



Achieving Remediation And GOverning
Restoration of contaminated soils Now



PFAS-forurening og konsekvenser for byer

4. December 2025

Jordbundens Dag, Sund jord til sunde byer

Københavns Universitet

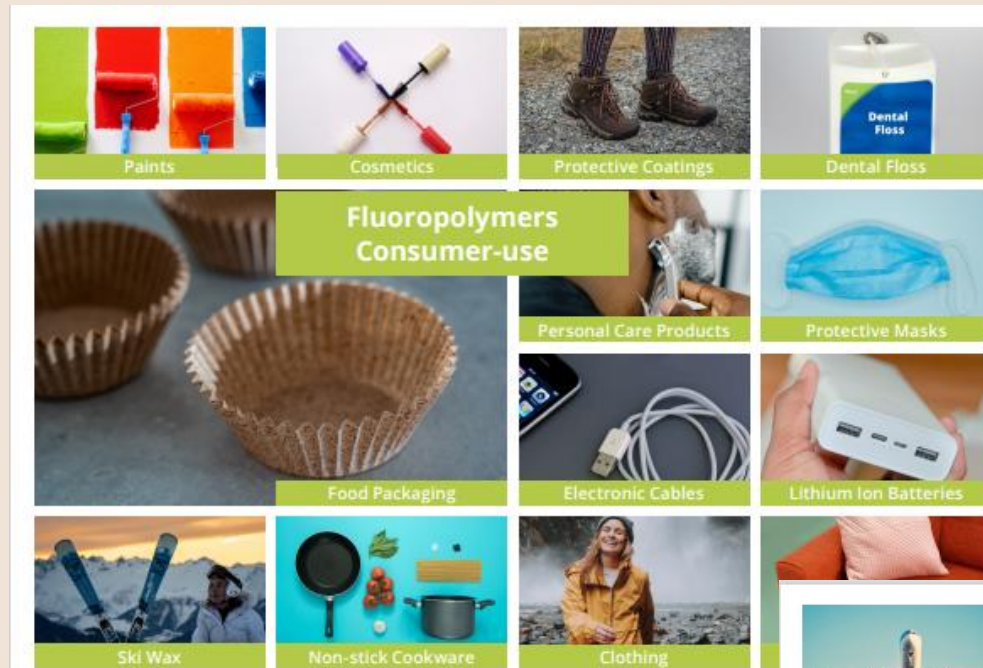
Xenia Trier, Lektor i analytisk miljøkemi
Sektion for miljøkemi og fysik
Institut for plante- og miljøvidenskab (PLEN), Københavns Universitet

Det Danske PFAS Center –projekt coordinator for ARAGORN EU Soil Mission projekt



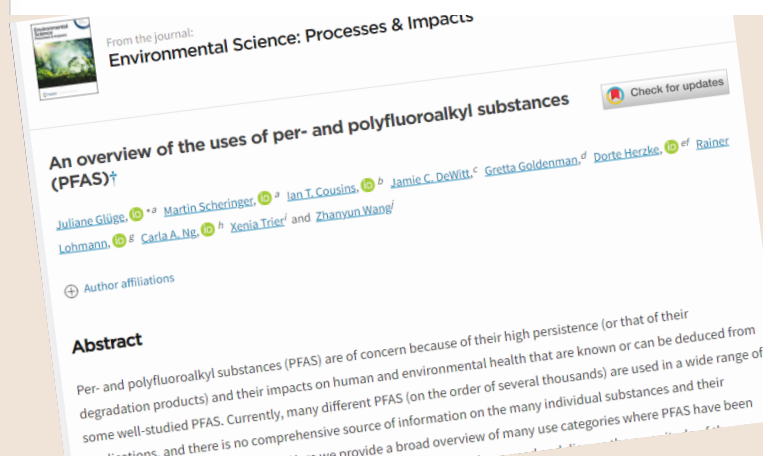
Funded by
The European Union

Anvendelser af per- og polyfluorerede alkyl forbindelser (PFAS)



> 10.000 stoffer i >200 typer anvendelser

EEA-ETC report on 'Systemic view on fluorinated polymers in a circular, low carbon and non-toxic economy' (2021)



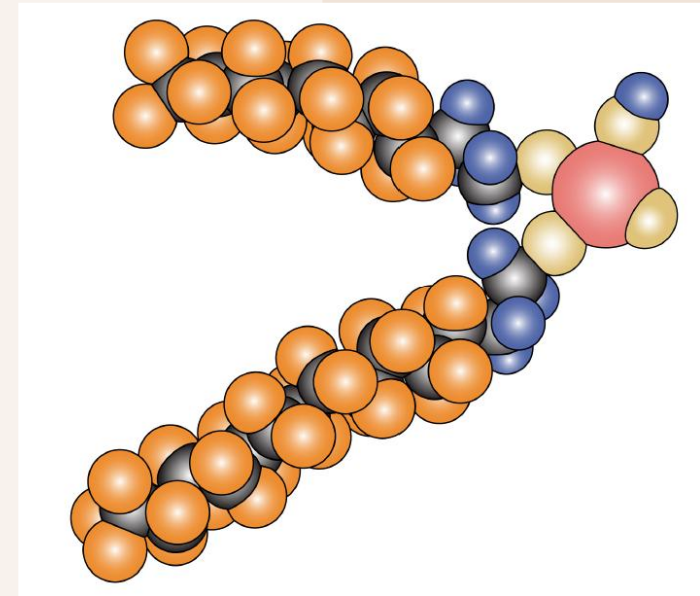
PFAS egenskaber



- Fluor-carbon skyer både vand, snavs og fedt
- Forekommer typisk som salte og voks, sjældent som væsker
- Fluorkæderne er ureaktive pga stærke fluor-kulstof bindinger:
 - => mere flygtige end tilsvarende hydrocarboner
 - => modstandsdygtige overfor varme/kemiske reaktioner
- => fluorcarbonkæderne er **unedbrydelige** = **persistente** = ‘forever chemicals’
- => **PFAS ophober sig:**
 - internt* i levende organismer (især langkædede PFAS) og/eller
 - eksternt* i miljøet fx luft, vand (kortkædede PFAS) og
 - i jord og sediment (langkædede PFAS)

Hvad er PFAS?

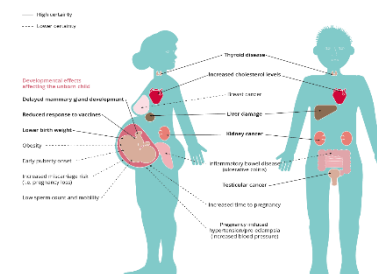
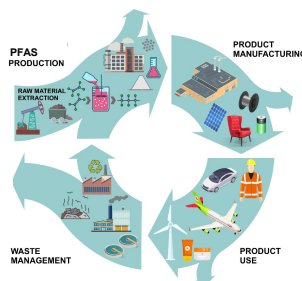
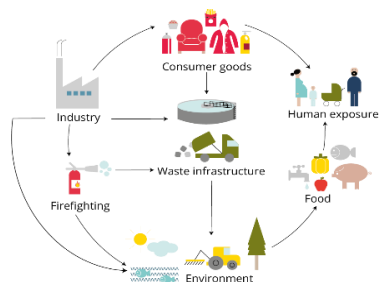
- **Fluorkemikalier** er menneskeskabte, organiske molekyler hvor brint er erstattet med fluor på kulstof-strukturerne
 - Indeholder mindst et $\text{-CF}_2\text{-}$
 - Både på alkyl og aromatiske forbindelser
- *Poly*-fluorerede stoffer har både F og H bundet til kulstof
Per-fluorerede stoffer kun har F bundet til kulstof
- Langkædede PFAS: ≥ 6 fluorerede kulstofatomer
- Kortkædede PFAS: ≤ 5 fluorerede kulstofatomer



Eksempler på perfluoralkyl syrer (PFAA)

- Perfluor carboxylsyre (PFCA) $\text{F}(\text{CF}_2)_x\text{-COOH}$ fx PFOA ($x=7$)
- Perfluor sulfonsyre (PFSA) $\text{F}(\text{CF}_2)_x\text{-SO}_3\text{H}$ fx PFOS ($x=8$)

Forskellige beviser for PFAS' skadesvirkninger



- PFAS forurening findes overalt på kloden, i alle mennesker
- I praksis umuligt at analysere og karakterisere toksiciteten af flere tusinde PFAS ^{1,2}
- Emissioner langs livscyklene ^{1,3,4}: produktionsfasen (fx. fluorpolymerer), brugsfasen (fx. PFOS i brandslukningsskum, fødevarekontaktmaterialer), affalds/genanvendelsesfasen (fx. F-gaser, tekstiler)
- PFAS og deres nedbrydningsprodukter er persistente => PFAS ophobes i mennesker og miljø¹
- Toksiske – forskellige effekter (fx. immunotox/kræft/kolesterol/hormonforstyrrende), cocktail effekter ^{1,3}
- Forurening og skader fra PFAS er irreversibel
- Koster dyrt – sundhedseffekter, beskadigede økosystemer og services, rensning af vand/jord, hus priser ^{1,3}

¹ Kwiatkowski et al.(2020): [Scientific basis for managing PFAS as a chemical class](#)

² Glüge et al. (2020): [An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances \(PFAS\)](#)

³ EEA (2019): [Emerging risks in Europe – PFAS](#).

⁴ ETC/WMGE report (2021): [Fluorinated polymers in a low carbon, circular and toxic-free economy](#).

⁵ 2019, Nordic Council of Ministers (2019). [The cost of inaction: A socioeconomic analysis of environmental and health impacts linked to exposure to PFAS](#)

⁶ Macleod et al. (2014): [Identifying chemicals that are planetary boundary threats](#)

Hvad ved vi om PFAS i byer?

E.S. Heimstad et al.

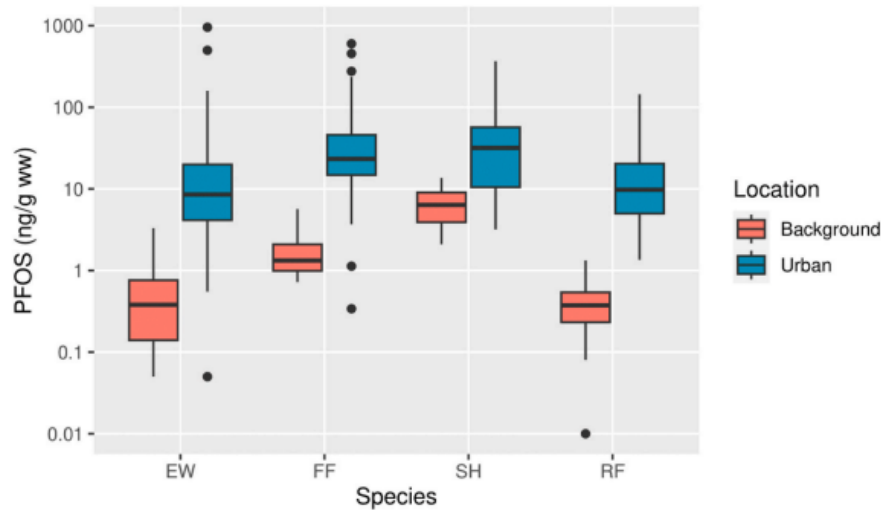


Fig. 3. Box plot of PFOS concentrations (ng/g ww) in species (earthworm, EW; fieldfare, FF; sparrowhawk, SH; red fox, RF) with both background and urban locations.

- Højere niveauer i byer end på landet
- Mest PFOS (legacy)
=> brandslukningsskum, forkromning, ..
- Jord og regnorme: mere langkædede PFAS

Environmental Pollution 347 (2024) 123735

E.S. Heimstad et al.

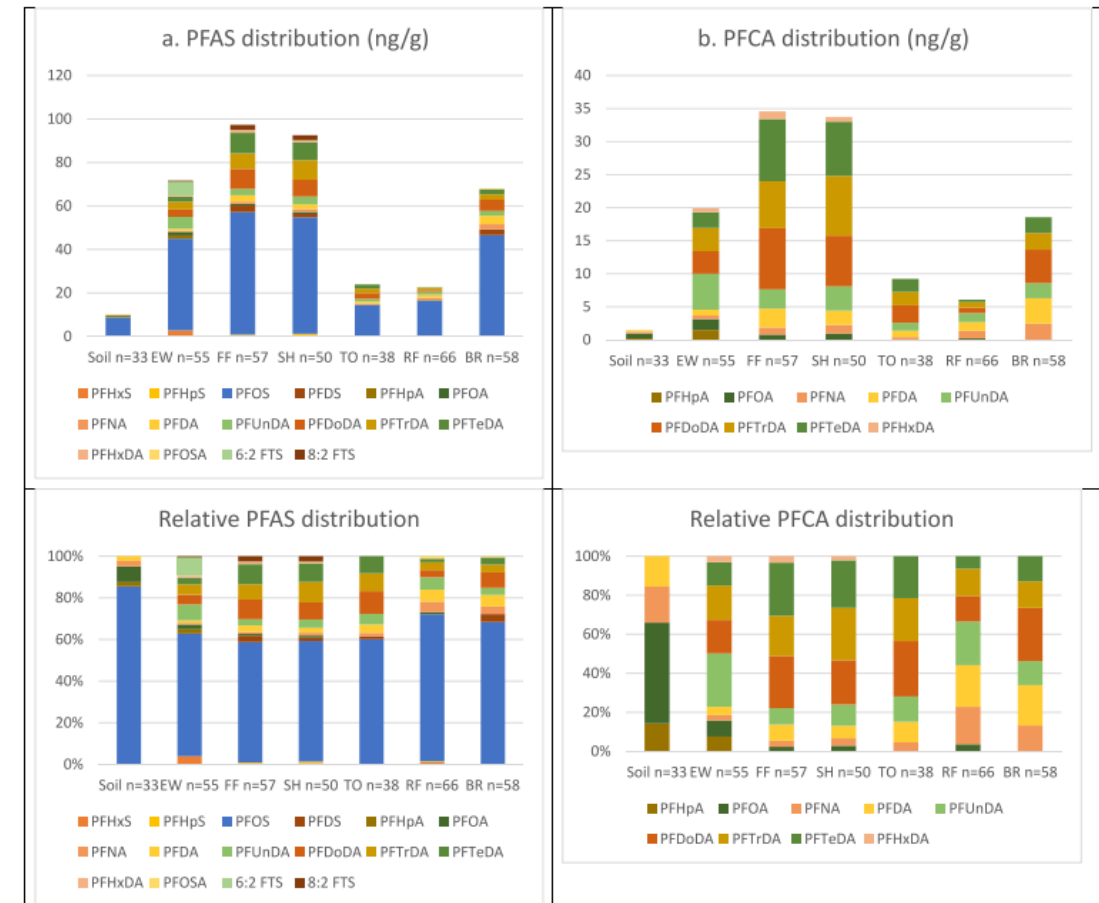
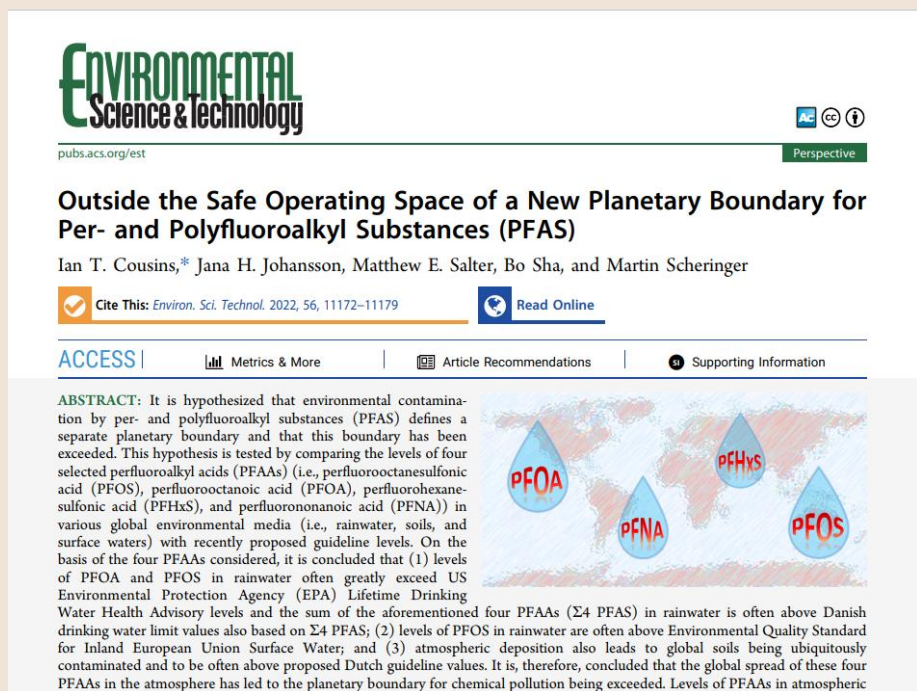


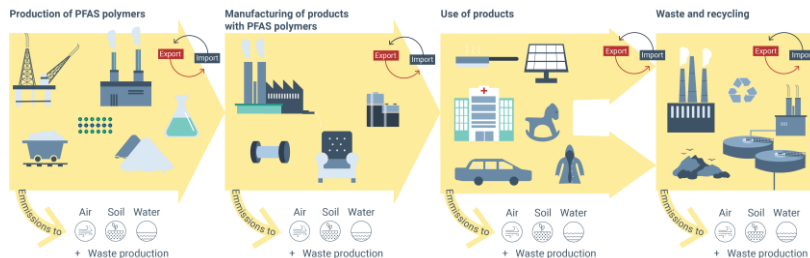
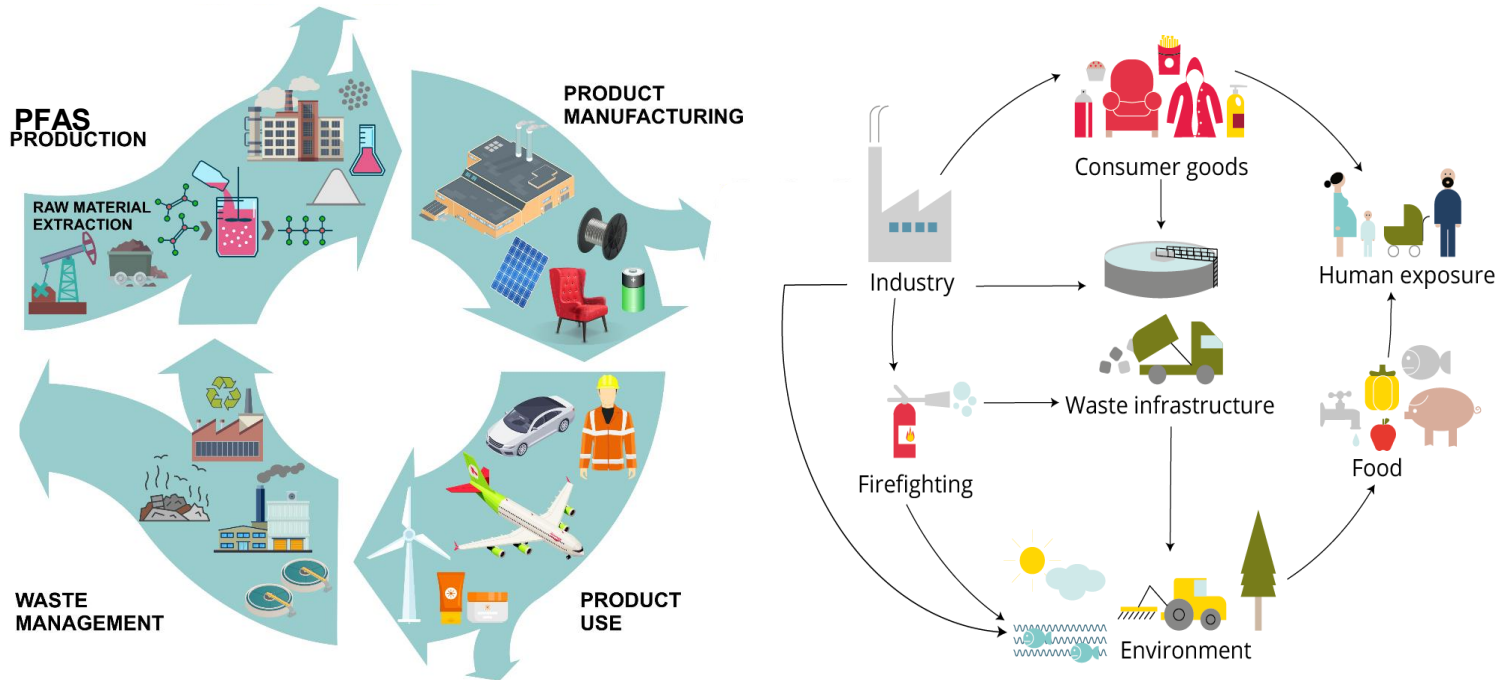
Fig. 2. Distribution shown as average concentrations of PFAS (2a) and PFCA (2b) compounds, and their relative distribution in soil, earthworm (EW), Fieldfare egg (FF), Sparrowhawk egg (SH), Tawny owl egg (TO), Red fox liver (RF) and Brown rat liver (BR). All biota samples in ng/g ww and soil in ng/g dw.

Hvad er kilderne til PFAS i byerne?



- Regnvand indeholder PFAS > 2 ng/L
'antropocene baggrunds niveau'
- forklarer ikke PFAS mønsteret i by jord
=> andre kilder

PFAS kilder og spredningsveje



Primære kilder til PFAS i miljøet

- **Brandskum:** træning, lufthavne
- **Industri:**
 - Metal belægninger fx forkromning
 - Produktfremstilling - tekstiler/træ, coatings, maling, elektronik mm
 - Kemikalie syntese
- **Affaldshåndtering og genanvendelse**
 - Rensningsanlæg
 - Lossepladser
 - Genanvendt slam/org. gødning
 - Genbrugsprocesser (fx af PTFE)

Spredt via luft/vand/støv/jord/produkter

Primære humane eksponeringsveje

- Fødevarer, drikkevand, arbejdsmiljø, samt via produkter, støv, mm..
- Nuværende PLUS tidligere brug, ophobet i miljø og produkter

Glüge et al. (2020): An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/em/d0em00291g#!divAbstract>

ETC/WMGE report (2021): [Fluorinated polymers in a low carbon, circular and toxic-free economy](#)

EEA (2019): [Emerging risks in Europe – PFAS](#) and EEA (2019): State and Outlook of the Environment 2020

[EEA \(2025\) PFAS polymers in focus: supporting Europe's zero pollution, low-carbon and circular economy ambitions | Publications | European Environment Agency \(EEA\)](#)

Urbane miljø: Byggematerialer er 3. største PFAS anvendelse

- Det Europæiske Kemikalieagentur (ECHA) behandler p.t. det 'Universelle PFAS restriktionsforslag' (uPFAS)
- Byggematerialer (Construction products) er 3. største anvendelse af PFAS
- Anvendt i maling, coatings, 'sealant tapes', skum mm bidrager mest
 - => run-off til jord og vand
 - => atmosfærisk deposition af støv, afgang (via aerosoler/regen)
 - => støv fra arbejdsmiljø, affald,...
- P.t. stort set ingen dansk/EU regulering der begrænser PFAS anvendelse i byggematerialer

For byggematerialer er de relevante afsnit: Annex A.3.14, Annex B.9.14, Annex E.2.13
Se også lovteksten i rapporten (fra side 4) [86488ab5-30c9-f7b9-547d-84db15535d9a](#).
Tidsvinduer på 1.5/ 5/12 år (+1.5 år til indfasning) fra 2027

Table 4. Tonnes and emissions of major use sectors and manufacture for 2020 (sorted by tonnage range)^a

Application	Tonnage range	Emission range [%] emitted in manufacturing and use phase	Contribution to total emission		
Applications of fluorinated gases	5	3	4		
Transport	5	3	4		
Construction products	5	3	2		
TULAC	5	2	3		
Food contact materials and packaging	5	2	1		
Manufacture	5	1	1		
Sealing applications	5	1	1		
Electronics and semiconductors	5	1	1		
Other medical applications	4	4	2		
Medical devices	4	3	3		
Lubricants	4	2	2		
Technical textiles	4	2	1		
Military applications	4	2	1		
Broader industrial uses	4	2	1		
Energy sector	4	1	1		
Cosmetics	3	2	1		
Explosives	3	2	1		
Metal plating and manufacture of metal products	3	1	1		
Machinery applications	3	1	1		
Printing applications	3	1	1		
Consumer mixtures and miscellaneous consumer articles	2	3	1		
Ski wax	1	3	1		
Petroleum and mining	1	2	1		
Table legend					
Tonnage range [t/y]		Emission range [%]		Emission contribution [%]	
1	0 – 10	1	0 – 5	1	0 – 1
2	10 – 100	2	5 – 25	2	1 – 5
3	100 – 1 000	3	25 – 75	3	5 – 10
4	1 000 – 10 000	4	75 – 95	4	10 – 50
5	>10 000	5	>95	5	>10 – 50

^a Military applications reported for the sake of completeness, but not included when calculating totals to avoid double counting as the uses are already covered in other sectors.

Emissioner til luft fra affaldssektoren

- lossepladser, rensningsanlæg, affaldsforbrænding..

Waste and recycling



Anal Bioanal Chem (2017) 409:1395–1404
DOI 10.1007/s00216-016-0072-1

RESEARCH PAPER

Sampling and simultaneous determination of volatile per- and polyfluoroalkyl substances in wastewater treatment plant air and water

Ian Ken Dimzon^{1,2} • Joke Westerveld¹ • Christoph Gremmel² • Tobias Frömel² • Thomas P. Knepper² • Pim de Voogt¹

ENVIRONMENTAL
Science & Technology

pubs.acs.org/est



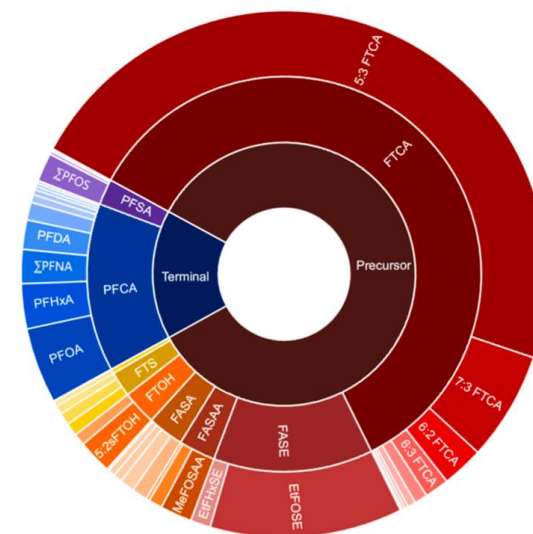
Article

Emission of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from a Waste-to-Energy Plant—Occurrence in Ashes, Treated Process Water, and First Observation in Flue Gas

Sofie Björklund, Eva Weidemann, and Stina Jansson*

Cite This: Environ. Sci. Technol. 2023, 57, 10089–10095

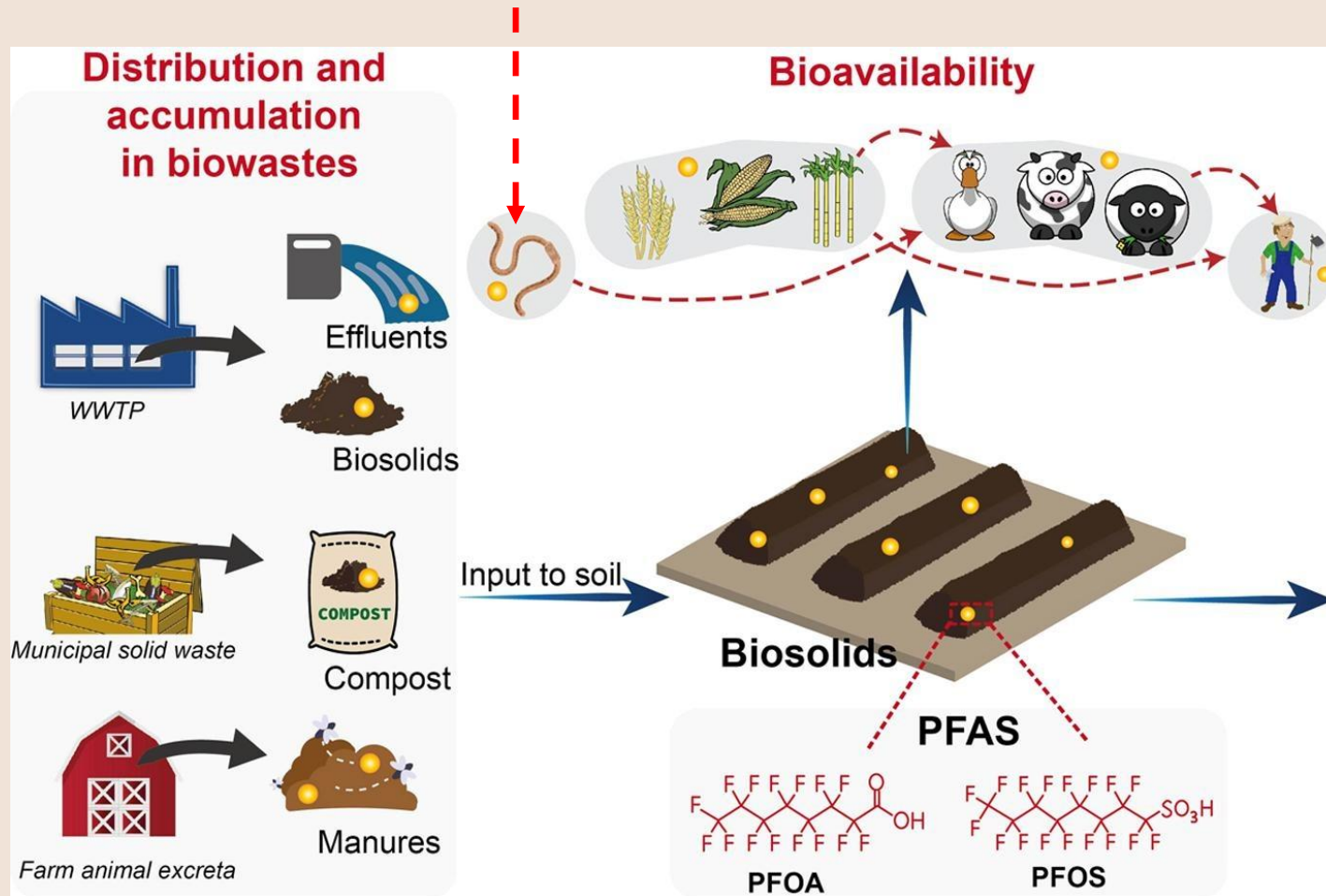
Read Online



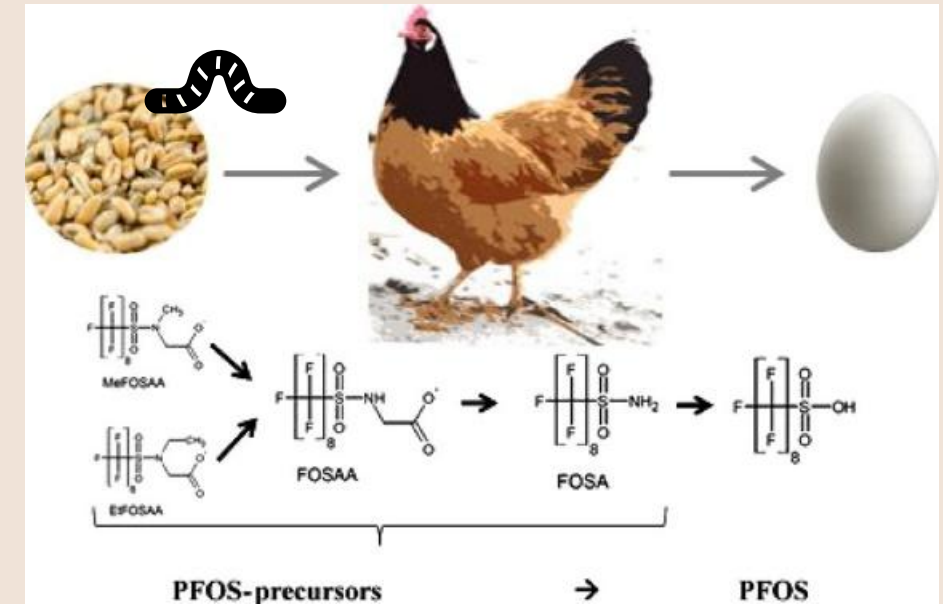
PFAS distribution in landfill gas condensate in US landfills.
Figure by Smallwood et al., 2023.

Konsekvenser:

Optag af PFAS fra jord og vand i foder og fødevarer



PFAS i æg fra hobbyhøns
– via jord, regnorme, insekter, planter?



Bolan et al. (2021) Distribution, behaviour, bioavailability and remediation of poly- and per-fluoroalkyl substances (PFAS) in solid biowastes and biowaste-treated soil.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021002257>

Kowalczyk et al. (2020) Transfer of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from Feed into the Eggs of Laying Hens. Part 2: Toxicokinetic Results Including the Role of

Precursors. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c04485

Konsekvenser:

Forurenet jord – hvad gør vi af den? - *og bliver den liggende?*



- Forurenet jord er tung/dyr/klimabelastende at transportere, fylder meget, ineffektivt/dyrt at oprense, forsinker byggerier, og hvad med lokal samfundet?
- Kan forureneren betale – eller bliver det skatteborgeren?
- Klimaforandringer
 - => øgede regnmængder
 - => større risiko for oversvømmelser,
 - => risiko for remobilisering af forurenet jord og forurening fra lossepladser

PFAS forskningsprojekter for at skabe overblik

- **EU og nationale projekter**

- **arag✱rn** – EU Soil Mission, fokus på jord remediering og restaurering
- D4RunOff, Galadriel m.fl. – non target analyser af run-off overflade og spildevand
- *PFAROS – EU (ansøgt) – emissioner fra medicinal sektoren (luft, spildevand)*
- *REPLACE - EU (ansøgt) – alternativer til PFAS i byggesektoren*



Det Danske PFAS Center

- neutralPFAS og PFASsuspect 2025-2028 (udvide analysemetoderne)
- WastAir 2025-2027 (lossepladser og rensningsanlæg)
- EggsMiti 2026-2027 (hobbyhøns og afgrænsning af PFAS indtag)
- CONTAIN 2025-2026 (biokul til immobilisering af PFAS forurening)

aragorn objectives



Funded by the European Union.

- **To support the Soil Mission Aims:** Reduce hot-spot soil pollution and enhance restoration in urban, peri-urban and rural environments across Europe – while enabling other EGD objectives of biodiversity, climate, CE. Focus on **persistent pollutants** and **support landowners decision-making**
- **to collect, monitor, test remediation/restoration and share data**
 - map potentially and known contaminated sites,
 - gather information on sampling, methods, remediation, RA/SEA, co-creation,
 - **optimise chemical monitoring methods/monitoring strategies to be fit-for-purpose for commercial laboratories** and landowners decision-making
 - test remediation technologies: From regrettable → restorative remediation
 - provide tools and technical guidance documents to support decision-making
 - **support development of the Soil Monitoring and Resilience Directive (SMRD)**
- **to enable land managers in Europe to manage soil pollution by**
 - **prioritization**, planning and co-creation with local community and authorities
 - informed decisions on actions to remediate/restore polluted lands
 - invest in activities to remediate and restore land

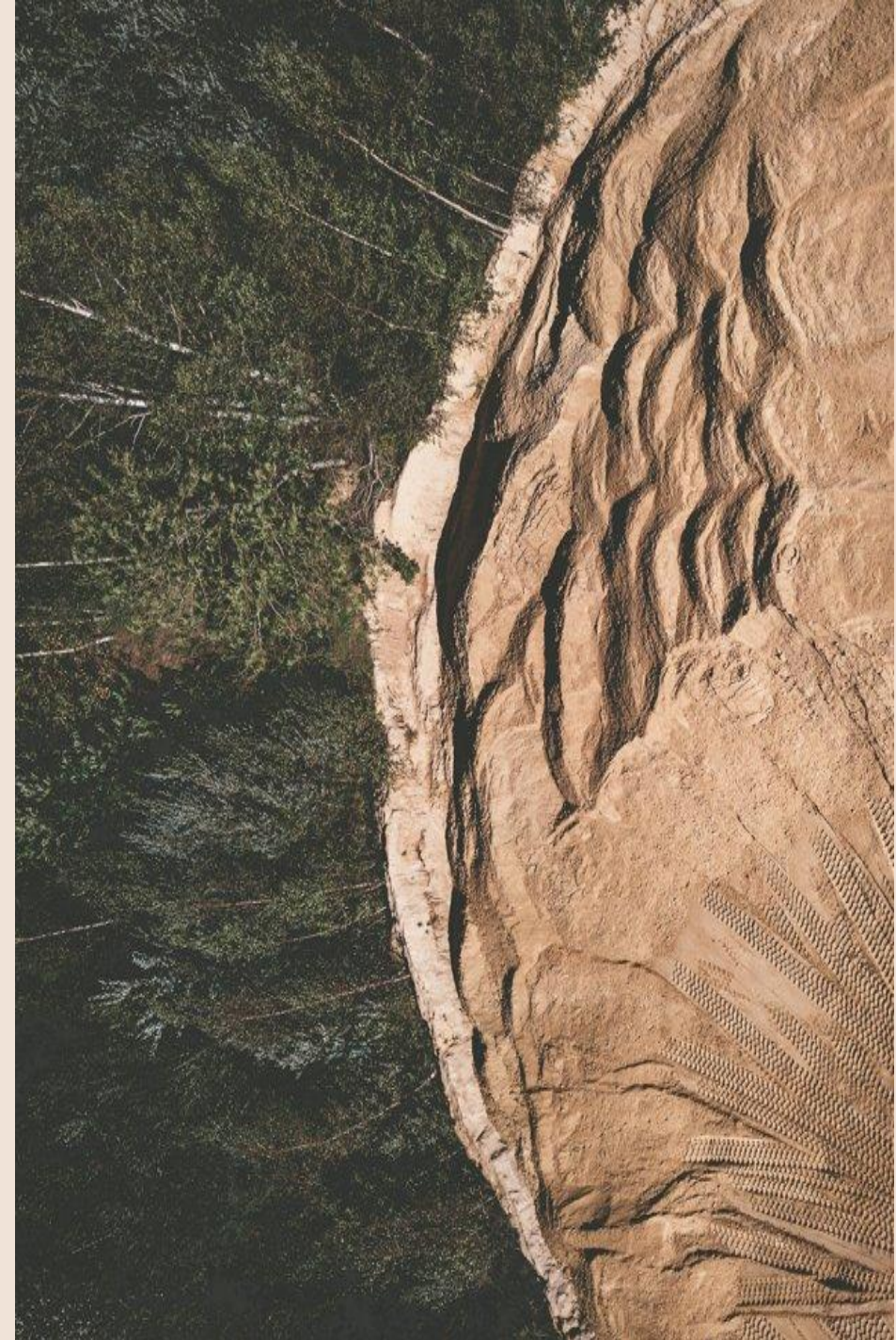
[Aragorn Horizon - combat soil contamination in Europe \(aragorn-horizon.eu\)](https://aragorn-horizon.eu)

PFAS : (Per- and Polyfluorinated Substances)

OCBs: (Organochlorines and Organobromines)

PETCO; (Petroleum and Coal Compounds)

Metals: (Hazardous Metals)



Soil Pollution and Remediation Cluster – 4. nov, Århus

Fokus: Biotilgængelighed – hvornår skal vi måle for hvad?



Hvordan beskytter vi Jorden mod PFAS?

- Risiko = Eksponering x Hazard

persistens (fx. vPvB/vM)

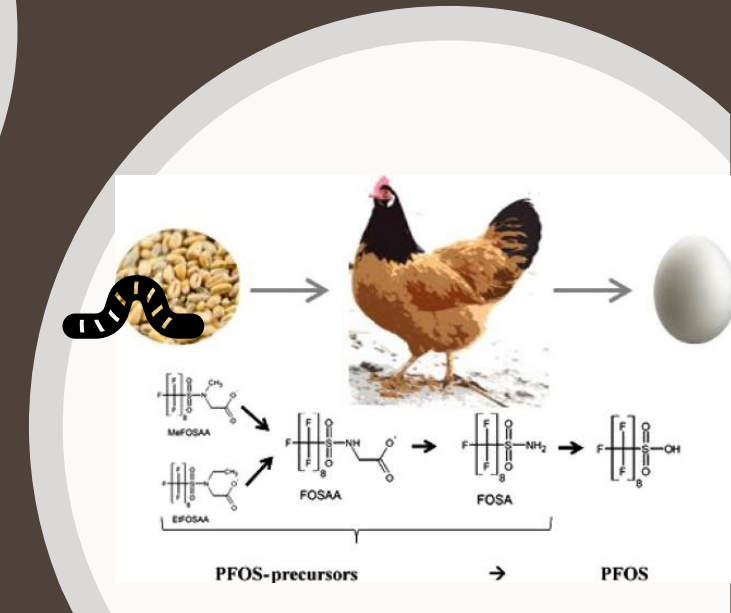
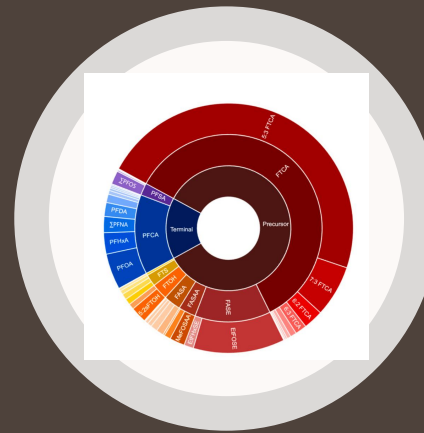
driver eksponeringen, og dermed risikoen op

- PFAS forureningen kan ikke fjernes ved oprensning, og lukkede kredsløb er en illusion...
- ‘Sluk for hanen’ er det eneste der virker
=> **uPFAS** og lovgivning af PFAS i jord, og emissioner?
=> *absurd at oprense mens udledninger fortsætter..*



Konklusioner

- PFAS er persistente stoffer der ophobes og er overalt => *antropocent baggrundsniveau*
- Anvendes i >200 anvendelsere
- Størst PFAS forurening i byer, fra historiske /nuværende anvendelser og affaldssektoren
- PFAS optages i fødevarer => sikre fødevarer?
- Hvad gør vi med forurennet jord og hvem betaler?
- Forskningsprojekter for at skabe bedre overblik
- **‘Sluk for hanen’!** => uPFAS/regulering er nødvendig



Tak til kollegaer!

Danske PFAS Center
ARAGORN TEAM
Norman Network
Global PFAS Science Panel
EEA



Spørgsmål?

Xenia Trier - xt@plen.ku.dk

Funding

arag[✶]rn



Funded by
The European Union

