

PFAS i atmosfæren

Der har de seneste måneder været stor fokus på PFAS i medierne. Problemet med disse svært nedbrydelige stoffer har været kendt siden starten af 2000, hvor man for alvor begyndte at undersøge koncentrationer af PFAS i forskellige miljøprøver (luft, vand, jord og dyr). I denne artikel fokuserer vi på skæbnen af PFAS i atmosfæren og deres transport helt op til Arktis.

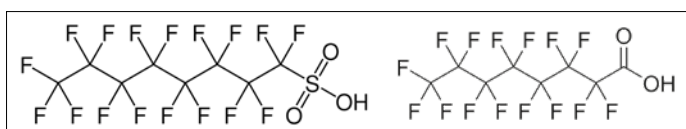
Af Henrik Skov, Rossana Bossi og Katrin Vorkamp, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

PFAS er forkortelsen for per- og polyfluoralkylstoffer. PFAS omfatter mange forskellige fluorholdige forbindelser, som har været brugt siden 1940'erne i både industrien og i forbrugerprodukter. PFAS inkluderer tusindvis af stoffer; i den videnskabelige litteratur omtales der p.t. 4.700 PFAS-enkelstoffer [1], mens US-EPA's PFAS-database allerede omfatter 12.034 enkeltstoffer [2]. De mest velundersøgte stoffer i gruppen er PFOS og PFOA (figur 1), som i dag er forbudt og derfor ikke længere er i brug. For disse stoffer består kulstofkæden af otte kulstofatomer, som er forbundet med det maksimalt mulige antal fluoratomer.

PFOS er en sulfonsyre, mens PFOA er en carboxylsyre. Udover de mere stabile ioniske stoffer som PFOS og PFOA findes der også neutrale PFAS-molekyler, der ofte kan omdannes til den respektive syre. Neutrale PFAS inkluderer for eksempel en gruppe af alkoholer (fluortelomer alkoholer, (FTOH) (se eksempel i figur 2), perfluoroktansulfonamider (FOSA) og perfluoroktansulfonamidethanoler (FOSE). I modsætning til de ioniske PFAS er disse neutrale molekyler flygtige og udsendes til atmosfæren ved fordampning, hvor de overvejende findes i gasform. Neutrale PFAS kan i atmosfæren blive oxideret til mere polære stoffer, der er mere vandopløselige. Derfor findes ioniske PFAS kun bundet til partikler, hvorfra de udvaskes med nedbør.

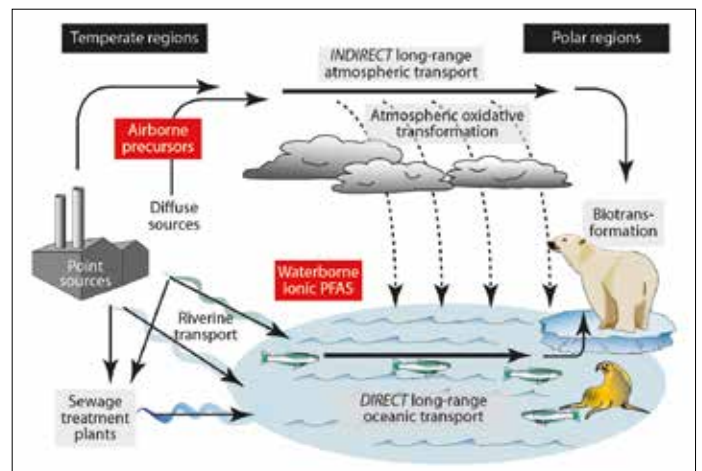
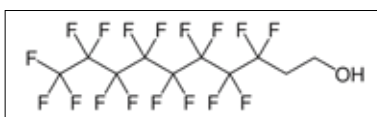
Spredning af PFAS

Neutrale PFAS har en levetid i atmosfæren på mellem 40 og 70 dage og kan derfor transporteres over store afstande. Dermed kan de også nå op til Højarktis, hvor de er fundet i atmosfæren, i sne [3], og i arktiske dyr med høje koncentrationer [4-5]. Det er typiske de ioniske PFAS, der akkumulerer i dyr ved at



Figur 1. Kemiske strukturer for PFOS (perfluoroktansulfonat), til venstre, og PFOA (perfluoroktansyre), til højre. To eksempler på PFAA'er (perfluoroalkylic acids = perfluoralkylsyre).

Figur 2. Kemiske strukturer for FTOH8:2 som eksempel på de neutrale og flygtige fluortelomer alkoholer.



Figur 3. Illustration af globale PFAS-transportprocesser og dannelse af aerosoler. Figureerne stammer fra AMAP (2009) [6]. Arctic Monitoring and Assessment Programme.

binde sig til proteiner. Oxidationen kan ske i atmosfæren eller i organismen.

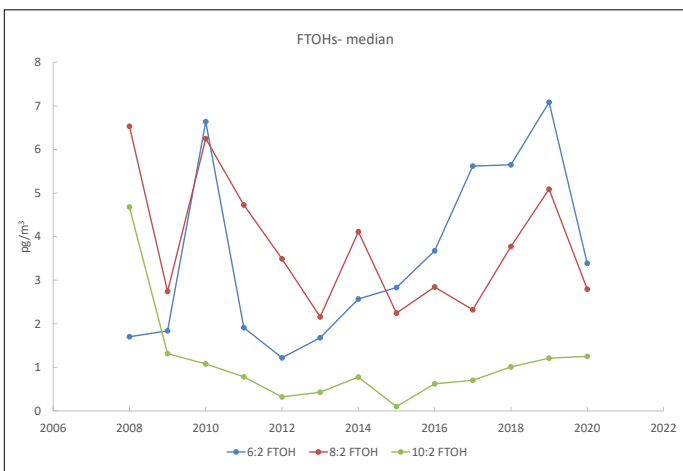
Udover luften kan PFAS også langtransporteres med havstrømmen, hvilket er specielt vigtigt for de polære og ioniske PFAS. PFAS-forbindelser opløst i vandet eller opkoncentreret i et mikrolag på vandoverfladen kan sætte sig på aerosoler, der dannes i havbølgerne (figur 3), og herefter transporteres de også i luften.

Målinger af FTOH i luften på Villum Research Station på Grønland viser, at disse stoffer transporteres til Højarktis. Årsmiddelkoncentrationer fra 2008 til 2020 er vist i figur 4. Vi har tidligere beskrevet Villum Research Station og mere information kan findes i Skov et al. 2022 [7].

Vi er i øjeblikket ved at undersøge udviklingen i koncentrationer samt mulige transportveje til Arktis.

Budskabet her er, at vi må vænne os til at have disse stoffer i miljøet i fremtiden overalt på jorden. Og læren af vores internationale undersøgelser er, at hver gang en ny gruppe af svært nedbrydelige stoffer er blevet syntetiseret, taget i anvendelse og udsendt i miljøet, ser vi, at de spredes globalt, og dette er også tilfældet med PFAS. Dette er altid bekymrende og hvor slemt det så er, afhænger af stoffernes evne til bioakkumulering og deres toksiske egenskaber. I PFAS-tilfælde er de toksiske effekter ikke særligt godt kendte [9], men det har vakt bekymring, at der er fundet effekter på vacciner ved høj PFAS-eksponering [10].

E-mail:
Henrik Skov: hsk@envs.au.dk



Figur 4. Årsmediankoncentrationer af tre FTOH-forbindelser.

Referencer

1. Gluge, J.; Scheringer, M.; Cousins, I.T.; DeWitt, J.C.; Goldenman, G.; Herzke, D.; Lohmann, R.; Ng, C.A.; Trier, X.; Wang, Z.Y., An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science-Processes & Impacts* 2020, 22 (12), 2345-2373.
2. EPA PFASMASTER. (accessed 28-02-2023).
3. Bossi, R.; Skov, H., Per- og polyfluoroforbindinger i arktisk luft og sne. *dansk kemi*, 2015, 97 (1/2), 16-17.
4. Wong, F.D.-C., H.; Hung, H.; Aas, W.; Bohlin-Nizzetto, P.; Brevik, K.; Nerentorp Mastromonaco, M.; Brorström Lundén, E.; Ólafsdóttir, K.; Sigurðsson, A.; Vorkamp, K.; Bossi, R.; Skov, H.; Hakola, H.; Barresi, E.; Sverko, E.; Fellin, P.; Li, H.; Vlasenko, A.; Zapevalov, M.; Samsonov, D.; Wilson, S., Time trends of legacy and emerging persistent organic pollutants (POPs) in arctic air from 25 years of monitoring. *Støten* 2021, 775, (145109).
5. Muir, D.B., R.; Carlsson, P.; Evans, M.; De Silva, A.; Halsall, C.; Raurert, C.; Herzke, D.; Hung, H.; Letcher, R.; Rigét, F.; Roos, A., Levels and trends of poly- and perfluoroalkyl substances in the Arctic environment - An update. *Emerging Contaminants* 2019, 5, 240-271.
6. AMAP, *Arctic Pollution 2009*. AMAP: <https://www.amap.no/documents/doc/arctic-pollution-2009/88>, 2009; p xi+83pp.
7. Skov, H., Station Nord, Nordøstgrønland i ACTRIS-DK. *Dansk Kemi* 2022, 5.
8. Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N., *Atmospheric chemistry and physics: from Air Pollution to climate change*. Second ed.; Wiley-Interscience: 2006.
9. Foguth, R.; Sepulveda, M.S.; Cannon, J., Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Neurotoxicity in Sentinel and Non-Traditional Laboratory Model Systems: Potential Utility in Predicting Adverse Outcomes in Human Health. *Toxics* 2020, 8 (2).
10. Shih, Y.H.; Blomberg, A.J.; Bind, M.A.; Holm, D.; Nielsen, F.; Heilmann, C.; Weihe, P.; Grandjean, P., Serum vaccine antibody concentrations in adults exposed to per- and polyfluoroalkyl substances: A birth cohort in the Faroe Islands. *Journal of Immunotoxicology* 2021, 18 (1), 85-92.

Energien af C-F bindingen i PFAS er på omkring 485 kJ/mol, hvilket gør den til den mest stabile i organisk kemi og gør forbindelserne svært nedbrydelige. Der er således ikke noget lys, der kan fotolysere dem ved jordoverfladen og en forbindelse skal helt op i termosfæren, før der er tilstrækkeligt kortbølget lys til at bryde bindingen. Bindingen kan heller ikke brydes ved reaktion med OH-radikaler, der ellers er ansvarlig for oxidationen af mange forbindelser i atmosfæren [8]. Derfor er levetiden af PFAS-forbindelser meget lange og oftest omdannes de til andre PFAS-forbindelser. Derfor er de blevet døbt "forever chemicals" (evighedskemikalier).

The entire spectrum of lab technology

LABVOLUTION

9 – 11 May 2023

Hannover • Germany

labvolution.de/en

Our Highlights:

- **smartLAB**
The intelligent lab of the future
- **LAB Sustainability Summit**
Make research processes and lab work more sustainable
- **LIMS & Software Area**
Presentations of experts and manufacturers to the current status of laboratory software



directly to your
ticket registration

Get your
free ticket
now:
3mKh4

world of labs. **LAB VOLUTION**