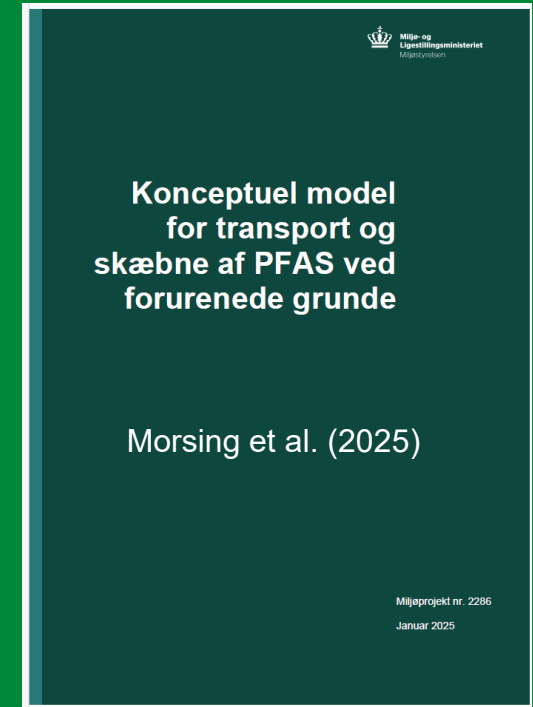


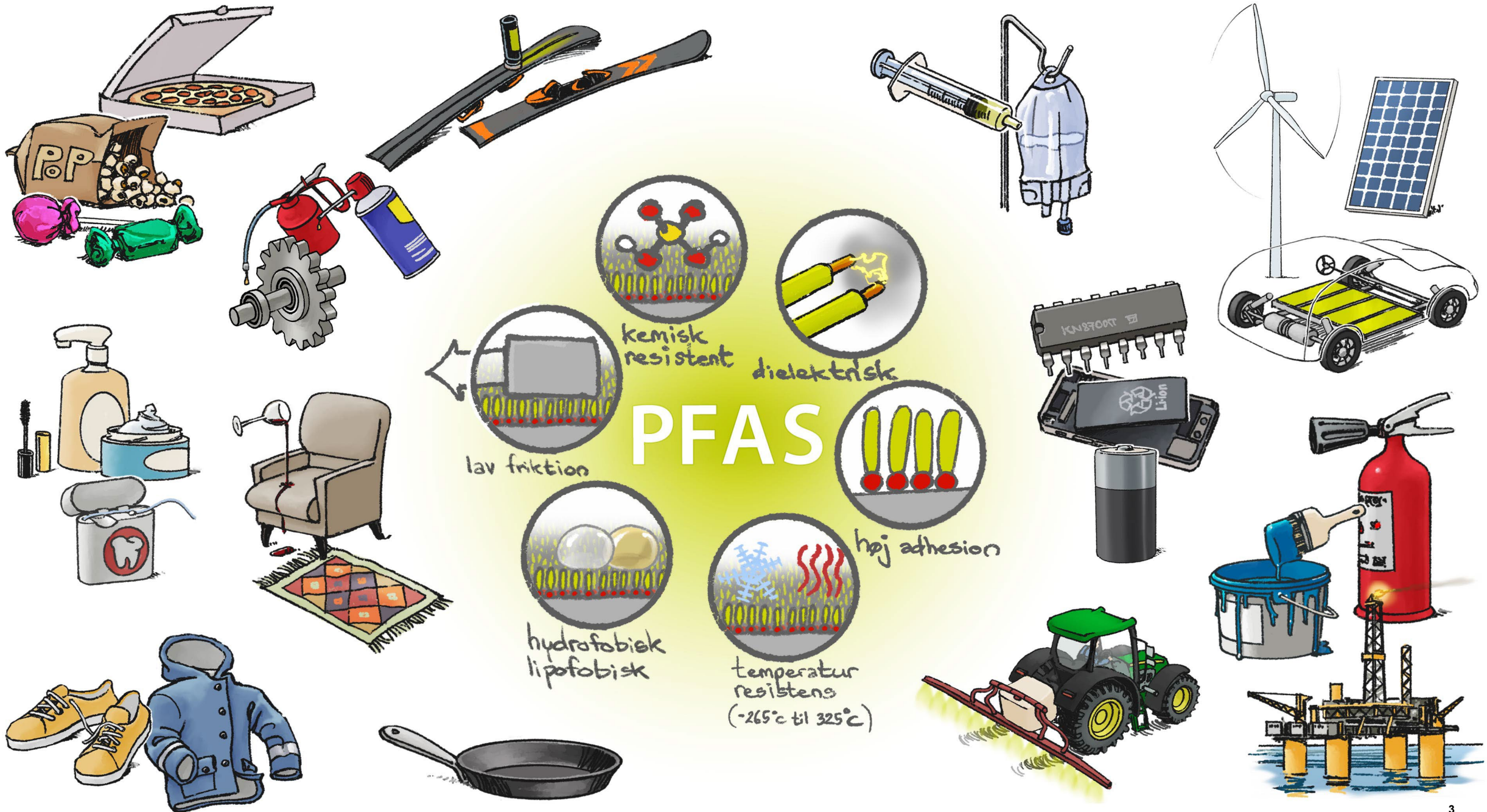
DTU

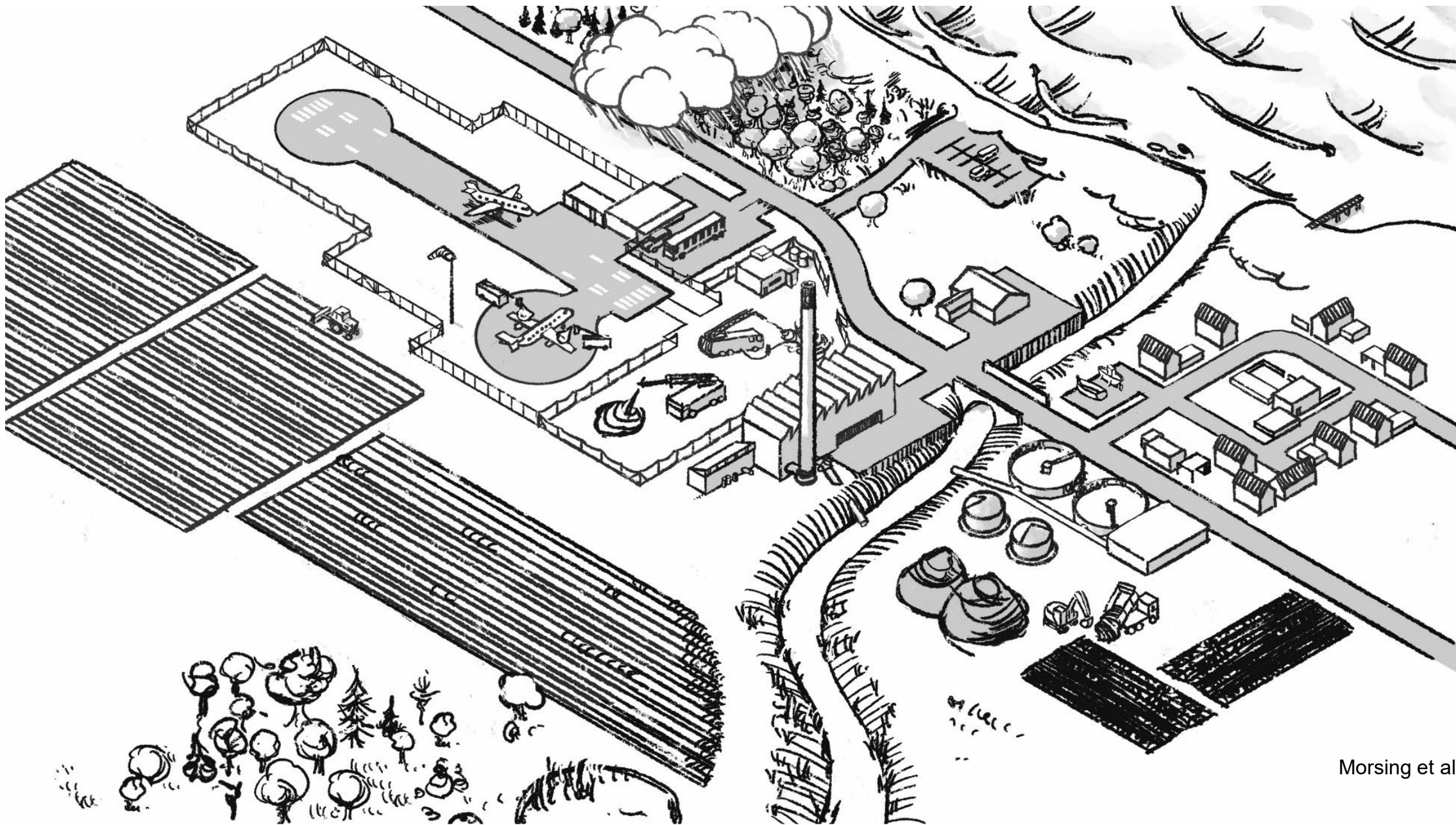


Konceptuelle modeller, processer og parametre for PFAS ved forurenede grunde

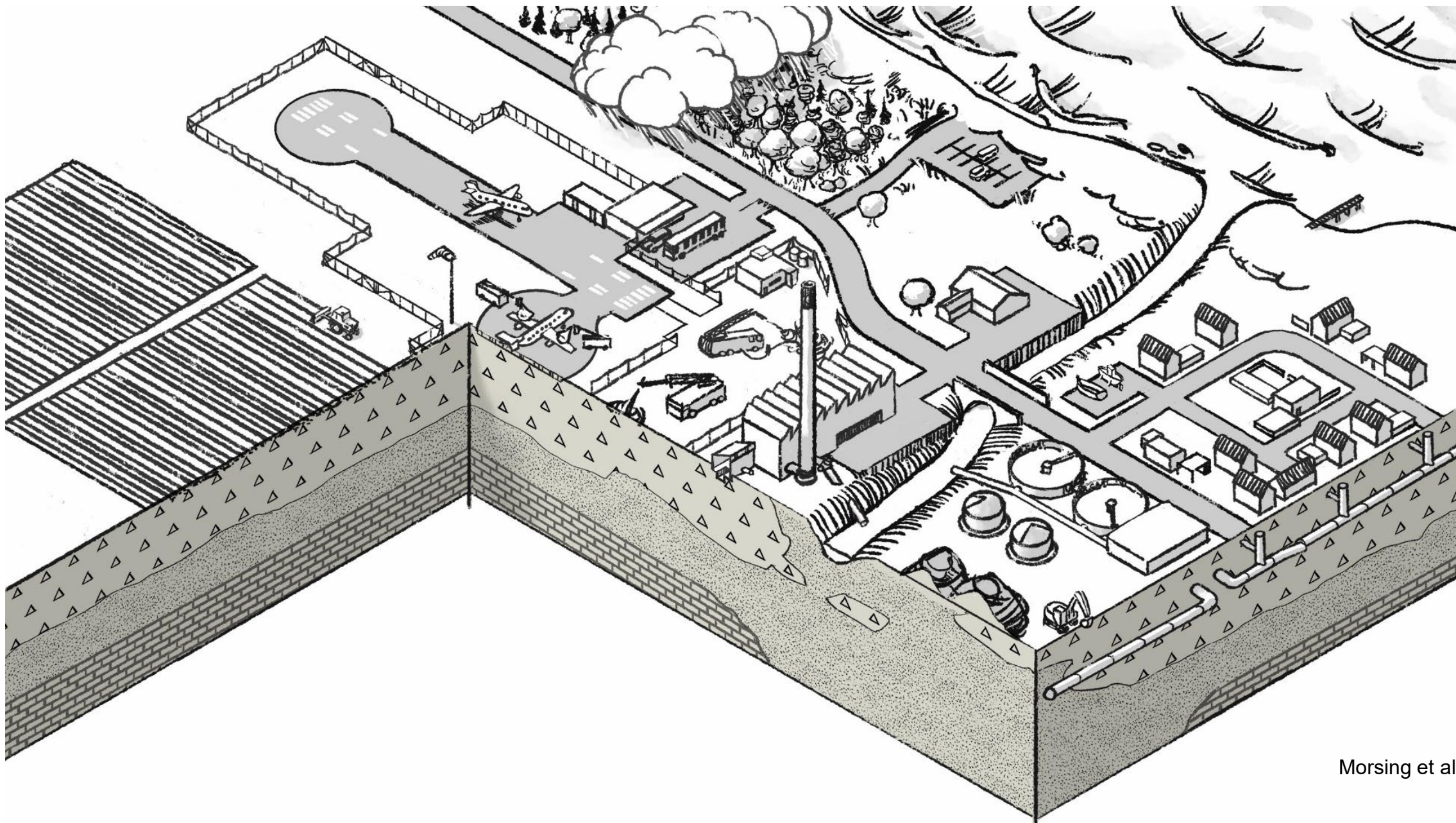


Poul L. Bjerg, **Laura Morsing**, Katerina Tsitonaki, Søren Dyreborg, Klaus Mosthaf, Annika S. Fjordbøge, Rune Hjorth, Bolette B. Jensen, og Anders Baun

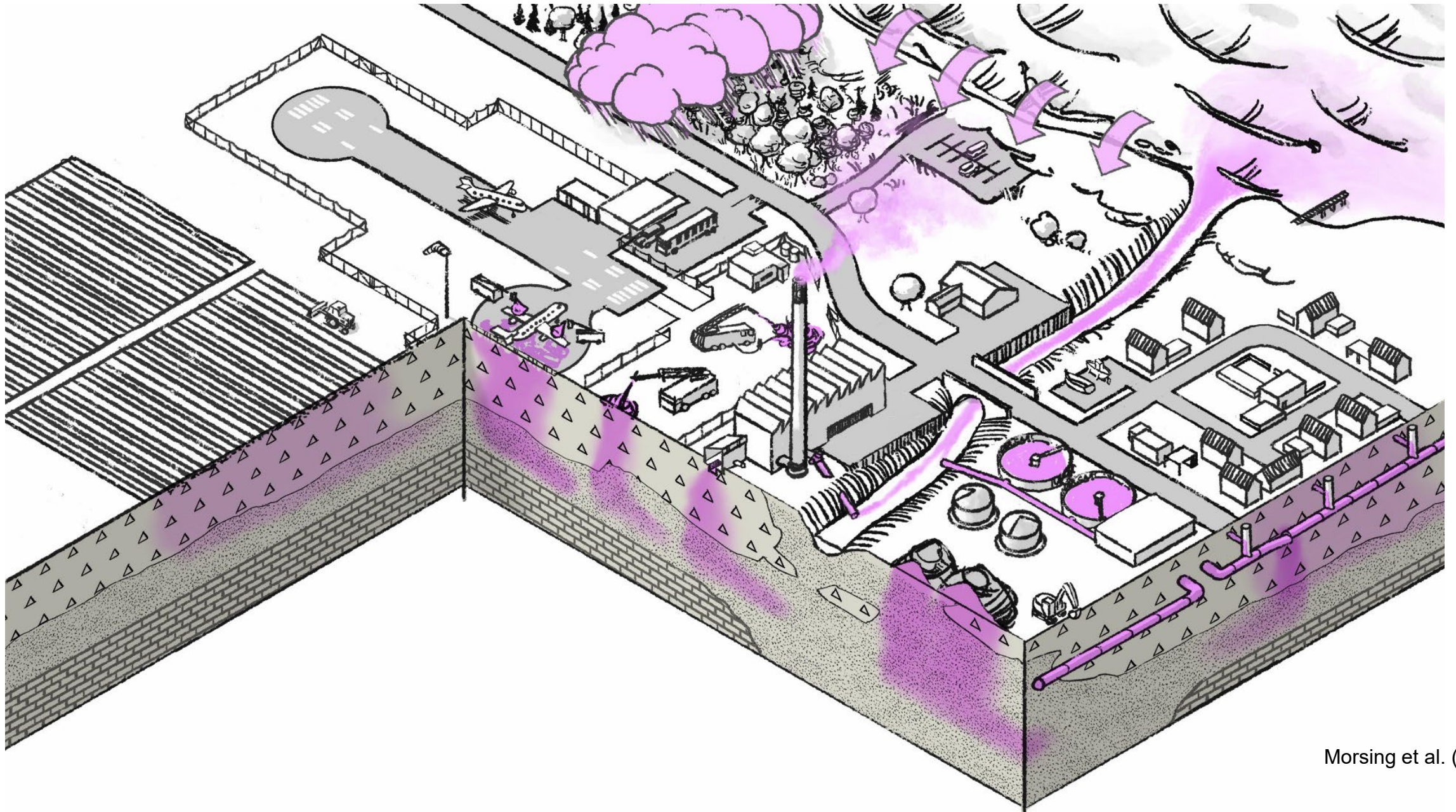




Morsing et al. (2025)

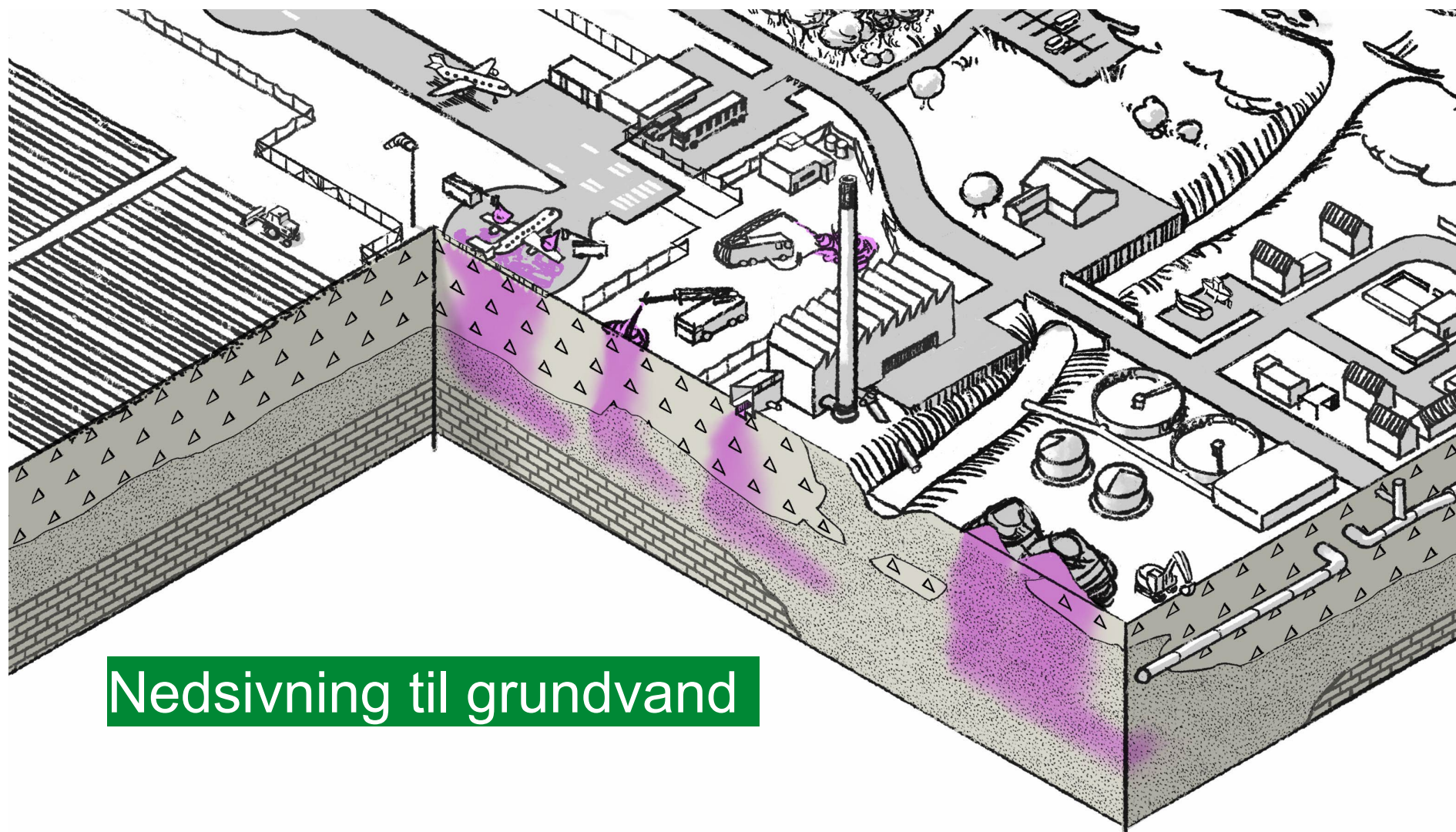


Morsing et al. (2025)

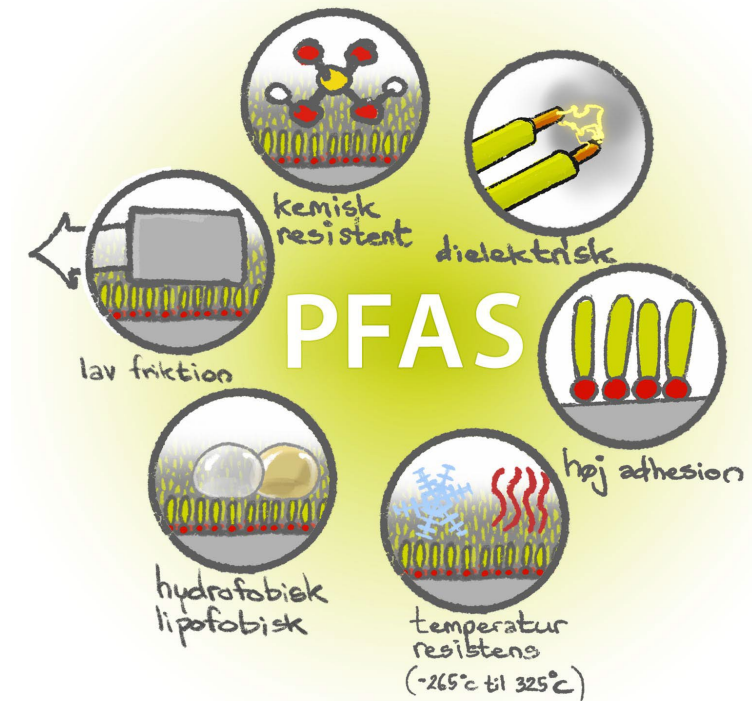


Morsing et al. (2025)

PFAS forurenede grunde i Danmark



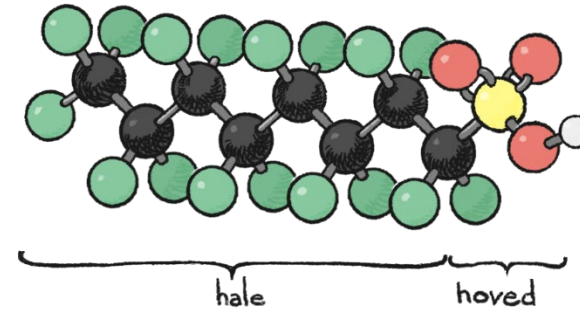
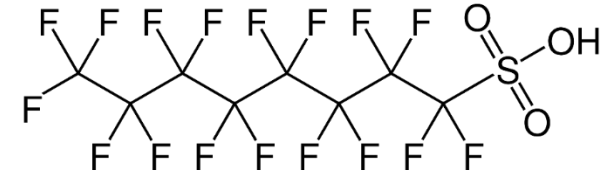
PFAS egenskaber – den simple version



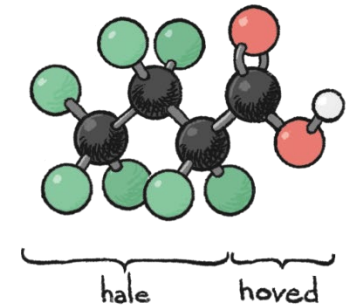
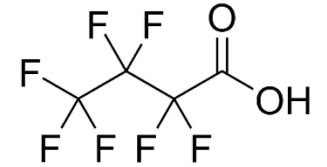
Perfluorerede sulfonsyrer

Perfluorerede carboxylsyrer

PFOS



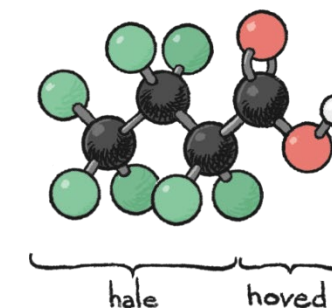
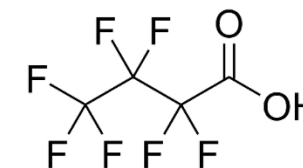
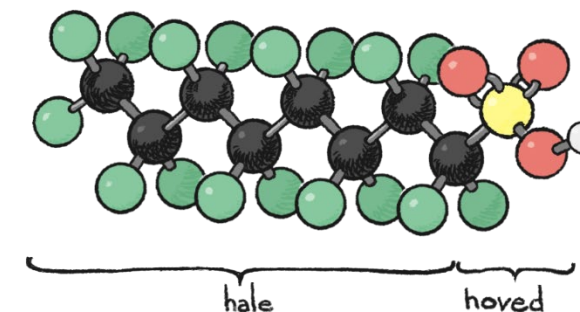
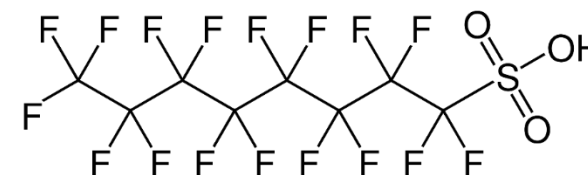
PFBA



Morsing et al. (2025)

Husk PFAS $\neq$ PFAS

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



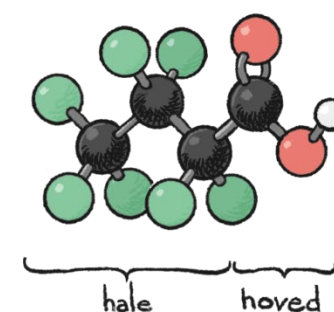
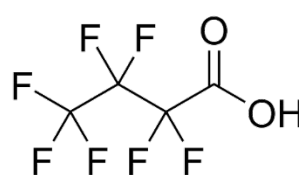
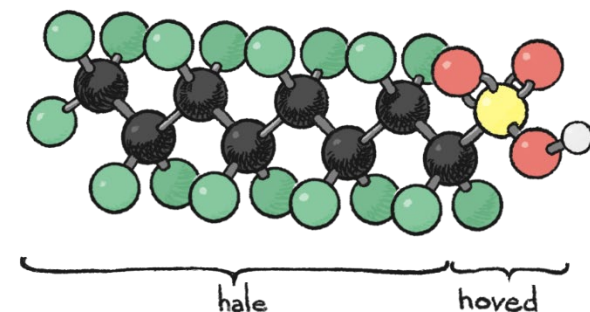
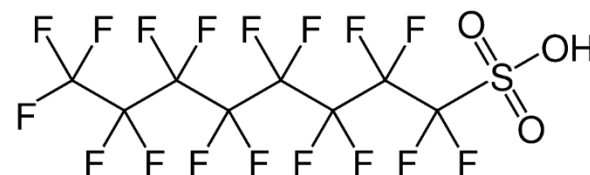
Morsing et al. (2025)

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

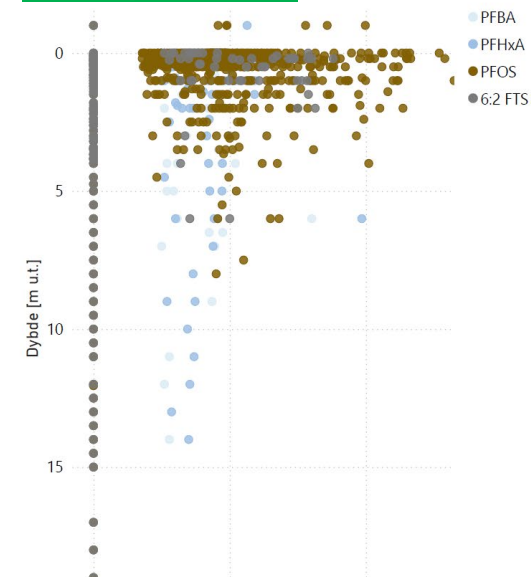


PFAS fund fra forureningsundersøgelser

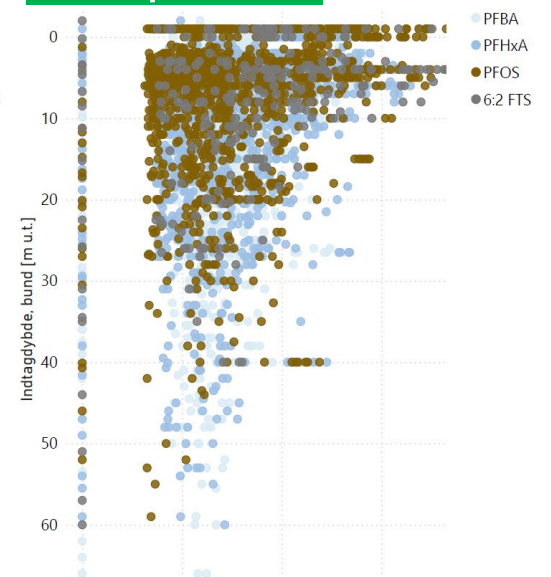
- Størstedelen af PFAS massen findes i de øverste ca. 10 meter
- Kortkædede PFAS træffes ofte dybere end langkædede PFAS
- I jord detekteres PFOA og PFOS hyppigt
- I grundvand detekteres både kortkædede og langkædede PFAS
- **Svært at udlede noget generelt for enkeltstoffer**
- **Mange fine cases i litteraturgennemgangen**

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

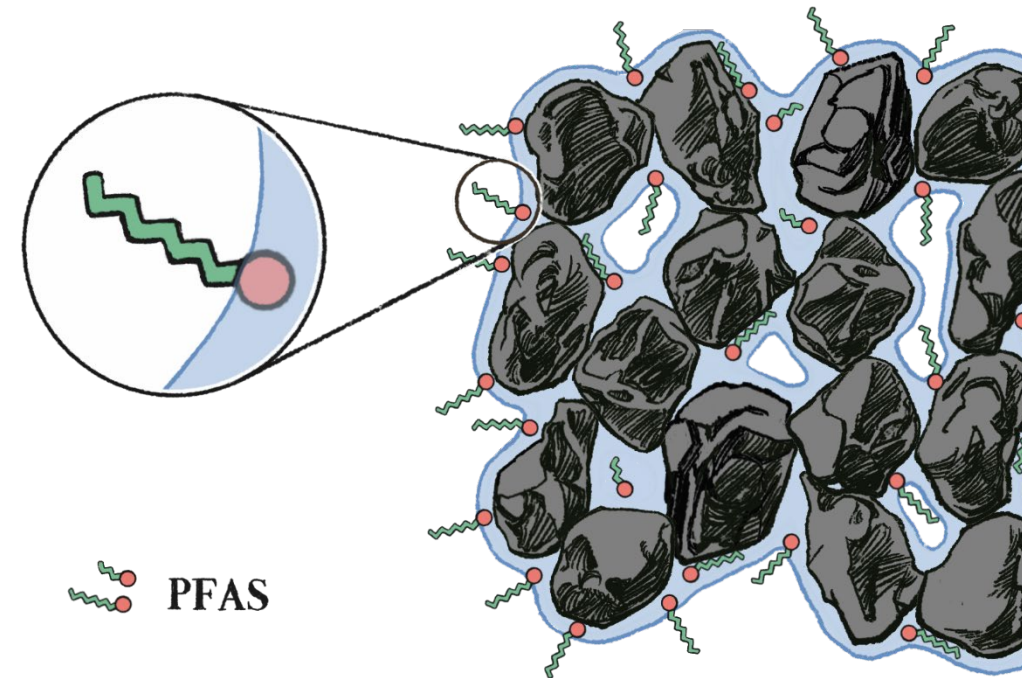


Hvad gør PFAS særlige?

Bindingsmekanismer:

- Sorption til jord og til luft-vand grænsefladen

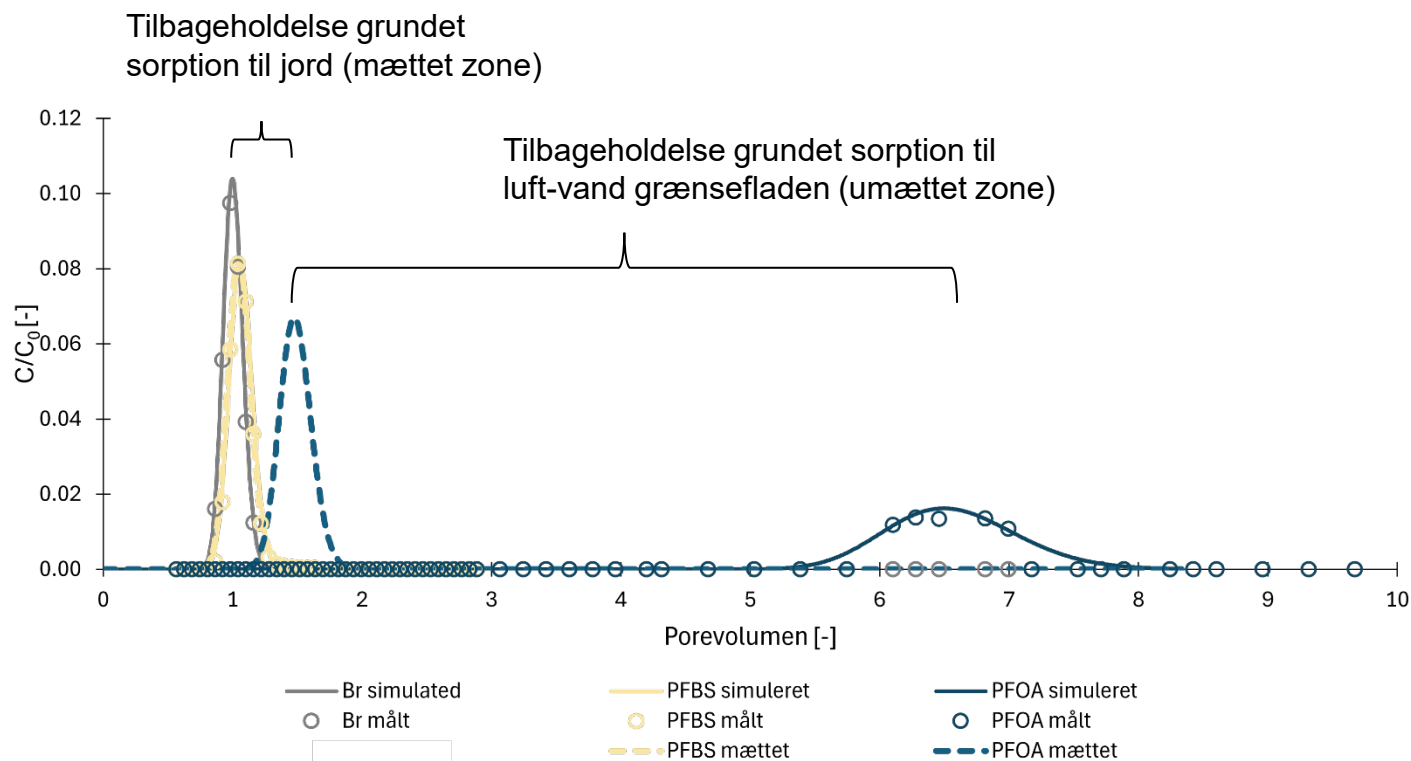
Laura Morsing og Therese Petersen (2024)



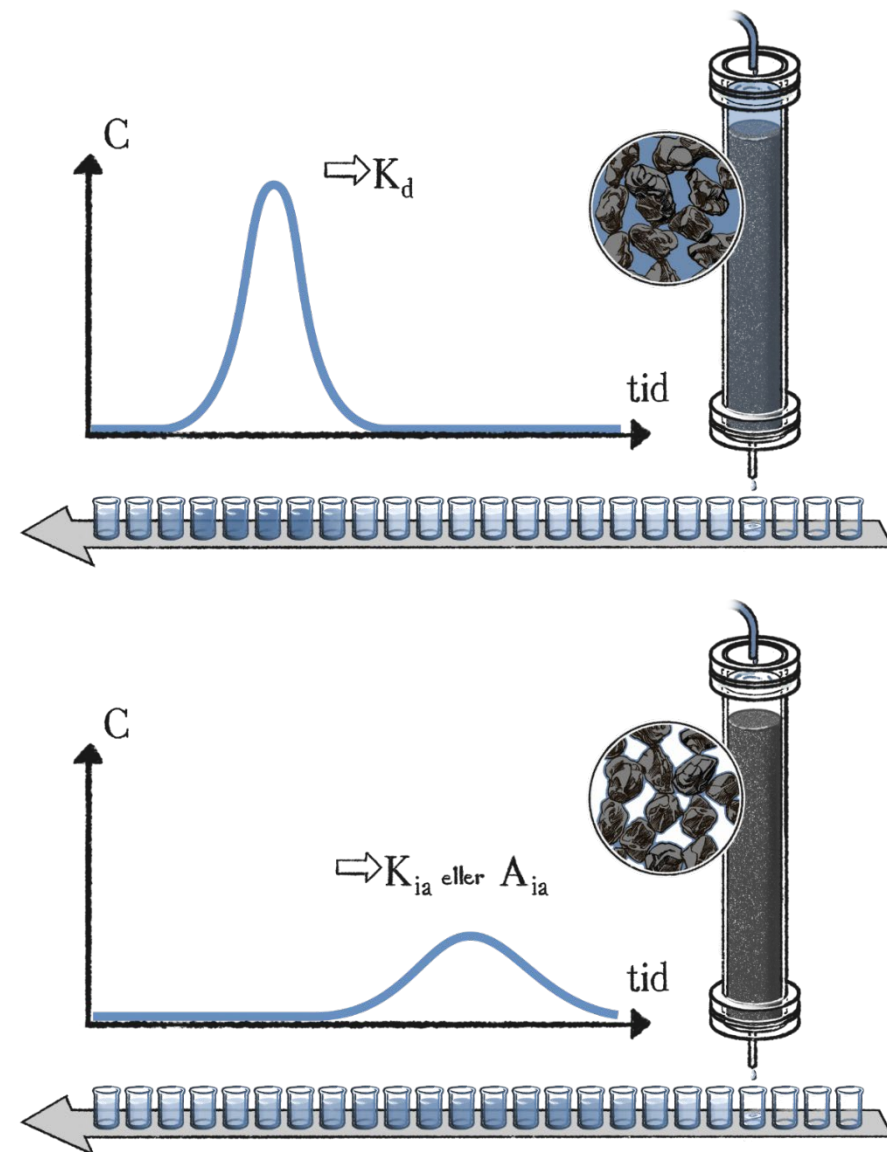
Hvad gør PFAS særlige?

Bindingsmekanismer:

- Sorption til jord og til luft-vand grænsefladen



Morsing & Petersen (2024)

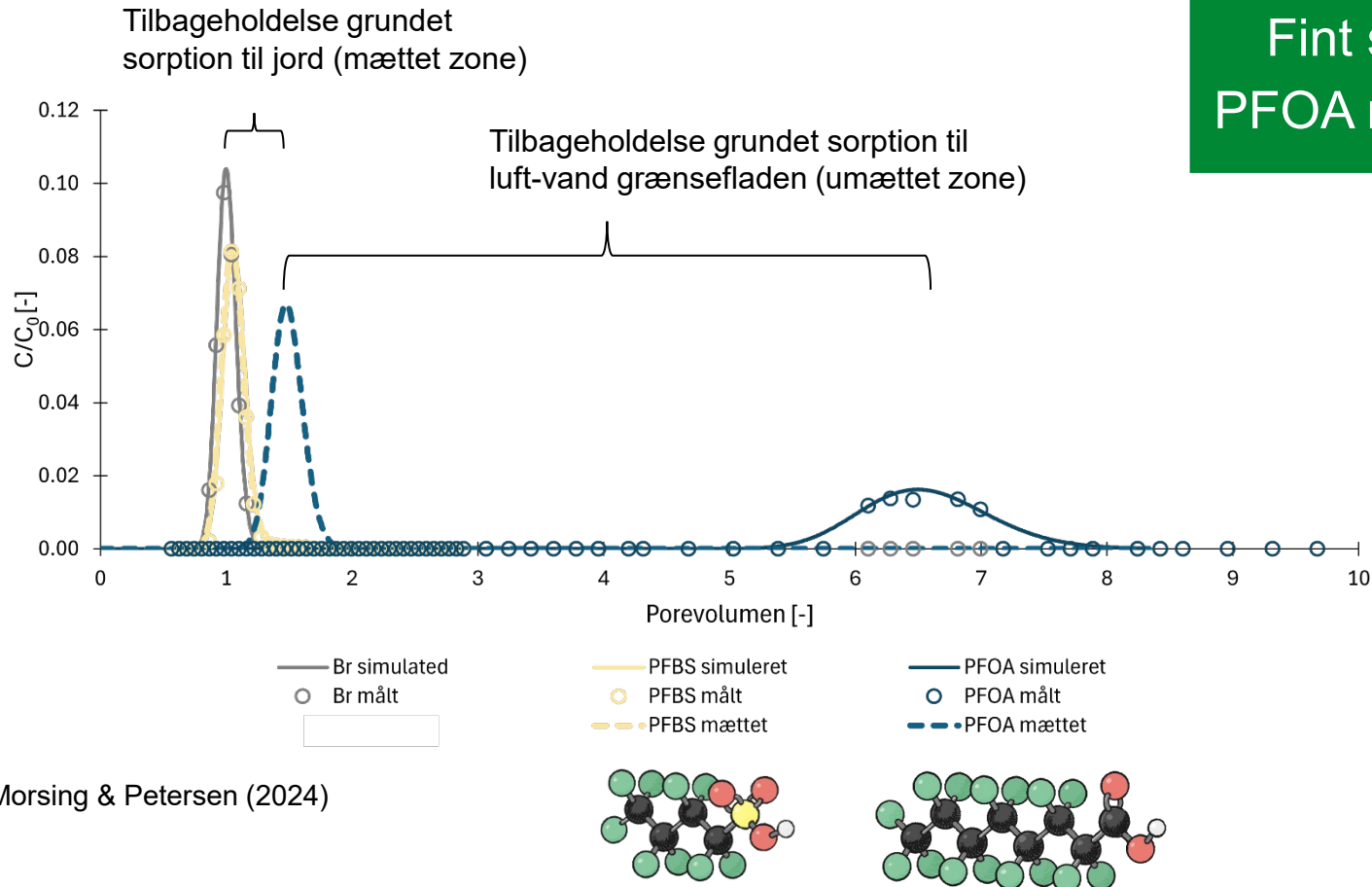


Morsing et al. (2025)

Hvad gør PFAS særlige?

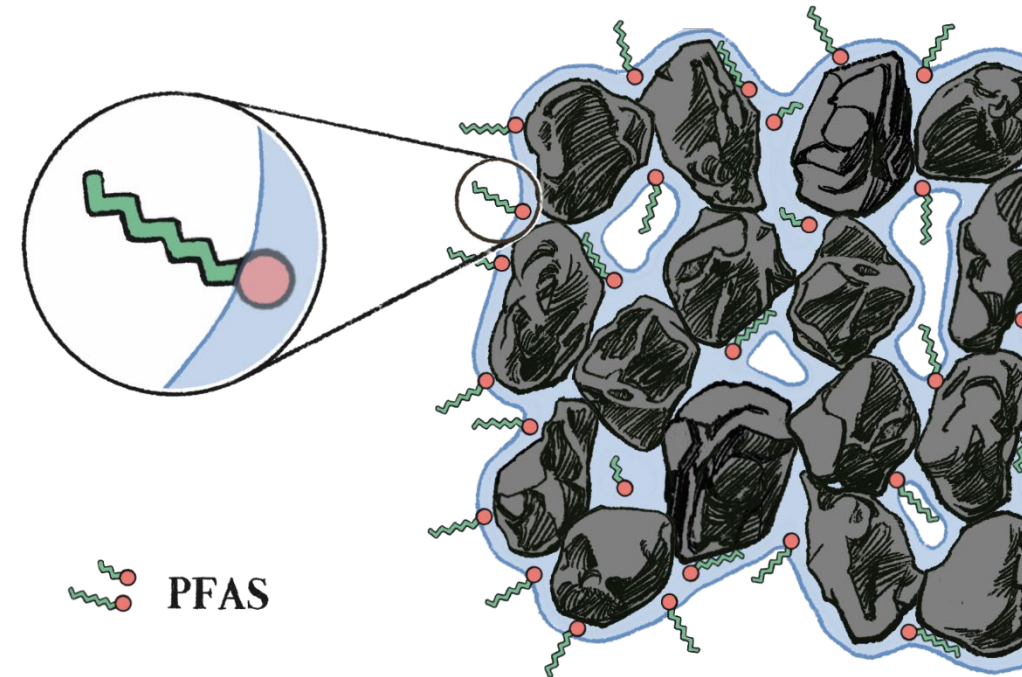
Bindingsmekanismer:

- Sorption til jord og til luft-vand grænsefladen



Morsing & Petersen (2024)

Fint sand: Kortkædede PFAS $\approx$ tracer
PFOA retention øges x 5 ved umættede forhold



Styrende processer og betydende parametre

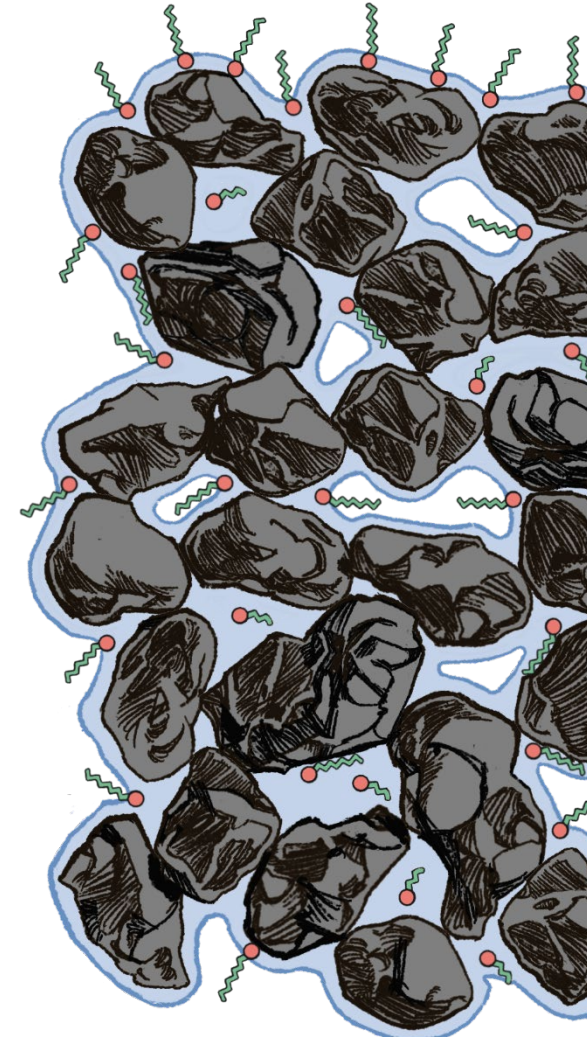
Sorption til jord



Retardationsfaktor

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

- $K_{ia} \rightarrow$ Sorptionskoefficient til luft-vand grænsefladen (cm)
- $A_{ia} \rightarrow$ Luft-vand grænsefladearealet (cm^{-1})
- $K_d \rightarrow$ Fordelingskoefficient til jord (l/kg)
- $\theta_w \rightarrow$ Vandindhold (-)
- $\rho_b \rightarrow$ Rumvægt - bulk density (kg/l)



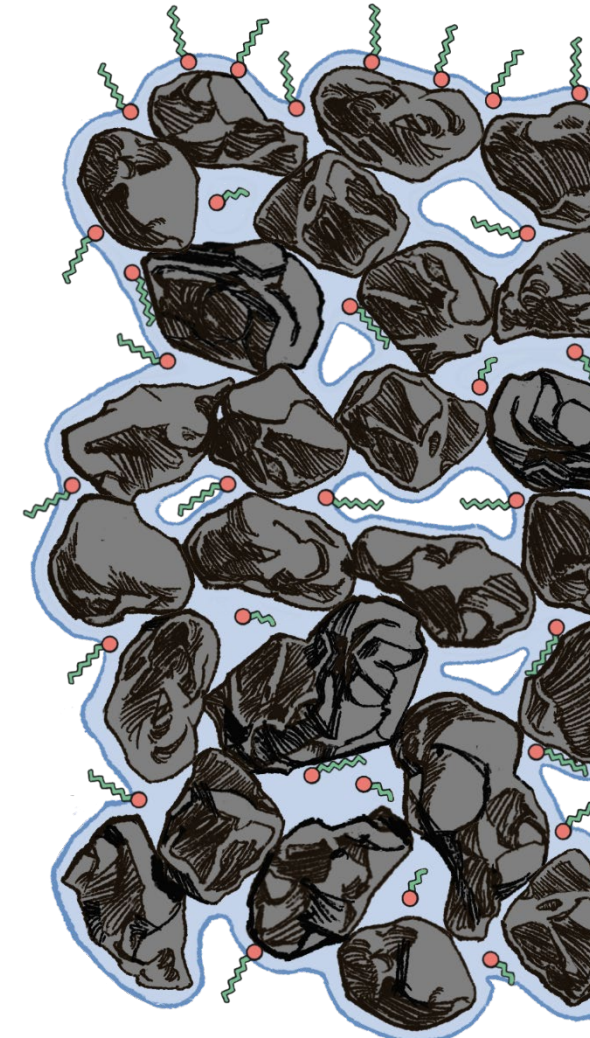
Styrende processer og betydende parametre

Retardationsfaktor

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

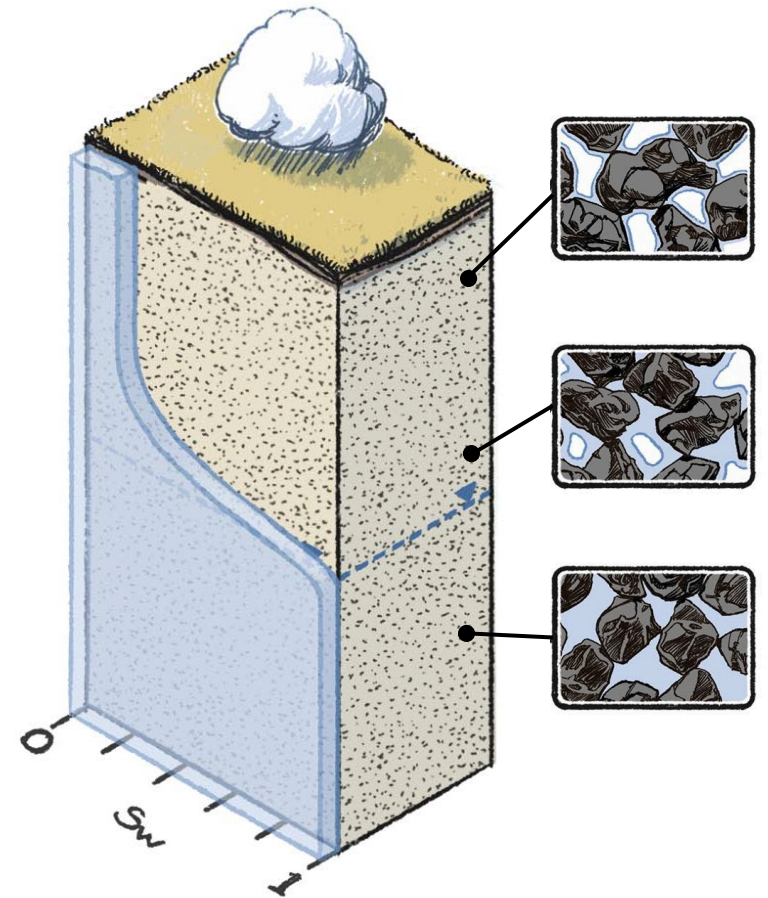
Sorption til jord (points to $K_d \cdot \rho_b$)
Adsorption til luft-vand grænsefladen (points to $K_{ia} \cdot A_{ia}$)
Relevant for langkædede (points to the second term)

- 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)

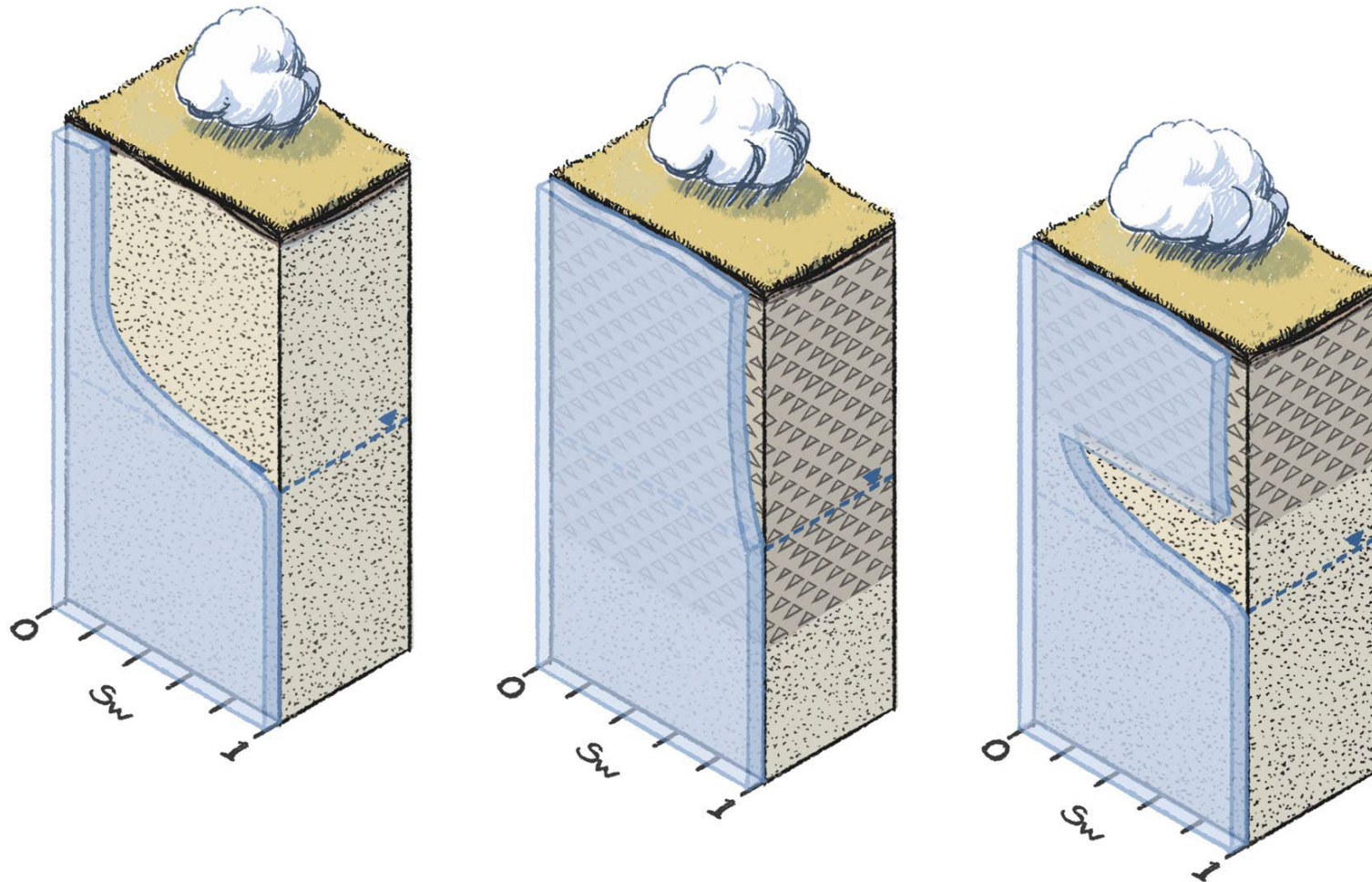


Vandmætningens betydning for transporten

- 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

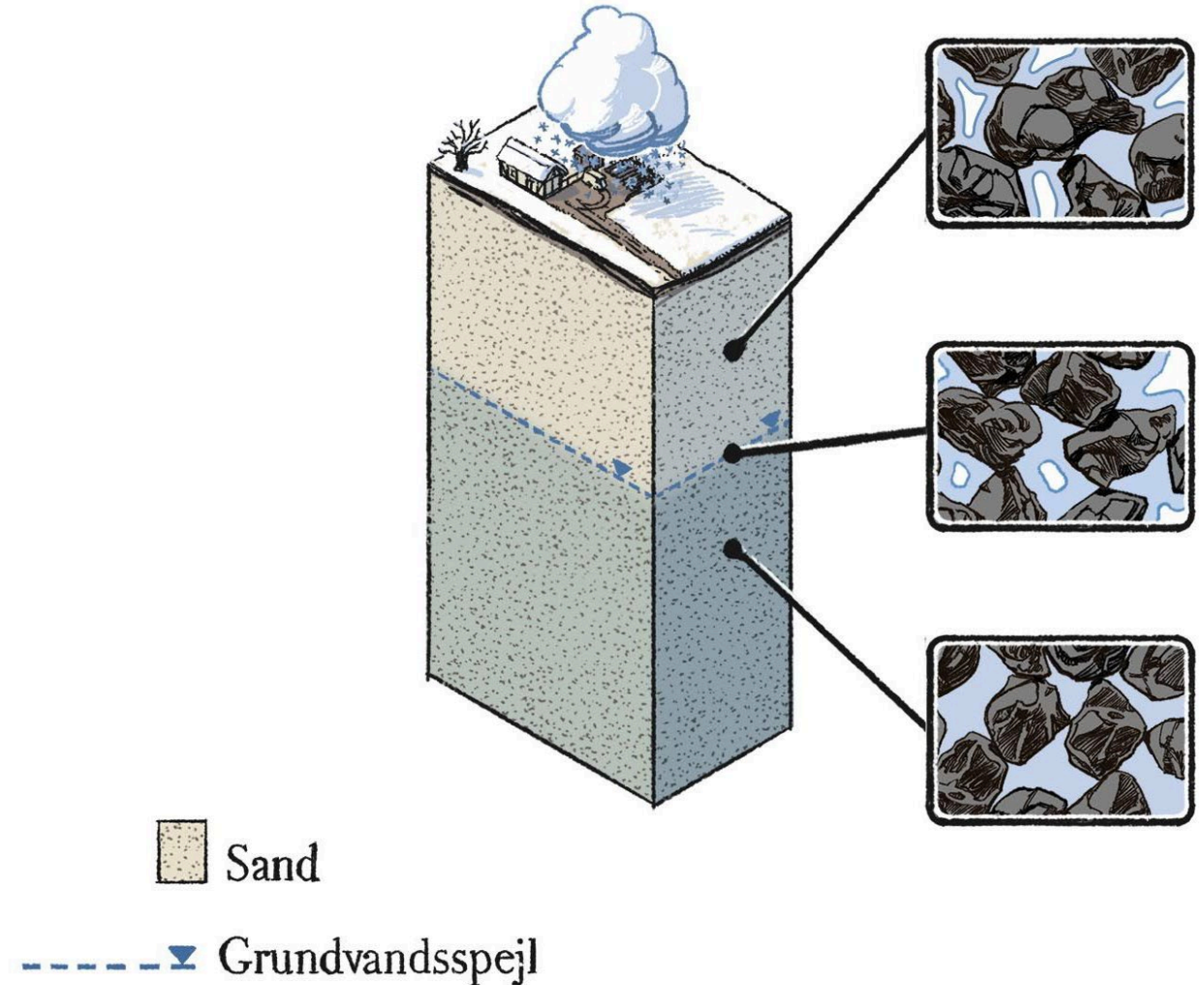


Geologiens påvirkning af vandmætningen



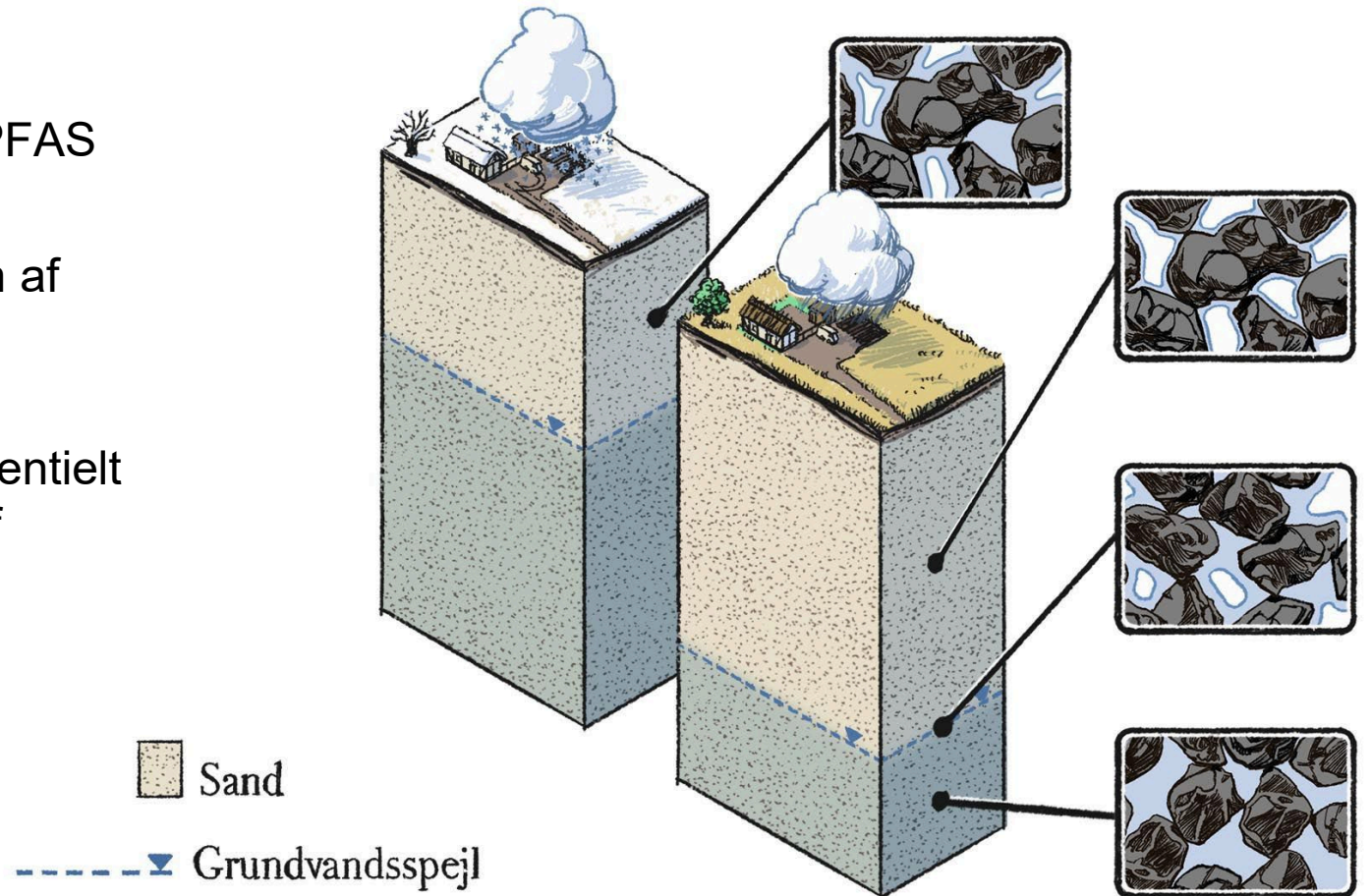
Sæsonvariationers påvirkning

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



Sæsonvariationers påvirkning

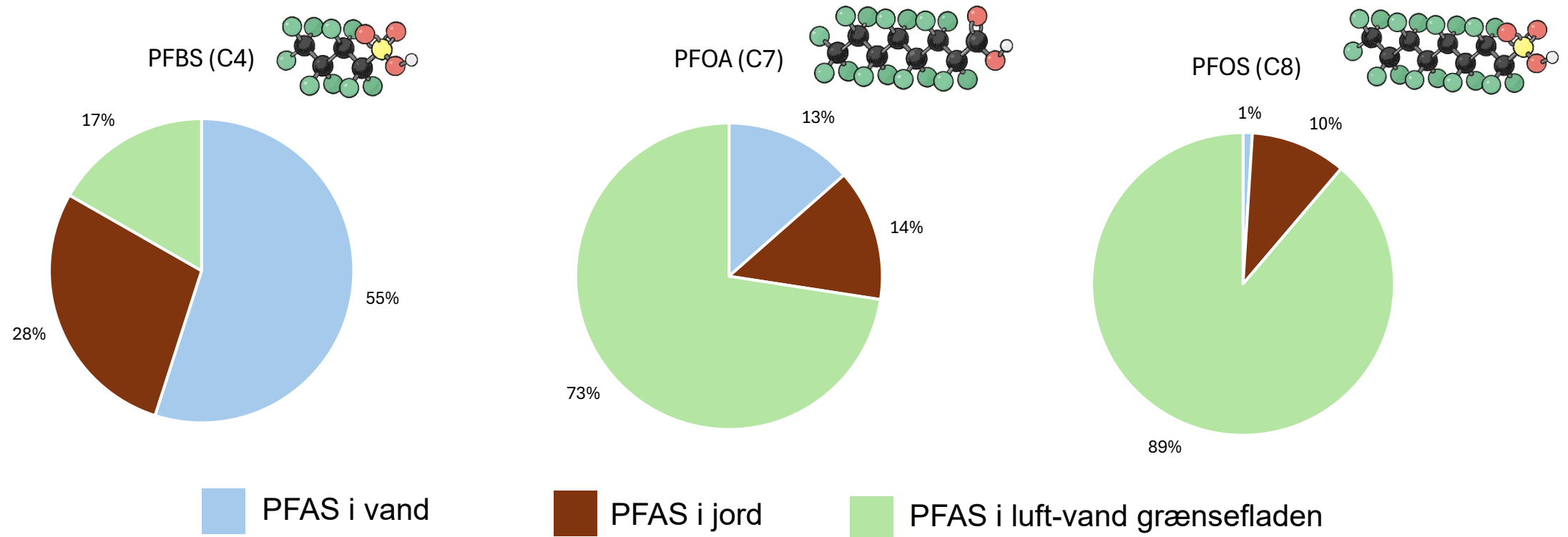
- Typisk lav vandmætning om sommeren
- Demobilisering af langkædede PFAS
- Forventeligt lavere koncentration af PFAS i porevand
- Grundvandsfluktuationer har potentielt en indflydelse på spredningen af PFAS i frie magasiner



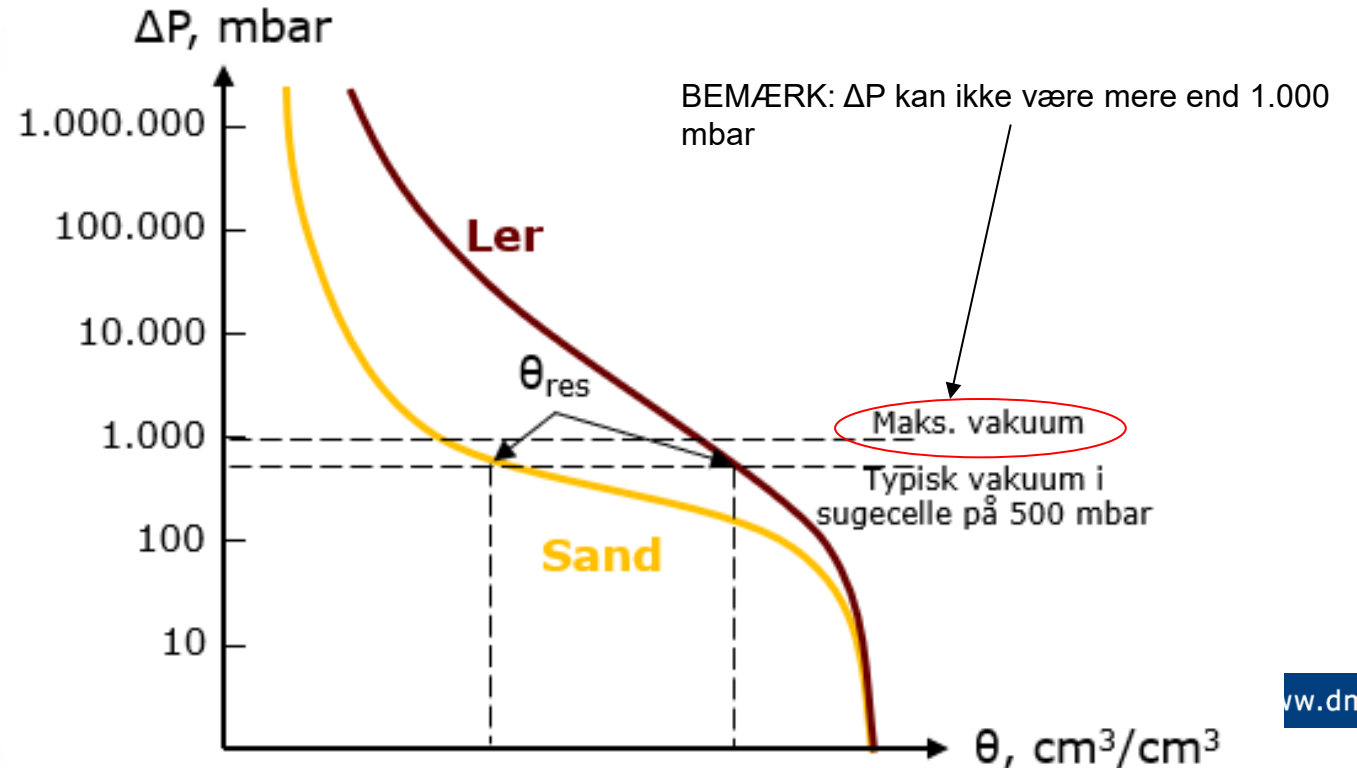
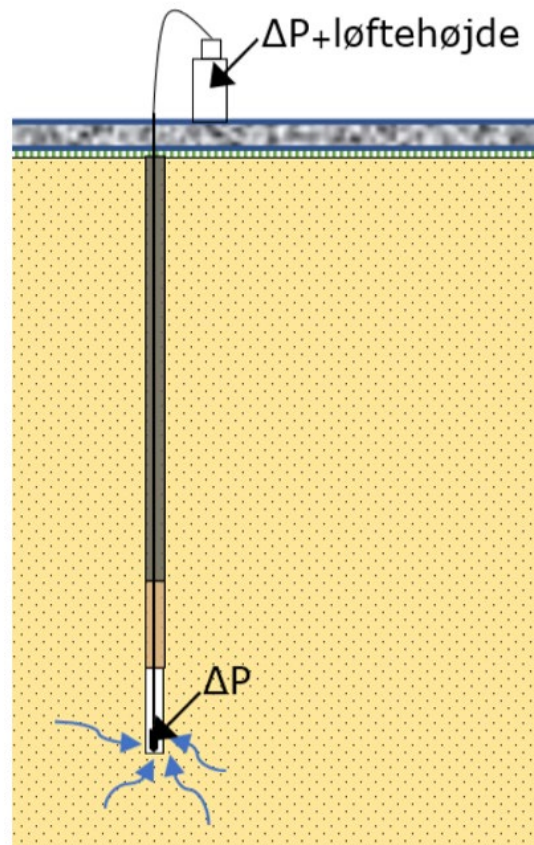
Fasefordeling – konstant vandmætning - sand ($S_w = 60\%$)

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



- Vurdering af porevandspotentialet – afhænger af jordens retentionsegenskaber, vandindhold og løftehøjde -> det kræver et vakuum på ca. 100 mbar for at løfte porevand 1 m.



Miljøstyrelsen (2025)
Miljøprojekt 2295

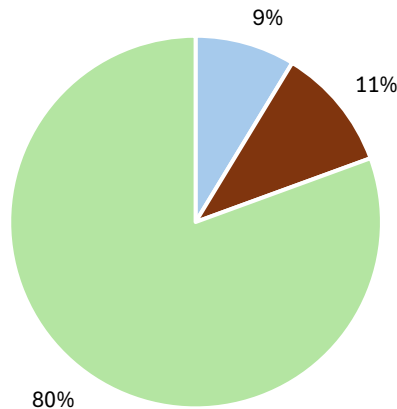
www.dmr.dk

Fasefordeling – varierende vandmætning - sand

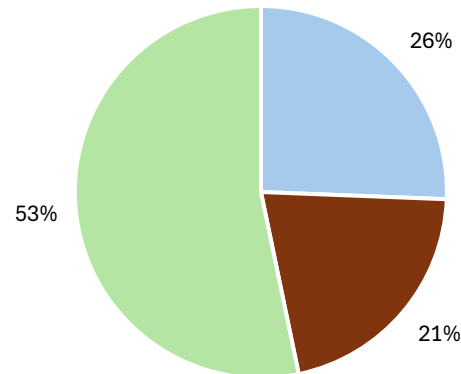
Vandmætningen påvirker koncentrationen i porevandet (samme PFOA masse)

- 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**

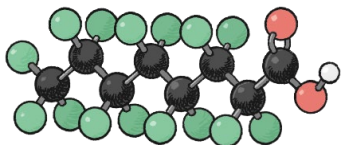
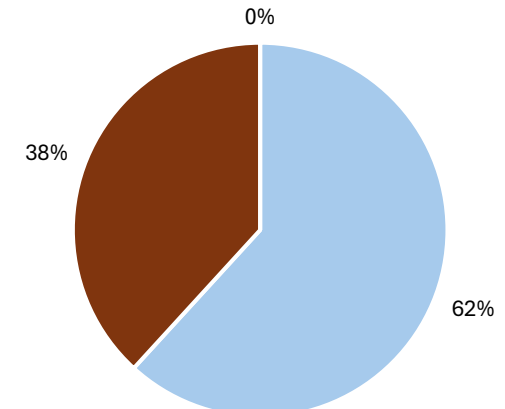
PFOA $S_w = 50\%$ $C_w \approx 0.1 \mu\text{g/l}$



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



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

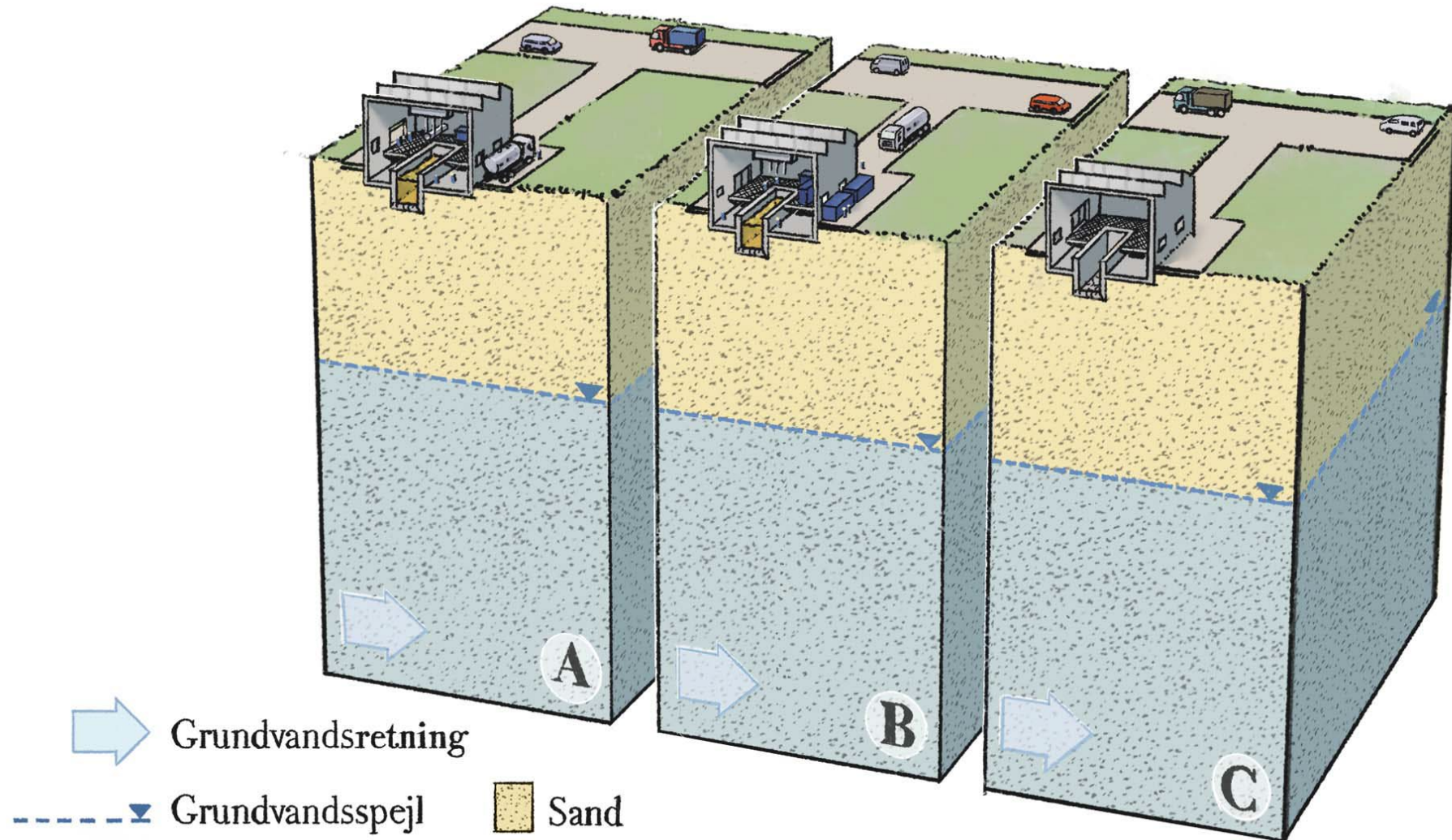


 PFAS i vand

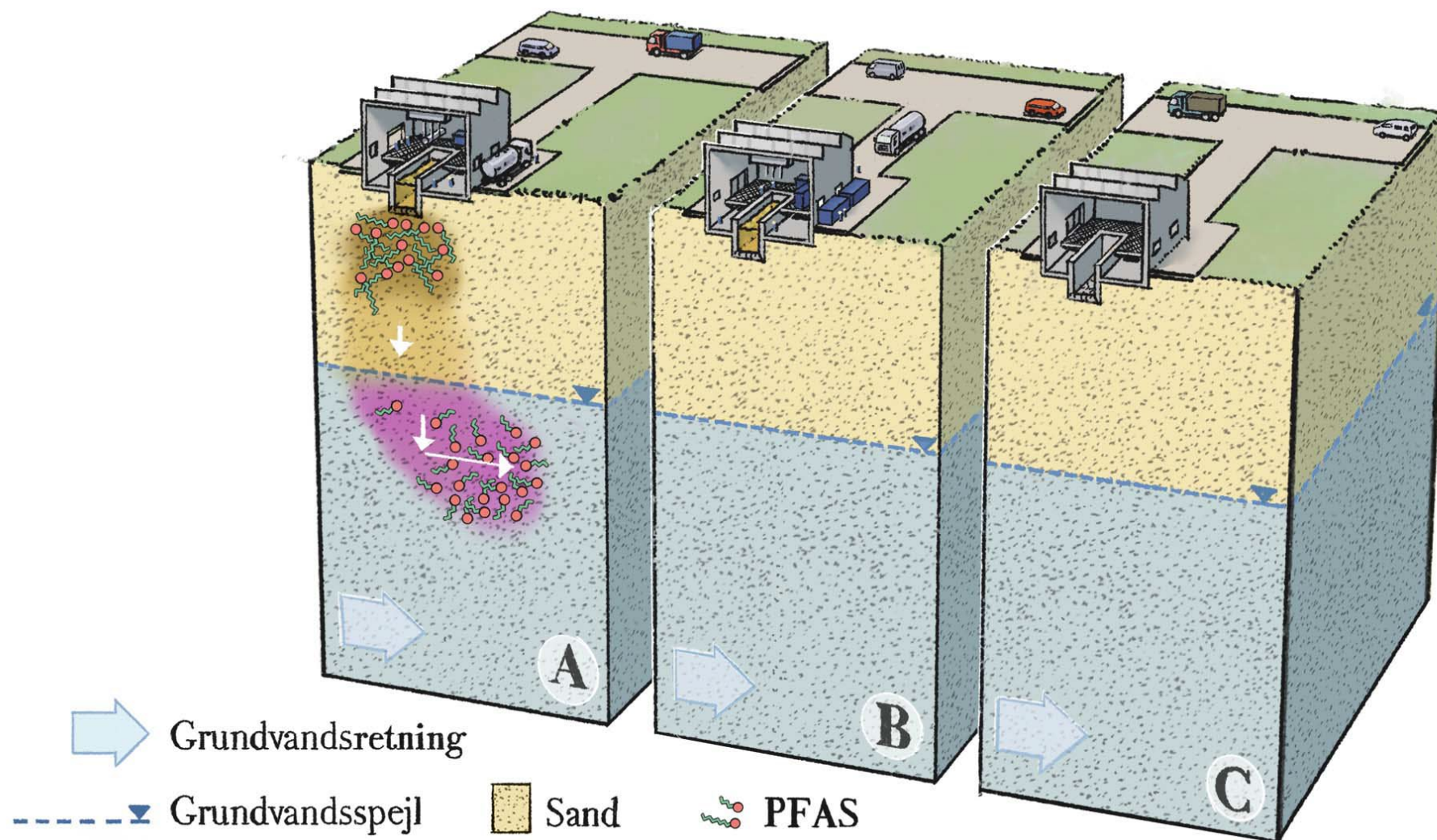
 PFAS i jord

 PFAS i luft-vand grænsefladen

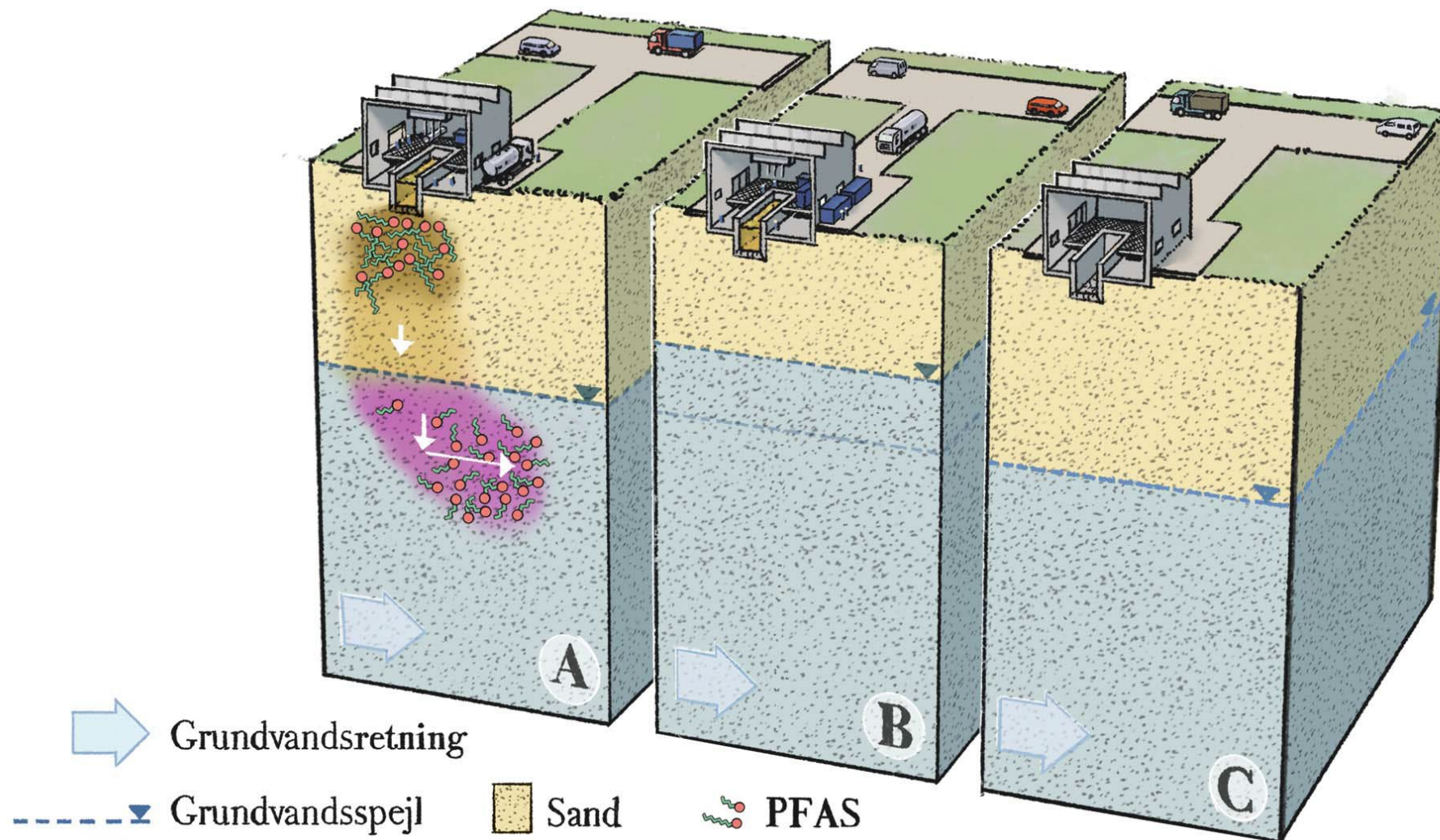
Sand – eksempel med frit grundvandsmagasin



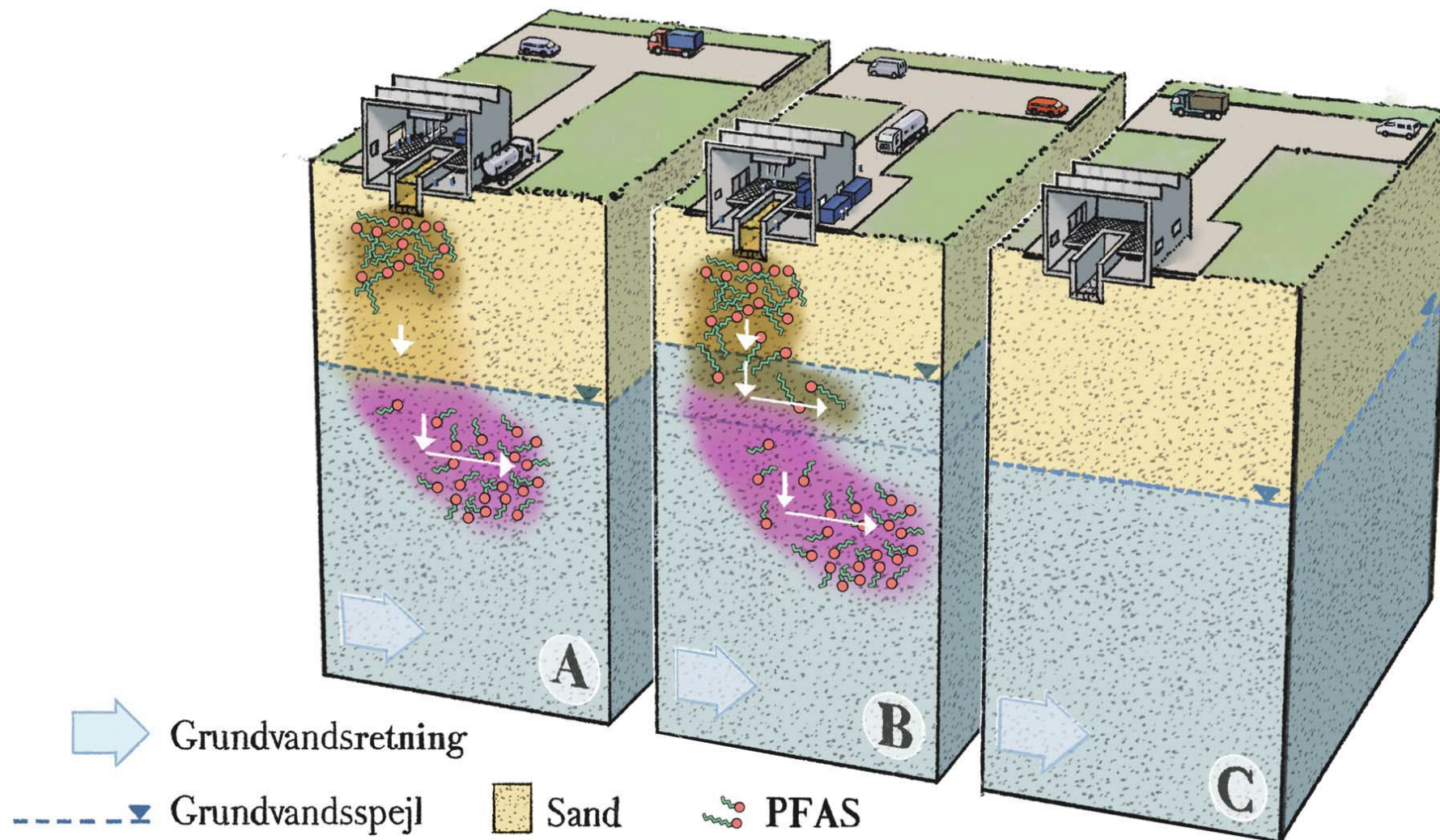
Sand – eksempel med frit grundvandsmagasin



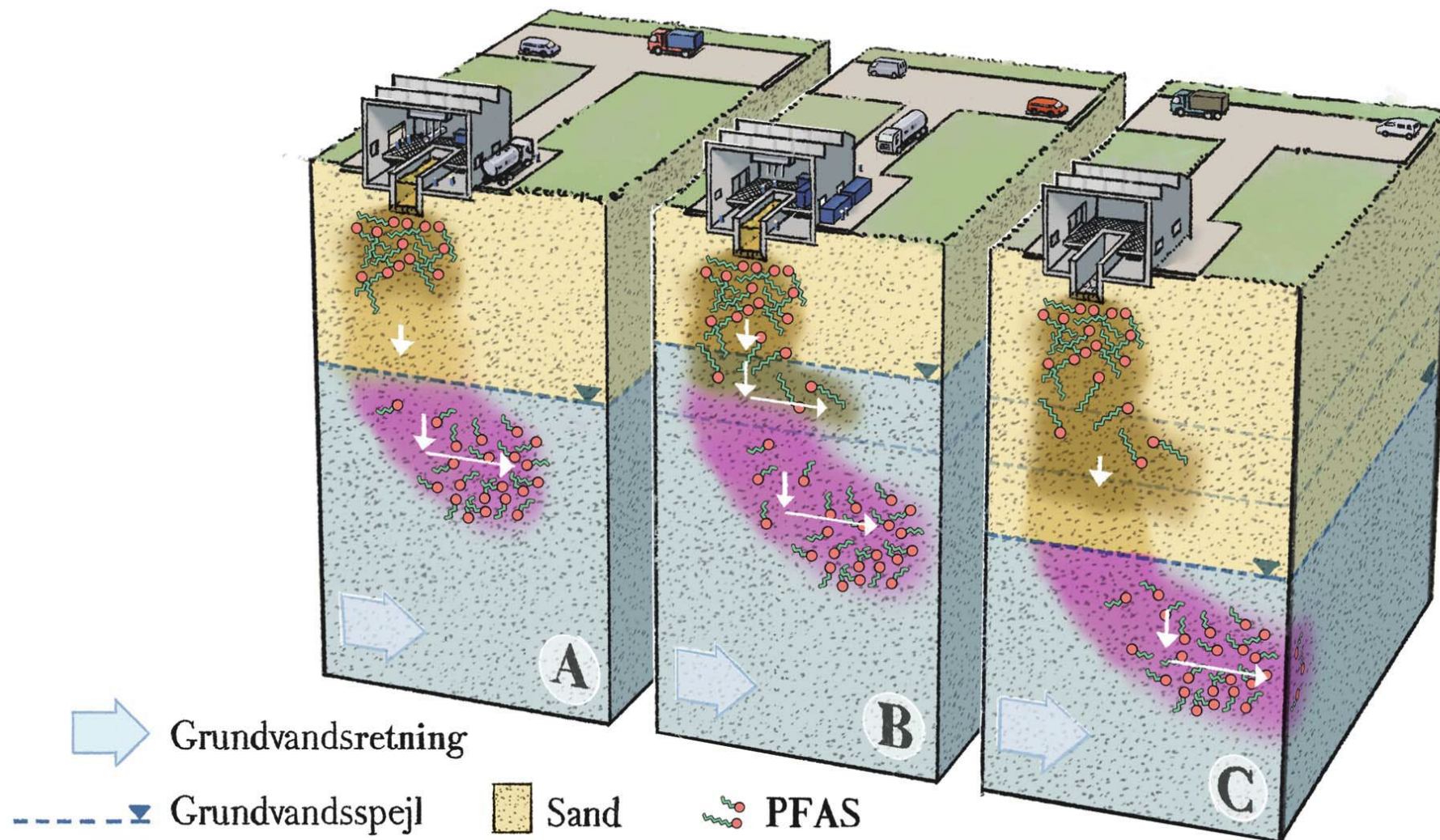
Fluktuerende vandspejl



Sekundær PFAS fane



"Imobilisering" af PFAS i umættet zone



Opsummering

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

Meget at lære endnu - heldigvis

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. 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.
- Miljøstyrelsen (2025). Porevandsprøver til vurdering af grundvandsrisiko på PFAS-forurenede lokaliteter. Miljøprojekt nr. 2294.

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>