



Termisk behandling av PFAS-förorenad jord

Felicia Fredriksson

Postdoctoral Researcher in Chemistry

MTM Research Centre

Örebro University

felicia.fredriksson@oru.se

SGI:s Regeringsuppdrag PFAS

Forskning och kunskapsspridning rörande undersökning, utredning och åtgärder.

Huvudsyfte: Öka åtgärdstakten vad gäller PFAS-förorenade områden, utveckla/testa åtgärdsmetoder.

Samarbete med SGU och samverkan med Naturvårdsverket samt andra statliga myndigheter.

Rapportering till regeringen 1/9 2026.

Finns i
DiVA



Åtgärdstekniker för PFAS i jord och grundvatten

Kunskapssammanställning

Michael Pettersson, Malin Montelius, Dan Berggren Kleja och Anja Enell

Uppdragsgivare: SGI

2022-09-15

VILKA ÅTGÄRDSMETODER KOMMER SGI UNDERSÖKA INOM UPPDRAGET?

JORDTVÄTT

Rening av PFAS-förorenad jord

TERMISK BEHANDLING

Rening av PFAS-förorenad jord

STABILISERING MED AKTIVT KOL

Begränsa spridning med grundvatten

LUFTINJEKTERING (AIR SPARGING)

Rena grundvatten



Termisk behandling av PFAS-förorenad jord

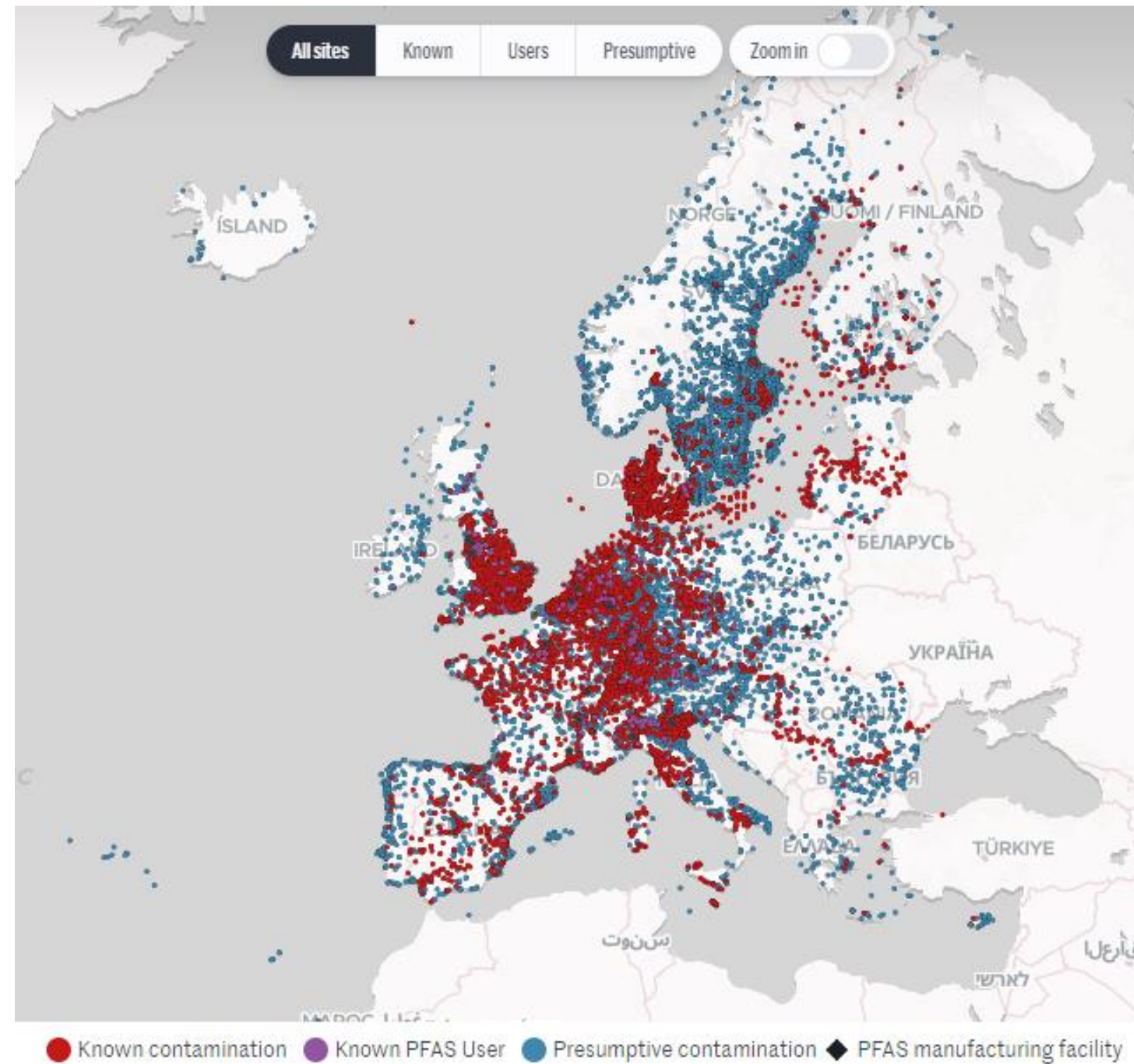
Felicia Fredriksson

Postdoctoral Researcher in Chemistry

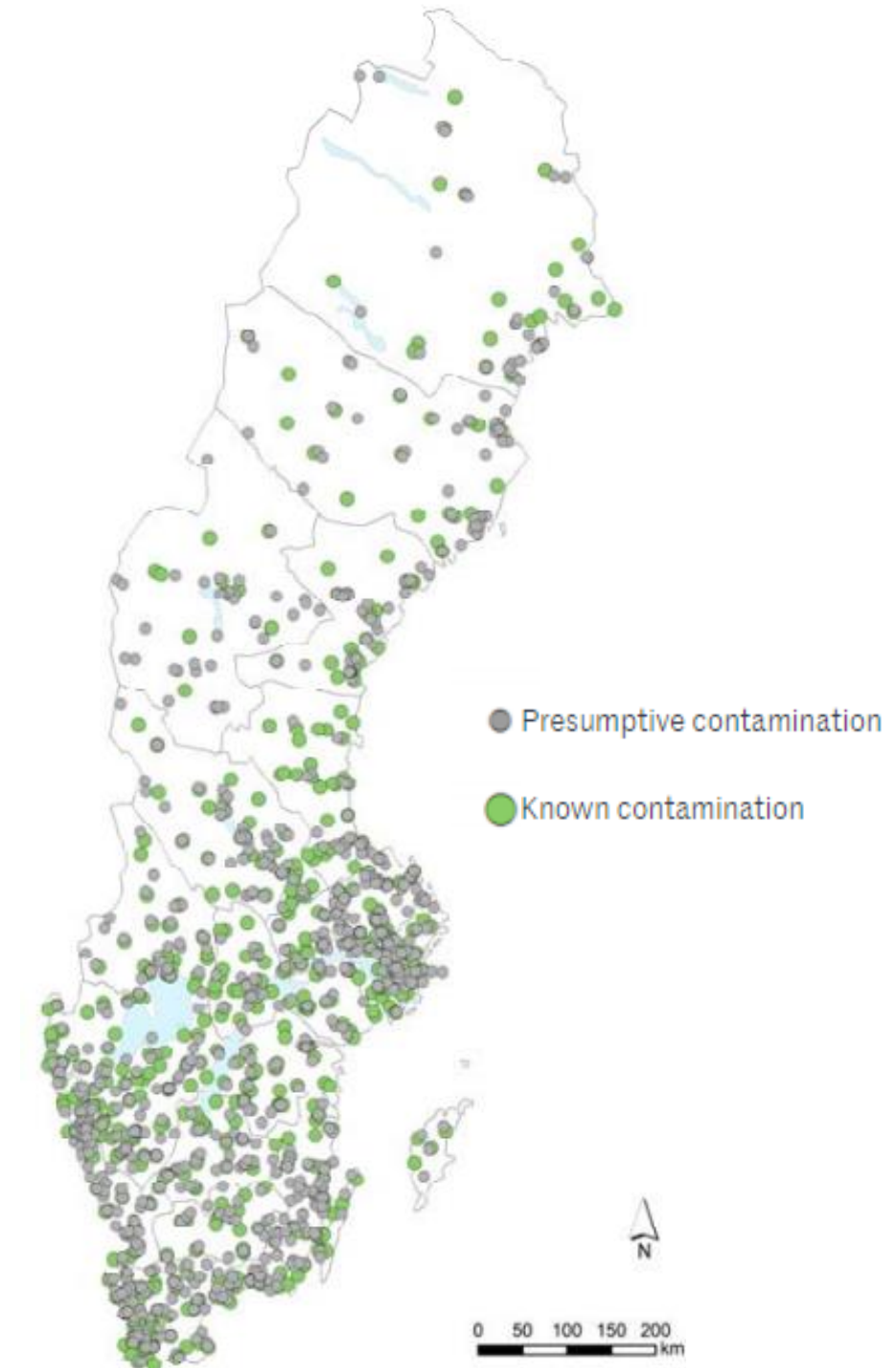
MTM Research Centre

Örebro University

felicia.fredriksson@oru.se



Över 23,000 PFAS-förorenade platser finns i Europa

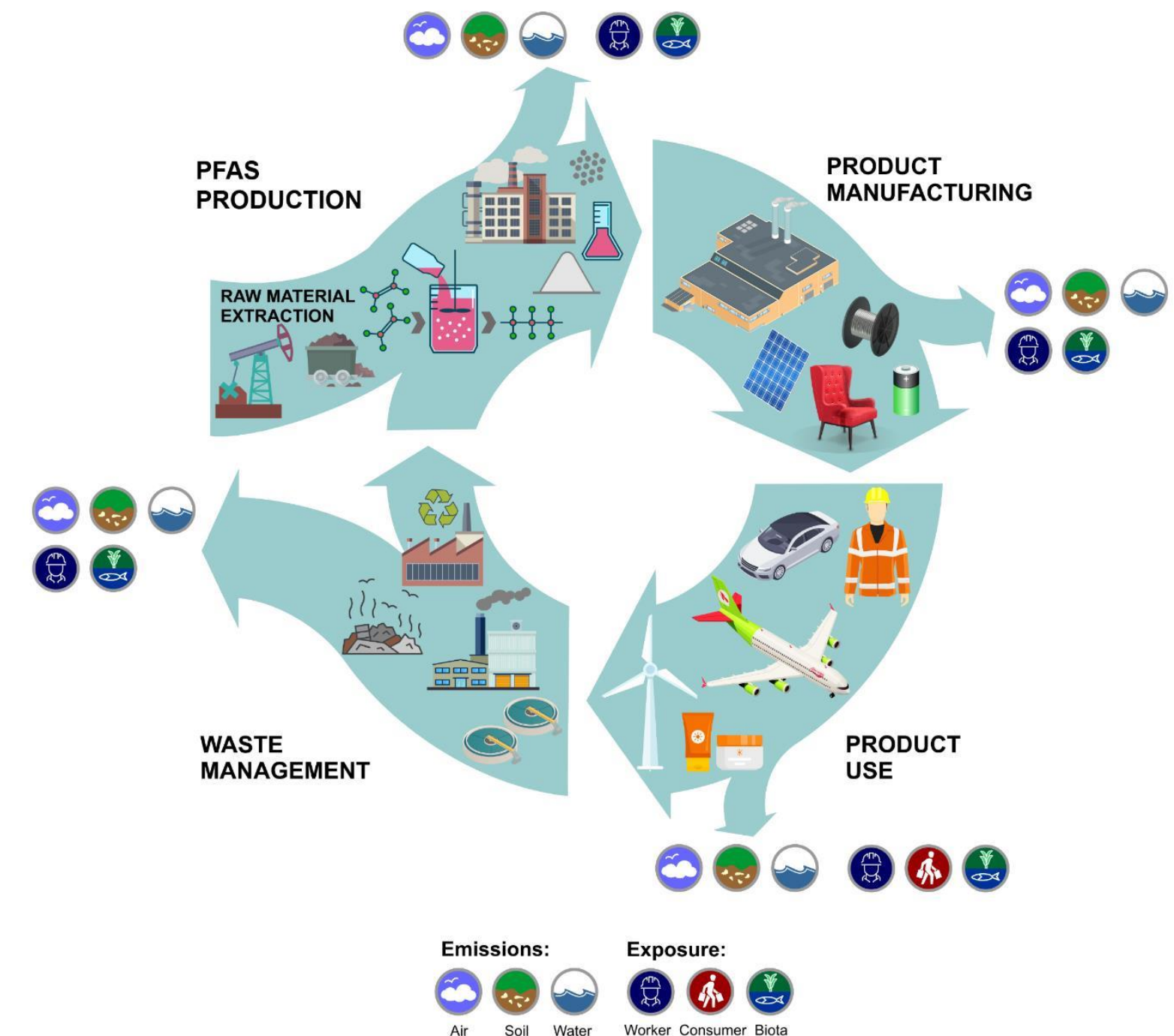


Över 2000 PFAS-förorenade platser i Sverige

Per- och polyfluorerade alkylämnen

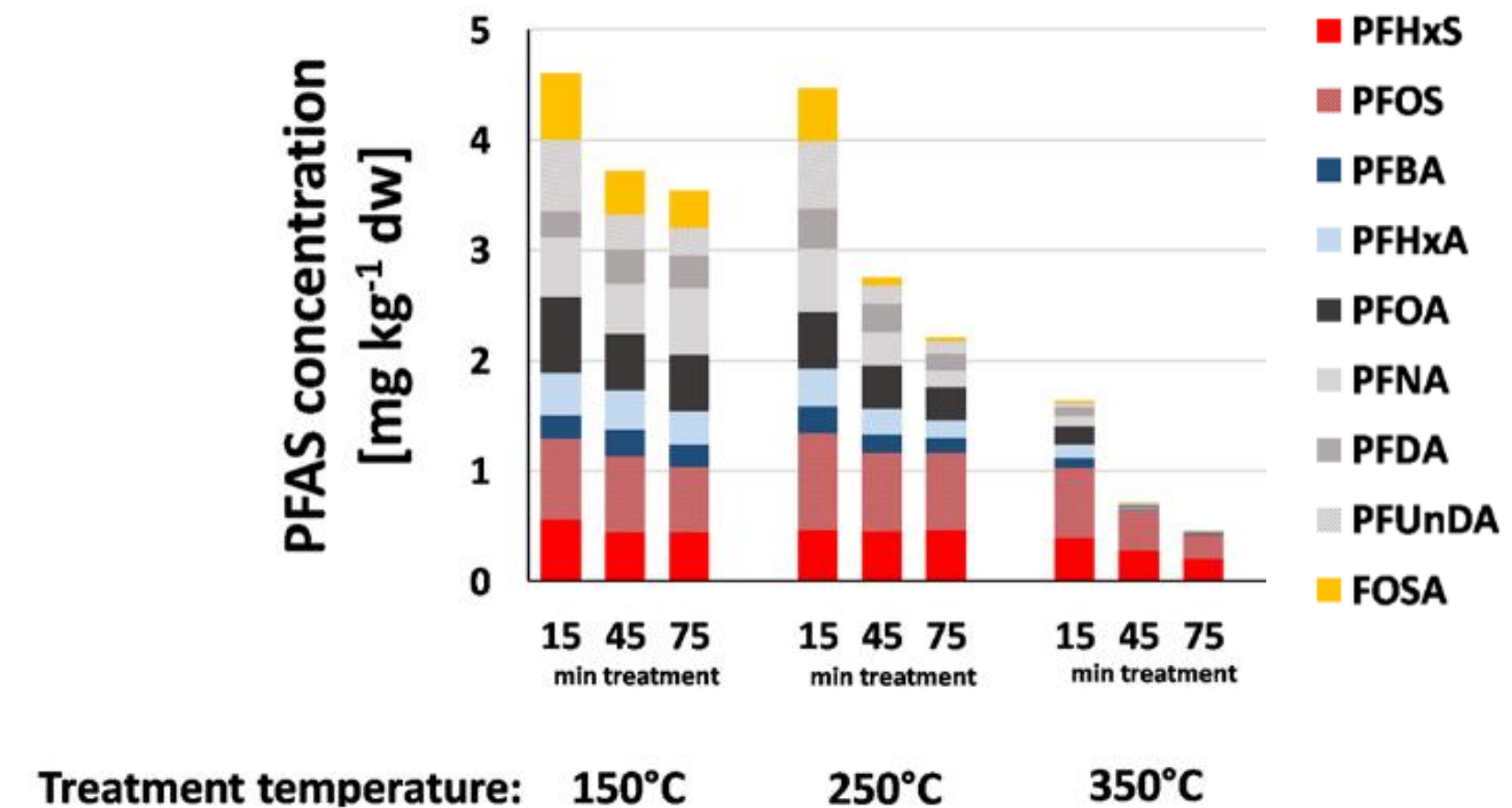
- Unika fördelaktiga egenskaper → finns i en mängd olika användningsområden
- PFAS termiska och kemiska motståndskraft komplicerar saneringsinsatser och gör många metoder ineffektiva
- Metoder som "funkar" är förbränning och urschaktning

Ett stort behov för hållbara åtgärdsmetoder för PFAS förorenad mark



Saneringsmetoder – Termisk remediering

- Användning av värme för att förånga, bryta ner eller förstöra ett ämne
 - Avdrivning, förbränning och pyrolys
- Studier visar att PFAS förstörs vid 900-1100 °C
- Termisk avdrivning – lägre temperaturer
 - Förånga PFAS och fånga upp via luftfilter
- Studier har visat att mer än 99% av all PFAS tas bort från jord vid temperaturer runt 400 °C

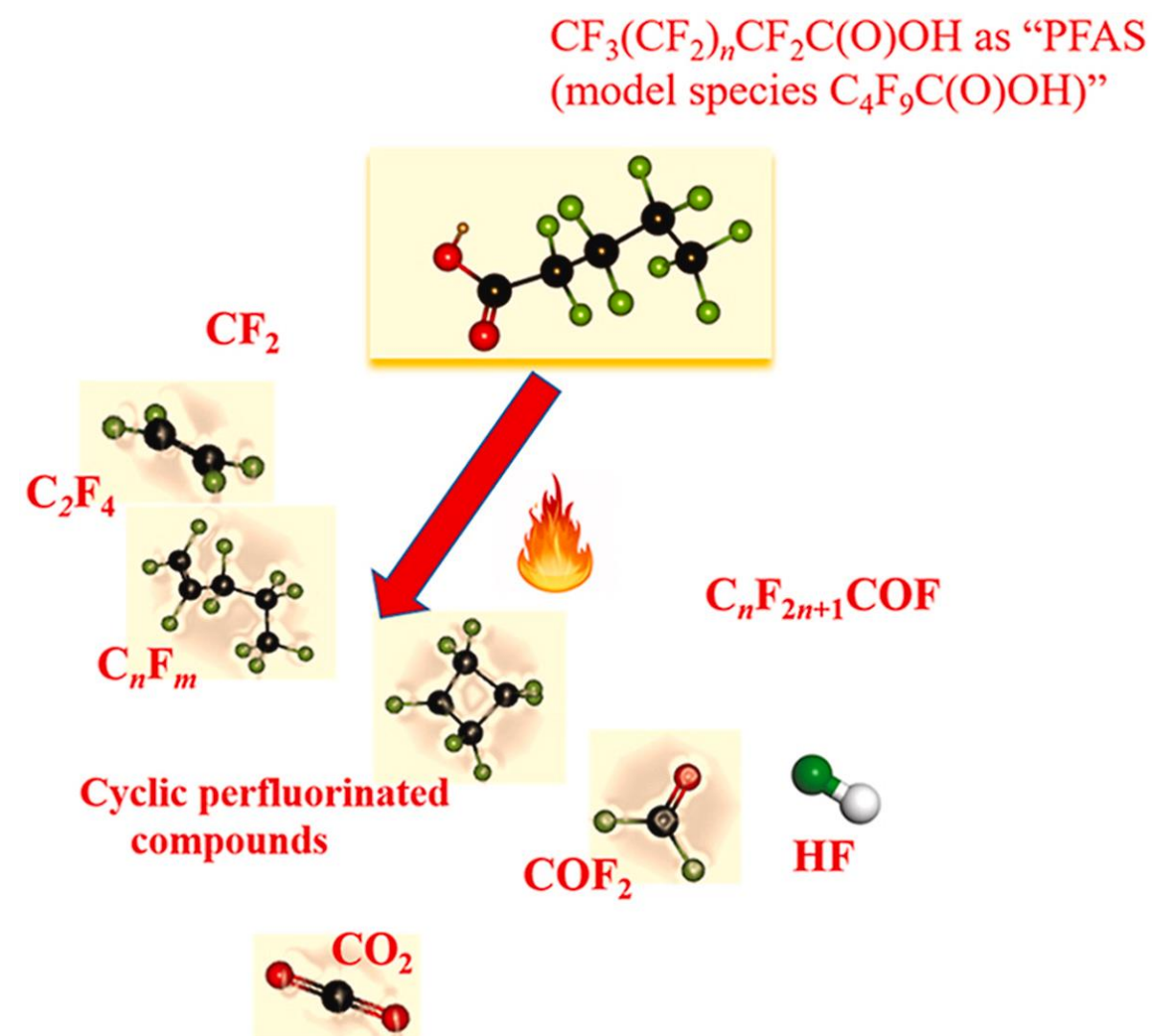


Sörengård et al., 2020

Termisk remediering

Risk: Oavsiktligt utsläpp av PFAS

- Termisk behandling kan vara en sekundära utsläpp av PFAS till miljön ¹⁻²



Altarawneh et al., 2022

Stor kunskapslucka och lite forskning

Begränsningar i att fånga och mäta PFAS i gas



Öka kunskapen om termisk behandling av PFAS-förorenad jord, med fokus på att bedöma metodens begränsningar och osäkerheter



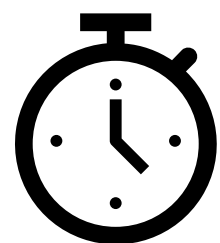
01

Vilka faktorer påverkar mekanismen?

- Koncentration
- Temperatur
- Tid
- Ämnen
- Mängd jord
- Jordtextur



Korttids-experiment

Tid

< 90 min

Val av jordtyp

Spikad jord

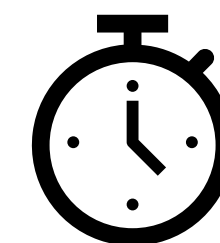


PFAS-jord

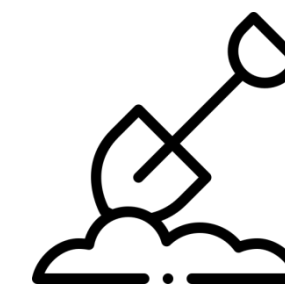
Temperaturer

150 – 800 °C

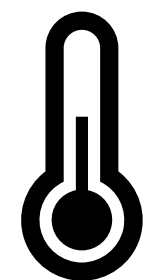
Långtids-experiment

Tid

< 7 days

Jordtyp

PFAS-jord

Temperaturer

150 – 350 °C

01

Vilka faktorer påverkar mekanismen?

02

Förstå nedbrytningen och vart de hamnar?

- Vilka nedbrytningsprodukter bildas
- Vart tar produkterna vägen



01

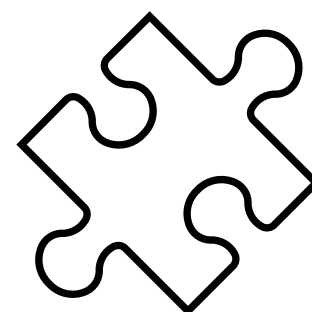
Vilka faktorer påverkar mekanismen?

02

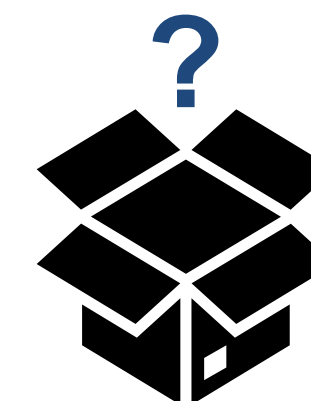
Förstå nedbrytningen och vart de hamnar?

03

Hur kan vi få en mer tillförlitlig massbalans?

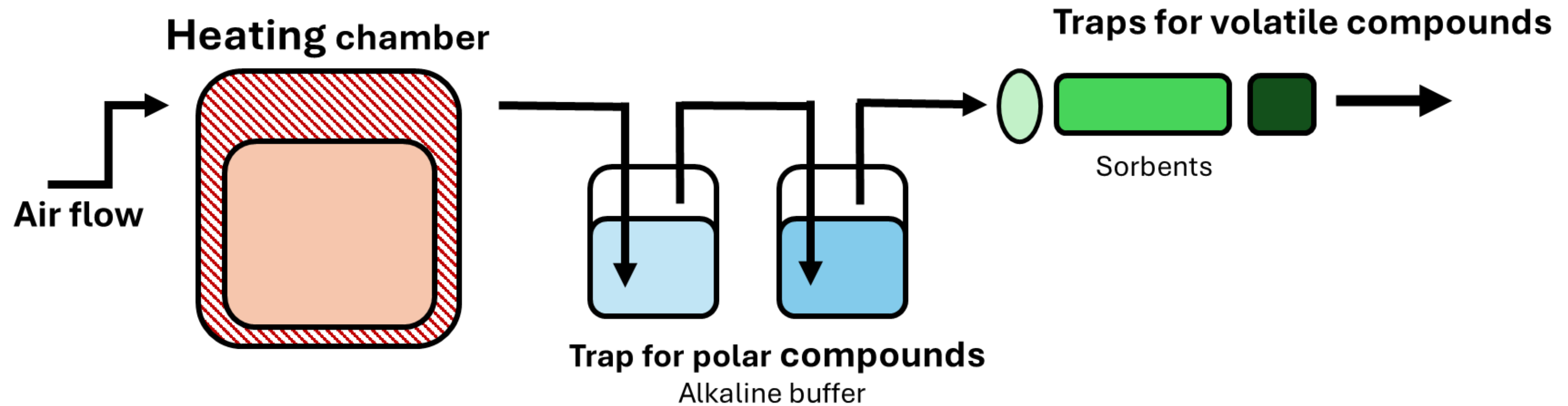


Utveckla analytiska metoder för PFAS-total



Okända PFAS

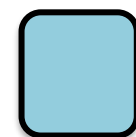
Labbskaliga experiment



Prover efter ett experiment



Jord

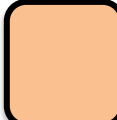


Vattenfälla



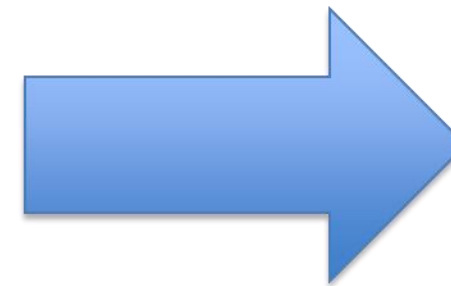
Sorbent

Prover efter ett experiment

 Jord  Vattenfälla  Sorbent

Extraction

-  **Solid-Liquid Extraction**
polar and non-polar solvents
-  **Solid-Phase Extraction**
WAX + WCX
-  **Solid-Liquid Extraction**
polar and non-polar solvents



Analysis



Combustion IC

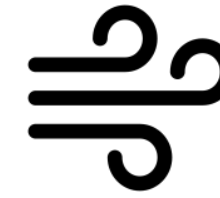


LC/GC-MS/MS

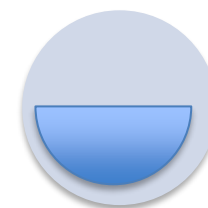
LC/GC-QToF-MS

SFC-TQS-MS

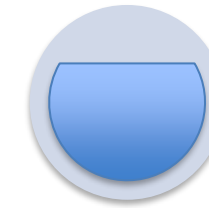
Analysmetoder för kvantifiering av den totala mängden PFAS



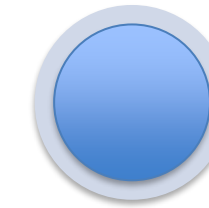
Riktad analys



**Extraherbart
organisk fluor**

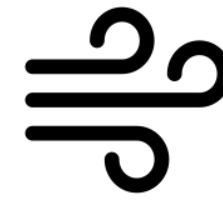


Oxidation



Total Fluor

Analysmetoder för kvantifiering av den totala mängden PFAS



Riktad analys

- > 100 PFAS
- Helhetsbild på kontamineringen
- Indikerar nedbrytning

Perfluoroalkylsulfonic acids (PFSAs) (

PFBS (C4), PFPeS (C5), PFHxS (C6), PFHpS (C7), PFOS (C8), PFNS (C9), PFDS (C10), PFUnDS (C11), PFDsDS (C12), PFTTrDS (C13), PFTDS (C14)

Precursors of PFSAs

FBSA, MeFBSA, FHxSA, MeFHxSA, FOSA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, diSAmPAP

Perfluorinated phosphonic acids (PFPAs)

PFHxPA (C6), PFOPA (C8), PFDPA (C10)

Perfluorinated phosphinic acids (PFPiAs)

6:6, 6:8, 8:8 PFPiA etc

Novel PFASs

ADONA, HFPO-DA, HFPO-TA, F-53B, PFECHS

Perfluoroalkyl carboxylates (PFCAs)

PFBA (C4), PFPeA (C5), PFHxA (C6), PFHpA (C7), PFOA (C8), PFNA (C9), PFDA (C10), PFUnDA (C11), PFDODA (C12), PFTTrDA (C13), PFTDA (C14), PFHxDA (C16), PFOcDA (C18)

Precursors of PFCAs (

FTSAs ($n=3$), FTCAs ($n=2$), FTUCAs ($n=3$), PAPs ($n=24$)

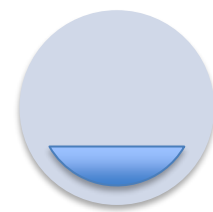
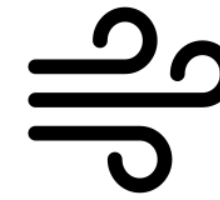
Ultrashort PFAS

TFA (C2), PFPrA (C3), PFEtS (C2), PFPrS (C3)

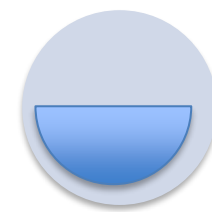
Zwitterions

5:3 FTB
N-AP-FHxSA
TAmP-FHxSA
6:2FTAB

Analysmetoder för kvantifiering av den totala mängden PFAS

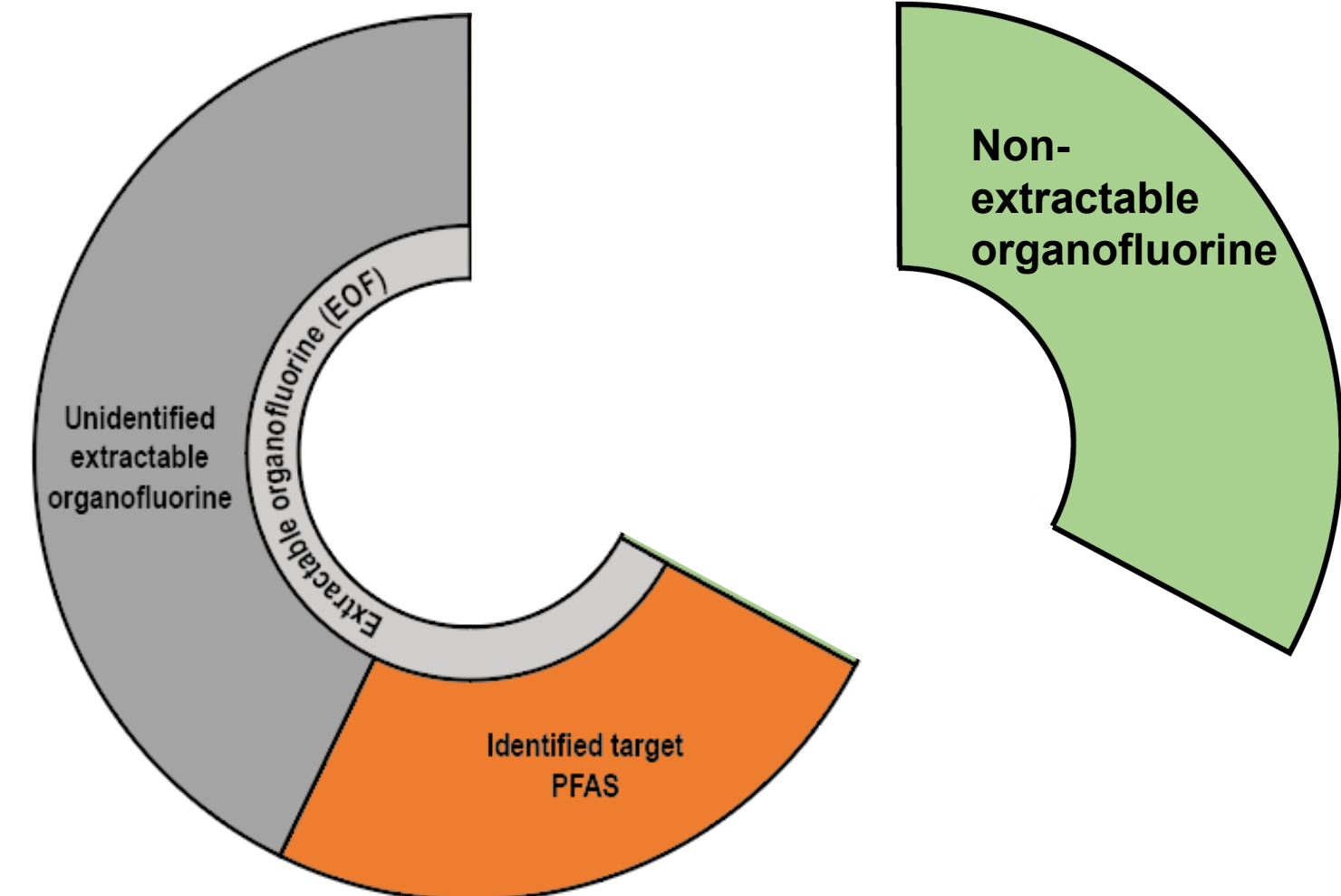


Riktad analys

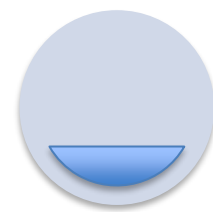
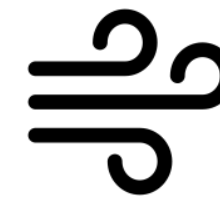
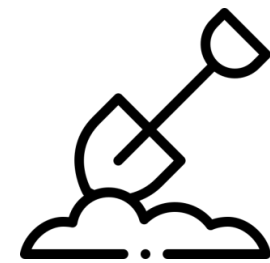


**Extraherbart
organisk fluor**

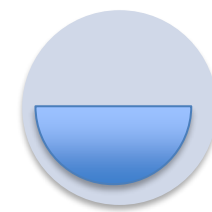
- Extrahera ut det organiska fluoret (EOF)
 - Jämföra med riktad analys
- Mängden okänt organisk fluor
 - Karakterisera och gruppera EOF
 - Både okänt och känt via riktad analys



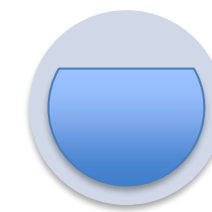
Analysmetoder för kvantifiering av den totala mängden PFAS



Riktad analys

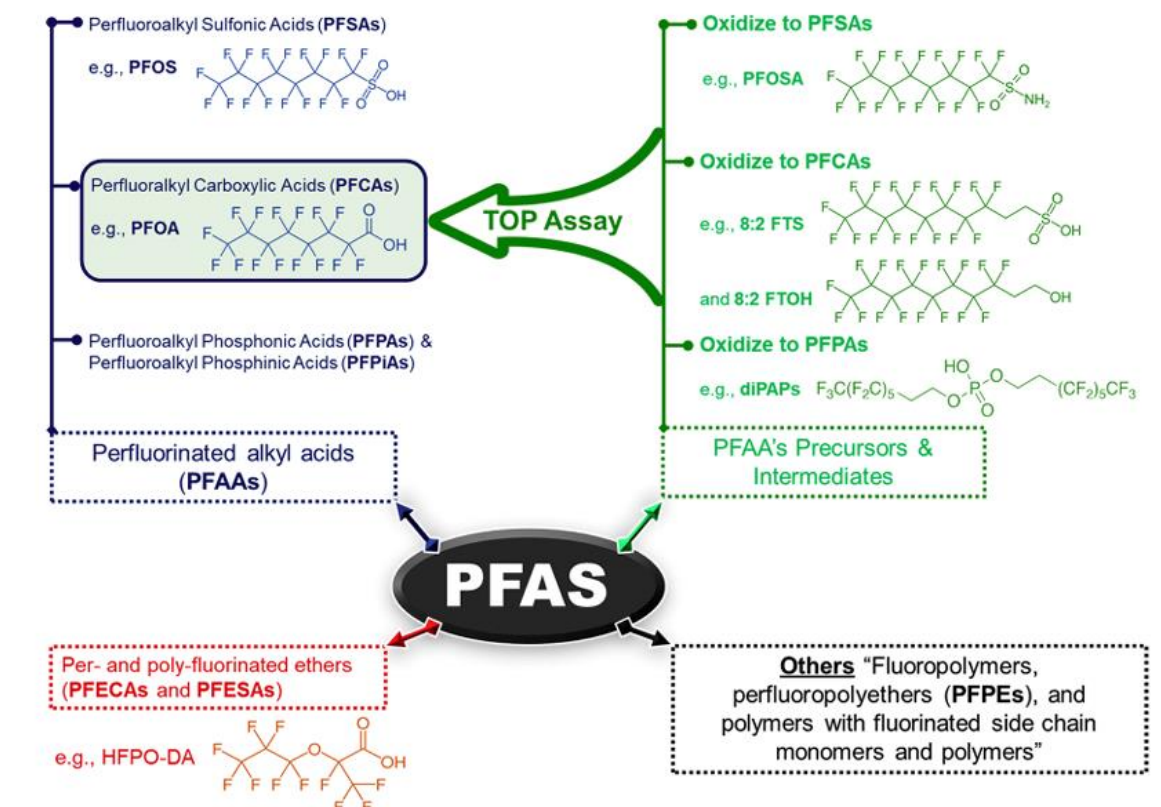


**Extraherbart
organisk fluor**

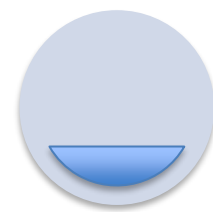
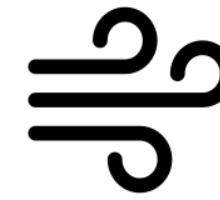


Oxidation

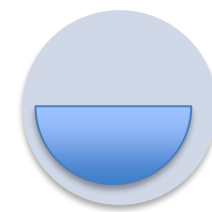
- Oxidering av på provet
- Mängden prekursorer i ett prov
 - Både okända och kända prekursorer
 - Jämföra med massbalansen för att ge ytterligare information



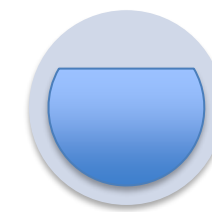
Analysmetoder för kvantifiering av den totala mängden PFAS



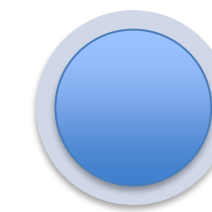
Riktad analys



**Extraherbart
organisk fluor**

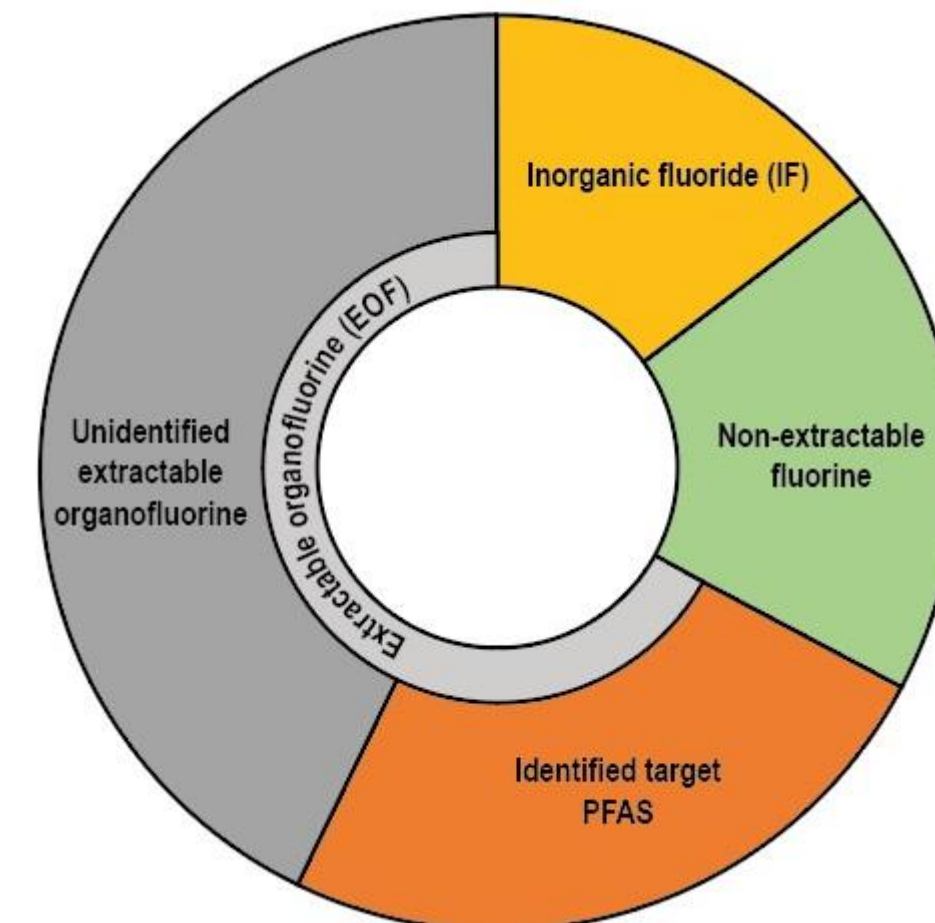


Oxidation



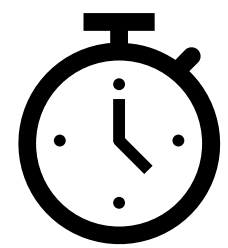
Total fluor

- Förstå den totala mängden fluor
 - Oorganisk
 - Organisk fluor
 - Icke-extraherbart



Korttidsexperiment på PFAS-kontaminerad jord

Exponeringstid



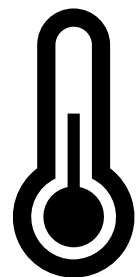
15 min
30 min

Selektion av jord



10 g
Triplikat

Temperaturer



150 °C
250 °C
350 °C
450 °C
600 °C

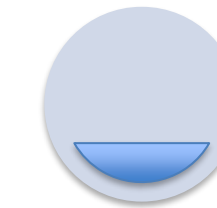
PFAS-förorenad jord

- En svensk flygplats
- Där AFFF släckskum har används
- Ger en indikation vilken PFAS kontaminering vi kan föreställa oss

Delmål:

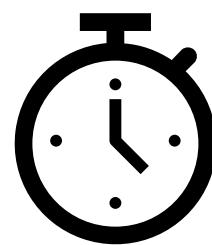
- Hur påverkar exponeringstiden och temperaturen processen
- Förstå nedbrytningen och vart PFAS hamnar
- Utvärdera arbetsflödet för att få en mer tillförlitlig massbalans

Korttidsexperiment – Sammanfattning



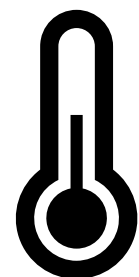
Riktad analys

Exponeringstid



15 min
30 min

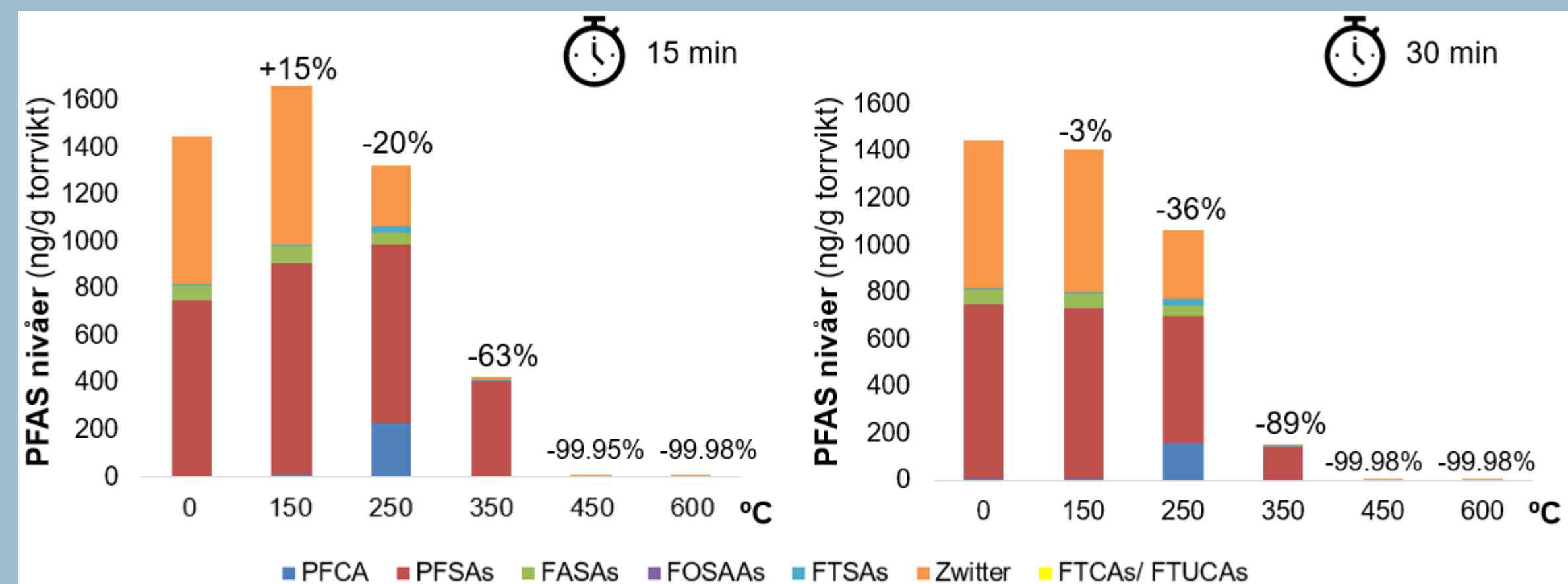
Temperaturer



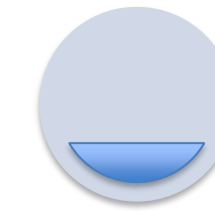
150 °C
250 °C
350 °C
450 °C
600 °C

Hur påverkar exponeringstiden och temperaturen processen

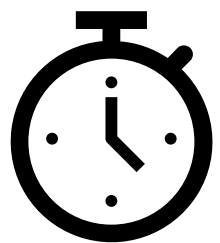
- Krävs minst 450 grader för nedbrytning/avdrivning
- En längre tid gav en högre grad av nedbrytning



Korttidsexperiment – Sammanfattning

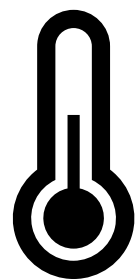
**Riktad analys**

Exponeringstid



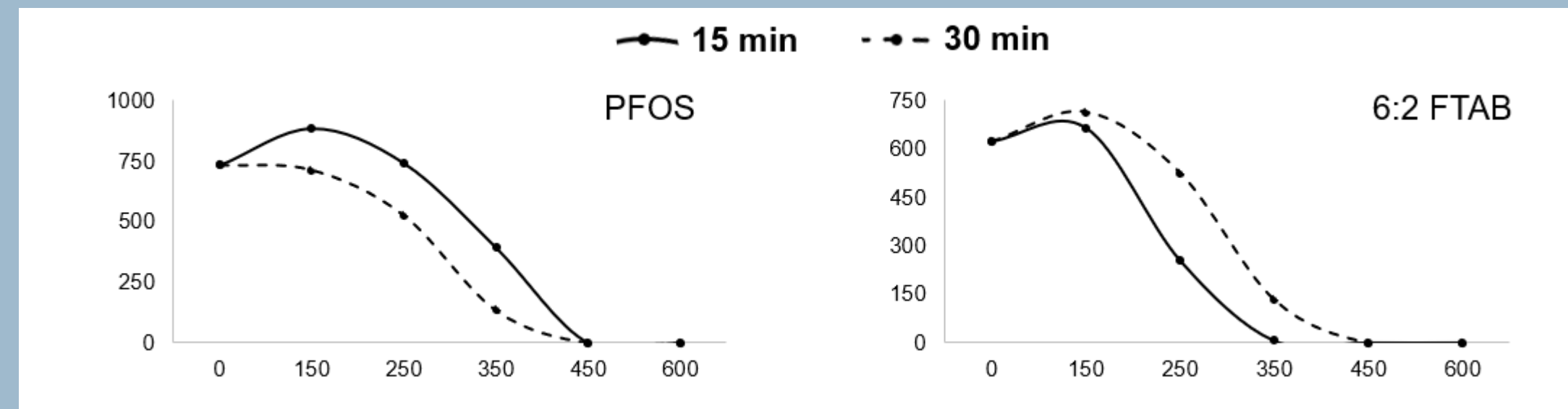
15 min
30 min

Temperaturer

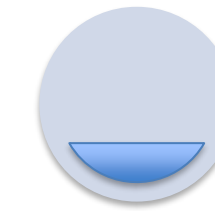


150 °C
250 °C
350 °C
450 °C
600 °C

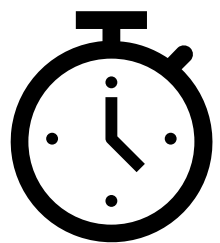
- **Hur påverkar exponeringstiden och temperaturen processen**
 - Krävs minst 450 grader för fullständig nedbrytning
 - En längre tid gav en högre grad av nedbrytning
- **Hur ser nedbrytningen ut**
 - Nedbrytningen ser likartad ut mellan 15 och 30 min
 - En ökning av PFOS under 150 °C - nedbrytning av prekursorer



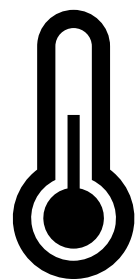
Korttidsexperiment – Sammanfattning

**Riktad analys**

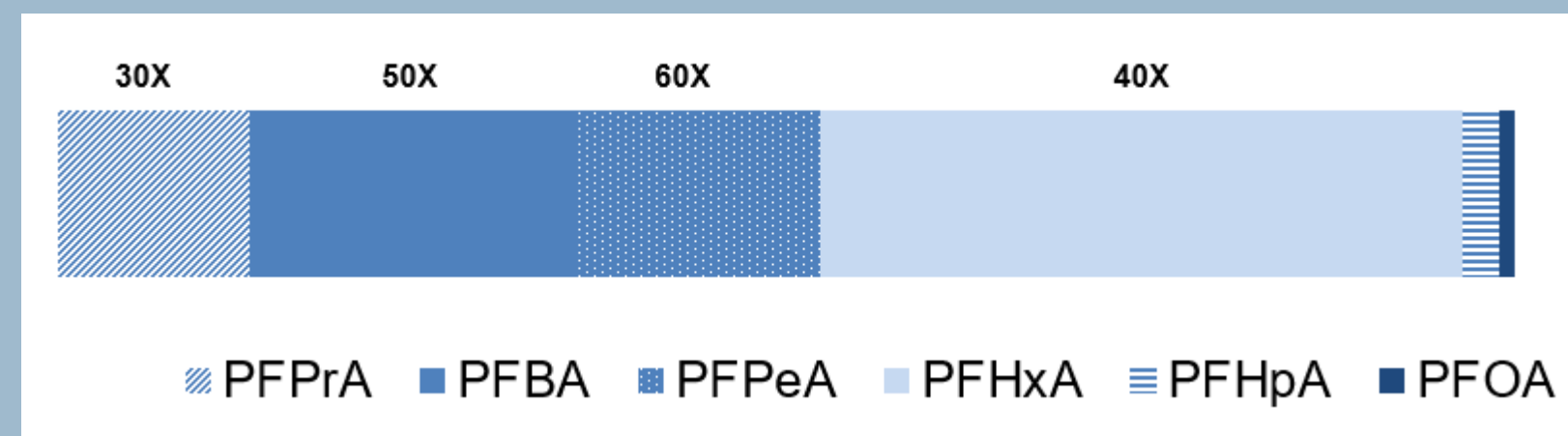
Exponeringstid

15 min
30 min

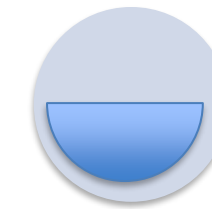
Temperaturer

150 °C
250 °C
350 °C
450 °C
600 °C

- **Hur påverkar exponeringstiden och temperaturen processen**
 - Krävs minst 450 grader för fullständig nedbrytning
 - En längre tid gav en högre grad av nedbrytning
- **Hur ser nedbrytningen ut**
 - Nedbrytningen ser likartad ut mellan 15 och 30 min
 - En ökning av PFOS under 150 °C - nedbrytning av prekursorer
 - Ytterligare indikation av nedbrytning av prekursorer är den radikal ökning av PFCAs vid 250 °C

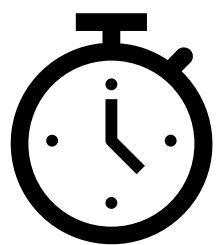


Korttidsexperiment – Sammanfattning



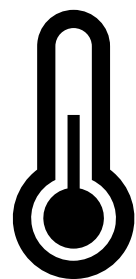
**Extraherbart
organisk fluor**

Exponeringstid



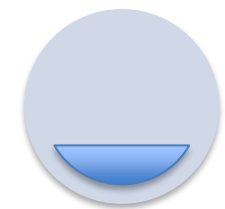
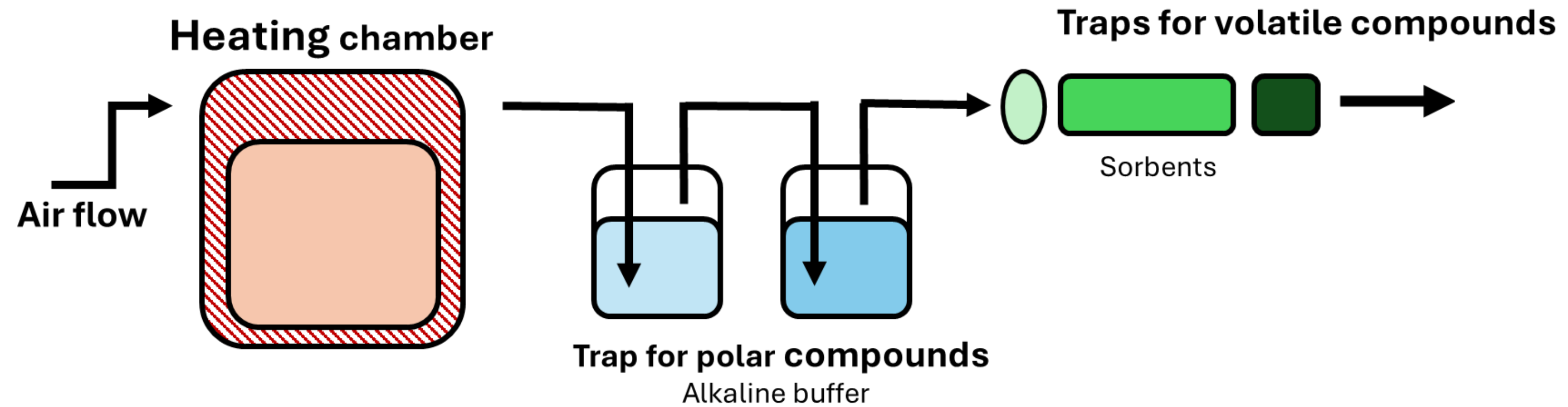
15 min
30 min

Temperaturer

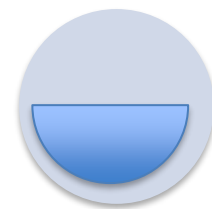
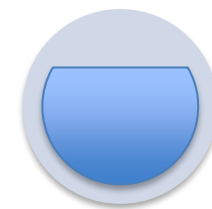
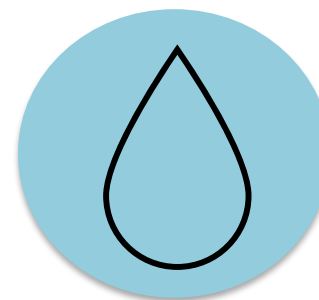


150 °C
250 °C
350 °C
450 °C
600 °C

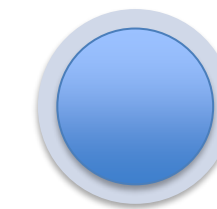
- **Hur påverkar exponeringstiden och temperaturen processen**
 - Krävs minst 450 grader för fullständig nedbrytning
 - En längre tid gav en högre grad av nedbrytning
- **Hur ser nedbrytningen ut**
 - Nedbrytningen ser likartad ut mellan 15 och 30 min
 - En ökning av PFOS under 150 °C - nedbrytning av prekursorer
 - Ytterligare indikation av nedbrytning av prekursorer är den radikala ökningen av PFCAs vid 250 °C
- **Få en mer tillförlitlig massbalans**
 - En stor mängd av EOF är fortfarande okänt – framförallt Fr.A
 - Under nedbrytningen (250 °C) kan EOF förklaras
 - Kan vara katjoniska prekursorer och andra prekursorer



Riktad analys

Extraherbart
organisk fluor

Oxidation



Total fluor



Tack så mycket!

Föregående webbinarier:

Insyn i pågående pilotförsök med barriär av aktivt kol för åtgärd av PFAS-förorening (Robert Earon, SGI)

In situ stabilisering av PFAS i jord och grundvatten med aktivt kol (Dan Berggren Kleja, SGI)

Tvätt av PFAS-förorenad jord – resultat från laboriestudier (Malin Montelius, SGI)

Spridning av PFAS från ett källområde till recipient före och efter stabilisering (Robert Earon, SGI)

Termisk behandling av PFAS-kontaminerad jord (Felicia Fredriksson, Örebro universitet)

Kommande webbinarier:

23 september kl. 9.00-9.45

In-situ PFAS remediation using air bubbling/sparging technique (SLU)

2 december kl. 9.00-9.45

Stabilisering av PFAS-förorenad jord över tid – en laboriestudie (Linda Johnsson, SGI)

TACK!

Projekten är finansierade av Regeringens anslag 1:4 Sanering och återställning av förorenade områden