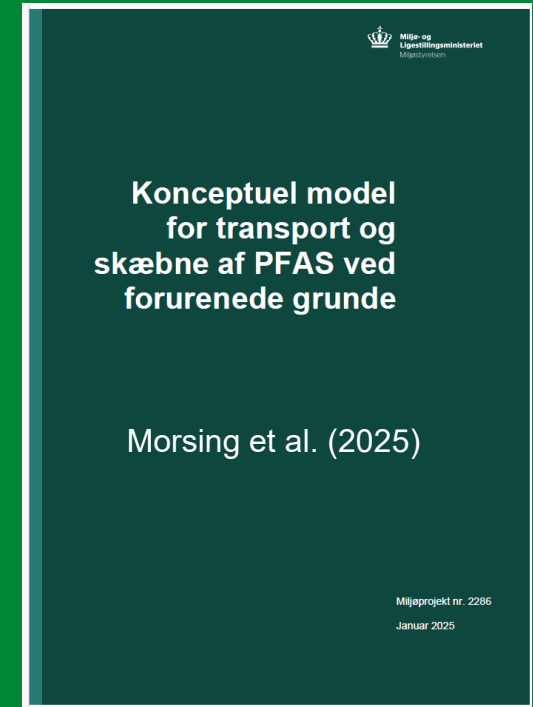


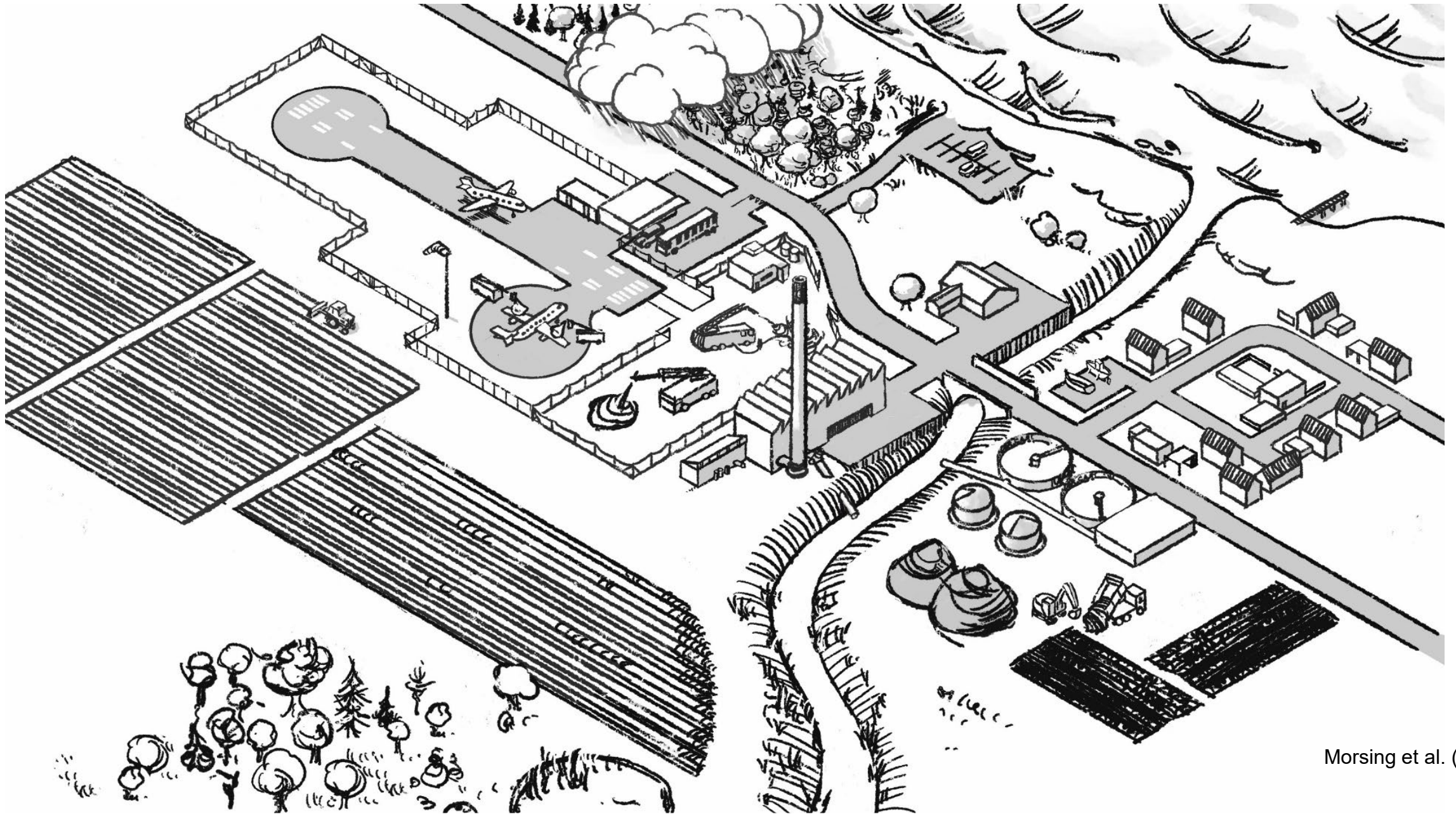
DTU



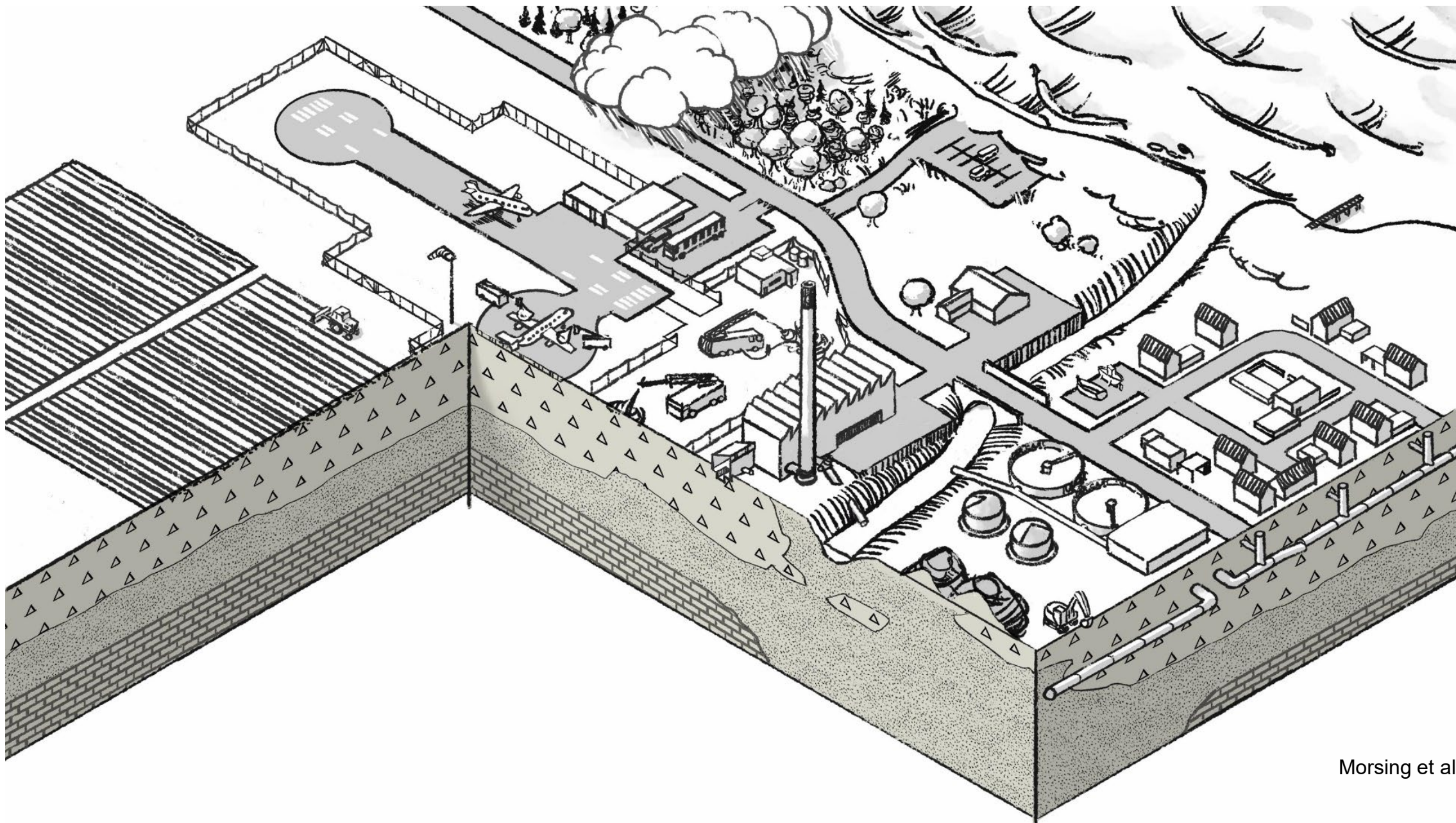


Konceptuel forståelse af PFAS transport ved forurenede grunde

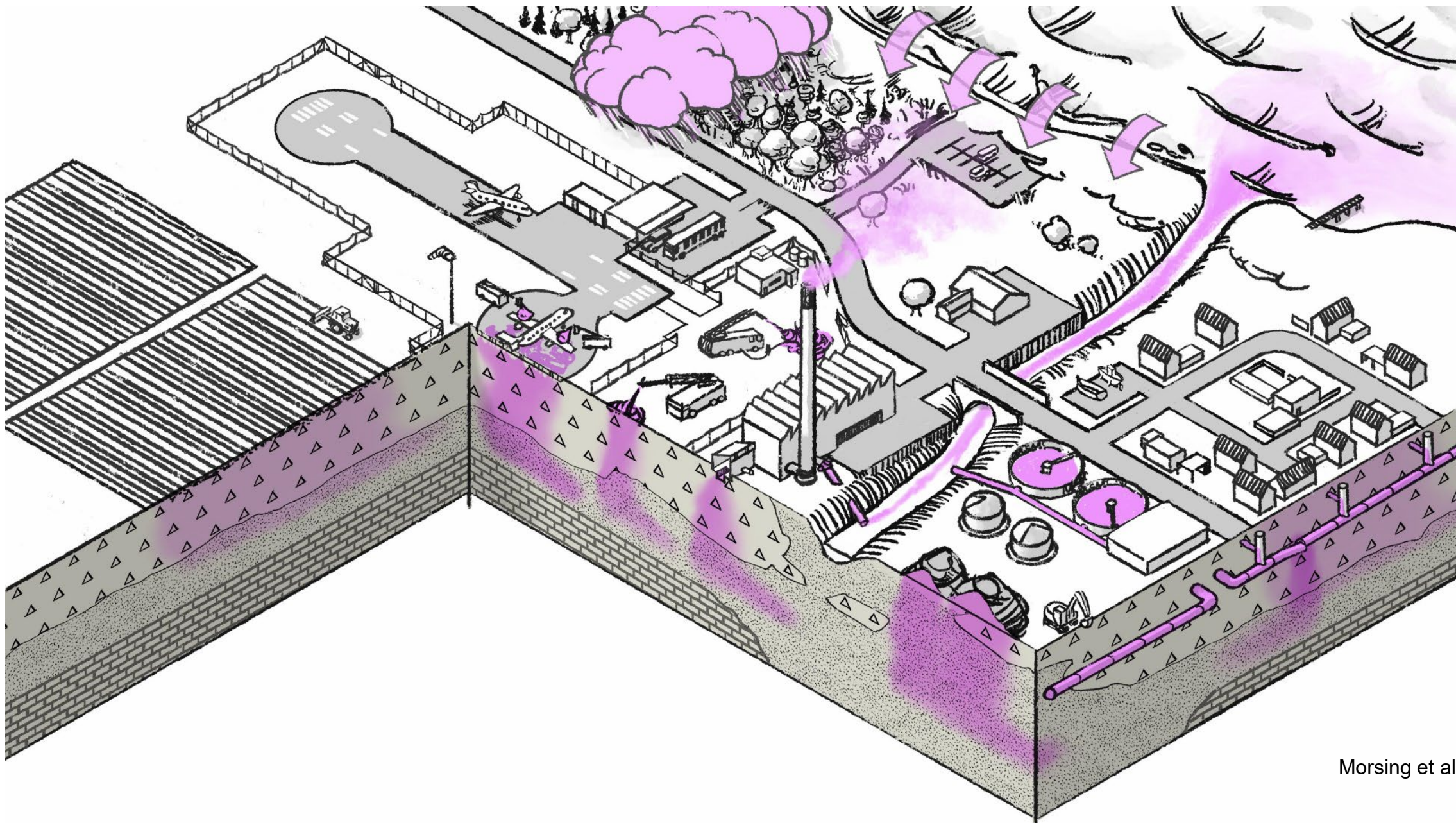
Poul L. Bjerg, Laura Morsing, Katerina Tsitonaki, Søren Dyreborg, Klaus Mosthaf, Annika S. Fjordbøge, Rune Hjorth, Bolette B. Jensen, og Anders Baun



Morsing et al. (2025)

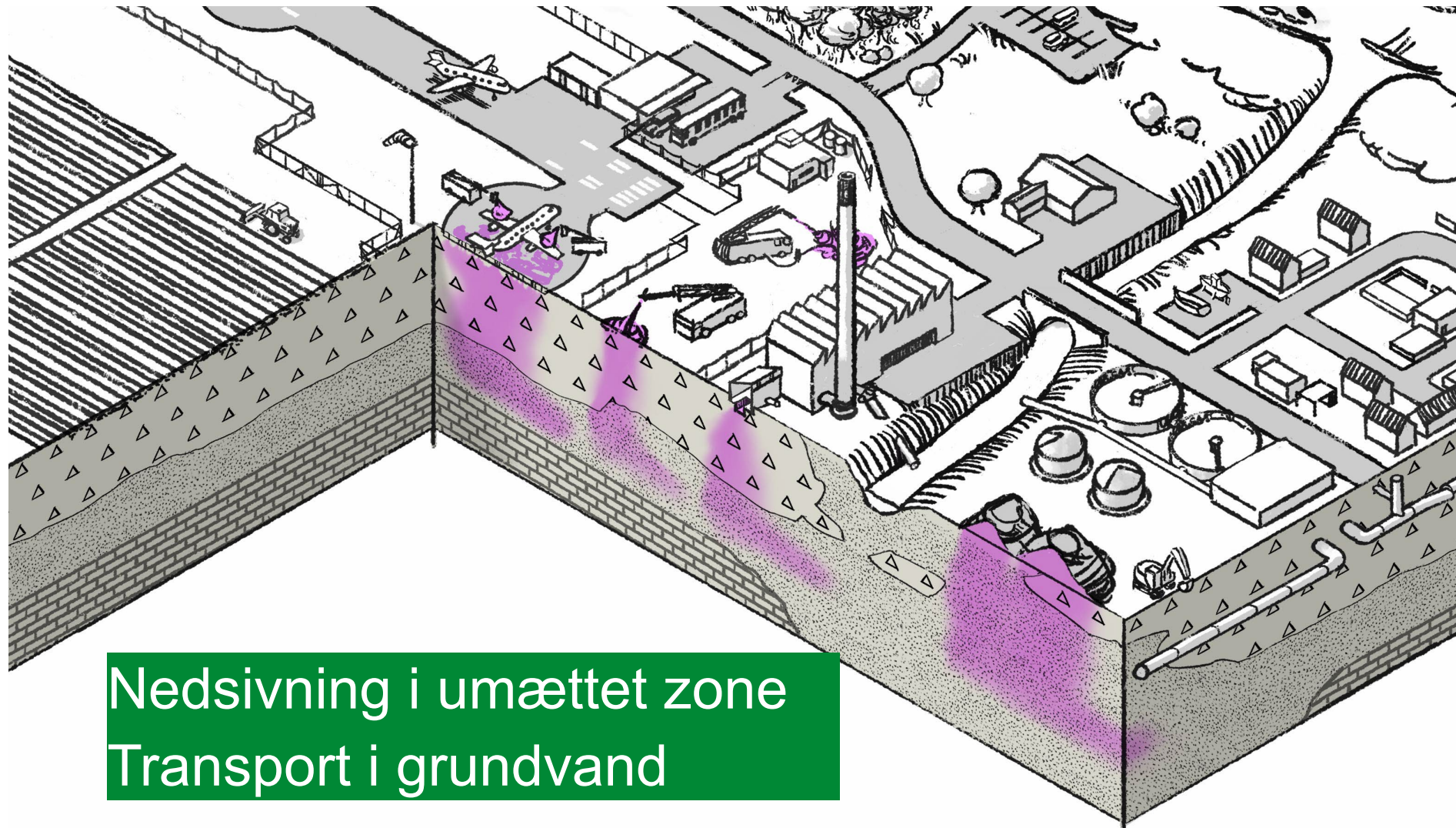


Morsing et al. (2025)



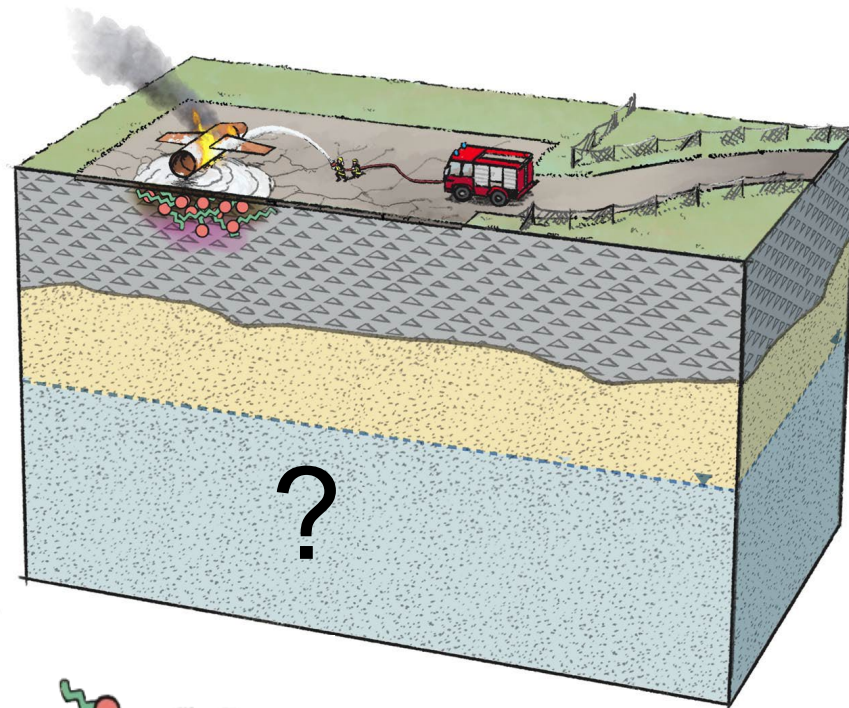
Morsing et al. (2025)

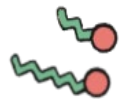
PFAS forurenede grunde i Danmark



Konceptuel forståelse af PFAS transport

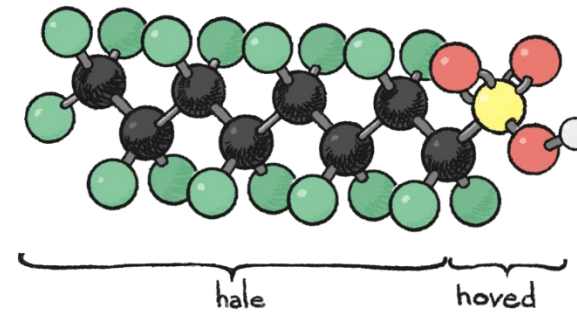
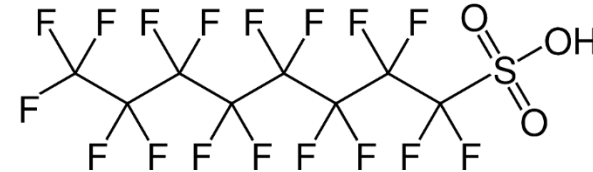
Forureningsundersøgelser



 PFAS

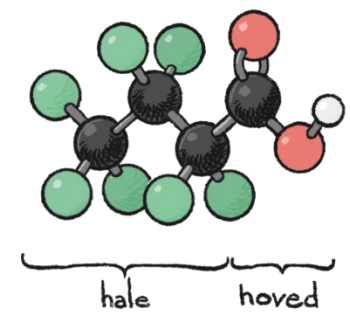
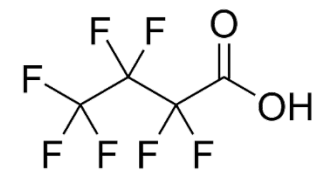
Perfluorerede sulfonsyrer

PFOS



Perfluorerede carboxylsyrer

PFBA



Morsing et al. (2025)

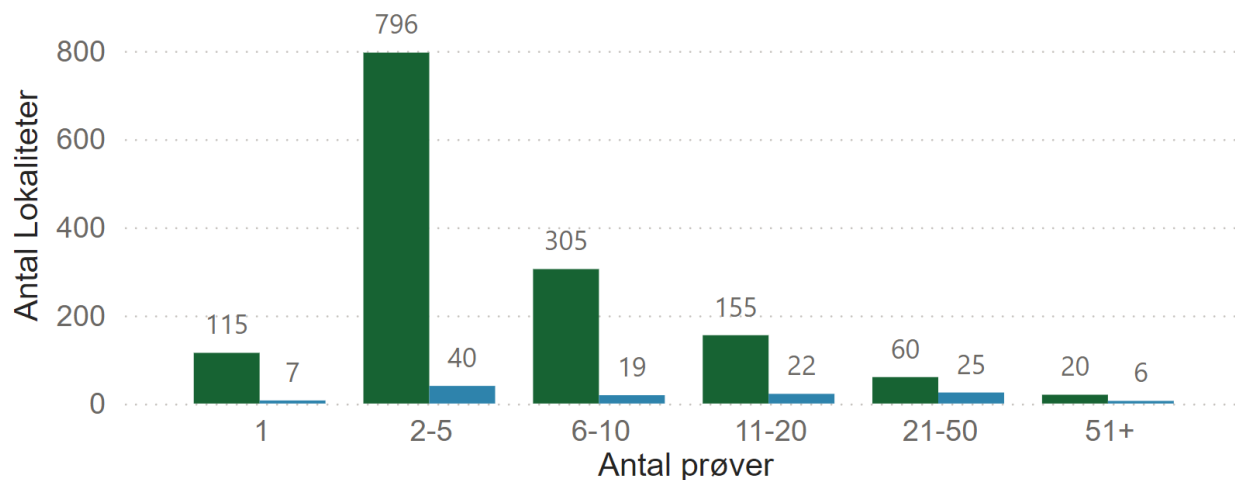
Husk PFAS ≠ PFAS

Konceptuel forståelse af PFAS transport

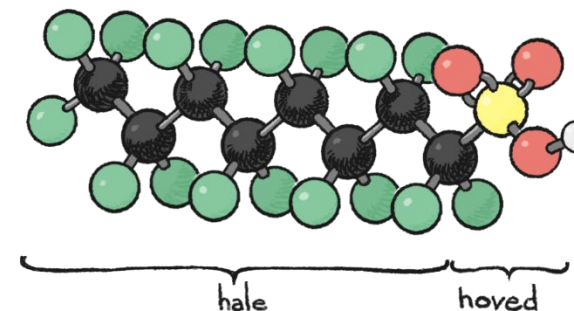
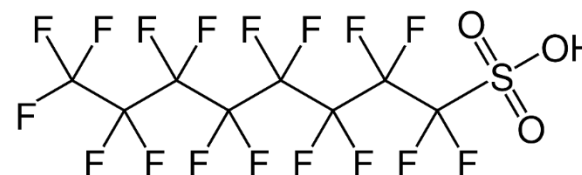
Forureningsundersøgelser

- Review af danske og udenlandske forureningsundersøgelser (WSP og NIRAS)
 - **Generelle erfaringer**
 - Statistik om fund, fordeling og stoffer
 - Inspiration til undersøgelser

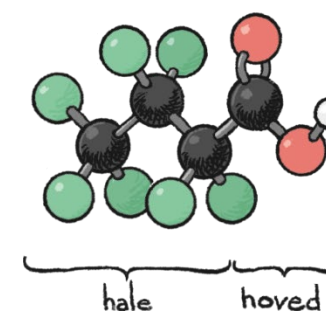
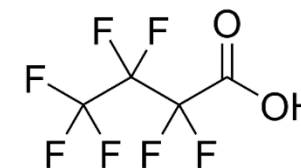
● Grundvand ● Jord



PFOS



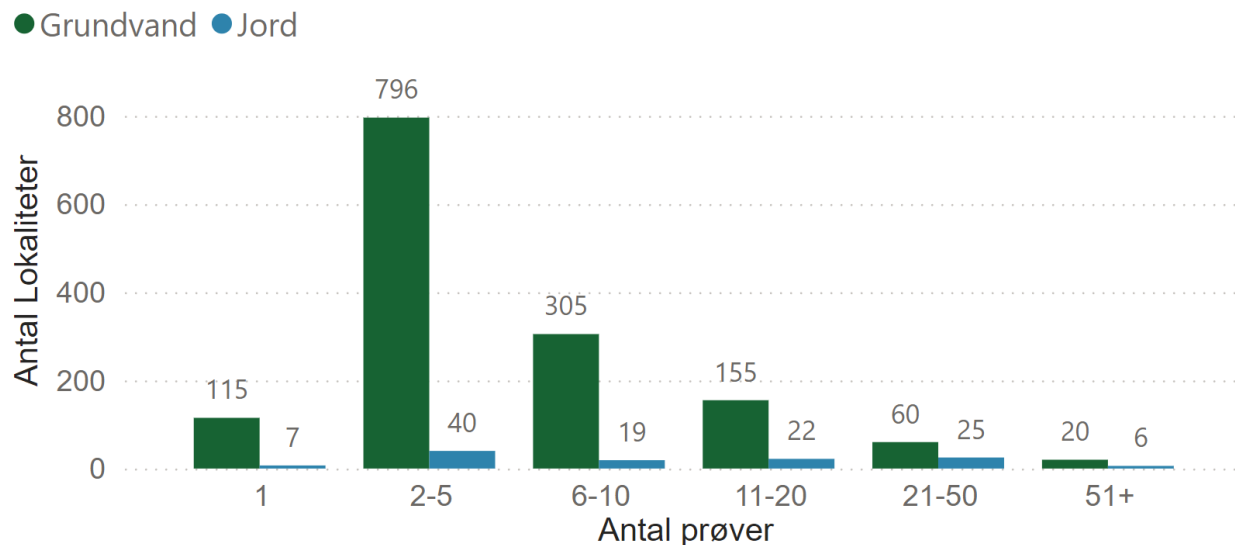
PFBA



Morsing et al. (2025)

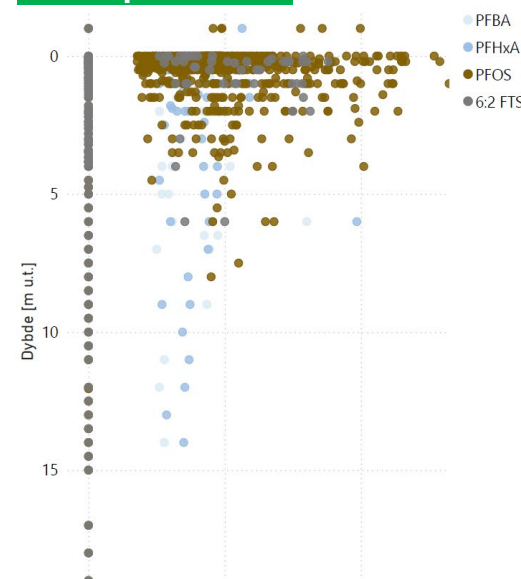
PFAS fund fra forureningsundersøgelser

- Størstedelen af PFAS massen findes i de øverste ca. 10 meter
- Kortkædede PFAS træffes ofte dybere end langkædede PFAS
- I jord detekteres PFOA og PFOS hyppigt
- I grundvand detekteres både kortkædede og langkædede PFAS
- **Svært at udlede noget generelt for enkeltstoffer**

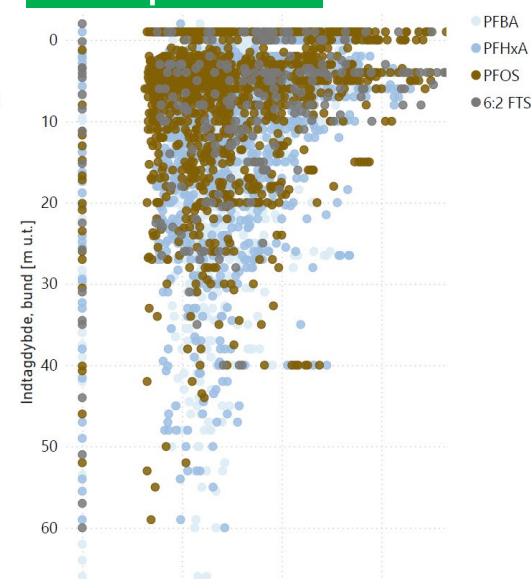


Morsing et al. (2025)

Jordprøver



Vandprøver

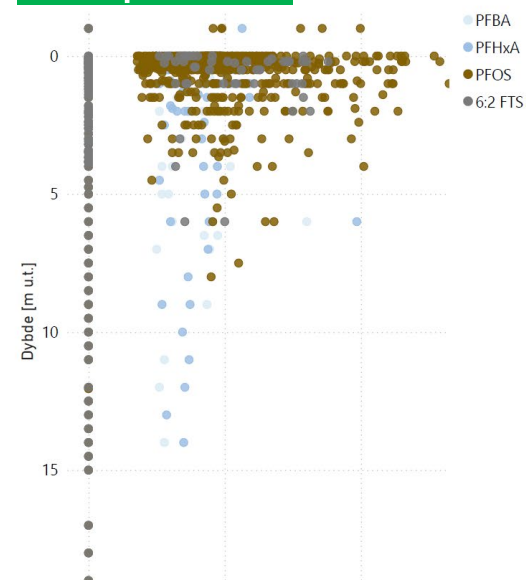


PFAS fund fra forureningsundersøgelser

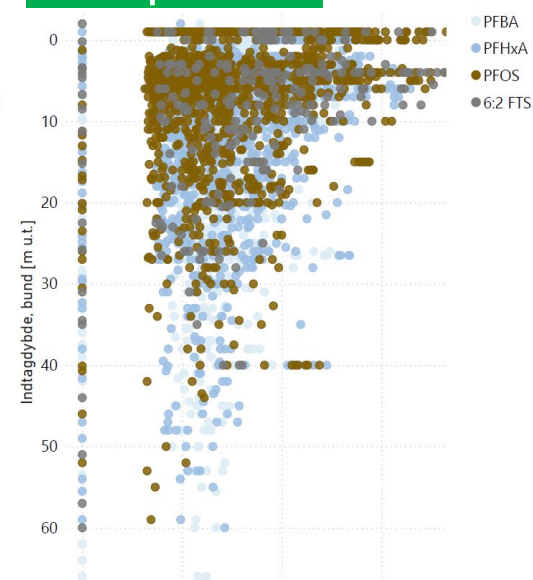
- Størstedelen af PFAS massen findes i de øverste ca. 10 meter
- Kortkædede PFAS træffes ofte dybere end langkædede PFAS
- I jord detekteres PFOA og PFOS hyppigt
- I grundvand detekteres både kortkædede og langkædede PFAS
- **Dominerende forureningskilder?**

Branche	Grundvand >10.000 ng/l	Jord >100 µg/kg TS
Brandvæsen og redningskorps	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFBS, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	PFOS
Lufthavne	PFPeA, PFHxA, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	
Lossepladser	PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	PFOA, PFDA, PFOS
Overfladebehandling af metal	PFOS, 6:2 FTS	PFOS
Forsvar	PFBA, PFPeA, PFHxA, 6:2 FTS	
Elektronikfremstilling	6:2 FTS	PFOS
Møbelindustri	6:2 FTS	PFOS

Jordprøver



Vandprøver



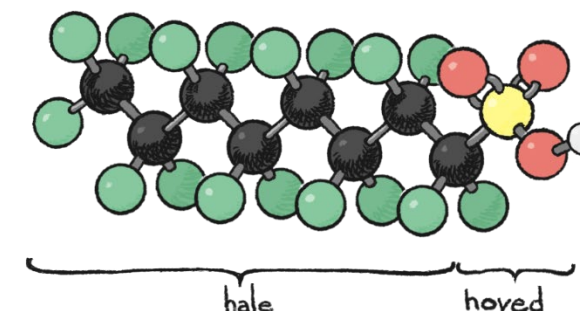
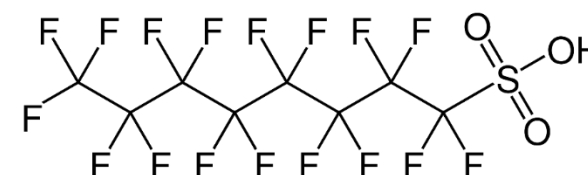
Konceptuel forståelse af PFAS transport

Forureningsundersøgelser

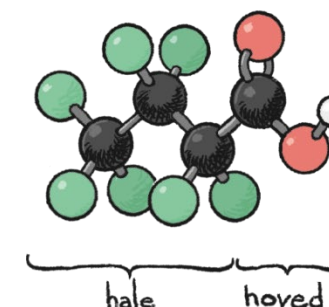
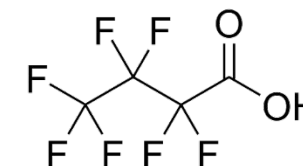
- Review af danske og udenlandske forureningsundersøgelser (WSP og NIRAS)
 - Generelle erfaringer
 - Statistik om fund, fordeling og stoffer
 - **Inspiration til undersøgelser**

Branche	Grundvand >10.000 ng/l	Jord >100 µg/kg TS
Brandvæsen og redningskorps	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFBS, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	PFOS
Lufthavne	PFPeA, PFHxA, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	
Lossepladser	PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS	PFOA, PFDA, PFOS
Overfladebehandling af metal	PFOS, 6:2 FTS	PFOS
Forsvar	PFBA, PFPeA, PFHxA, 6:2 FTS	
Elektronikfremstilling	6:2 FTS	PFOS
Møbelindustri	6:2 FTS	PFOS

PFOS



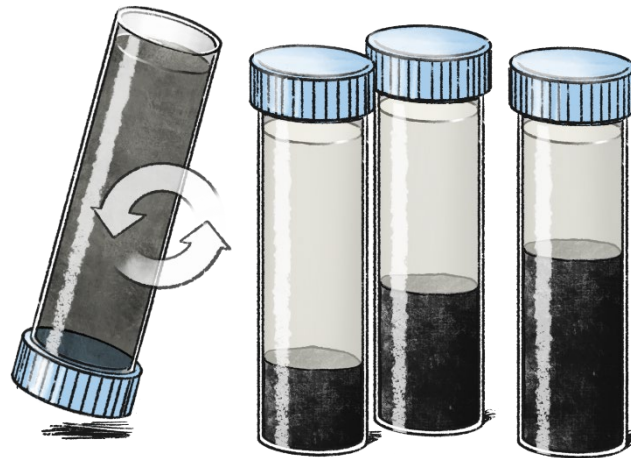
PFBA



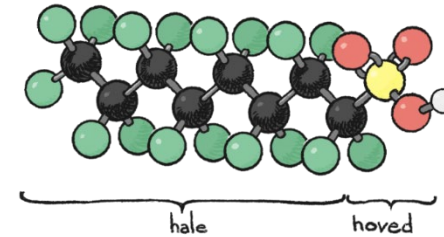
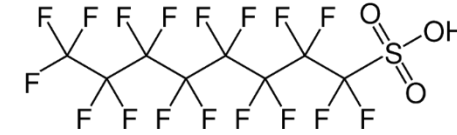
Morsing et al. (2025)

Binding til jordpartikler

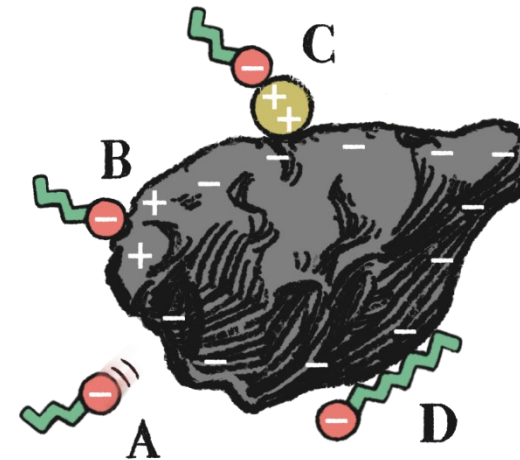
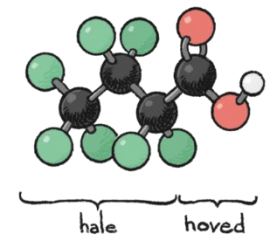
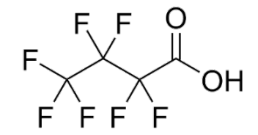
- Forureninger kan bindes/sorbere til jord
- K_d angiver forureningens fordeling mellem sorberet fase på jord og vandfase



PFOS



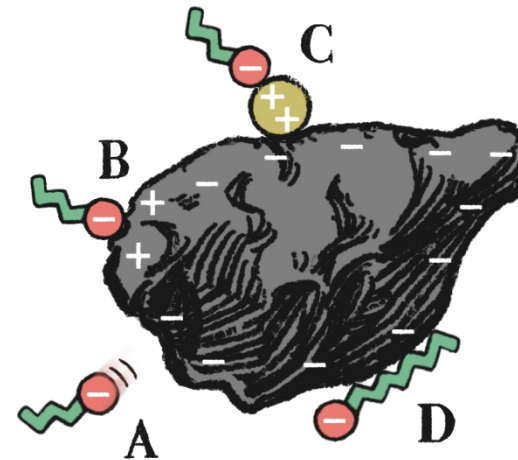
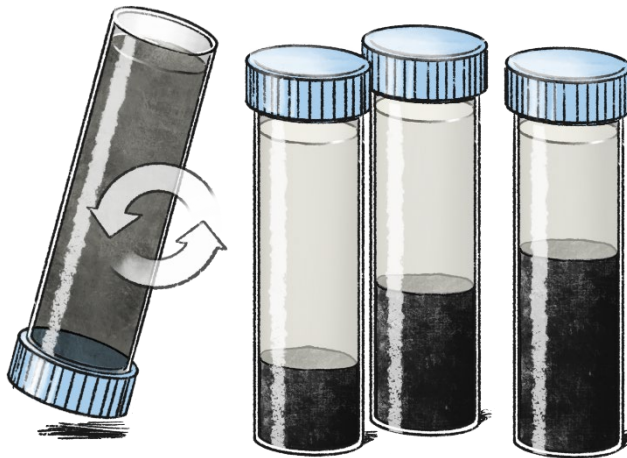
PFBA



- A – elektrostatisk frastødning,
B – elektrostatisk tiltrækning,
C – divalent-bro effekter,
D – hydrofobisk interaktion.

Binding til jordpartikler

- Forureninger kan bindes/sorbere til jord
- K_d angiver forureningens fordeling mellem sorberet fase på jord og vandfase

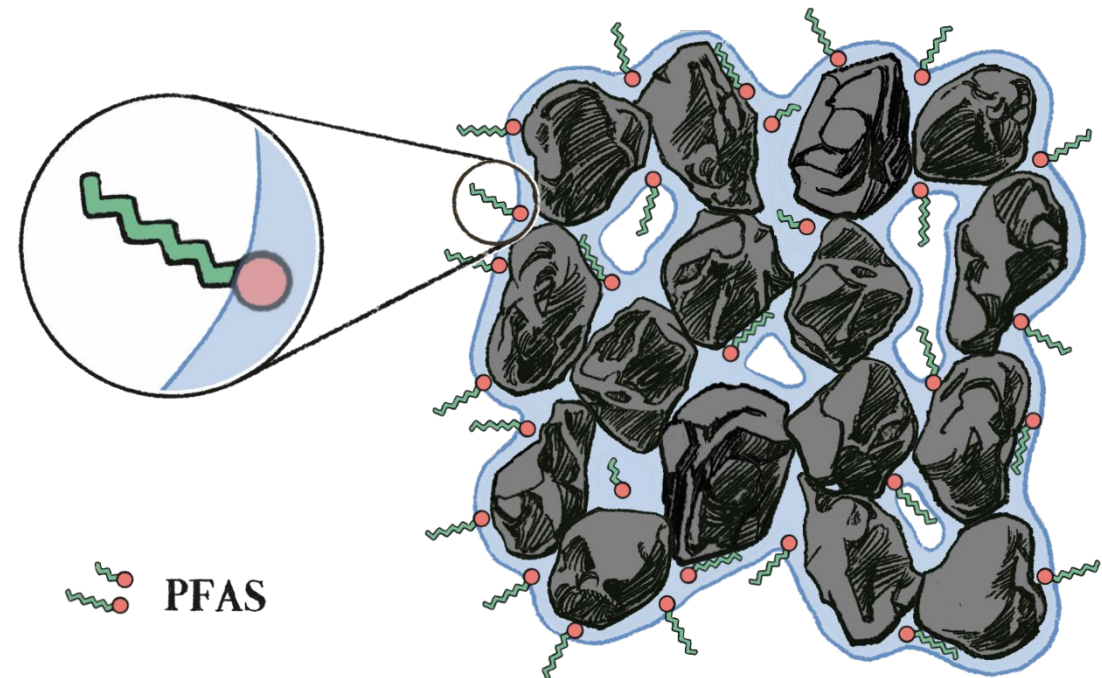


A – elektrostatisk frastødning,
B – elektrostatisk tiltrækning,
C – divalent-bro effekter,
D – hydrofobisk interaktion.

Binding til luft-vand grænsefladen

Bindingsmekanismer:

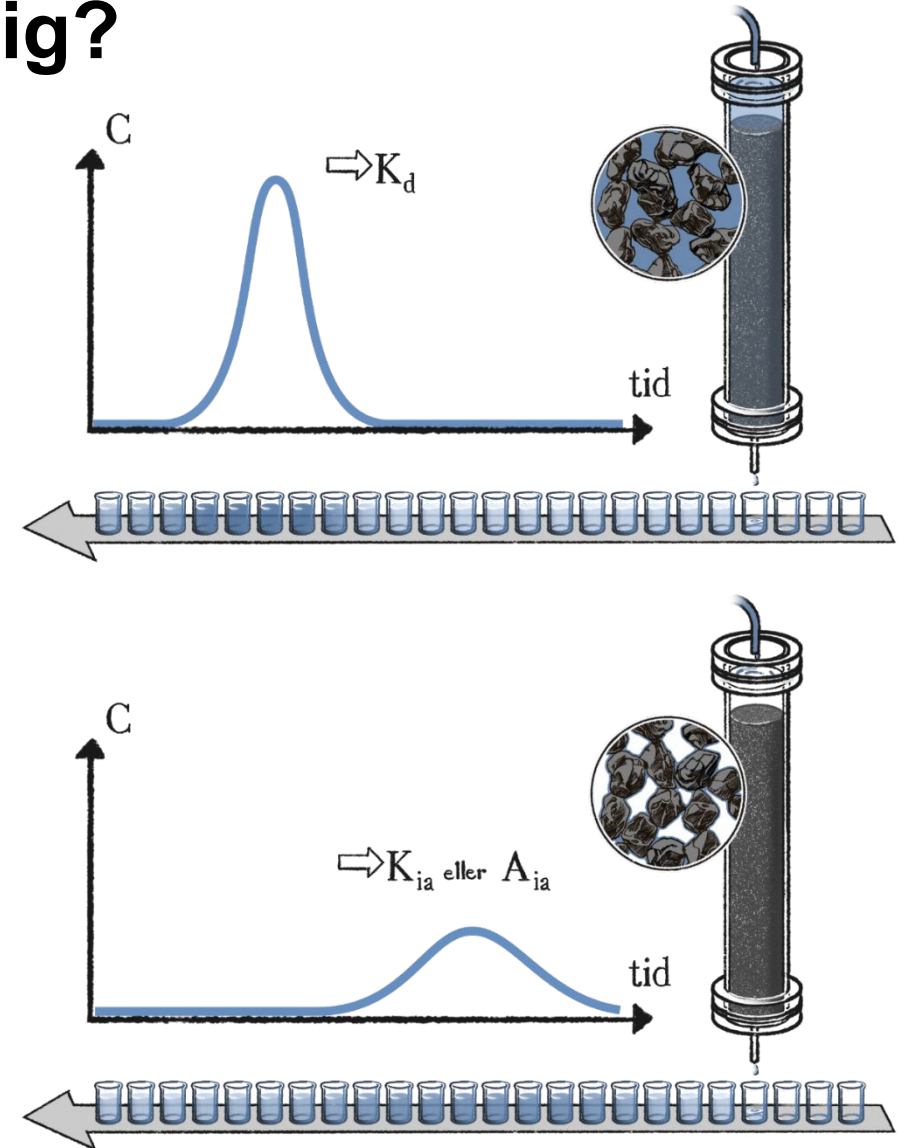
- Umættede forhold
- Sorption til luft-vand grænsefladen



Hvad gør transport af PFAS særlig?

Bindingsmekanismer:

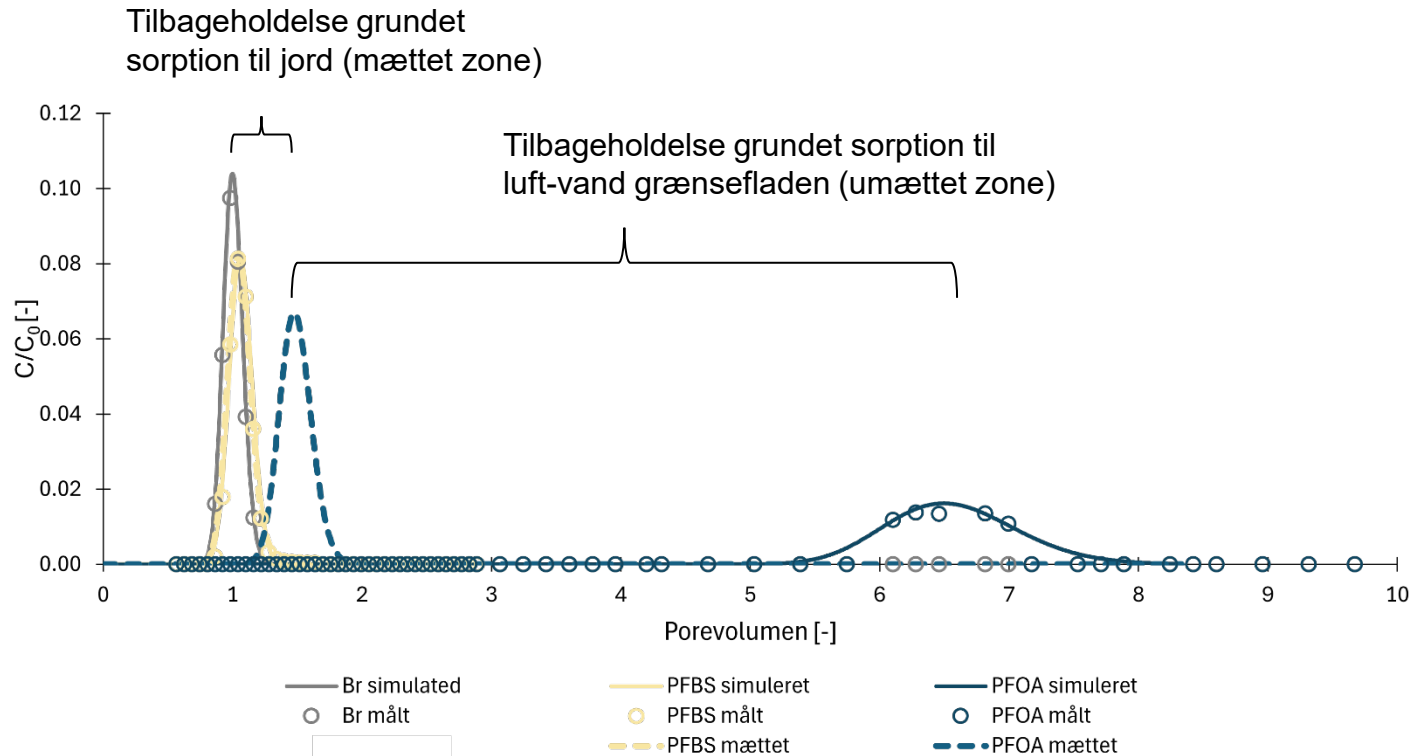
- Sorption til jord **og** til luft-vand grænsefladen



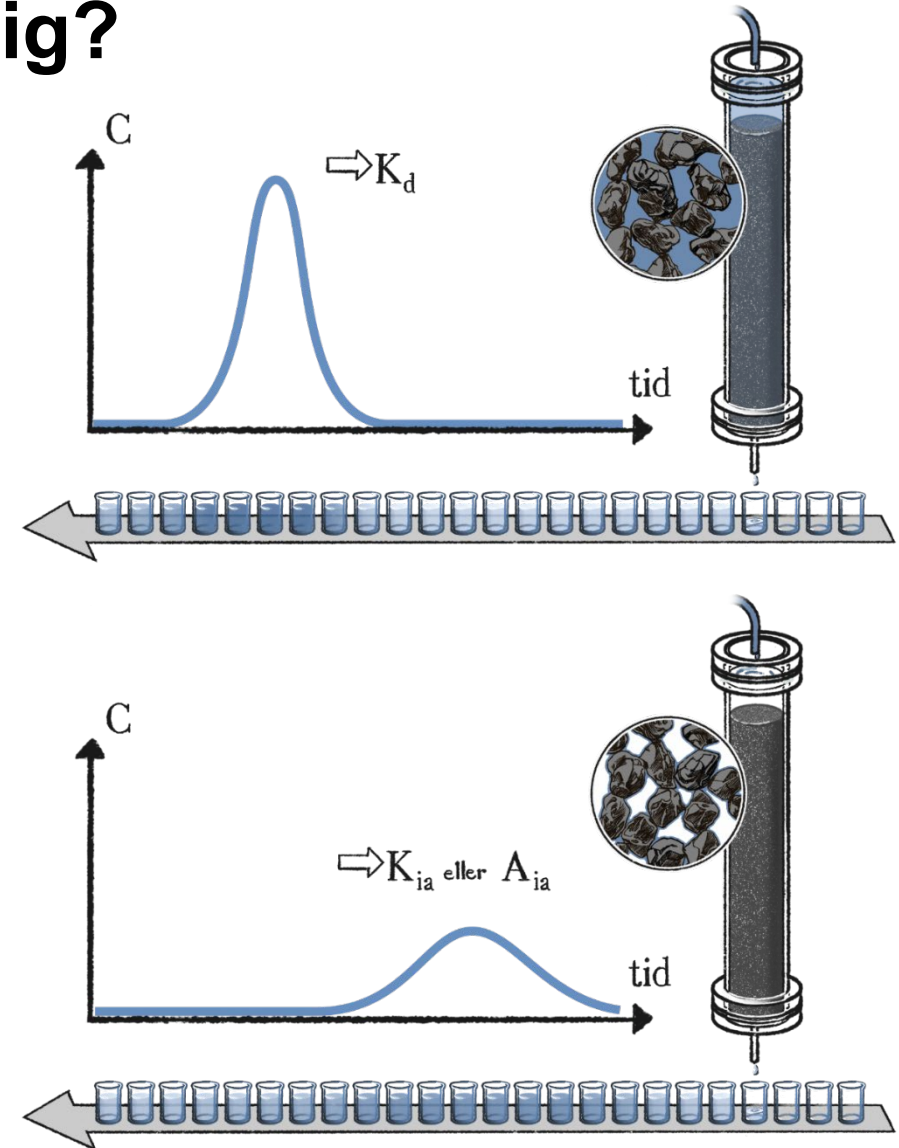
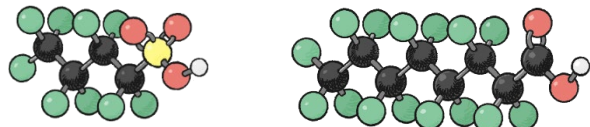
Hvad gør transport af PFAS særlig?

Bindingsmekanismer:

- Sorption til jord **og** til luft-vand grænsefladen



Morsing & Petersen (2024)

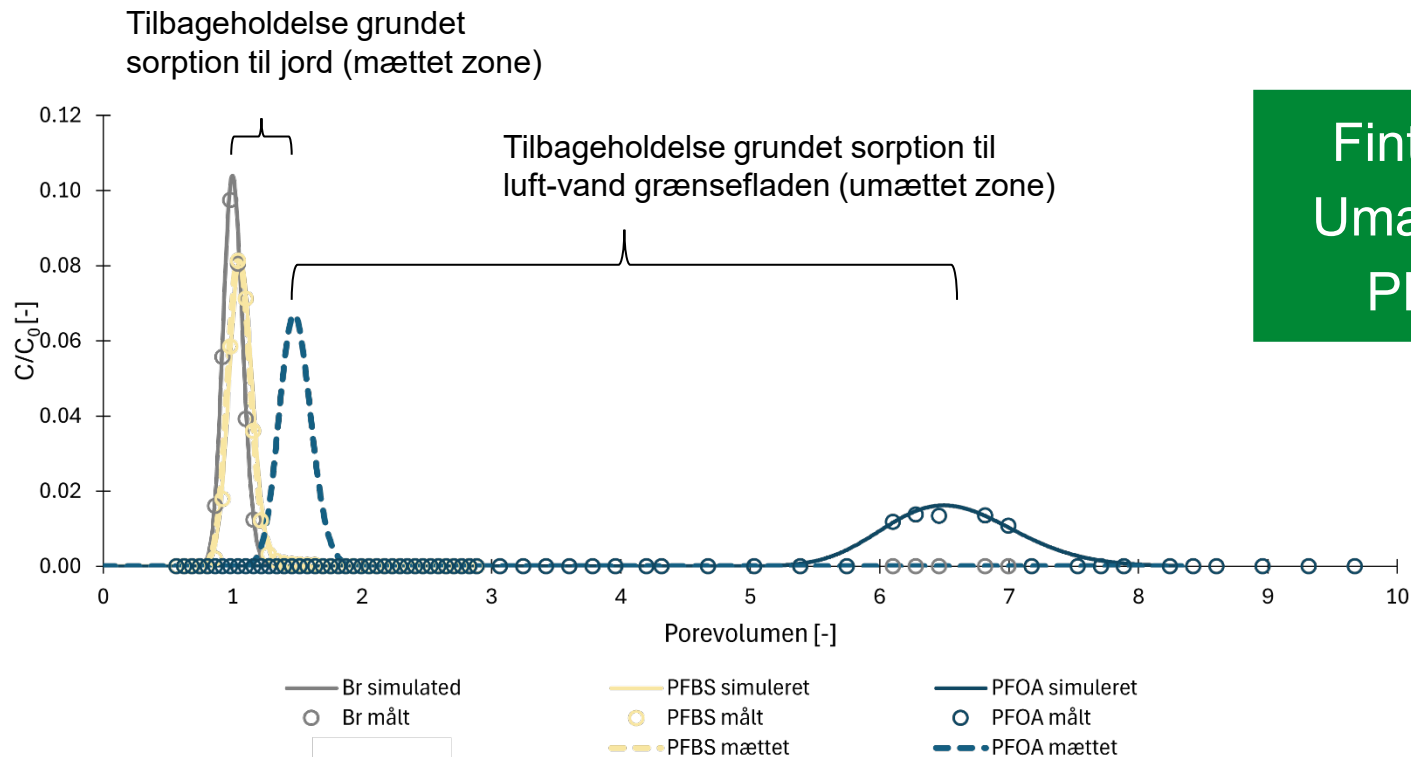


Morsing et al. (2025)

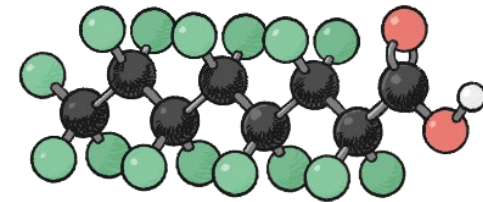
Hvad gør transport af PFAS særlig?

Bindingsmekanismer:

- Sorption til jord **og** til luft-vand grænsefladen



Fint sand: Kortkædede PFAS ≈ tracer
Umættede forhold, ca 80-90% vandmætning
PFOA tilbageholdelse øges ca. 5 gange



Retardationsfaktor, styrende processer og parametre

Sorption til jord

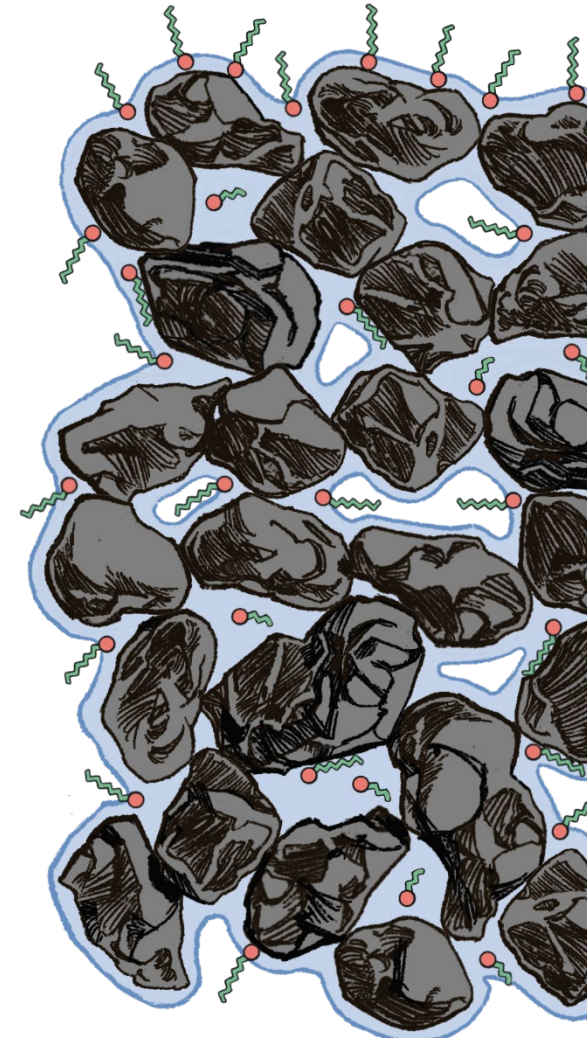


Retardationsfaktor

$$R = 1 + \frac{K_d \cdot \rho_b}{\theta_w}$$

R udtrykker forsinkelsen af PFAS i forhold til vandets transporthastighed

- K_{ia} → Sorptionskoefficient til luft-vand grænsefladen (cm)
- A_{ia} → Luft-vand grænsefladearealet (cm⁻¹)
- K_d → Fordelingskoefficient til jord (l/kg)
- θ_w → Vandindhold (-)
- ρ_b → Rumvægt - bulk density (kg/l)



Styrende processer og betydende parametre

Sorption til jord

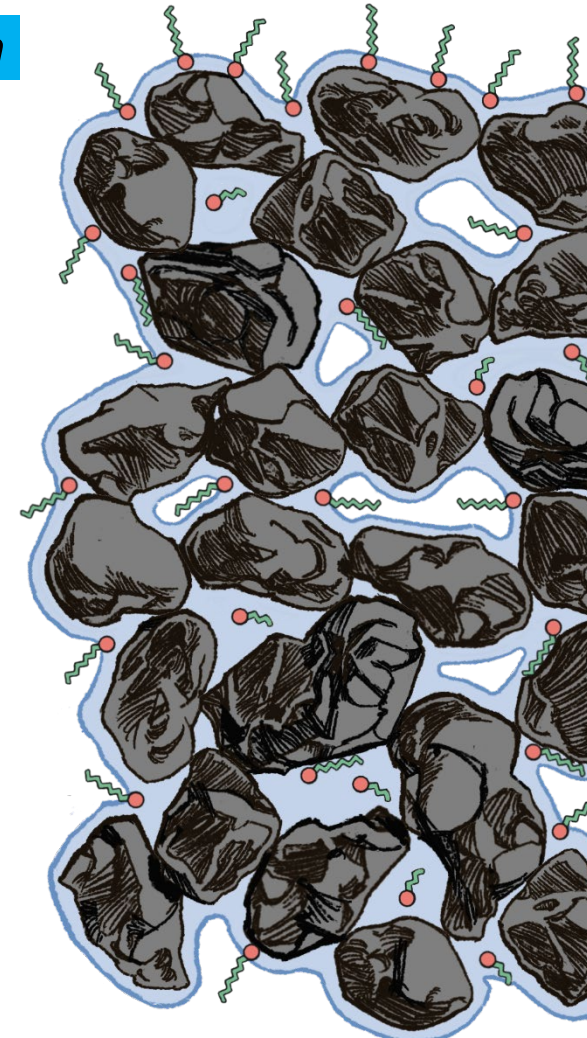
Adsorption til luft-vand grænsefladen

Retardationsfaktor

$$R = 1 + \frac{K_d \cdot \rho_b}{\theta_w} + \frac{K_{ia} \cdot A_{ia}}{\theta_w}$$

Relevant for
langkædede PFAS

- K_{ia} → Sorptionskoefficient til luft-vand grænsefladen (cm)
- A_{ia} → Luft-vand grænsefladearealet (cm⁻¹)
- K_d → Fordelingskoefficient til jord (l/kg)
- θ_w → Vandindhold (-)
- ρ_b → Rumvægt - bulk density (kg/l)

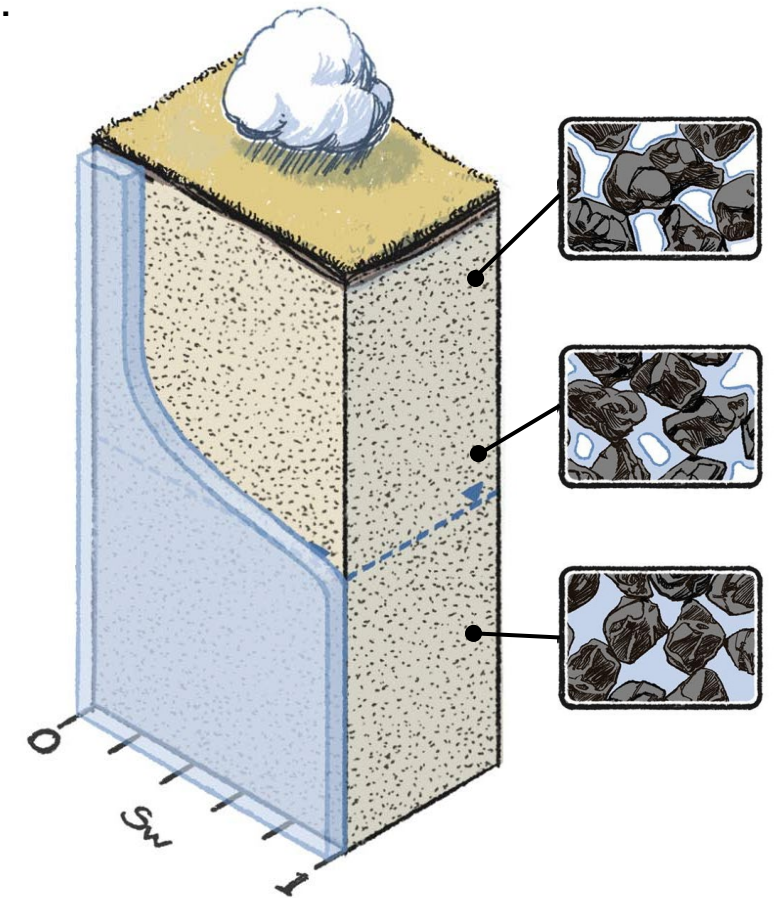


Vandmætningen i mættet og **umættet** zone

- Vandmætning S_w , er den vandmættede del af porøsiteten, n :

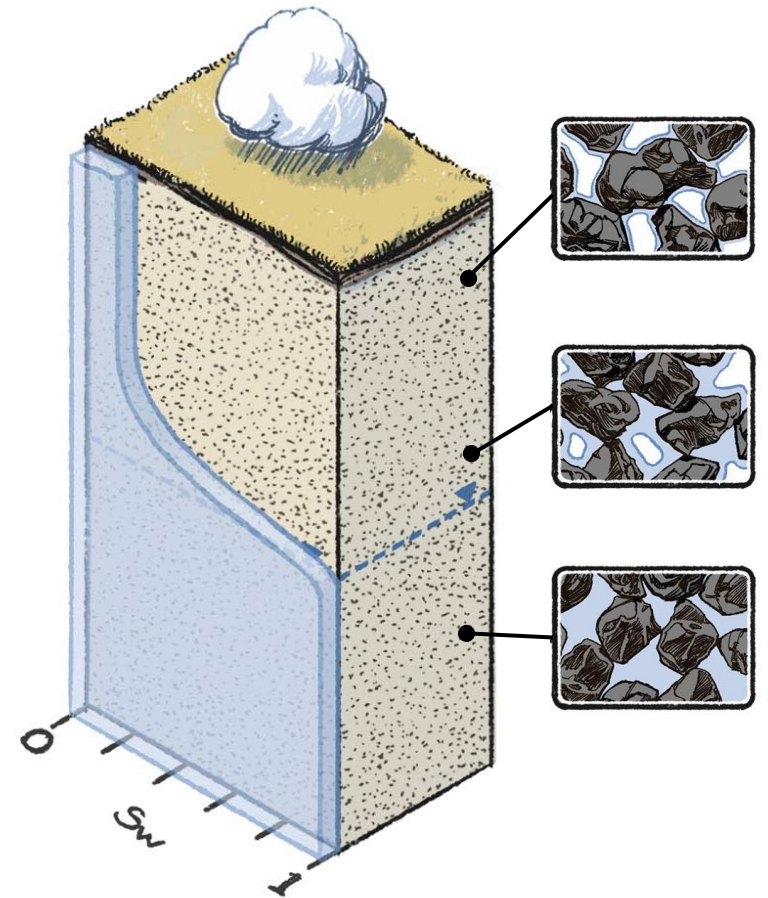
$$S_w = n_{vand} / n$$

- Vandmætning (S_w) varierer i mættet zone
- Vandmætning (S_w) er 1 i mættet zone
- S_w afhænger af geologien og infiltrationen
- Vandmætningsfordeling i den umættede zone
 - Kan matematisk beskrives med retentionskurver
 - van Genuchten parametre

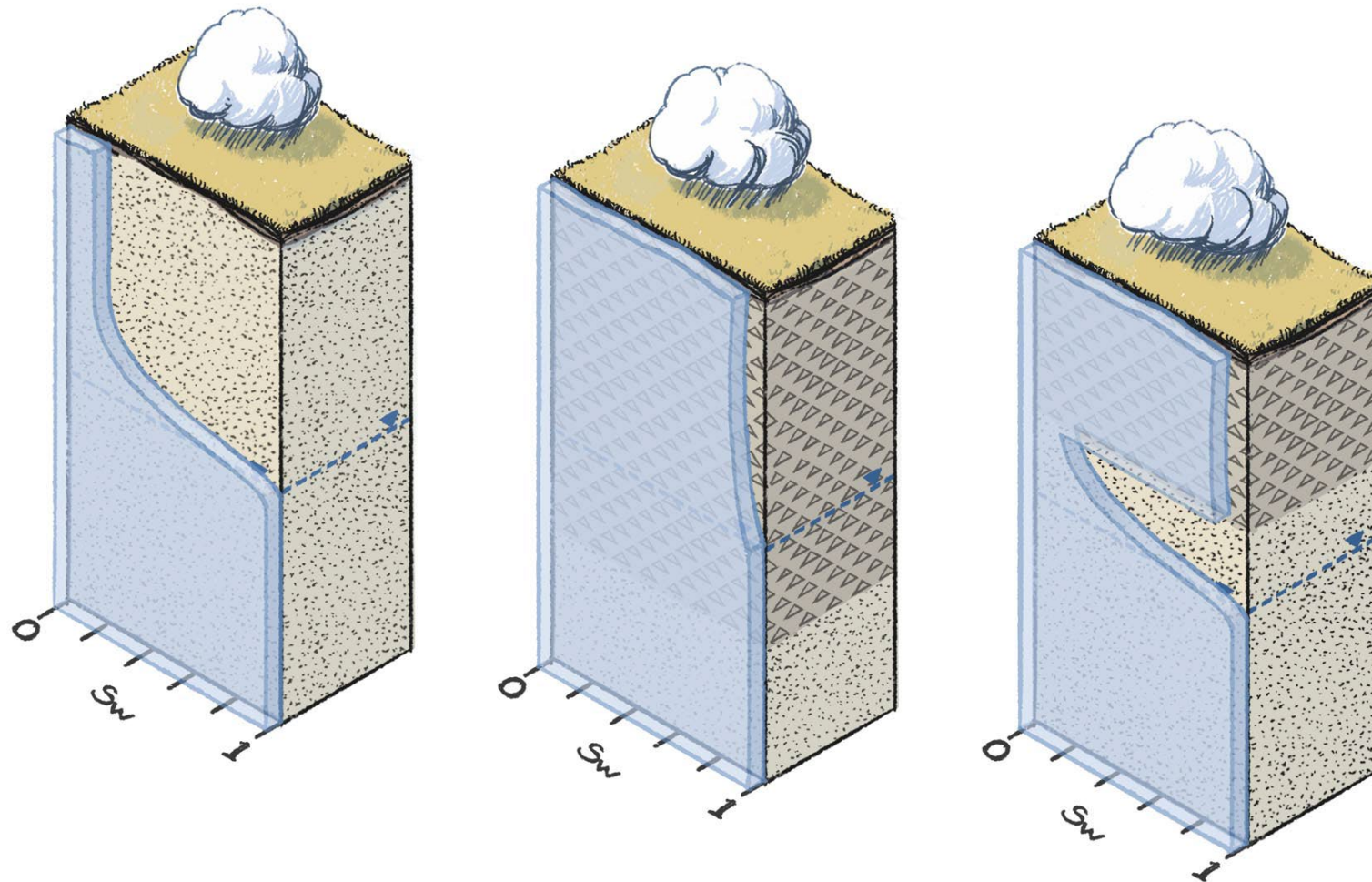


Vandmætningens betydning for transporten

- Vandmætning (S_w) er styrende for A_{ia} og dermed transporten
- S_w afhænger af geologien og infiltrationen
- Vandmætningsfordeling i den umættede zone
 - Kan matematisk beskrives med retentionskurver
 - van Genuchten parametre

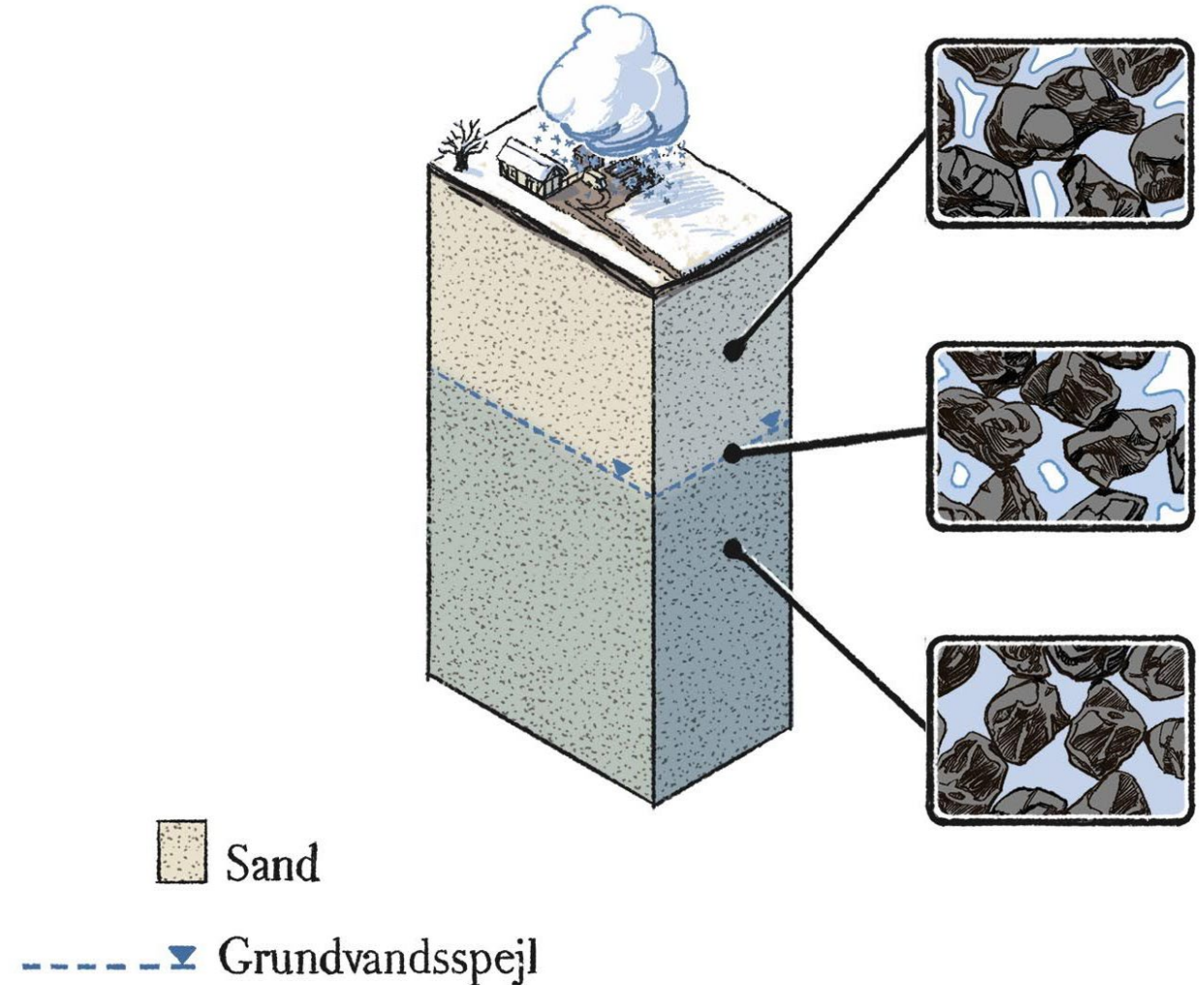


Geologiens påvirkning af vandmætningen



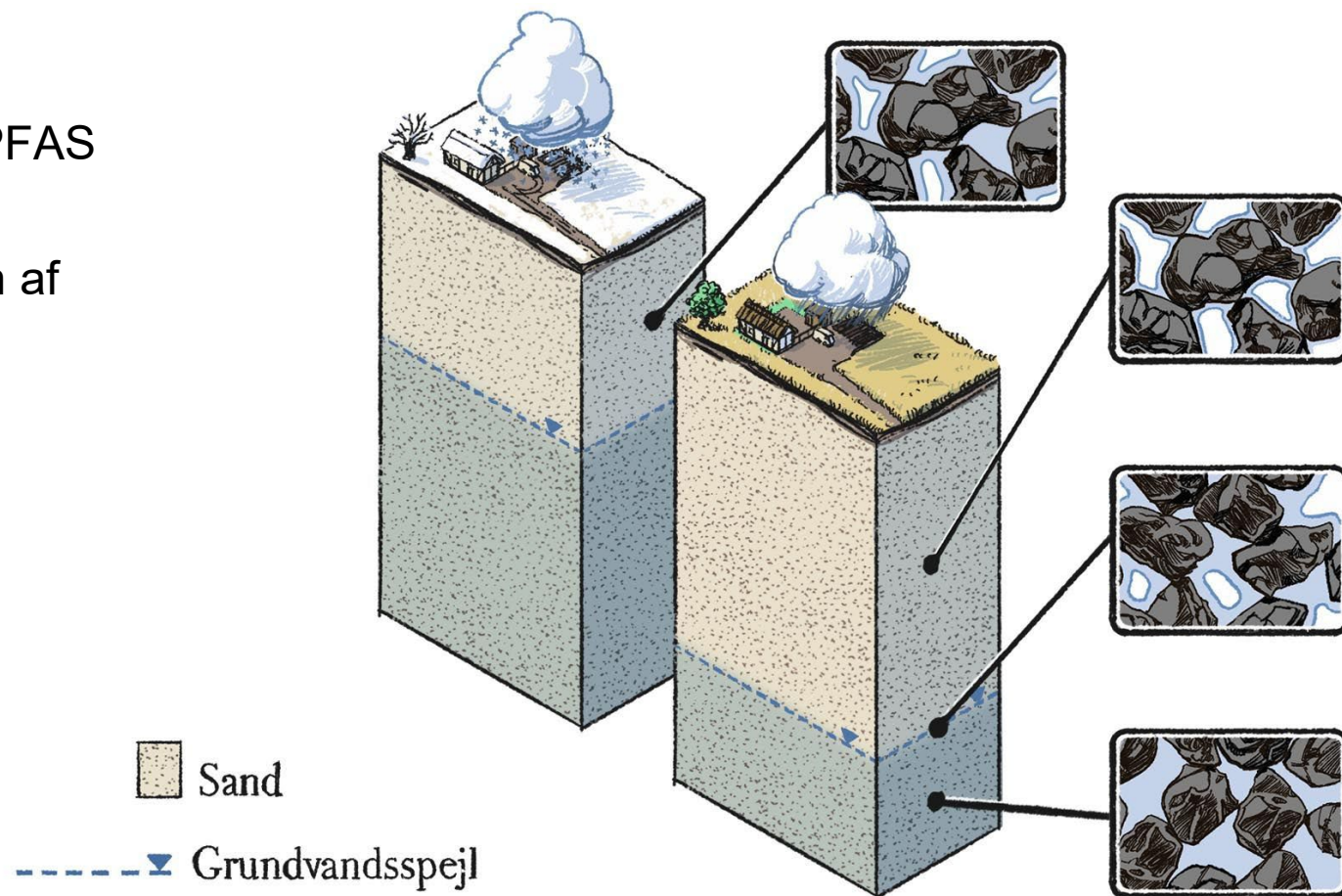
Sæsonvariationers påvirkning af vandmætning

- Typisk højere vandmætning om vinteren og et højere grundvandsspejl
- Mobilisering af langkædede PFAS
- Forventeligt højere koncentrationer af PFAS i porevand udtaget efter en våd periode



Sæsonvariationers påvirkning af vandmætning

- Typisk lav vandmætning om sommeren
- Demobilisering af langkædede PFAS
- Forventeligt lavere koncentration af PFAS i porevand

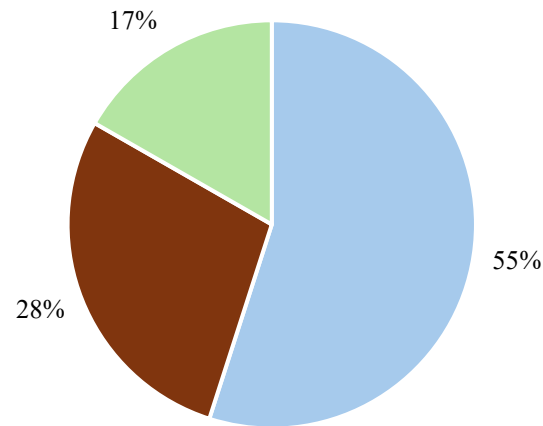
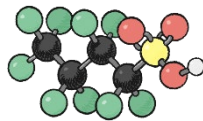


Fasefordeling – konstant vandmætning - sand ($S_w = 60\%$)

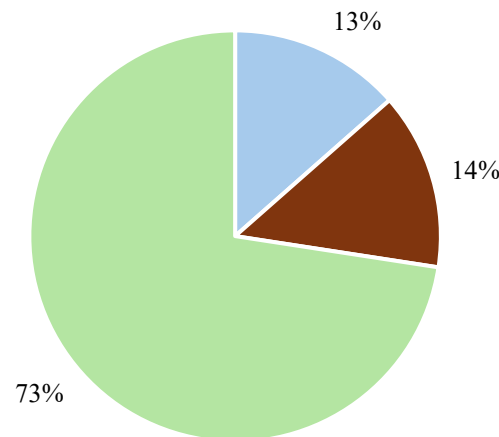
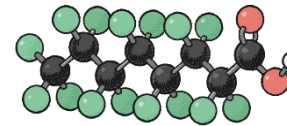
Massens fordeling i procent i sand

- Kortkædede PFAS findes primært i vandet
- Langkædede PFAS findes primært i luft-vand grænsefladen
- PFOS har større affinitet for luft-vand grænsefladen sammenlignet med PFOA

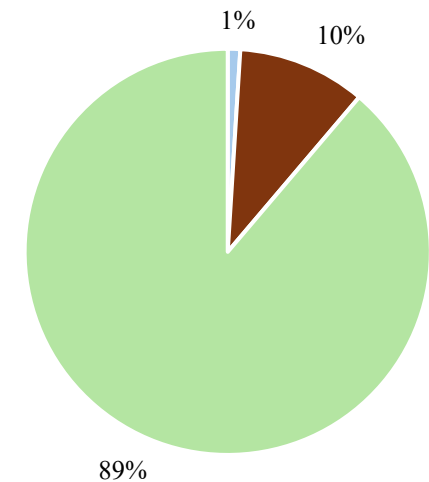
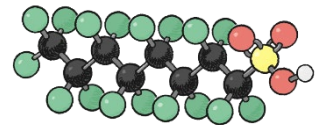
PFBS (C4)



PFOA(C7)



PFOS (C8)



PFAS i vand

PFAS i jord

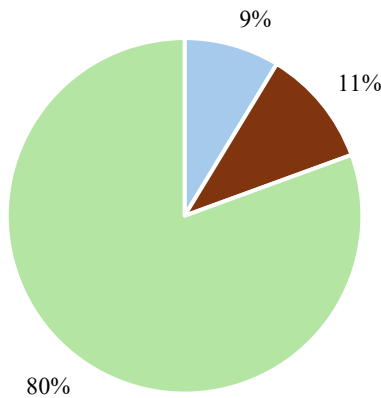
PFAS i luft-vand grænsefladen

PFOA fasefordeling – varierende vandmætning - sand

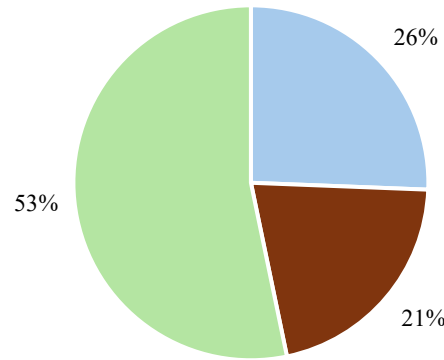
Vandmætningen påvirker koncentrationen i porevandet (samme PFOA masse)

- Ved højere vandmætninger bliver en større del af PFAS massen fordelt i vandfasen
- Koncentrationen i porevandet stiger med stigende vandmætning (kun porevand udtages)
- Koncentration i porevand skal vurderes i forhold til vandmætning ved prøvetagning
- **Effekten er langt størst for langkædede PFAS**

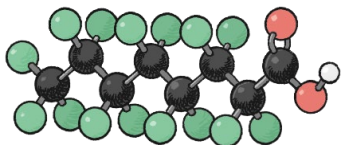
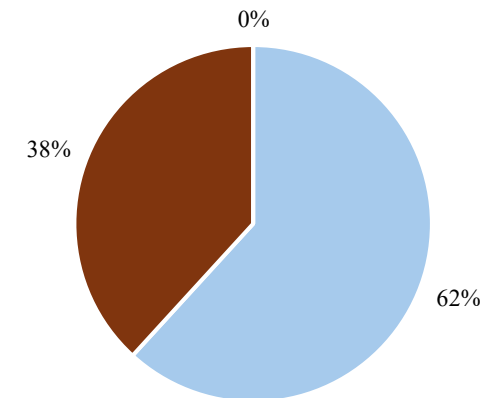
$S_w = 50\%$ $C_w \approx 0.1 \mu\text{g/l}$



$S_w = 75\%$ $C_w \approx 0.2 \mu\text{g/l}$



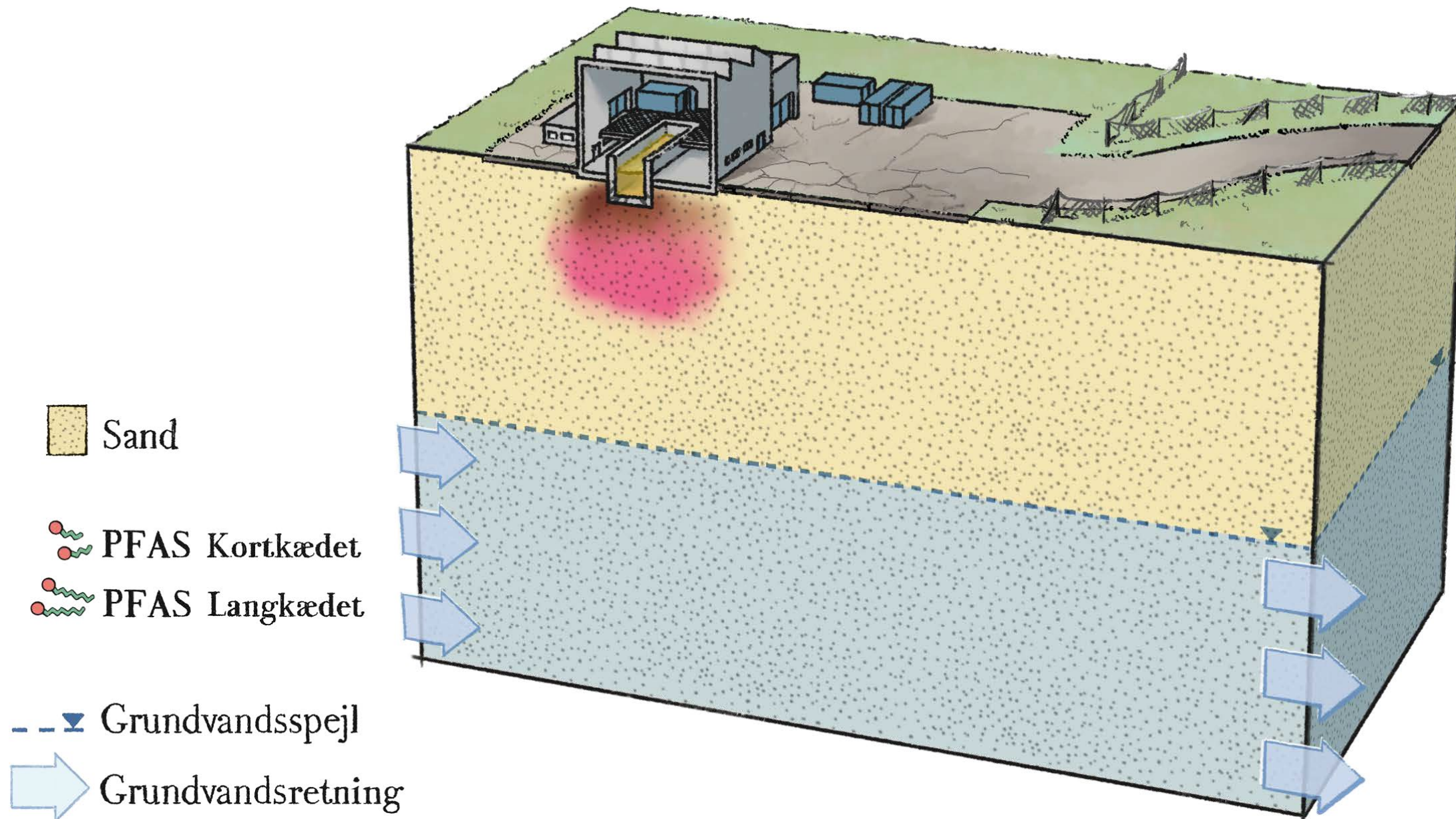
$S_w = 100\%$ $C_w \approx 0.3 \mu\text{g/l}$

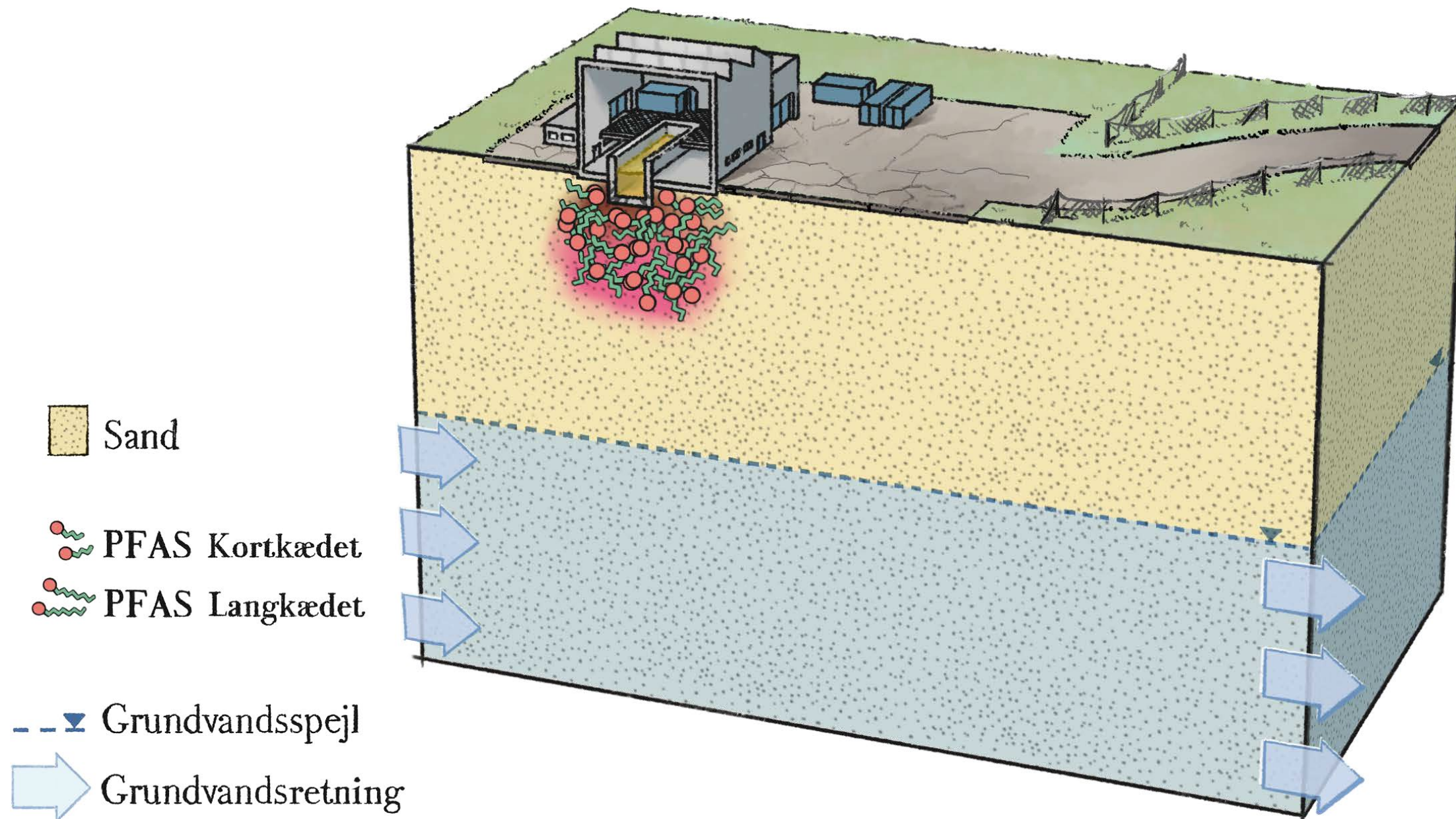


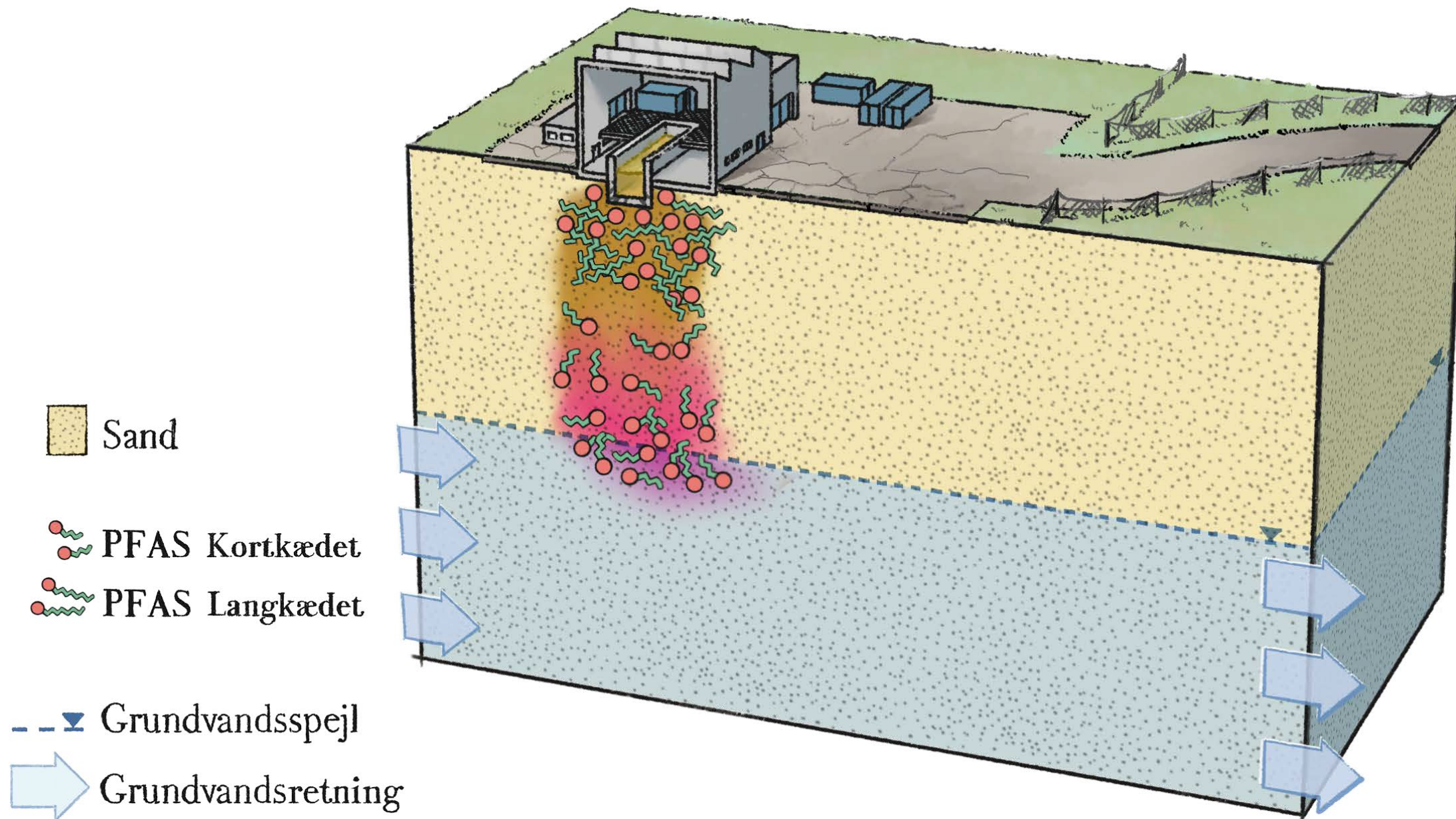
 PFAS i vand

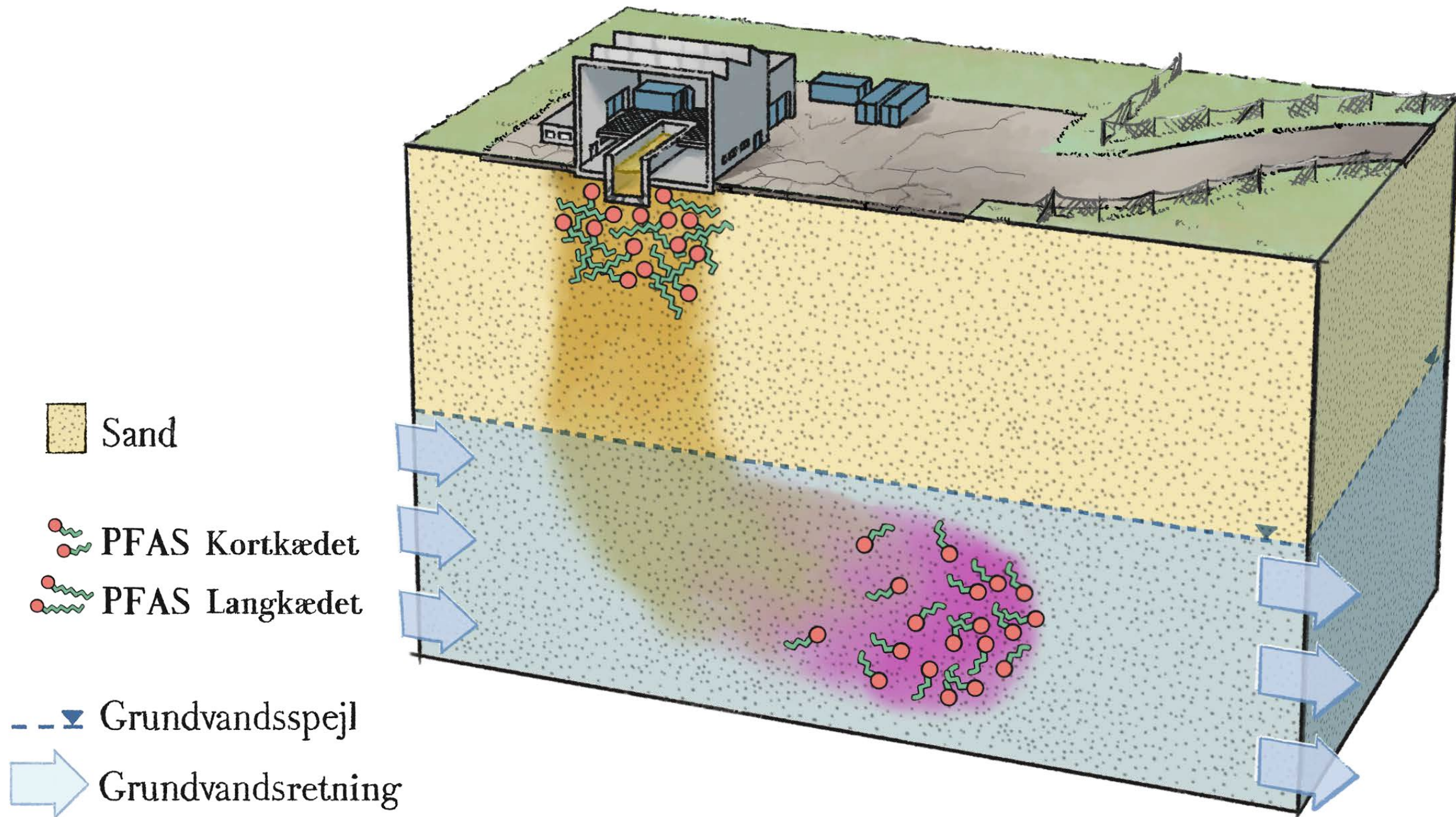
 PFAS i jord

 PFAS i luft-vand grænsefladen









Hvad betyder dette for en forureningsundersøgelse?

PFAS som forurening er mange forskellige stoffer med forskellige egenskaber

- PFAS $\neq$ PFAS,
- Se nøje på hvilke PFAS dominerer i analyser for PFAS-4, PFAS-22

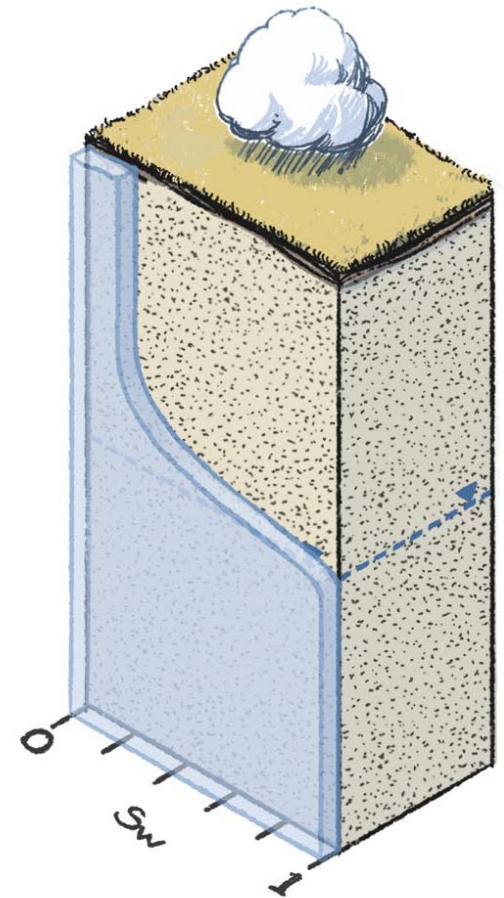
Kritisk at forholde sig til, hvor jord og vandprøver er udtaget

- Dybde – forskellige PFAS er i forskellige dybder
- Type af jord – muld – dybere jordlag - grundvand
- Vandindhold – tørstofindhold i jordprøven

Hvilke risiko skal vurderes?

- Kontaktrisiko?
- Grundvandsrisiko?

Overvej valg af prøvetype ud fra formålet med risikovurderingen



Opsummering

- Langkædede PFAS er overfladeaktive og dominerer i den umættede zone grundet sorption til luft-vand grænsefladen.
- Kortkædede PFAS er (meget) mobile i jord og grundvand
- Luft-vand grænsefladearealet påvirkes direkte af vandmætningen i den umættede zone
- Vandindhold påvirker PFAS i porevand
- PFAS forureningsfaner er karakteriseret ved stofkromatografering
 - Fluktuerende grundvandsspejl og varierende vandindhold
 - Sprækketransport og matrixdiffusion i ler/kalkmatricer

Vigtigt at overveje ved forureningsundersøgelser

Konceptuel model for transport og skæbne af PFAS ved forurenede grunde

Miljøprojekt nr. 2286

Januar 2025

PFAS Center projekt
Region Hovedstaden

- PFAS processer og parametre
- PFAS fluxe i jord og grundvand
- Felt- og laboratorieundersøgelser
- Numerisk modellering

Mere information og litteratur (I)

- Morsing, L.; Tsitonaki, K.; Dyreborg, S.; Mosthaf, K.; Fjordbøge, A. S.; Hjorth, R.; Jensen, B.; Baun, A.; Bjerg, P. L. (2025): Konceptuel model for transport og skæbne af PFAS ved forurenede grunde, Projektrapport for Videnstaskforcen for PFAS- forurening. **Miljøprojekt 2286**. Miljøstyrelsen, Odense, Danmark.
- Morsing, L., & Petersen, T. E. L. (2024). Assessment of parameters for transport and distribution of PFAS in the unsaturated and saturated zone of a sandy aquifer. Master Thesis. DTU Sustain. Technical University of Denmark.

Konceptuel model
for transport og
skæbne af PFAS ved
forurenede grunde

Miljøprojekt nr. 2286

Januar 2025

Tak for opmærksomheden



Morsing og Petersen (2024) <https://panopto.dtu.dk/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=f58eec28-d65f-4d7a-a1bd-b273005fd282>

Mere information og litteratur (II)

- Zeng, J., Brusseau, M. L., & Guo, B. (2024). Modeling PFAS Subsurface Transport in the Presence of Groundwater Table Fluctuations: The Impact on Source-Zone Leaching and Exploration of Model Simplifications. *Water Resources Research*, 60(11). <https://doi.org/10.1029/2024WR037707>
- Divine, C., Hasbrouck, K., Guo, B., Brusseau, M., Zeng, J., Wright, J., Fortner, E., Chapman, S., Munn, J., Parker, B., & Packer, B. (2024). Dynamic Storage, Release, and Enrichment of some Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Groundwater Table Fluctuation Zone: Transport Processes Requiring Further Consideration. *Groundwater Monitoring and Remediation*. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12694>

**Konceptuel model
for transport og
skæbne af PFAS ved
forurenede grunde**

Miljøprojekt nr. 2286

Januar 2025



Morsing og Petersen (2024) <https://panopto.dtu.dk/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=f58eec28-d65f-4d7a-a1bd-b273005fd282>

Dybde af umættet zone har stor betydning

Vandmætning styrer transport af langkædede PFAS

