44	0,81	0,52	2,12	1,41	7,48	2,84
Kd-Sand	0,06	0,05	0,04	0,1	0,05	0,28	0,3	0,95	0,53
Kd-Lermuld	0,31	0,34	0,31	0,37	0,31	0,52	0,55	1,08	0,74
Kd-Ler	0,3	0,31	0,28	0,35	0,28	0,63	0,84	2,73	0,86
Kd-Muld									21,9
Kd-Sand									14,6

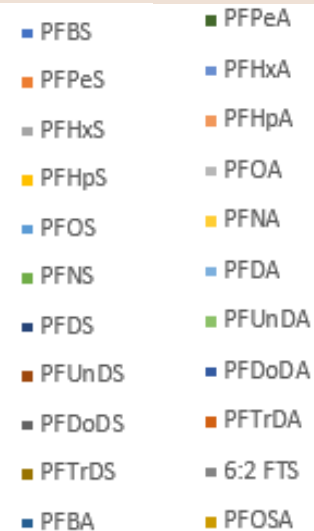
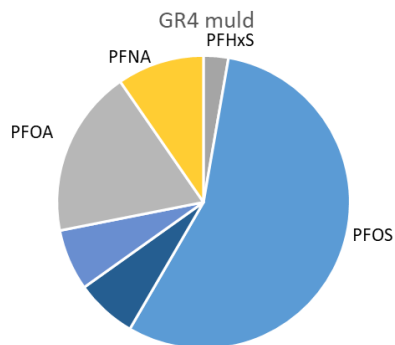
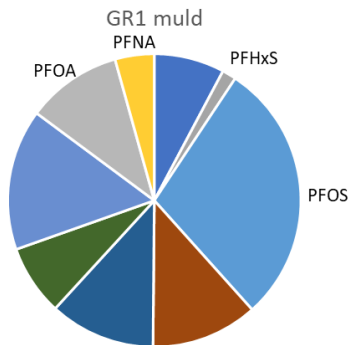
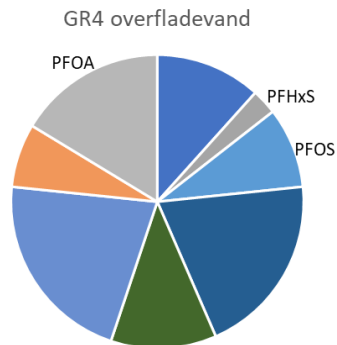
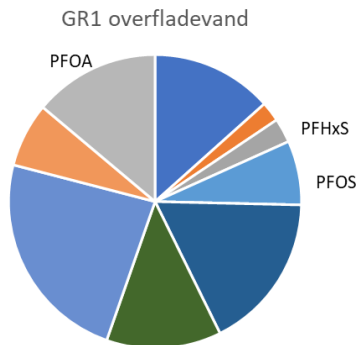
Kemiske navn	Perfluor oktan sulfonsyre	6:2 Fluorotelomer sulfonate	Perfluor oktan sulfonamid	Perfluor nonansyre	Perfluor nonan sulfonsyre	Perfluor dekansyre	Perfluor dekan sulfonsyre	Perfluor undekansyre	Perfluor dodekansyre
Forkortelse	PFOS	6:2 FTS	PFOSA	PFNA	PFNS	PFDA	PFDS	PFUnDA/ PFUnA	PFDoDA
Molekyleform	C ₈ F ₁₇ SO ₃ H	C ₈ H ₄ F ₁₃ O ₃ S ⁻	C ₈ F ₁₇ SO ₂ NH ₂	C ₈ F ₁₇ COOH	C ₉ F ₁₉ SO ₃ H	C ₉ F ₁₉ COOH	C ₁₀ F ₂₁ SO ₃ H	C ₁₀ F ₂₁ COOH	C ₁₁ F ₂₃ COOH
K _d litteratur	0,67- 35		15 - 155	7,1 - 72					
Kd-Sandmuld	34,3	1,77	47,29	10,69	119,7	45,75	325	45,75	45,75
Kd-Sand	3,22	0,19	15,58	1,27	6,26	93,1	27,3	11,7	93,1
Kd-Lermuld	3,71	0,47	3,14	2,1	13,73	905	66,5	20,7	905
Kd-Ler	5,66	0,87	12,82	2,46	9,57	187,8	16,3	45,1	187,8
Kd-Muld	125								
Kd-Sand	28,5								

Hvad overser vi?

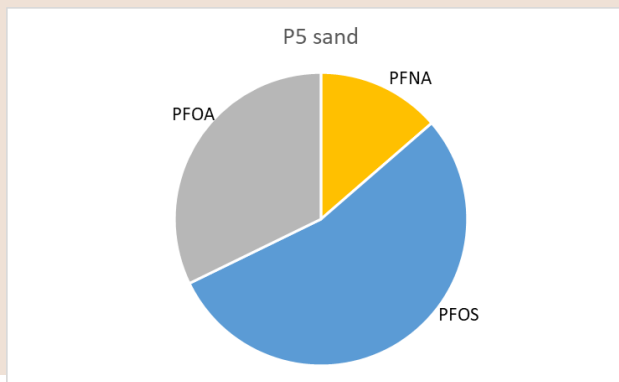
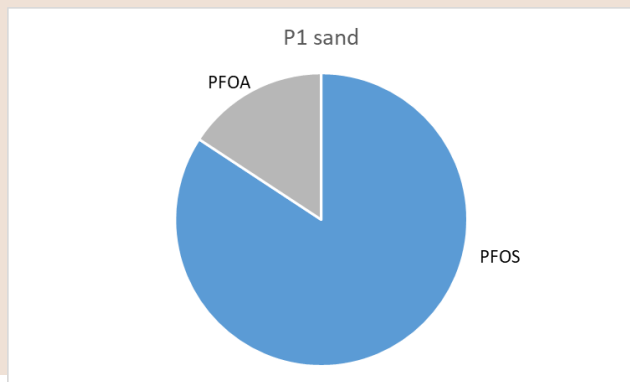
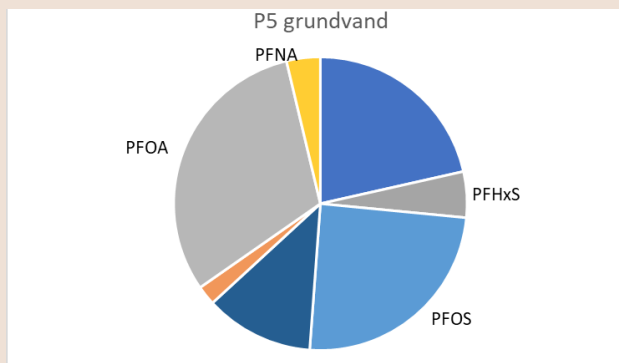
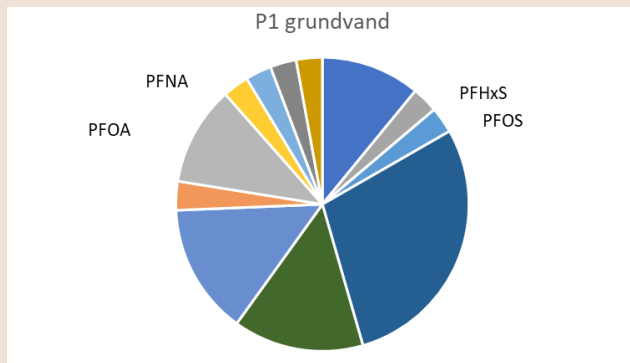


Stof	areal (m ²)	dybde (m)	vol (m ³)	gns. konc. i jord (mg/kg TS) (g/t TS)	gns.konc i porevand (µg/l) (mg/m ³)	porøsitet (gns.) E	dens. Jord (t/m ³)	masse jord (g)	masse vand (g)	masse total (g)	nedsivn. (mm/år)	flux (mg/år)
PFOS	100	2	200	0,001596	0,056	0,4	2,7	0,52	0,0045	0,52	300	1,68
PFOA	100	2	200	0,000219	0,015	0,4	2,7	0,07	0,0012	0,07	300	0,45
PFOS	100	2	200	0,0381900	1,34	0,4	2,7	12,37	0,1072	12,48	300	40

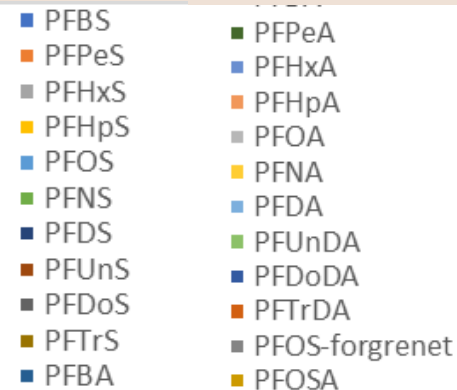
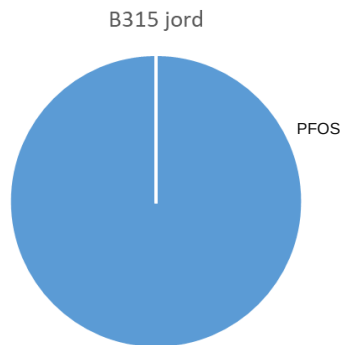
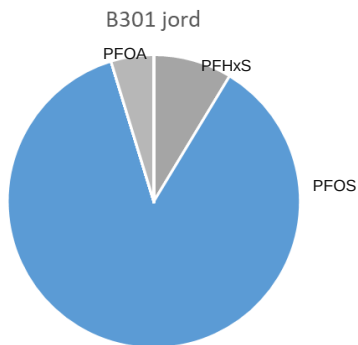
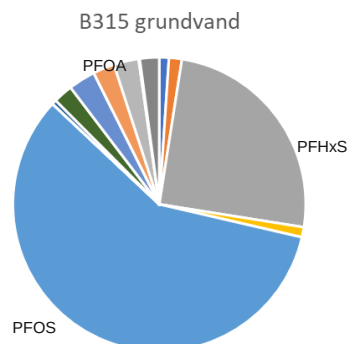
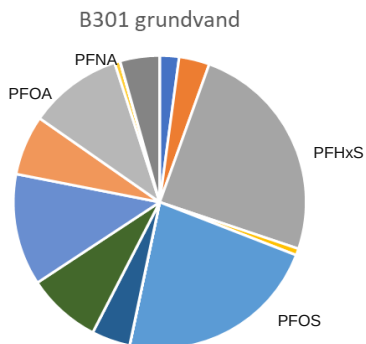
Hvad viser analyserne?



Hvad viser analyserne?



Hvad viser analyserne?



Konklusioner

- Store variationer på K_d -værdier
- Med de forholdsvis lave koncentrationer i vand, vil vi ikke kunne se det i jorden
- Detektionsgrænsen i jord er forholdsvis høj
- Vi går glip af massen i jorden
- Eller vi beregner et meget usikkert estimat
- Overfladeprøver af jord er ikke tilstrækkelige til en risikovurdering
- I muld ses langt flere stoffer end i sand
- Der skal forholdsvis høje koncentrationer til, før der er en risiko for grundvandsressourcen
- Sammenhæng mellem jord og vand er noget rod
- Udtag sammenhængende prøver af jord og vand samt TOC-analyser

