

Når det primære magasin under en industrigrund for en gang skyld ikke er så forurenset med klorerede opløsningsmidler, som man kunne forvente  
– En syntese af detaljerede geologiske informationer giver svaret

---

CHARLOTTE RIIS  
PETER TYGE

---

10. MARTS 2021

**NIRAS**

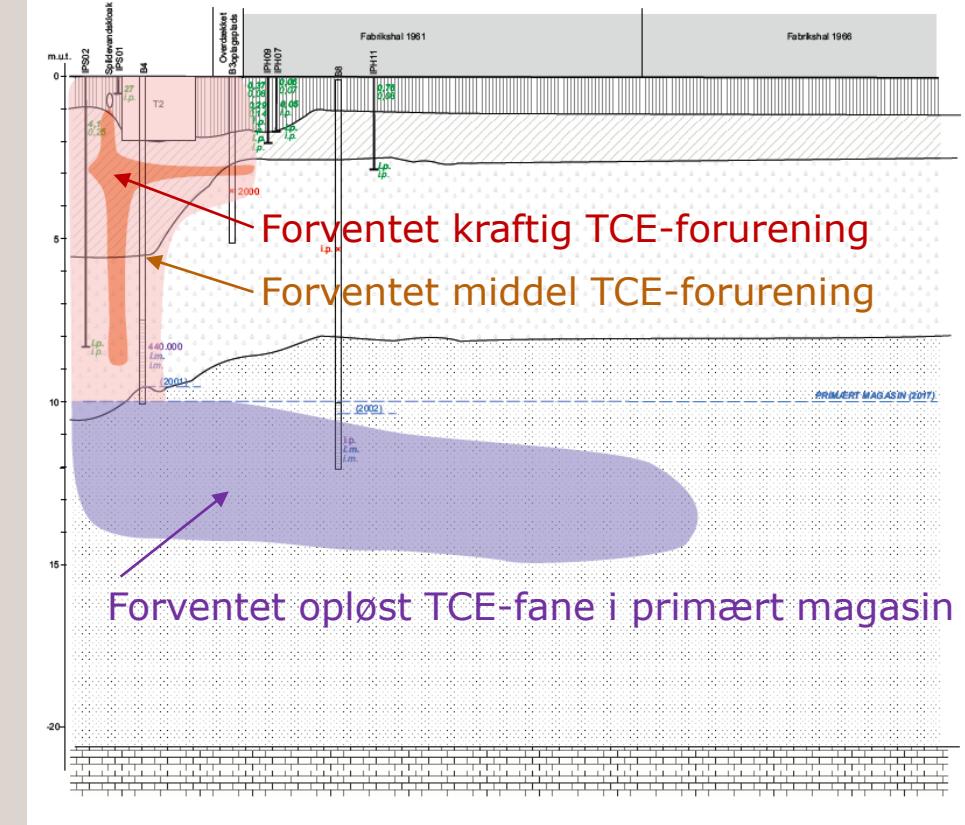
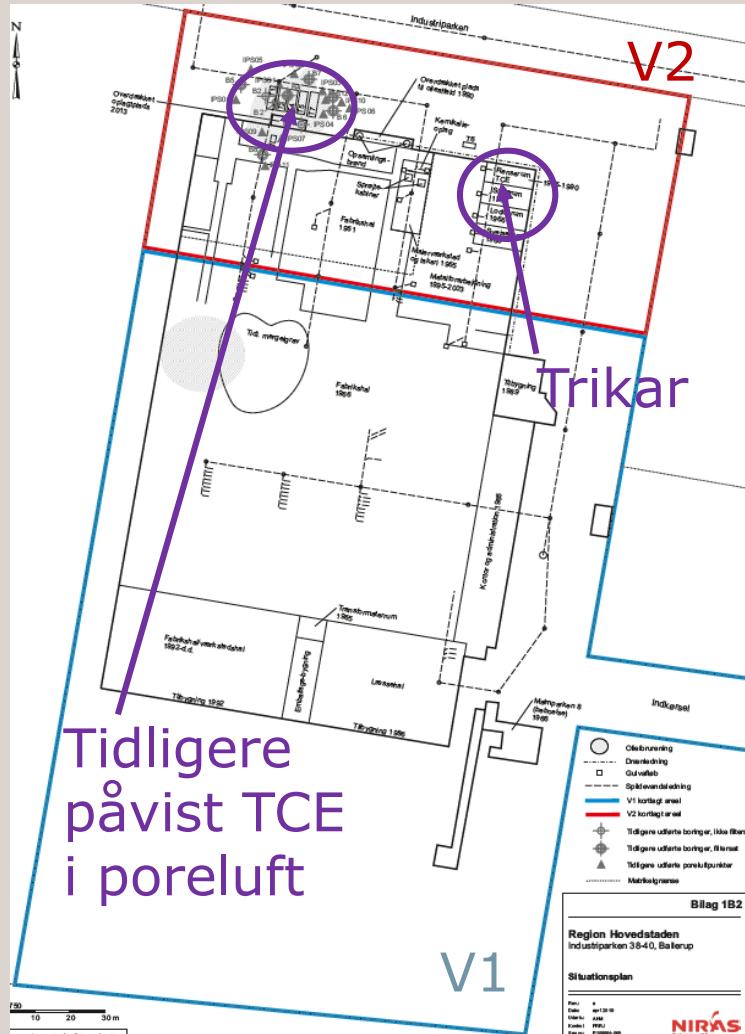


# Historik og forventet forurening

## Afgrænsende forureningsundersøgelser



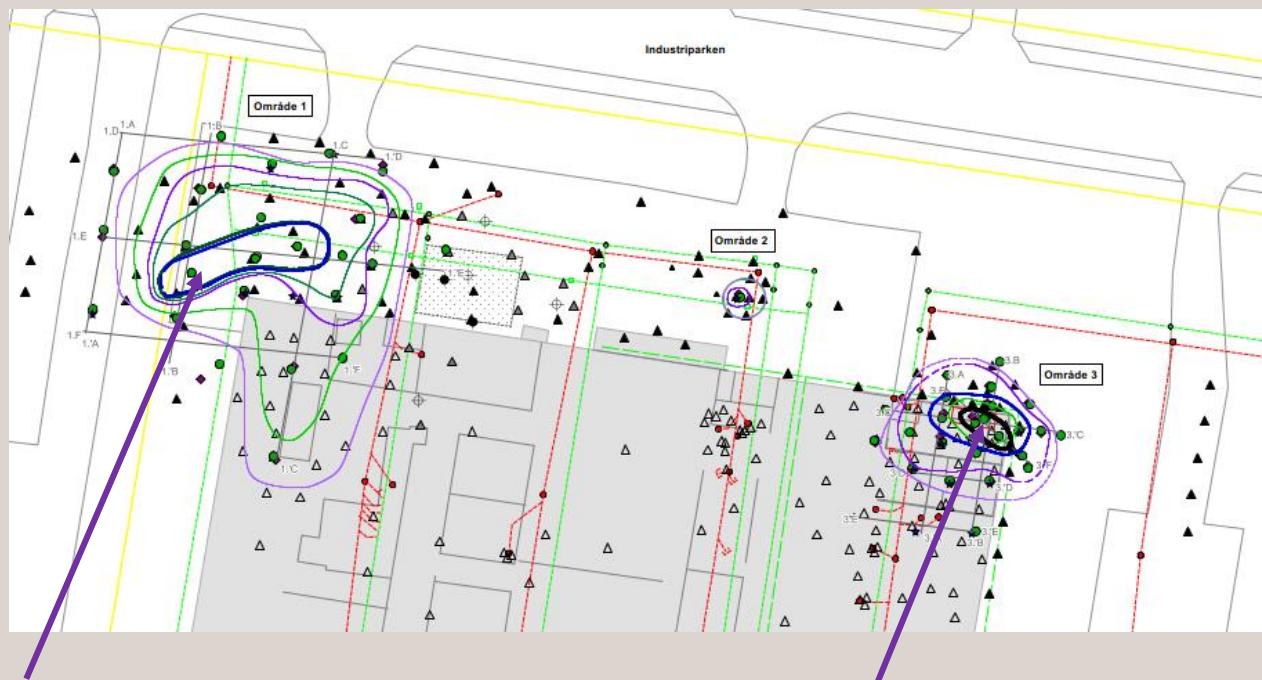
- Metalforarbejdning
- TCE 1965-1990
- Viden om store mængder bortskaffede kemikalier



# Faktisk påvist forurening

Afgrænsende forureningsundersøgelser

JORD – 93-117 kg



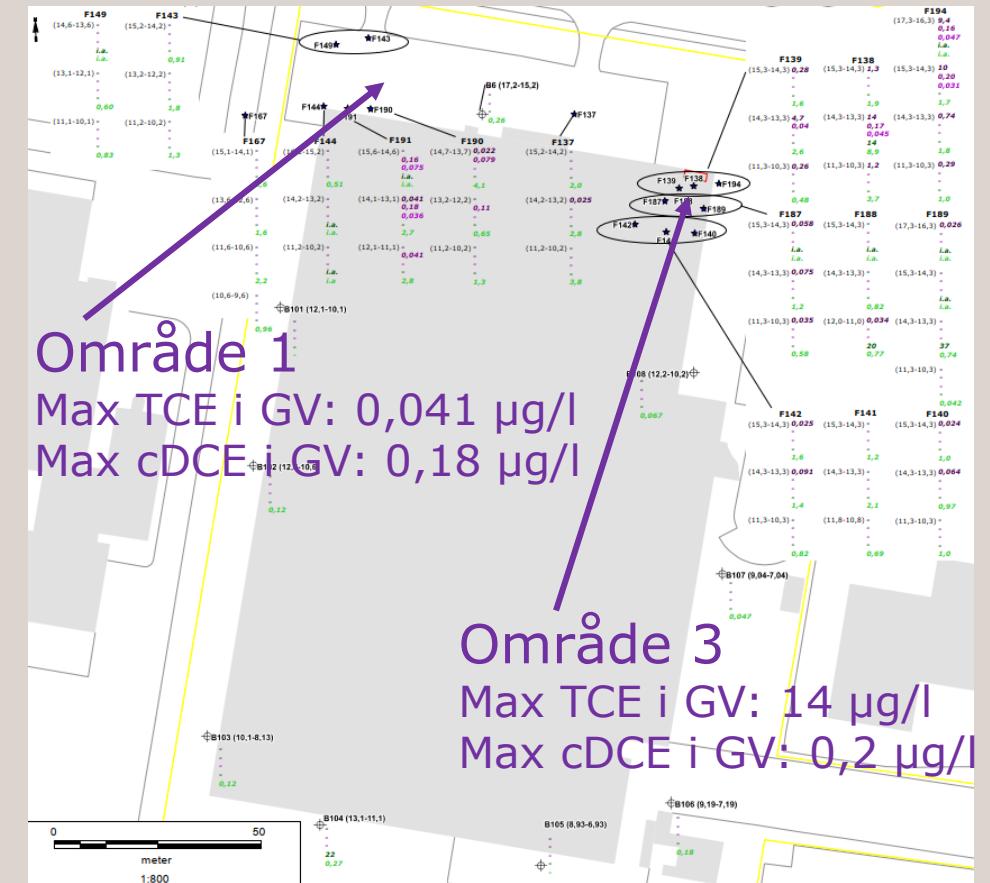
Område 1

Max TCE i jord: 12 mg/kg  
Max cDCE i jord: 9,1 mg/kg

Område 3

Max TCE i jord: 670 mg/kg  
Max cDCE i jord: 0,9 mg/kg

GRUNDVAND – 0,0009 kg



Område 1

Max TCE i GV: 0,041 µg/l  
Max cDCE i GV: 0,18 µg/l

Område 3

Max TCE i GV: 14 µg/l  
Max cDCE i GV: 0,2 µg/l

# Faktisk påvist forurening

Afgrænsende forureningsundersøgelser

JORD - 93-117 kg



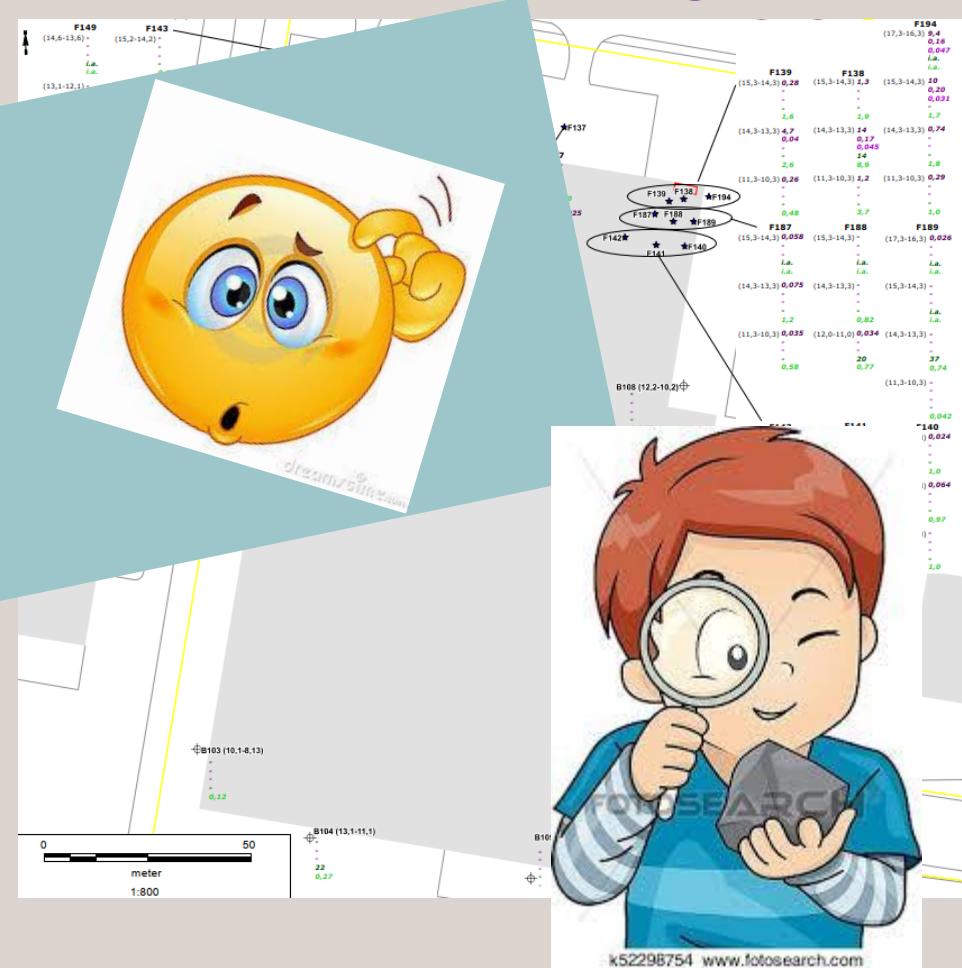
30-55 år efter spild er der INTET i grundvandet

HVORFOR???

Har vi overset noget?

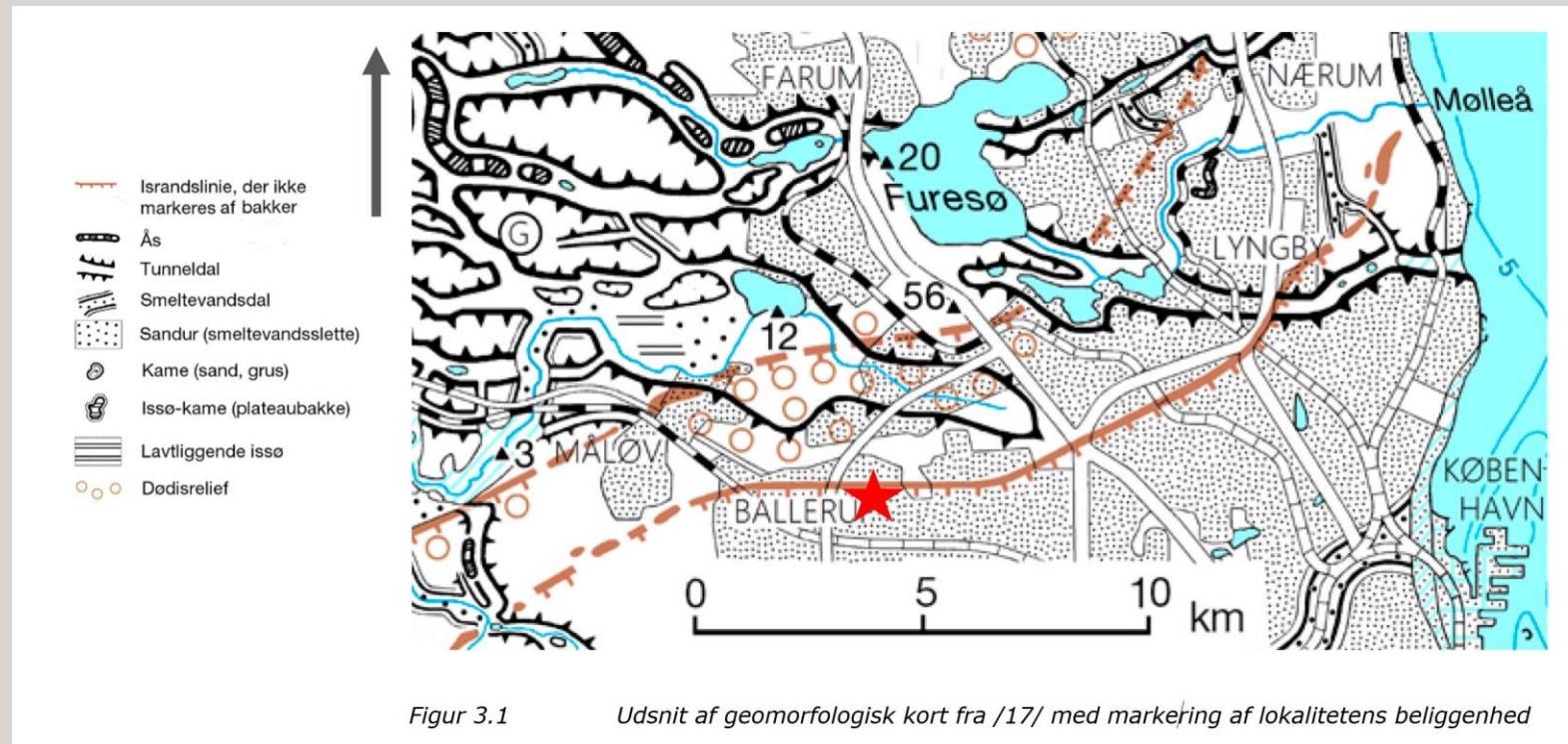
Kan det forklares alene med meget lille infiltration?

GRUNDVAND - 0,0009 kg

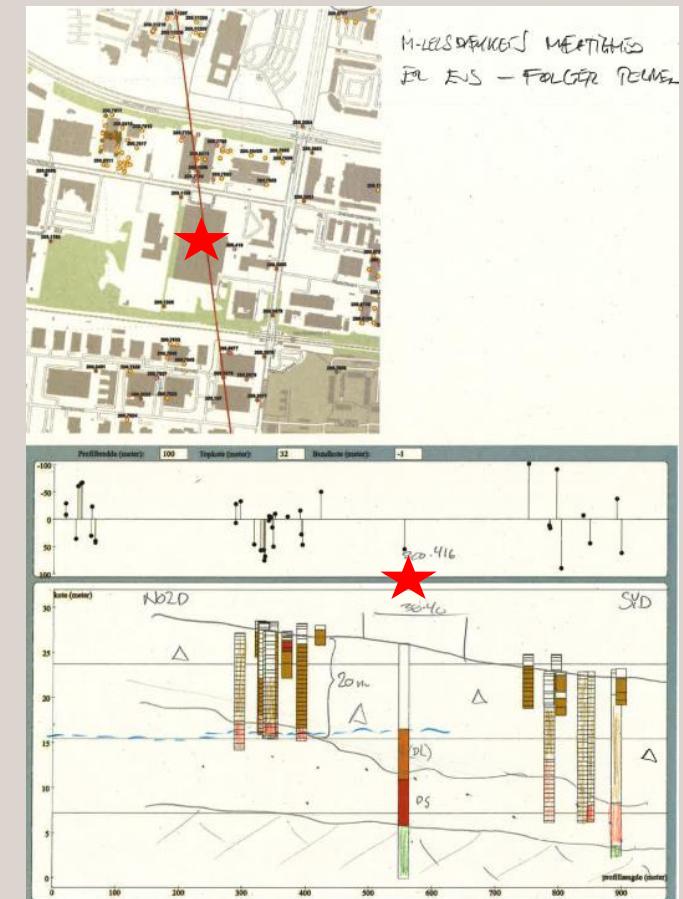


# Overordnet geologisk kontekst

# Geomorfologisk kort

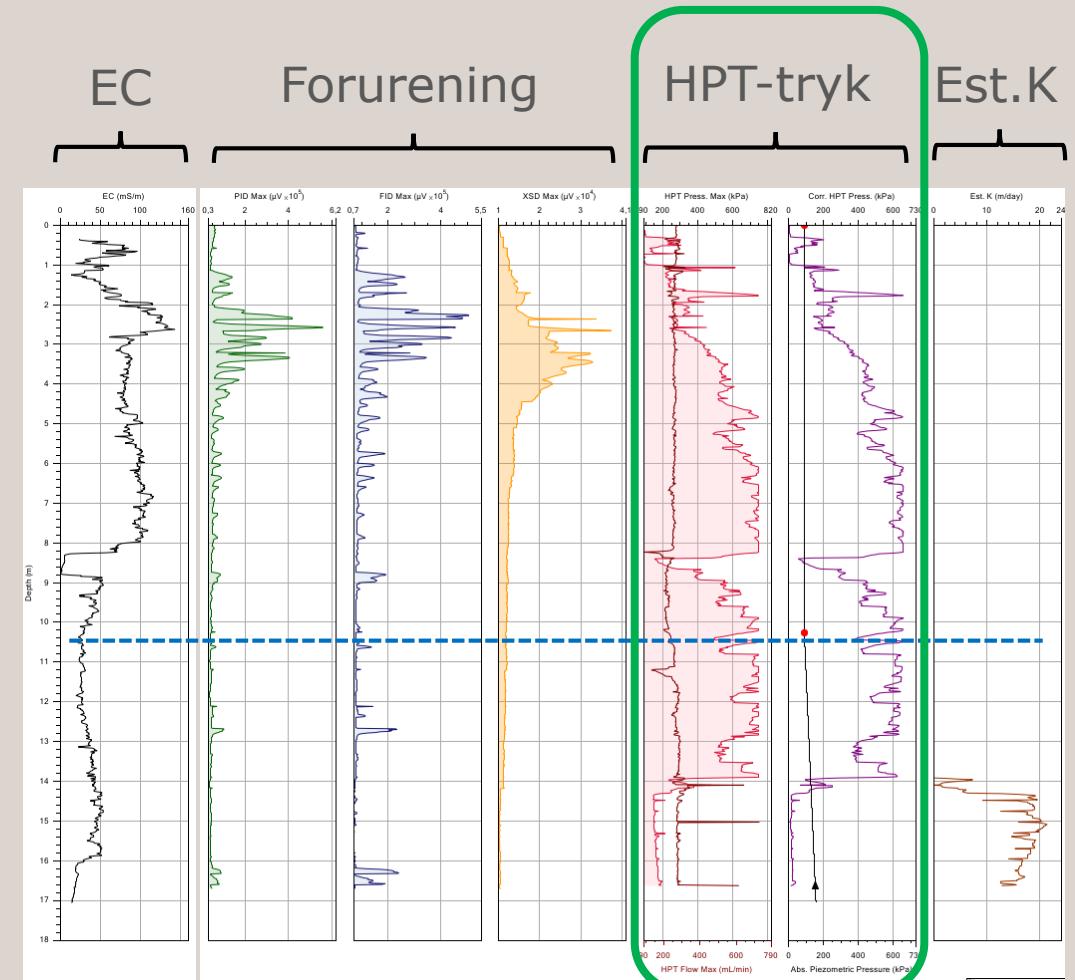
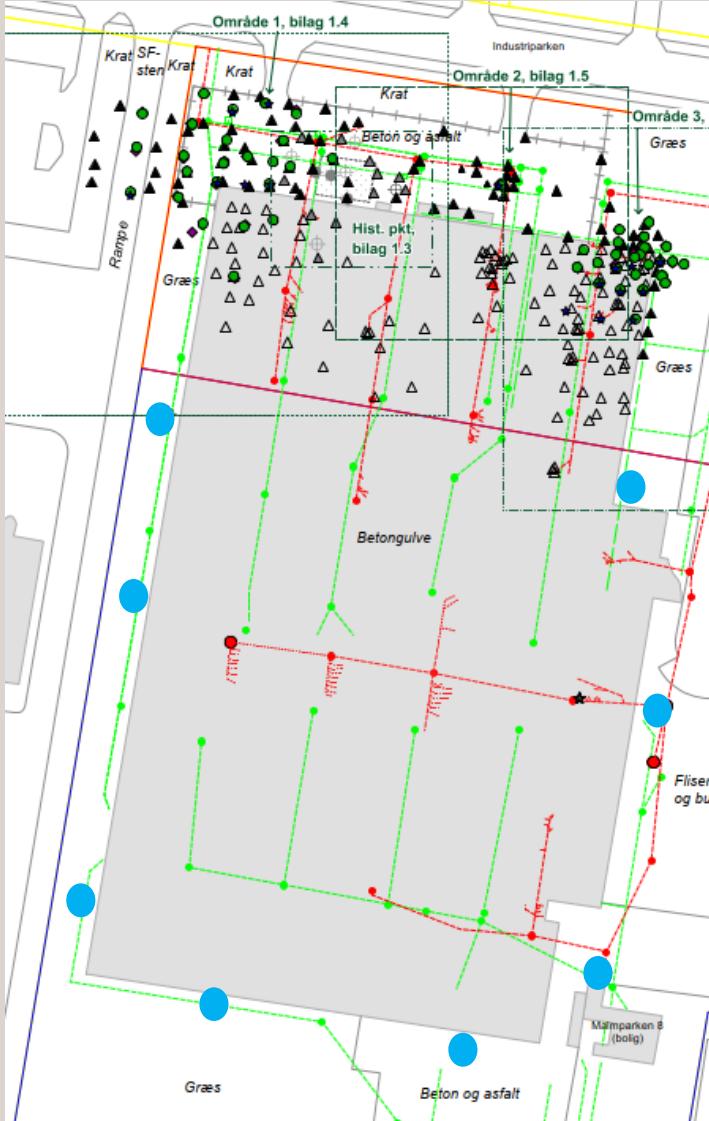


## Udtræk fra Jupiter



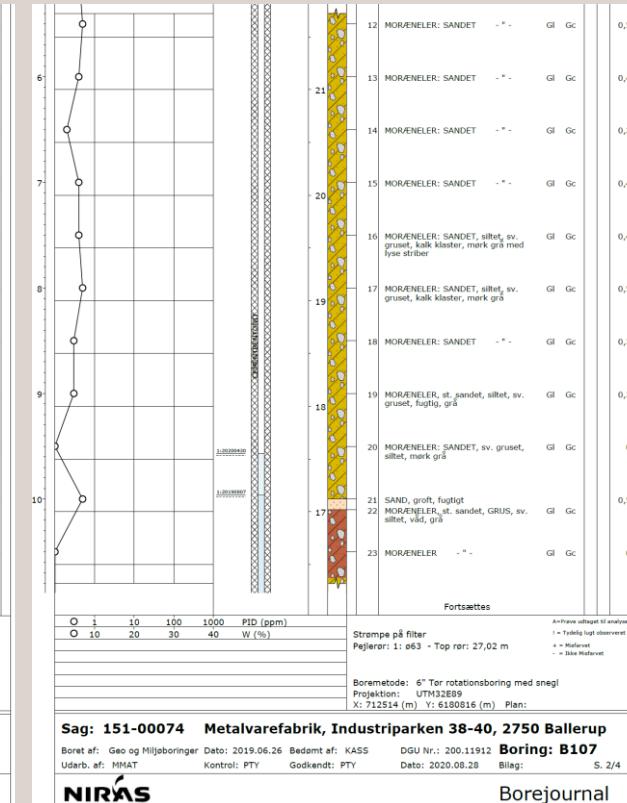
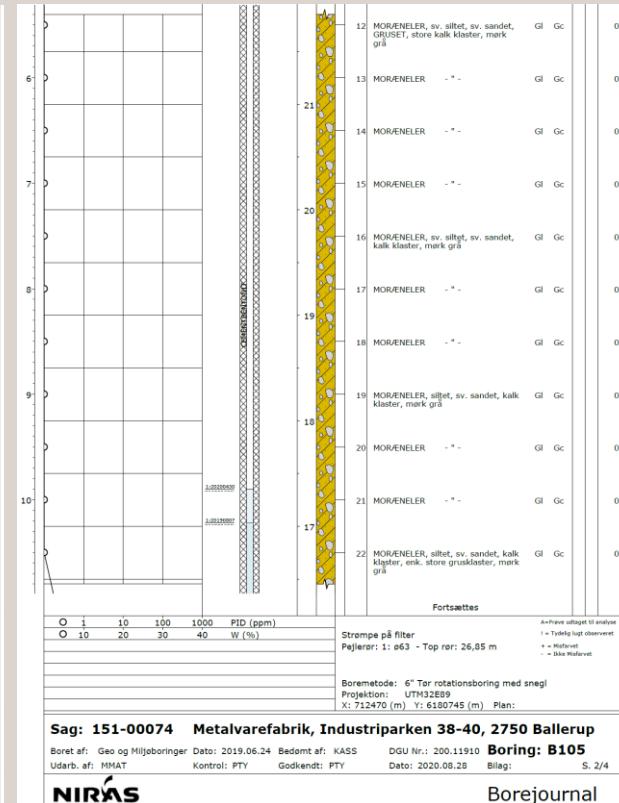
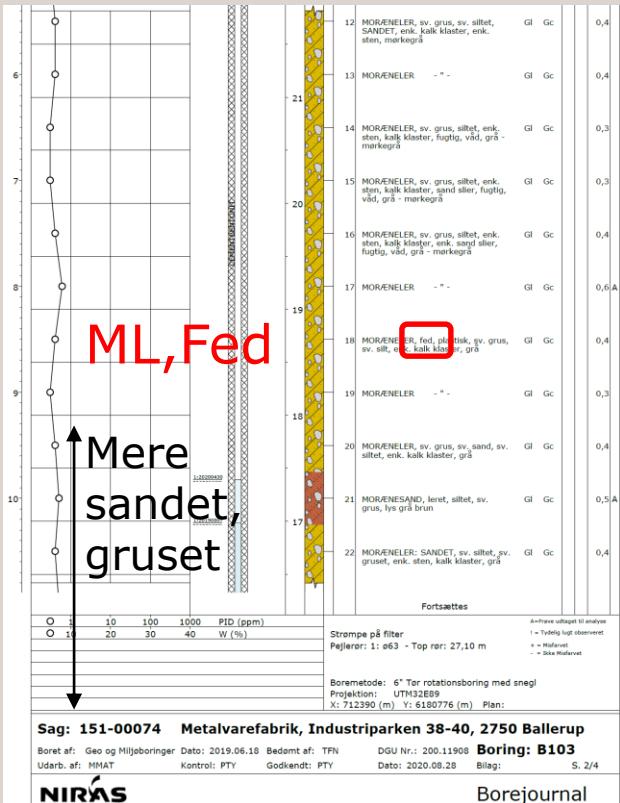
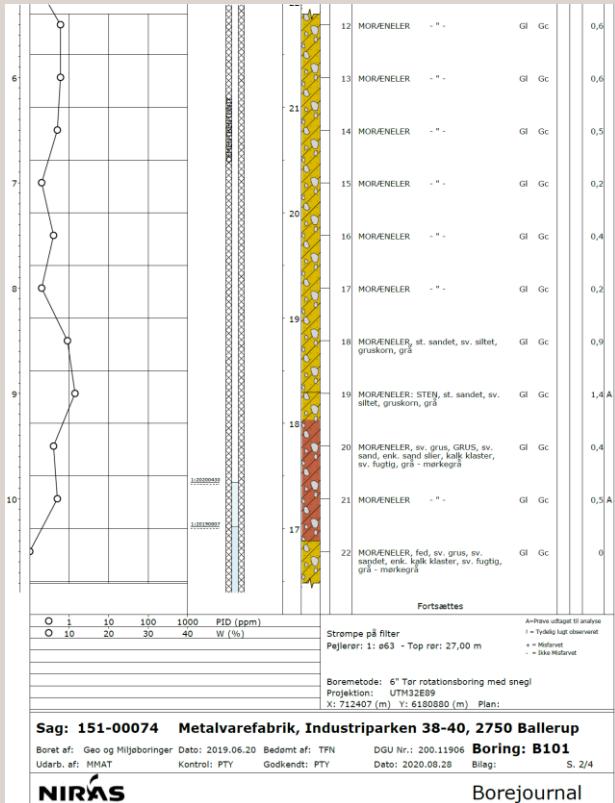
# Lokale geologiske observationer

- Boringer
- MiHPT
- ▲ Kerner



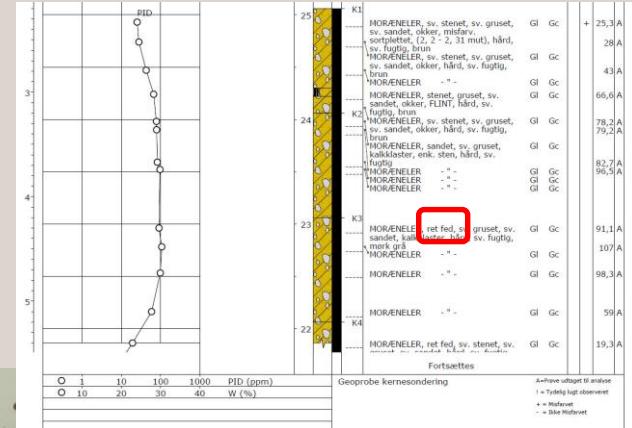
# Lokale geologiske observationer

Hvad viser boringerne?



# Lokale geologiske observationer

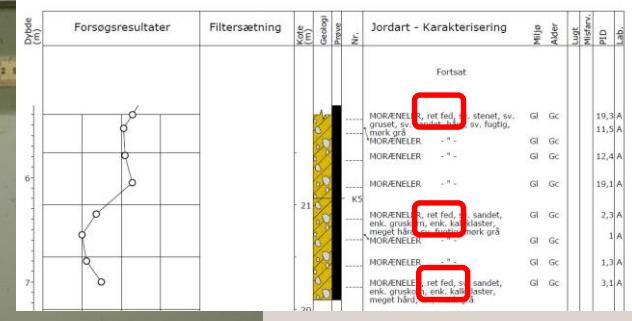
Hvad viser kernerne?



Sag: 151-00074 Metalvarefabrik, Industriparken 38-40, 2750 Ballerup Boring: F179

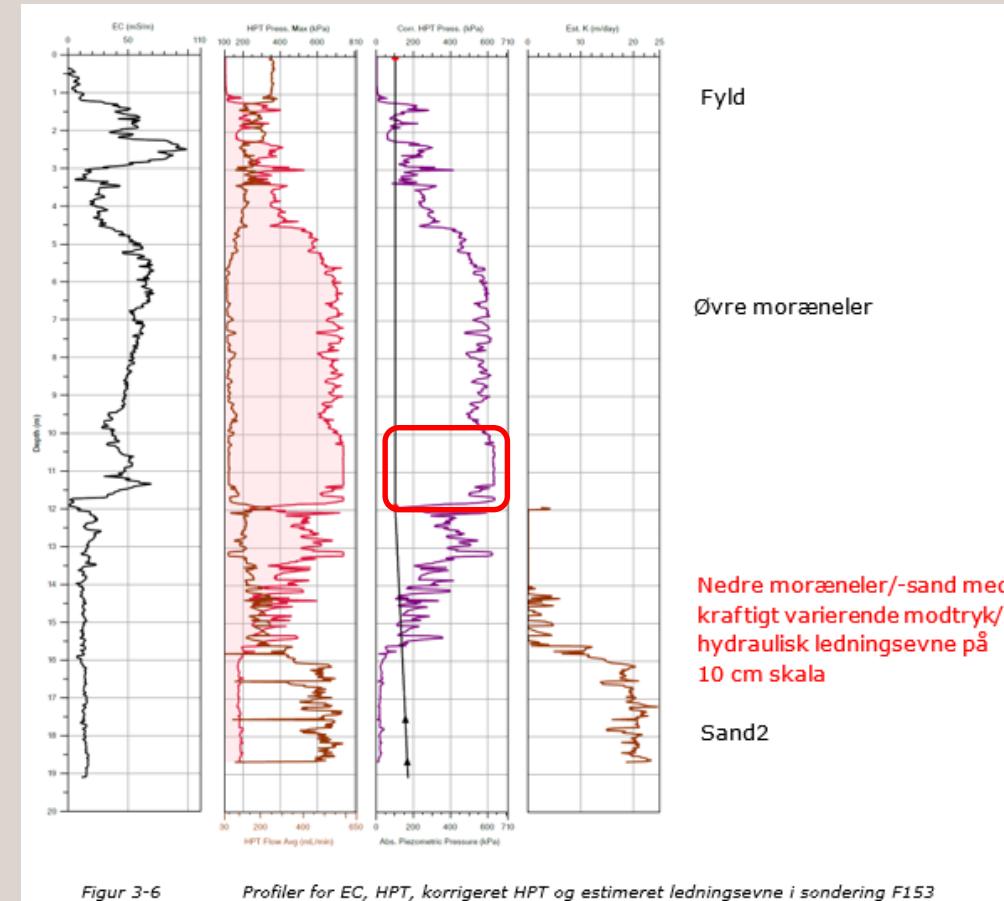
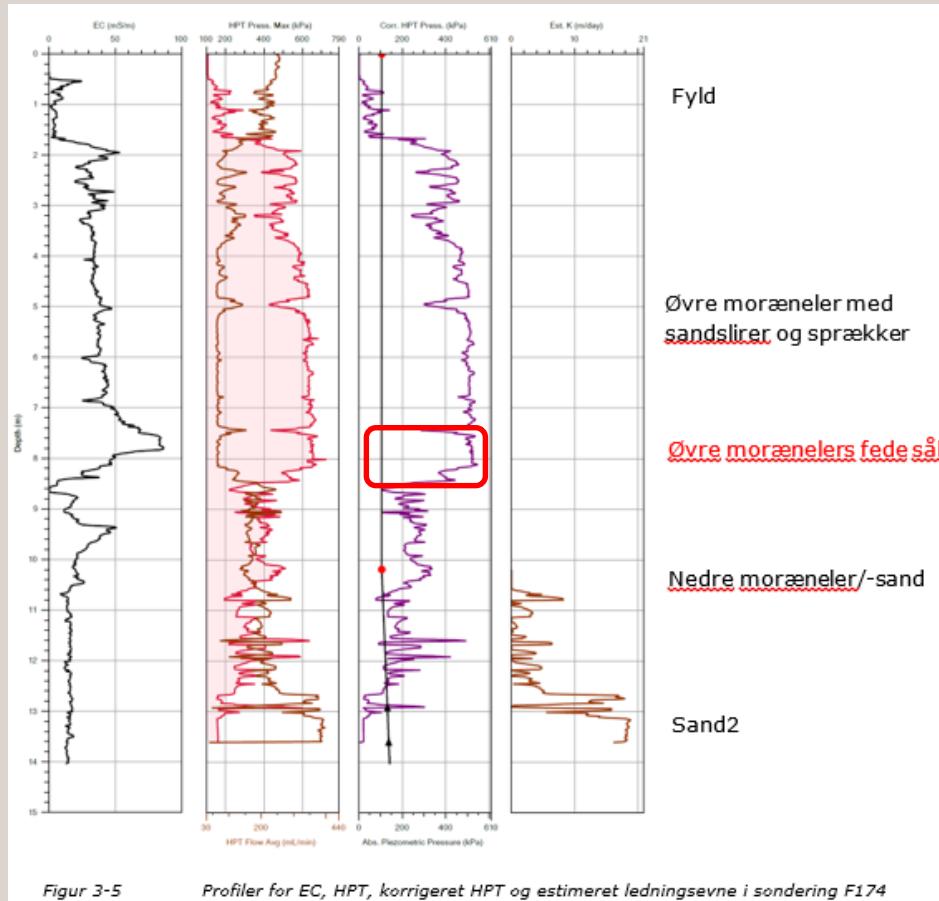
Boret af: NIRAS Dato: 2020.04.14 Bedømt af: ACOR DGU Nr.: 200.12384 Boring: F179  
Udarb. af: ACOR Kontrol: ANHE Godkendt: PTY Dato: 2020.08.28 Bilag: S. 1/2

NIRAS Borejournal



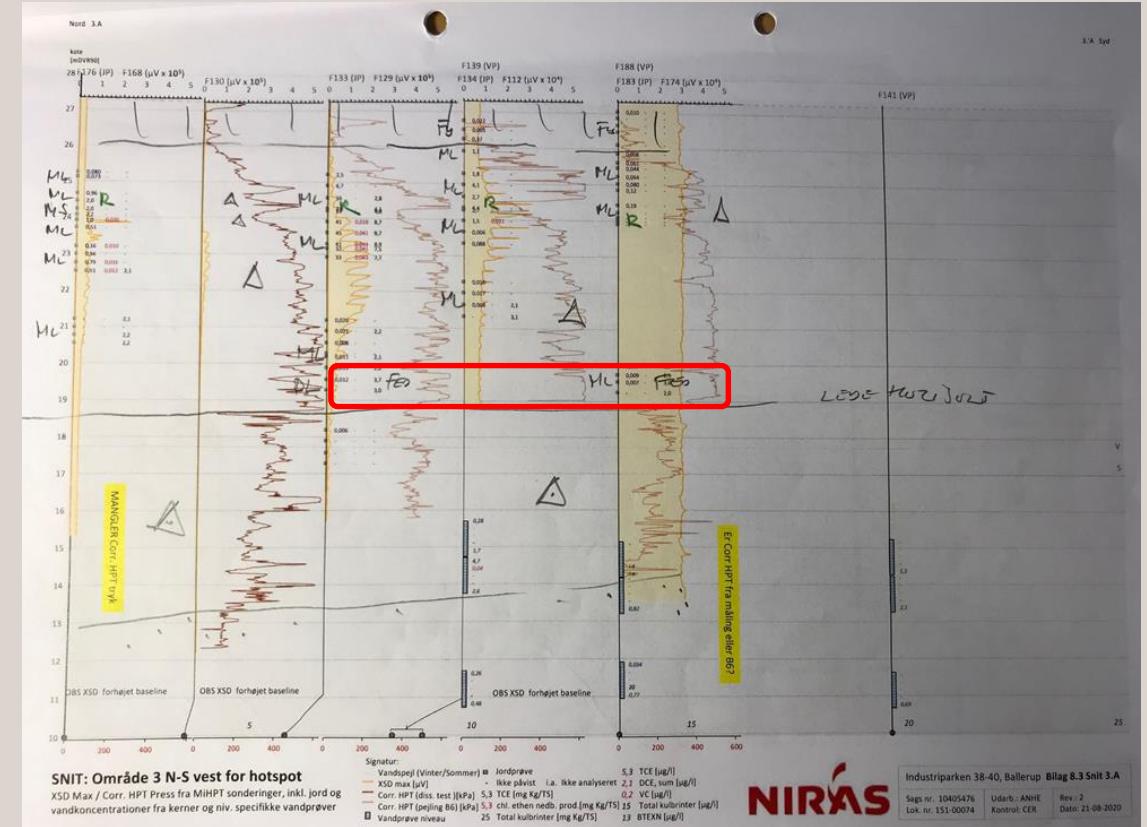
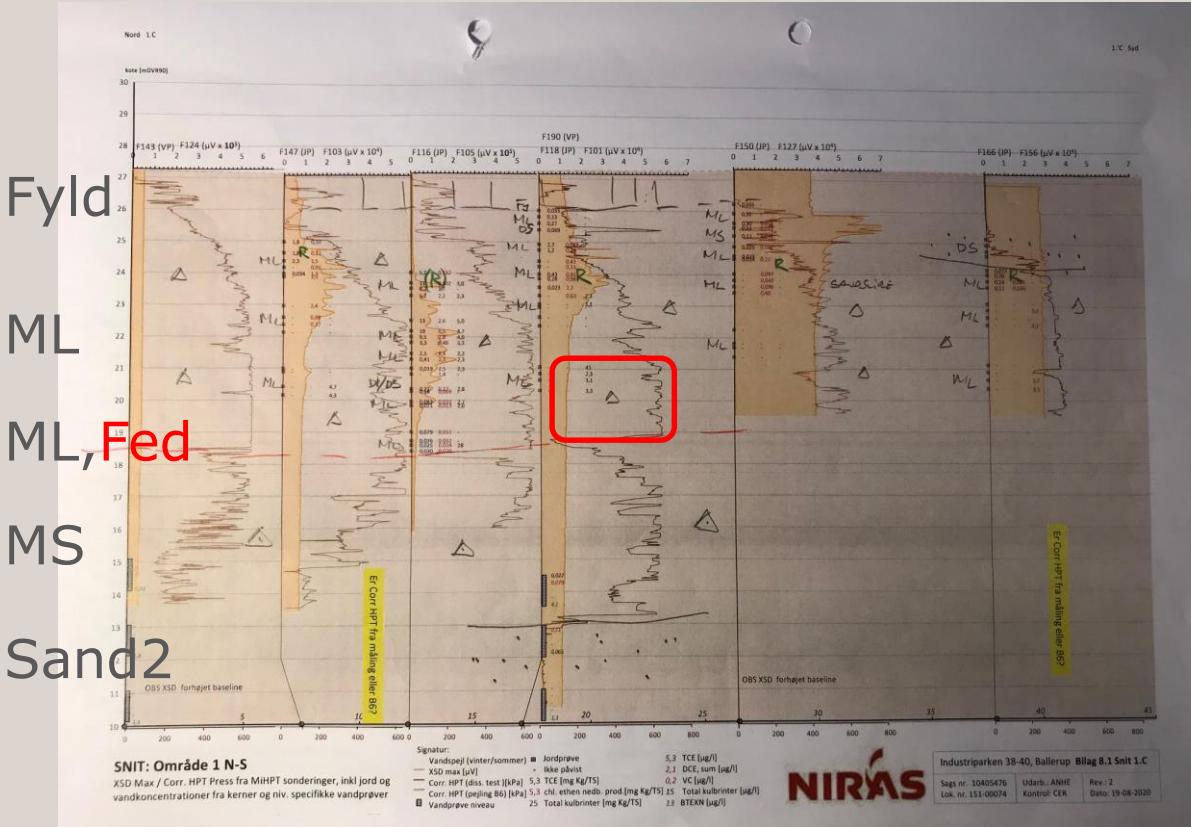
# Lokale geologiske observationer

Hvad viser HPT?



# Lokale geologiske observationer

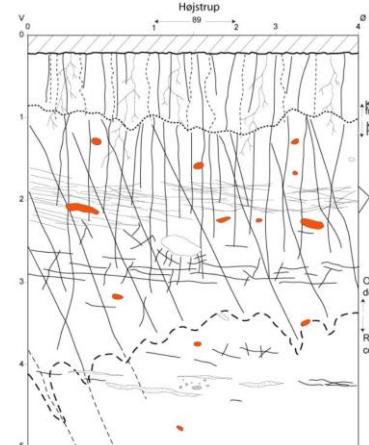
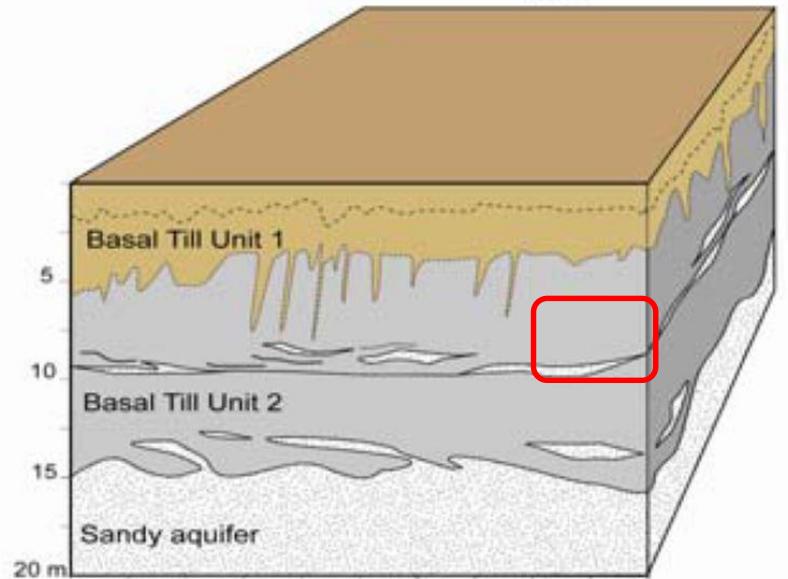
Samtolkning af HPT-logs – input til hypotesen



# Krydstjek med teorien

Hænger vores hypotese sammen med GEUS' modeler af morænetyper?

## Geologisk kontekst



Fyld/intakt  
Kalkspejl  
Redoxfront/Farveskifte  
Makroporer/Sprækker  
Sandslirer/-linser  
Aflejringssekvenser  
Glacialtektonik

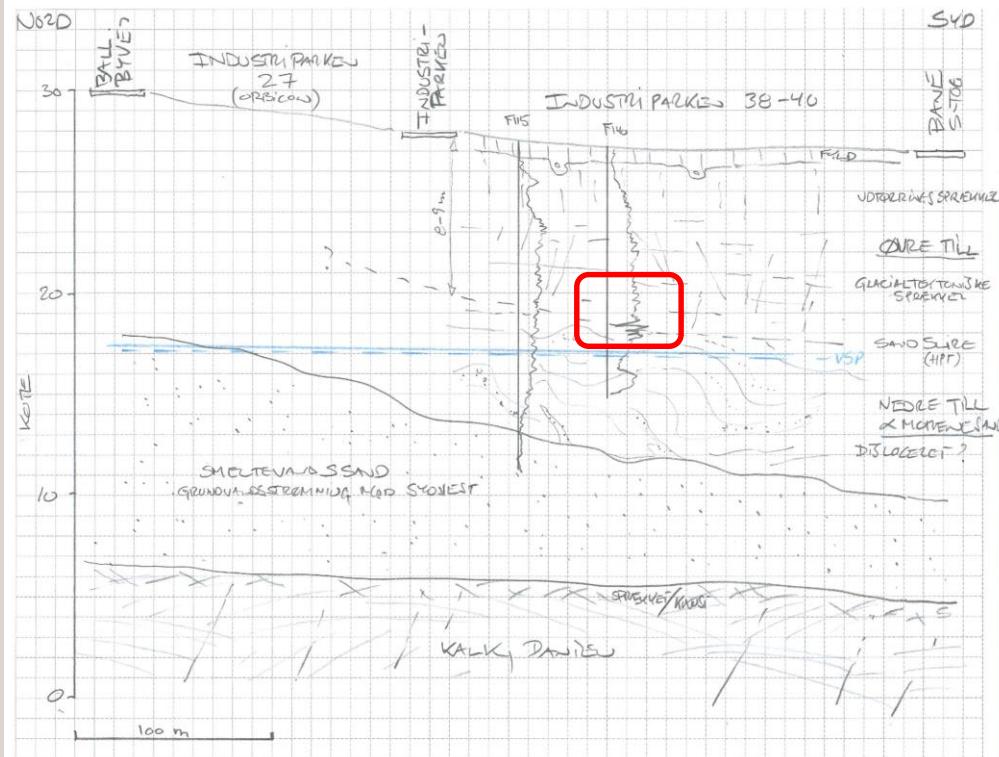
Figur 3.3

Polymorfologisk model med flere bundmoræner afsat på vandførende smeltevands-sand /11/, /15/

# Revideret konceptuel geologisk model

Samtolkning pba. detaljerede geologiske informationer

## Arbejdsprofil

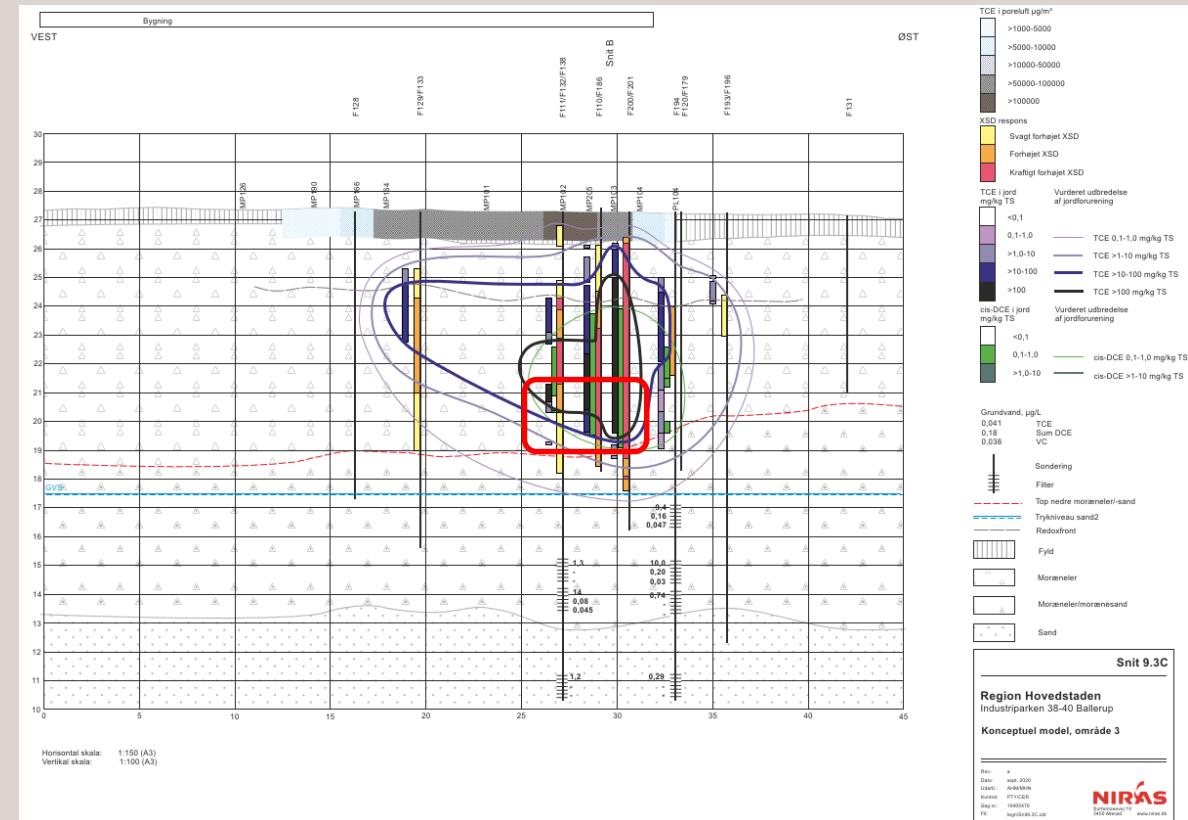
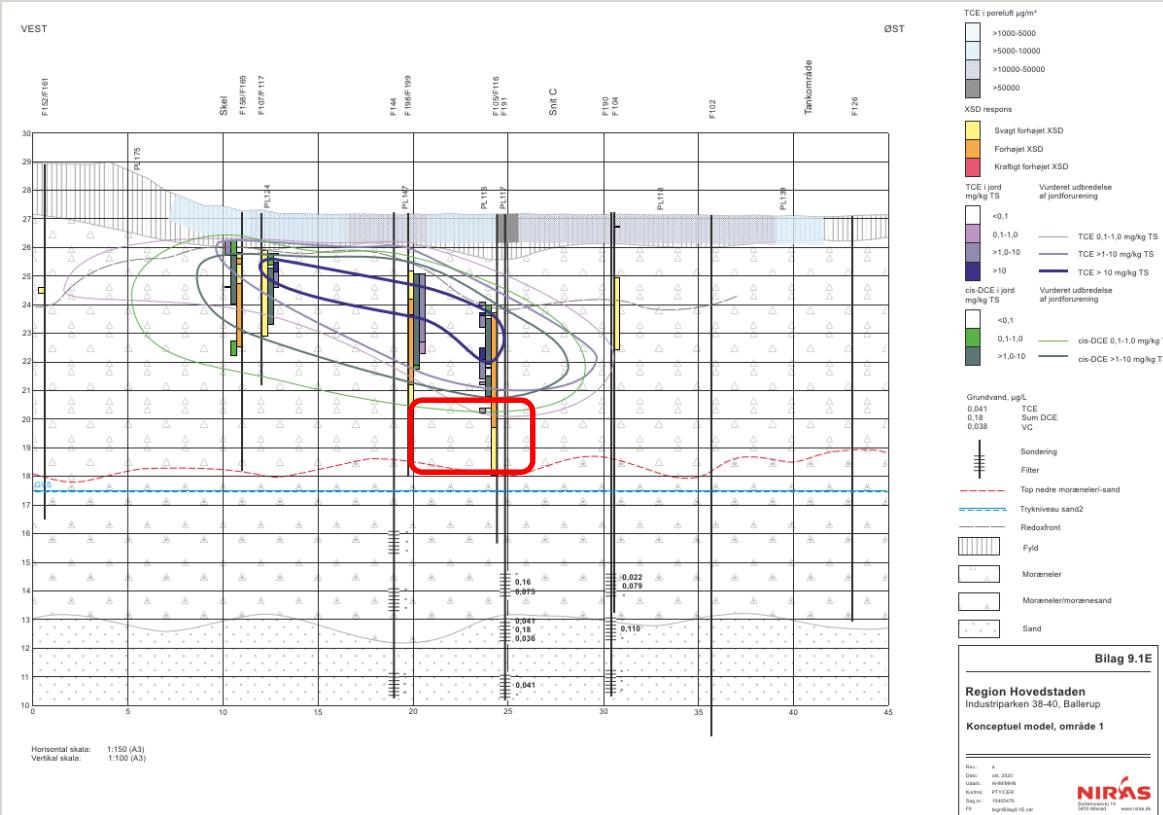


## Rentegnet profil



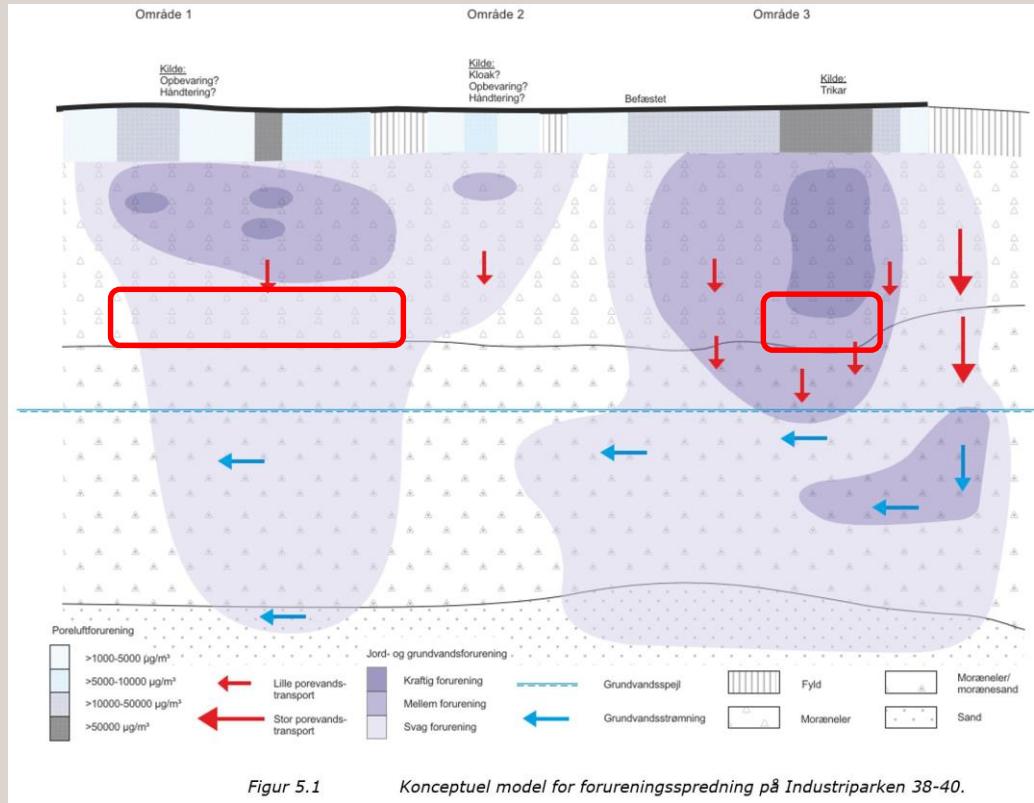
# Kobling af geologi og forurening

Den fede ML sål bremser vertical forureningspredning



# Endelig konceptuel forståelsesmodel

Syntese af geologi, forurening og spredningsmekanismer



# TAK FOR OPMÆRKSOMHEDEN

TAK TIL

Peter Tyge, NIRAS

Jens Dengsø Jensen, NIRAS

Anne Schouby Hemdorff, NIRAS

Maria Heisterberg Hansen, NIRAS

Katja Grunnet, Region Hovedstaden

Mette Munk, Region Hovedstaden





# Undersøgelser i områder med stærkt varierende geologi

ATV vintermøde, 10. marts 2021

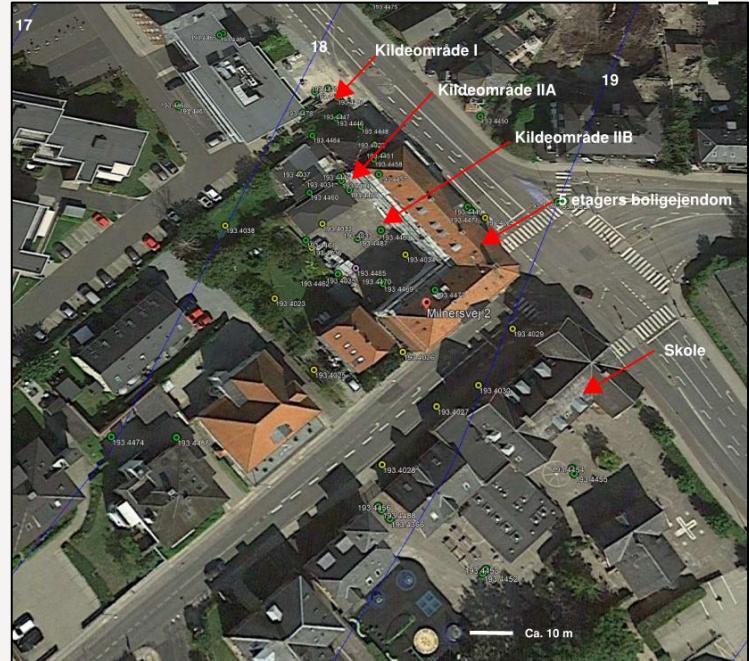
Katja Sauer Grunnet, Region Hovedstaden

Bernt Grosen og Christian Helweg, COWI A/S



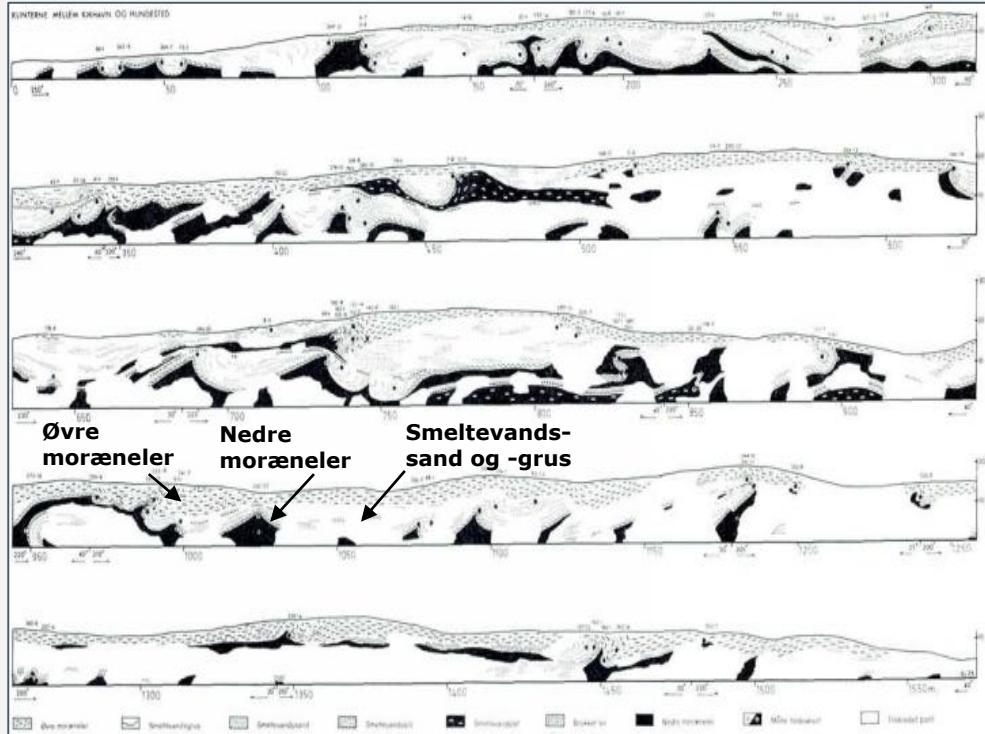
# Udgangspunkt

- › Klorerede opløsningsmidler i jord og grundvand
- › Undersøgelser i et randmoræneområde
- › Normalt baserer vi vurderinger af forurenningsspredning på lagdelte geologiske forhold
- › Vurderinger baseret på lagdelte forhold er ikke retvisende i randmoræneområder
- › Hvad gør vi så ?



# Geologiske forhold

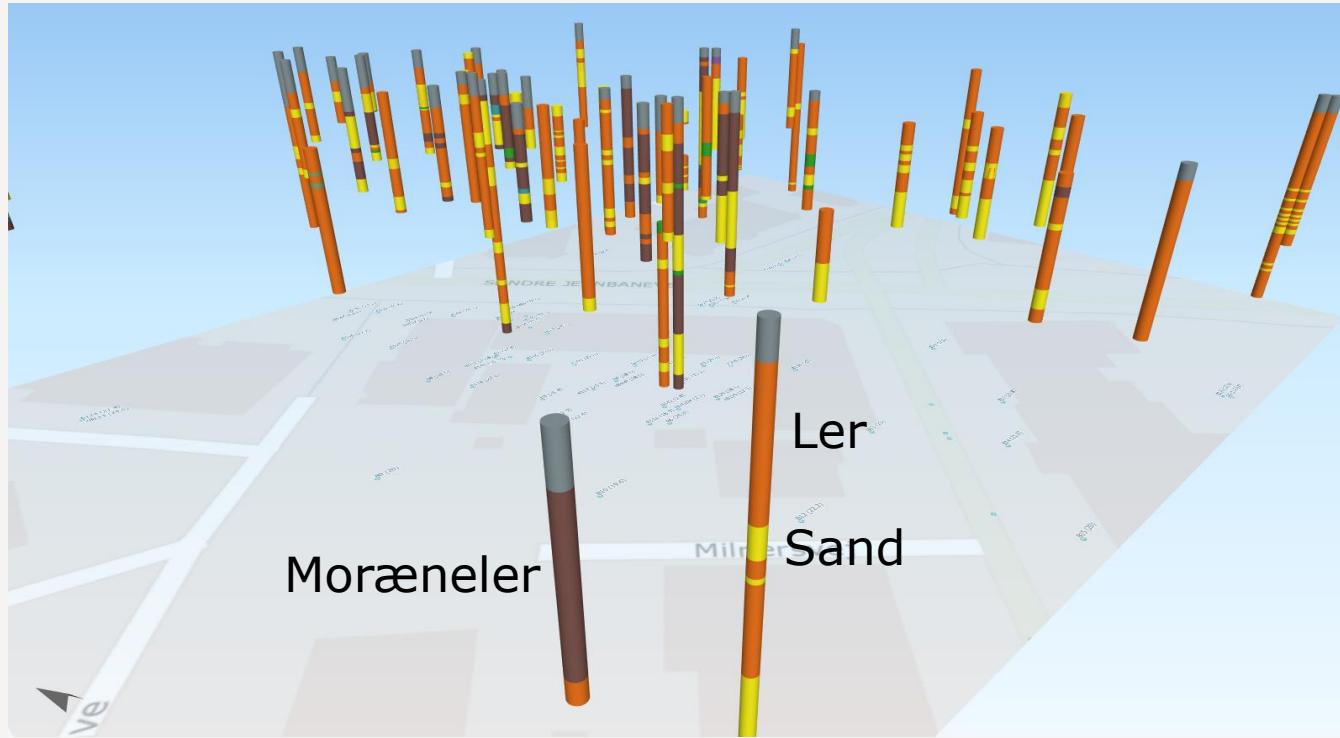
- › Lokalitet er beliggende vest for randmorænekompleks
- › Boringer viser kompleks geologi
- › Domineret af moræneler
- › Afbrudt af vandførende tynde lag af siltet smeltevandssand
- › Vanskeligt at korrelere sandlagene mellem forskellige boringer
- › Geologi sammenlignelig med kystklint ved Hundested, som viser opbygning af randmoræne
- › Figur illustrerer kompleksitet ved lokalitet
- › Varierende forhold kan fortsætte til toppen af kalken ca. 50 m u.t.



Randmoræner i kystklinter ved Hundested

COWI

# Geologi - overblik



# Store variationer i geologiske forhold

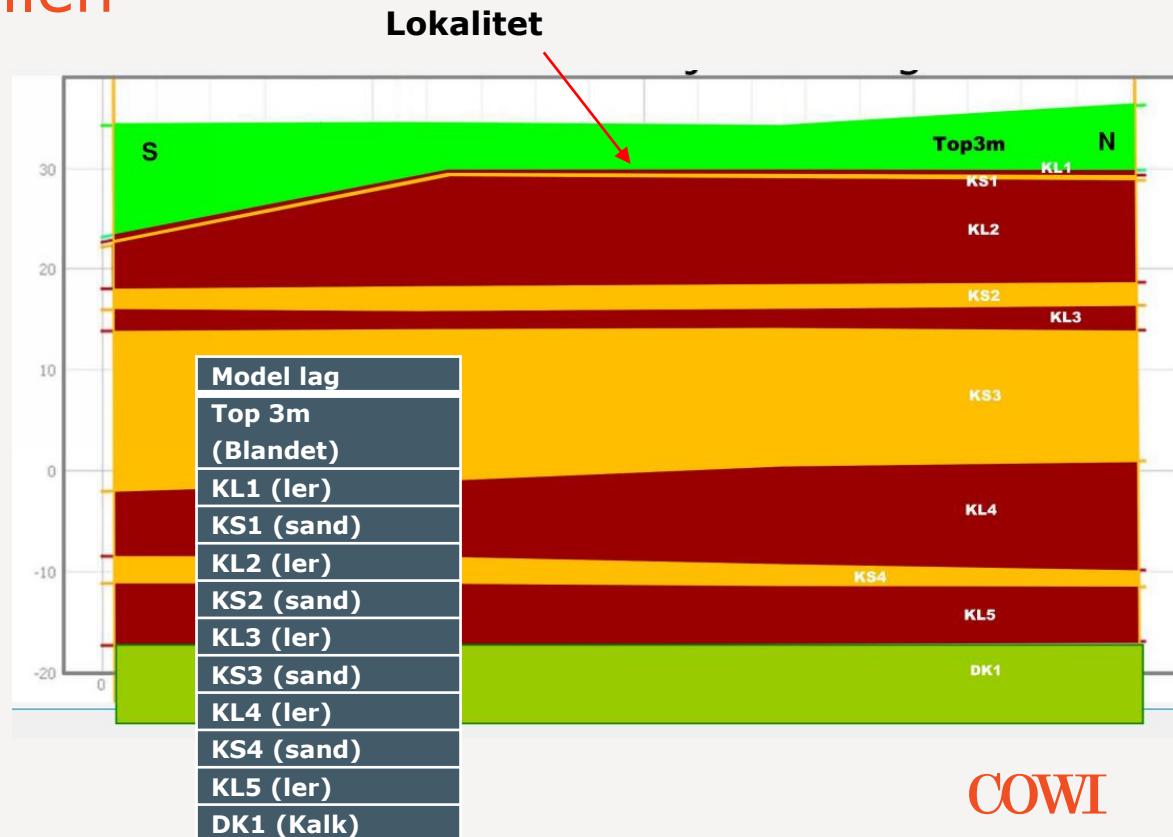
- › Ca. 70 borer til i et område på ca. 150x150 m og til dybder mellem 5 og 40 m
- › Vekslende lag af ler med sandstriber og tynde sandlag til 40 m u.t
- › Ringe korrelation mellem sandlag i forskellige borer
- › Flere vandførende lag med forskellige trykniveauer
- › Kan forklares med beliggenhed i nærhed af randmoræne
  
- › Nærmeste borer gennem hele kvartæret og til kalken
  - › ca. 500 m vest for lokaliteten
  - › ca. 400 m syd for lokaliteten

# Beslutning om opstilling af geologisk model

- › Vanskeligt at korrelere lerlag og vandførende sandlag
- › Bedre forståelse af spredningsveje
- › Bedre forståelse for store forskelle i koncentrationer samt i komponentfordeling indenfor korte afstande
- › Hjælp til placering af dybere undersøgelsesboringer
- › Støtte for risikovurdering overfor grundvandsressourcen og vandindvinding
- › Der tages udgangspunkt i Nordsjællandsmodellen

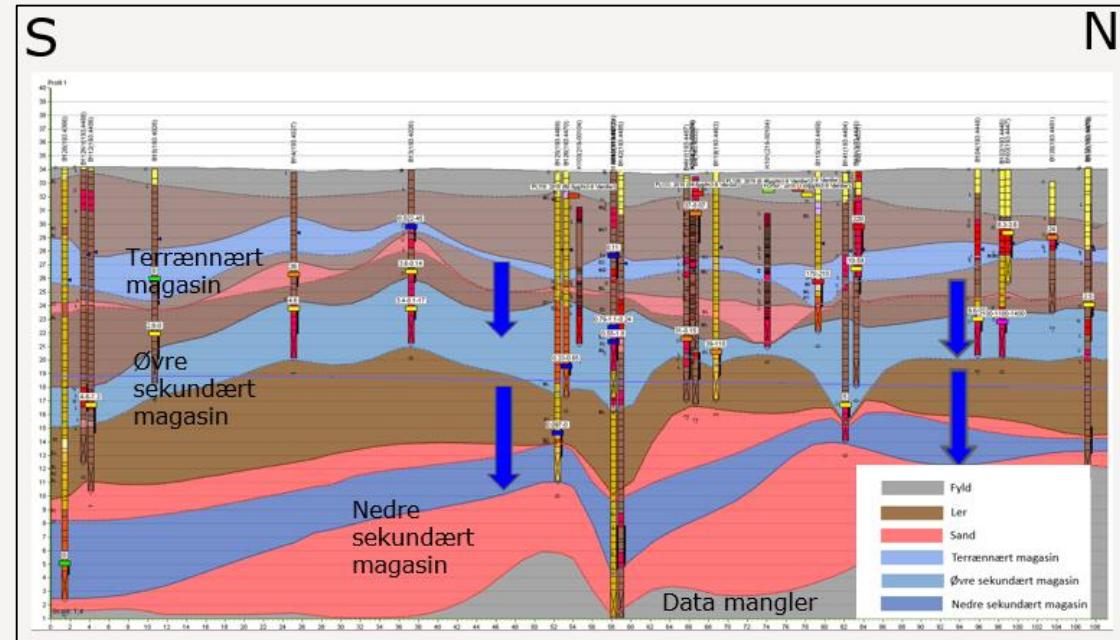
# Nordsjællandsmodellen

- › En del af DK-modellen fra april 2019
- › Dækker hele Nordsjælland
- › Geologisk model med antagelse om lagdelt geologi
- › Nord syd rettet snit gennem lokalitet
- › Lagfølgen indeholder 10 modellag
- › Modellag navngivet efter DK modellen
- › Cellestørrelse 100x100m



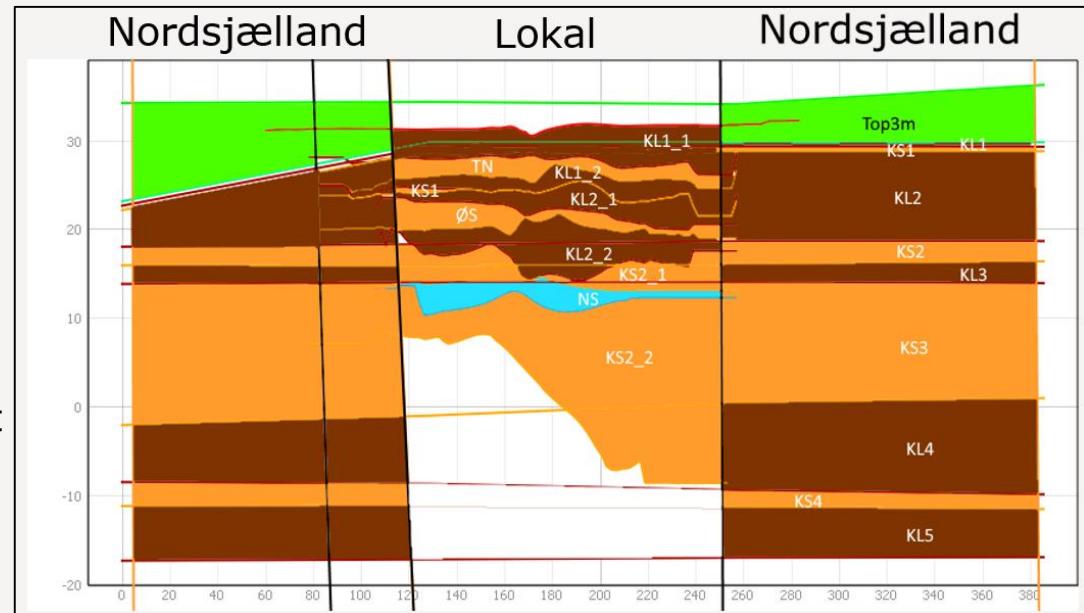
# Fra Nordsjællandsmodel til lokal geologisk model

- > Foreløbig geologisk model
- > Udgangspunkt i Nordsjællandsmodellens 4 øverste lag KL1, KS1 KL2 og KS2
- > Forfinet med data fra RH's GeoGis2020 database
- > Flere lag og højere oplosning end Nordsjællandsmodellen
- > Modelleret som lagmodel i Geoscene 3D
- > Baseret på ca. 70 borer fra 5 til 40 m u.t
- > Modellen dækker kun lokaliteten ca. 150x150 m
- > Cellestørrelse mindsket fra 100x100m til 2x2 m for at modellere den varierende geologi
- > Vekslende lag af ler med indslag af sandstriber og sand
- > 3 sammenhængende vandførende lag
- > Nedadrettet vertikal gradient



# Fra Nordsjællandsmodel til lokal geologisk model

- › Lokal model indsat i Nordsjællandsmodellen
- › Geologien passer ikke med Nordsjællandsmodellen
- › Lokal model repræsenterer ikke den varierende geologi særlig godt
- › Årsag - begge modeller bundet af antagelsen om lagdelt geologi
- › Konklusion:
  - › Lagdelte modeller ikke egnet til at beskrivelse af geologi i områder med stærkt varierende geologi
  - › Beslutning om opstilling af VOXEL model (kassemodel)

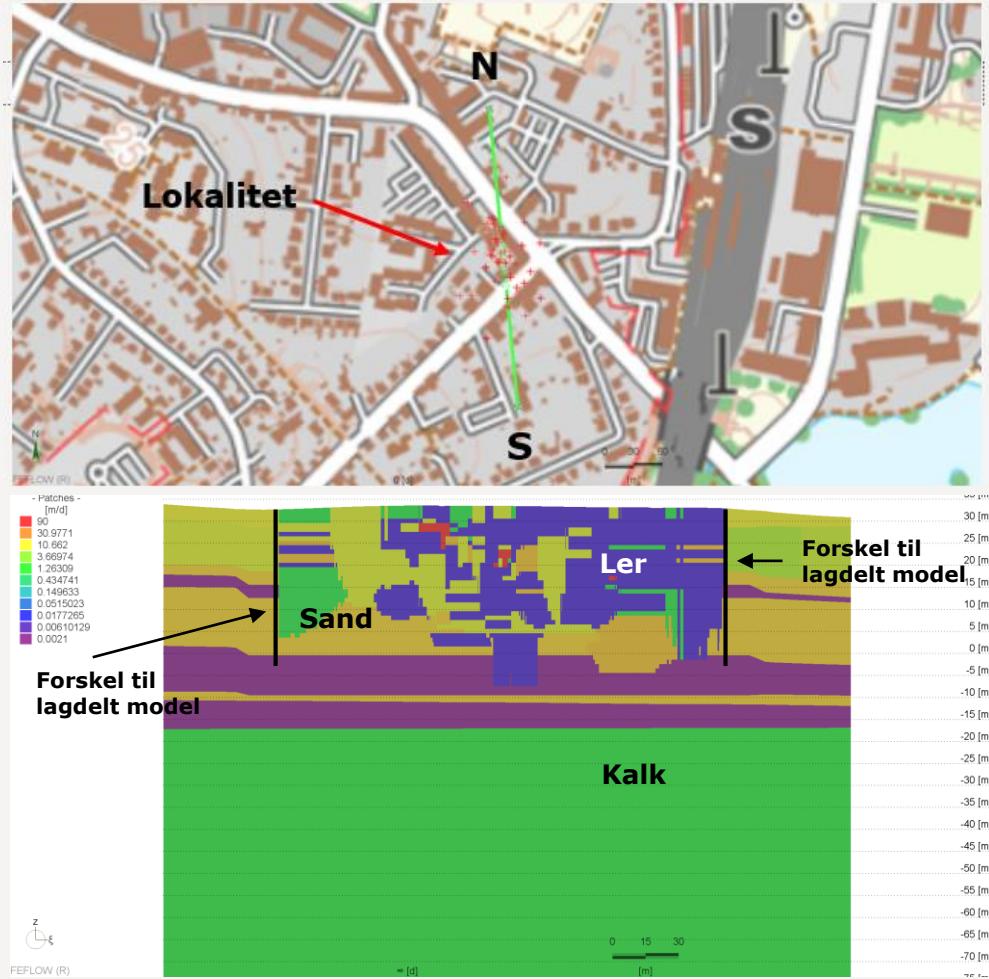


# Opstilling af ikke lagdelt geologisk model (VOXEL)

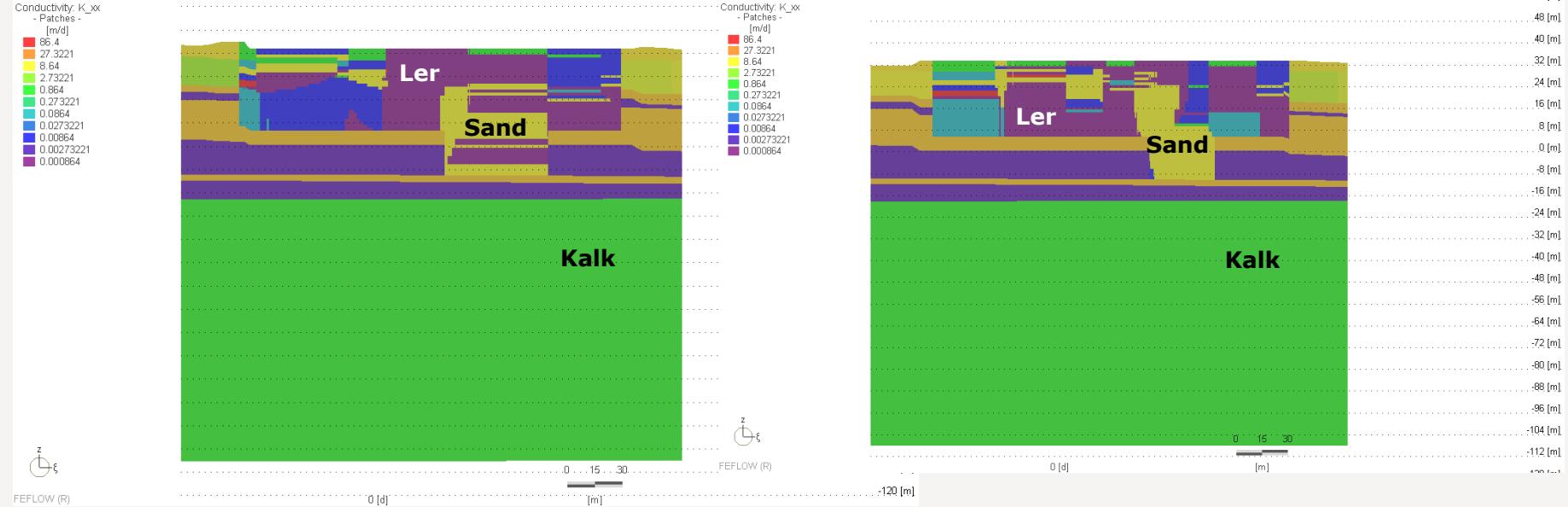
- > Voxel model – 3D grid ("kassemodel")
- > Modellen bygger på observeret geologi - muligt da mange borer
- > Interpolering af geologi i 3 dimensioner uden antagelse om lagdeling
- > Kassestørrelse: længde x bredde x højde: 2 x 2 x 1 m
- > Dækker kun lokaliteten på 150x150 m, da afhængig af data fra udførte borer
- > Kote +36 til kote -10 i alt 47 niveauer, da begrænset af dybden af udførte borer
- > Geologiske data udtrukket fra RHs GeoGIS database
- > Resultater beskrives visuelt ved at hver kasse tildeles en hydraulisk ledningsevne baseret på tabelværdier for geologiske enheder

# Ikke lagdelt model

- > Voxel model i lokalområdet indbygget i Nordsjællands modellen
- > Nord syd rettet snit gennem lokalitet
- > Regelløs blanding af ler og sand
- > Model beskriver faktiske forhold langt bedre
- > Begrænset af dybden på indgående borer
- > Siger ikke noget om evt. "skorstene" til kalken



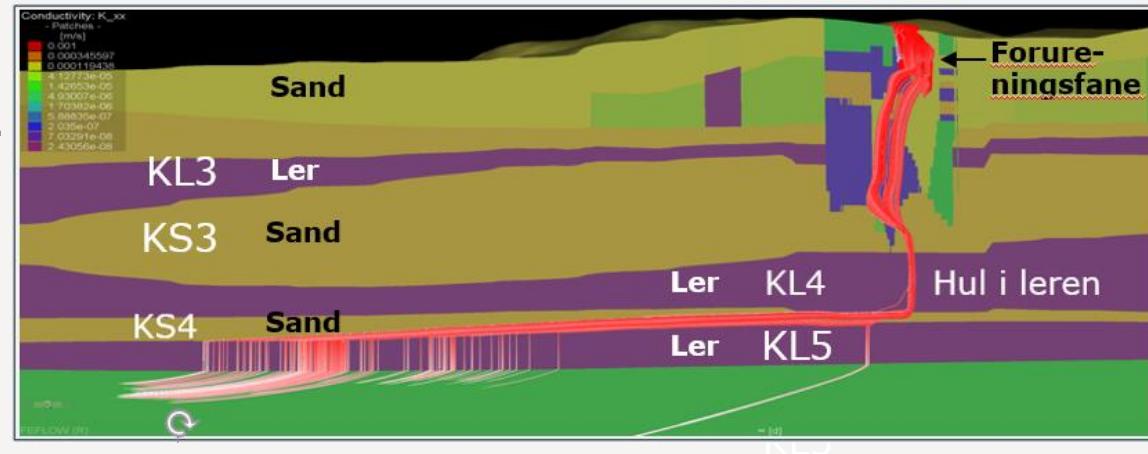
# To snit, begge N-S, med 20 meters afstand.



- › Stor variation inden for korte afstande
- › Muligt at anvende udvalgte snit som støtte ved horisontale og vertikale fluxberegninger

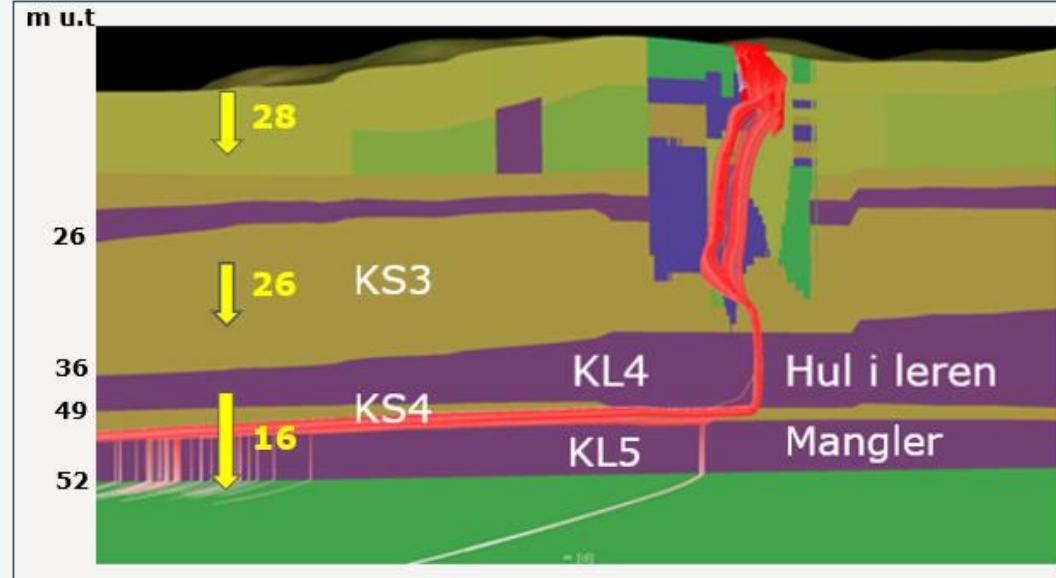
# Partikelbanesimuleringer med grundvandsmodel

- › Grundvandsmodel bygger på udsnit af Nordsjællandsmodellen
- › Dækker kildepladsen beliggende ca. 500 nedstrøms lokaliteten
- › Lokalt er lagfølgen til ca. 40 m u.t. baseret på Voxel modellen
- › Lagfølge fra ca. 40 m u.t. og til kalken er baseret på Nordsjællands modellen
- › Lerlag over kalken - antaget pga. potentialeforskelse
- › Partikelbanesimuleringer: Eks. på hul i KL4 til KS4 eller hvis KL4 mangler
- › Transporteres på top af KL5
- › Mulig transport til kalken hvor lerlaget er tyndt eller med sandstriber
- › KL4, KS4 og KL5 er ikke eftervist lokalt



# Opdatering af grundvandsmodel

- › KS3 (sand), 26 – 36 m u.t
- › KL4 (ler), 36 - 49 m u.t
- › KS4 (sand), 49 - 52 m u.t.  
Hydraulisk kontakt med kalk
- › KL5 (ler) findes ikke ved lokalitet
- › Kalkoverflade, 52 m u.t
- › Observationer afviger fra Nordsjællandsmodellen
- › Heterogene forhold vurderes ikke at omfatte hele kvartæret
- › Beskyttende lerlag (KL4) ca. 10 m tykt
- › Nedadrettet vertikal gradient
- › Trykniveau – lokalt er lerlaget (KL4) tæt pga. betydelig forskel i trykniveau mellem kalken og KS3 på ca. 10 m
- › Lerlag (KL4) udbredt pga. betydelig forskel i trykniveau mellem kalken og KS3 på ca. 10 m



# Perspektivering

## > Konklusion

- > Generelt er vurdering af forureningsspredning i jord og grundvand baseret på lagdelte geologiske forhold
- > Software til opstilling af geologiske modeller og grundvandsmodeller lægger op til lagdelt geologi
- > Faktiske forhold i randmoræneområder kan afvige kraftigt fra lagdelte modeller
- > Lagdelte modeller er ikke retvisende i områder med stærkt varierende geologi (randmoræner)

## > Muligheder med ikke lagdelt model

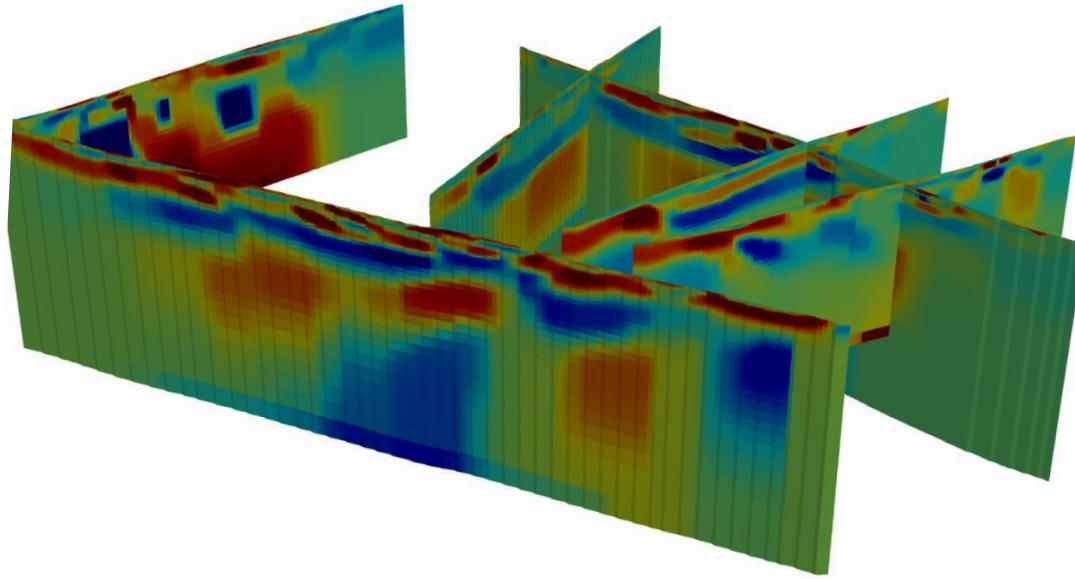
- > Anvendelse af en ikke lagdelt model (kassemodel) beskriver de inhomogene forhold langt bedre
- > Betyder mere robust beskrivelse af de geologiske forhold
- > Bedre baggrund for at forstå store forskelle i koncentrationer og komponentsammensætning indenfor korte afstande
- > Afgørende for vurdering af, hvordan forurenningen spreder sig
- > Bedre grundlag for fluxbestemmelse
- > Grundvandsmodel kan kombineres med stoftransportmodel og give koncentrationer til fluxbestemmelser
- > Betyder mere sikker risikovurdering overfor grundvandsressourcen og vandindvindingen



Kompliceret geologi giver  
kompliceret forureningspredning  
ved losseplads. DCIP giver den  
nødvendige forståelse

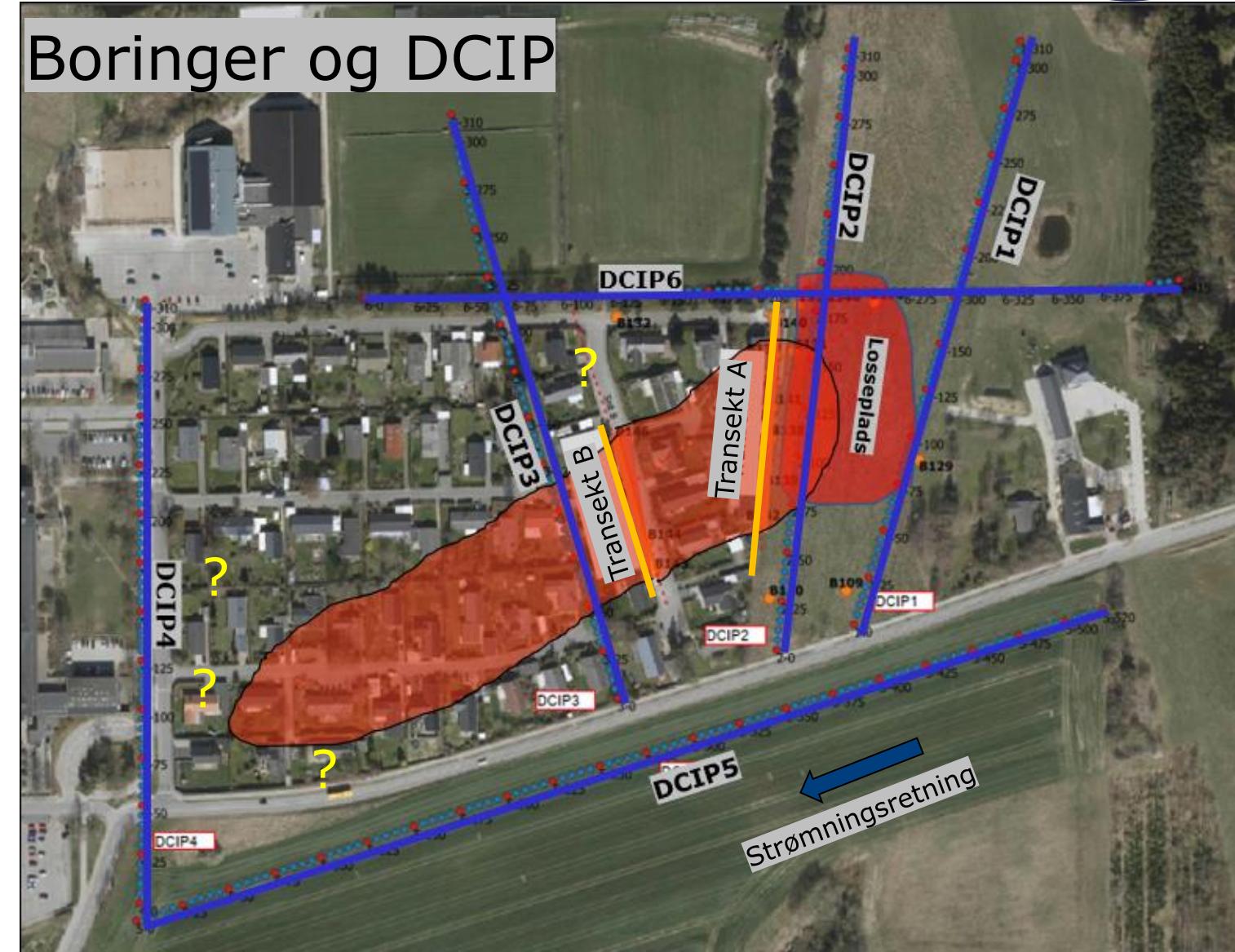
Bettina M. Olsen  
Geolog, cand.scient., DMR A/S

Nanna Muchitsch og Per Loll, DMR A/S  
Helle Overgaard og Nina Tuxen, Region Hovedstaden  
Poul L. Bjerg, DTU Miljø

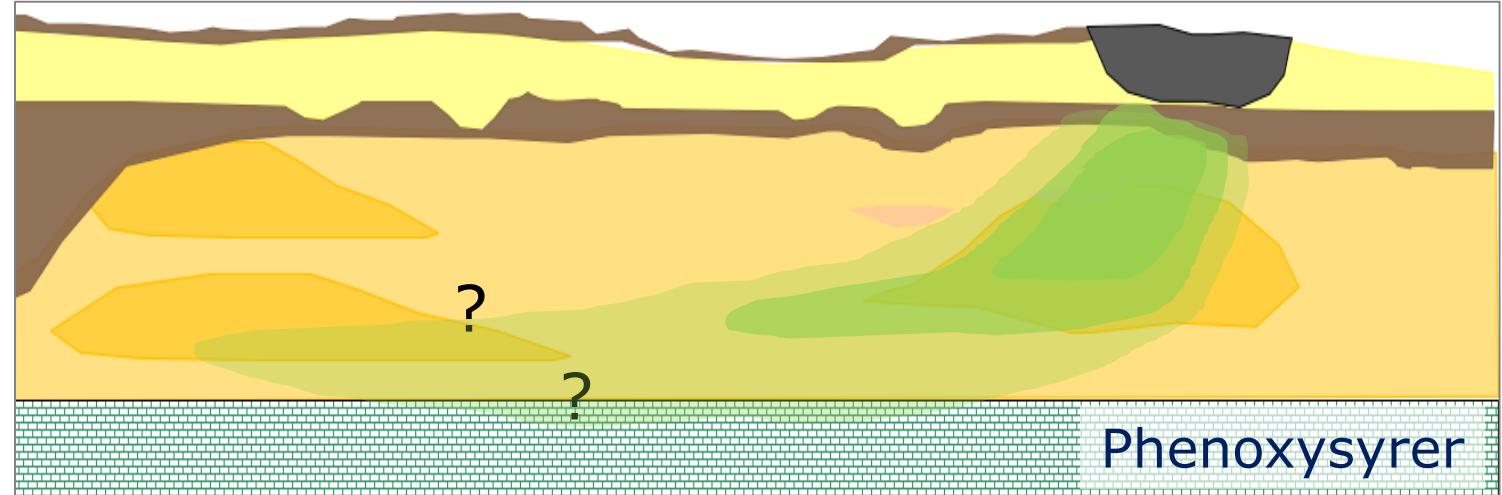
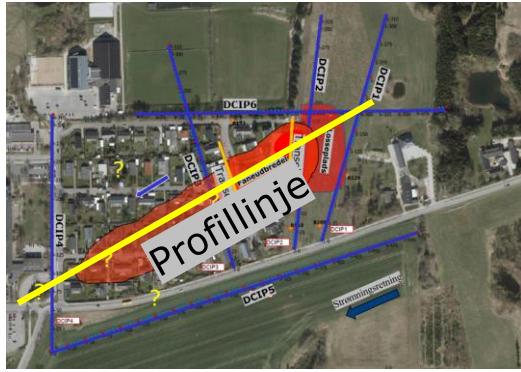


# Undersøgelser

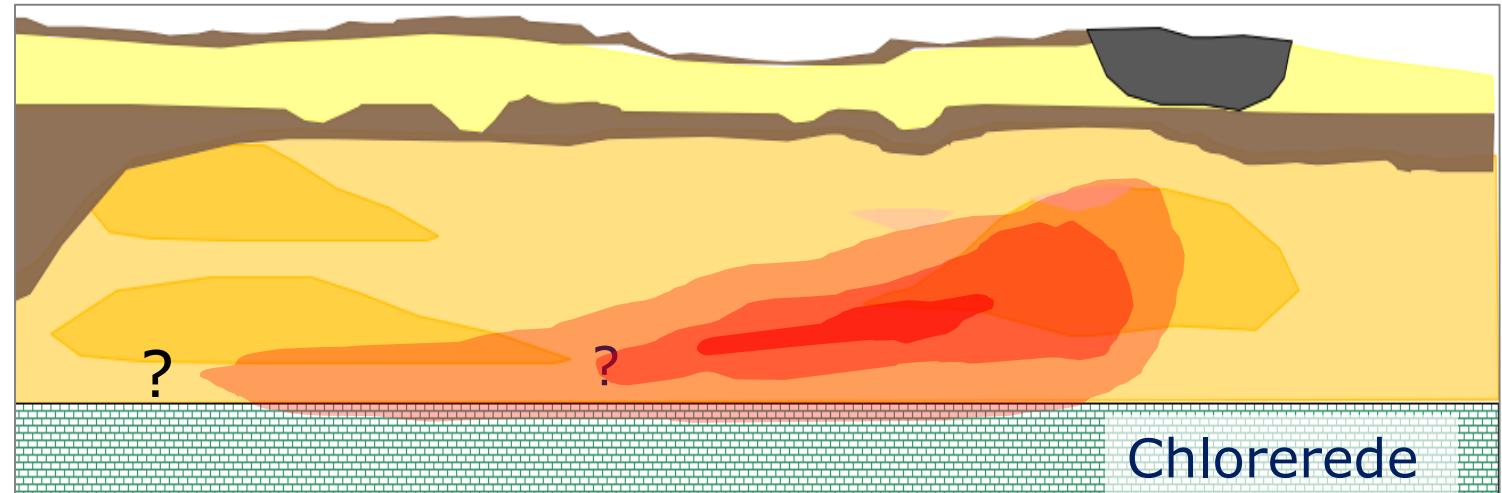
- Undersøgt med mange borer i og omkring kilden
- To boringstransekter- et kildenært (A) og et nedstrøms (B) til 55 m u.t.
- En boring til kalken (70 mut) i transekt B
- Forurening med cis-DCE og vinylchlorid. Højeste koncentration i transekt B
- Forurening med phenoxyssyrerne 2,4DP og 4CPP
- Forurening ikke afgrænset nedstrøms og delvist mod nord



# Grundvandsforureningen - før geofysik

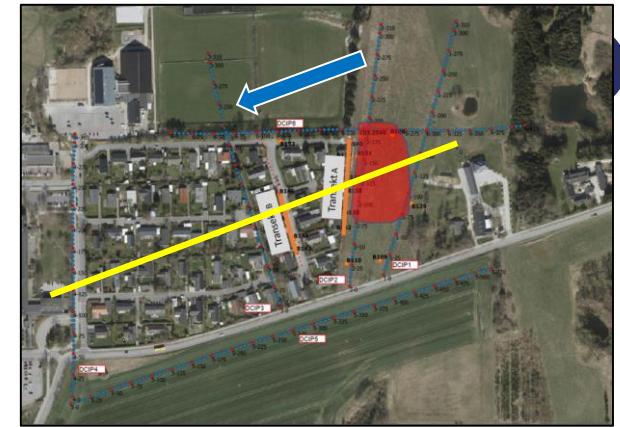


- Fanen dykker hurtigt ned i det nedre sandmagasin ved lossepladsen
- Uvist om vi har fundet det værste
- Boringer til 55 m u.t. er dyre
- DCIP blev valgt forud for boringsplacering



# Geologi

Umiddelbart en simpel geologi  
To sandmagasiner mellemlejret af et morænelerslag

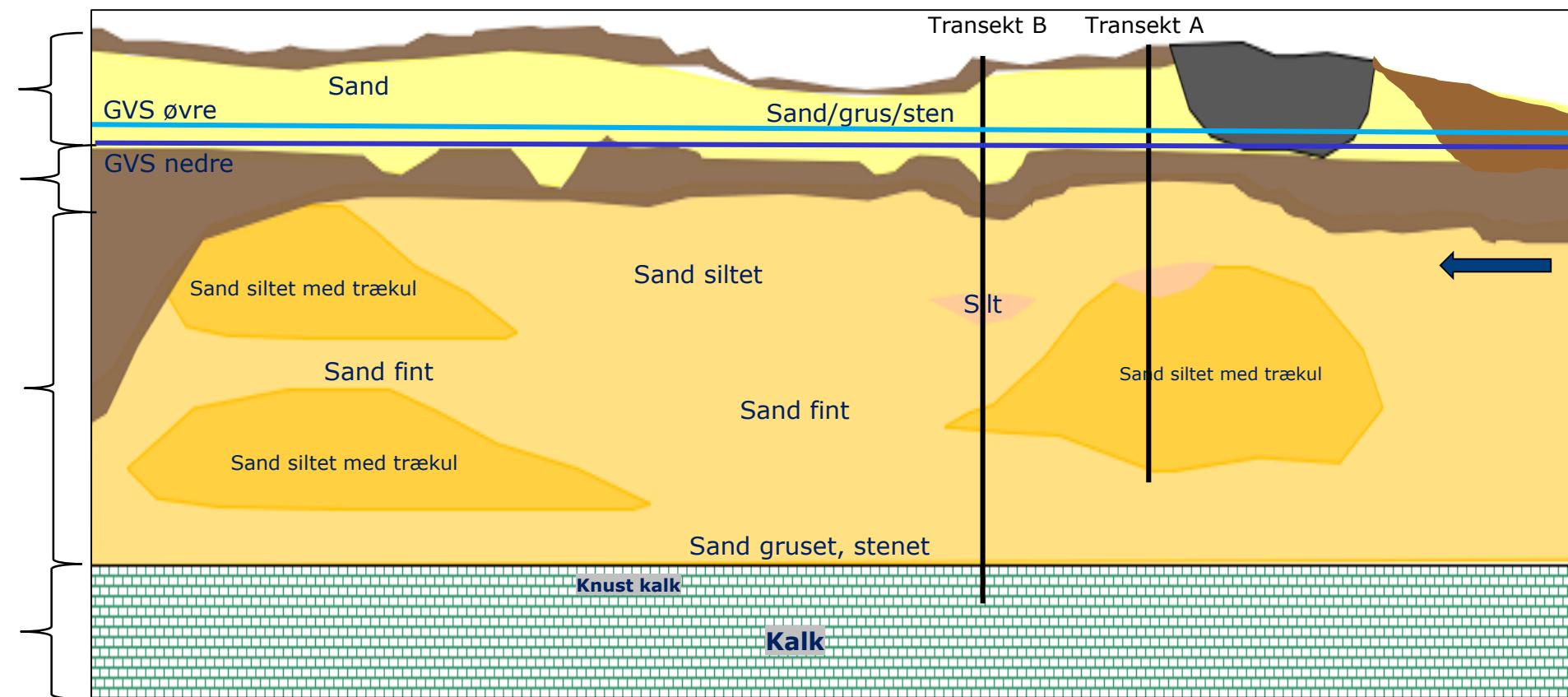


Øvre magasin, 1-16 m  
u.t. Sand med ler i  
dødishuller

Morænelerslag (tør)  
16-22 m u.t. meter

Nedre magasin,  
22-57 m u.t.  
Smeltevandssand

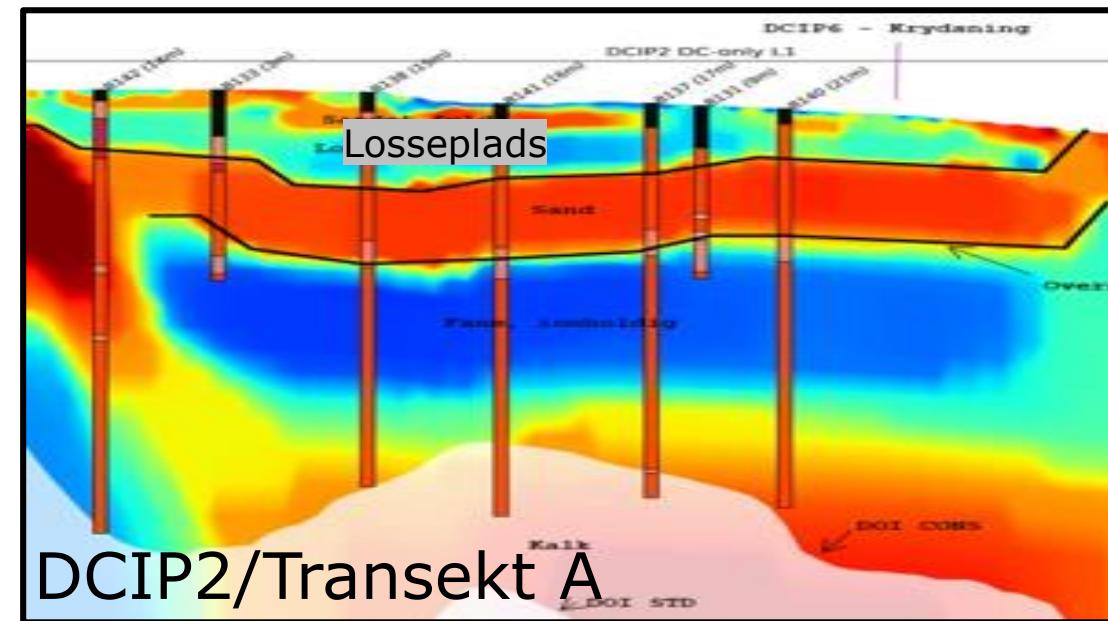
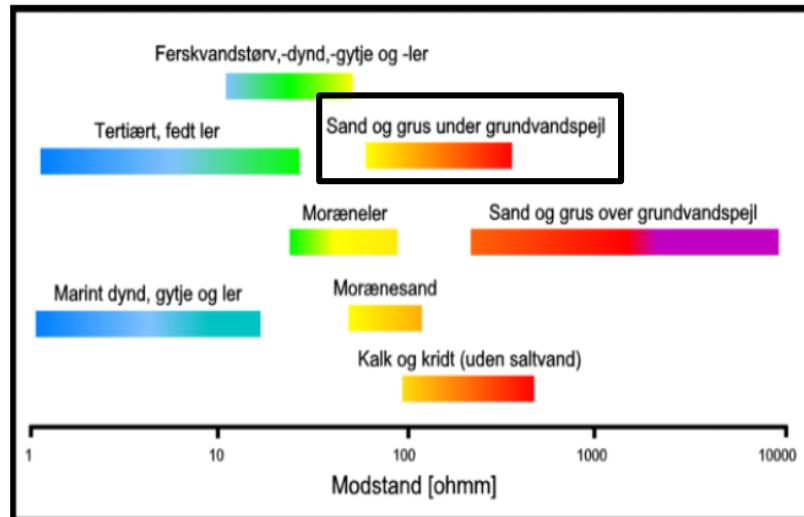
Primært magasin  
Kalk, 57 m u.t.  
Knust i toplaget



Forventet modstand i mættet sand (gul-rød) = 80-700 ohmm

I DCIP2 - parallel med transekt A – ses lave modstande (blå) hvor geologien i transekt A er mættet sand.

Ioniseret porevand = ændring i grundvandskemi = indikation på forurening



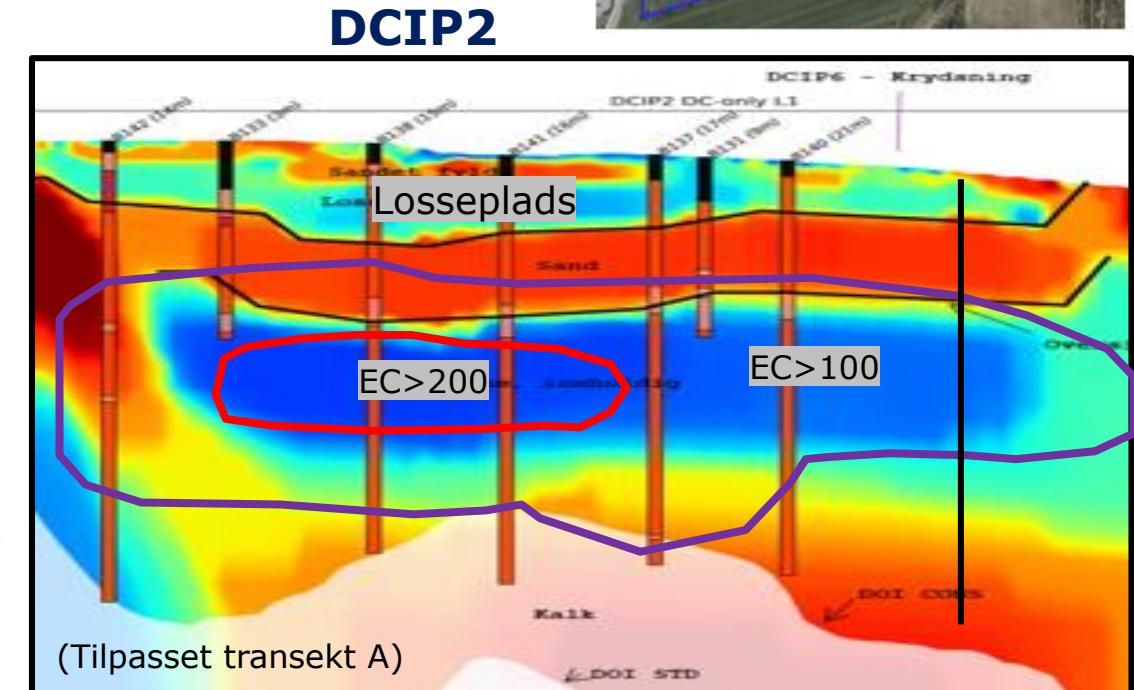
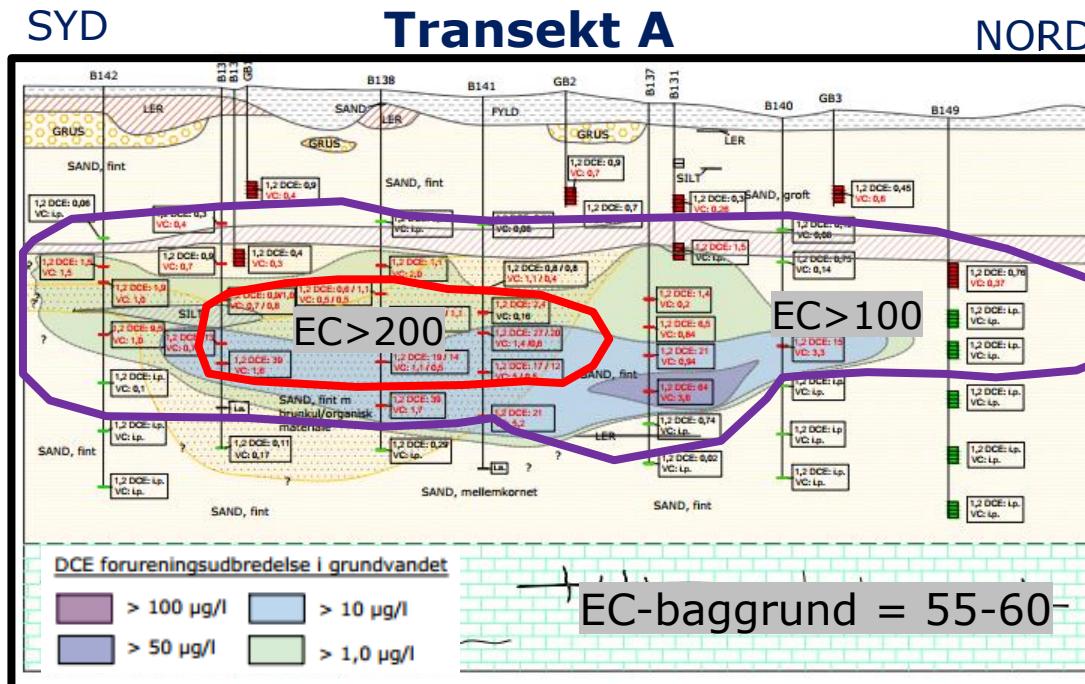
# Ledningsevne (EC)



Overordnet set en god sammenhæng mellem forureningsudbredelsen (perkolat), ledningsevnen (EC) og DCIP2 i transekt A.

Det samme for Transek B og DCIP3 dog befinder forurening med chlorerede sig dybere end de højeste EC.

Mikrofaner i perkolatfanen kan ikke måles direkte med DCIP.

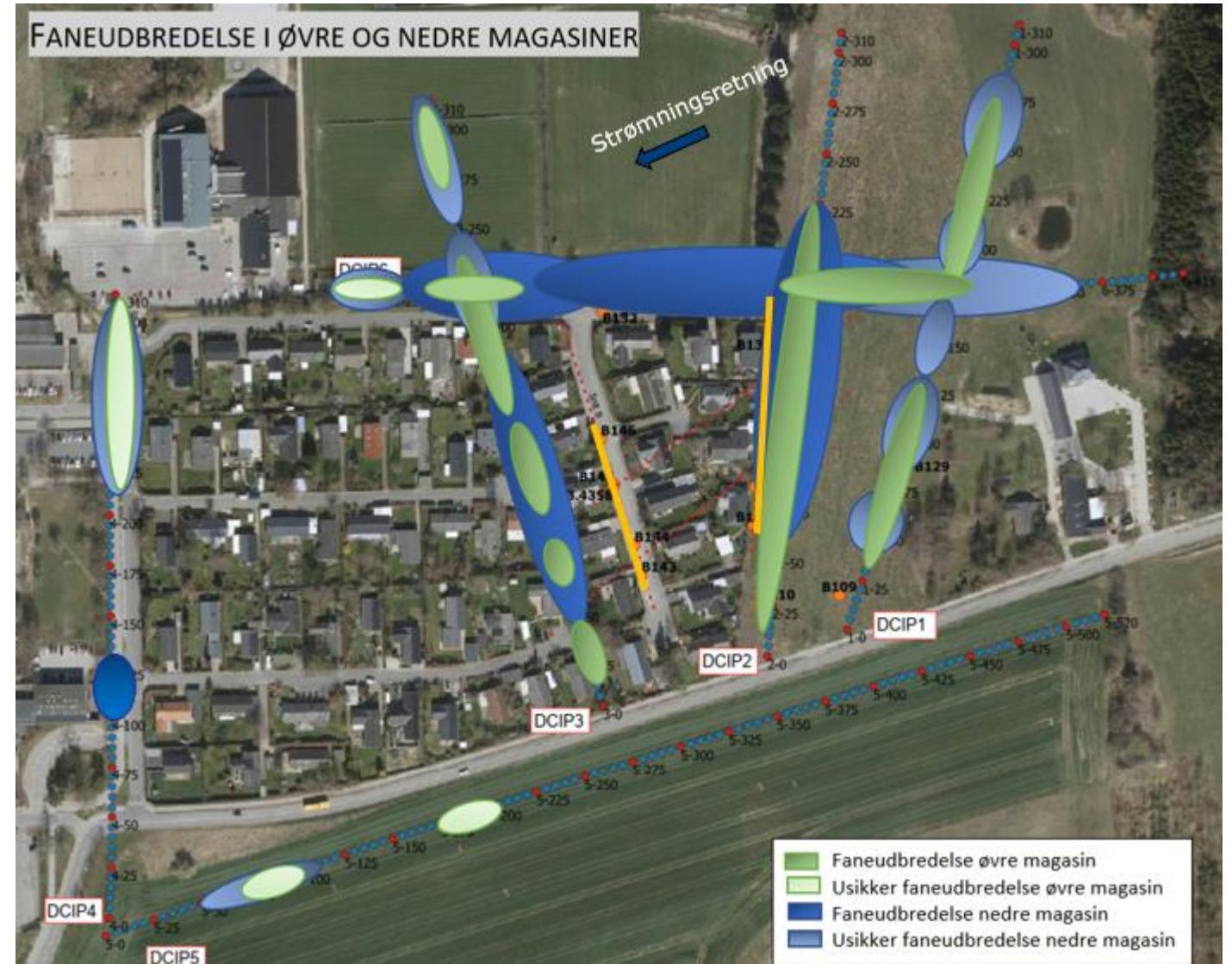


# DCIP-fane – øvre og nedre magasiner



- DCIP-“fane” i øvre sekundære magasin (grøn) er sammenhængende ved lossepladsen, men deler sig op både vest og øst for lossepladsen.
- DCIP-“fane”-i nedre grundvandsmagasin (blå) er også sammenhængende kildenært og ser ud til at være delt op i flere ”dykkende” faner (nordlig linje) og splittet op længst nedstrøms (350 m).

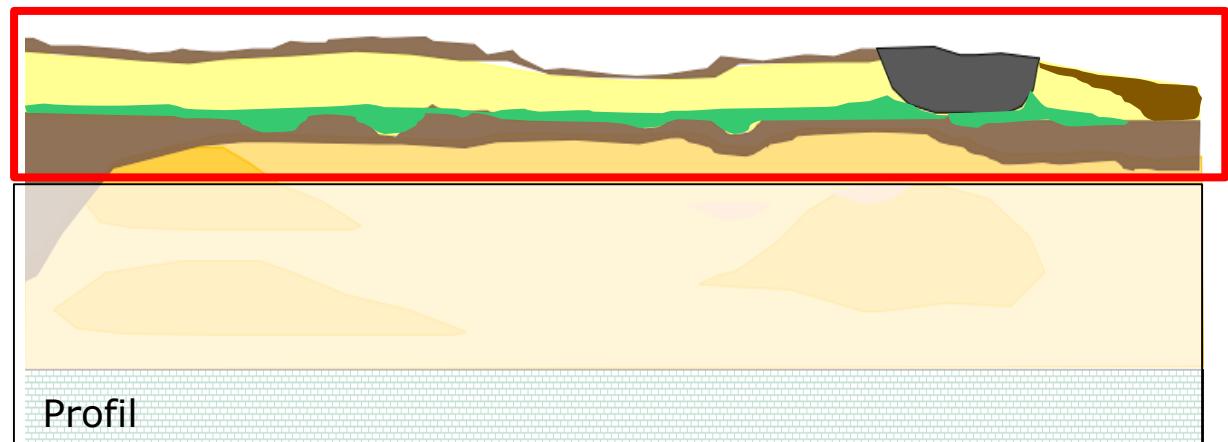
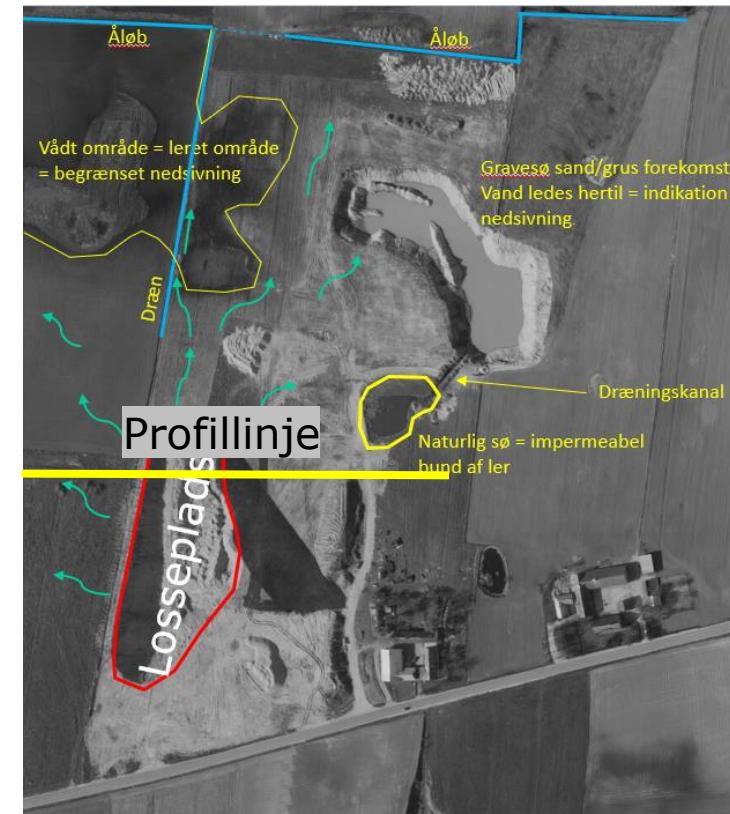
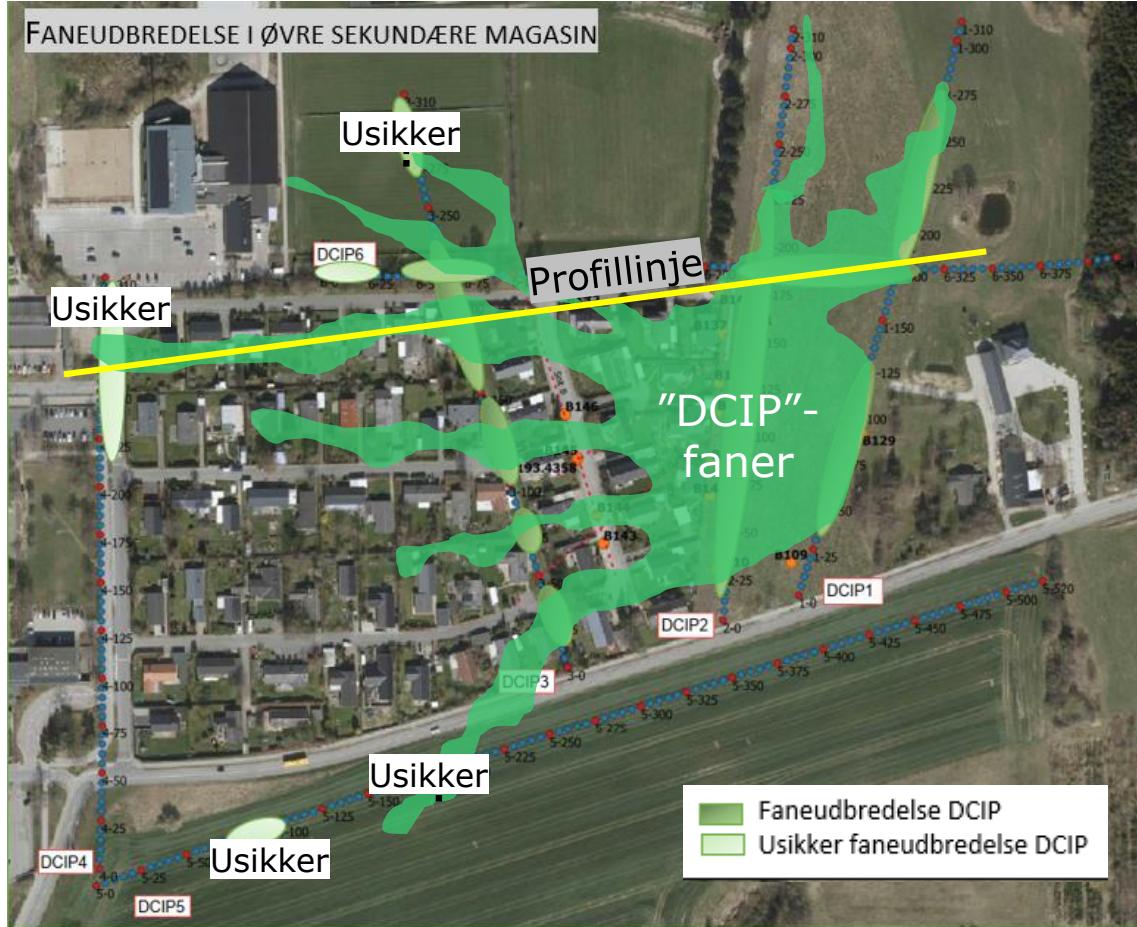
OBS! DCIP-“fane” er tolket udelukkende ud fra DCIP-data og er ikke det samme som forureningsfanen



# Forureningssspredning DCIP

## Øvre sekundære magasin

Dødislandskab – sand med ler i dødishuller

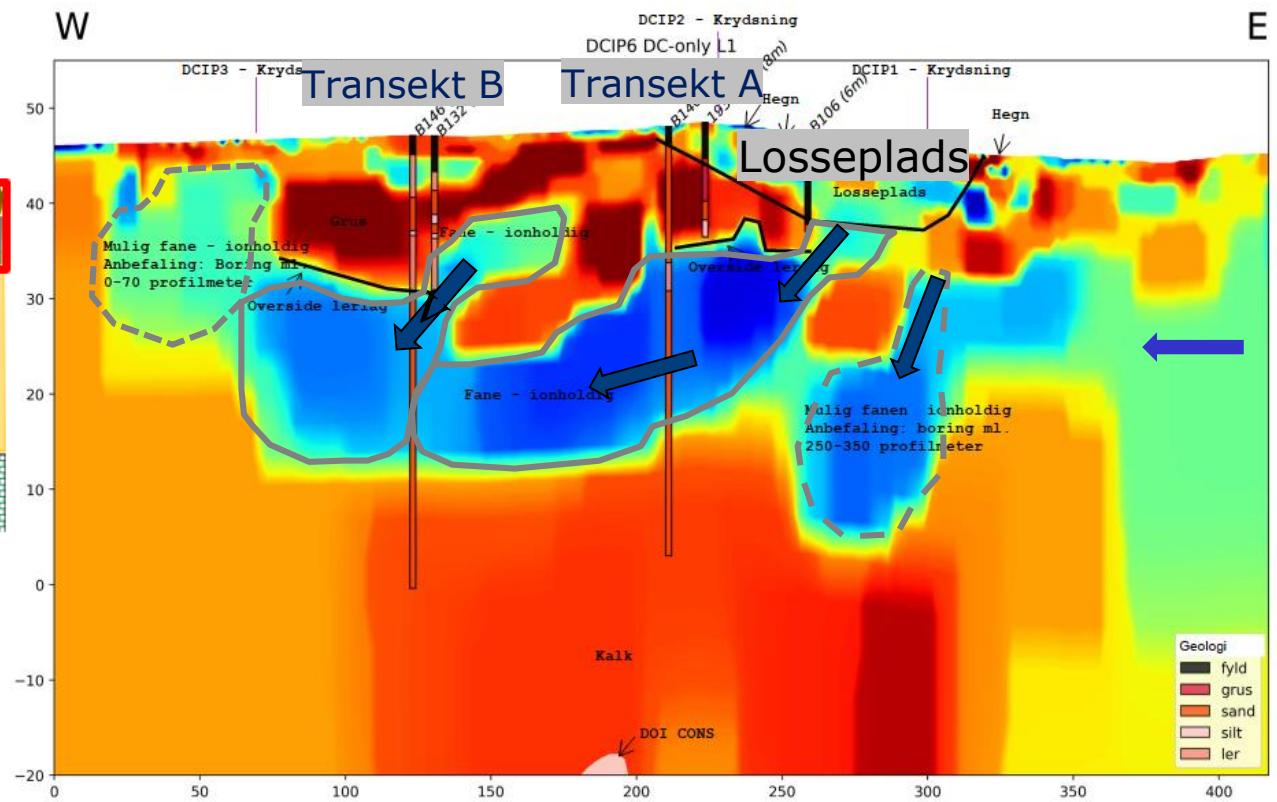
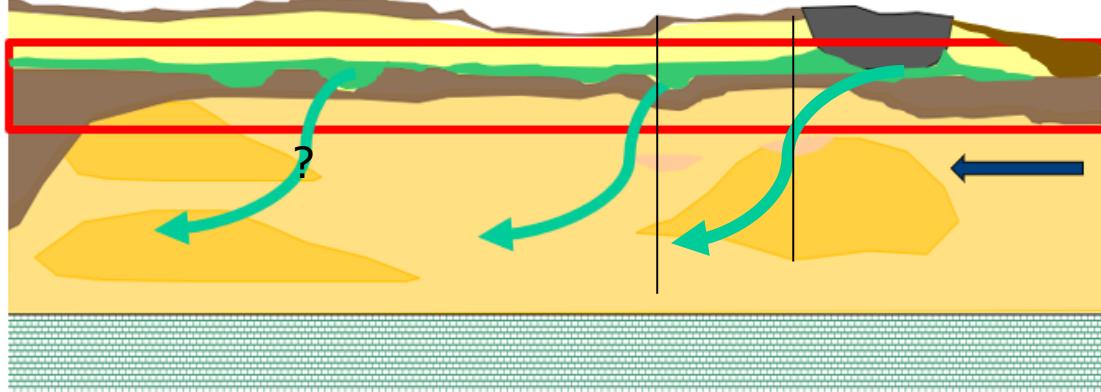


# DCIP6 – langsgående nordligt profil



Ud fra DCIP-data er der tegn på 2-3 faner der dykker ned efter hinanden.

Fanerne ser ud til at dykke ned hvor lerlag ligger dybere (lavning) eller er tyndere.



# Forureningspredning – øvre til nedre



## Morænelerslaget

Morænelers-lag på 0-6 meters tykkelse

Smeltevandskanaler fra gletsjeren har eroderet den tynde morænelersflade og skabt huller og lavninger i moræneleren.

Der er i borerne observeret at mægtigheden af vådt sand er større i de borer hvor moræneleren er tyndest eller hvor overfladen ligger lavere.

Det tyder på at grundvandet transportereres i disse lavninger

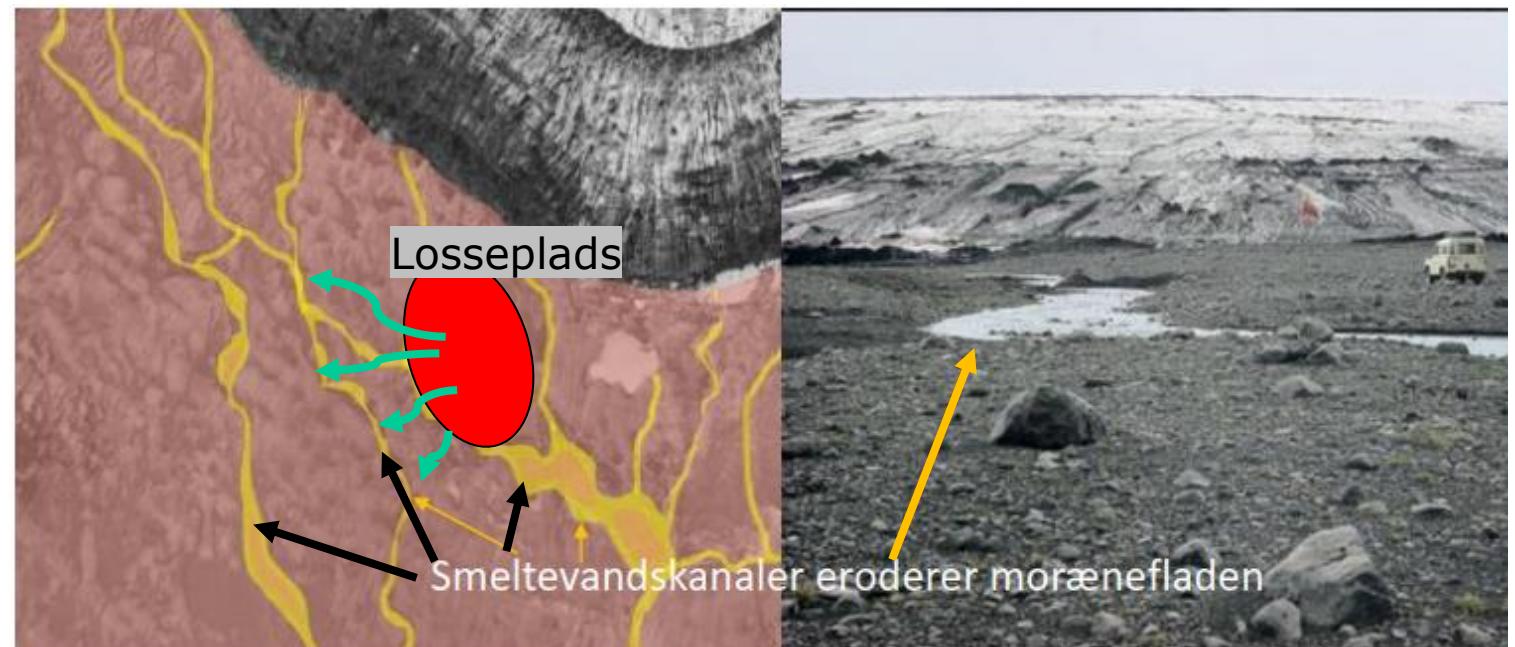
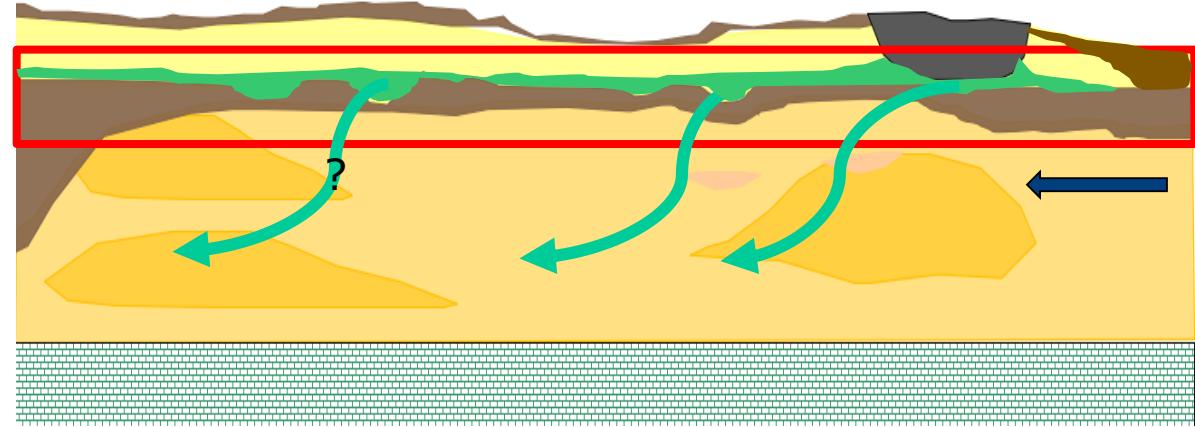
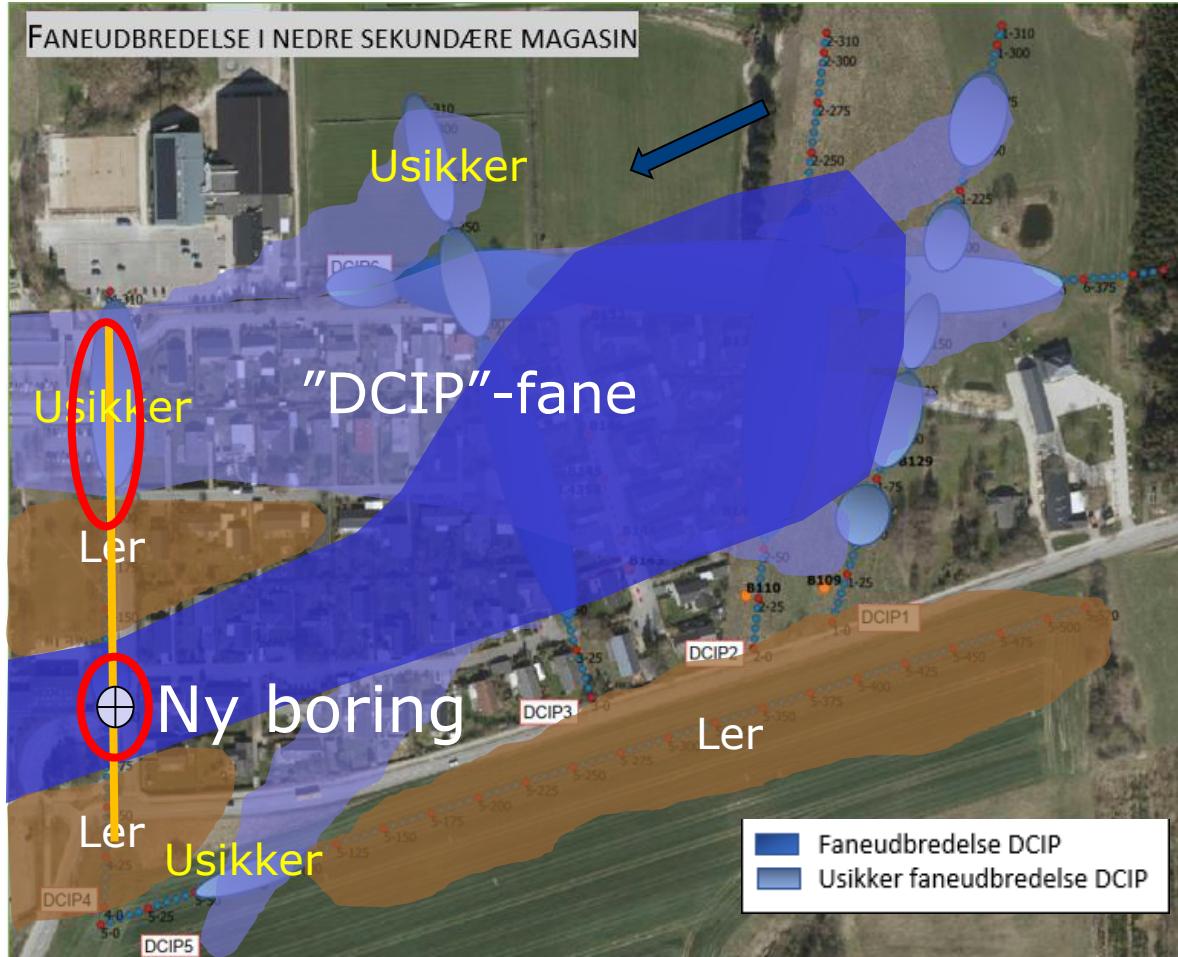


Foto: Knud Erik Klint

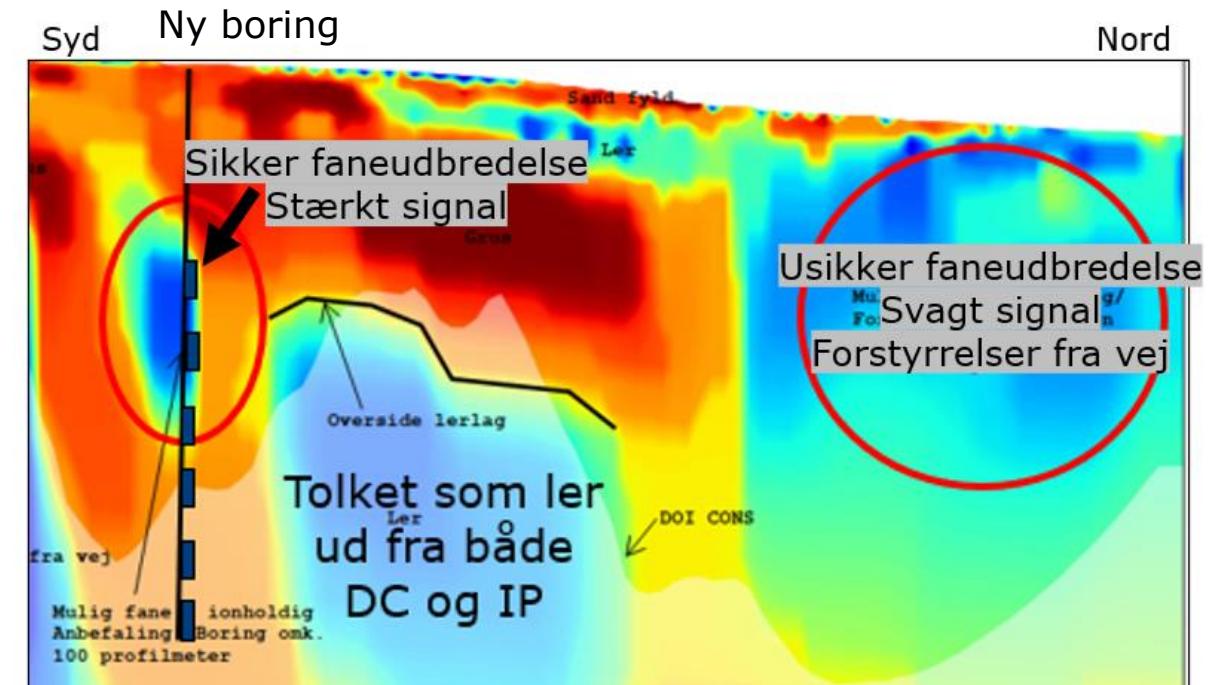
# Forurenningsspredning DCIP

## Nedre magasin



Alene ud fra DCIP ser det ud til at fanen splitter sig op i 2 (evt. 3) mindre faner nedstrøms som strømmer imellem lerforekomster

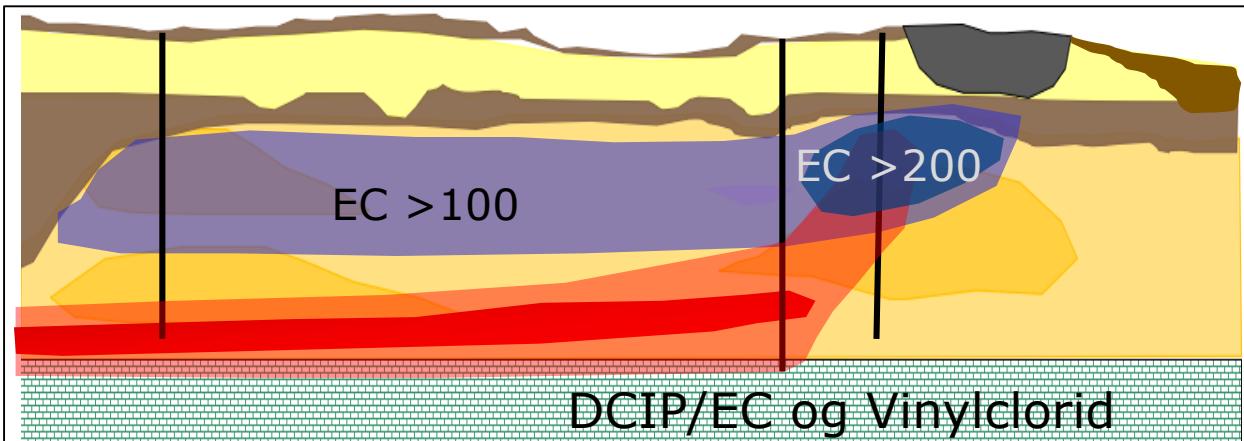
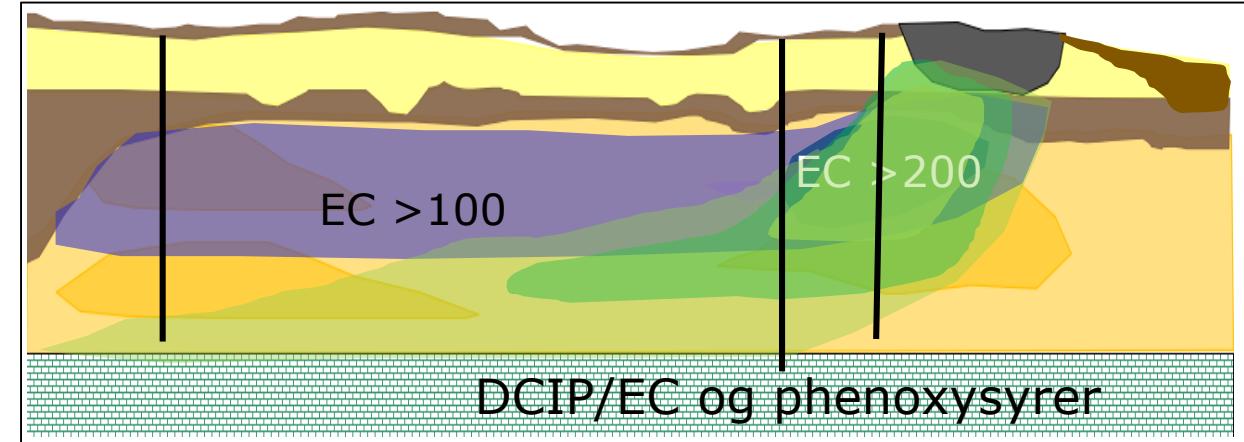
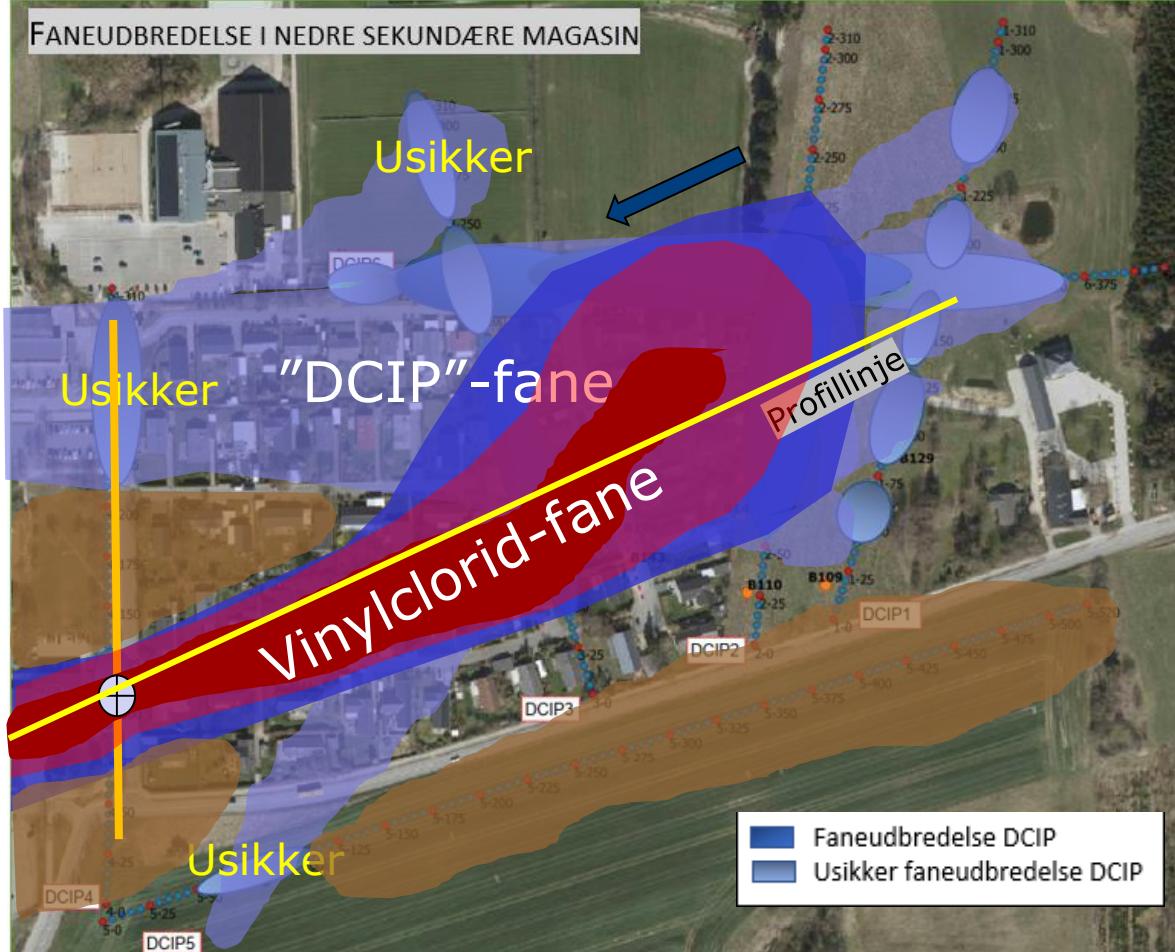
Nordligste og sydligste dog noget usikre



# Forurenningsspredning efter geofysik og ny boring

Fund af højeste koncentration af vinylchlorid i ny boring

Phenoxyssyrer tilsvarende GV-kriteriet i ny boring



# Hvorfor virker DCIP her?

1. Der var signifikant forskel i EC-baggrund (55-60 mS/m) og EC-perkolatfane (100-250 mS/m) i vandprøverne. Forhøjet EC er tegn på ionholdigt porevand/-grundvand, som DCIP kan måle. Ioniseret porevand er tegn på forurening.
2. Der er tale om et stort, relativt homogent sandmagasin hvor den geofysiske modstand (DC-data) er høj (80-700 ohmm). Ler og ioniseret porevand (forurening) har samme lave modstand (< 70 ohmm). Forurening vil da fremstå som fed ler på DC profilet.
3. IP-data anvendes til at supplere DC-målinger for tolkning af om der er tale om ler eller forurening i områder, hvor der ikke er oplysninger fra borer.

OBS! De geofysiske data bør altid verificeres med borer for korrelation med geologi.

# Opsummering



Geologien i det øvre magasin og det relativt tynde lag af ler har haft betydning for både den horisontale og vertikale spredning af forurening til det nedre sekundære magasin.

To store forekomster af ler i det nedre sandmagasin har muligvis bidraget til at forurenningen har kilet sig ind til en smal fane.

DCIP-fanen er ikke én til én med forureningsfanen, men DCIP kan anvendes som faneindikator, der kan optimere placeringen af de afgrænsende borer.

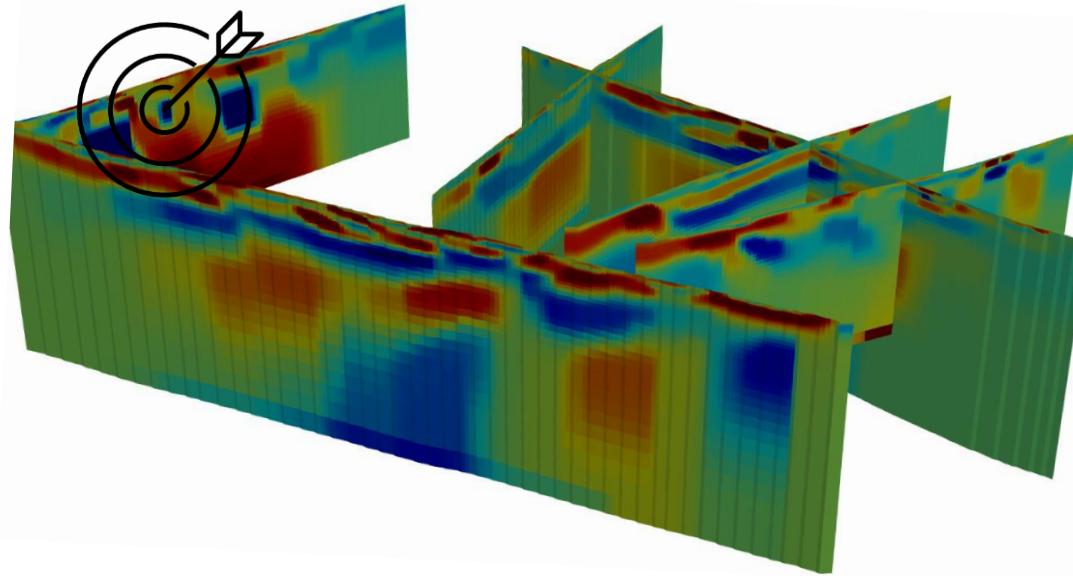
DCIP anbefales, hvis der er tale om forurening i et stort sandmagasin og der er forhøjet ledningsevne ( $EC > 100$ ) i forureningsfanen.

Metoden er billig set i forhold til afgrænsende borer. En dyb boring til 55 m koster det dobbelte af de seks DCIP-linjer tilsammen.

Planlagt flere DCIP-målinger i 2021.

Tak for opmærksomheden

Bettina M. Olsen  
[bmo@dmr.dk](mailto:bmo@dmr.dk)



# Vurdering af pris, effekt og CO<sub>2</sub>- aftryk ved udvalgte teknikker til afværge i lavpermeable medier

ATV Vintermøde, 10. marts 2021

Nina Tuxen, Region Hovedstaden og

Thomas H. Larsen, WSP

Samt mange gode kolleger

# Indhold

---

- Introduktion
- Kort om teknikkerne
- Sammenligning af teknikker
- Scenarier
- Resultater og diskussion
- Konklusion og Perspektivering



# Introduktion

- Baggrund
  - Afværge i lavpermeable aflejringer er svært og dyrt
  - I dag bruges næsten kun afgraving og termisk i Region Hovedstaden
  - Begge er kendetegnede ved at "vi" er blevet ret gode til dem, men de har også ulemper (fx stort CO<sub>2</sub> aftryk, pladskrævende)
  - Vi ønsker at anvende mere bæredygtige afværgemetoder
  - Vi har på pilotskala arbejdet med flere alternativer, der alle har vist lovende takter
- De store spørgsmål
  - Hvilke(n) teknik er bedst ?
  - Hvordan kommer vi fra udviklingsprojekt til "almindeligt" afværgeprojekt ?
- Proces
  - Intern workshop med sagsansvarlige
  - 3 "syntetiske" afværgeprogrammer
  - Sammenligning på tværs, herunder interaktiv præsentation for kolleger

# Kort om teknikkerne

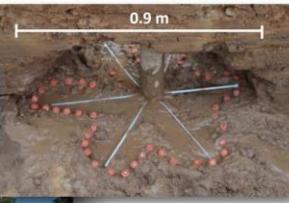
## Opgravning



## Termisk



## Jetinjektion



## Elektrokinetik



## Soilmixing



# Sammenligning af teknikker

- Systematisk tilgang der gör os bevidste om hvad der er afgørende for valg
- Parametre
  - Pris
  - Sikkerhed for prisen holder
  - Carbon Footprint
  - Lokale gener
  - Sikkerhed for effekt, at målet nås
  - Anlægsarbejdets varighed
  - Oprensningens samlede varighed
- Kvantitative/kvalitative

*Mindst er bedst*

| Teknik                      | Pris<br>mill kr. | Sikkerhed for<br>pris<br>(0-5) | Carbon<br>Footprint<br>ton CO2 | Lokale gener<br>(0-5) | Sikkerhed for<br>effekt<br>(0-5) | Anlægs-<br>arbejdets<br>varighed<br>mdr. | Samlet<br>varighed<br>år |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|--------------------------|
| Jet injektion               | 5.5              | 3                              | 80                             | 2                     | 2                                | 3  | 5                        |
| Soil Mixing, med<br>bygning | 13               | 4                              | 1100                           | 5                     | 3                                | 12                                       | 1                        |
| EK (Bio)                    | 7                | 4                              | 100                            | 4                     | 3                                | 6  | 5                        |
| Termisk                     | 7.5              | 1                              | 200                            | 3                     | 1                                | 12                                       | 1                        |
| Opgraving med<br>bygning    | 14               | 1                              | 500                            | 5                     | 1                                | 12                                       | 1                        |

# Scenarier i syntetiske afværgeprogrammer

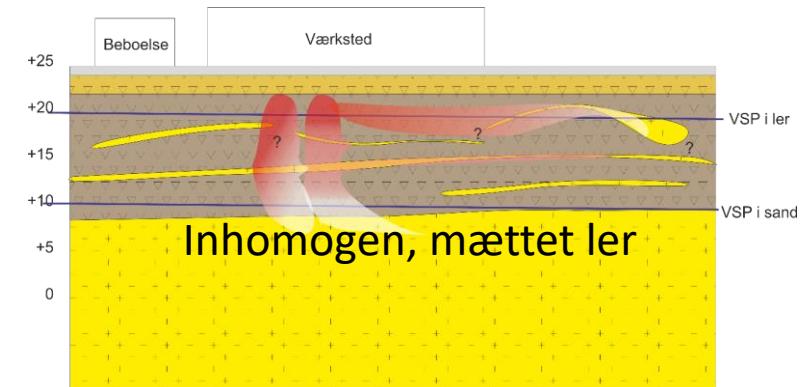
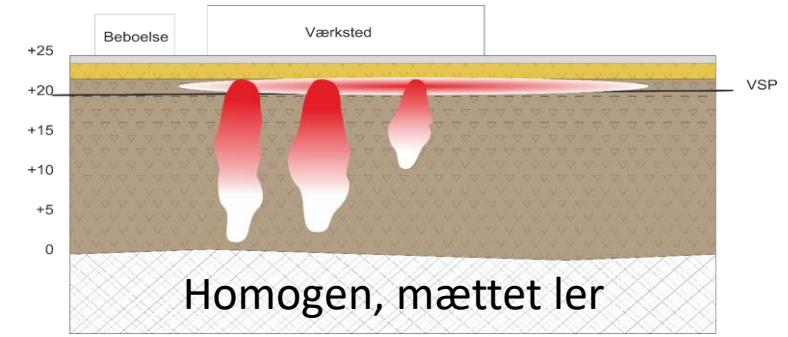
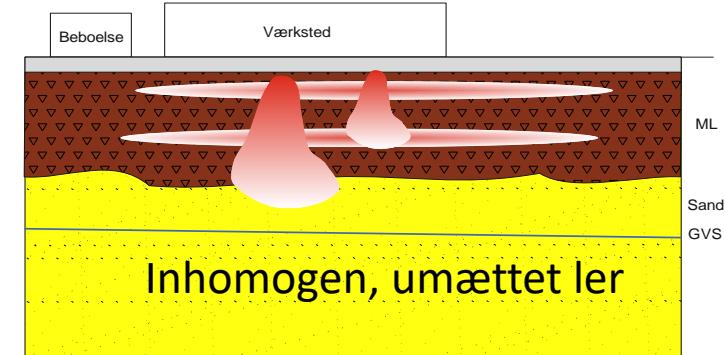
For alle:

2-3 hotspots

Med/uden bygning

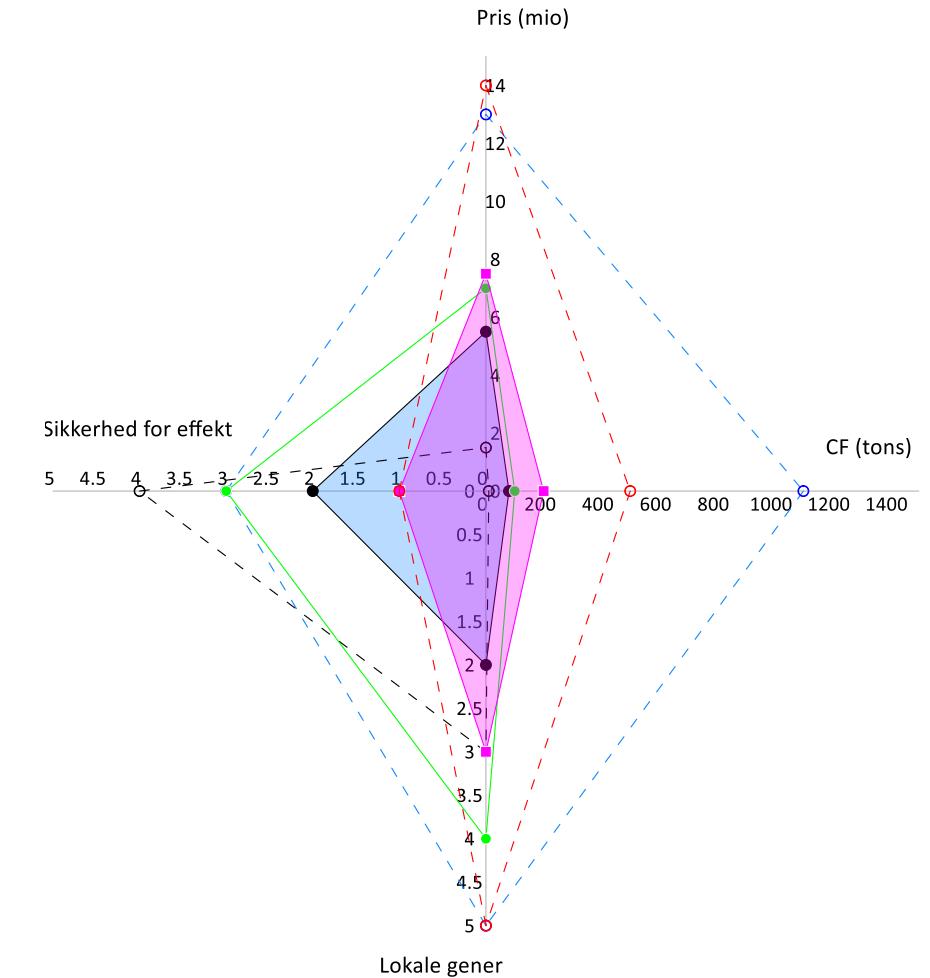
90% stoffjernelse krævet

|                                      | Forurenset<br>areal<br>$m^2$ | Behandlings-<br>dybde<br>m | Behandlings-<br>volumen<br>$m^3$ | Masse<br>kg |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------|
| Inhomogen,<br>umættet ler            | 500                          | 14                         | 7.000                            | 250         |
| <b>Homogen,</b><br><b>mættet ler</b> | <b>400</b>                   | <b>16</b>                  | <b>2.500</b>                     | <b>300</b>  |
| Inhomogen,<br>mættet ler             | 250                          | 14                         | 2.700                            | 200         |



# Eksempel på sammenligning

| Teknik                      | Pris<br>mill kr. | Sikkerhed<br>for pris<br>(0-5) | Carbon<br>Footprint<br>ton CO2 | Lokale<br>gener<br>(0-5) | Sikkerhed<br>for effekt<br>(0-5) | Anlægs-<br>arbejdets<br>varighed<br>mdr. | Samlet<br>varighe-<br>dår |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|---------------------------|
| Jet injektion               | 5.5              | 3                              | 80                             | 2                        | 2                                | 3  | 5                         |
| Soil Mixing, med<br>bygning | 13               | 4                              | 1100                           | 5                        | 3                                | 12                                       | 1                         |
| EK (Bio)                    | 7                | 4                              | 100                            | 4                        | 3                                | 6  | 5                         |
| Termisk                     | 7.5              | 1                              | 200                            | 3                        | 1                                | 12                                       | 1                         |
| Opgraving med<br>bygning    | 14               | 1                              | 500                            | 5                        | 1                                | 12                                       | 1                         |

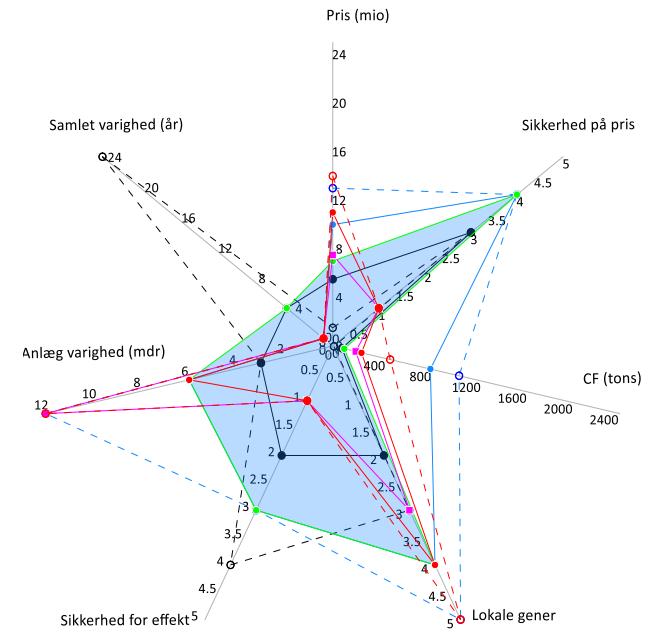
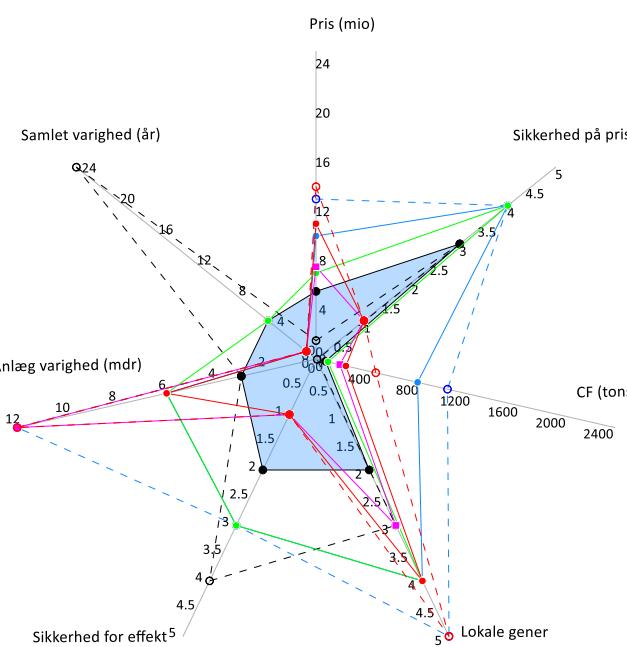
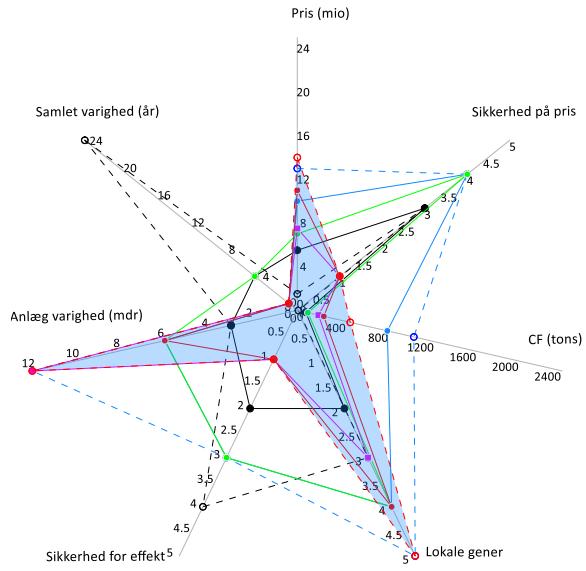


*Mindst er bedst*

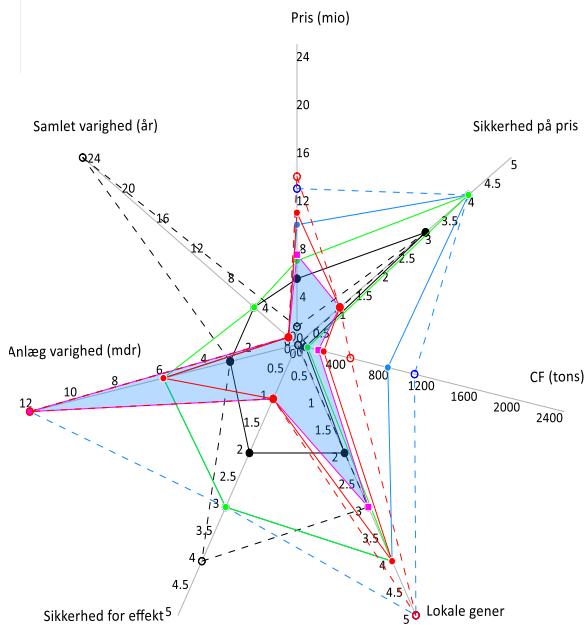
# Opgravning

# Jet injektion

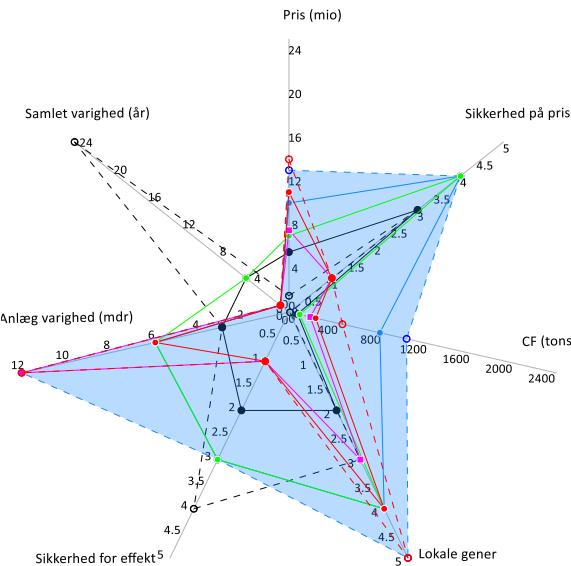
EK-BIO



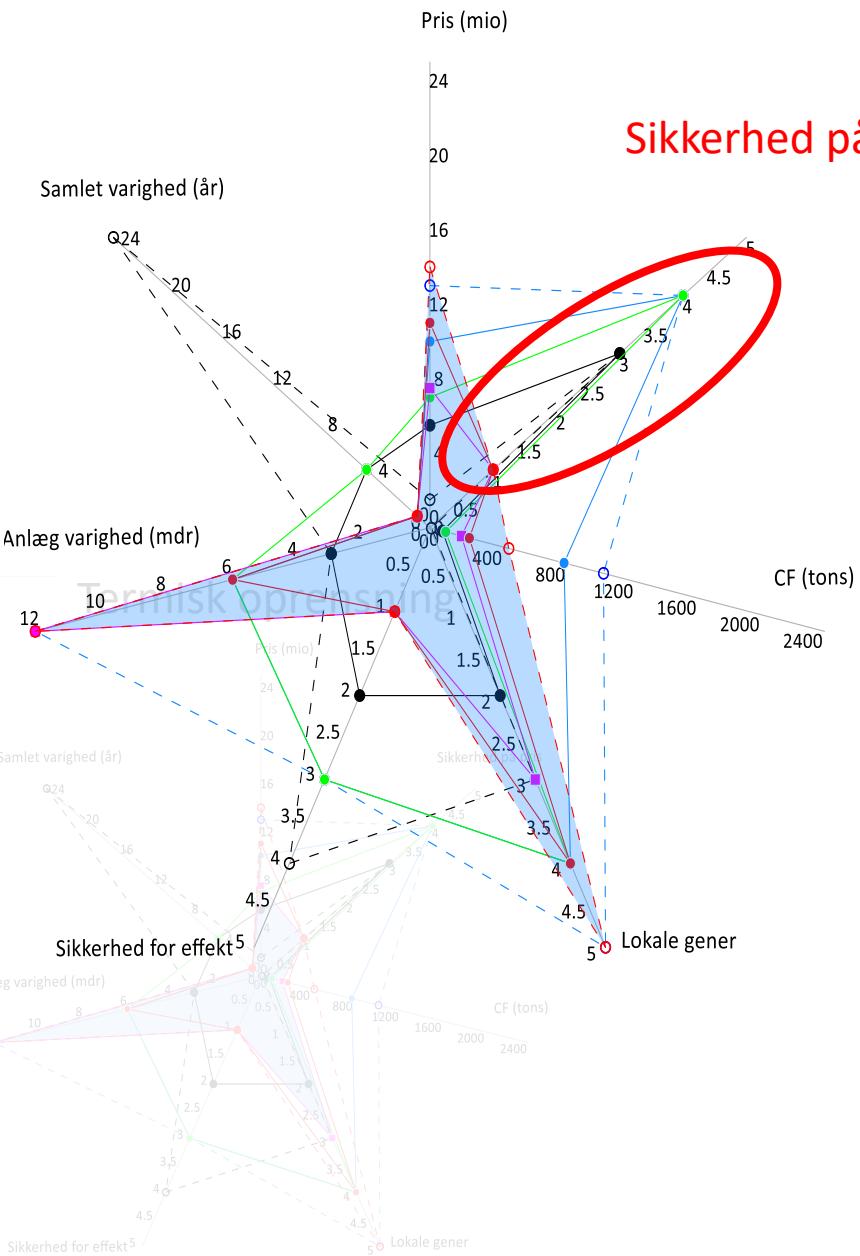
# Termisk oprensning



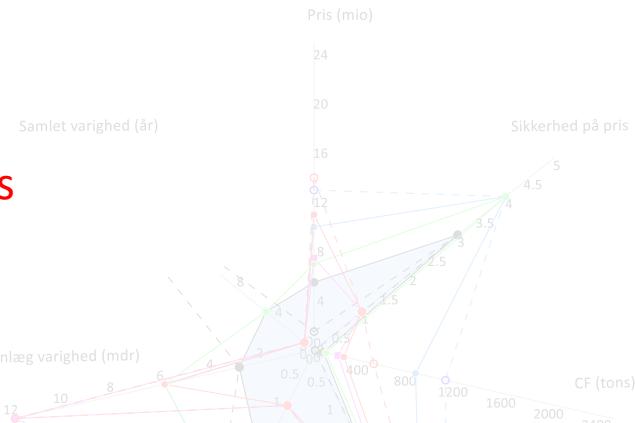
# Soil Mixing



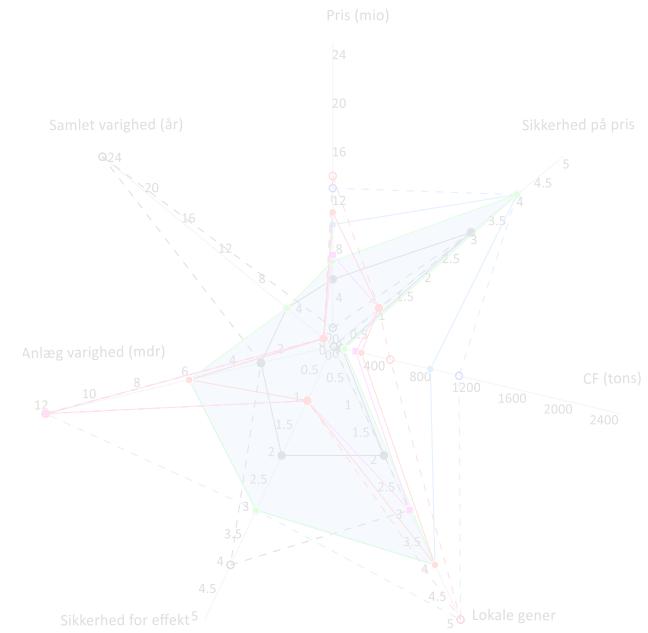
# Opgravning



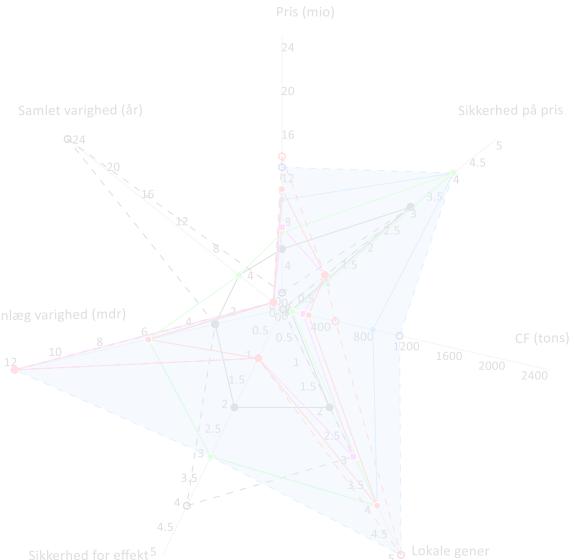
# injektion



# EK-BIO



# Soil Mixing

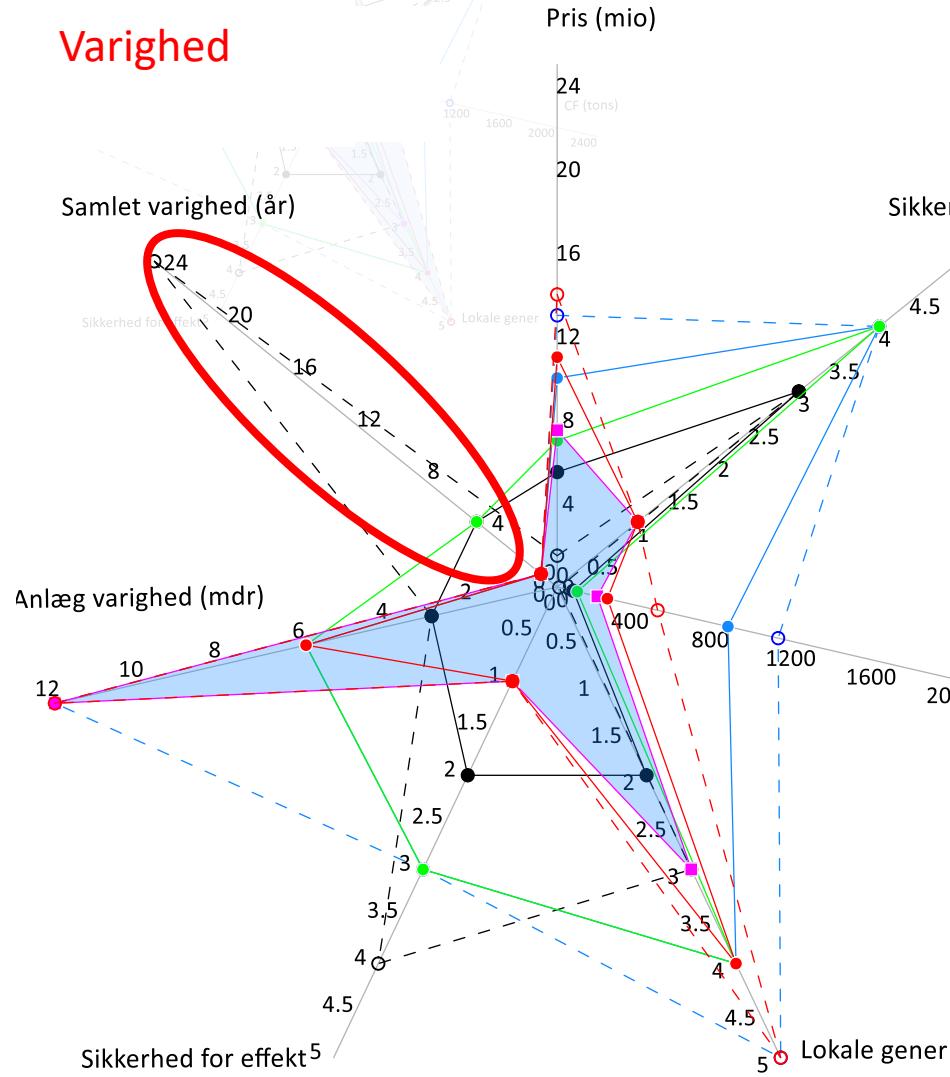


# Opgravning

# Jet injektion

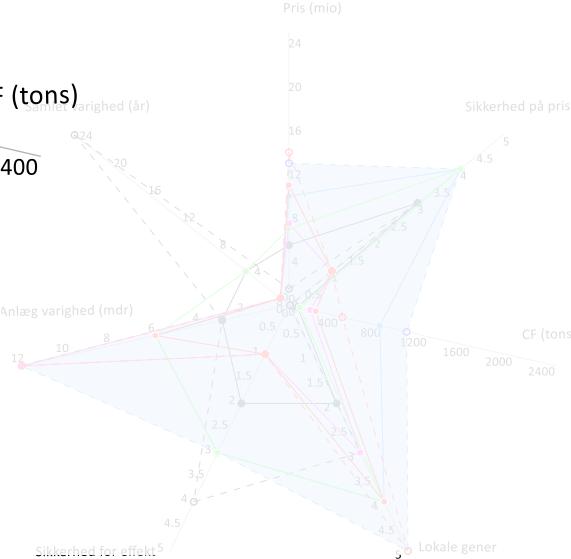
## Termisk oprensning

**Varighed**

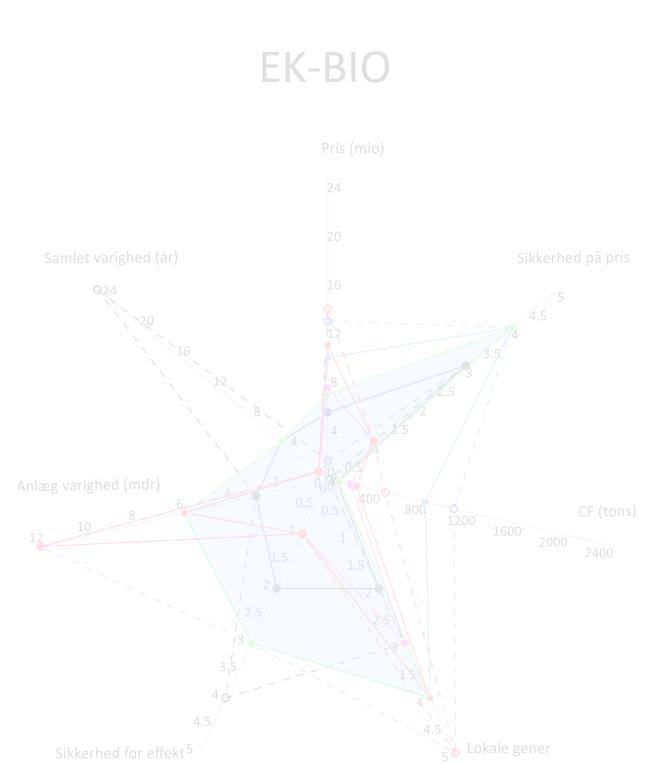


Sikkerhed på pris

## Soil Mixing



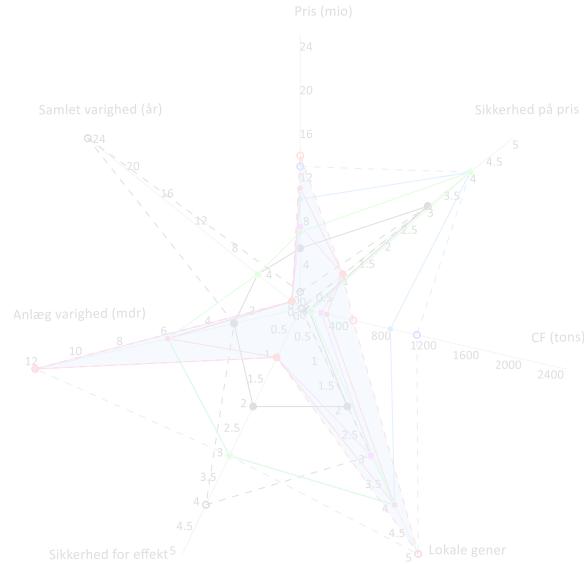
**EK-BIO**



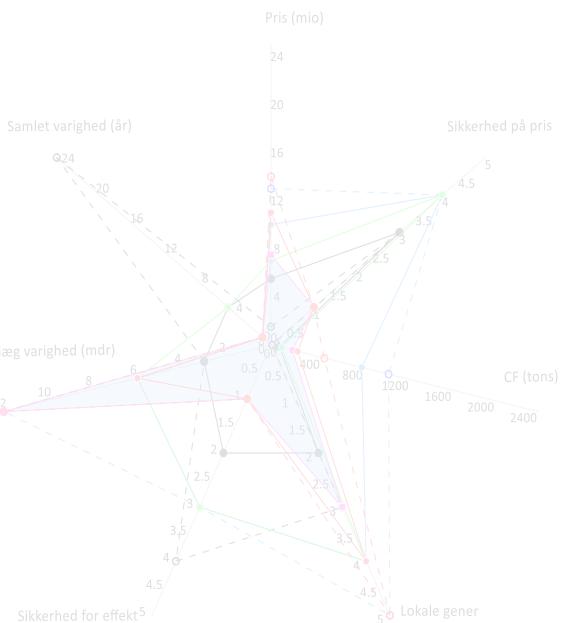
# Opgravning

# Jet injektion

Pris



# Termisk oprensning



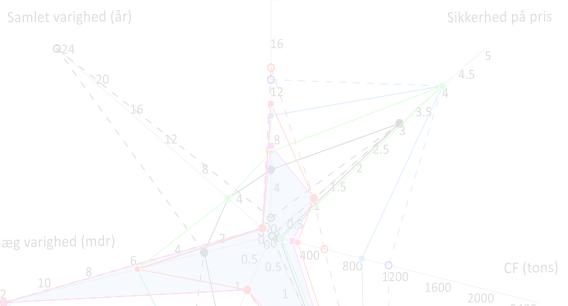
Samlet varighed (år)

Sikkerhed på pris

Anlæg varighed (mdr)

CF (tons)

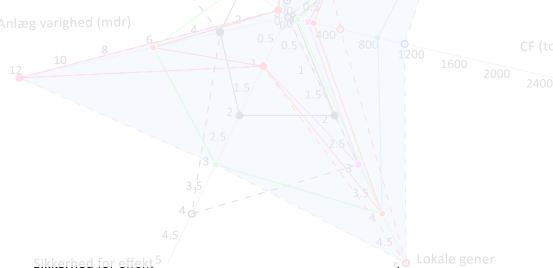
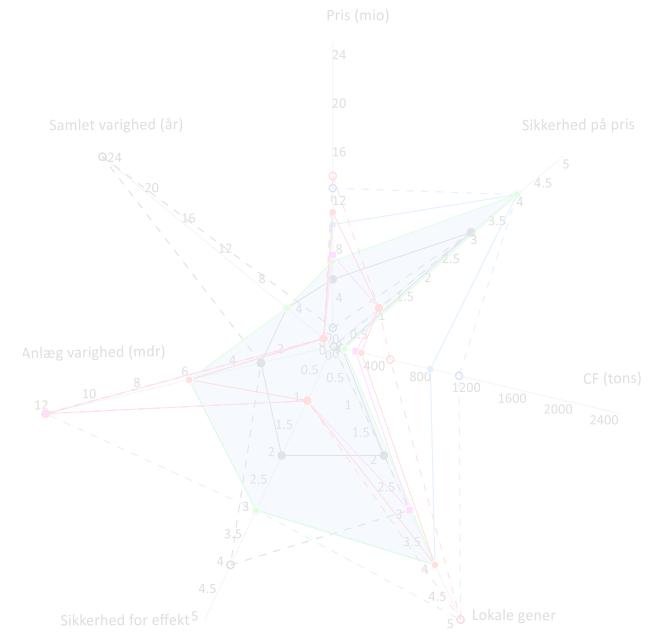
Sikkerhed for effekt



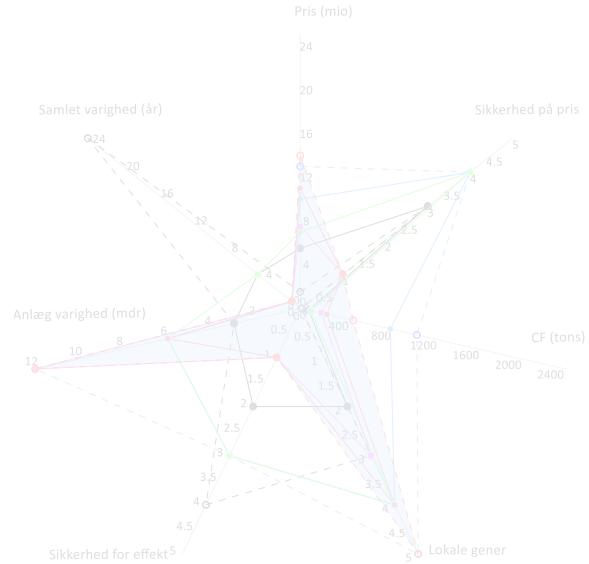
Sikkerhed på pris



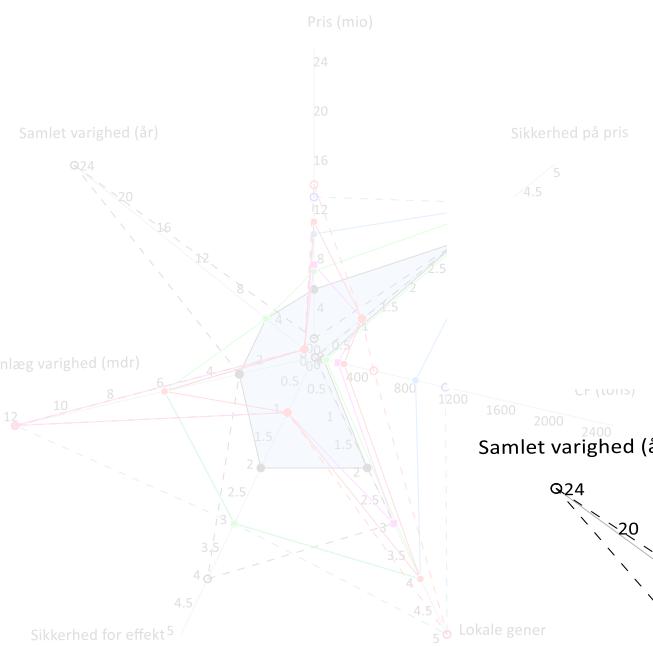
EK-BIO



## Opgraving

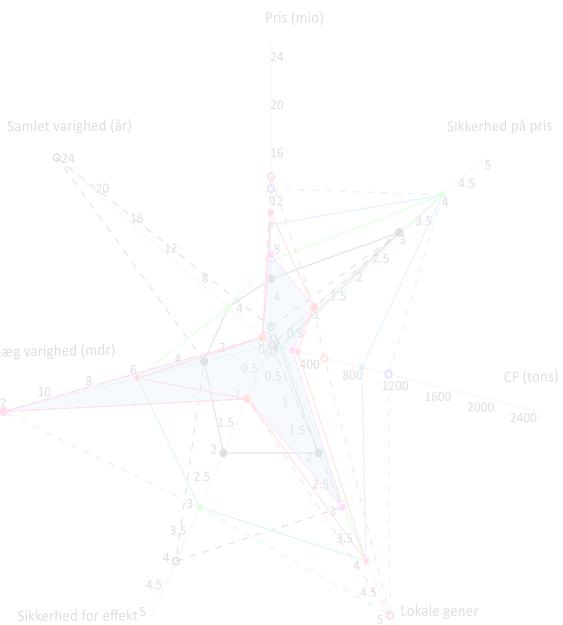


## Jet injektion

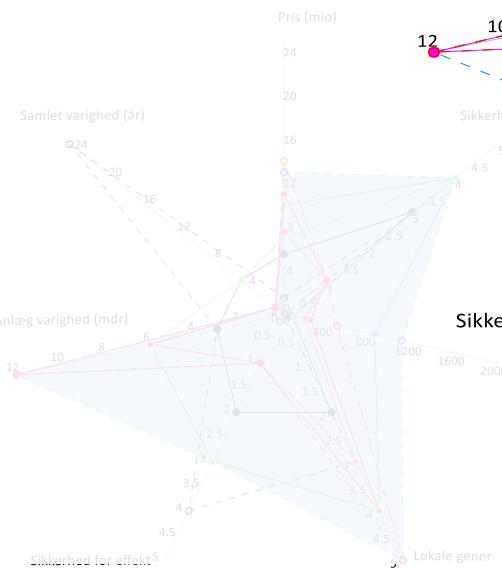


EK-BIO

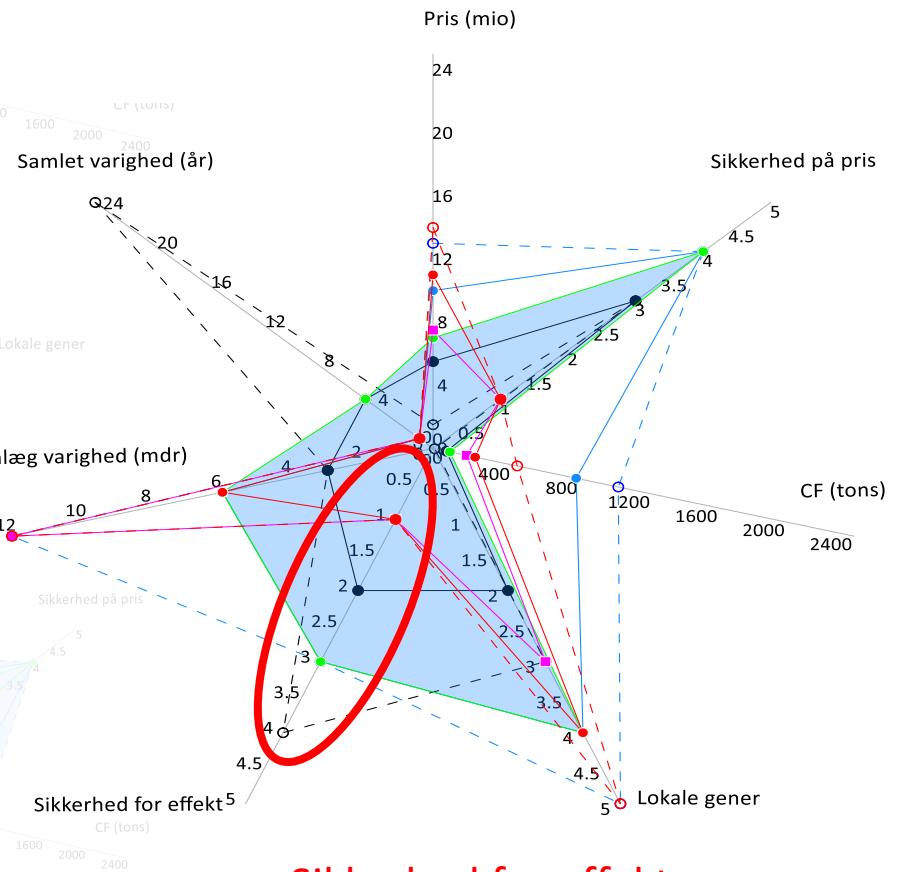
## Termisk oprensning



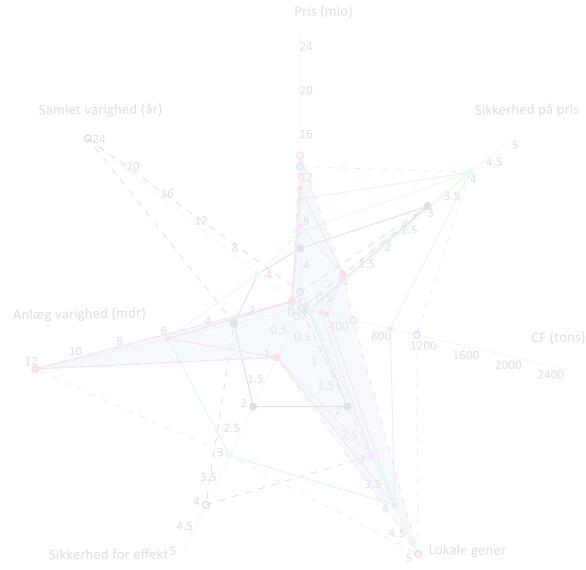
## Soil Mixing



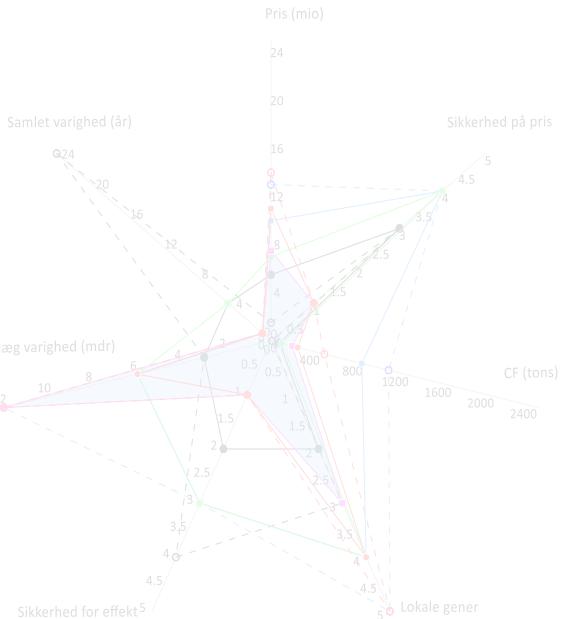
Sikkerhed for effekt



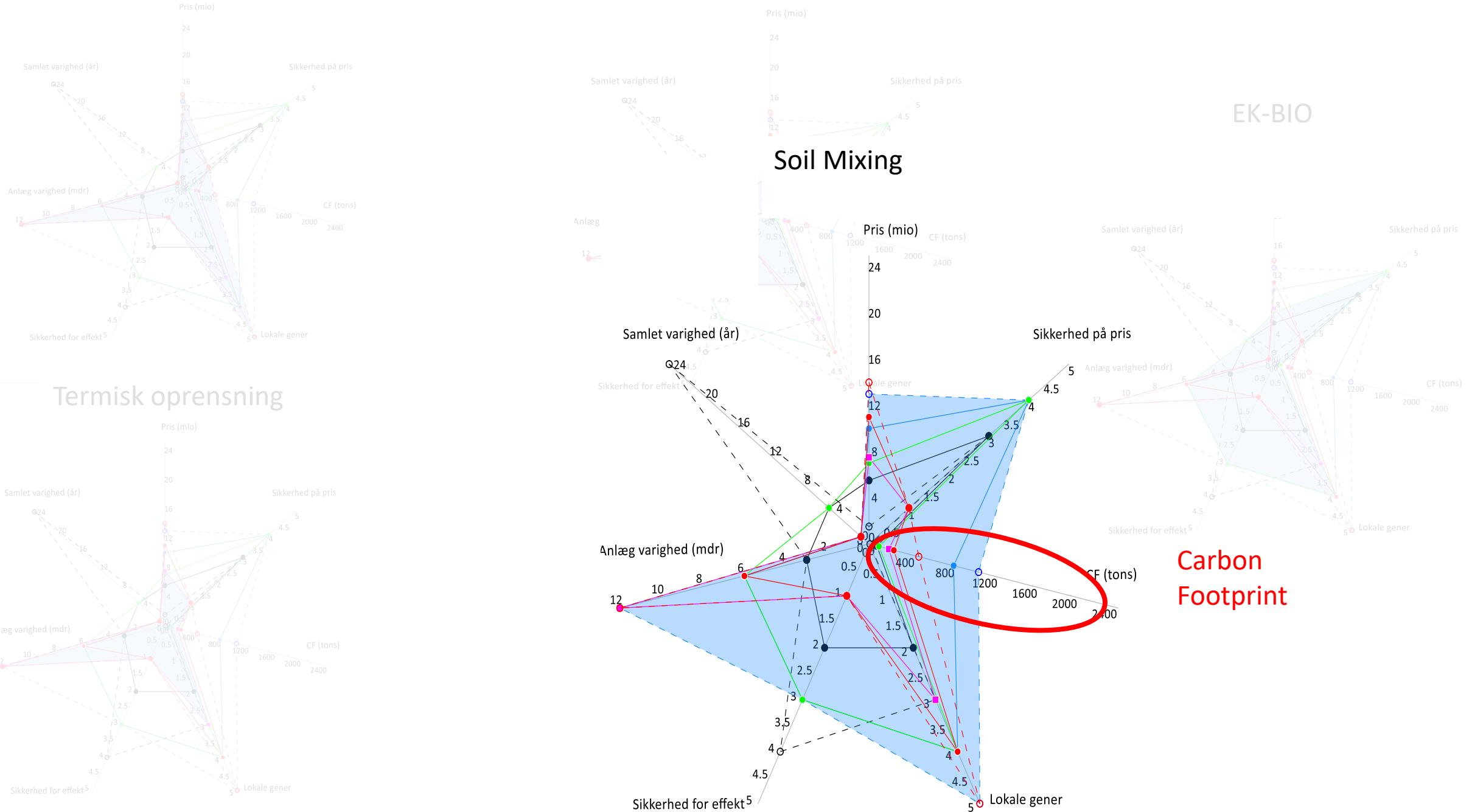
## Opgraving



## Termisk oprensning

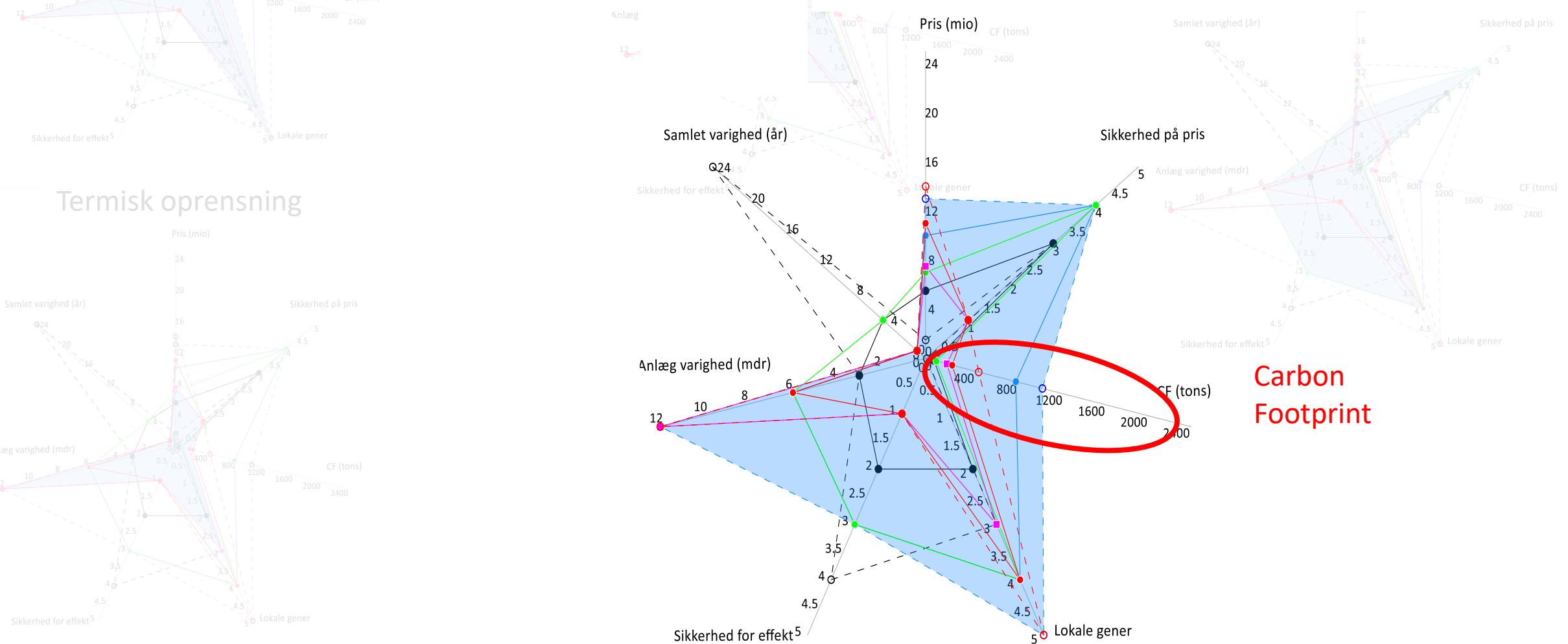


## Jet injektion



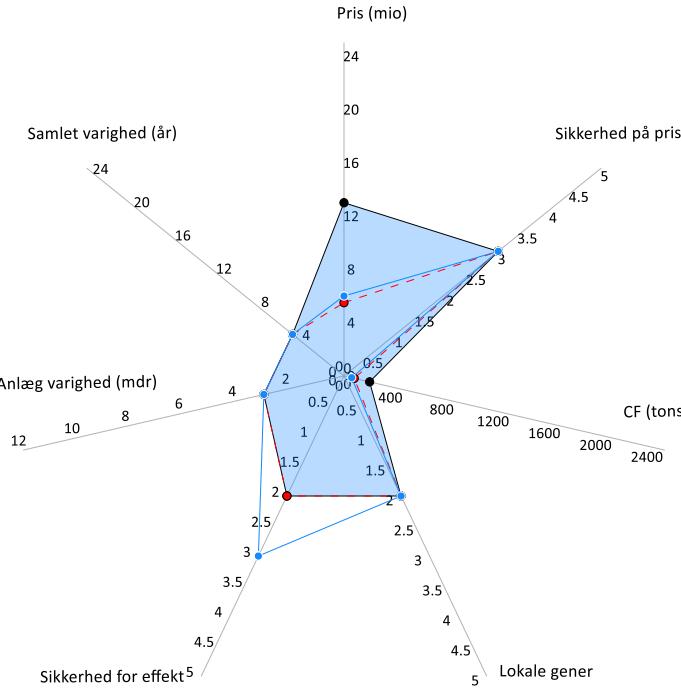
EK-BIO

## Soil Mixing

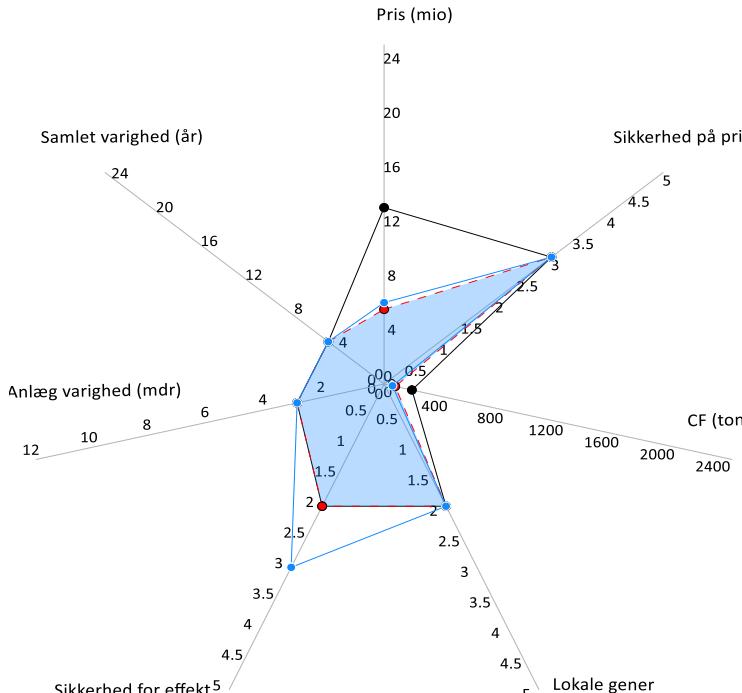


Carbon  
Footprint

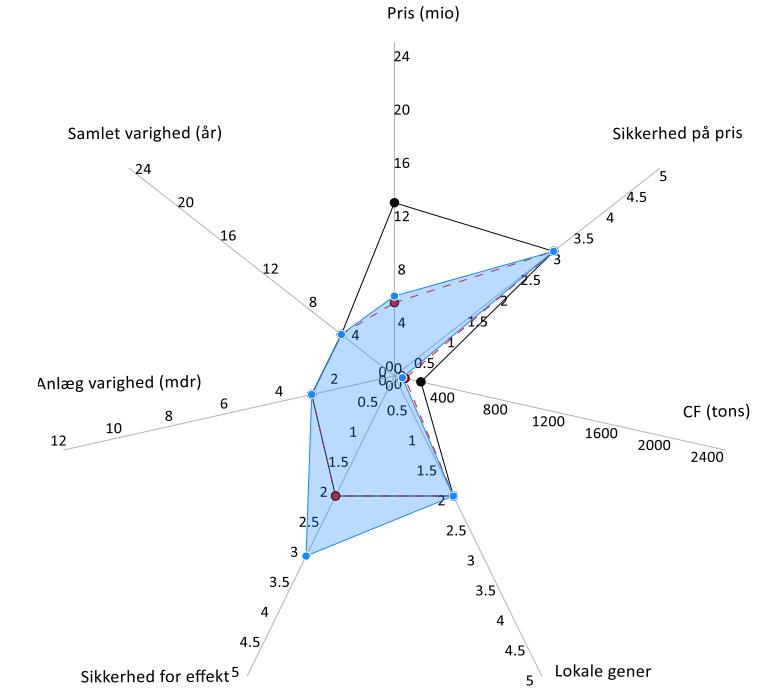
# Jetinjektion i forskellige scenarier



## Inhomogen, umættet ler

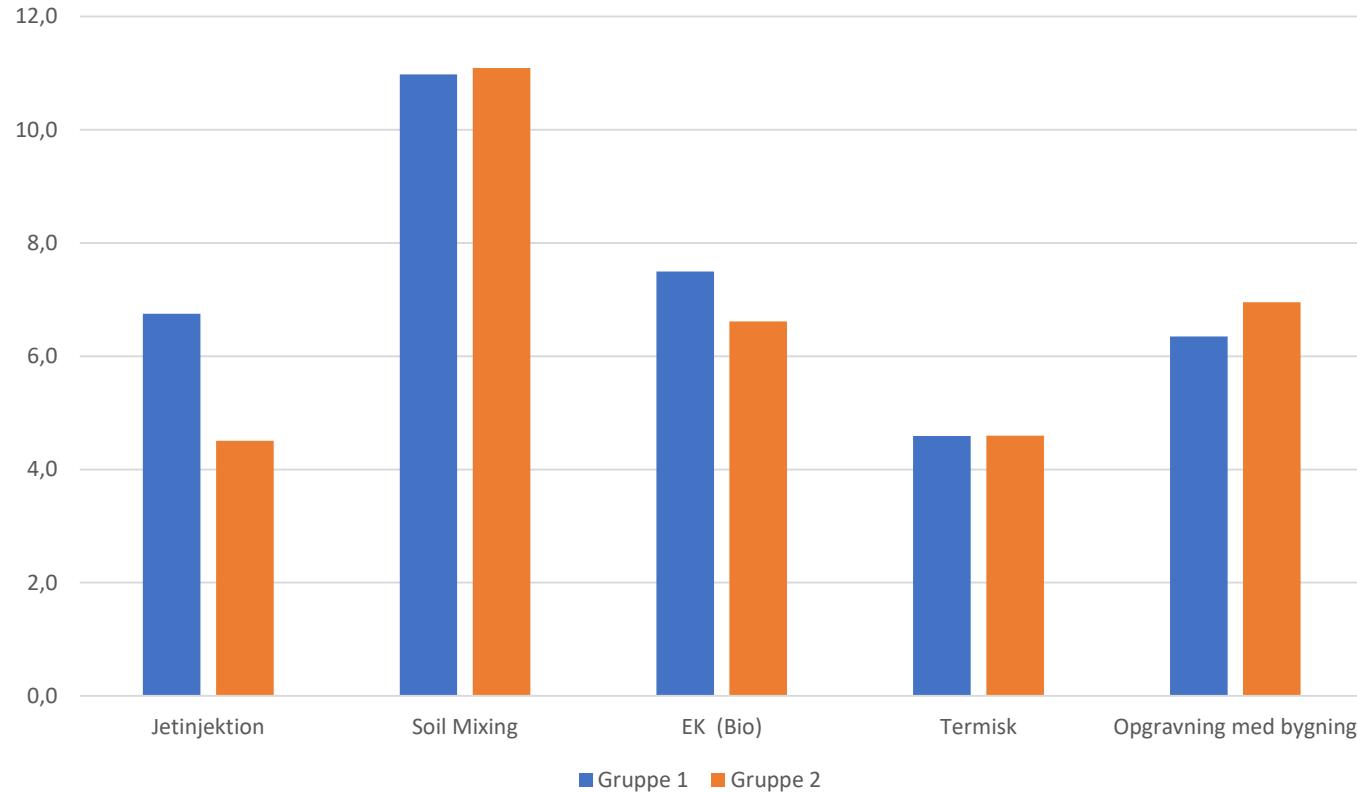


## Homogen, mættet ler



## Homogen, umættet ler

# Normeret, additiv pointgivning



- Både points og vægtning varieret
- Relativt ens
- Gruppe 2 vægtede Carbon Footprint mere end Gruppe 1
- Risiko for ”kvadratisk” effekt

# Konklusioner, sammenligningsmetode

- Mange subjektive vurderinger (oversættelse fra ord til tal, vægtning, normering...)
- Forudsætningerne er helt bestemmende for fx beregnet Carbon Footprint
- Systematisk tilgang muliggør diskussion (hvor vi også opdager hvis vi er uenige)
- Systematisk tilgang illustrerer de forskellige metoders styrke og svagheder ift. hinanden og i de enkelte scenerier

# Konklusioner, teknikker

- Ingen teknik falder ud som "bedst" i alle geologier/forurenningsscenarier, så husk altid individuelle vurderinger
- **Jet injektion** ser ud til at have en række fordelagtige egenskaber og er allerede nu på et rimeligt teknisk stade
- **EK-BIO** ser ud til i visse situationer at være anvendelig, der er dog stadig et stykke vej optimeringsmæssigt på udstyr og forståelse
- **Soil Mixing** mangler endnu noget udvikling på reaktantsiden (sammen med binderen) ift chlorerede opløsningsmidler og herudover optimering ift. udstyr (økonomi). CF aftrykket er meget afhængig af hvad der skal mixes ind.

# Perspektivering

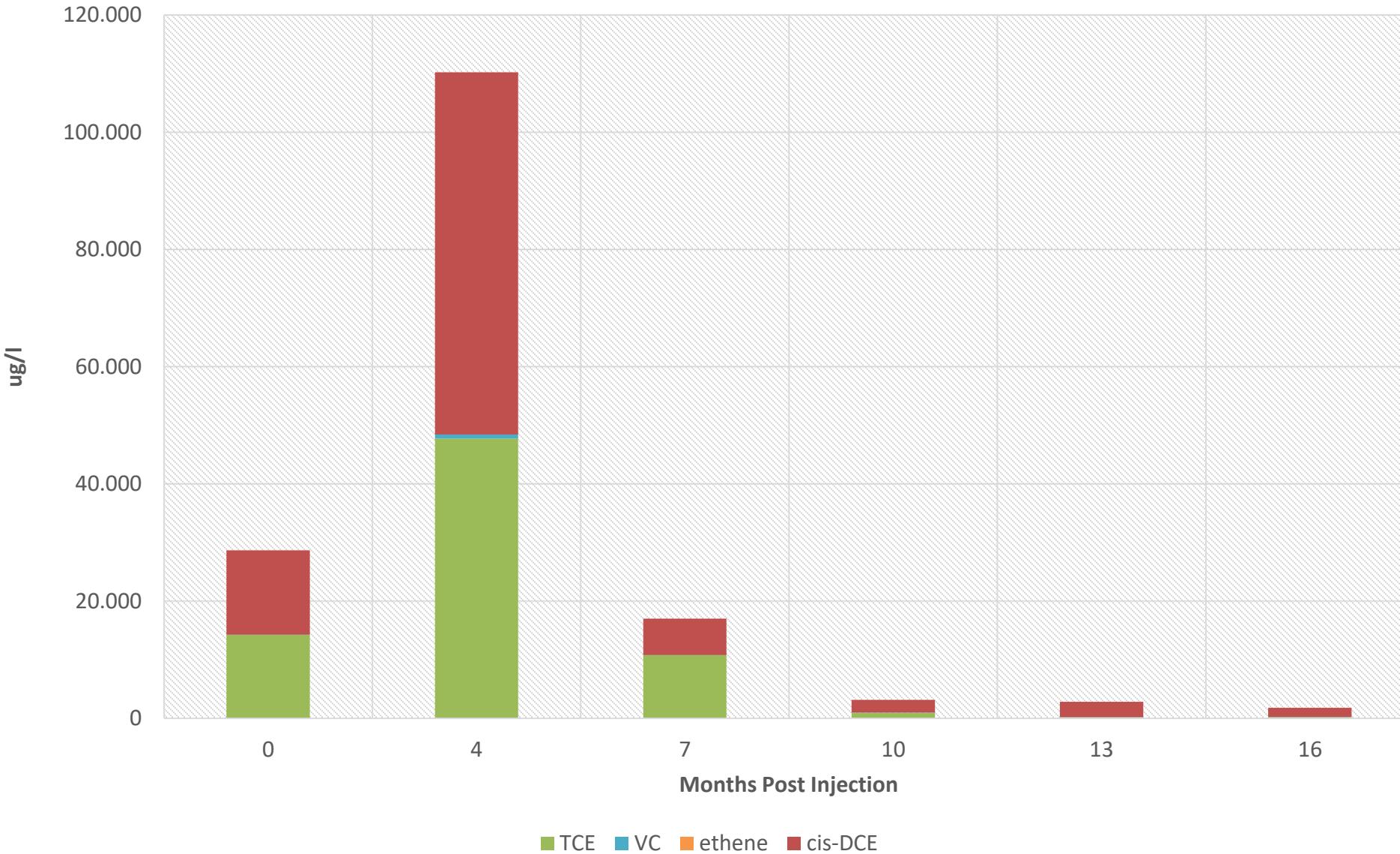
- Vi vil gerne systematisere og ensrette valg af teknikker
- Vi vil gerne lægge mere vægt på bæredygtighed i valg af teknikker
- På den enkelte sag, vil konkrete, praktiske forhold naturligt fylde (økonomi, grundejerhensyn, sikkerhed for effekt)
- Vægter man de "klassiske" parametre pris og sikkerhed, har de nye teknikker ikke en chance
- Ny, grønnere fokus kræver en strategisk beslutning
- Der er behov for en kommercialisering af de nye metoder – men det kommer måske kun hvis begynder at bruge dem (hønen og ægget)
- Vi er i gang med at kortlægge administrative barrierer (juridiske, konkurrencemæssige, osv) for at sagsbehandlere tager nye metoder i brug

# **Successful full dechlorination of DNAPL comprising chlorinated ethenes and ethanes under a commercially active site.**

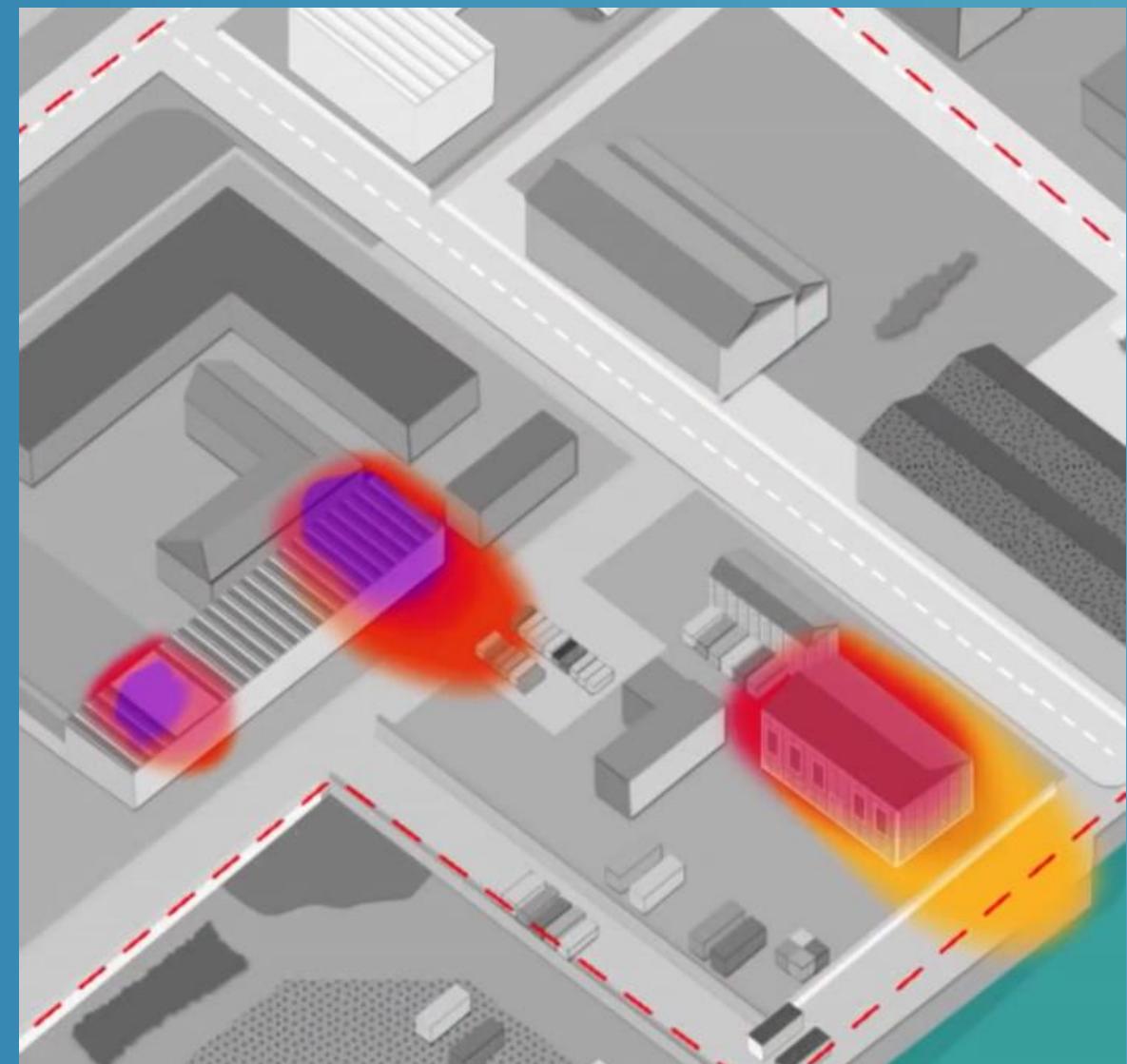
Jack Shore  
UK & Scandinavia District Manager  
REGENESIS

# What can be achieved?

## 2. Mean Concentration Distribution Over Time (Cl-Ethenes)



# Challenges to overcome...

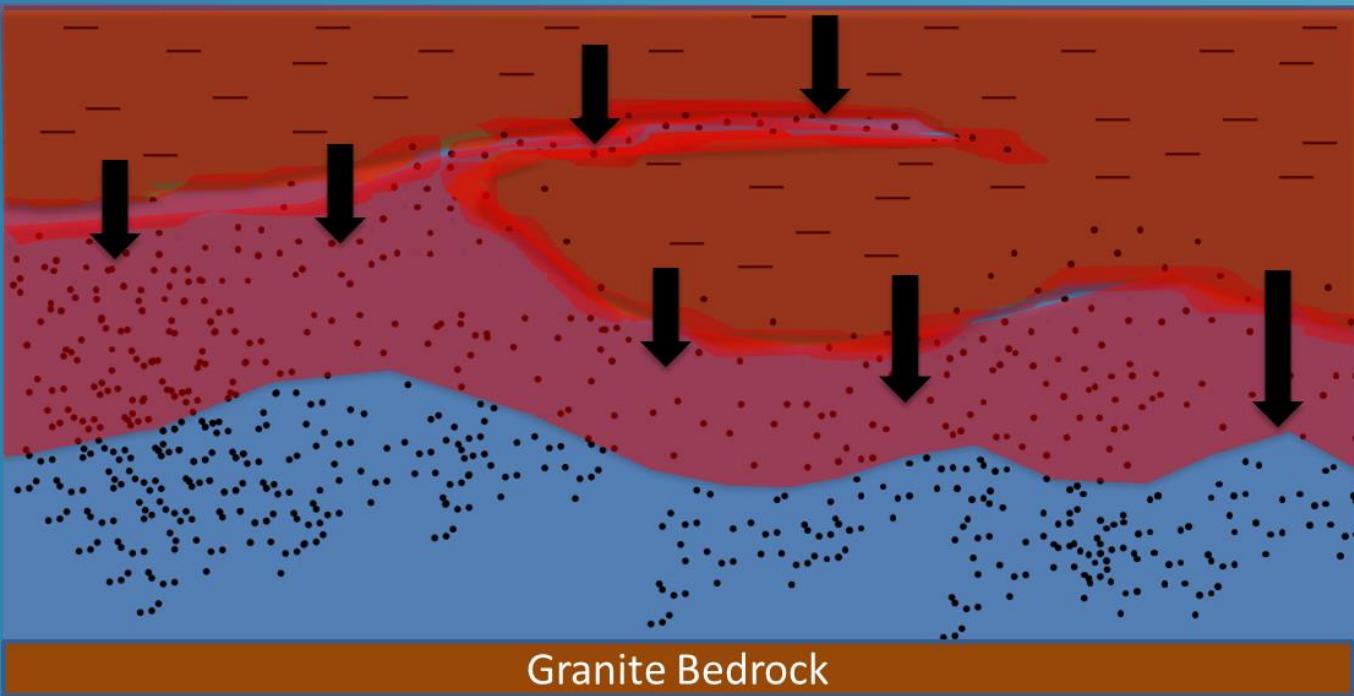


# Metal Works – United Kingdom

## Groundwater Impacted with DNAPL TCE/TCA

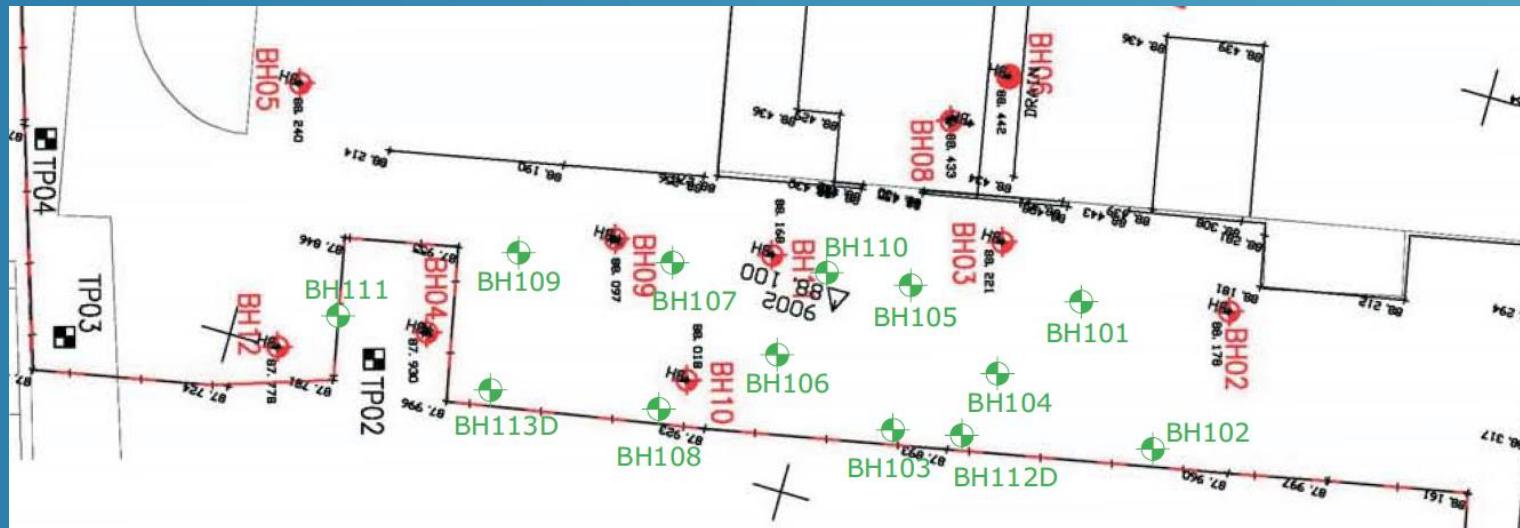
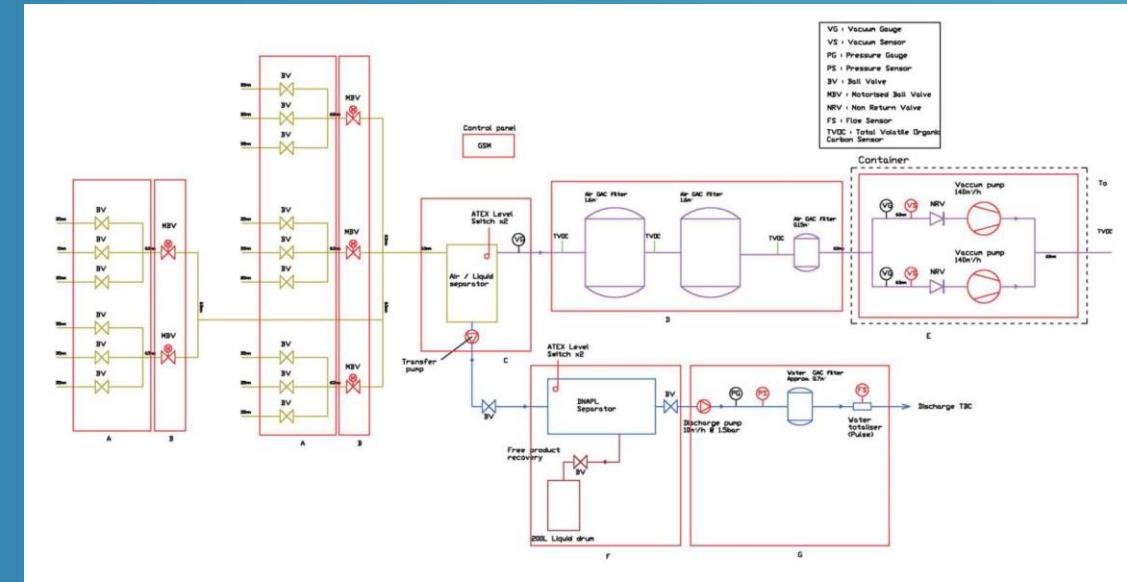
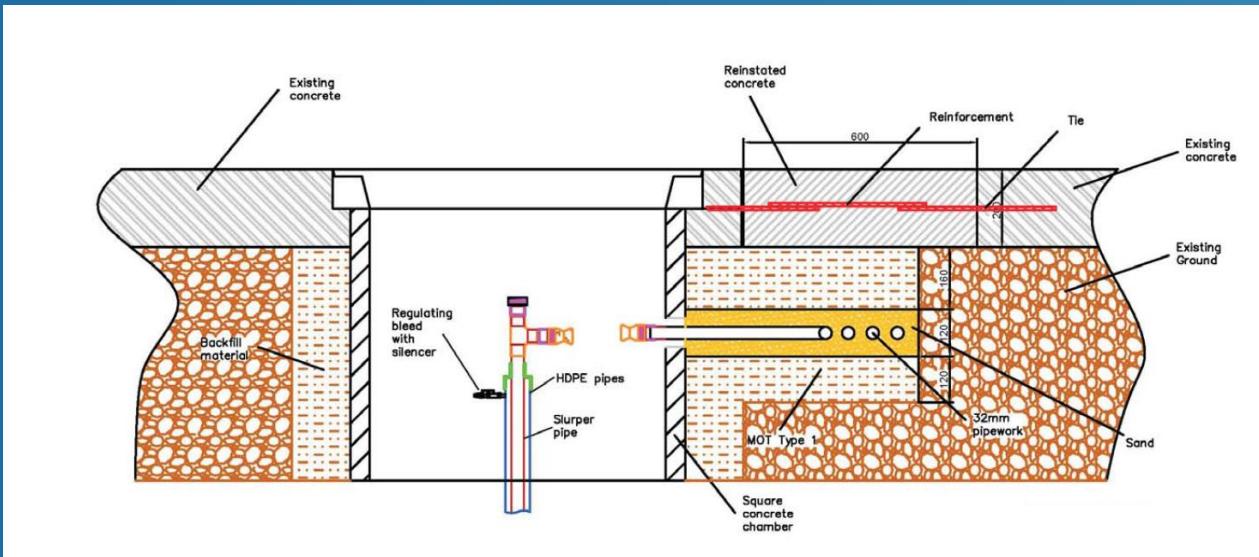
### Site investigation

- Identified a 1,500m<sup>2</sup> area Impacted with TCE and TCA
- Up to 20 mg/L of TCA and 33 mg/L TCE identified across the area
- Average total CHC concentrations 11 mg/L
- Impacted thickness 1 – 9m BGL
- Groundwater at 2.5m BGL
- Geology identified as glacial till/ clay underlain by coarse sands and granite bedrock



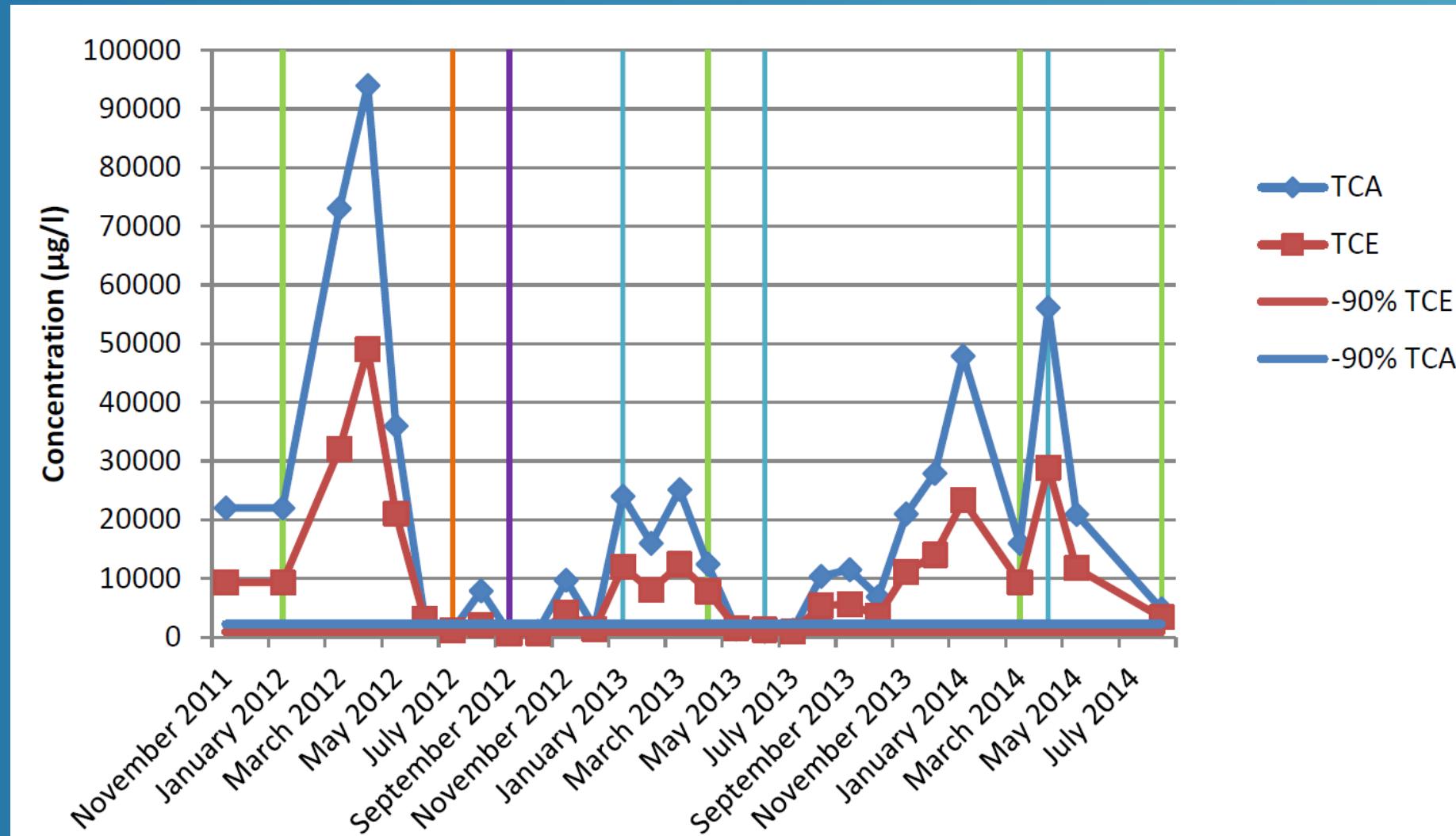
Remediation driver – contractual

# Before REGENESIS: Initial Remediation Strategy – Dual / Multi Phase Vacuum Extraction



# Dual / Multi Phase Vacuum Extraction – Results

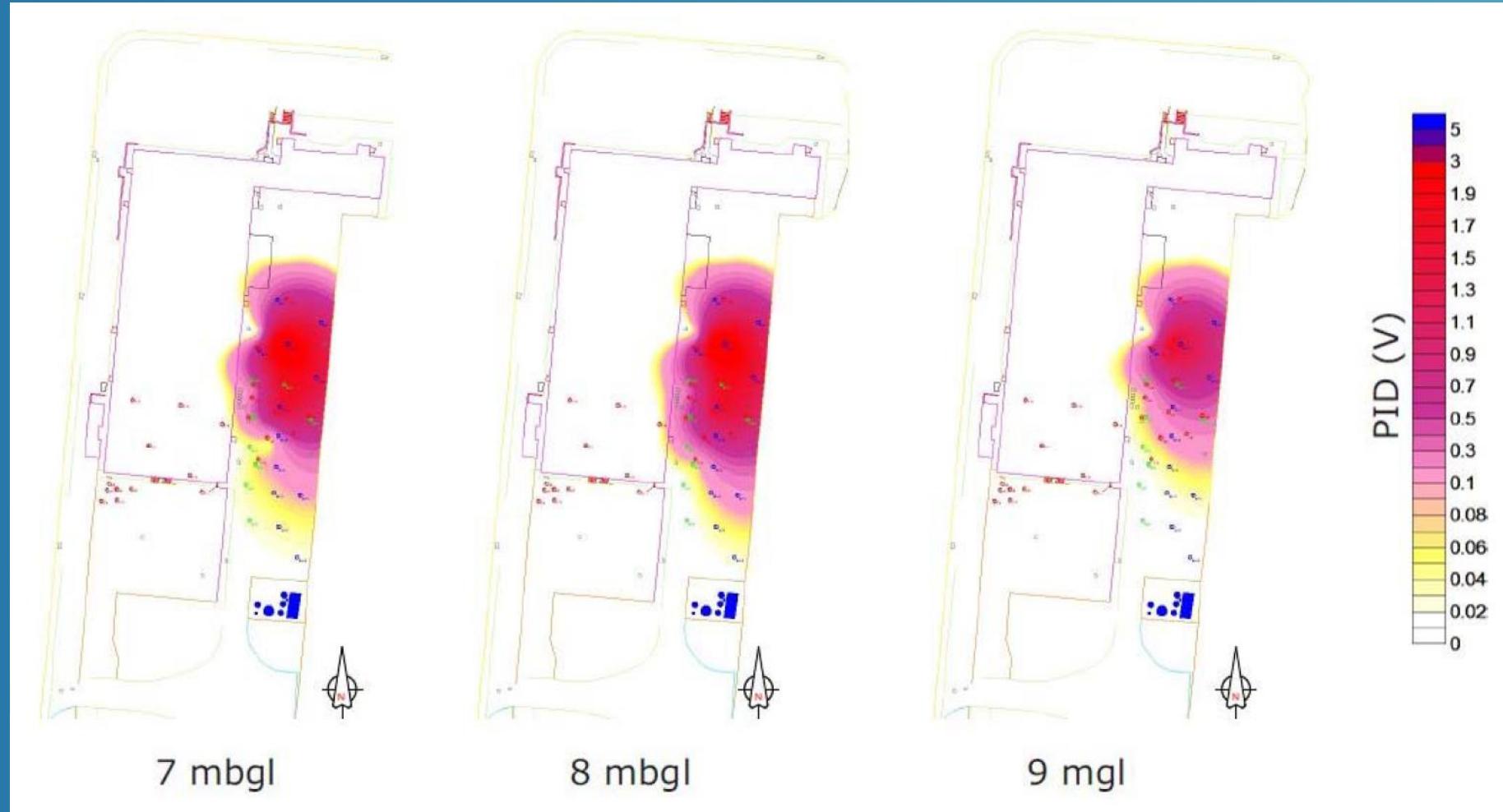
- 75% Reduction not achieved
- Significant rebound when the system was switched off
- 3 yrs of physical treatment
- Targets not met
- Further investigation required



# MIP Survey Results – Post SVE

## Objectives:

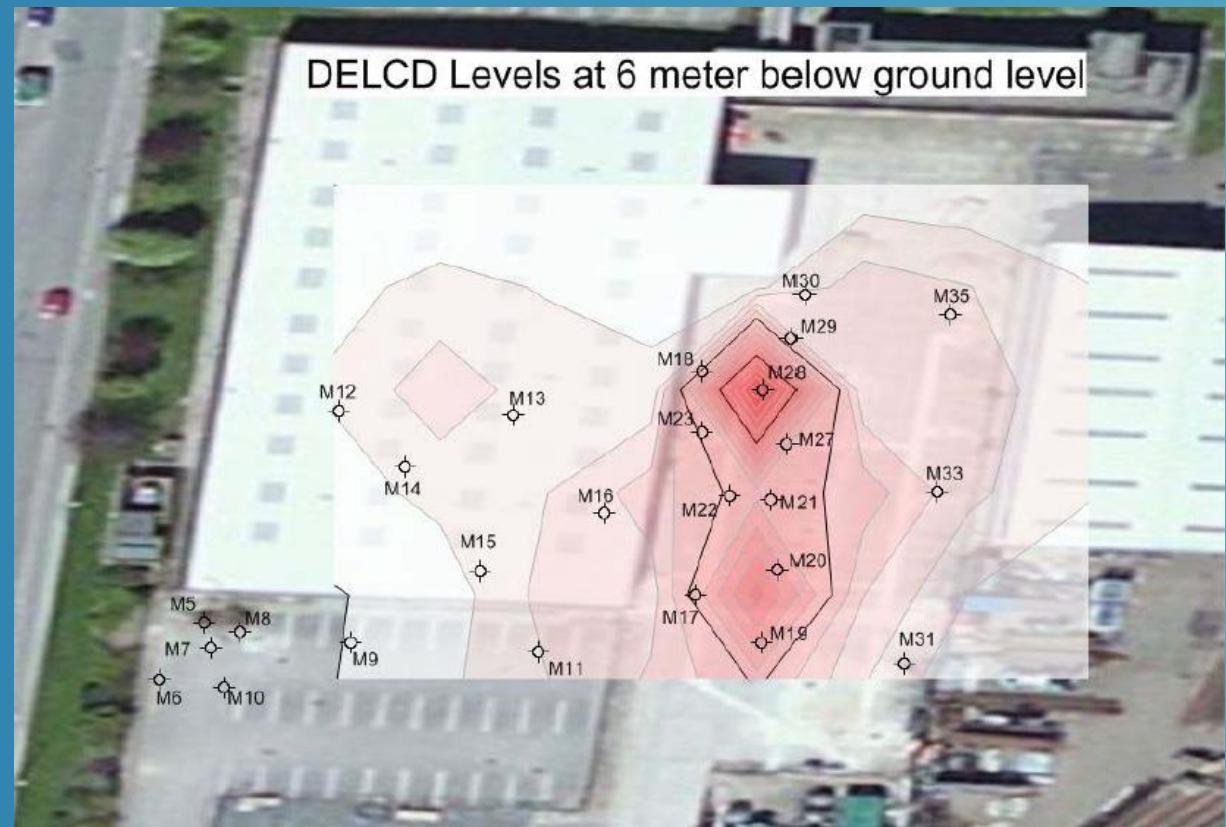
- Assess residual mass
- Understand vertical plume profile
- Inform remedial strategy
- Evaluate risk



# Metal Works– United Kingdom Groundwater Impacted with DNAPL TCE/TCA

## The Challenge

- Active Metal Plaiting Works
- Multiple TCE spills over decades
- Into made ground, underlying clays with sand layers.  
To 9mBGL.
- Considerable DNAPL onsite
- Limited signs of reductive dechlorination
- DPVE System reached asymptomatic conditions

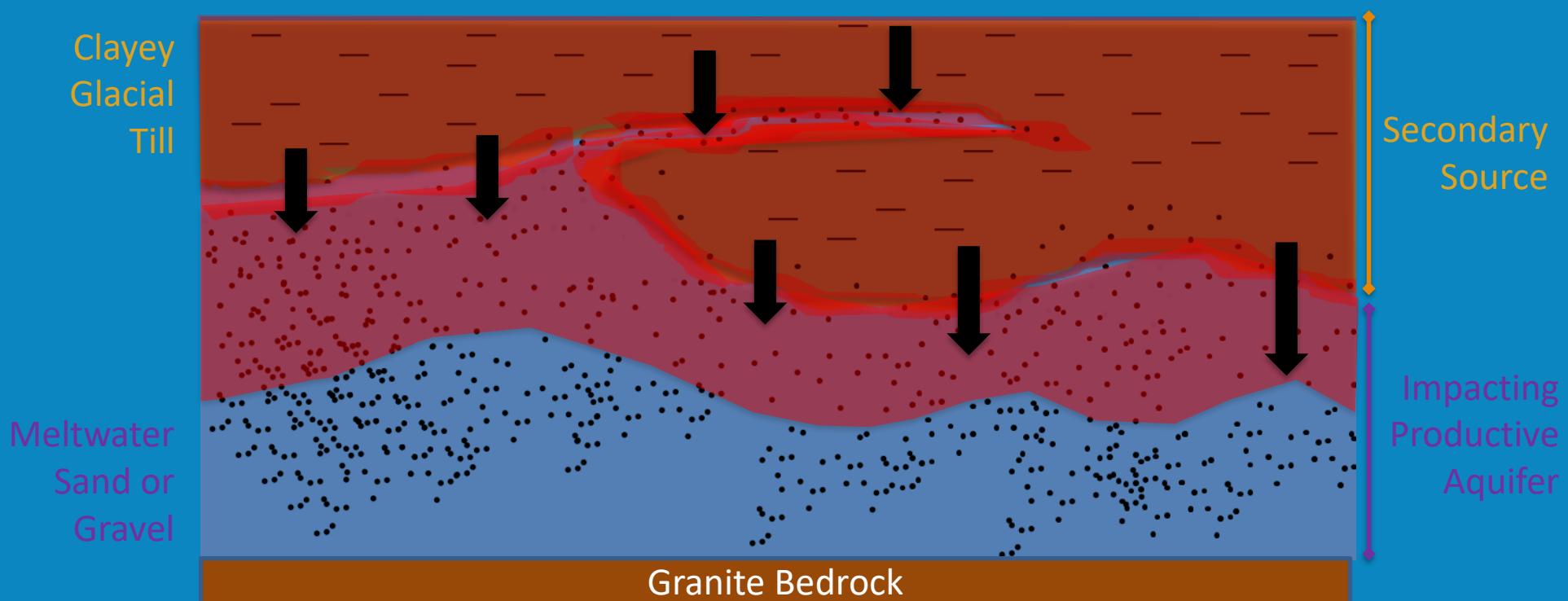


# Metal Plating Works – United Kingdom

Upon Flushing and Removal of Adsorbed Mass “Back Diffusion” Continues



**HYDROGEN  
RELEASE  
COMPOUND**



**3-D®  
MICROEMULSION**



## MICROEMULSION

---

**Enhanced Anaerobic  
Biodegradation  
(Reductive  
Dechlorination)**

### WHAT IT DOES

Making **enhanced reductive dechlorination** (ERD) process possible for *in situ* remediation projects.

### HOW IT WORKS

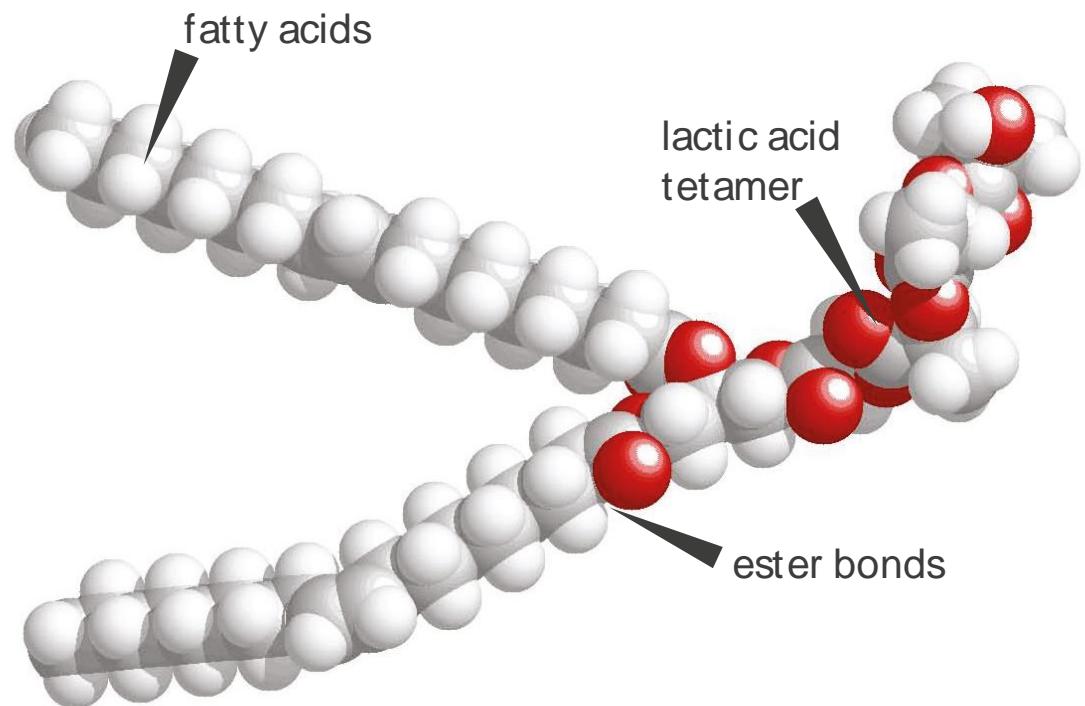
Problematic chlorinated solvents such as tetrachloroethylene (PCE) and trichloroethene (TCE), dichloroethene (DCE) and vinyl chloride (VC) in groundwater are biologically transformed into less harmful end products such as ethene.

### ADVANTAGES

- + Propagates widely within the subsurface
- + Treats wide areas around one injection point saving time and money
- + Immediate, mid-range and long-term, controlled-release supply of organic acids

# 3D Microemulsion

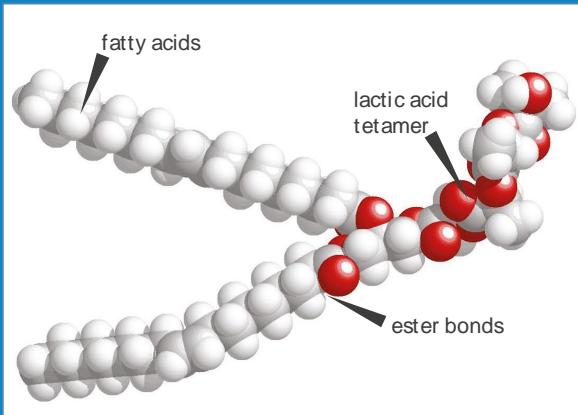
An appropriately soluble controlled release electron donor



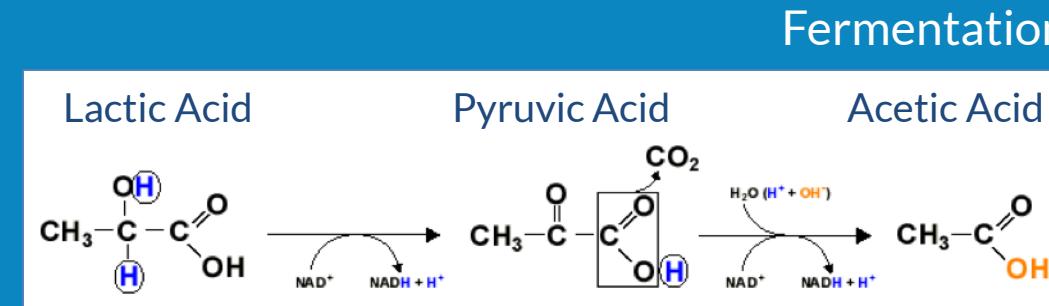
The molecular structure of 3-D Microemulsion®



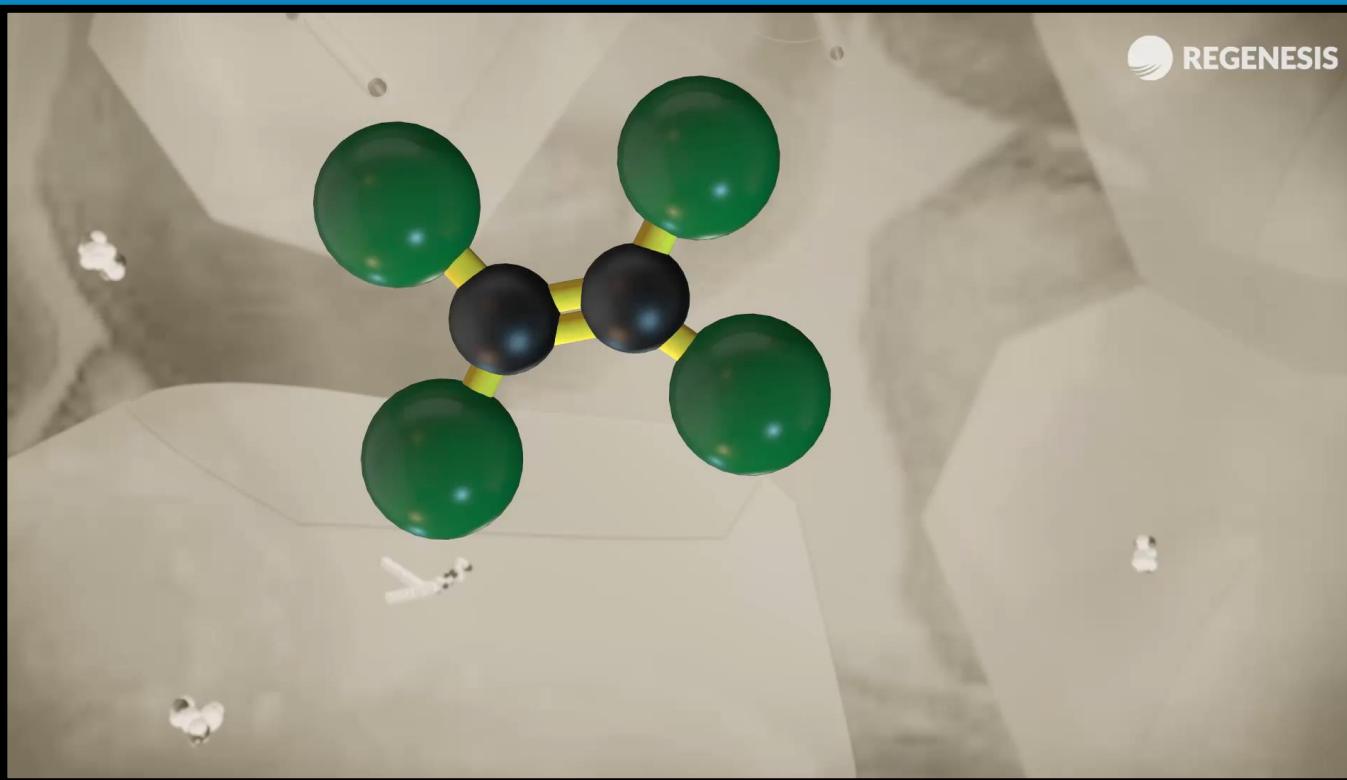
# 3DMicroemulsion - Controlled Release of Hydrogen for up to 5 years



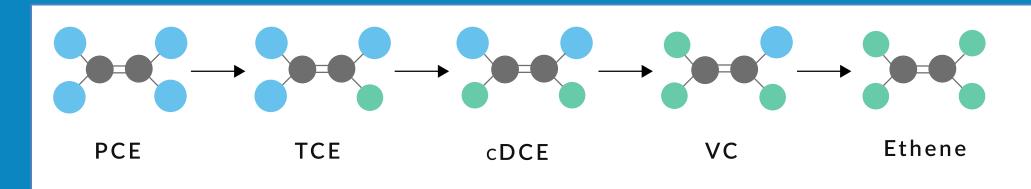
Dissolution



Fermentation



Enhanced Reductive Dechlorination



## PRODUCTS



### HYDROGEN RELEASE COMPOUND

#### Enhanced Anaerobic Biodegradation (Reductive Dechlorination)

#### WHAT IT DOES

Provides **controlled-release** lactic acid to promote conditions and optimize the anaerobic enhanced reductive dechlorination process.

#### HOW IT WORKS

Provides a viable, long-term source of staged-release hydrogen, on the order of **2-5 years from a single application**.

#### ADVANTAGES

- + Easily monitored with *in situ* application
- + Highly compatible with anaerobic bioaugmentation approaches using BDI Plus
- + Clean, low-cost, non-disruptive application
- + Eliminates the need for on-going operations and maintenance

## PRODUCTS



### BIO-DECHLOR INOCULUM

#### Bioaugmentatio n

#### WHAT IT DOES

**Rapidly** dechlorinate contaminants during *in situ* bioremediation processes.

#### HOW IT WORKS

Bio-Dechlor INOCULUM stimulates the rapid and complete dechlorination of compounds such as tetrachloroethene (PCE), trichloroethene (TCE), dichloroethene (DCE), and vinyl chloride (VC).

#### ADVANTAGES

- + Contains microbes capable of dehalogenating halomethanes (e.g. carbon tetrachloride and chloroform) and haloethanes (e.g. 1,1,1 TCA and 1,1, DCA) as well as mixtures of these halogenated contaminants.
- + Fast acting



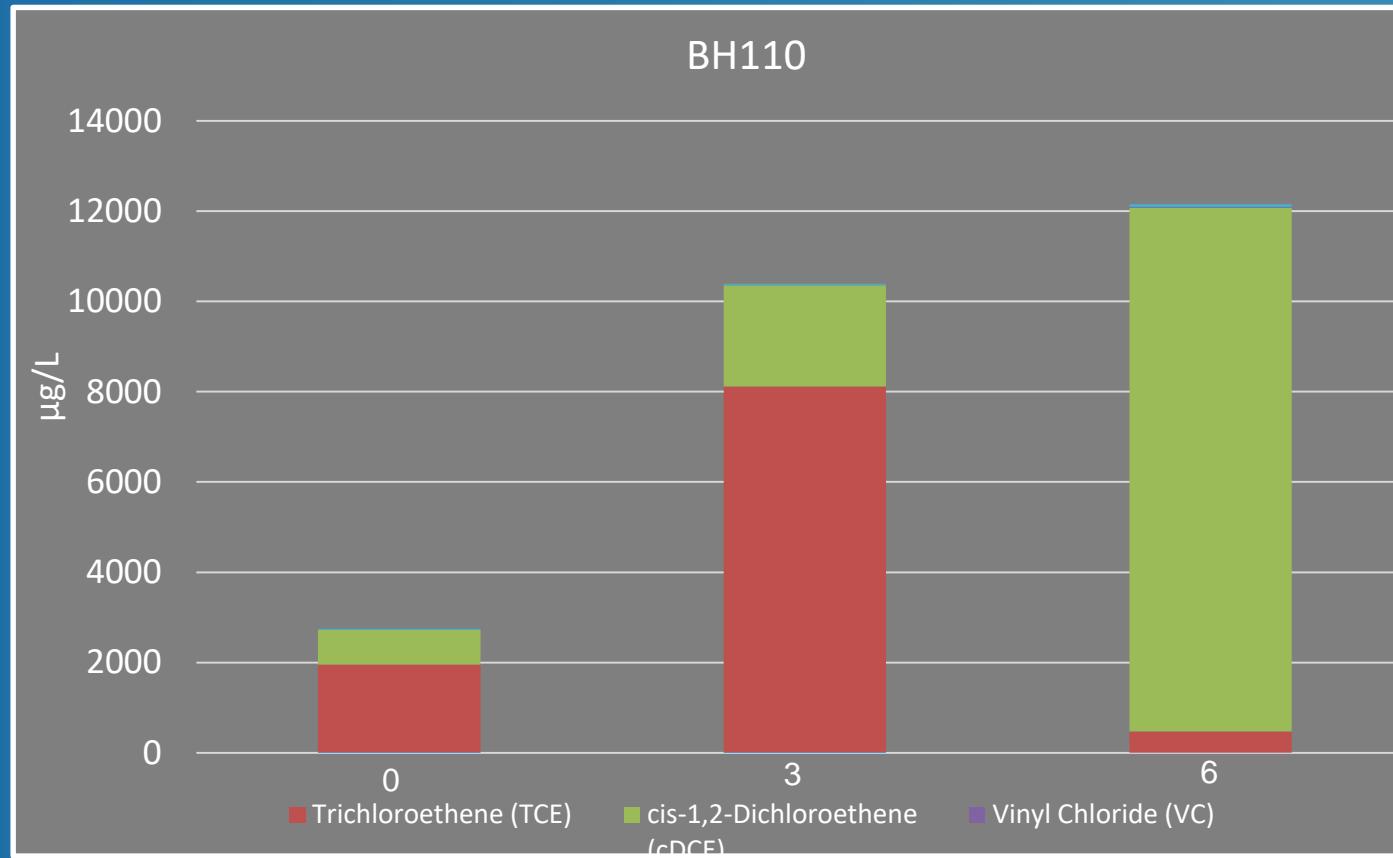
# Initial Pilot Trial

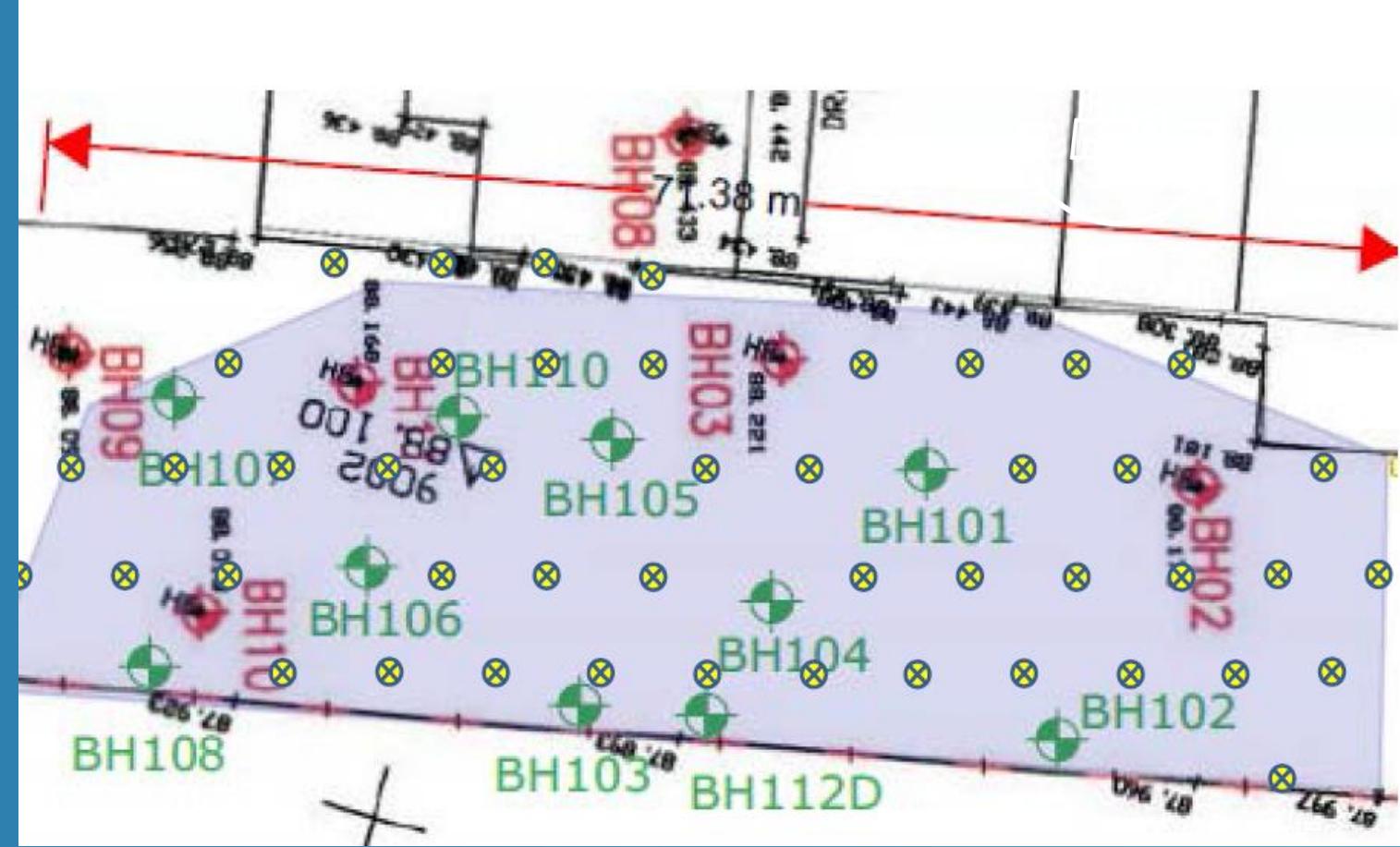
## Concern about the efficacy of direct push injection

MIP Injection proved difficult on site

All parties concerned that direct push injection not possible to 9mBGL

- ✓ Successfully reached 9m BGL





### Full-scale application works

- 1,500m<sup>2</sup>
- 6.5m Treatment thickness
- 9,750m<sup>3</sup> Treatment Volume

Direct Push Injection of HRC and 3DMe across 60 Points

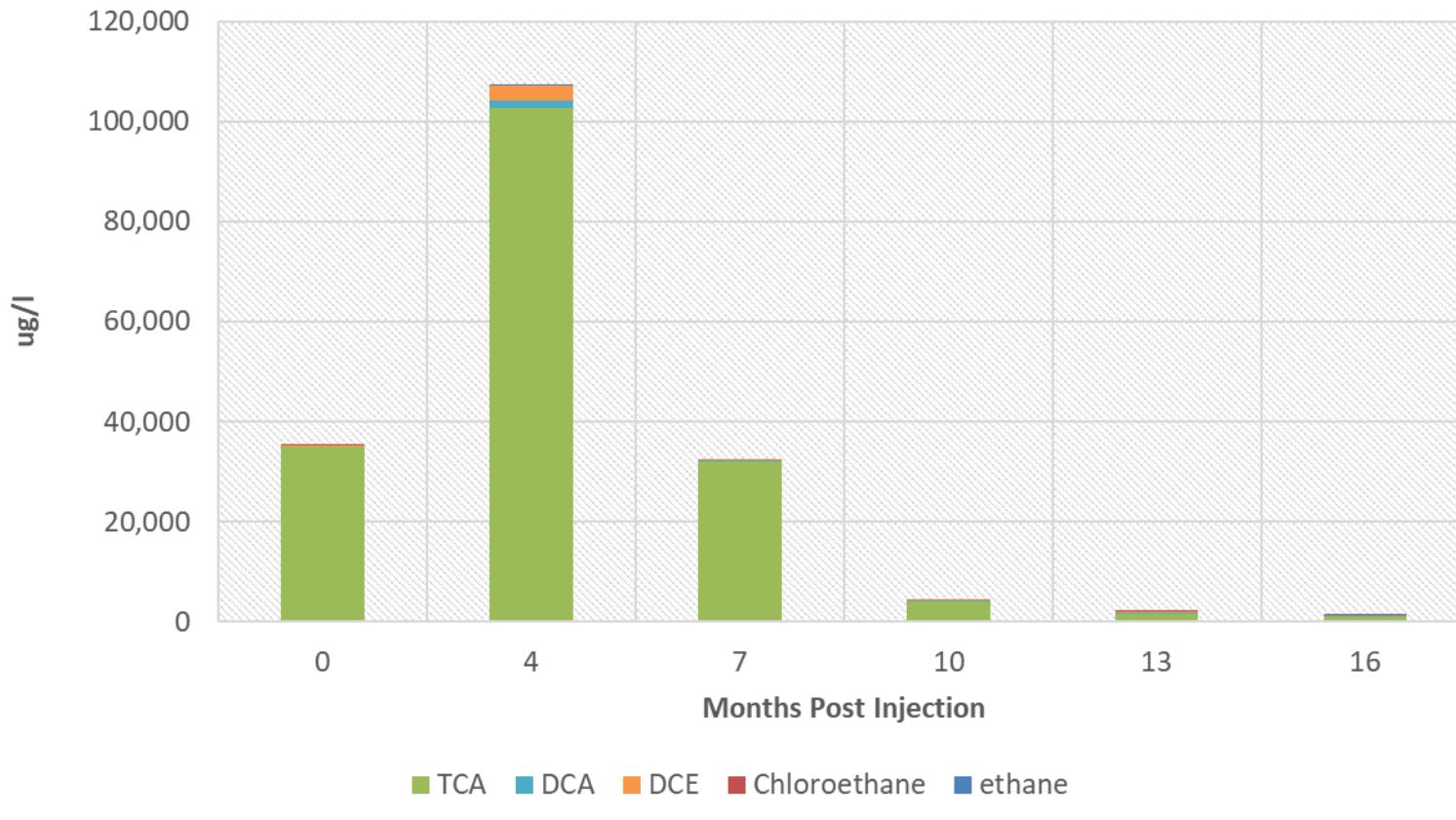
1,804,866.96 DKK

# Full-scale application works

## 16 Months Post Monitoring.. Chlorinated Ethenes



### 2. Mean Concentration Distribution Over Time (Cl-Ethenes)



- Following the injection works, quarterly validation monitoring was completed.
- Post injection monitoring showed no inhibition of parent compound degradation due to the mixed halogenated compound plume.
- 98% and 99% reduction in mean concentration of TCA and TCE respectively.
- 1.8m DKK

# Remediation across occupied sites Is often possible and cost effective with minimal disruption

- Just because a site is occupied does not mean remediation cannot take place
- Communicating occupants expectations to the remediation contractor/ designer is key
- Continual stakeholder engagement is key to ensuring that the occupier knows what to expect and that REGENESIS understands commercial and technical limitations to the site.





**Jack Shore**  
UK & Scandinavia District Manager  
[jshore@regenesis.com](mailto:jshore@regenesis.com)  
+44 7720 633930

# EJLSKOV

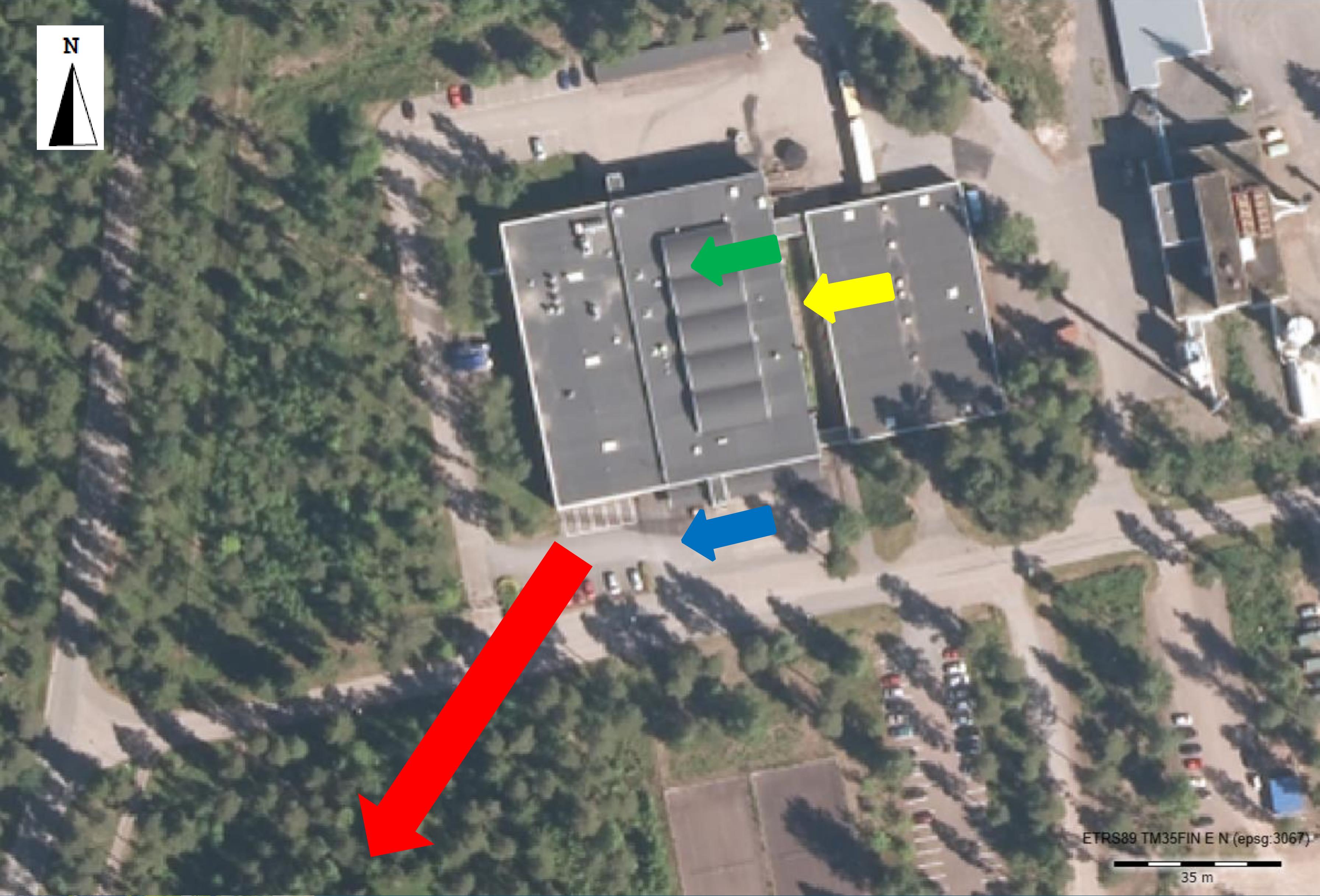
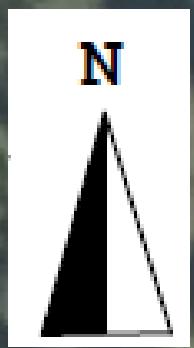
Cleaning up the earth



# In-Situ Remediation of DNAPL Source and Plume at an Active Industrial Facility with Innovative Enhanced Reductive Dichlorination Technology



*Gabriele Giorgio Ceriani*  
*In-Situ Remediation Services Team Leader*  
*Ejlskov A/S*



**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

- Dry Cleaning / Repair Shop site active since the 1960s
- Excavation remediation in 2003 / 2004
- Pump & Treat active for 5 years
- Air/Bio Sparging active for few years post excavation works, then discontinued
- PCE plume forcing private house holders 2 km downgradient to discontinue pumping wells in their gardens

JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH

# Ejlskov End to End Plan



## 1. Site Review

- Review available historical data and define the Remedial Design strategy

## 2. Remedial Design Characterization

- Conduct high frequency investigation (RDC) to define lateral, vertical extent of the contamination and total contaminant mass distribution
- Refine final Remediation Plan
- Define remediation criteria

## 3. Active Remediation

- Conduct remediation / injection works
- Use of RDC data allows for efficient use of remediation budget

## 4. Performance Monitoring

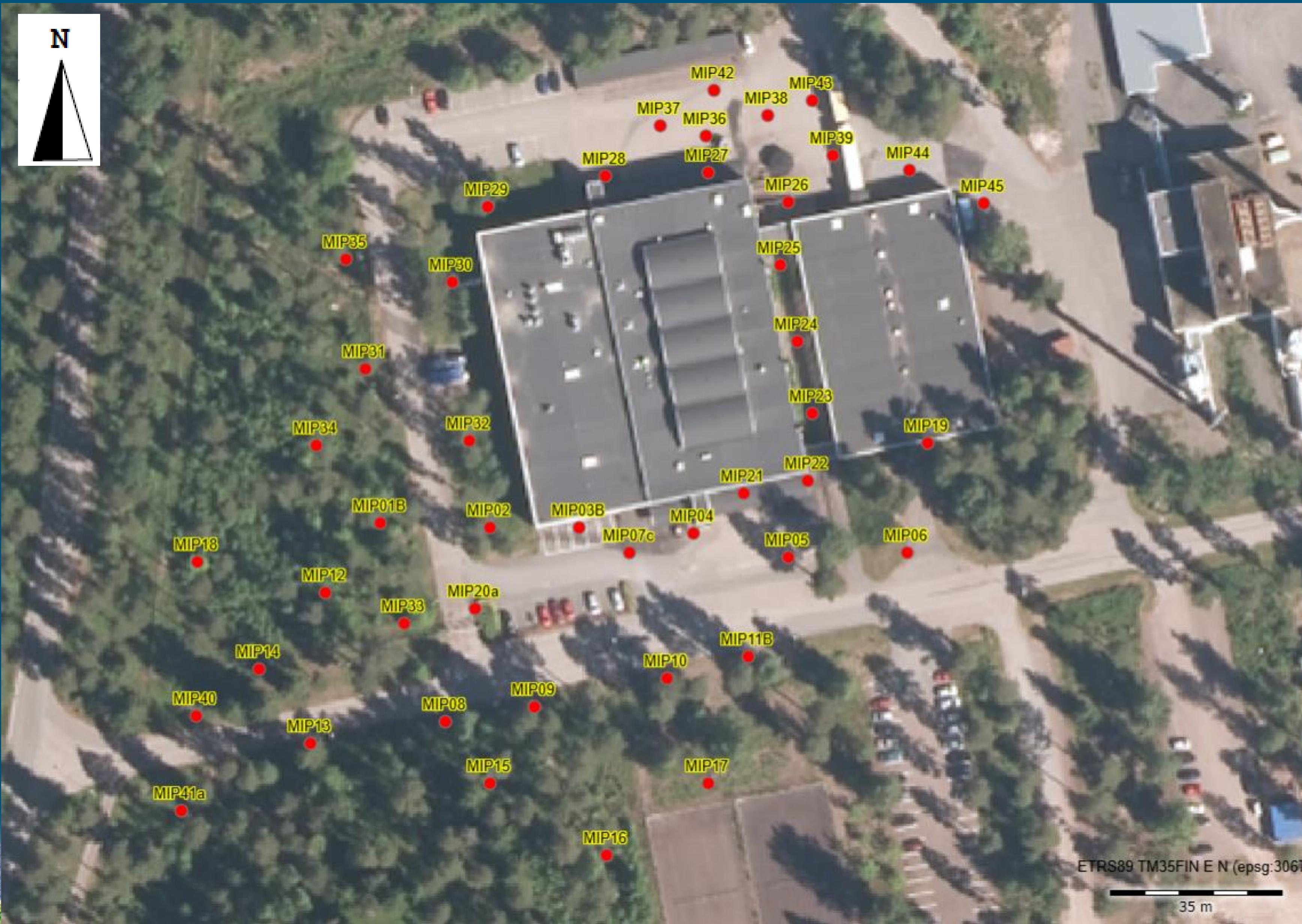
- Soil and groundwater data to be compared against baseline values based on agreed monitoring programme

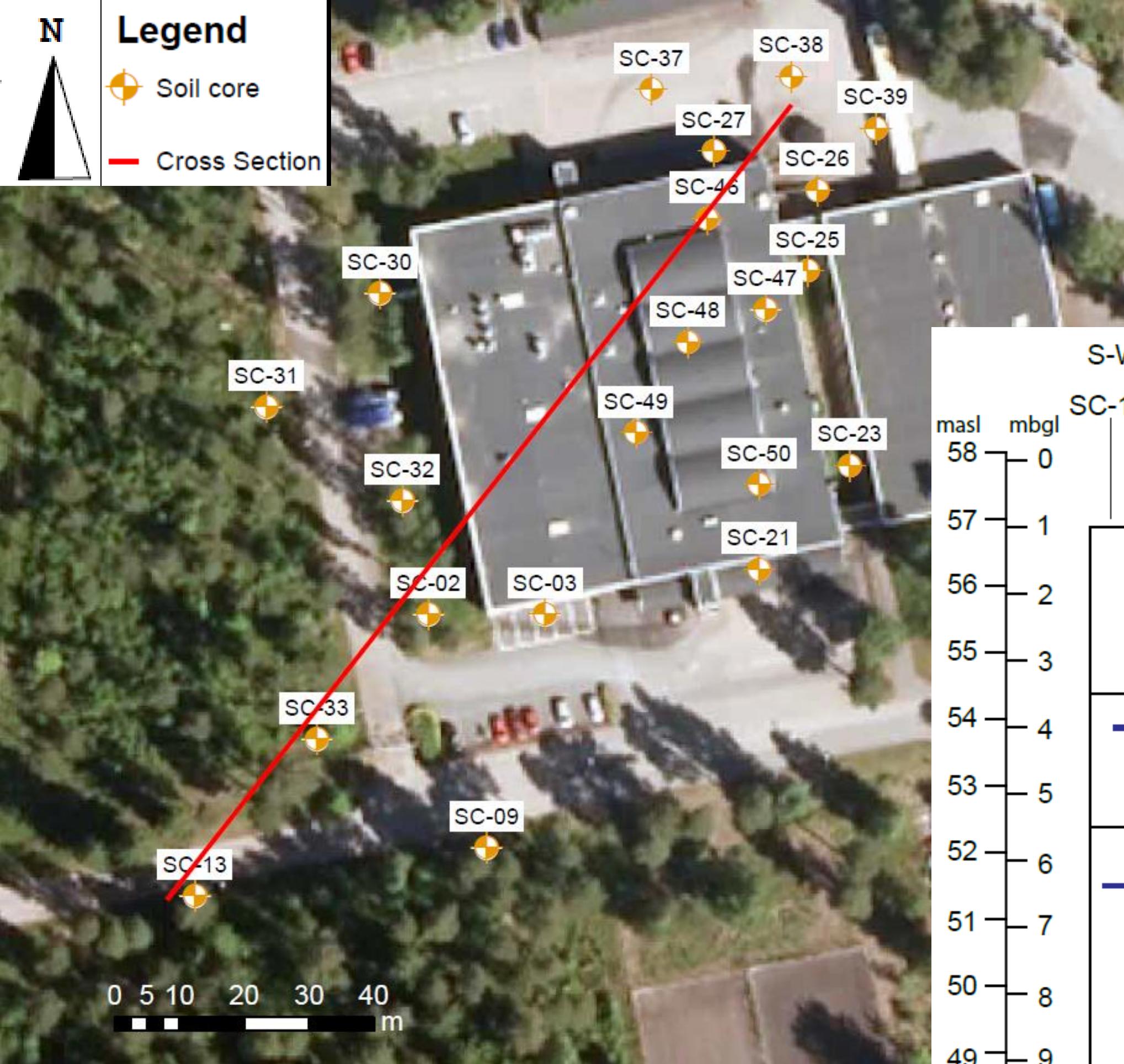


JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH

# MIP Investigation

- Regular and Low Level MIP used to assess lateral and vertical extent of contamination
- MIP screening allowed to identify source zone located in area totally unknown to client and secondary off-site minor source zone
- Follow up soil sampling and GW wells installation based on MIP profile – TARGETED EFFORT





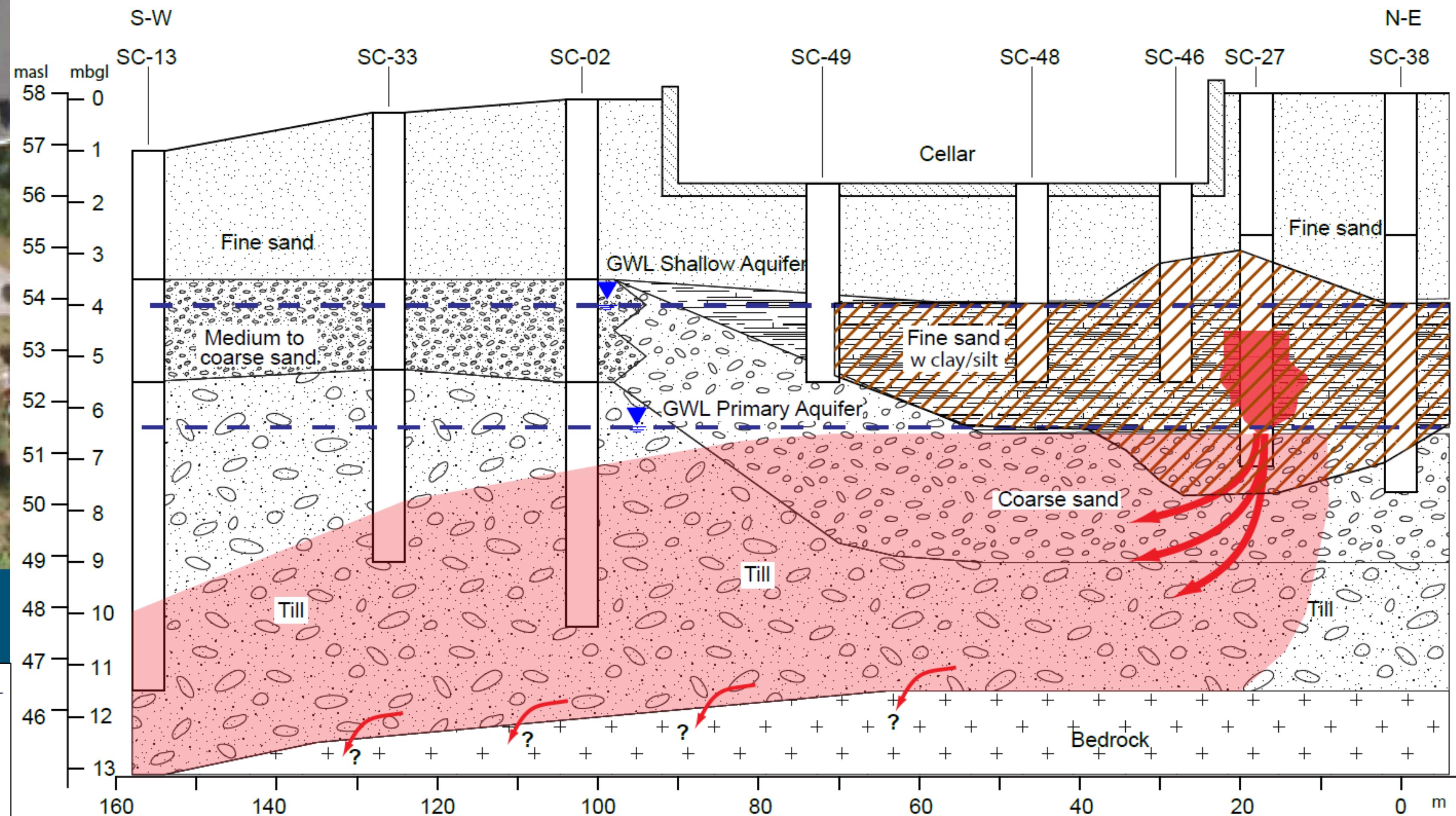
### CSM LEGEND

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| DNAPL Impacted zone          | Main preferential pathway for DNAPL diffusion in primary aquifer |
| Dissolved phase plume        | Potential downward pathway for dissolved phase diffusion         |
| Soil contamination mass bulk |  |

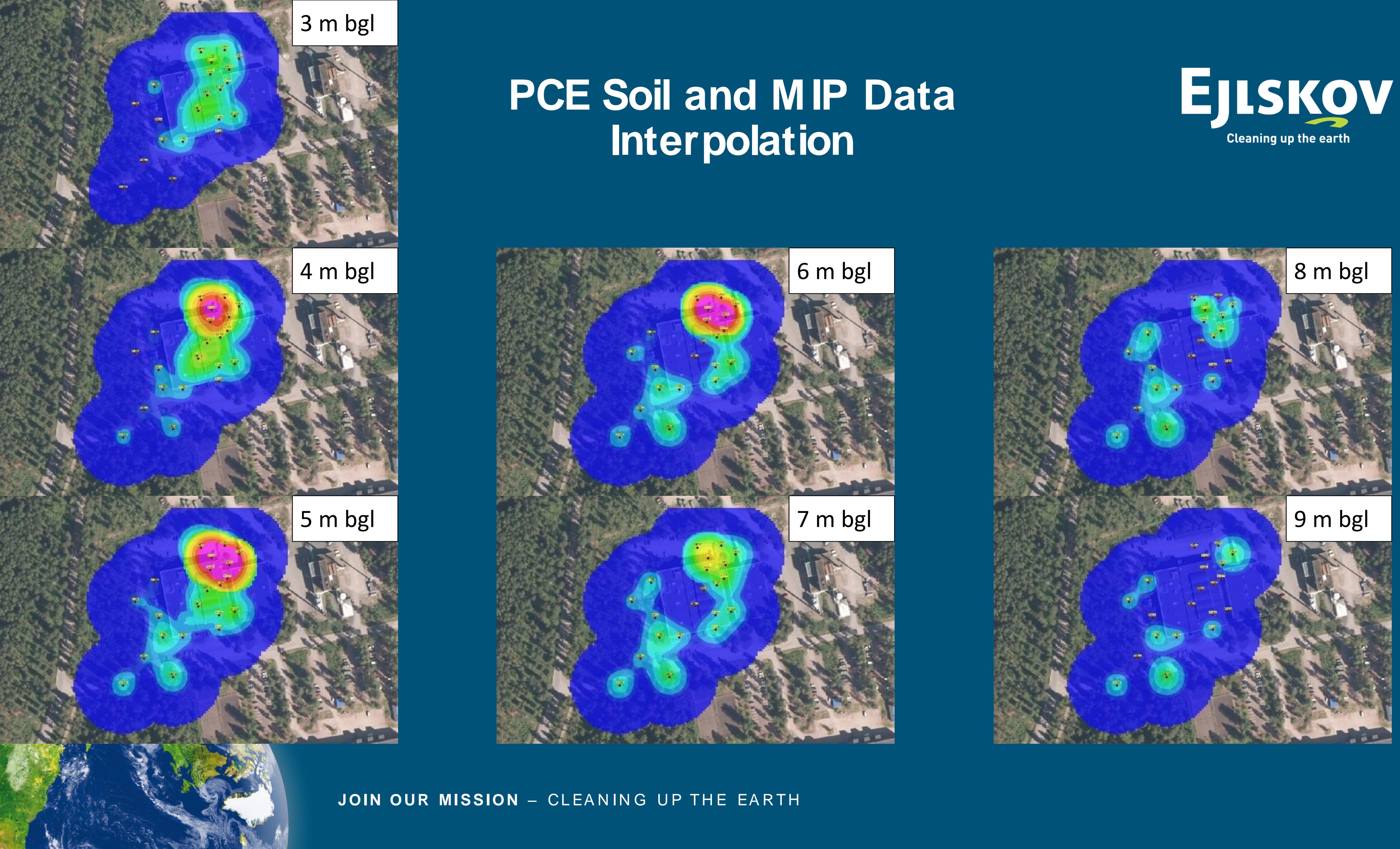
# Soil Coring and CSM

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

Total of 255 soil samples collected



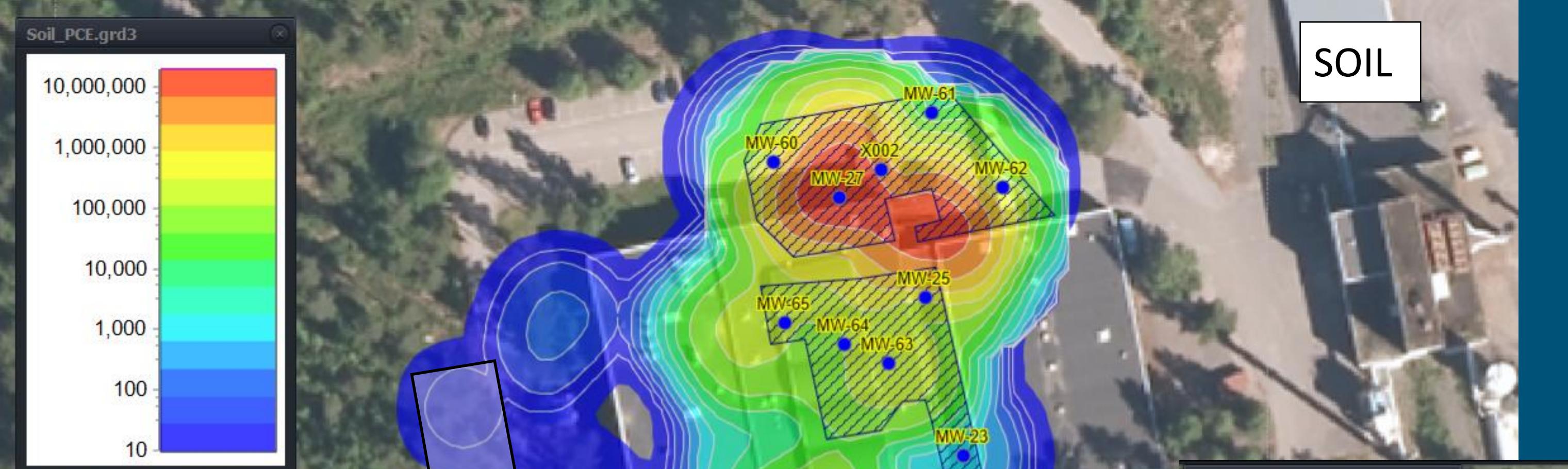
JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH



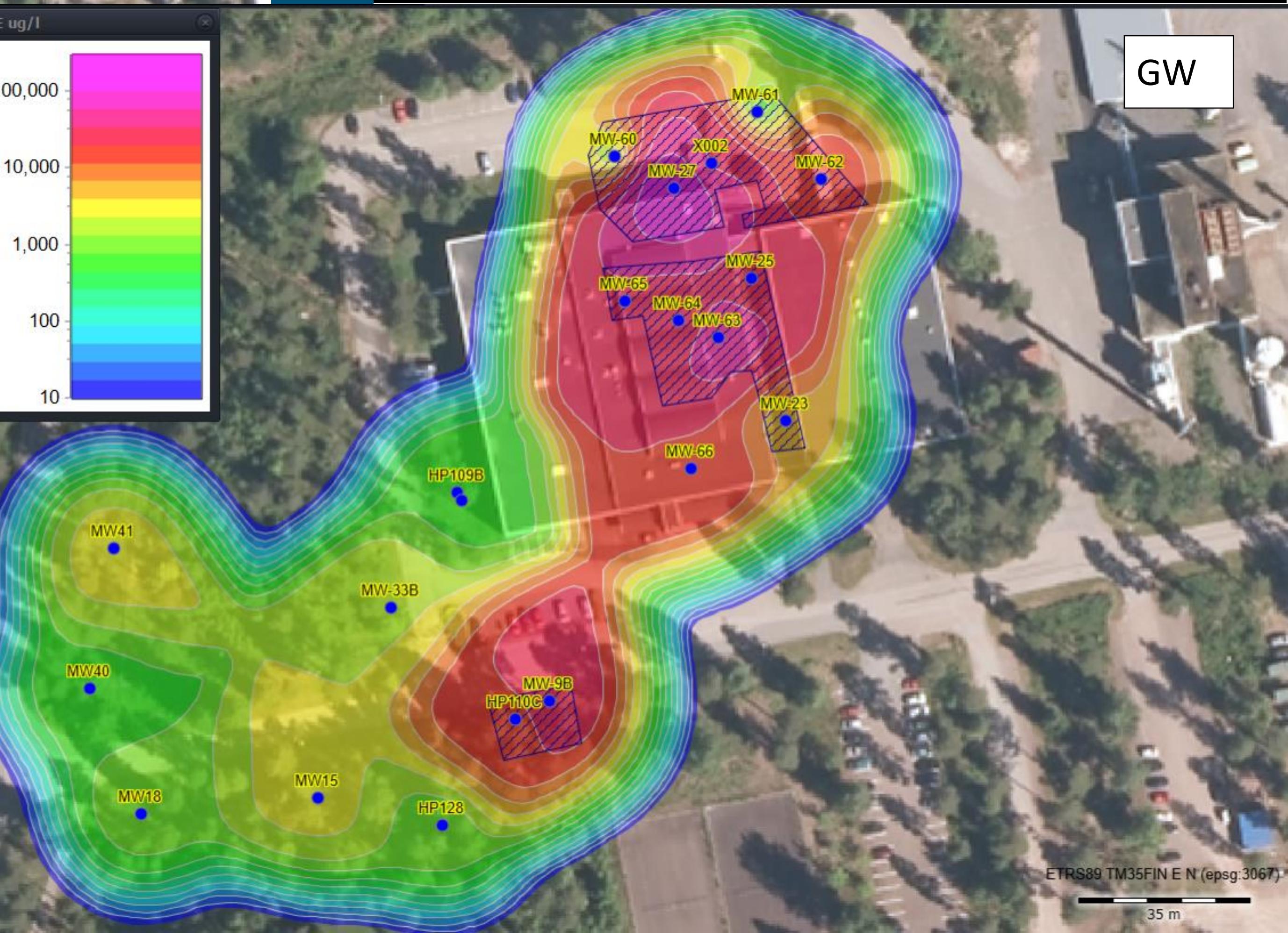
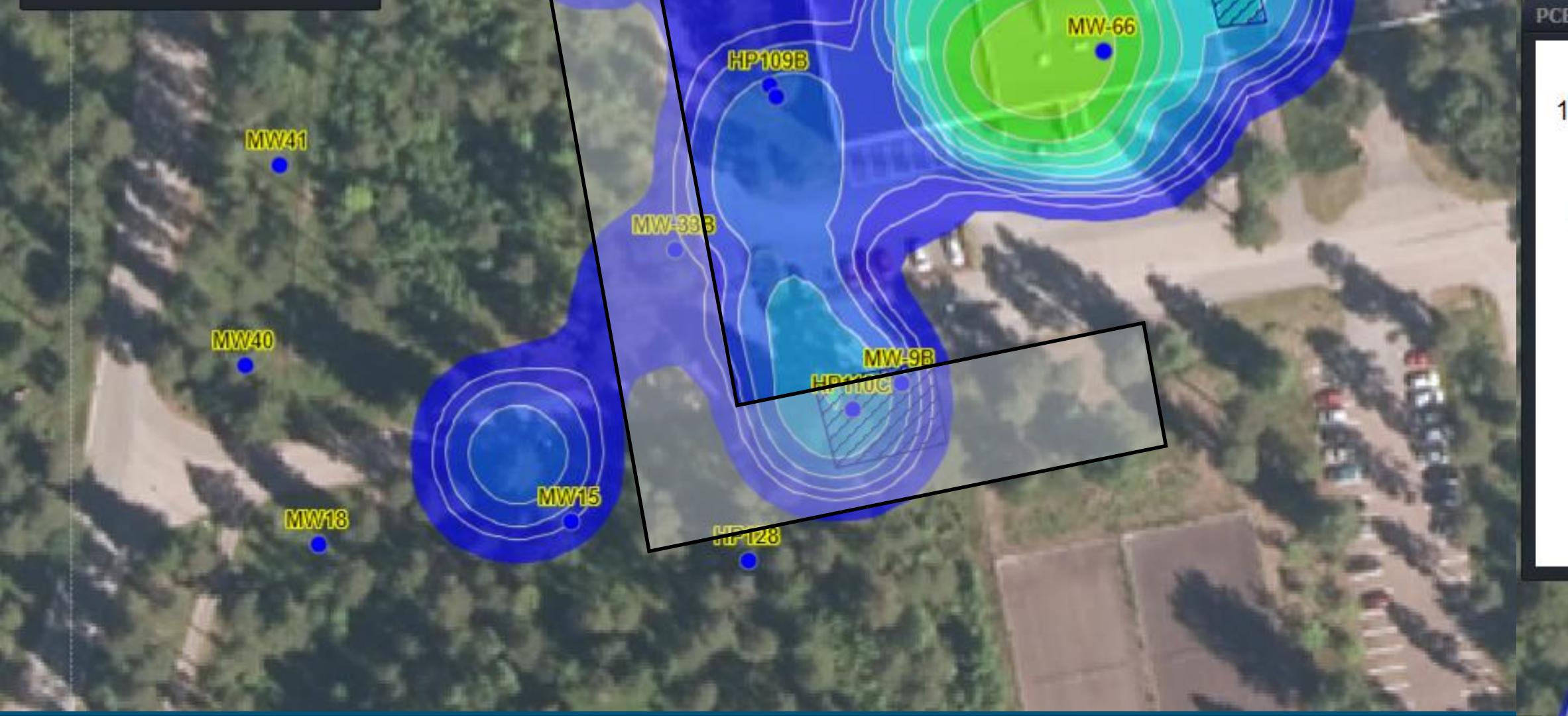
# PCE Soil and MIP Data Interpolation

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH



| <b>SUBAREA ID</b> | <b>AREAL EXTENT<br/>(m<sup>2</sup>)</b> | <b>PCE MASS (kg)</b> |
|-------------------|---|----------------------|
| AREA A            | 350                                     | 16,000               |
| AREA B            | 500                                     | 250                  |
| AREA C            | 250                                     | 150                  |
| AREA D            | 800                                     | 1,000                |
| AREA E            | 250                                     | 50                   |

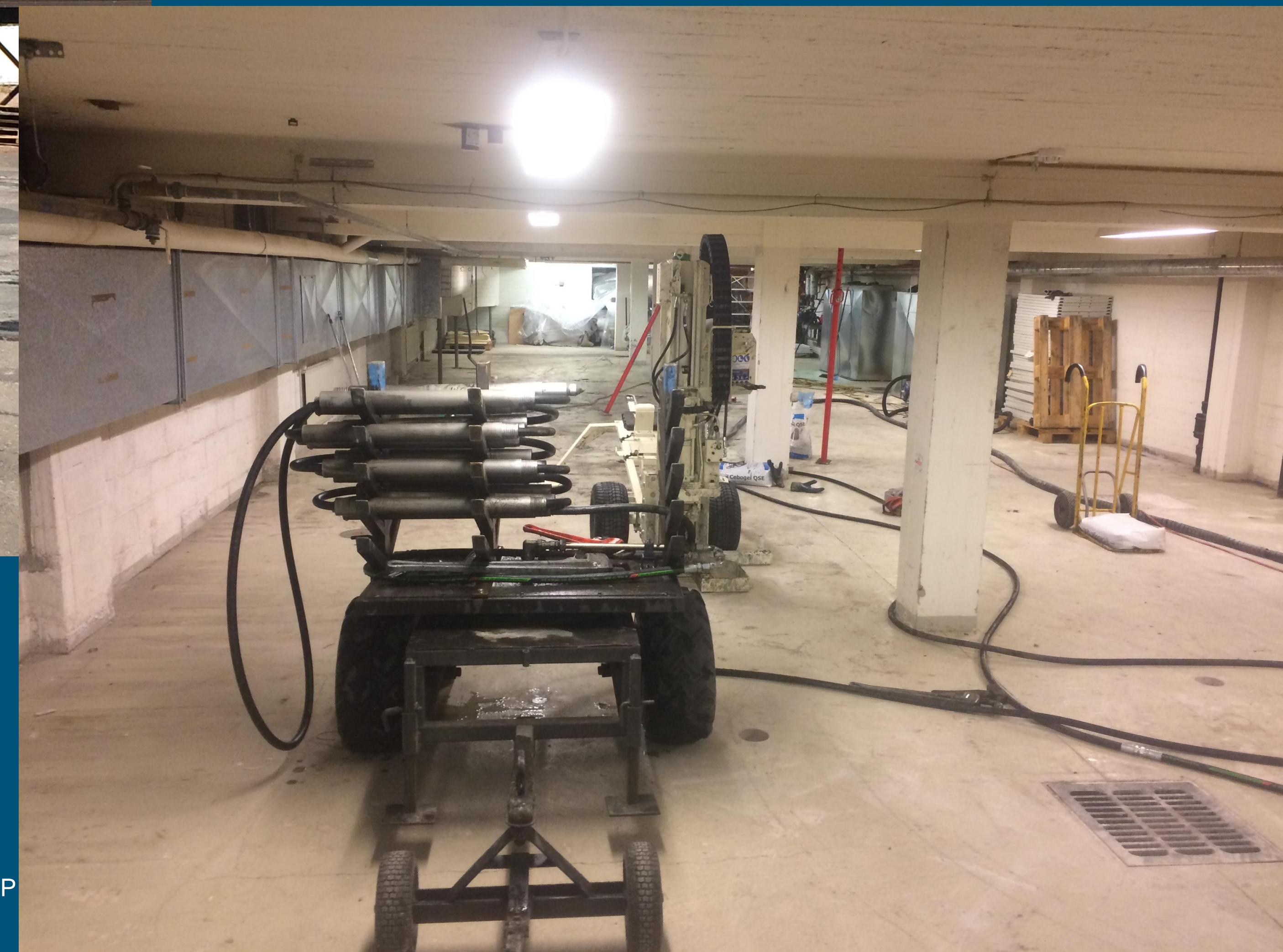


Injection works completed between April and August 2017. A total of 702 injection points were completed across subareas A through E.

Approx. 52,000 Kg of CAT100 (incl. 1,600 kg of BOS100<sup>®</sup>)  
were installed

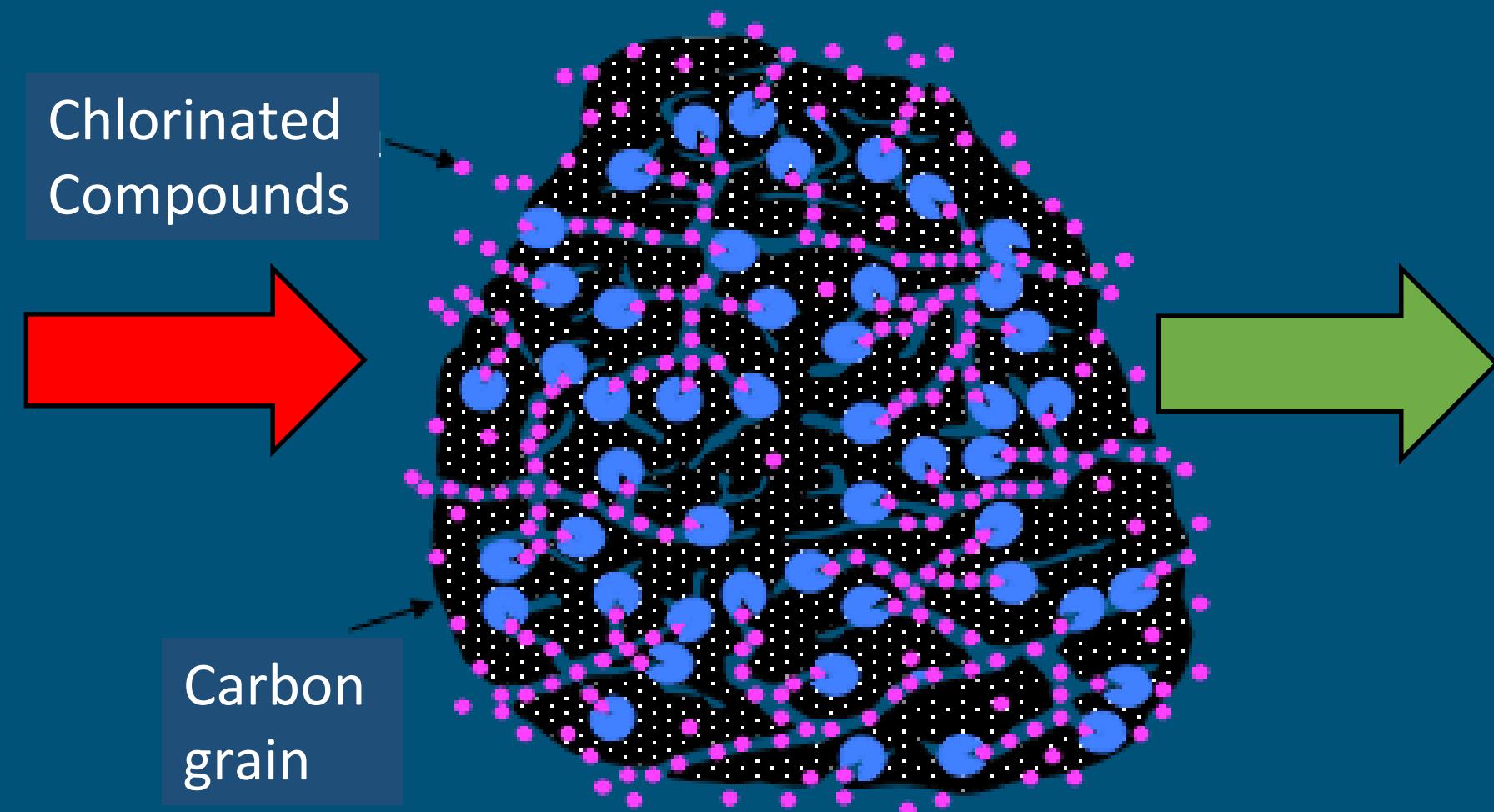


JOIN OUR MISSION – CLEANING UP



# BOS 100® - Degradation of Chlorinated Solvents

- Contaminants dissolved in groundwater are absorbed to the carbon based on carbon maximum absorption capacity
- PCE and TCE have higher absorption affinity than DCE and VC
- As mother products are degraded to daughter products, absorption availability is generated for more dissolved phase contamination to be absorbed

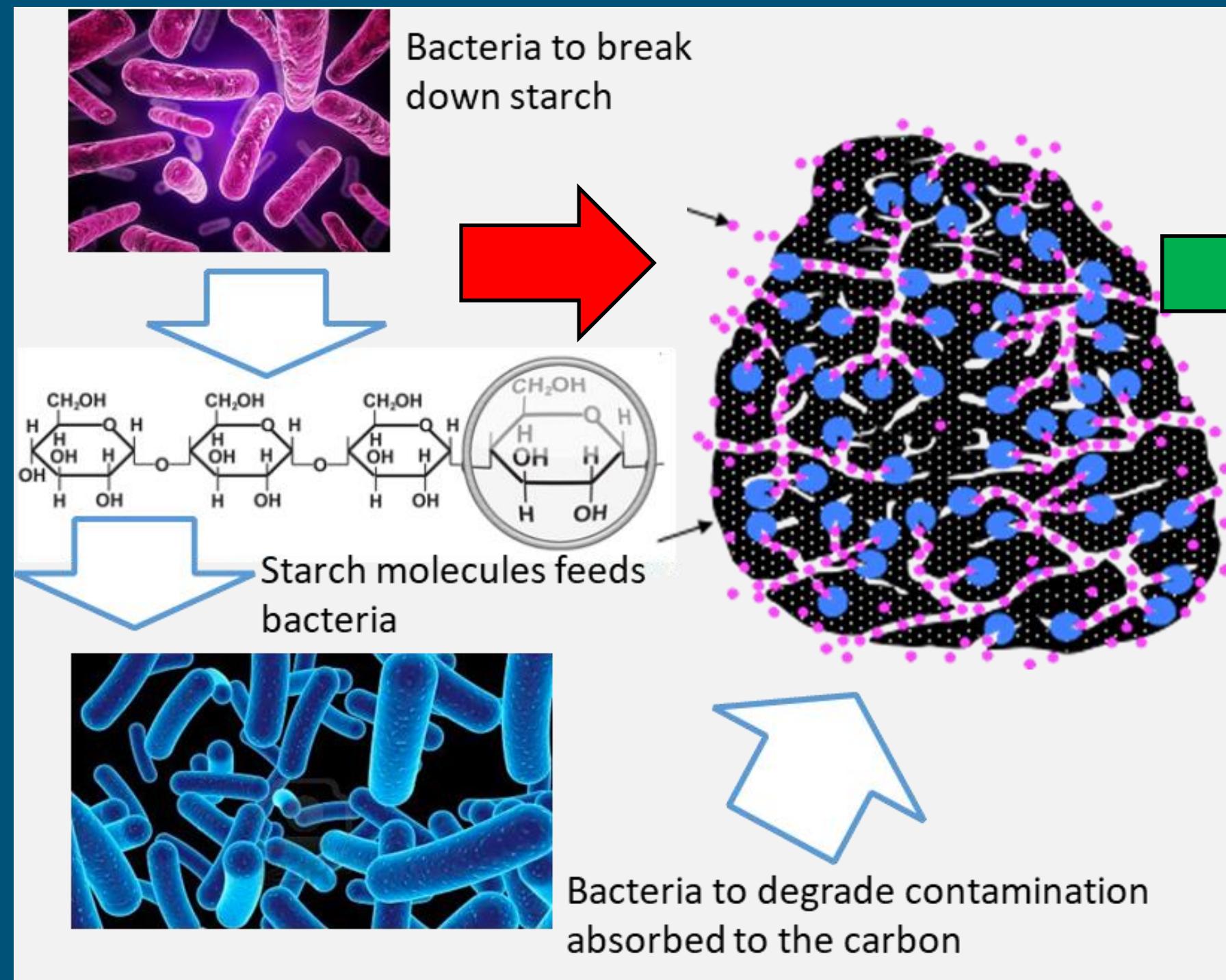


- Complete degradation to non-toxic end products is achieved
- Dissolved gases typically observed in groundwater samples are Ethylene, Acetylene and Chloride
- Trap and Treat® effect will last until ZVI is available (IMPORTANCE OF REMEDIAL DESIGN)



# CAT100 - Biodegradation of Chlorinated Solvents

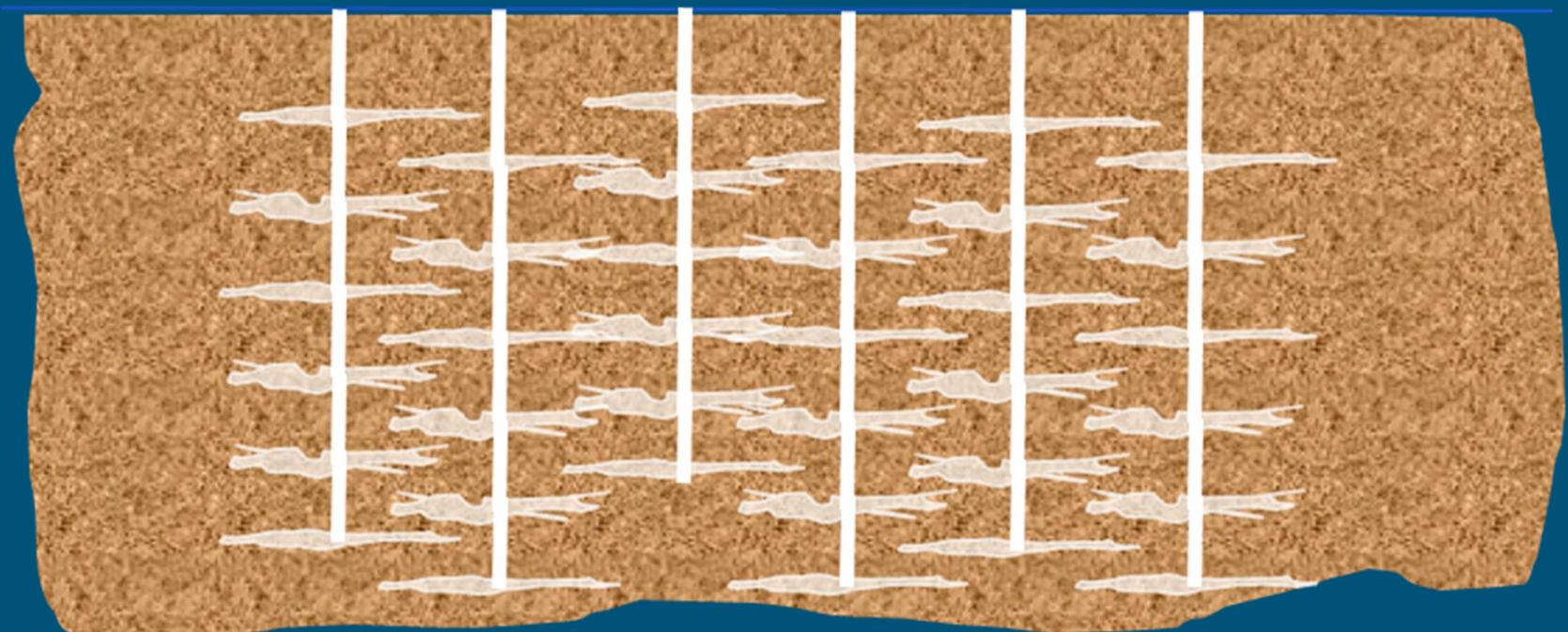
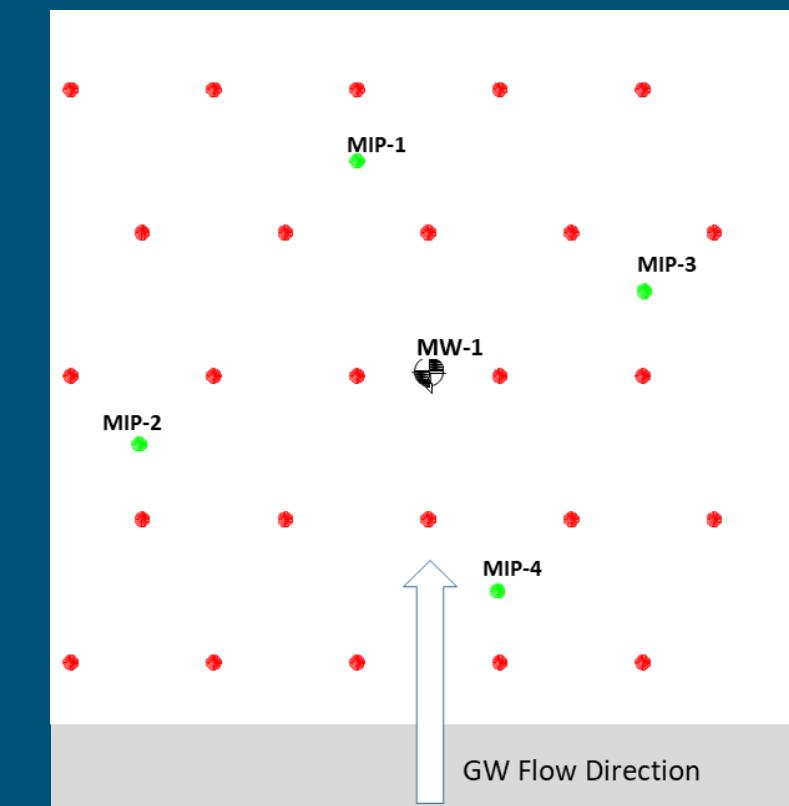
- Contaminants dissolved in groundwater are absorbed to the carbon based on carbon maximum absorption capacity
- Within initial months after installation abiotic conditions will be predominant
- As starch is degraded to simpler carbohydrates, CVOCs reductive bacteria start ERD processes increasing the generation of daughter products



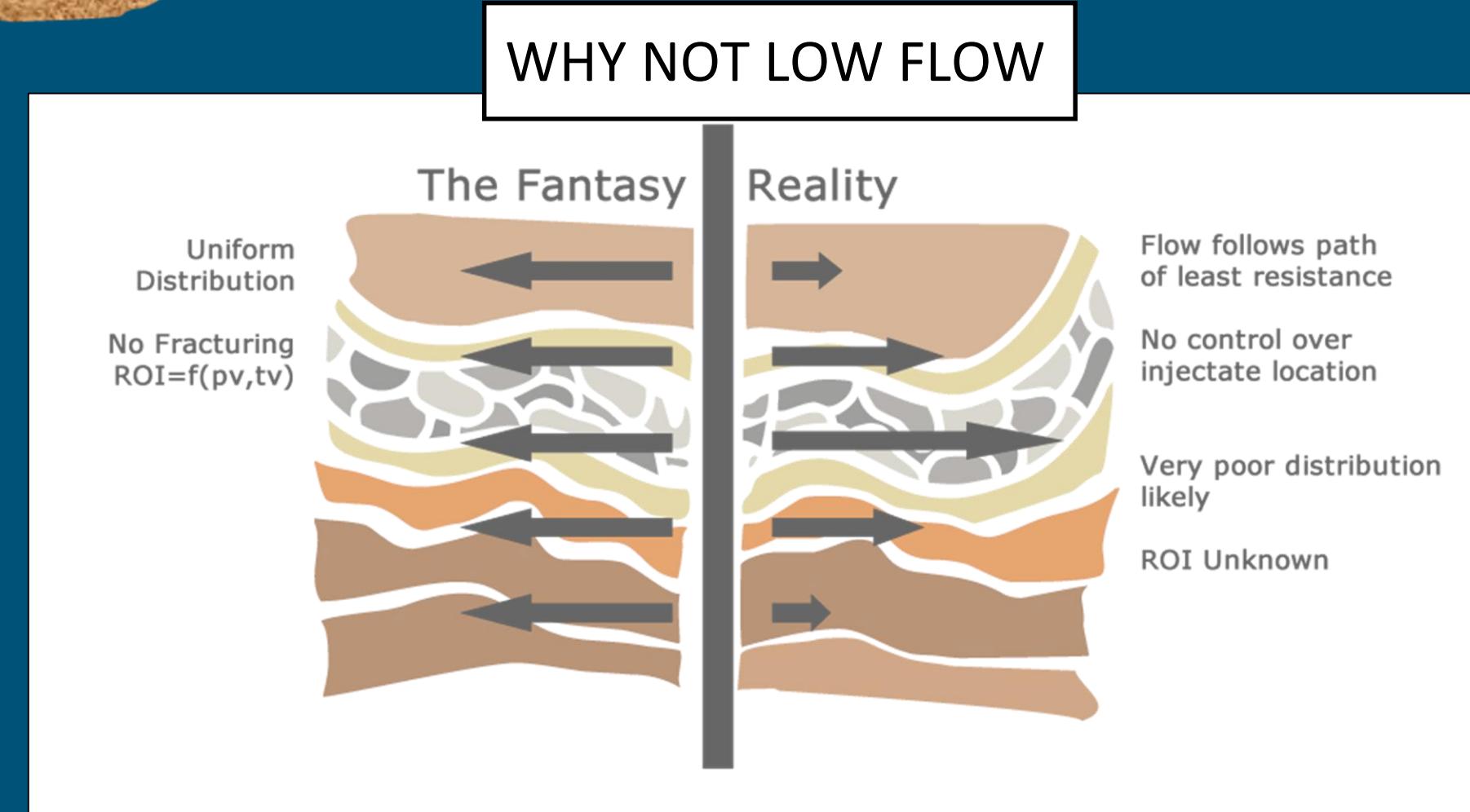
- High concentrations of mother products (PCE/TCE) generally fall drastically after ERD conditions start prevailing (except DNAPL)
- Monitoring of DCE and VC in groundwater is a balance of residual mass of mother products available and carbon absorption
- As mother products will be fully treated, DCE and VC concentrations will decrease to non-detect



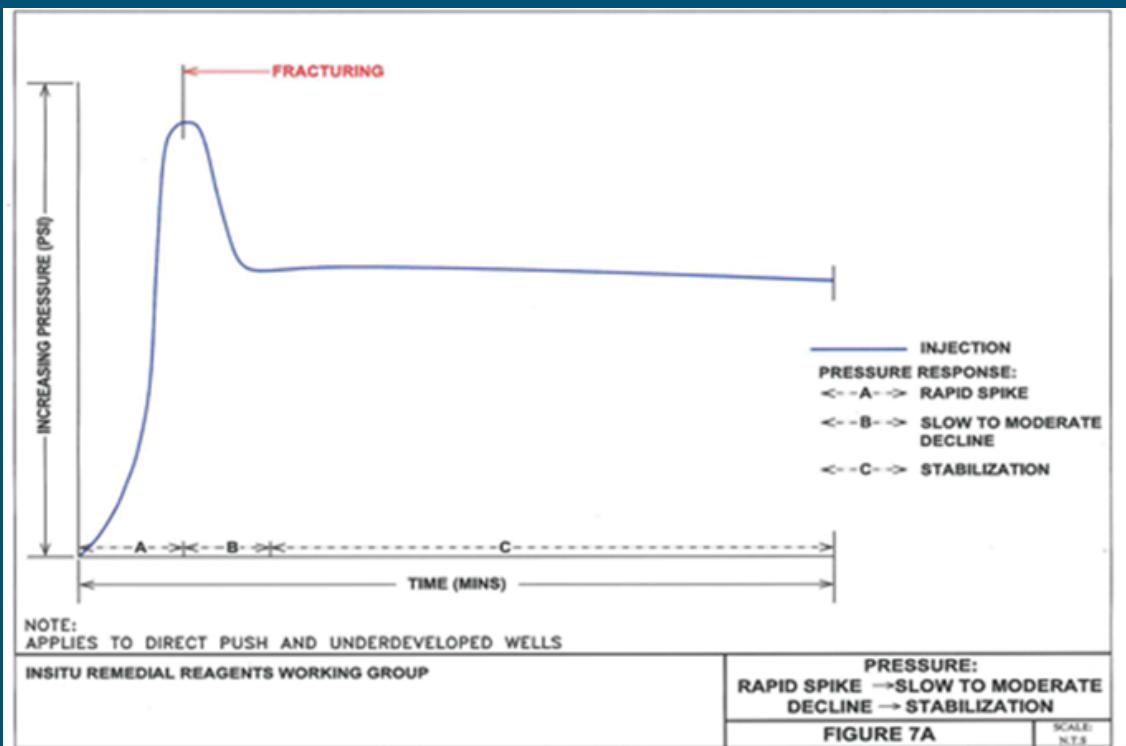
# Installation / Injection Features – Key to success



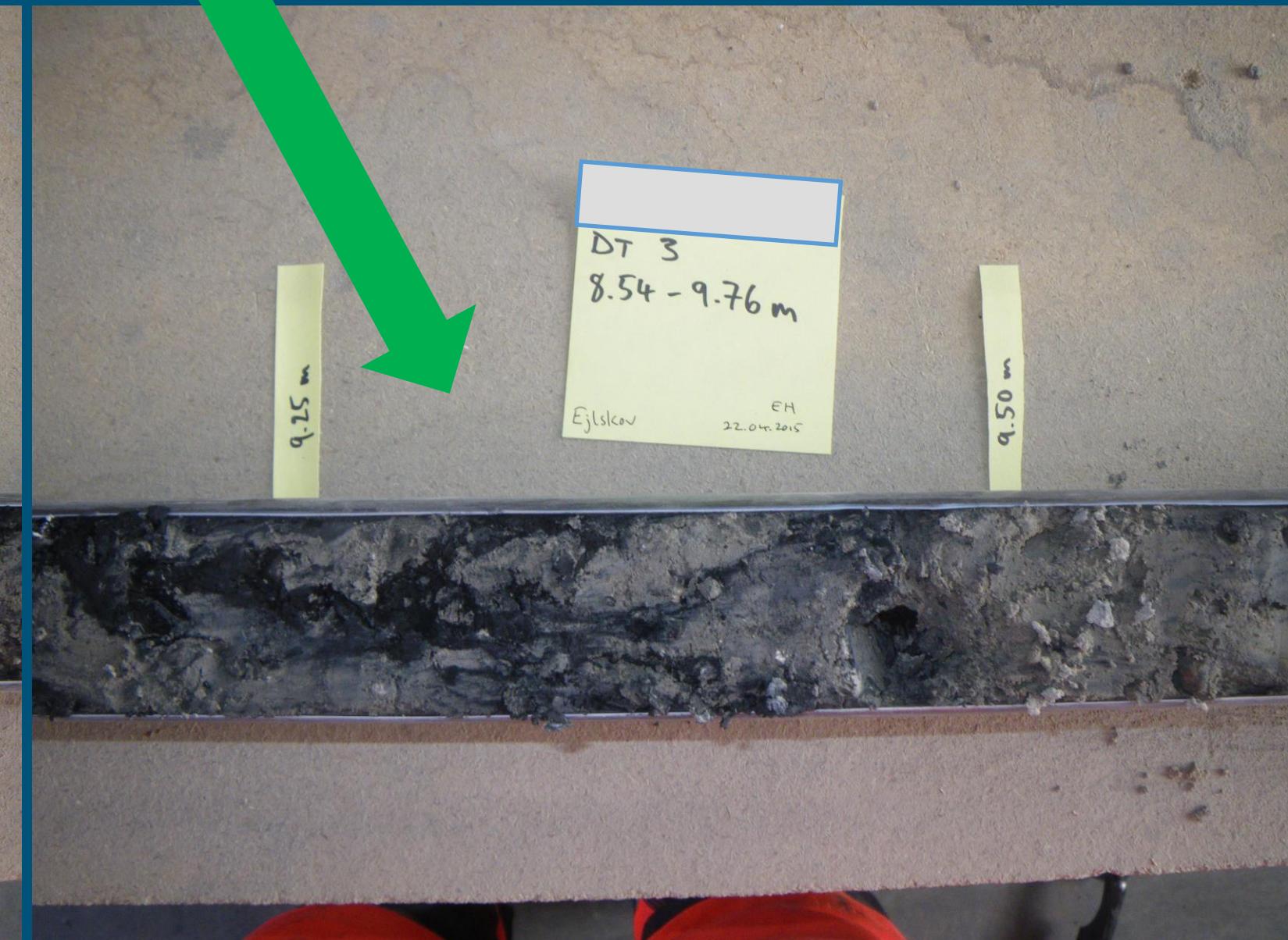
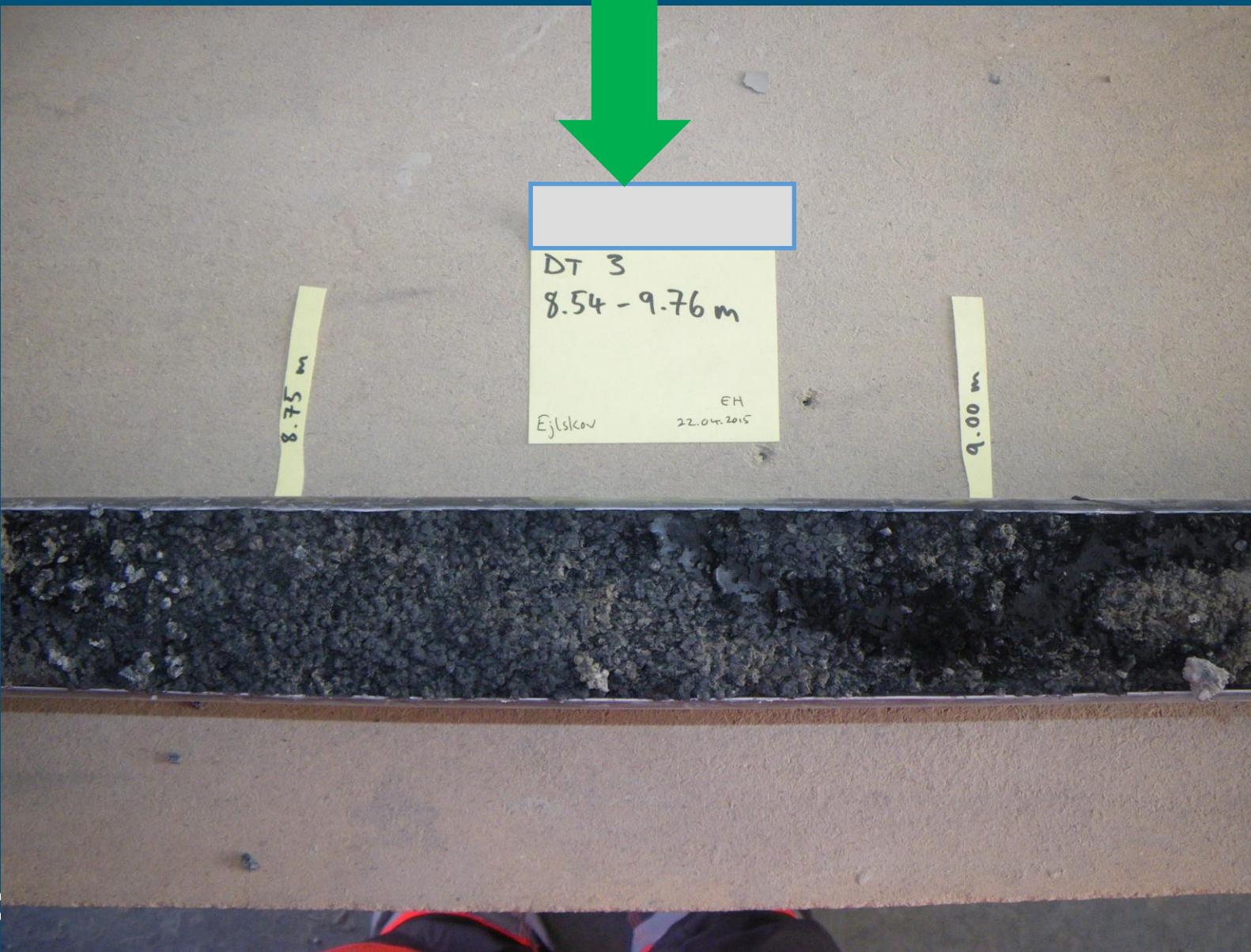
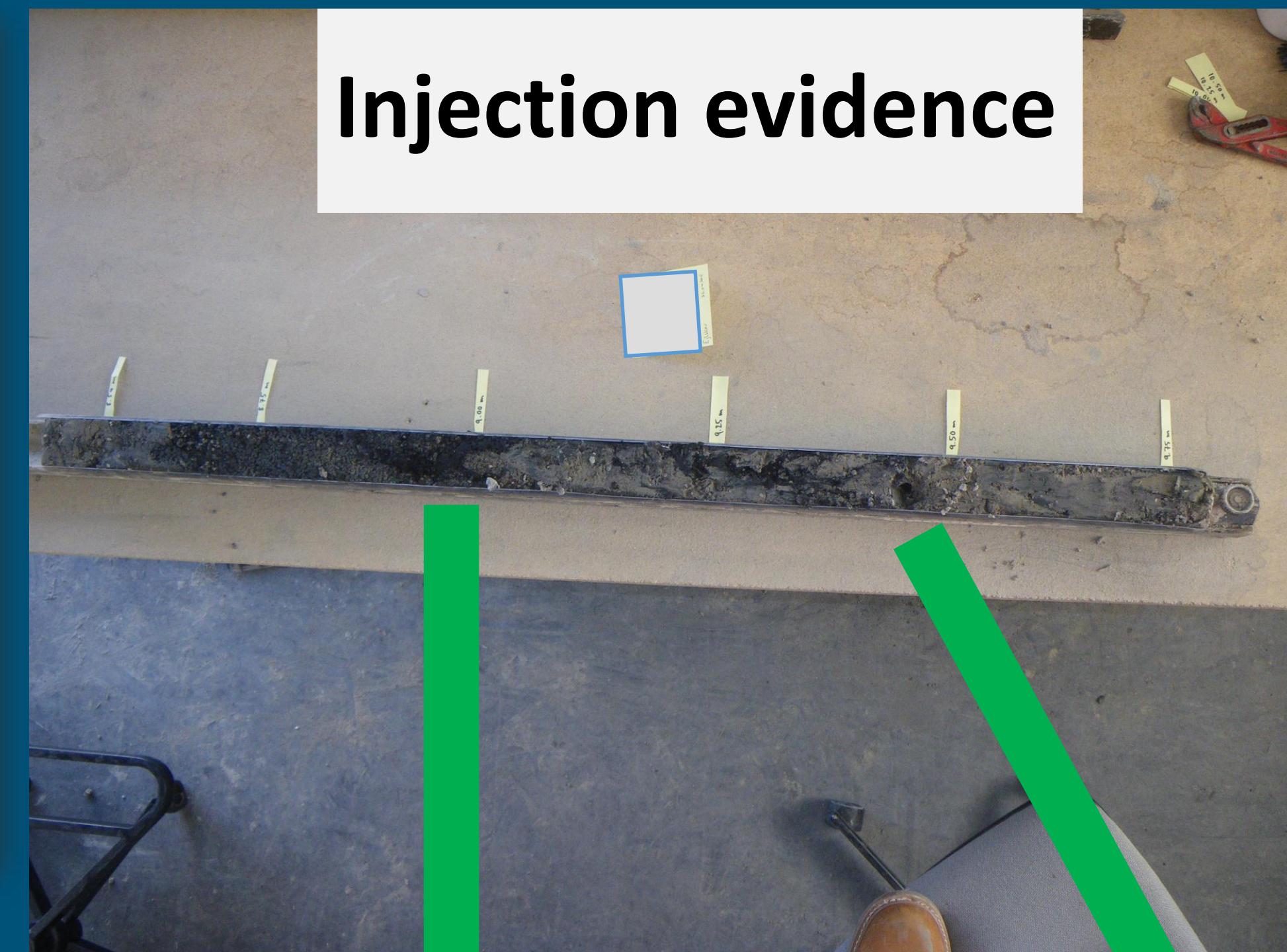
- Pressure, Flow, Exit Velocity
- Injection Volumes
- Distribution
- Sand vs. Clay Formations



- Mixing of slurry on site
- Top down injections - one for every 0,5-0,6 meter
- Injections pressure up to 90 bar and flow up to 260 lpm
- High pressure allows for soil separation (clayey soils)
- High flow leads to turbulent mixing (sandy soils)
- Injection Hoses – no loss of product in rod joints



**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

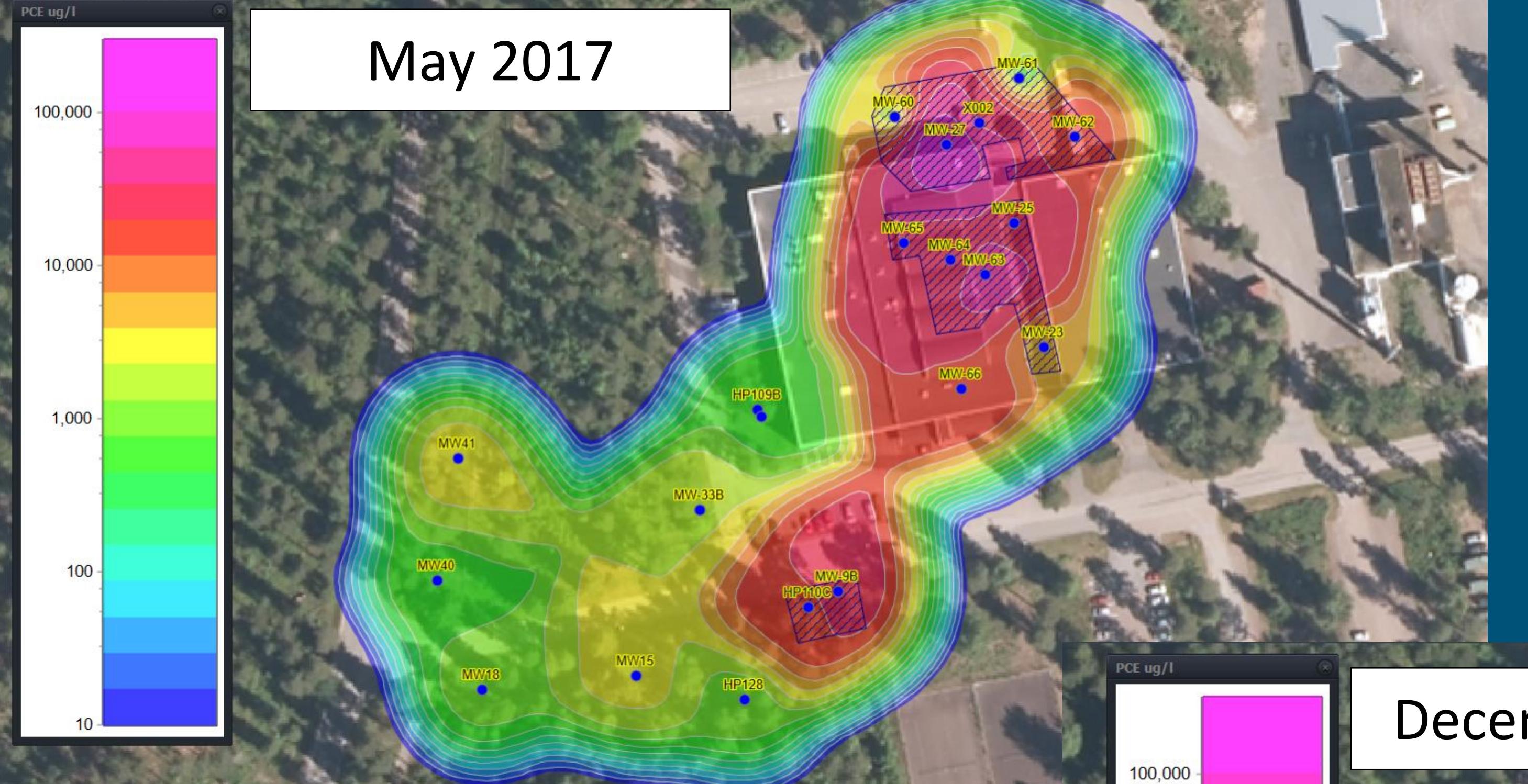


# Injection evidence

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth



May 2017



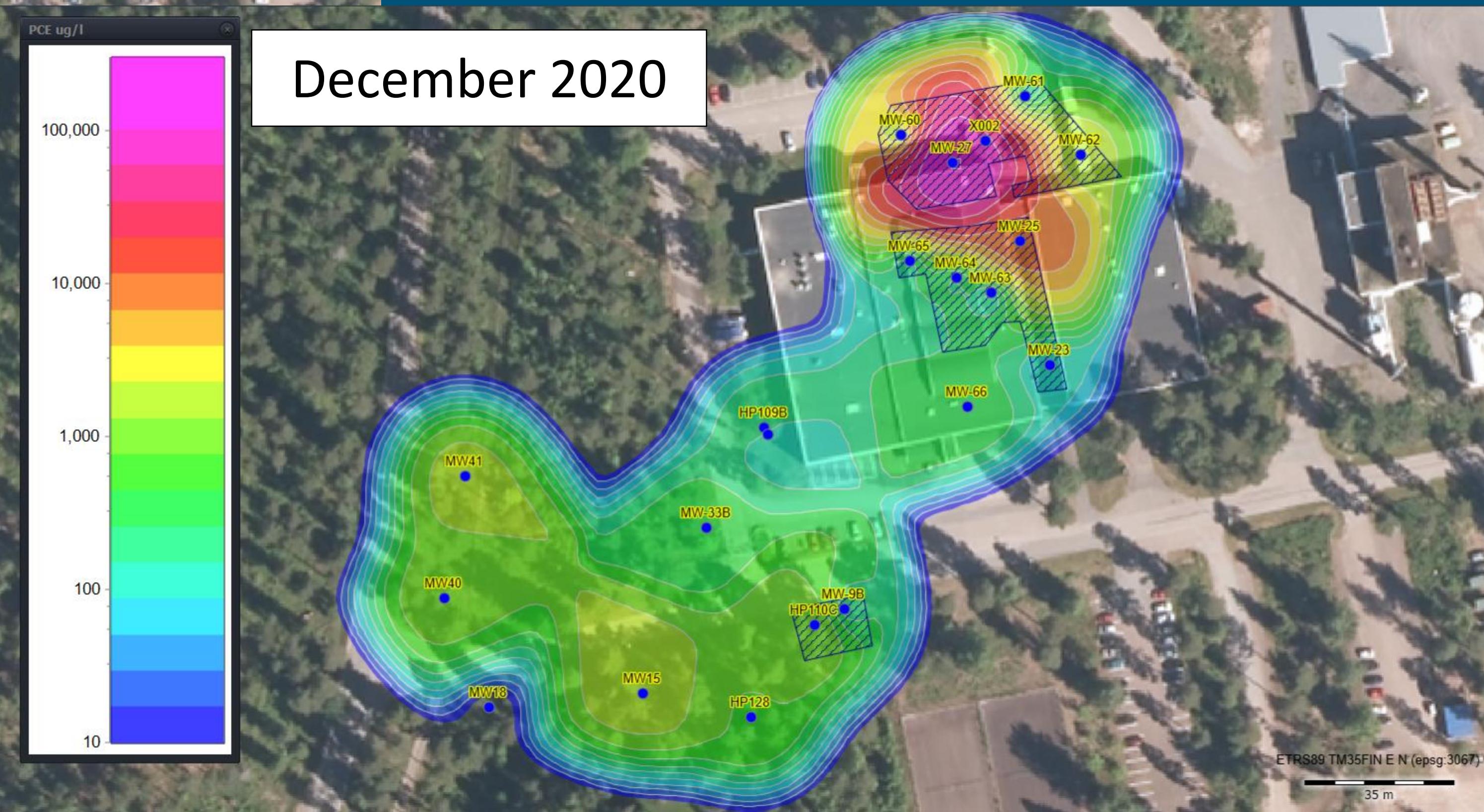
GW control program planned until end of 2022.  
Interim target is to bring PCE values at site boundary around 20-50 µg/l

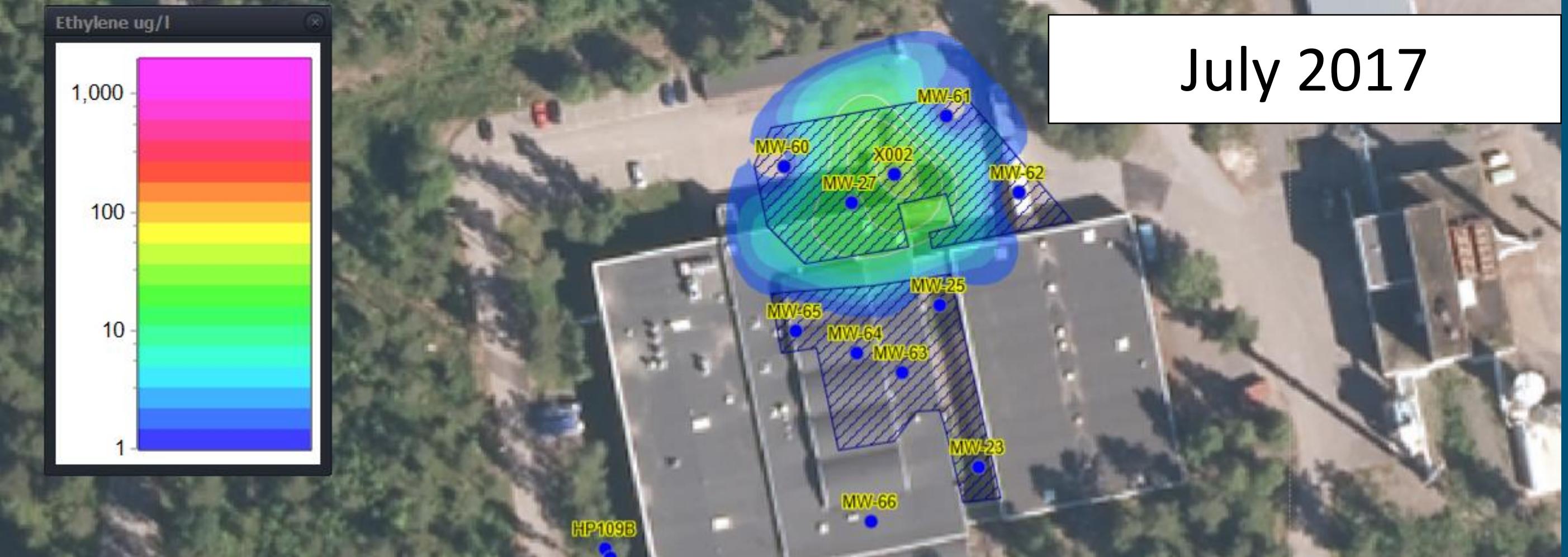


JOIN OUR MISSION – CLEAN

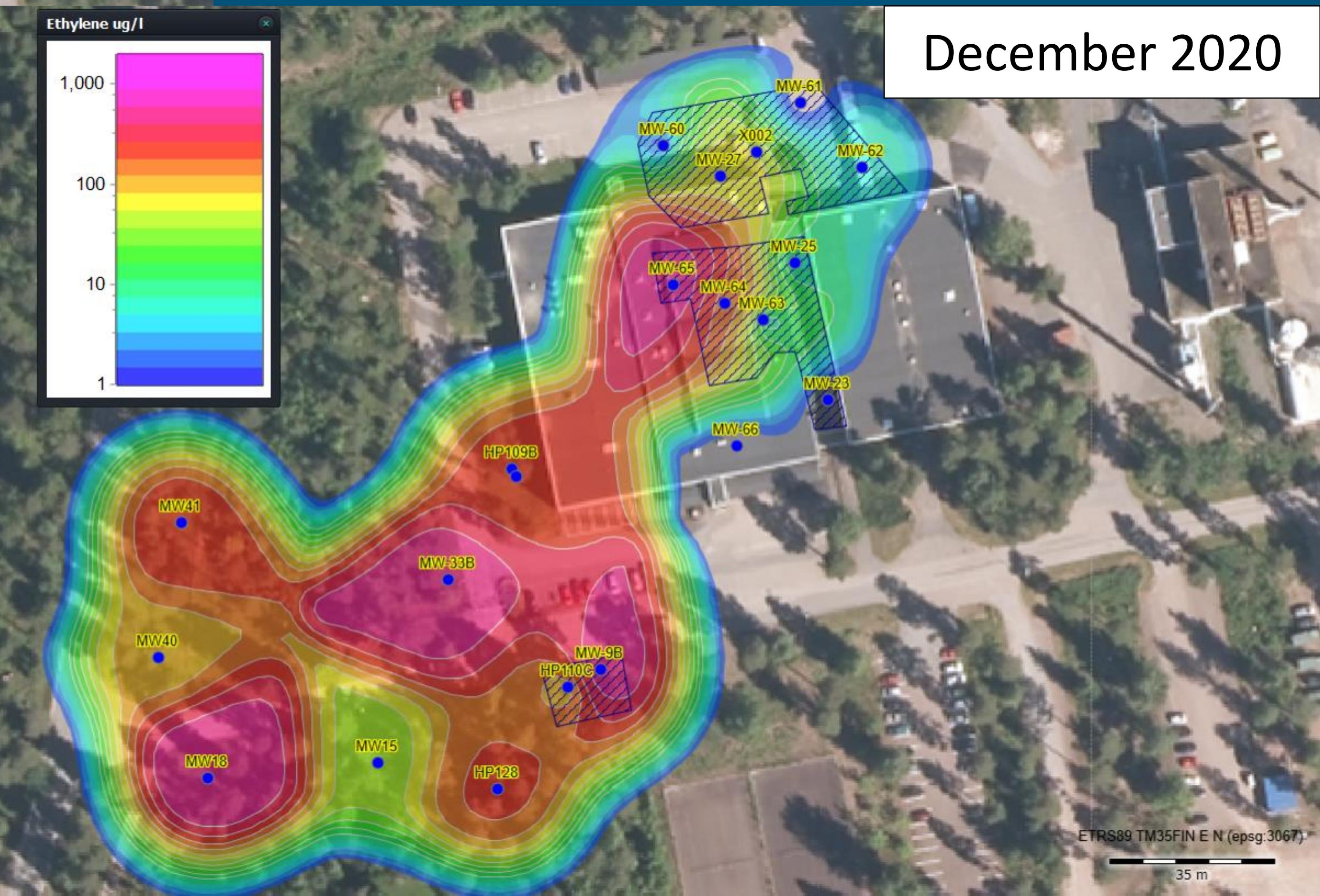
## PCE Plume (Pre- and Post Injection)

December 2020





JOIN OUR MISSION – CLEANING UP



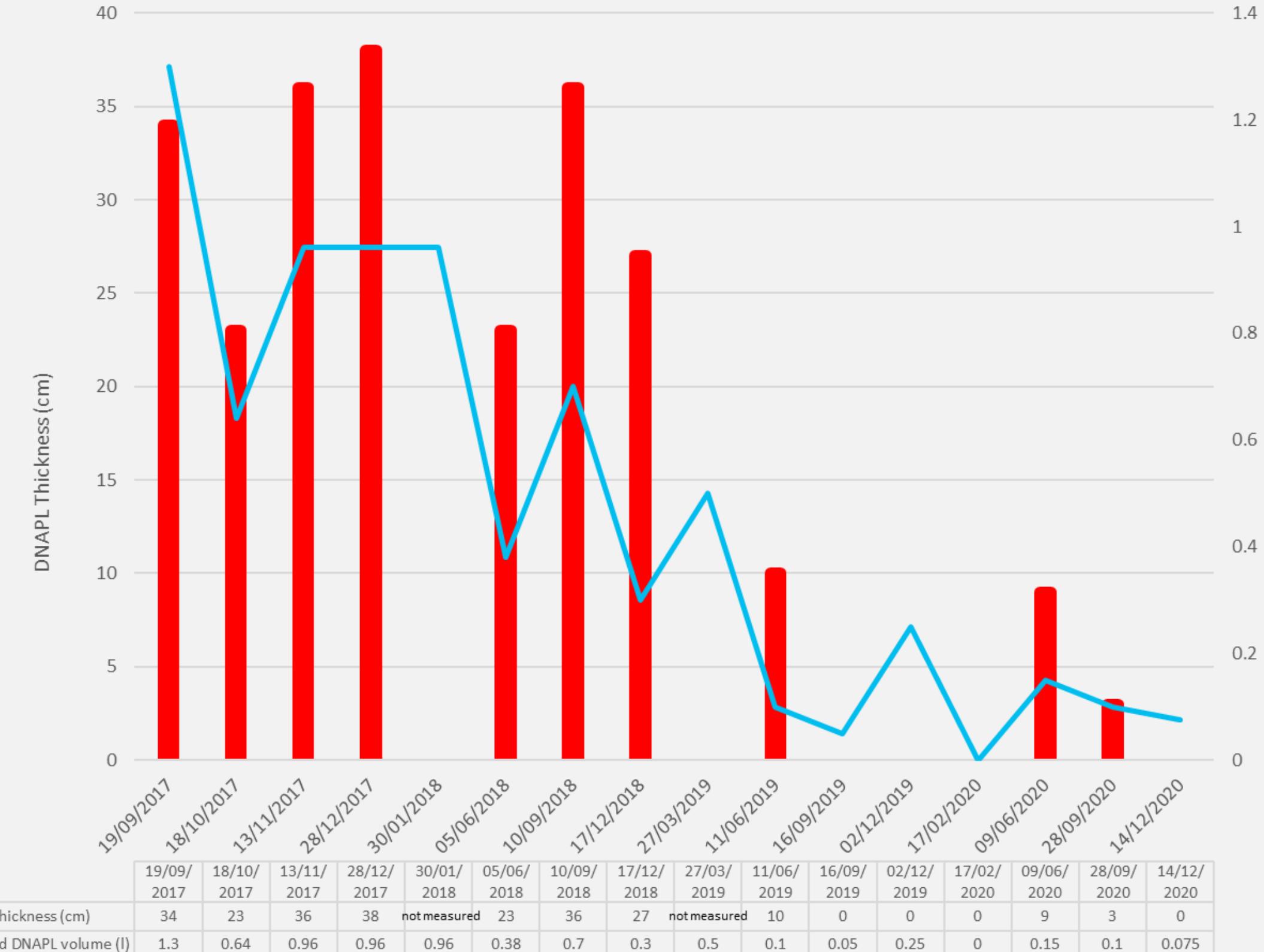
**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

## Ethylene Plume Development (Pre- and Post Injection)

# Mass Removal vs. Biological Evidence

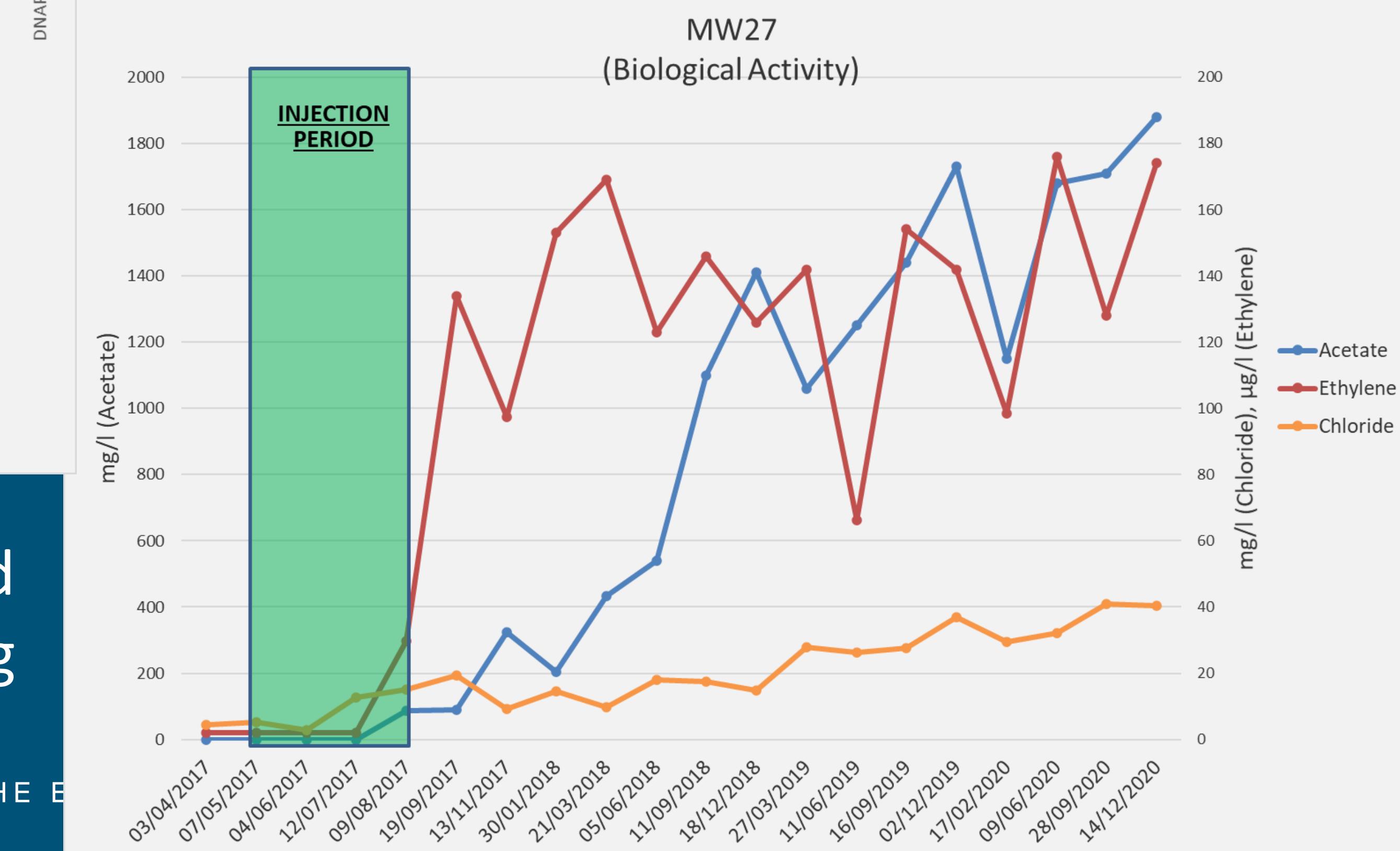


DNAPL Trends - MW27



EJLSKOV  
Cleaning up the earth

DNAPL evidence  
MW27 soil core



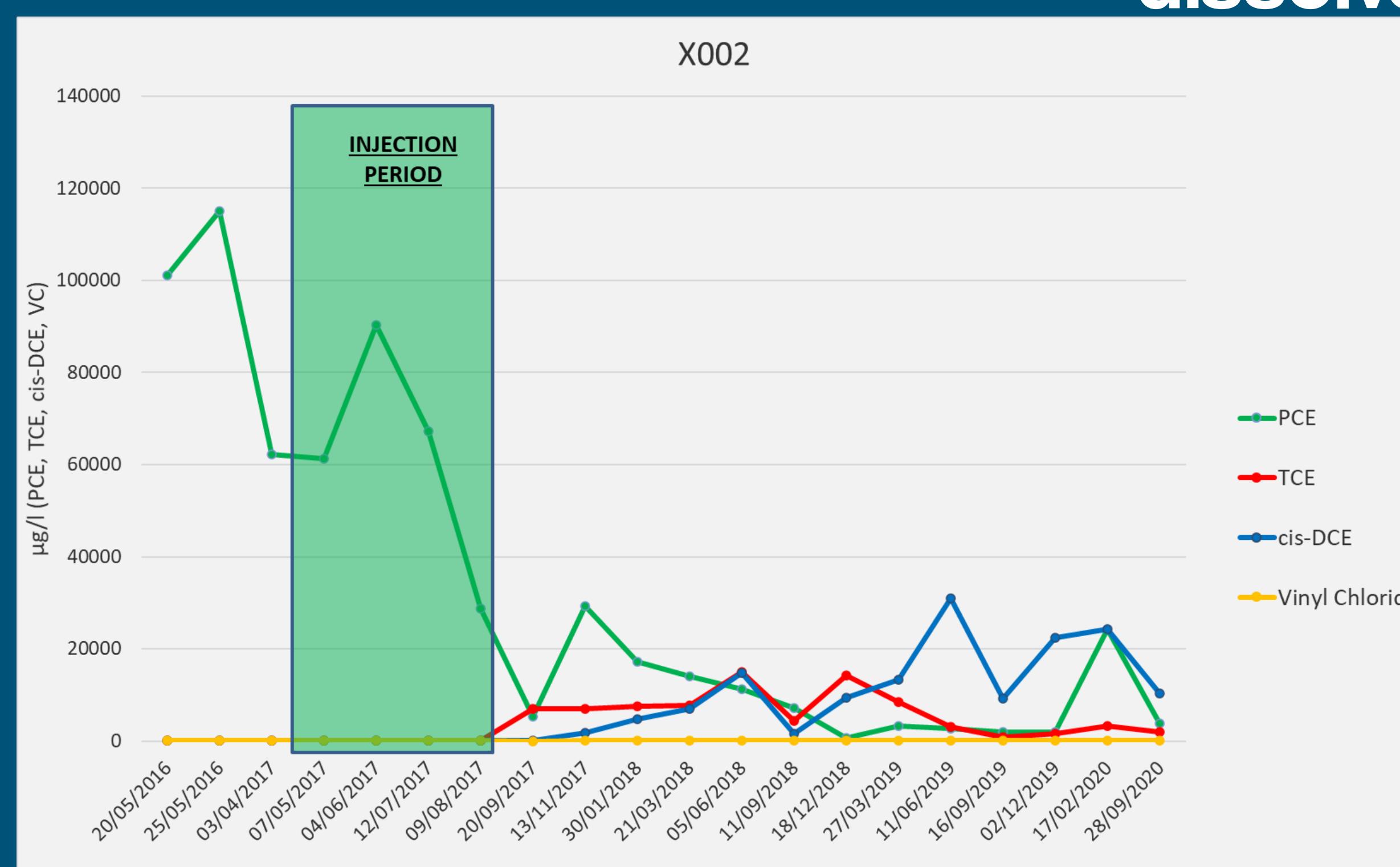
PCE Concentrations found  
in Soil at 50-60,000 mg/kg

JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE E

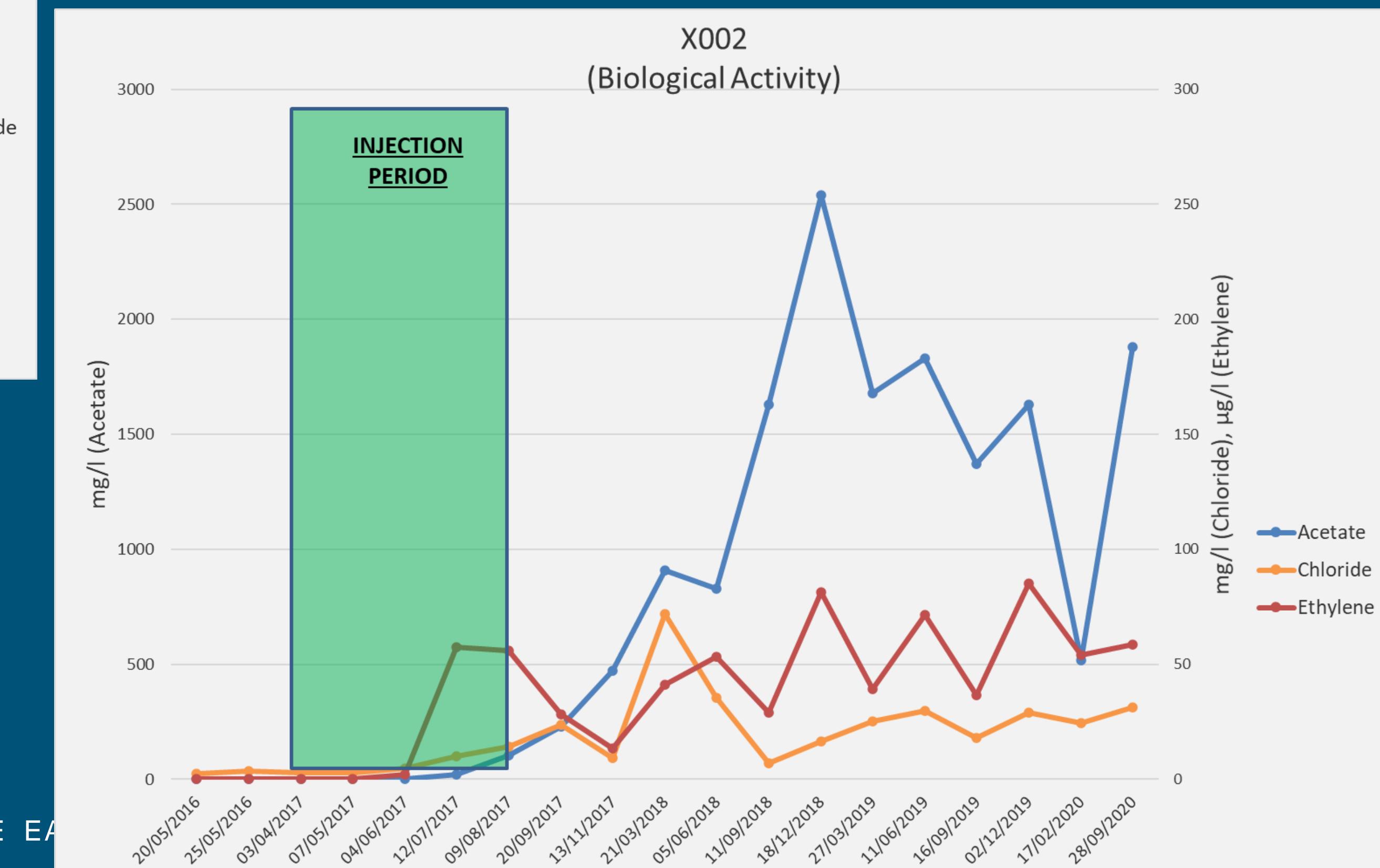
# Groundwater Trends CVOCs, fatty acids, dissolved gases

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

X002



## Source Zone

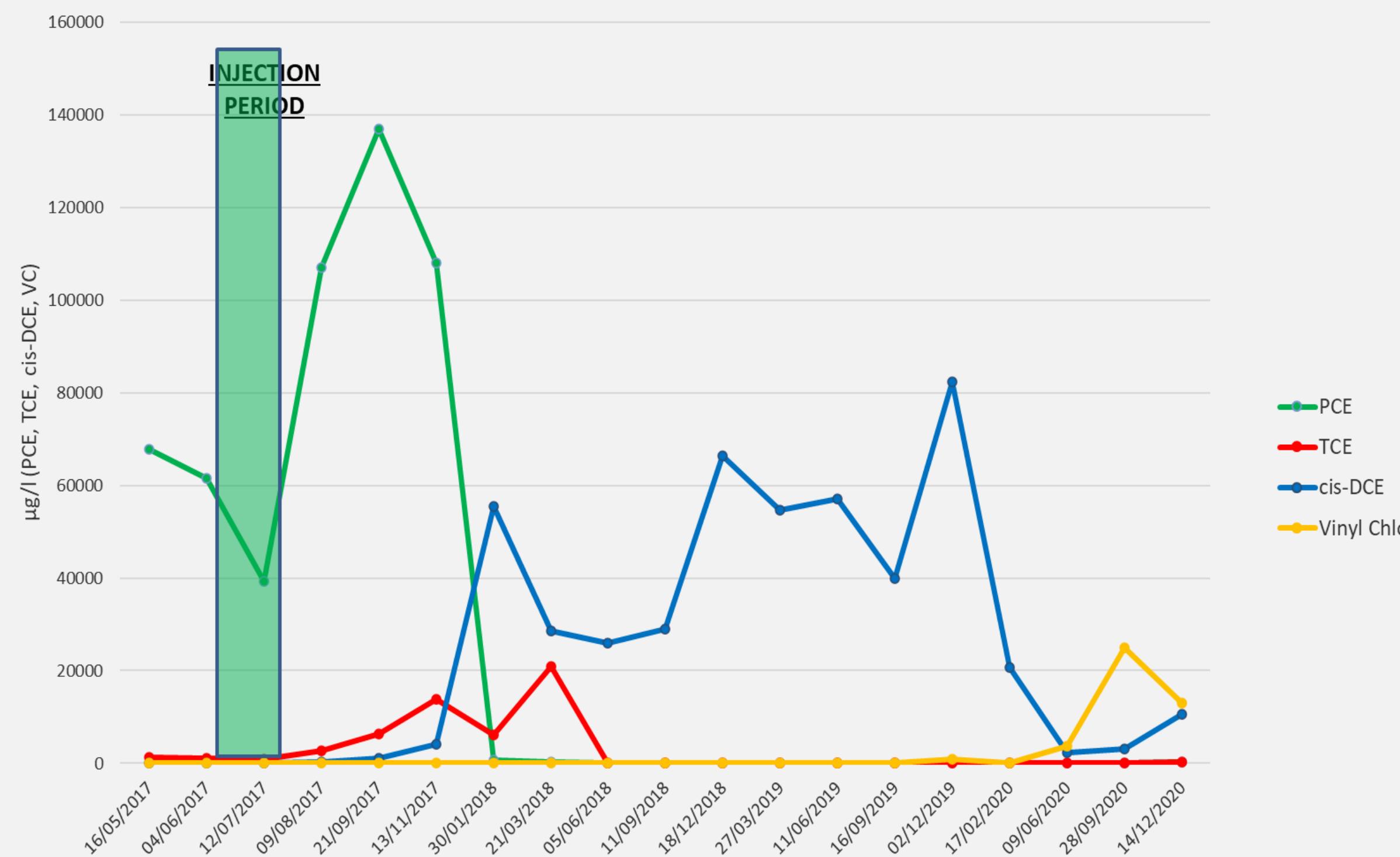


JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH

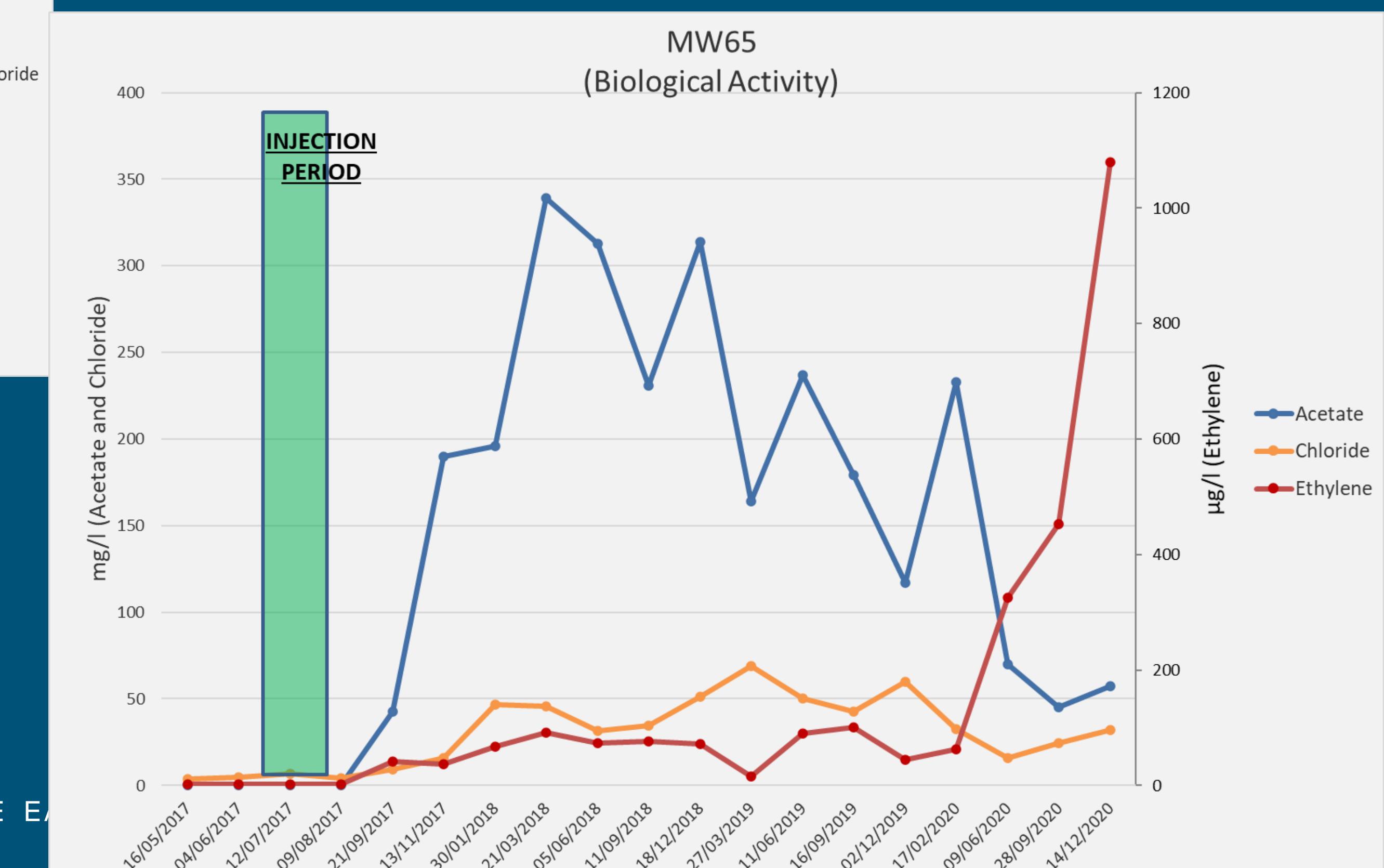
# Groundwater Trends CVOCs, fatty acids, dissolved gases

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

MW-65



Plume downstream of source zone



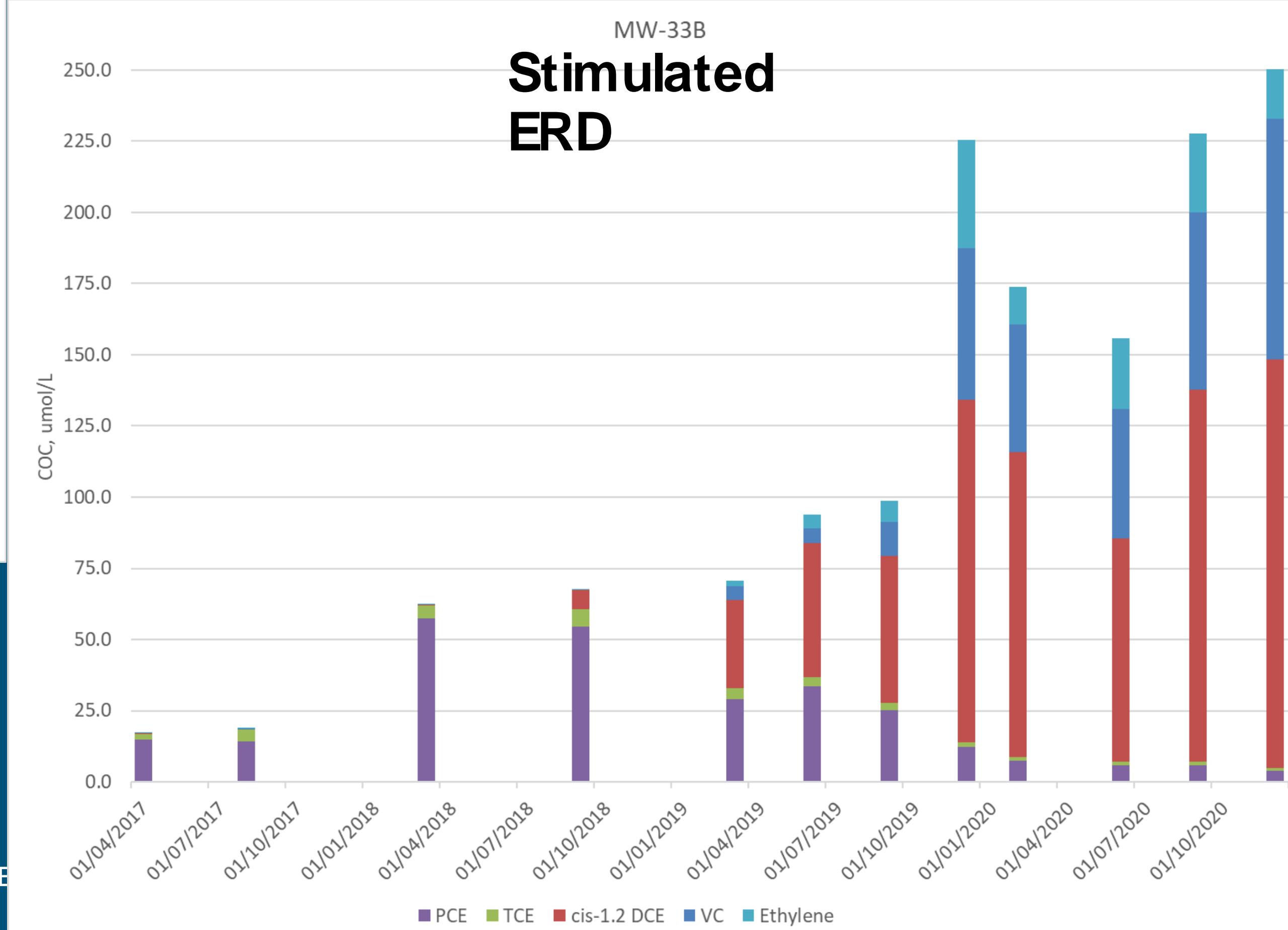
JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH

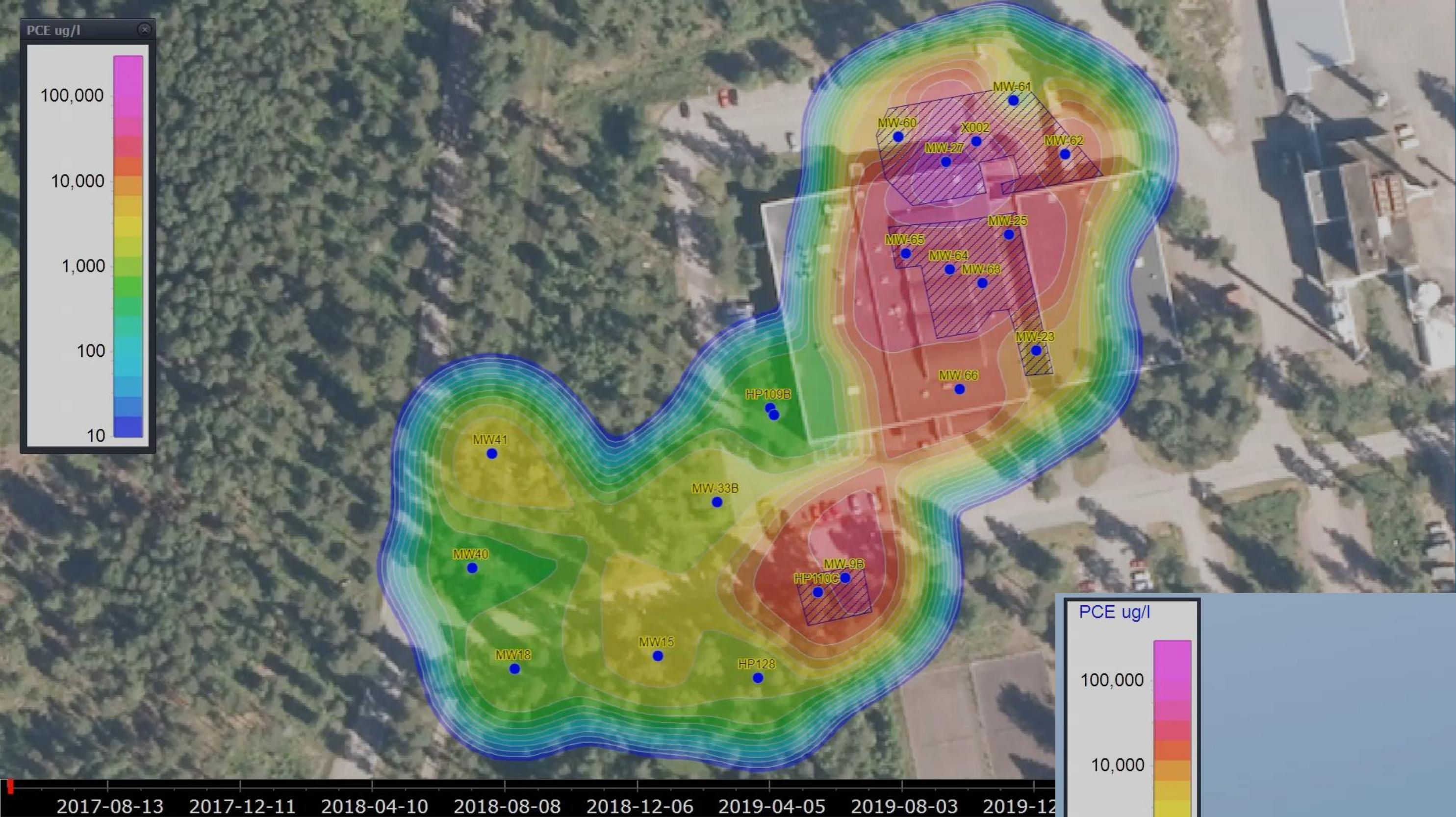
# Molar Mass Evaluation

EJLSKOV  
Cleaning up the earth



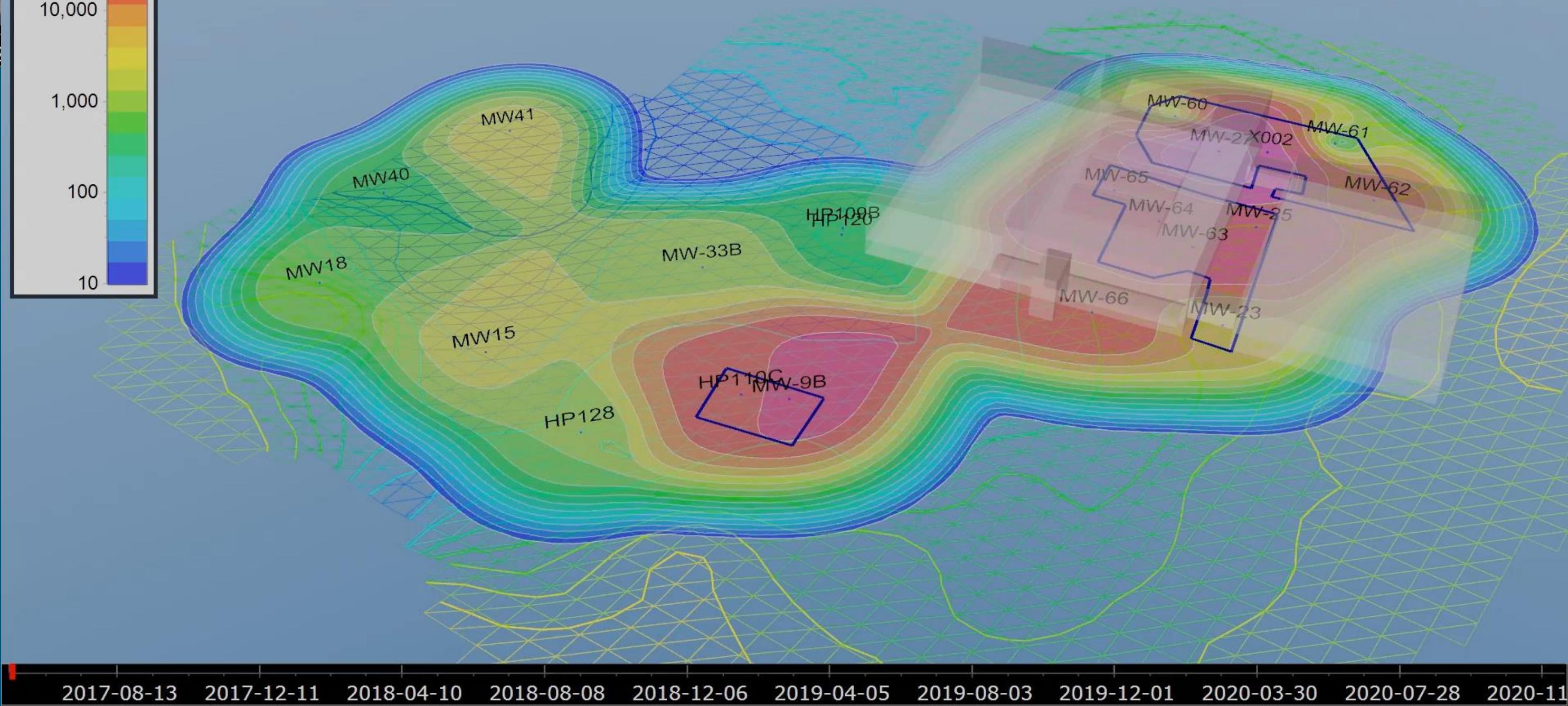
JOIN OUR MISSION – CLEANING UP THE EARTH





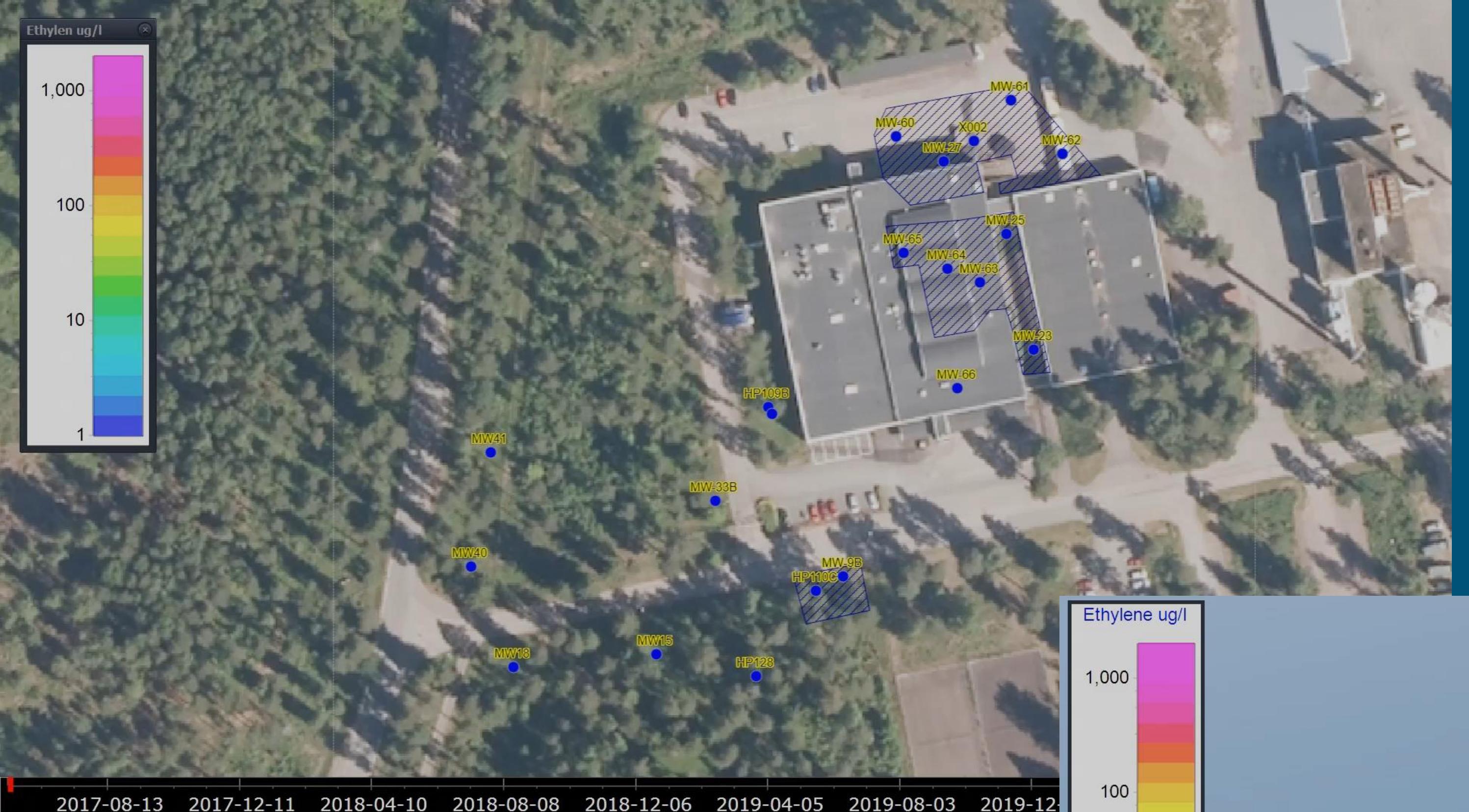
## PCE Plume Development

**EJLSKOV**  
Cleaning up the earth

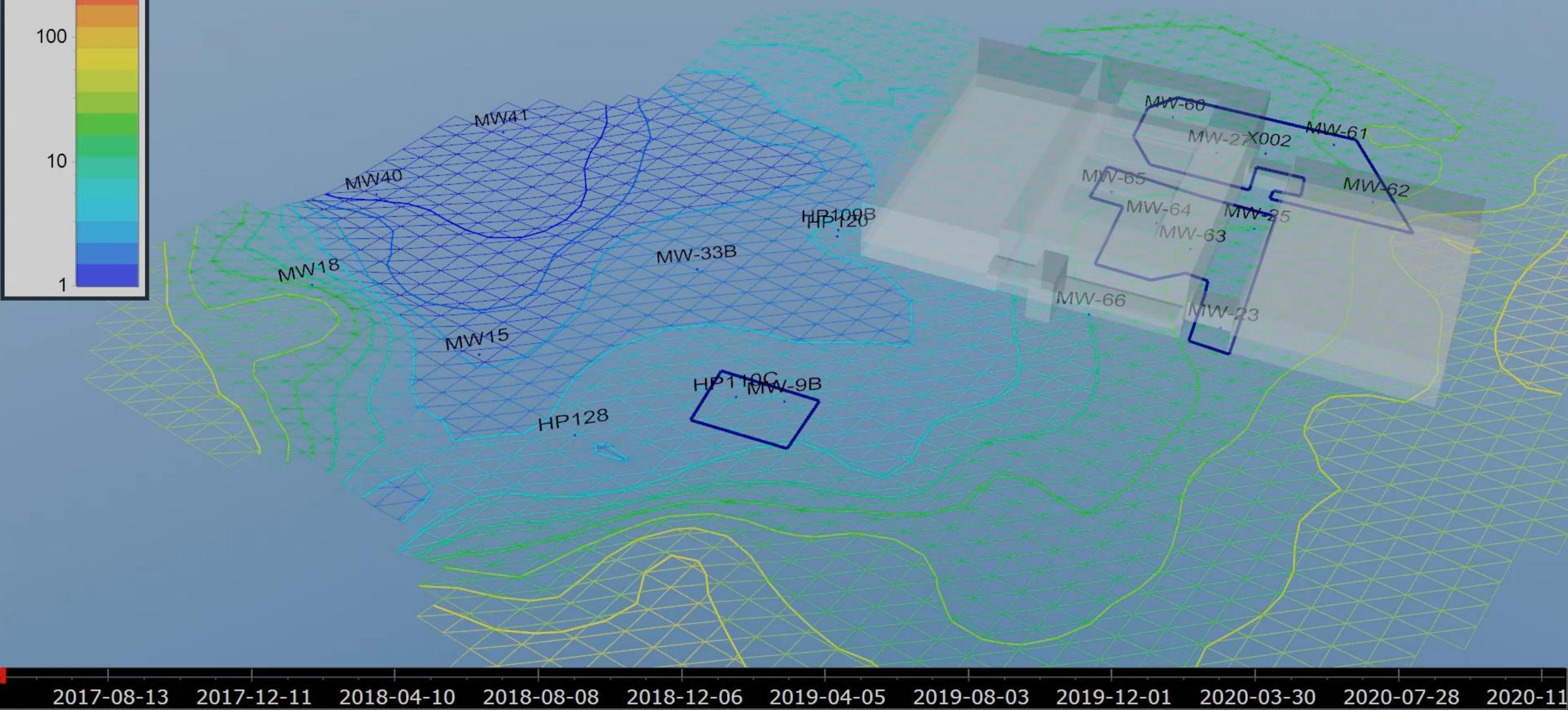


JOIN OUR MISSION – CLEANIN

## Ethylene Plume Development

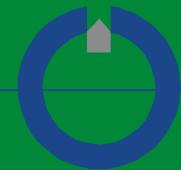


JOIN OUR MISSION – CLEANING



THANK YOU FOR YOUR TIME





ATV Vintermøde 10. marts 2021

# Cross-borehole DCIP: Kan det bruges til at planlægge og monitere *in situ* oprensning?

Rasmus Thalund-Hansen & Poul L. Bjerg, *DTU Miljø*

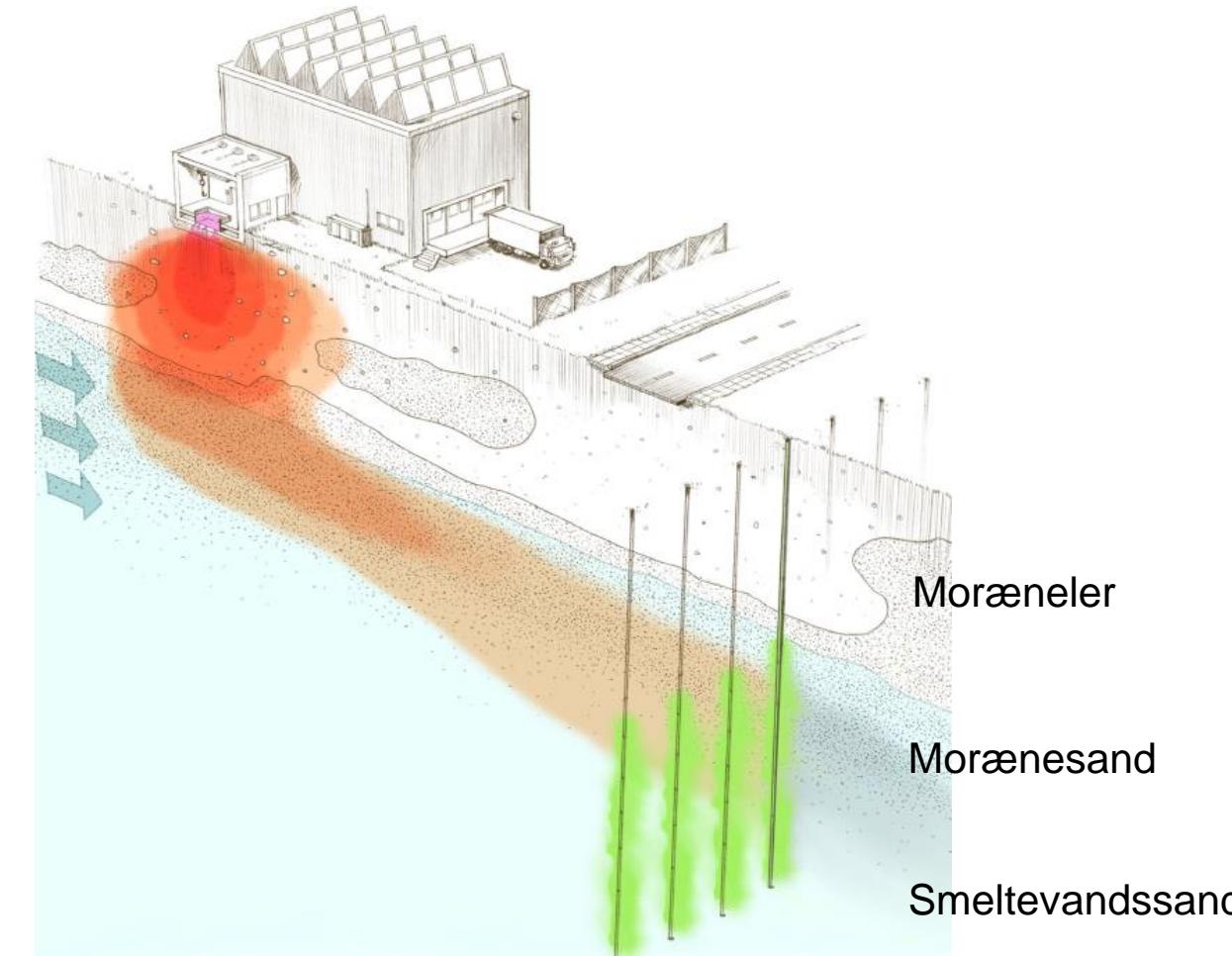
Léa Levy, Thue Bording & Anders Vest Christiansen, *HGG, Aarhus Universitet*

Kirsten Rügge, Morten Dreyer, Lærke Brabæk, *COWI*

Maria Hag, Nina Tuxen, *Region Hovedstaden*

# Motivation

- **Udvikling af mere bæredygtige faneoprensning metoder**
  - Lave vedligeholdelses- og driftsomkostninger
  - Høj effektivitet
- **In situ metoder**
  - Injektion af reaktive komponenter i fanen
  - Nedbrydning til harmløse slutprodukter
- **Udfordring:**
  - Injektionen er vanskelig
  - Rumlig og tidslig udbredelse er vanskelig at monitere



Hag et al. (2020)

# Mål

## Overordnet pilot-projektmål

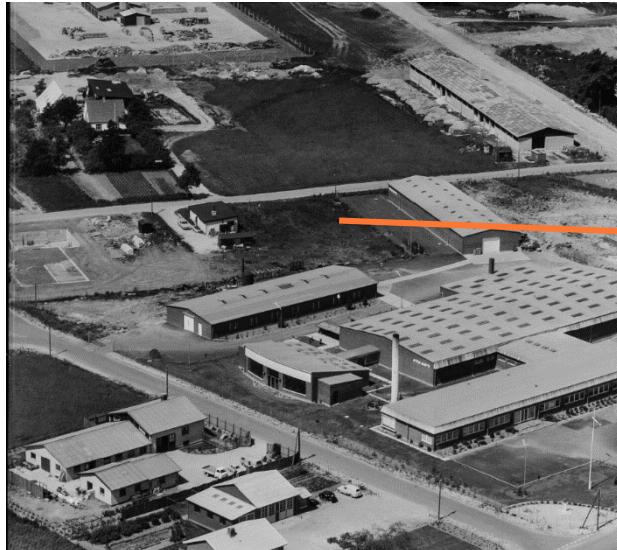
- Udvikling af bæredygtig oprensning metode til håndtering af forureningsfaner
- At skabe en reaktiv behandlingszone med kemisk og biologisk nedbrydning
- Videreudvikling af *in situ* oprensning
  - Forbedring af moniteringsmetoder

## Delmål

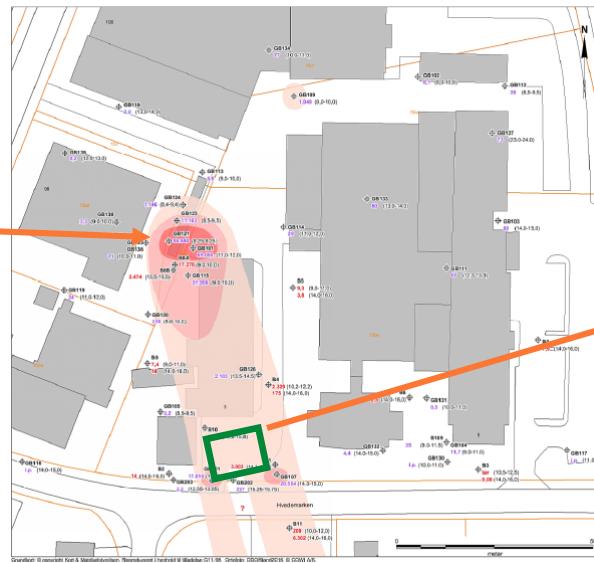
- Udvikling af ny metode til *in situ* monitering ved brug af geofysisk ‘cross-borehole’ DCIP:

**„Cross-borehole DCIP: Kan det bruges til at planlægge og monitere *in situ* oprensning?“**

# Felt-lokaliteten



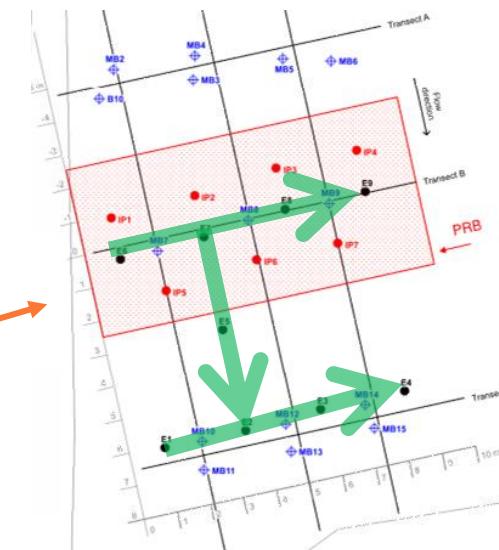
1959



Niras (2017)

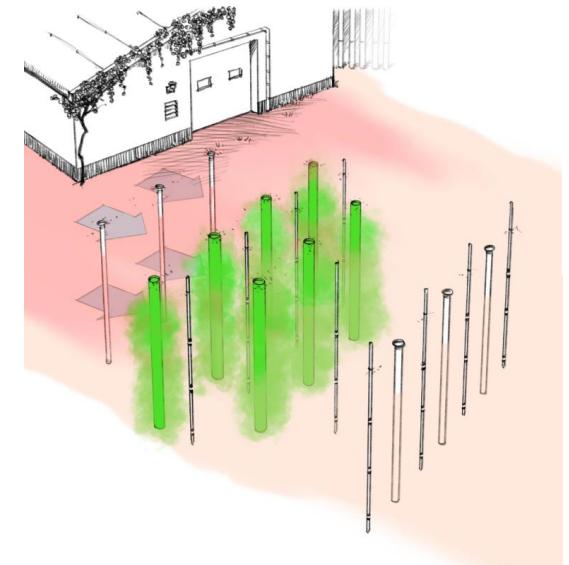
- Plastik- og indpakningsfabrik 1959-1989
- Privat tankstation

- Forurening med blandt andet TCE, cDCE, VC
- Geologi domineret af sand ved forurening



COWI (2020)

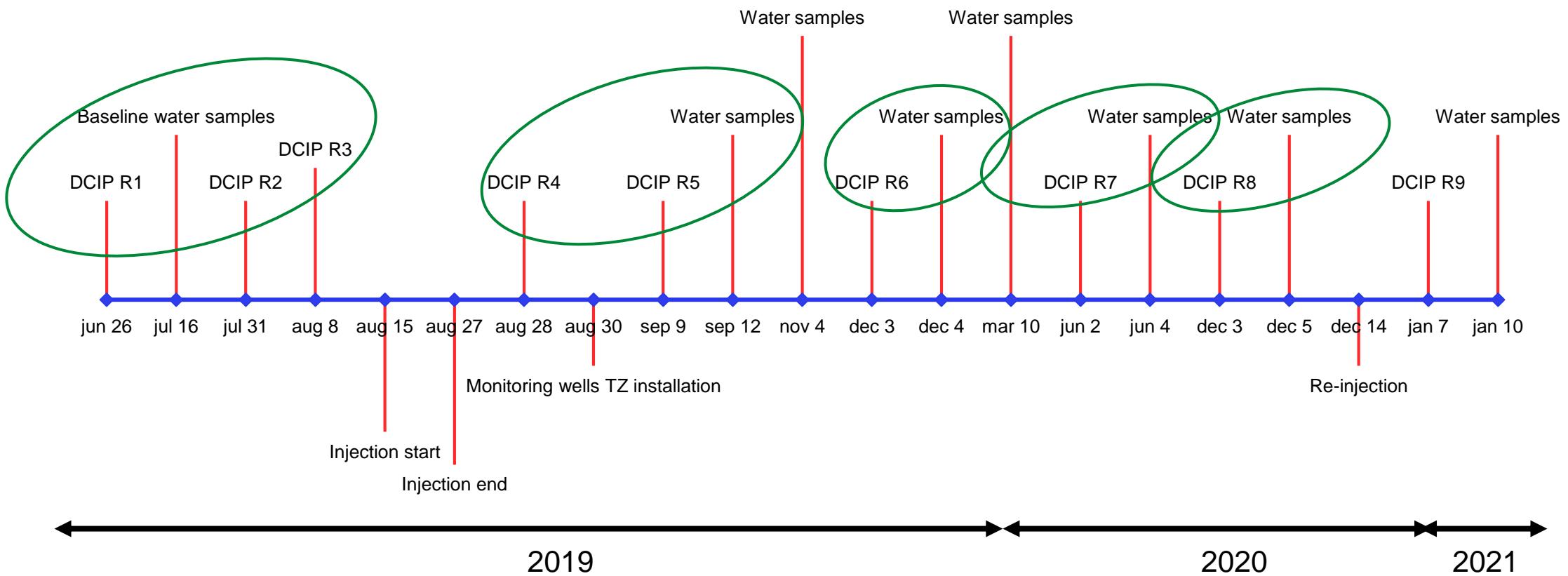
- Moniteringsboringer juli 2019 (august 2019)
- Elektrodeboringer til cross-borehole DCIP etableret juli 2019



Hag et al. 2020

- Provect-IR (mZVI) og KB1 injiceret august 2019

# Tidslinje



# Tidslinje

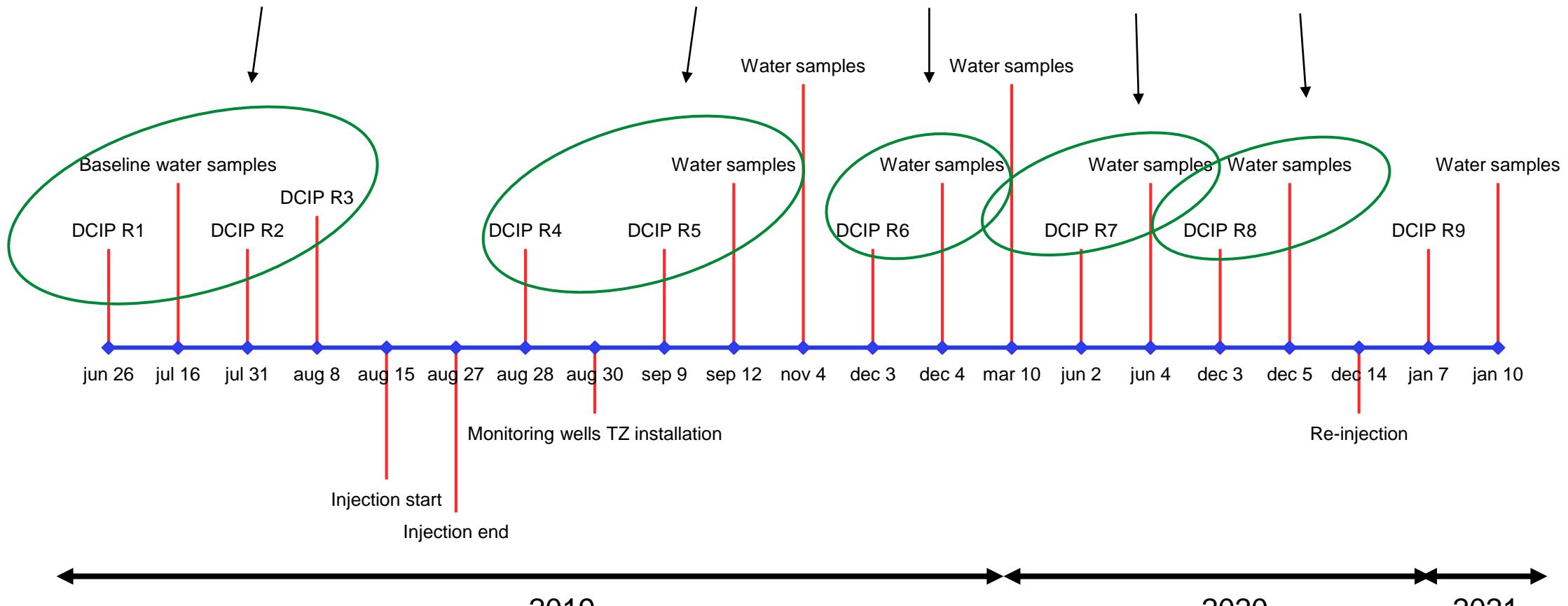
Dage efter injektion: + 0 dage

+ 14 dage

+ 90 dage

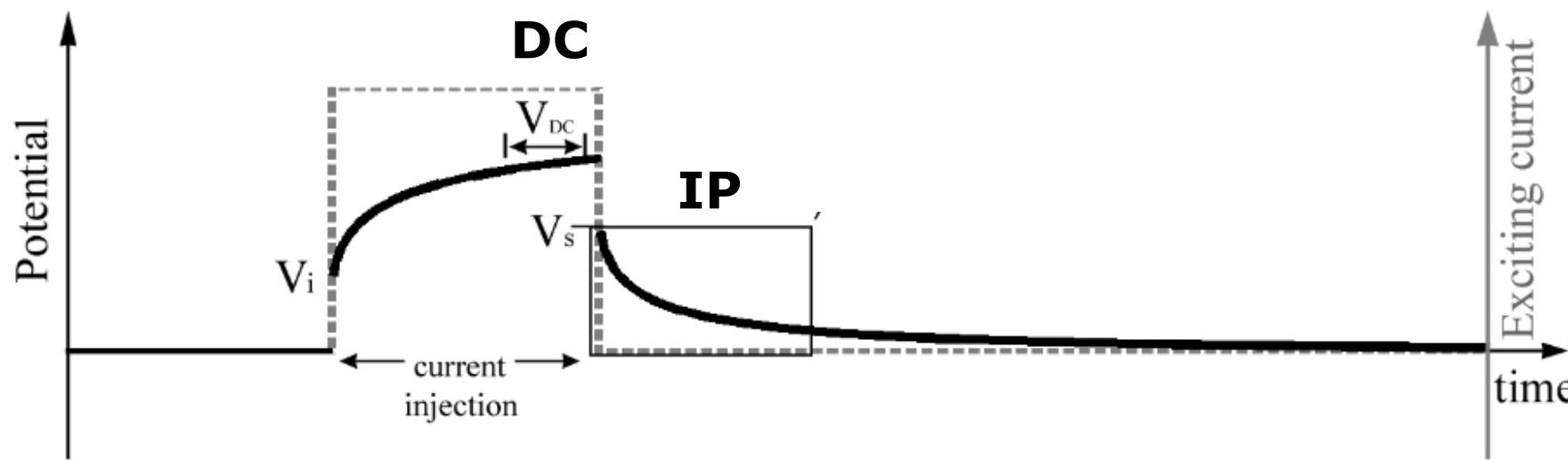
+ 270 dage

+ 450 dage



## DCIP – hvad er det?

- Direct Current, DC: Resistivitet
  - Sedimenttype
  - Ion-indhold af porevæske
  - Porøsitet
  - Samlet resistivitet,
    - skelner ikke mellem effekt fra porevæske og sediment-overflade

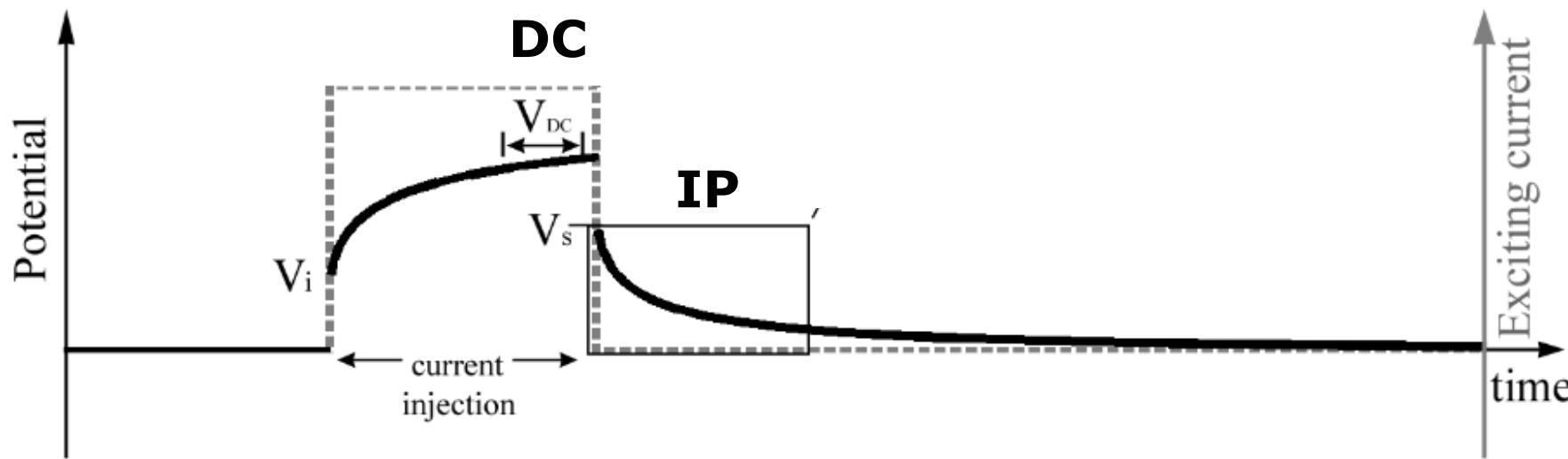
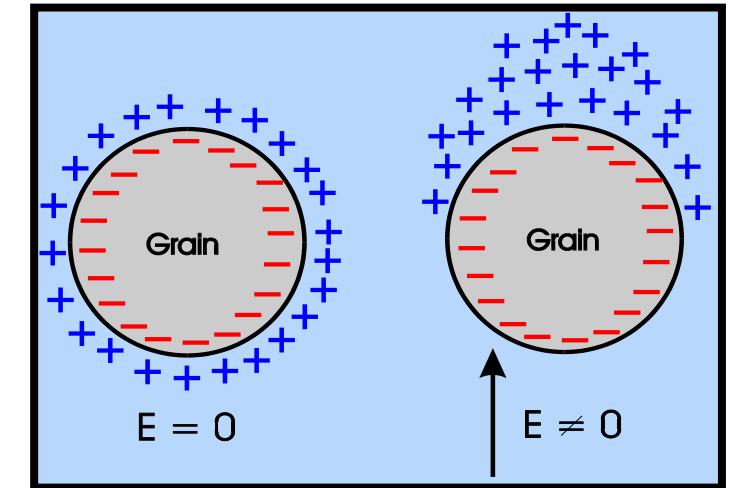


Modificeret fra Christiansen (2021)



## DCIP – hvad er det?

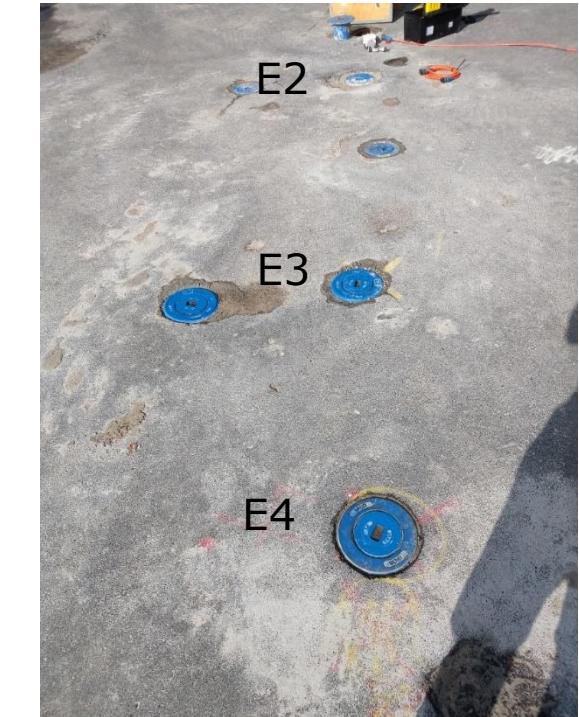
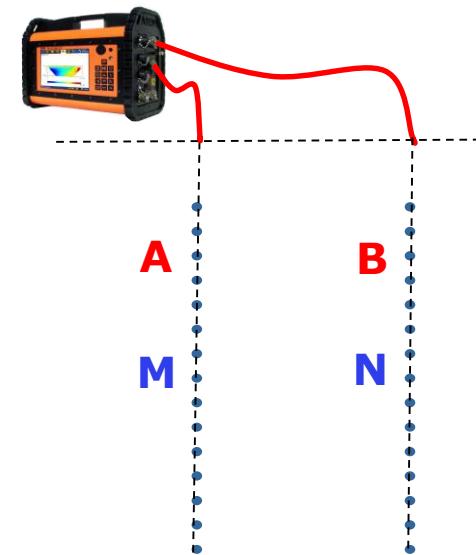
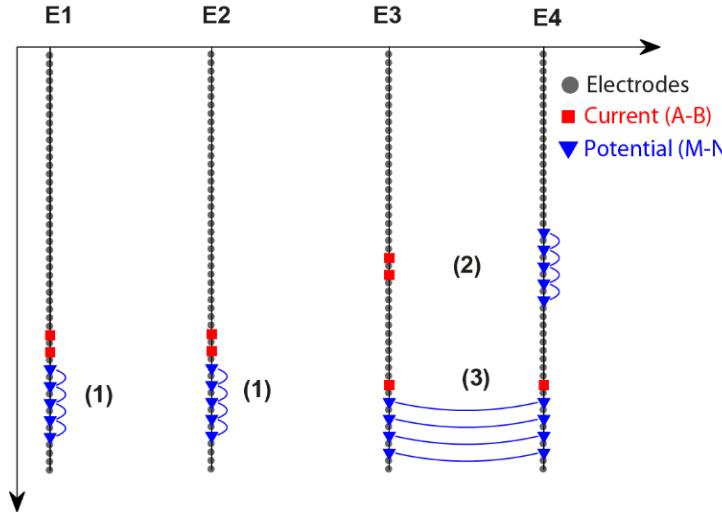
- Induceret Polarisation, **IP**: Jordlagenes opladningsevne
  - Potentiale-ændring over tid, når strømmen slukkes
  - ”Evne til at oplade og tilbageholde elektriske ladninger under påvirkning af et tidsligt varierende elektrisk felt”
  - Skelner mellem porevands- og overflade-effekter



Modifieret fra Christiansen (2021)

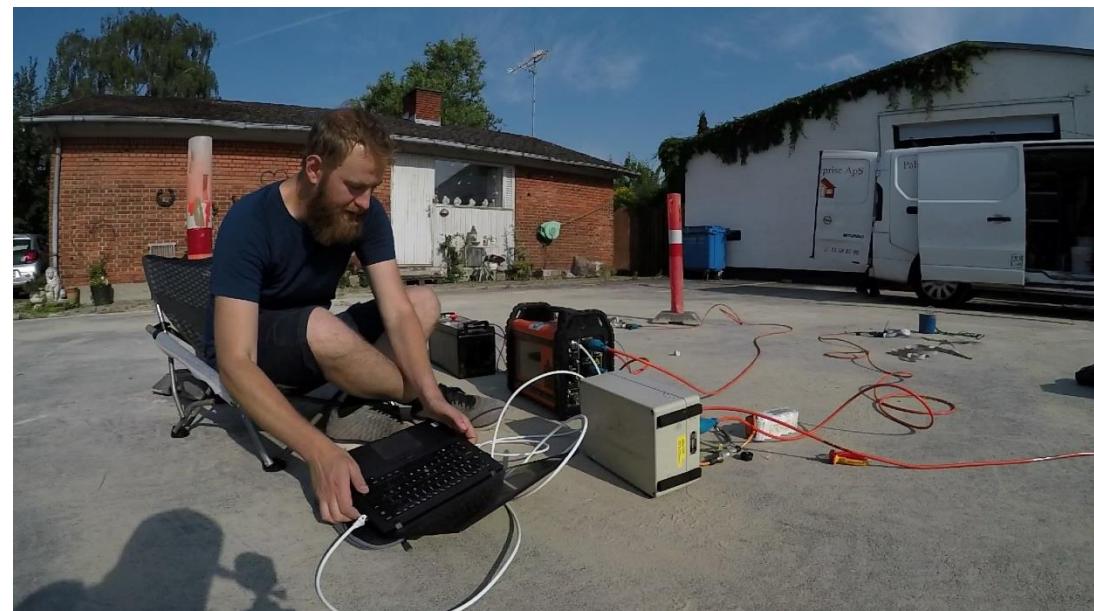


# Cross-borehole DCIP – hvad er det?

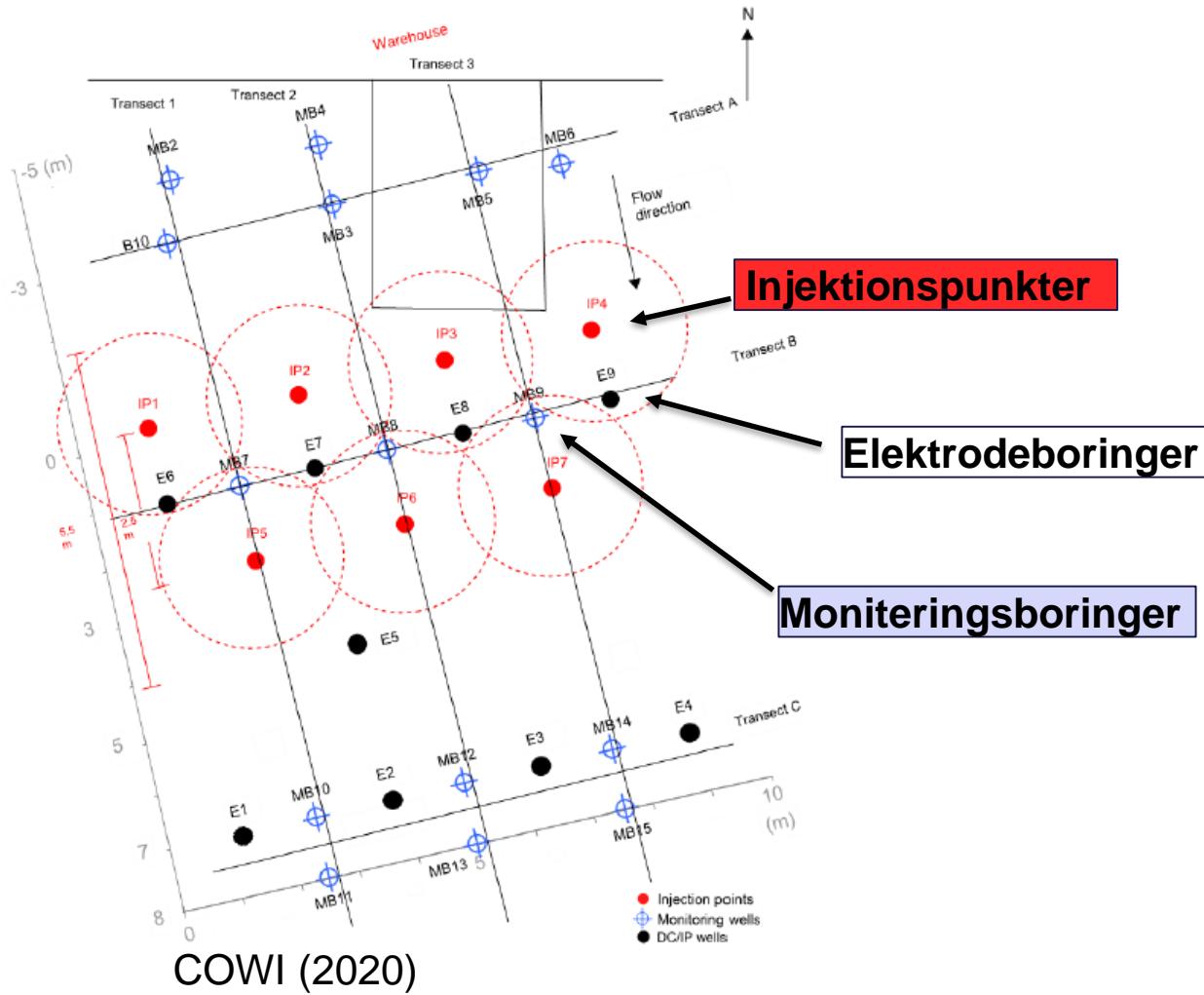


- Strøm sendes gennem AB-elektroder
- Potentialeforskæl måles mellem MN måles
- Forskellige elektrode-konfigurationer giver den rumlige fordeling af målingerne -> rumligt billede af jordlagenes elektriske egenskaber

# Installering af elektrodeboringerne og første målinger



# Installering/injicering af reaktiv zone



## Reaktiv zone

- 13-18 mut
- Injektion hver halve meter
- Bottom-up
- Provect IR (mZVI produkt)
- KB1 bakteriekultur
- Guar gum

## Elektrodeboringer

- 10-20 mut
- 30 cm mellem hver elektrode vertikalt
- 2,5-3 m hor. afstand mellem hver boring

## Moniteringsboringer

- 2 x 1m filtre i hver
- 13,5 – 17,5 mut

# Vandprøver afspejler det injicerede

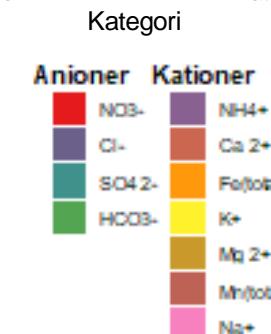
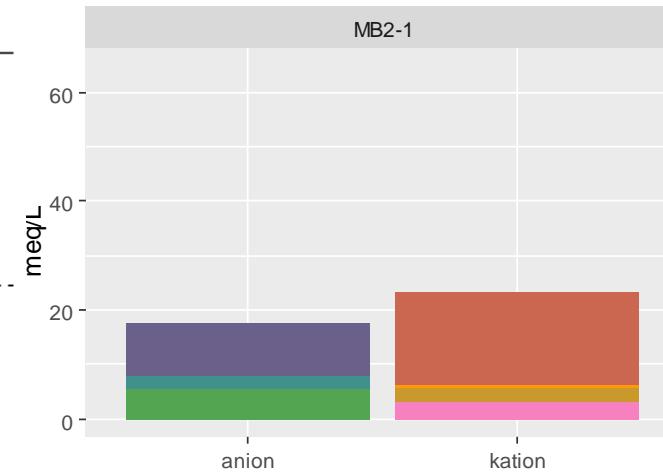
## Provect indhold

| Compound             | %     | Source       |
|----------------------|-------|--------------|
| m-ZVI                | 5-90  | Manufacturer |
| Calcium dipropionate | 2-12  | Manufacturer |
| Yeast extracts       | < 2.5 | Manufacturer |
| Guar gum             | < 2.5 | Manufacturer |
| Sodium sulfite       | < 2.5 | Manufacturer |

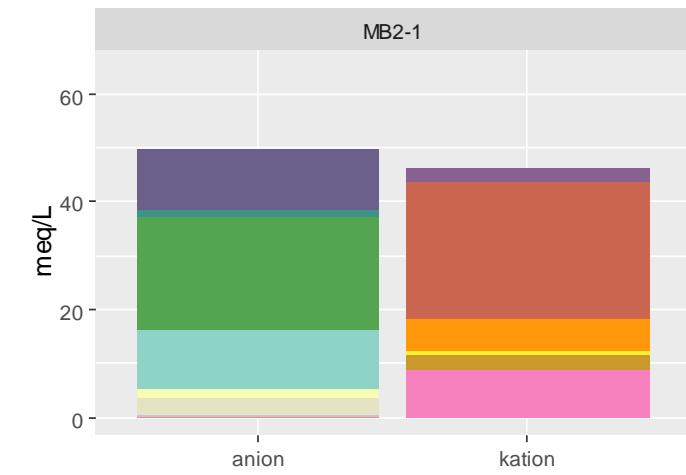
## Laboratorieanalyse af Provect

|                      | %    | metode  |
|----------------------|------|---------|
| Fe                   | 45   | ICP-OES |
| Total (Ca+K+Mg+Na+S) | 2.5  | ICP-OES |
| Total carbon         | 19.5 | ICP-OES |
| Unknown              | 34   | ICP-OES |

## Vandkemi + 0 dage (før injicering)



## Vandkemi + 90 dage



# Vandprøver afspejler det injicerede

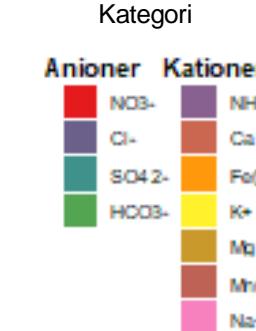
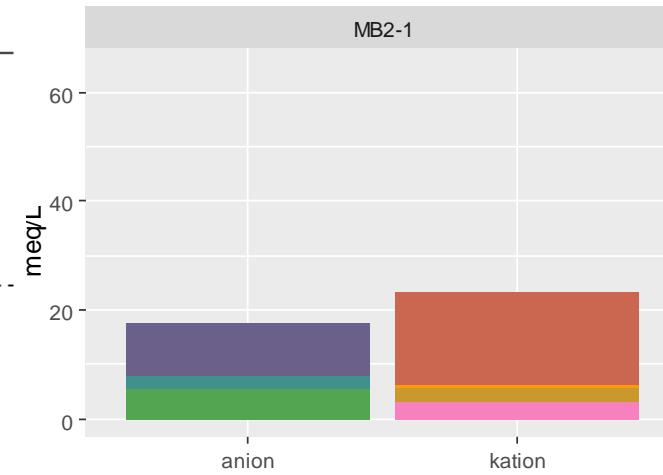
## Provect indhold

| Compound             | %     | Source       |
|----------------------|-------|--------------|
| m-ZVI                | 5-90  | Manufacturer |
| Calcium dipropionate | 2-12  | Manufacturer |
| Yeast extracts       | < 2.5 | Manufacturer |
| Guar gum             | < 2.5 | Manufacturer |
| Sodium sulfite       | < 2.5 | Manufacturer |

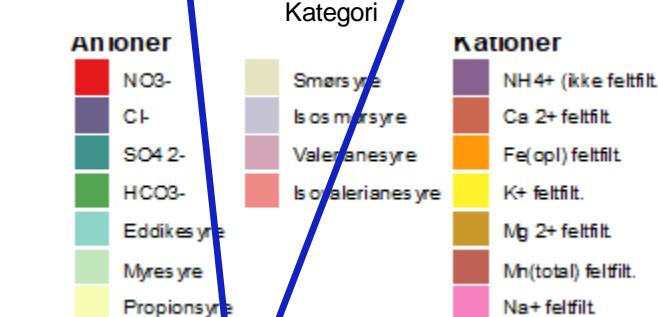
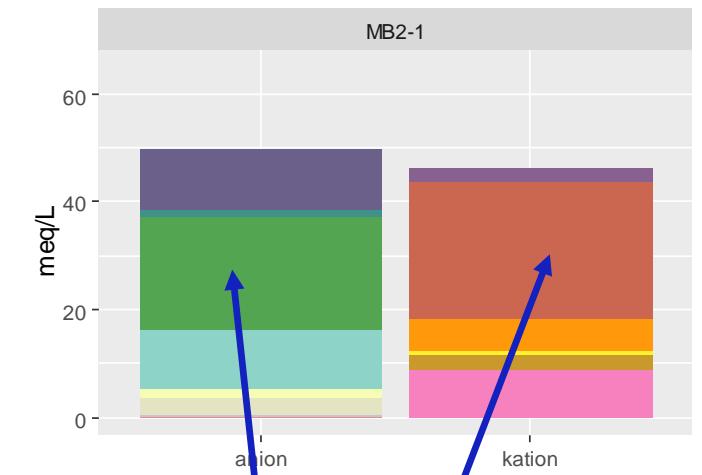
## Laboratorieanalyse af Provect

|                      | %    | metode  |
|----------------------|------|---------|
| Fe                   | 45   | ICP-OES |
| Total (Ca+K+Mg+Na+S) | 2.5  | ICP-OES |
| Total carbon         | 19.5 | ICP-OES |
| Unknown              | 34   | ICP-OES |

## Vandkemi + 0 dage (før injicering)

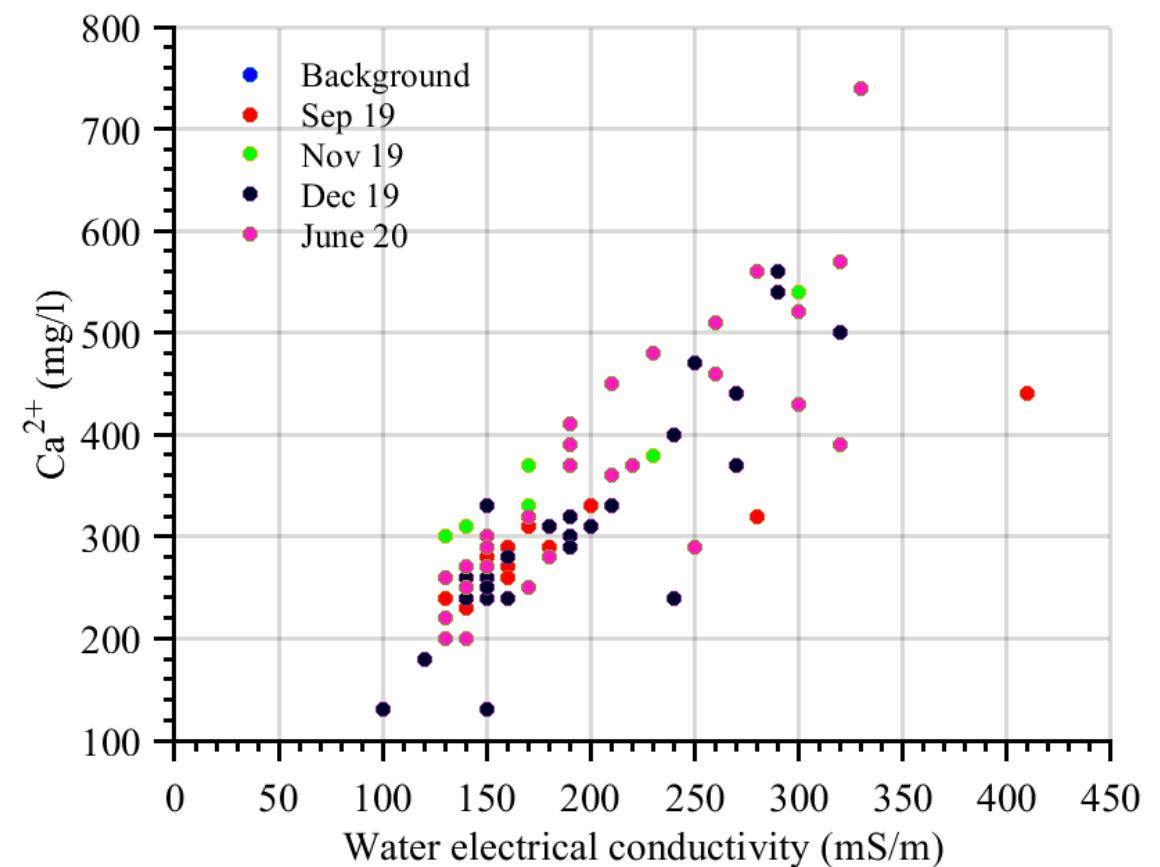
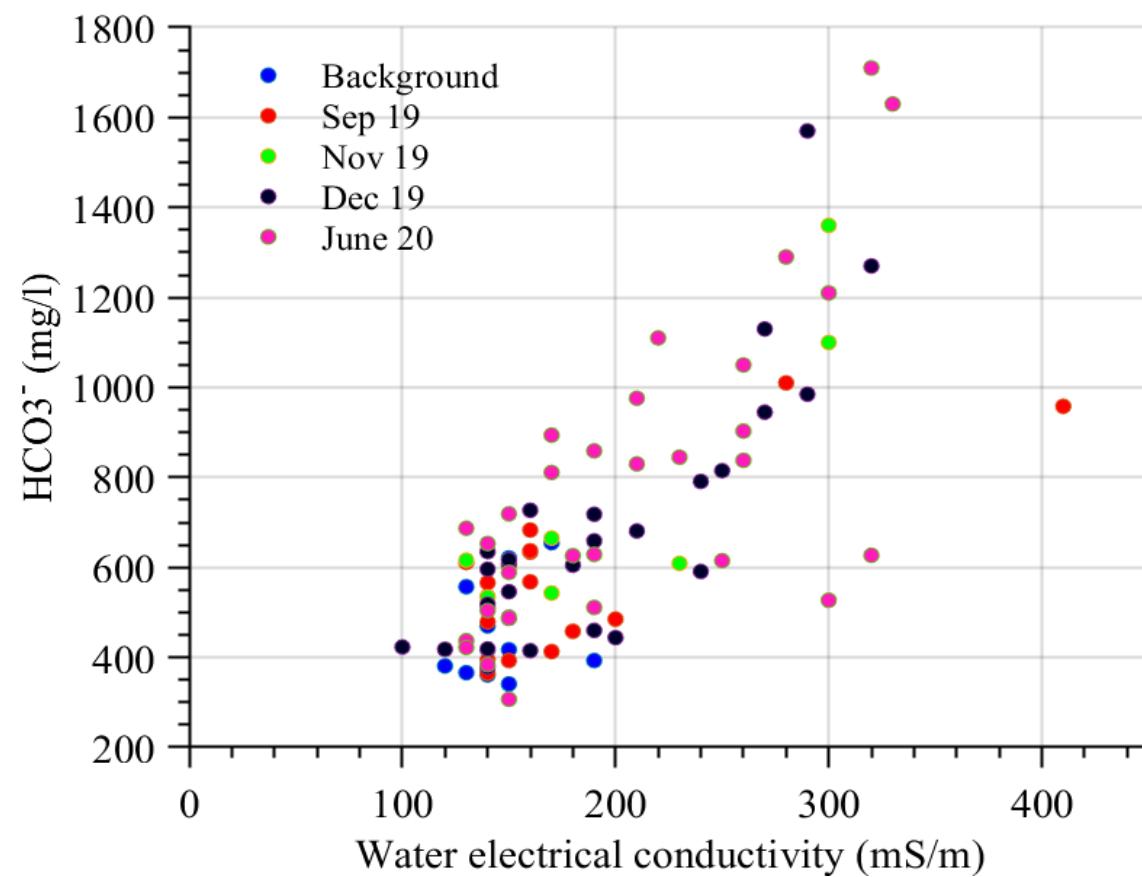


## Vandkemi + 90 dage

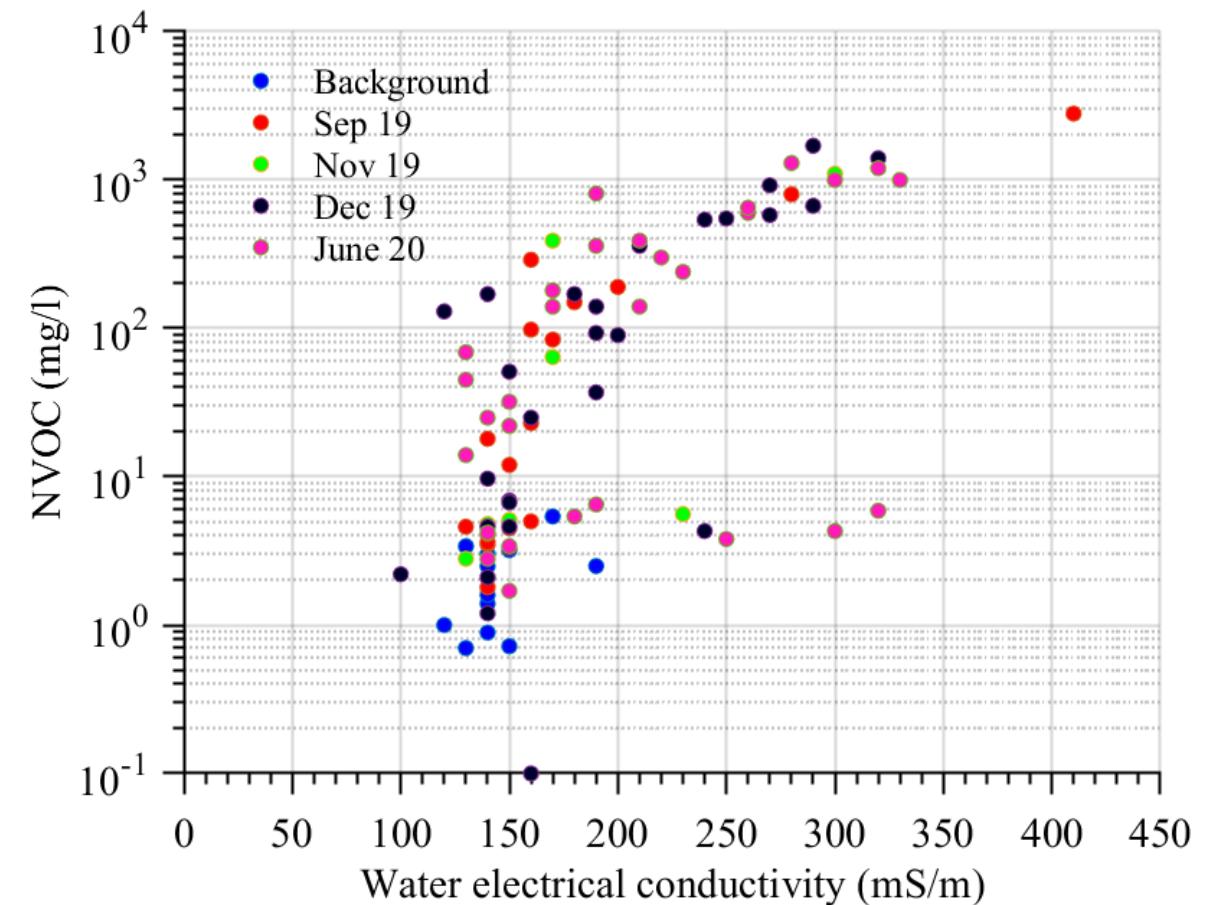
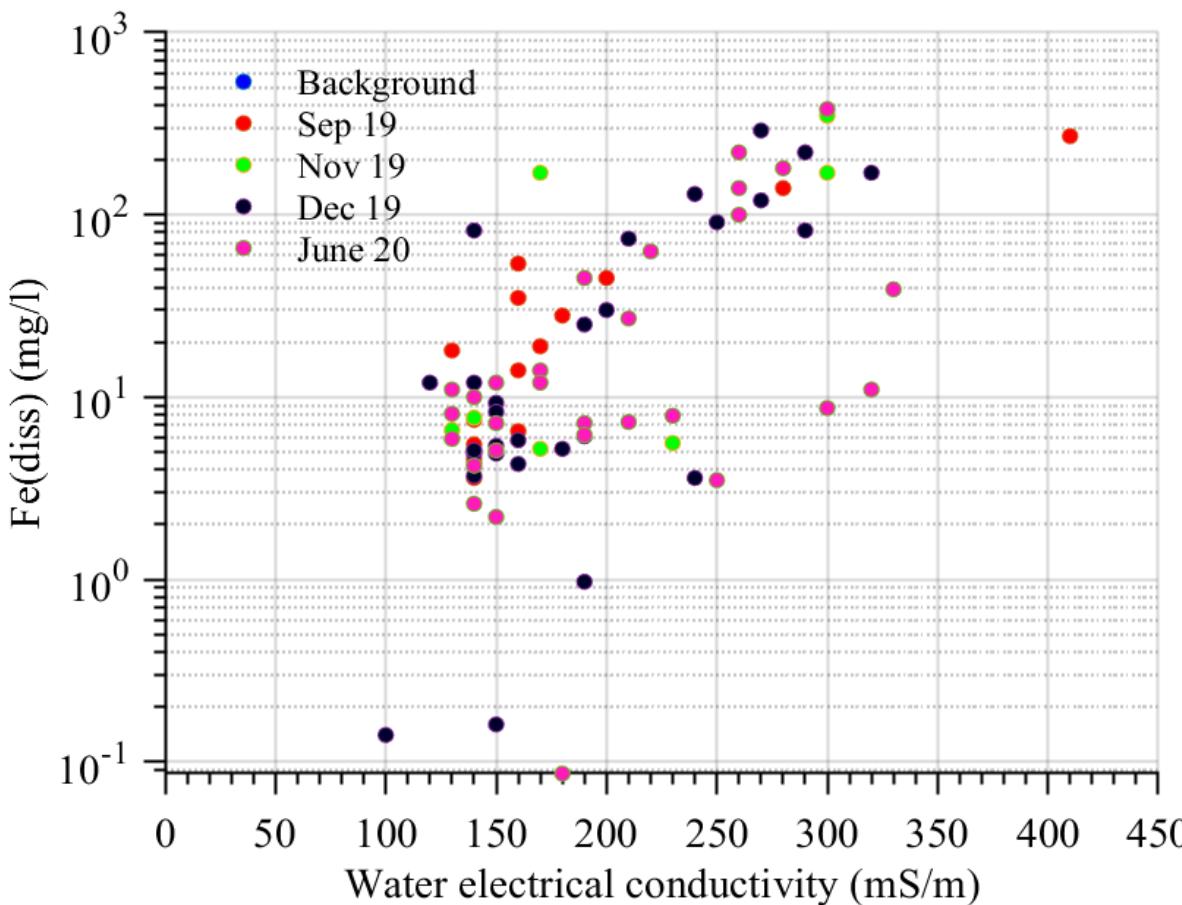


HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> og Ca<sup>2+</sup> er de dominerende ioner

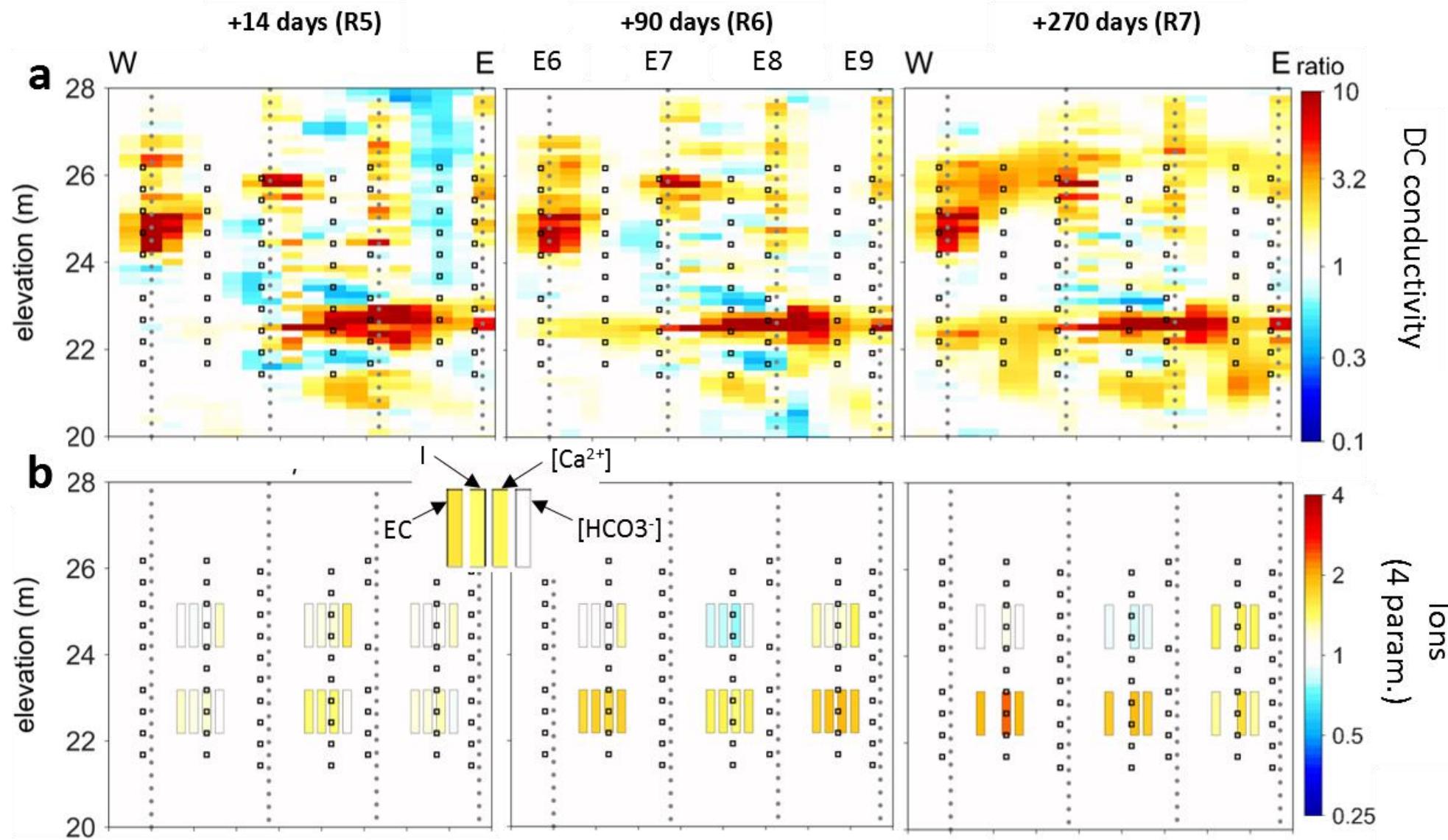
# Fordeling af det injicerede: Kobling mellem vandkemi og DCIP: $\text{HCO}_3^-$ og $\text{Ca}^{2+}$



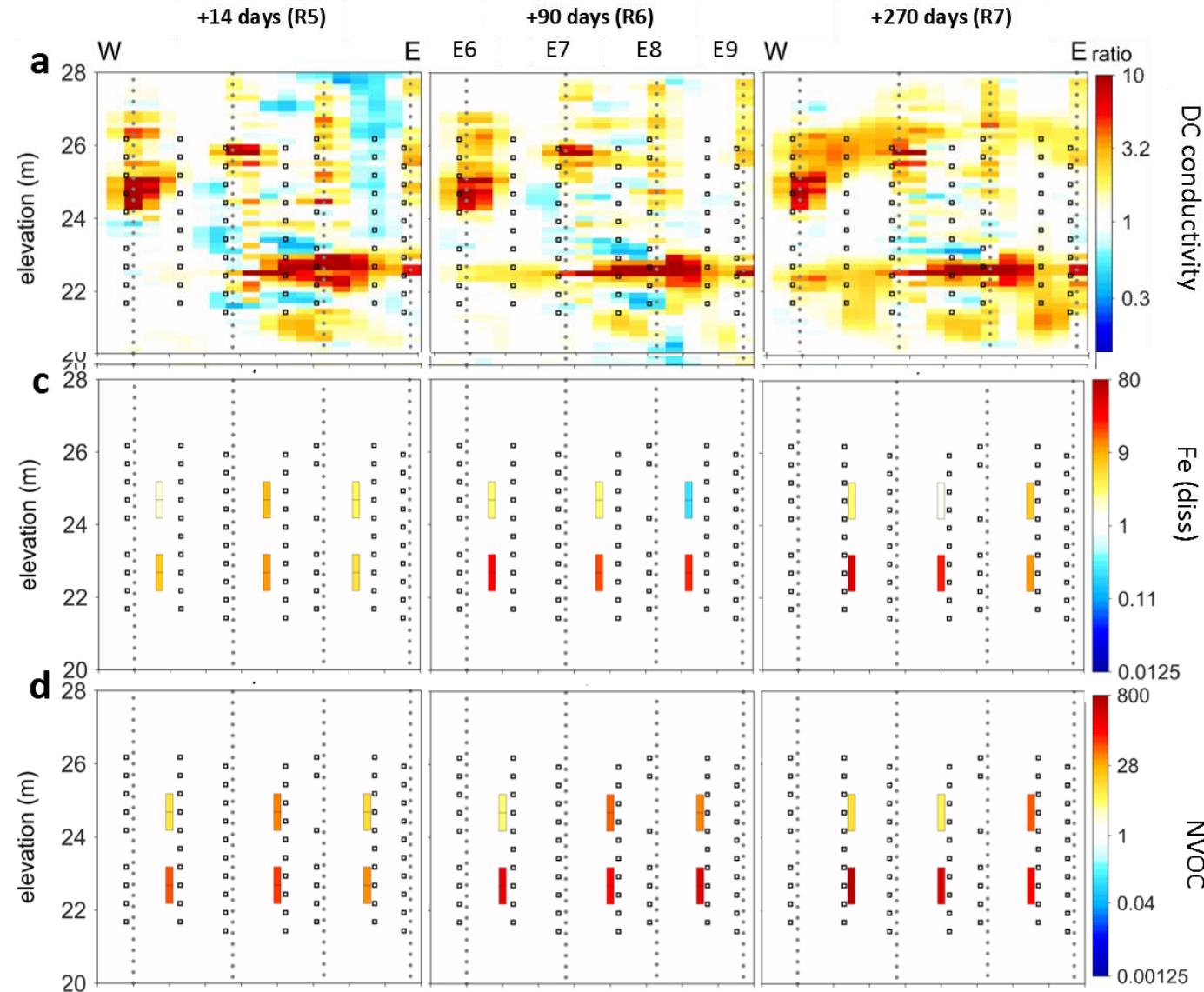
# Fordeling af det injicerede: Kobling mellem vandkemi og DCIP: Fe (diss) og NVOC



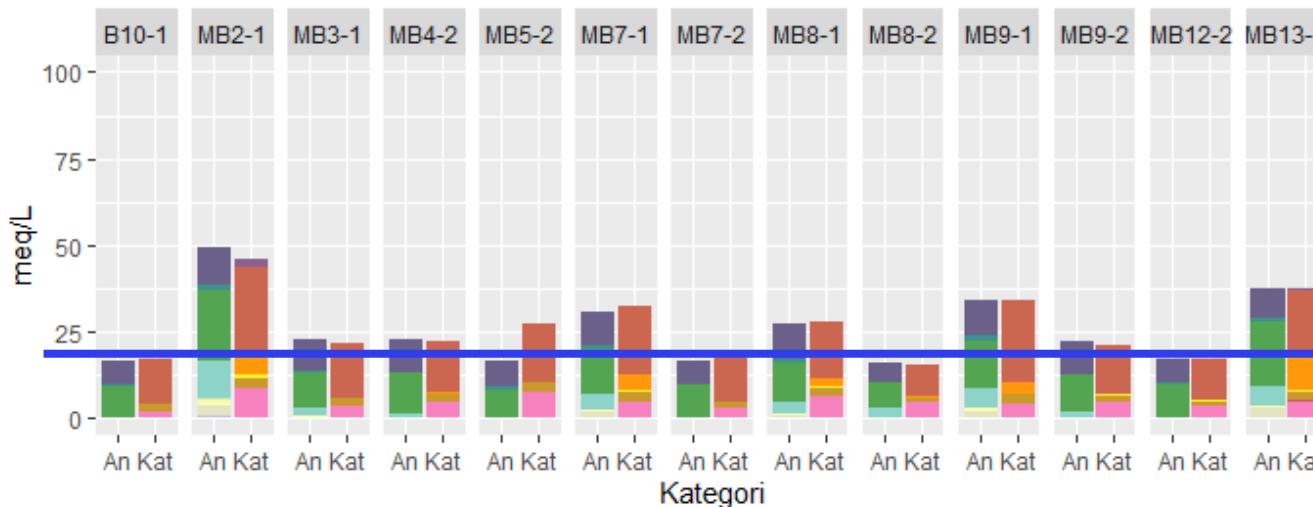
# Vandkemi og cross-borehole DCIP data: Hvordan stemmer det overens?



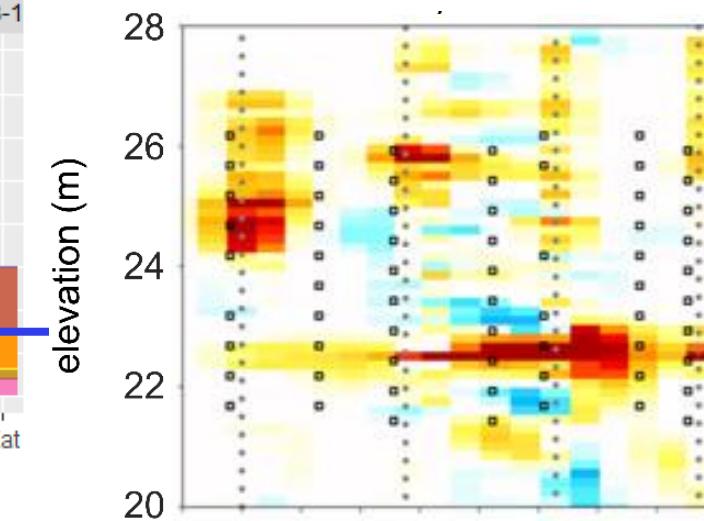
# Vandkemi og cross-borehole DCIP data: Rumlig udbredelse



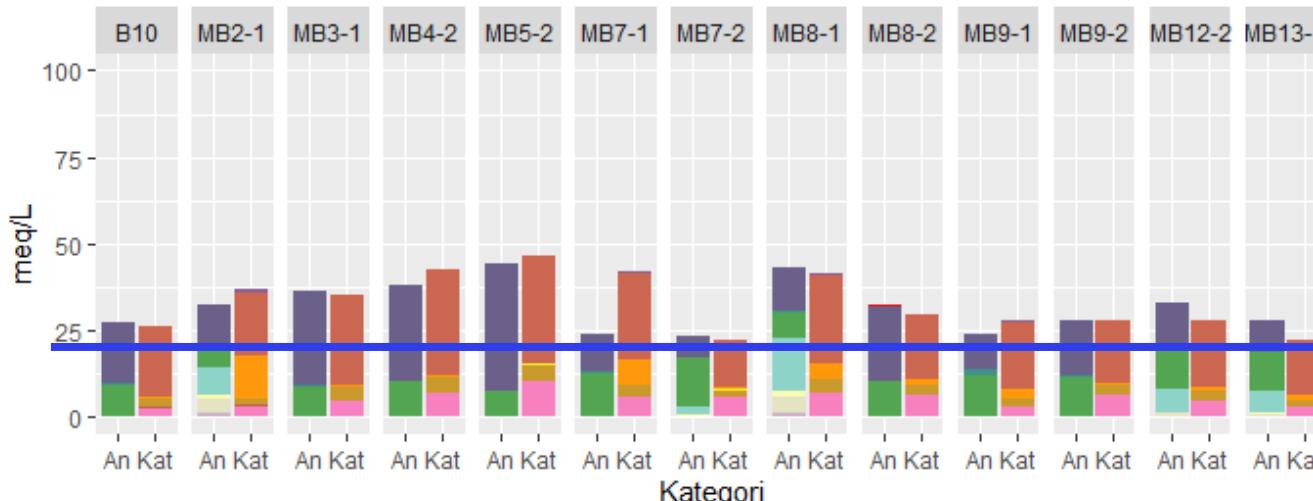
### Vandkemi + 90 dage (R6)



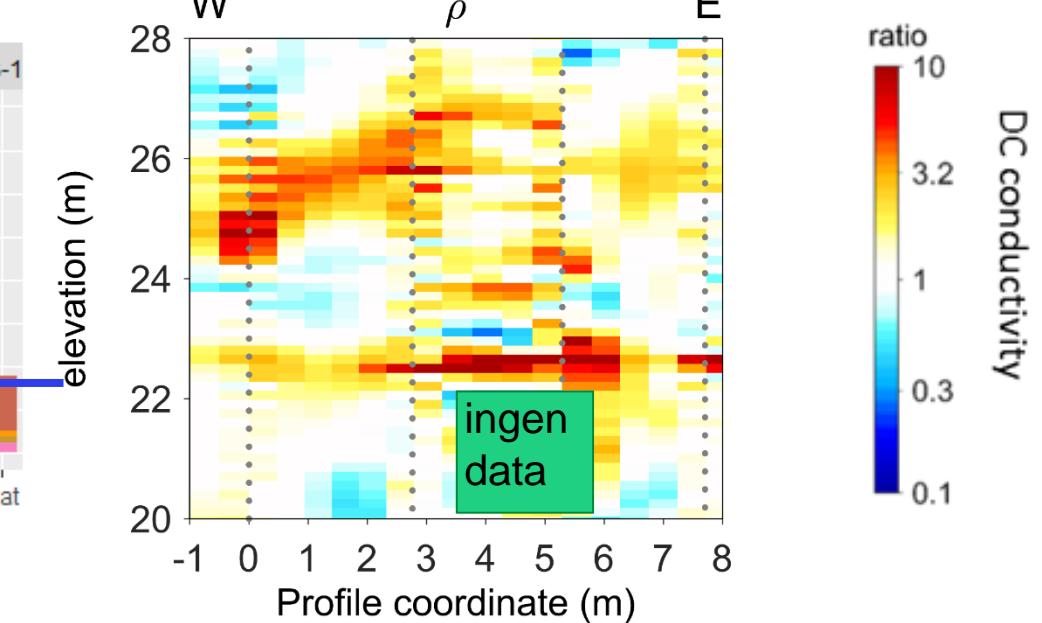
### DC konduktivitet ratio + 90 dage (R6)



### Vandkemi + 450 dage (R8)

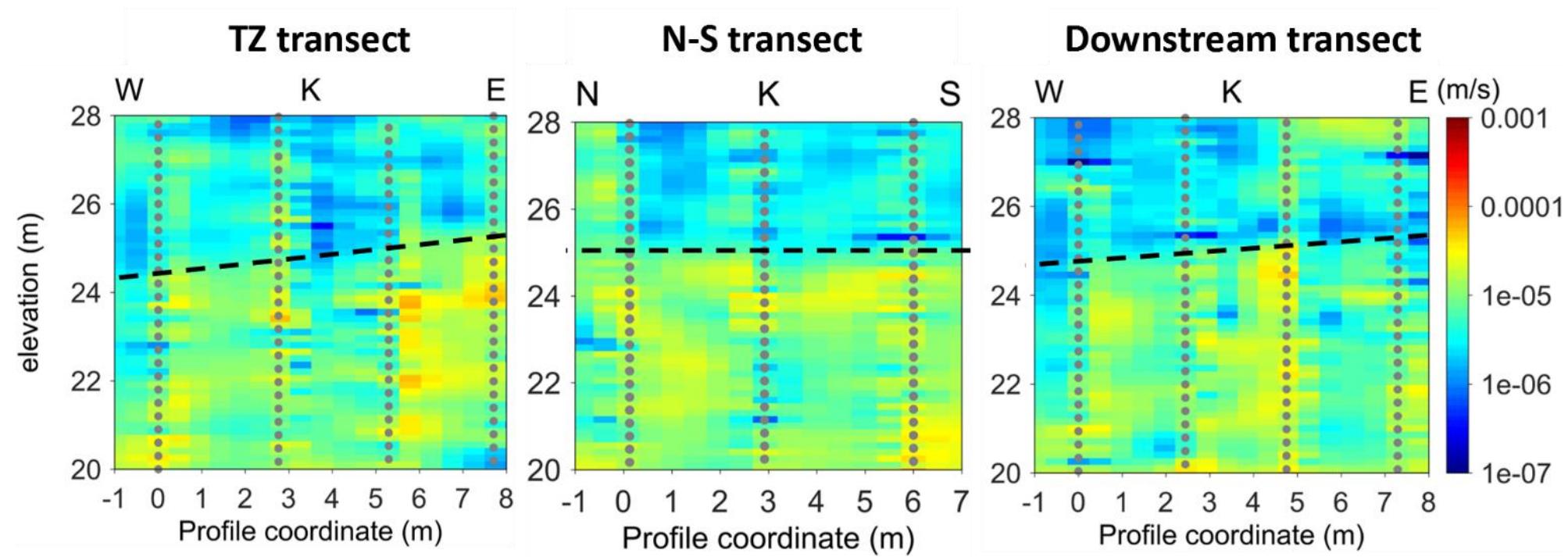


### DC konduktivitet ratio + 450 dage (R8)



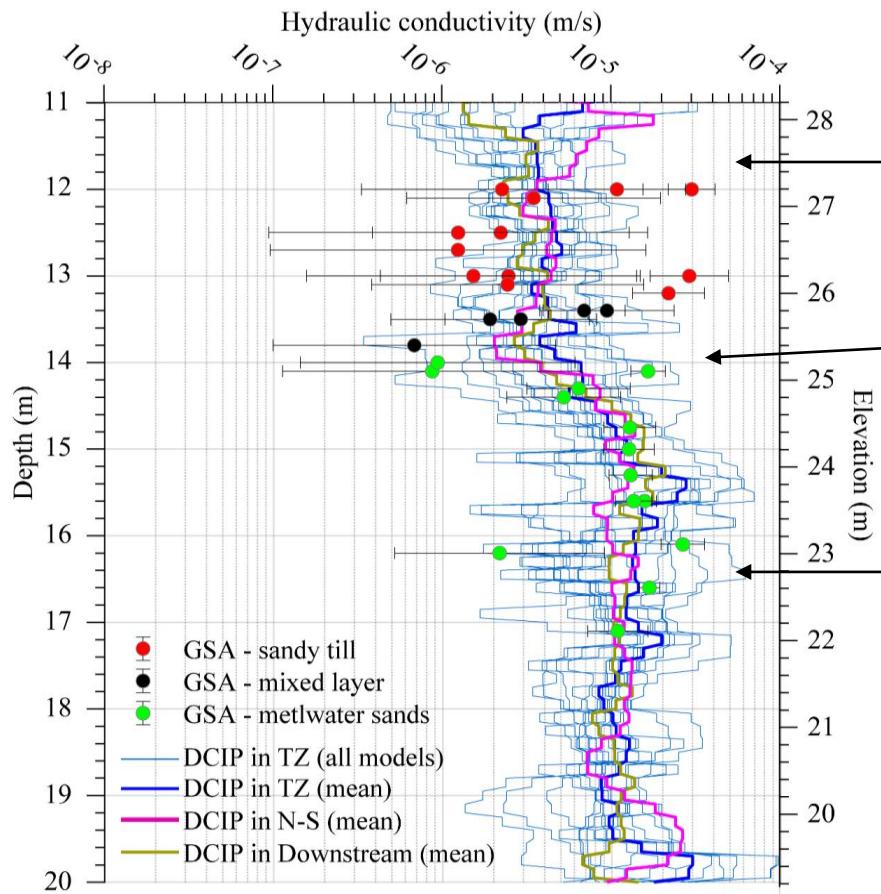
# Hydraulisk ledningsevne og DCIP målinger

Hydraulisk ledningsevne fra IP data

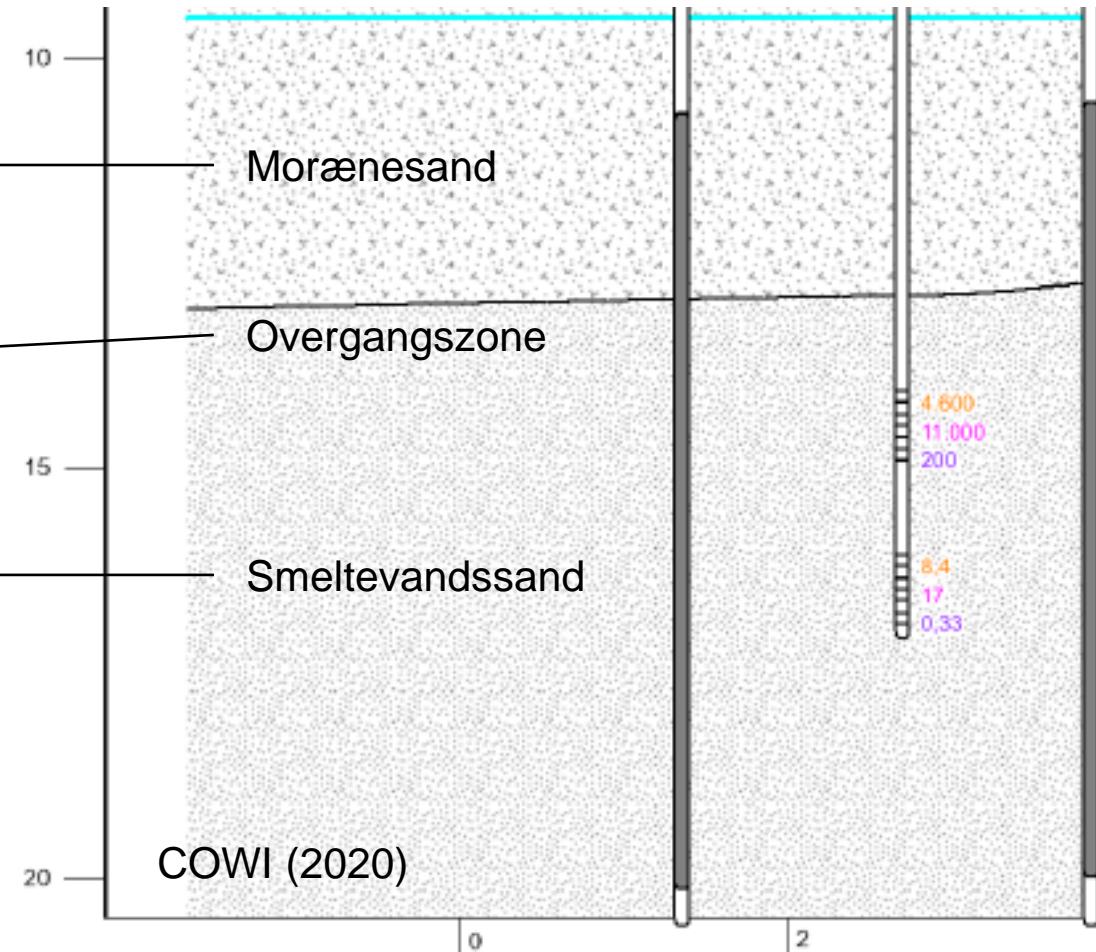


# Hydraulisk ledningsevne og cross-borehole DCIP: Hvordan stemmer det?

Horisontalt gennemsnit for K i  
behandlingszonen fra IP-data



Udsnit af geologi i behandlingszonen



# Konklusion

*„Cross-borehole DCIP: Kan det bruges til at planlægge og monitere in situ oprensning?“*

## Monitering

- *Ændringer i vandkemi kan relateres direkte til cross-borehole DCIP målinger*
- *Det er mulig at se meget detaljeret, hvordan det injicerede har spredt sig*
- *Udvikling over tid ses*

## Planlægning

- *Detaljeret rumlig fordeling af hydraulisk ledningsevne kan beregnes fra data*
  - *Brugbart i planlægnings- og fortolkningsfasen*
    - *kan også bruges til nøjagtig beregning af masseflux*
    - *Arbejde med K-værdier pågår*

# Projekt partnere

Pilotkala eksperiment med ZVI

- Kirsten Rügge, Torben Højbjerg Jørgensen, Morten Dreyer, Lærke Brabæk, COWI
- Neal Durant, and others, Geosyntec

Geofysisk monitering med cross-borehole

- Rasmus Thalund Hansen, Annika S. Fjordbøge, Poul L. Bjerg
- Léa Lévy, Thue Bording, Gianluca Fiandaca, Anders Vest Christiansen
- Bolette B. Jensen, Majken Looms, Copenhagen University

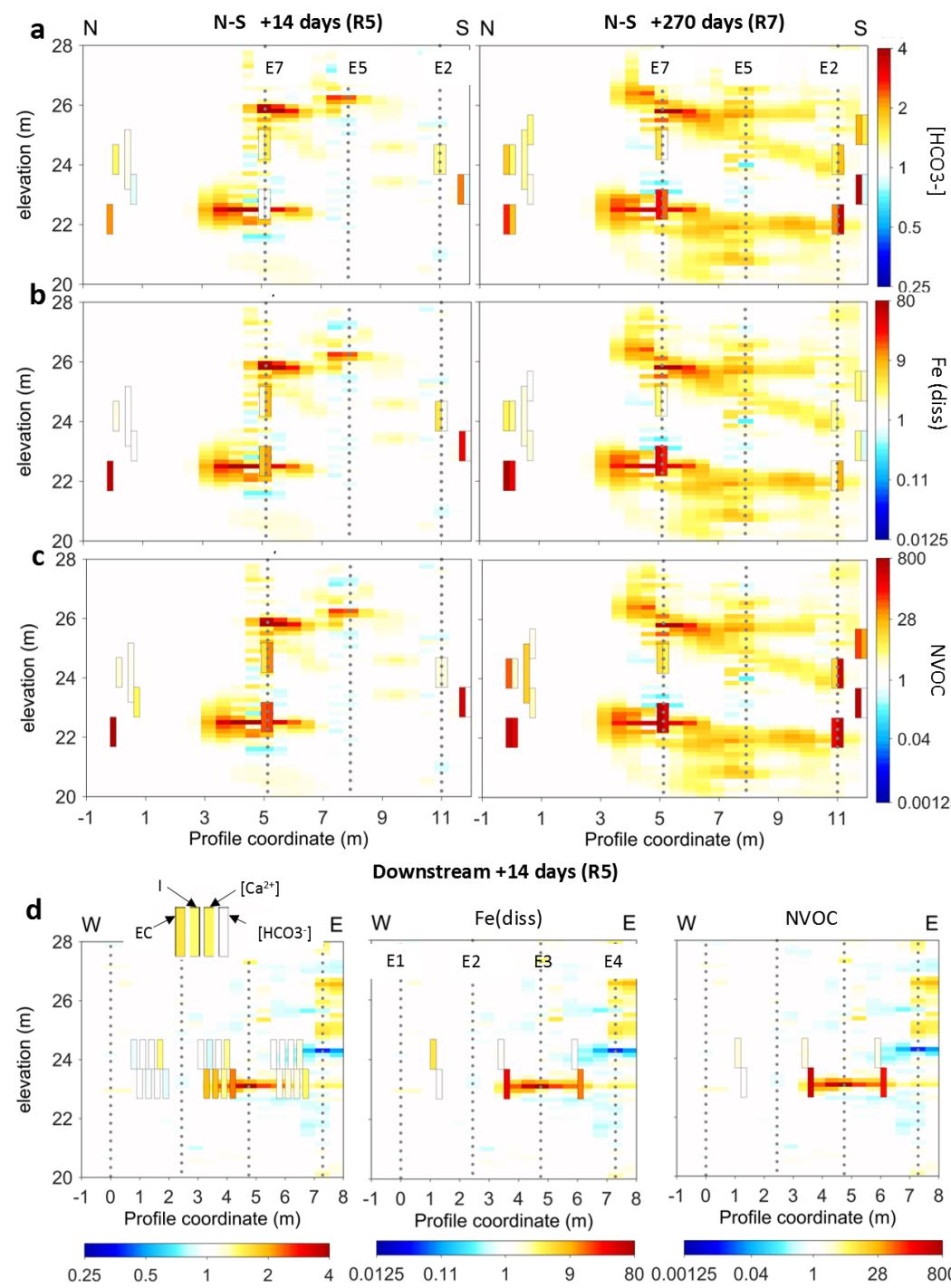
Projektleder

- Maria Hag, Nina Tuxen, Capital Region

Finansiering

- Capital Region
- Advokat Bent Thorbergs Fond

# Bonus



## Laboratorietest af 4 AOP (Advanced Oxidation Process) metoder til rensning af komplekst forurenset grundvand fra Grindsted



v/ Seniorspecialist Jarl Dall-Jepsen

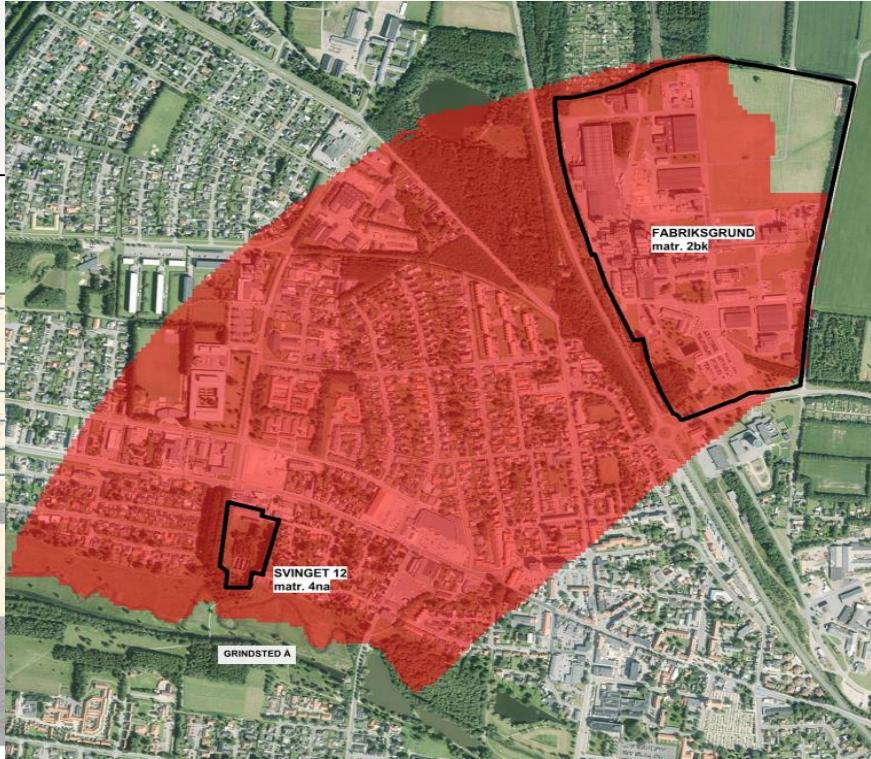
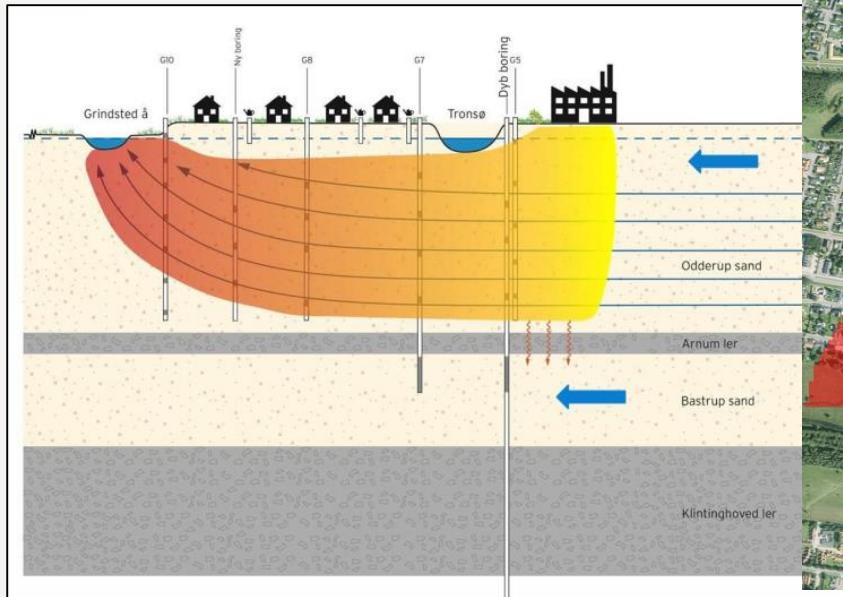
Medforfattere: Region Syddanmark, Vand og Jord

Hanne Nielsen, Jørn K. Pedersen, Lone Dissing, Kim Risom Thygesen, Klaus Bundgaard Mortensen

# Hvad jeg vil fortælle om

- > Forurenset grundvand strømmer fra fabriksgrunden mod Grindsted å
- > Formål med gennemførelse af laboratorietest
- > De fire AOP metoder og test af metoderne
- > Resultater af de fire metoders effektivitet
- > Resultater af økotoxikologiske test
- > Hvad er der egentligt sket i "oxidationsprocessen" et kig på NVOC
- > Konklusioner og perspektiv

# Grundvandet under Grindsted by



# Formål og omfang af laboratorietest

- › Afsøge muligheder for etablering af en midlertidig indsats for at reducere forureningen af Grindsted å (pump-and-treat) med afprøvning af lovende rensemetoder:
  1. Metode A: Ozon + aktivt kul
  2. Metode B: Ozon + brintperoxid + aktivt kul
  3. Metode C: UV + brintperoxid + aktivt kul
  4. Metode D: Katalytisk + brintperoxid + aktivt kul
  5. Forsøg udført på tre prøver efter beregnet optimal dosering, underdosering og overdosering
  6. Økotokologiske test med en langtids- og kortidsorganisme (grønalge/krebsdyr) for slutprøver og ubehandlet råvand

# Aktører

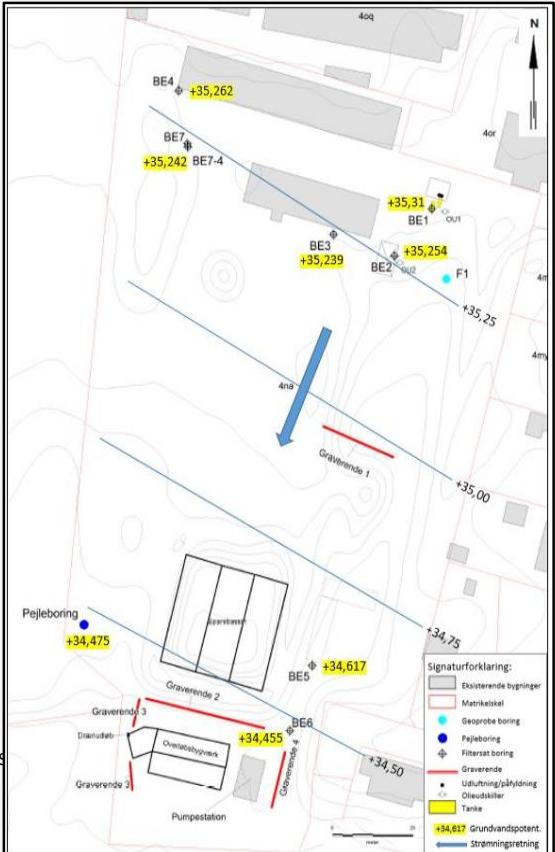
Bygherre: **Region Syddanmark**

Rådgiver: **COWI**

Udførende:

- › **Suez** (Schweiz og Tyskland)
  - › Ozon (Metode A)
  - › Ozon/brintperoxid (Metode B)
  - › UV/brintperoxid (Metode C)
  - › Aktivt kul
- › **Water IQ** (Holland)
  - › Katalystisk (Metode D)
- › **DHI** (Danmark)
  - › Økotoxikologiske test
- › **ALS** (Danmark)
  - › Analyser

# Oppumpning af grundvand fra boring BE6



# Analyser af 90 forskellige komponenter i råvand og testvand

- › Dele af analysepakken "Hovedbestanddele (Boringskontrol)":  $\text{NH}_4^+$ , Mn, Ca, Mg, K, Na, Fe,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ , P, N, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$
- › Kulbrinter og BTEX
- › Chlorerede stoffer og deres nedbrydningsprodukter
- › Metallerne: As, Pb, B, Cd, Cu, Ni og Zn
- › Inddampningsrest, COD, NVOC og TOC
- › Bromat (ozon omdanner bromid)
- › Grindsted Pakke A med 36 forskellige Grindstedværkstoffer (barbiturater, sulfonamider m.m.)

# Oversigt indhold af forureningskomponenter i råvand

| Komponentgruppe             | Koncentration ( $\mu\text{g/l}$ ) | Andel af forureningsindhold (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| BTEX                        | 533                               | 4,8                             |
| Totalkulbrinter             | 270                               | 2,4                             |
| Total chlorerede            | 8649                              | 78                              |
| Total Grindstedværk stoffer | 1673                              | 15                              |
| Samlet analyseret indhold   | 11125                             | 100                             |

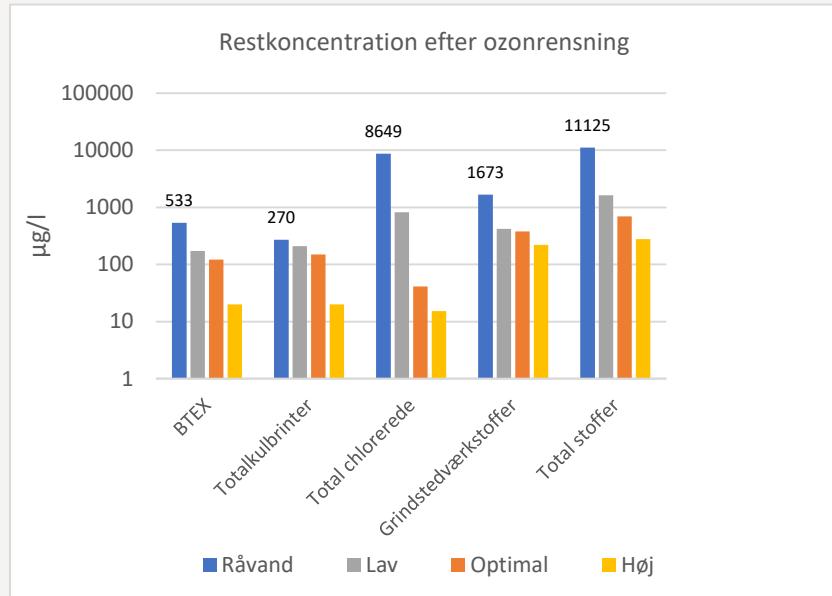
# Indhold af Grindstedværkstoffer top 6

| Grindstedværk stof      | Indhold ( $\mu\text{g/l}$ ) | Andel Grindstedværk-stoffer (%) |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Ethylurethan            | 315                         | 19                              |
| 5,5-diallylbarbitursyre | 230                         | 14                              |
| Sulfacetamid            | 200                         | 12                              |
| Isobutylbarbitusyre     | 150                         | 9                               |
| Butylbarbiturat         | 110                         | 7                               |
| Sulfadimidin            | 110                         | 7                               |
| Total                   | 1115                        | 67                              |

# Rensning af råvand kun med aktivt kul

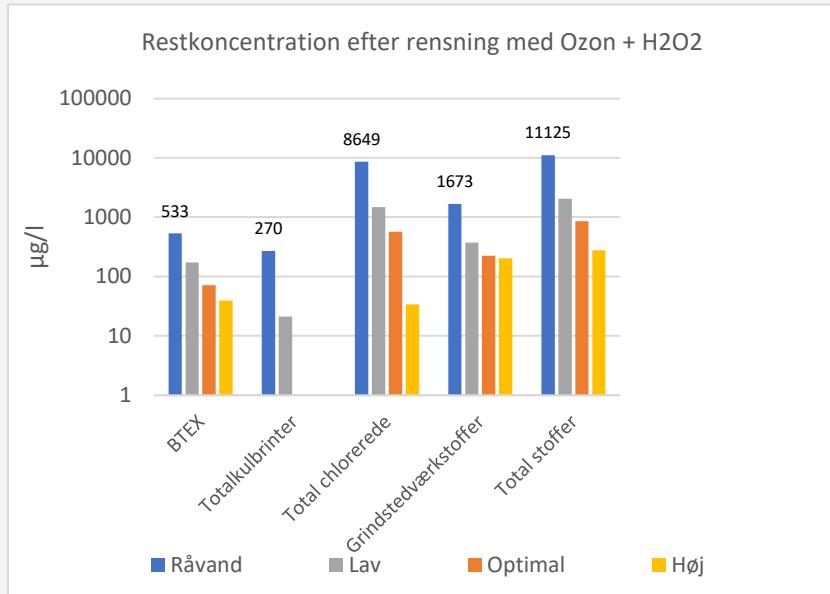
| Komponenter             | Baseline (µg/l) | Restkoncentration (µg/l) | Rensemøde (%) | Dominant     |
|-------------------------|-----------------|--------------------------|---------------|--------------|
| Chlorerede forbindelser | 8648            | 257                      | 97,0          | Vinylchlorid |
| BTEX                    | 533             | 3,12                     | 99,4          | Benzen       |
| Totalkulbrinter         | 270             | <5                       | 100           | Ingen        |
| Grindstedværkstoffer    | 1673            | 209                      | 87,5          | Ethylurethan |
| Sum af org. stof        | 11125           | 466                      | 96            |              |

# Resultater for metode A, kun ozonbehandling



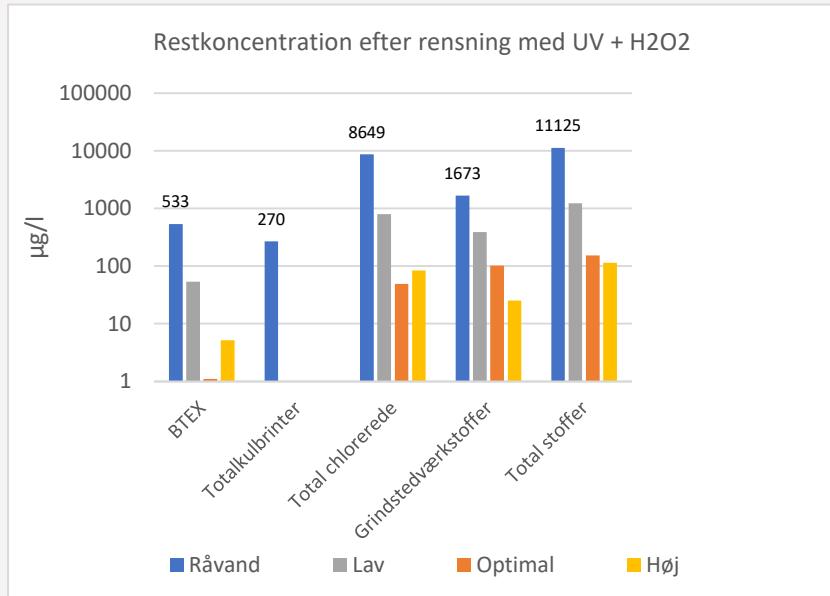
- › Bedste forsøg var overdosering.
- › Dog mere end 270 µg/l tilbage - fortrinsvis Grindstedværkstoffer.
- › Men stærkt forhøjet indhold af bromat på 65 µg/l.
- › Grænseværdi 10 µg/l for bromat.
- › En stor del af renseeffekt kommer fra stripning

# Resultater for metode B, fast dosering af ozon og varierende koncentration af brintperoxid



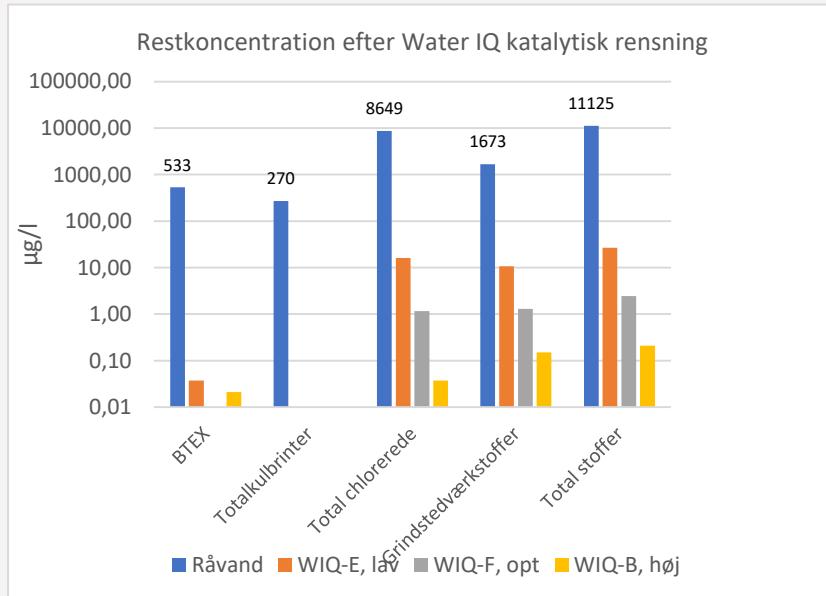
- Igen bedste resultat med overdosering .
- Dog mere end 270 µg/l tilbage - fortrinsvis Grindstedværkstoffer
- Overskridelse med bromat på 20 µg/l.
- Igen stor stripningseffekt for flygtige komponenter.

# Resultater af metode C, fast UV-dosering og varierende mængde brintperoxid



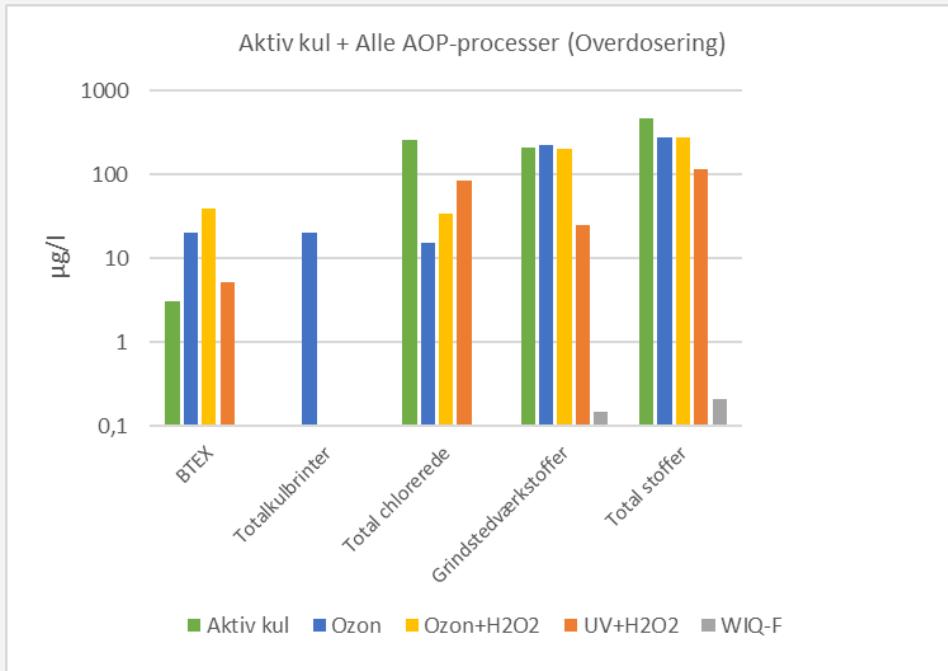
- Meget lille forskel på optimal- og overdosering med brintperoxid.
- Begrænsning i effekt ligger sandsynligvis i UV doseringen
- Det vurderes at metodens maksimale effekt ikke er afdækket

# Resultater af metode D, varierende mængde brintperoxid og opholdstid i katalytisk enhed.



- Meget effektiv metode ved alle doseringer.
- Det er dog lidt svært at gennemskue hvad der sker i det katalytiske kammer.
- Metodens effekt kan yderligere forstærkes ved tilslætning af jernsalt, med det giver problematisk høje indhold af jern i det rensede vand.

# Renseeffekt for de fire AOP metoder og behandling med aktivt kul



# Økotoksikologiske test på råvand og renset vand

- › Ingen observeret økotoksikologisk negativ effekt på det urensede grundvand.
- › For alle rensemetoder ses en svag negativ effekt.
- › En fortynding på 5 gange vil fjerne effekten.
- › Ingen påvirkning fra de anvendte oxidationsmidler.

| Sample                        | DHI ID No. | Algal growth inhibition test with <i>Raphidocelis subcapitata</i> (mL/L) |  |  |  | Immobilisation test with <i>Daphnia magna</i> (mL/L) |      |
|-------------------------------|------------|--|--|--|--|--|------|
|                               |            | NOEC   | LOEC                                     | EC10                                     | EC50                                     | EC10   | EC50 |
| Contaminated raw water sample | 20-1242    | 800 <sup>1)</sup><br>500 <sup>2)</sup>                                   | >800 <sup>1)</sup><br>>500 <sup>2)</sup> | >800 <sup>1)</sup><br>>500 <sup>2)</sup> | >800 <sup>1)</sup><br>>500 <sup>2)</sup> | >900   | >900 |
| PAC-A6-SF                     | 20-1245    | 500  | 800                                      | 483<br>(393-572)                         | >800                                     | >900   | >900 |
| PAC-B6-SF                     | 20-1246    | 500  | 800                                      | 544<br>(• - •) <sup>3)</sup>             | >800                                     | >900   | >900 |
| PAC-F-SF                      | 20-1247    | 200  | 300                                      | 257<br>(204-310)                         | >800                                     | >900   | >900 |
| PAC-C6-SF                     | 20-1248    | 300  | 500                                      | 305<br>(222-389)                         | >800                                     | >900   | >900 |

1) With pH-adjustment of the sample before initiation of the test

2) Highest test concentration without pH-adjustment of the sample

3) Data did not allow statistical calculation of the 95% confidence interval

# Hvad er der sket ved "AOP-rengøringen" af vandet?

- › Indholdet af NVOC (ca. 5 mg/l) er det samme før og efter AOP rensning
- › Efter behandling med aktivt kul sker der en reduktion med ca. 60% af NVOC.
- › En analyse af kulstofbalancen viser at ca. 4 mg/l NVOC ikke kan forklares ved kendte analyserede stoffer og kan være andre forureningskomponenter eller humusstoffer.
- › Det er sikkert, at de analyserede komponenter reduceres, men spørgsmålet er om de bliver mineraliseret eller delvis nedbrudt.
- › Det kan ikke afvises, at der er dannet nye stoffer, som kan være årsag til den forøgede økotoxicitet.

# Konklusioner

- › Metoderne A og B med ozon er uegnede grundet høj grad af stripning og problematisk dannelsel af bromat.
- › Metode C med UV+brintperoxid er sandsynligvis ikke testet i bund grundet en for lav UV-dosering i forsøgene.
- › Metode D med katalyse og brinkperoxid er klart den mest effektive.
- › Yderligere test af metode C og D vil være nødvendig før dimensionering af fuldskala anlæg.
- › Renset vand har en svag negativ økotoxikologisk effekt, mens det urensede råvand noget overraskende ikke har.
- › På nuværende tidspunkt er det uvist, om der i AOP-rensningen er dannet andre stoffer, som ikke er omfattet af det anvendte analyseprogram.

Link til rapport: <https://regionsyddanmark.dk/wm527903>

## Perspektiv

Region Syddanmark har valgt at standse arbejdet med udvikling af rensemetoder til et pump-and-treat pilot-renseanlæg fordi:

- › Udførelse af supplerende test vil betyde, at et eventuelt pilot-renseanlæg forventes at få en begrænset driftsperiode, da en permanent løsning forventes etableret indenfor 5 år.
- › Et pilot-renseanlæg forventes at have en meget lille effekt på forureningsbelastningen af Grindsted Å.
- › Der er risiko for en negativ effekt på åen som følge af utilsigtet dannelse af problematiske nedbrydningsstoffer.
- › Det er usikkert, om yderligere test kan give det nødvendige grundlag for at opnå en udledningstilladelse.
- › Ingen af de foreslæede metoder forventes at indgå i en permanent løsning.

# Aerob nedbrydning af vinylchlorid i sandfiltre

Lisbeth Hansen, Region Hovedstaden

Søren Eriksen, Krüger A/S

**ATV vintermøde 2021**

# Agenda

Pump and treat anlæg til afskæring af grundvandsfaner

- Chlorerede nedbrydningsprodukter udfordrer kulfiltre
- Nedbrydningsveje for vinylchlorid

Anlæg i forsøg

- Forureninger og driftsparametre

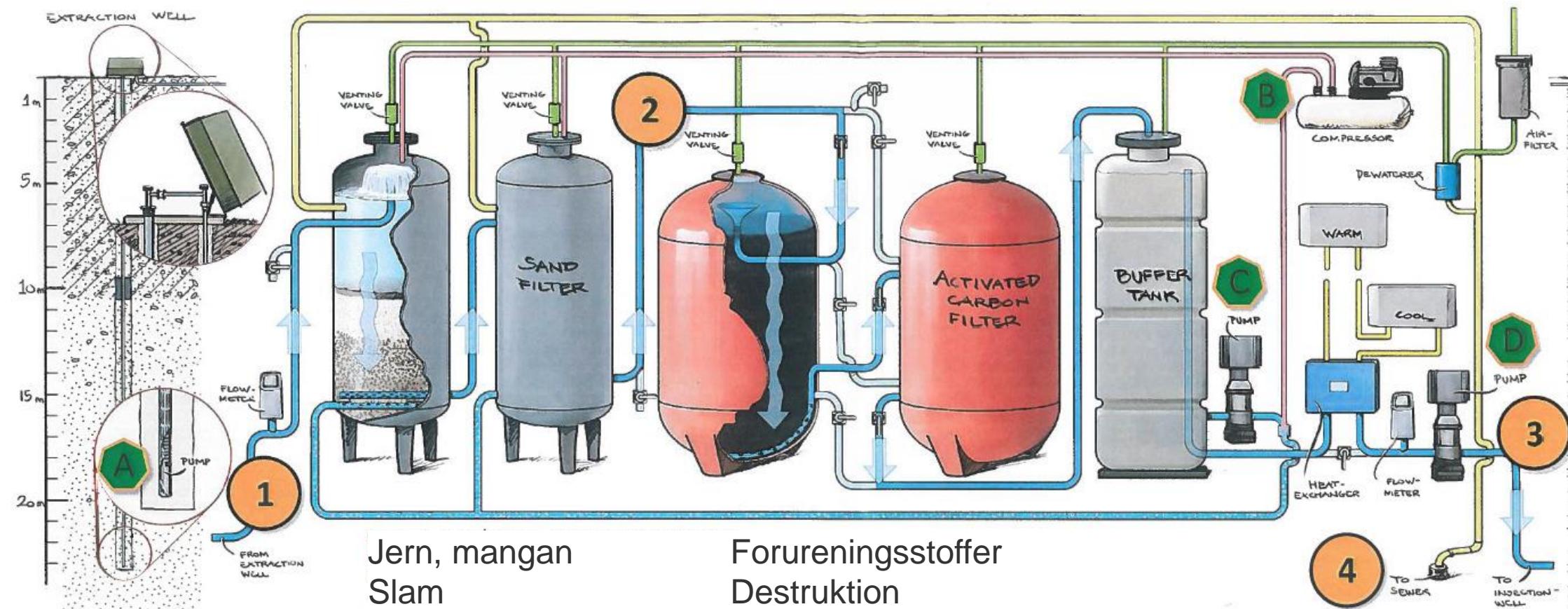
Modifikation af anlæg

- Forbedring af iltning
- Podning
- Substrattilsætning

Resultater

Konklusion

# P&T anlæg



# Nedbrydningsveje for chlorerede stoffer

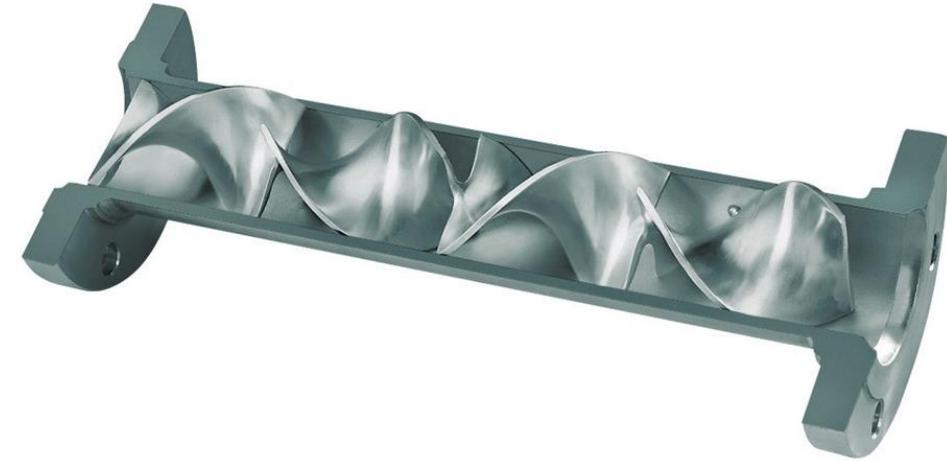
| Mikrobiologisk nedbrydning |             |                         |                     |  |                           |                       |   |
|----------------------------|-------------|-------------------------|---------------------|--|---------------------------|-----------------------|---|
| Kemisk forbindelse         | Forkortelse | Aerob                   |                     | Anaerob                                  |                           |                       |   |
|                            |             | Direkte aerob oxidation | Aerob cometabolisme | Reduktiv dechlorering v. halorespiration | Direkte anaerob oxidation | Anaerob cometabolisme |   |
| Perchlorethen              | PCE         |                         |                     | X  |                           |                       | X |
| Trichlorethen              | TCE         |                         | X                   | X  |                           |                       | X |
| cis-1,2-dichlorethen       | cis-DCE     | X                       | X                   | X  | (X)                       |                       |   |
| 1,1-dichloethen            | 1,1-DCE     |                         | X                   | X  |                           |                       |   |
| trans-1,2-chlorethen       | trans-DCE   | ?                       | X                   | X  | ?                         |                       |   |
| Vinylchlorid               | VC          | X                       | X                   | X  | (X)                       |                       | X |
| Trichloethan               | 1,1,1-TCA   |                         | X                   | X  |                           |                       | X |
| 1,1-dichloethan            | 1,1-DCA     | X                       | X                   | X  |                           |                       | ? |
| Chloethan                  | CA          | X                       | X                   | ?  | ?                         |                       |   |

## Anlæg i forsøg

| Anlæg               | Opholdstid | Carbonkilde<br>[µg/L]    | Cis-DCE indløb<br>[µg/L] | VC indløb<br>[µg/L] | Forsøg                     |
|---------------------|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| Søborg<br>Hovedgade | 200 min    | BTEX 3500<br>Øvrige 3500 | 200                      | 100                 | Iltning                    |
| Hejrevej            | 15 min     | BTEX 2,5<br>Øvrige 160   | 300                      | 300                 | Iltning                    |
| Lufthavnen          | 10 min     | --                       | 10                       | 0,3                 | Iltning<br>Podning         |
| Grusgraven          | 30 min     | --                       | 4                        | 0,4                 | Substrat<br>Næringsstoffer |

# Modifikationer af anlæg – optimeret iltning

- Statisk mixer
  - Forbedret opløsning af oxygen – mætning opnås
- Renovering af kompressoranlæg
  - Sikre trykluftforsyning
  - Eliminere olie og kondens
- Mass flow controller
  - Konstant luftdosering eller konstant luft-vandforhold
  - Tilstrækkelig iltning uden kalkudfældning



# Podning

- Filtersand er udtaget fra Søborg Hovedgade med effektiv nedbrydning og ilagt sandfilter i Lufthavnen med delvis nedbrydning

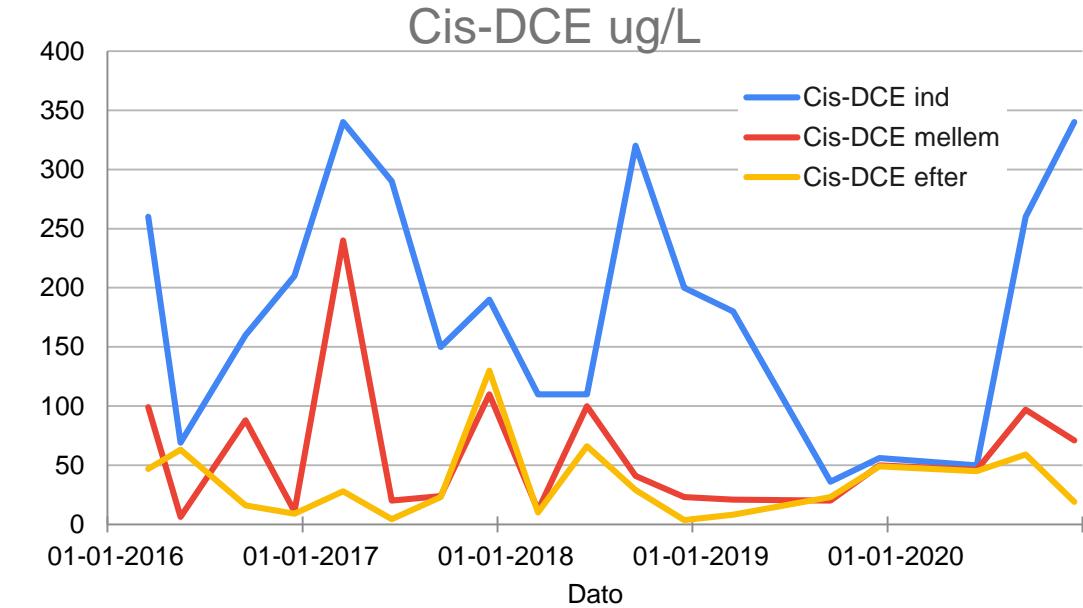
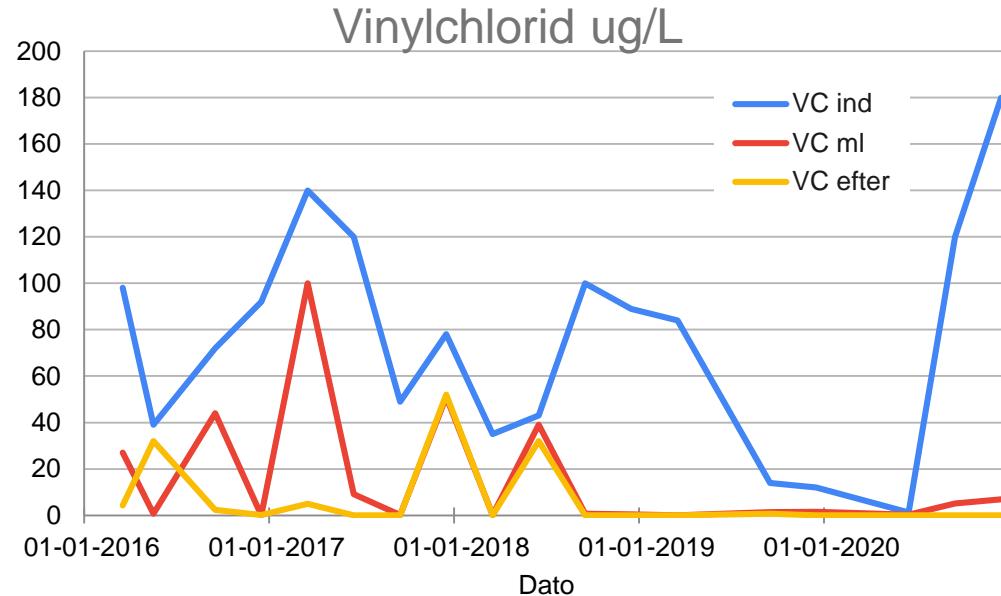
## Substrat dosering

- Eddikesyre                  40-160 g/L      0,2-0,9 mg/m<sup>3</sup>
- Sukker                        200-400 g/L      1,2-2,3 mg/m<sup>3</sup>
- NPK-gødning                50-100 g/L      6-12 µg P/m<sup>3</sup>
- Kontinuert / interval-dosering



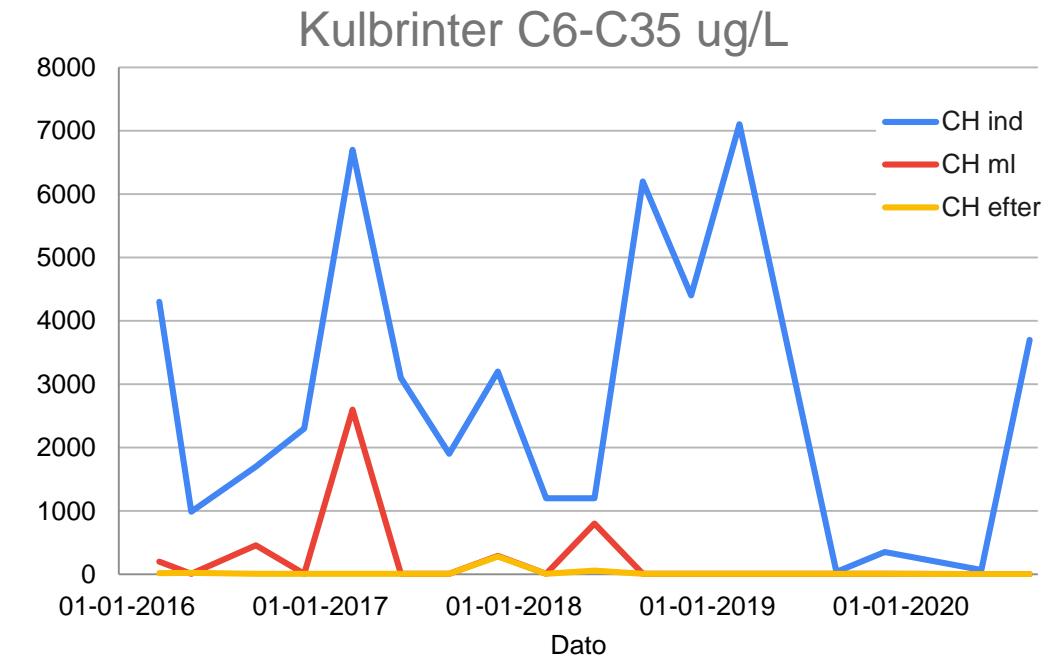
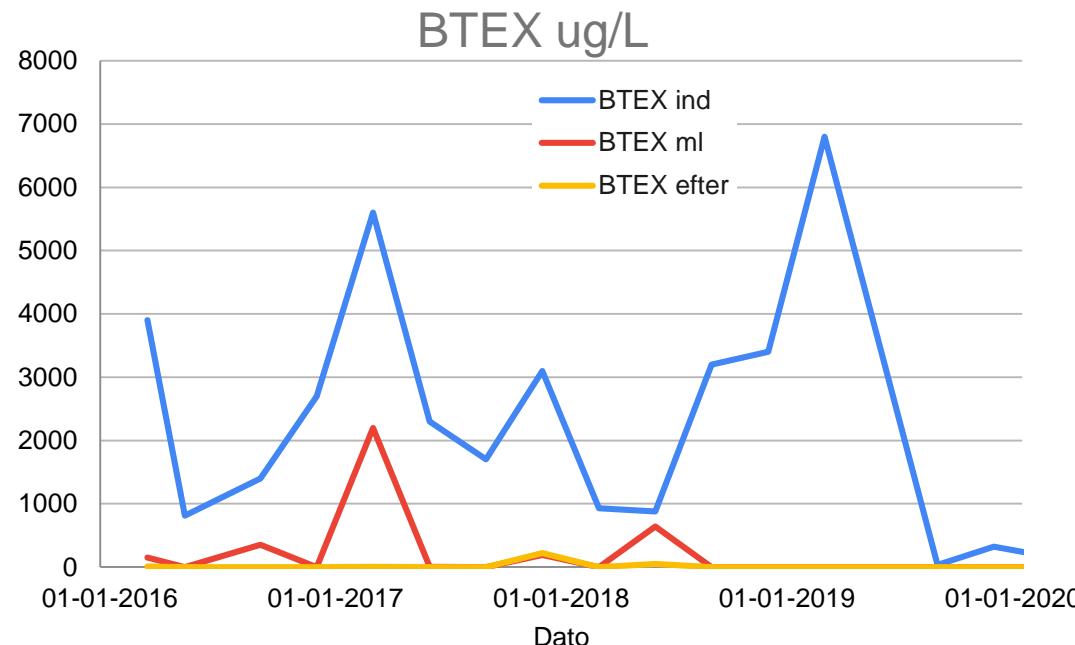
## Resultater – Itning ved høje forureningskoncentrationer

- Vinylchlorid nedbrydes stort set fuldstændigt
- Cis-DCE nedbrydes 80-95%



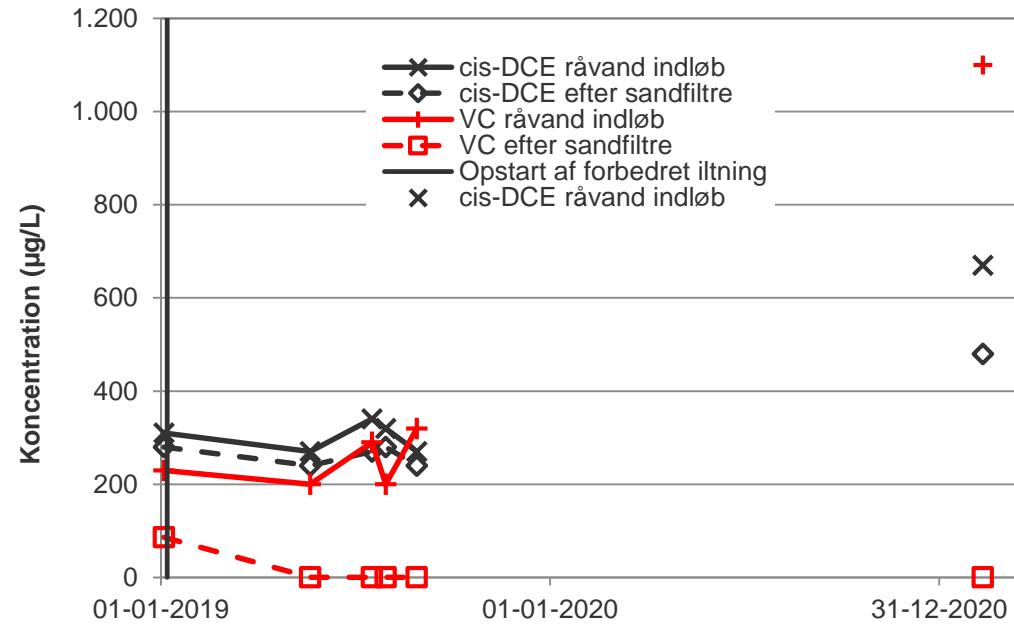
## Resultater – Iltning ved høje forureningskoncentrationer

- BTEX og kulbrinter nedbrydes stort set fuldstændigt
- PCE nedbrydes ikke, mens TCE og trans DCE nedbrydes i ringe grad



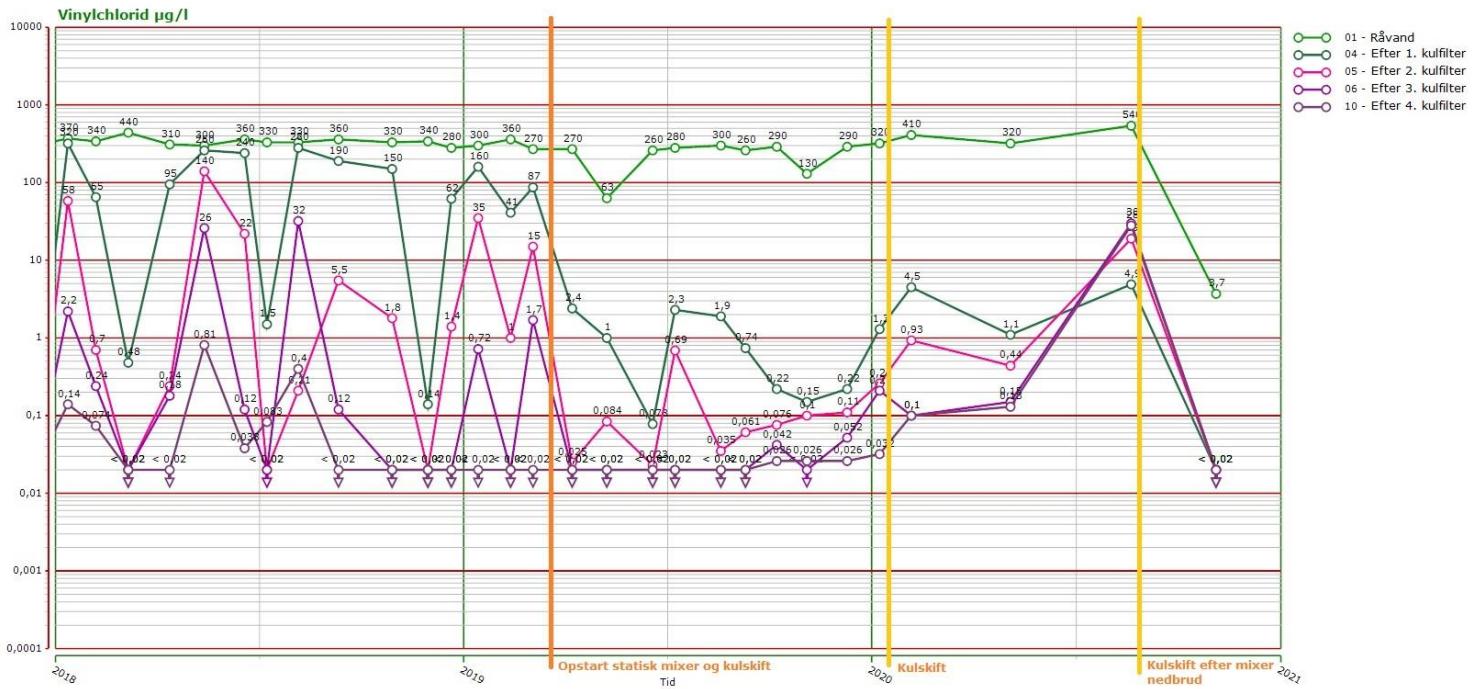
# Resultater – Iltning ved middel forureningskoncentrationer

- Vinylchlorid nedbrydes stort set fuldstændigt
- Cis-DCE nedbrydes 10-20%



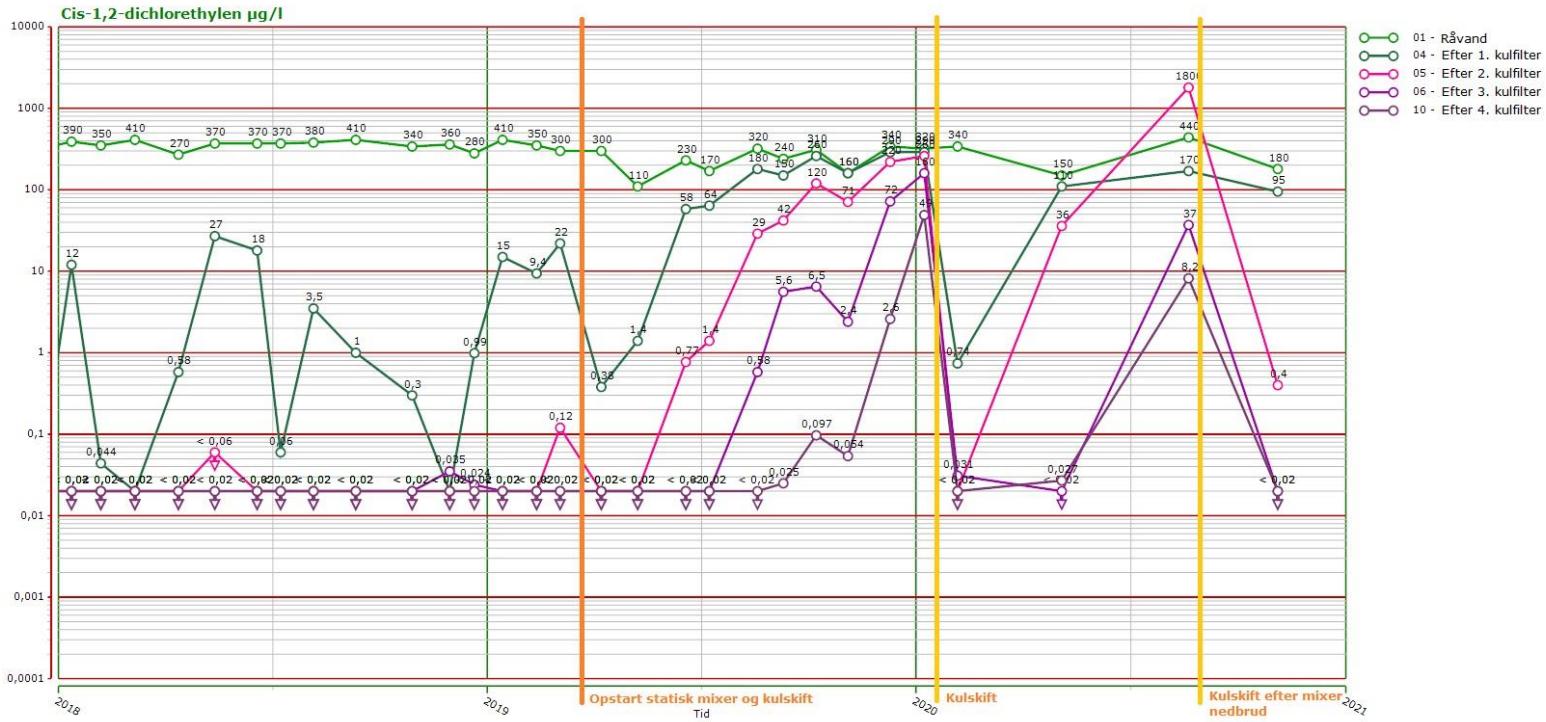
# Resultater – Itning ved middel forureningskoncentrationer

- Vinylchlorid belaster ikke længere kulfILTER
- Interval for kulskifte øges fra 7 uger til 10 måneder



# Resultater – Itning ved middel forureningskoncentrationer

- Cis-DCE bliver bestemmende for kulskifte
  - Prøvetagningsinterval øget fra 1 måned til 3 måneder



# Driftserfaringer med statisk mixer og mass flow controller

- Statisk mixer skal renses for okker 2 gange årligt
- Afluftere på sandfiltre kan med fordel renses samtidig
- Mass flow controller er følsom for partikler, olie og vand:
  - Trykluftanlæg skal være i god stand med køletørre og filtre
  - Kontraventil mod anlæg skal fungere, så vand ikke løber tilbage
- Driften bliver følsom for gennembrud af VC, hvis iltning svigter:
  - Iltning bør overvåges: luftflow eller endnu bedre oxygenkoncentration efter sandfilter

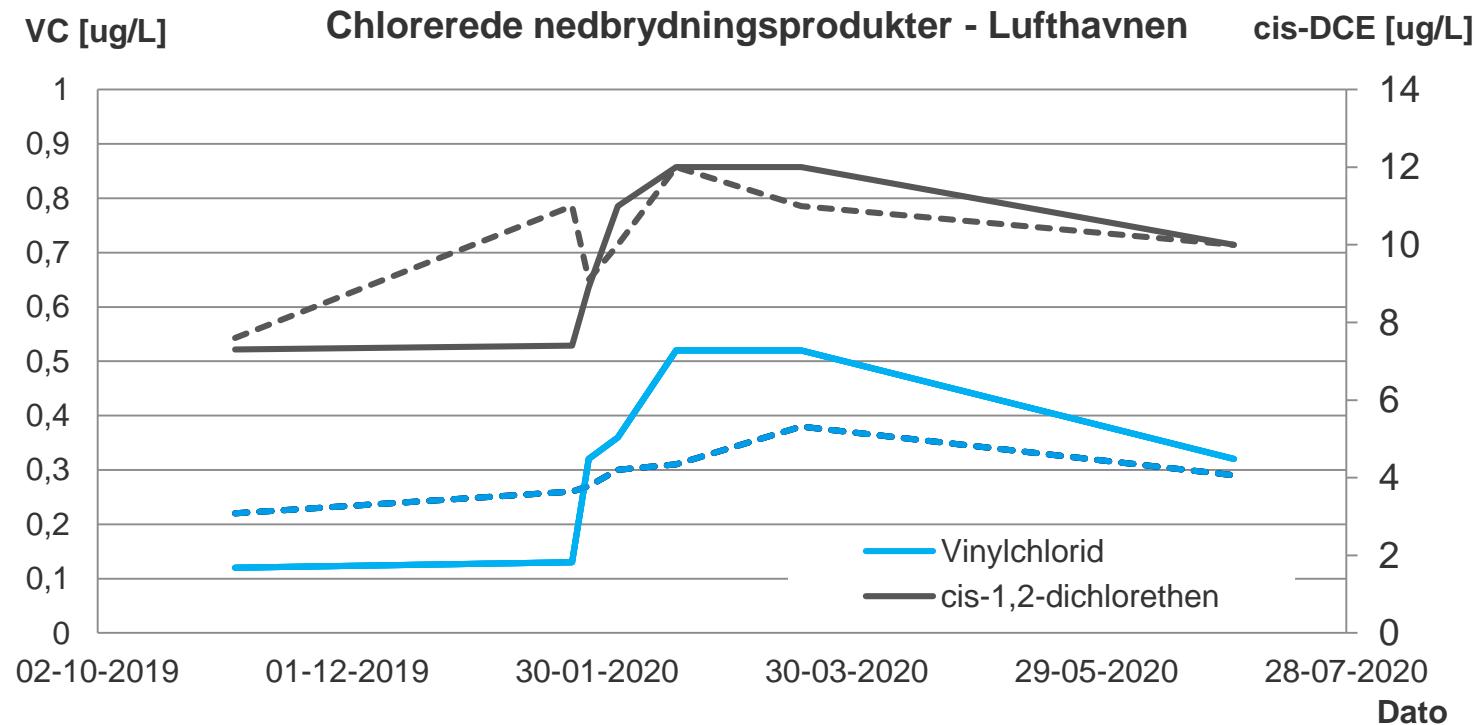
# Konklusioner – høje og middel forureningskoncentrationer

- Omfattende biologisk nedbrydning finder sted hvis iltning er tilstrækkelig
- De nødvendige bakterier er til stede og vokser villigt
- Biologisk nedbrydning går i gang af sig selv efter driftsafbrydelser

| Mikrobiologisk nedbrydning |             |                         |                     |   |                           |                       |
|----------------------------|-------------|-------------------------|---------------------|---|---------------------------|-----------------------|
| Kemisk forbindelse         | Forkortelse | Aerob                   |                     | Anaerob                                   |                           |                       |
|                            |             | Direkte aerob oxidation | Aerob cometabolisme | Reduktiv dechlorering v. haloresspiration | Direkte anaerob oxidation | Anaerob cometabolisme |
| Perchlorethen              | PCE         |                         |                     | X   |                           | X                     |
| Trichlorethen              | TCE         |                         | X                   | X   |                           | X                     |
| cis-1,2-dichlorethen       | cis-DCE     | X                       | X                   | X   | (X)                       |                       |
| 1,1-dichloethen            | 1,1-DCE     |                         | X                   | X   |                           |                       |
| trans-1,2-chlorethen       | trans-DCE   | ?                       | X                   | X   | ?                         |                       |
| Vinylchlorid               | VC          | X                       | X                   | X   | (X)                       | X                     |
| Trichloethan               | 1,1,1-TCA   |                         | X                   | X   |                           | X                     |
| 1,1-dichloethan            | 1,1-DCA     | X                       | X                   | X   |                           | ?                     |
| Chloethan                  | CA          | X                       | X                   | ?   | ?                         |                       |

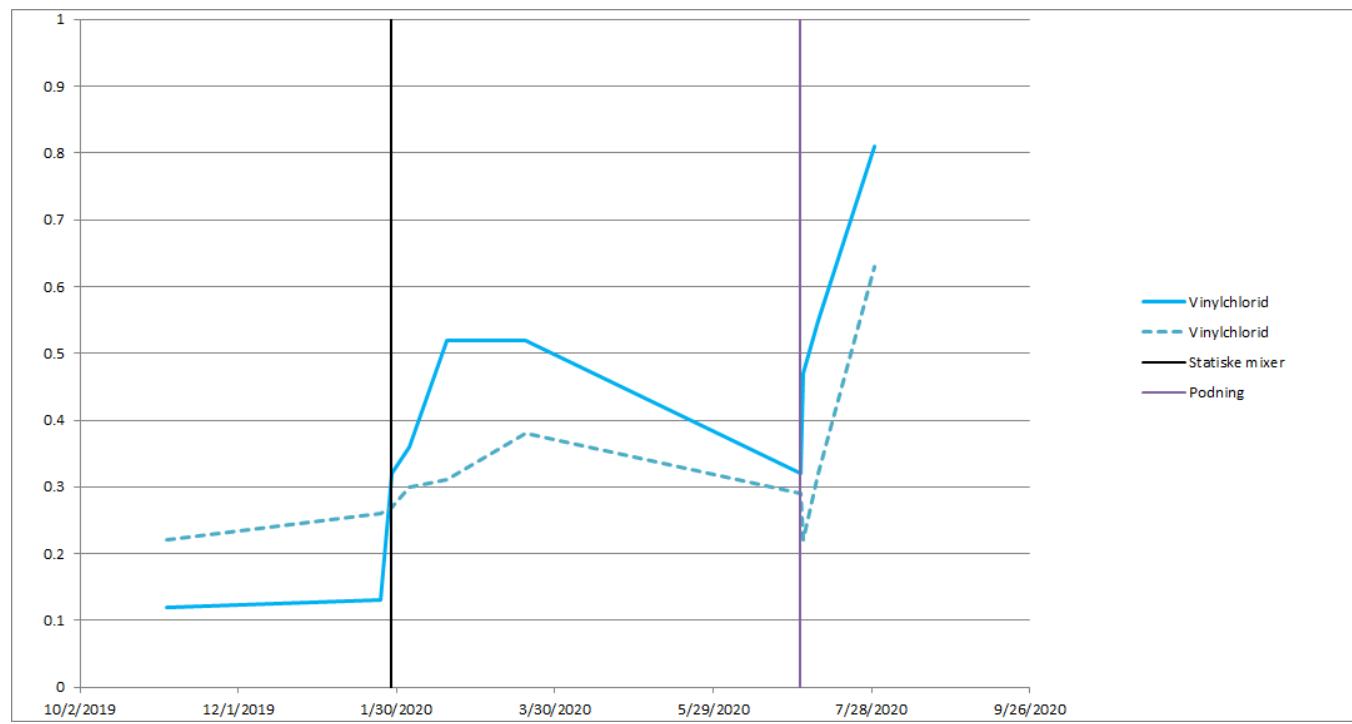
## Resultater – Lave forureningskoncentrationer

- Ca. 20-25% nedbrydning af vinylchlorid
- Ingen nedbrydning af cis-dichlorethen



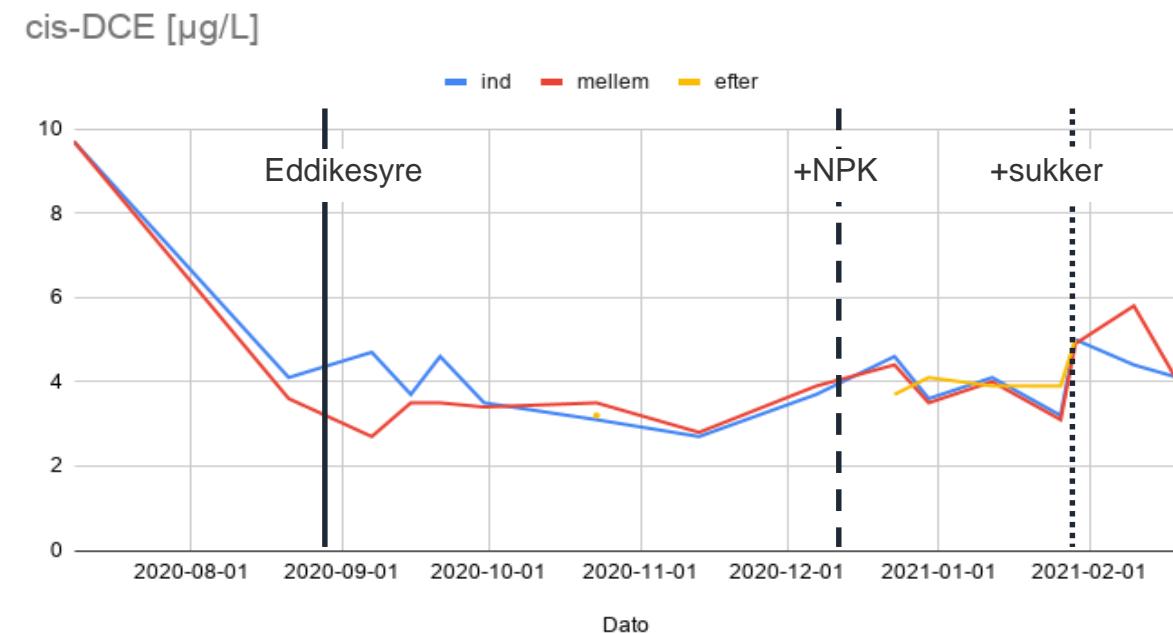
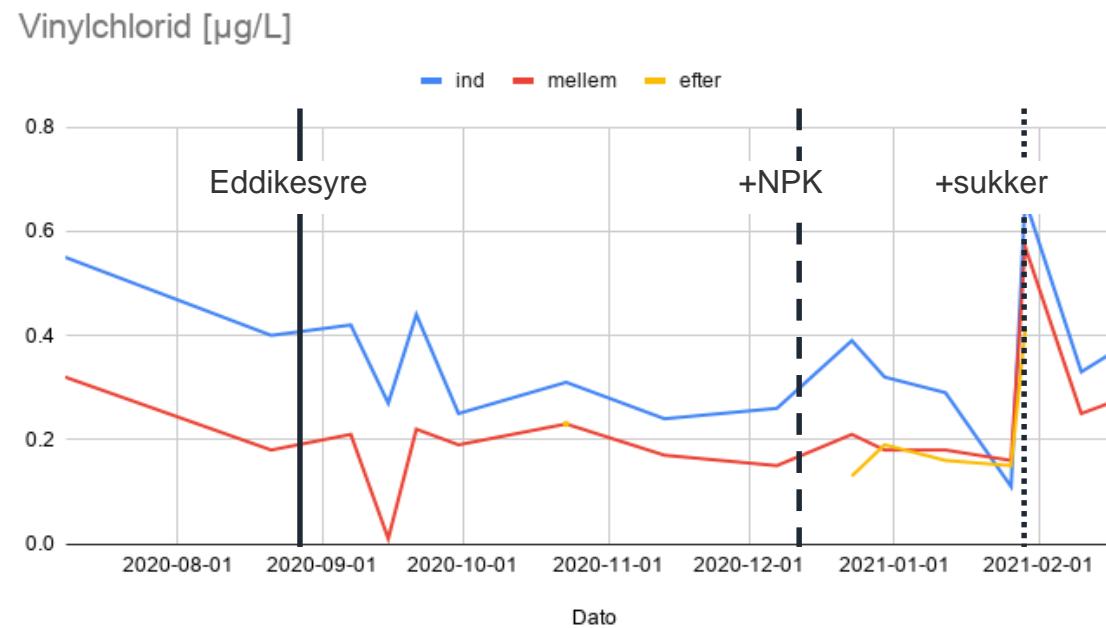
## Resultater – podning

- Podning har kortvarig virkning: 50% nedbrydning af VC
- Bakteriekultur er ikke stabil



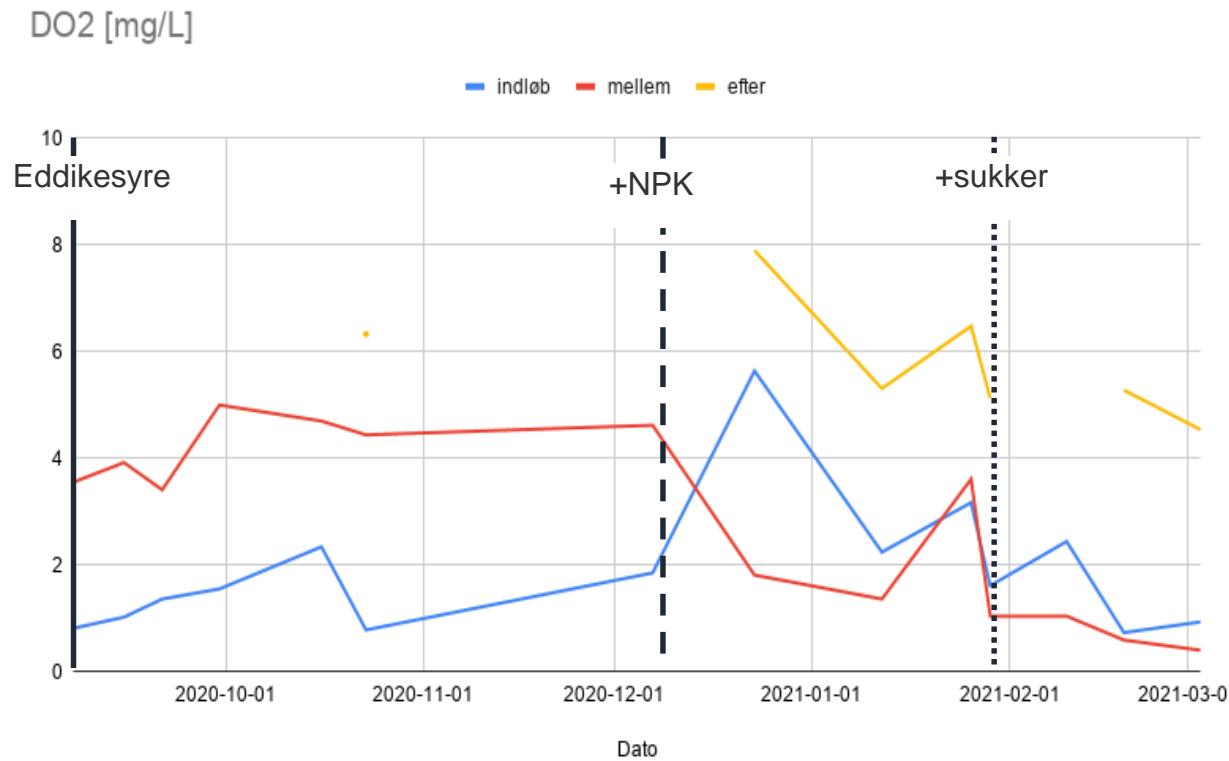
## Resultater – Lave forureningskoncentrationer

- Ca. 40-50% nedbrydning af vinylchlorid i 1. sandfilter – ingen nedbrydning i 2. sandfilter
- Ingen nedbrydning af cis-dichlorethen
- Ingen effekt af substrat og næringsstoffer



## Resultater - substratdosering

- Øget oxygenforbrug indikerer biologisk aktivitet
- Nedbrydning påvirkes ikke



## Resultater – lave forureningskoncentrationer

- Begrænset biologisk nedbrydning finder sted
- Det er vanskeligt at opnå nedbrydning ved hjælp af iltning, podning og dosering af kulstofkilde
- Udfordringer:
  - Er de rigtige bakterier i anlægget?
  - Vokser de tilstrækkeligt til at omsætte forureningen?
  - Overlever biomassen returskyl? Driftstop?
  - I Lufthavnen indeholder vandet desuden PFAS som begrænser valget af aktivt kul

# Konklusion

- Ved tilstrækkeligt høje forureningsniveauer af chlorerede nedbrydningsprodukter OG egnede kulstofkilder kan omfattende biologisk nedbrydning opnås i sandfiltre blot iltning er tilstrækkelig
- Miljøforbedring i form af mindre kul til destruktion
- Besparelser i form af længere intervaller for kulskefle og prøvetagning
- Væsentlig nedbrydning er vanskeligt at opnå ved lave forureningsniveauer
- Velfungerende biologisk nedbrydning kræver procesovervågning