

Injektion i praksis – fra skrivebord til feltarbejde

Gro Lilbæk, PhD hydrogeologi

ATV-møde, 3. November 2022



Injektion med Direct Push Teknologi



- Injektion kan ske via borer eller med direct push teknologi (DPT)
- Geoprobe® er en DPT metode, der ofte benyttes til kontinuerle data og måling in-situ → kan også benyttes til injektion af reaktanter ved in-situ afværge
- Injektion med højt eller lavt tryk
 - Lavt tryk (<5-10 bar) benyttes for at undgå fracking
- NIRAS har udført sonderinger og injektioner med Geoprobe®-systemet siden 1998 – både i Danmark og Sverige
- NIRAS ejer flere maskiner/systemer → en stor værktøjskasse ifht injektions- og undersøgelsesmetoder

**“En vellykket injektion
opnås, hvis al injektat er
kommet ned i jorden”**



**“Daylighting er tegn på
god fordeling af
reaktant nede i jorden”**



**“En vellykket injektion
opnås, ved kontakt mellem
reaktant og forurening”**



En vellykket injektion

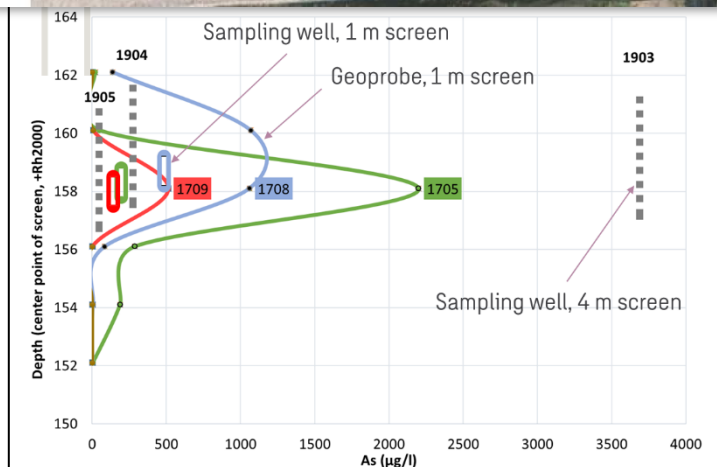
Hvad skal der til?

- En god konceptuel forståelse
 - geologi og hydrogeologi i injektionsområdet
 - forståelse af variation i hydrauliske egenskaber
 - fordeling af forurening (niveauspecifikke vandprøver)

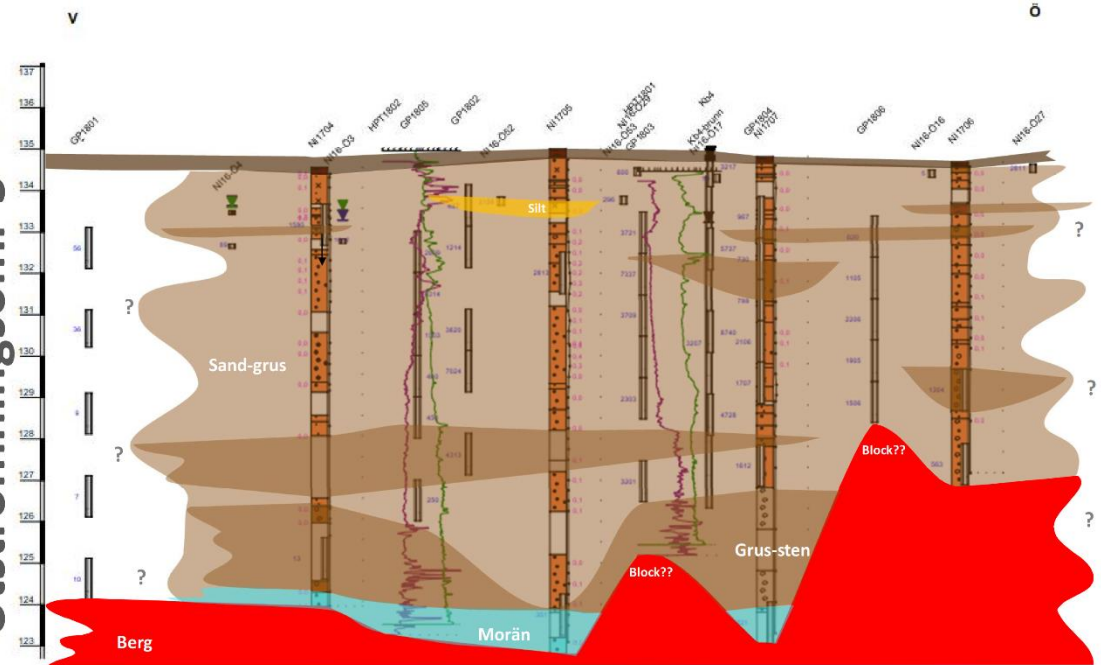
6,0 - 7,5
+161,5 - +160,0

7,5 - 9,0
+160,0 - +158,5

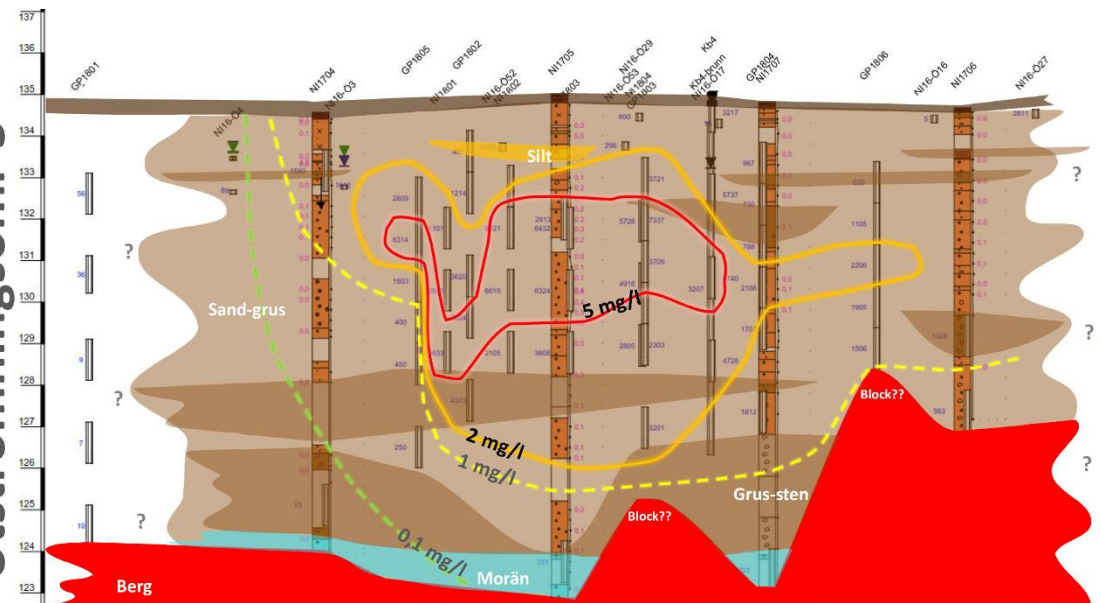
12,0 - 13,5
+155,5 - +154,0



Utströmningsomr 3



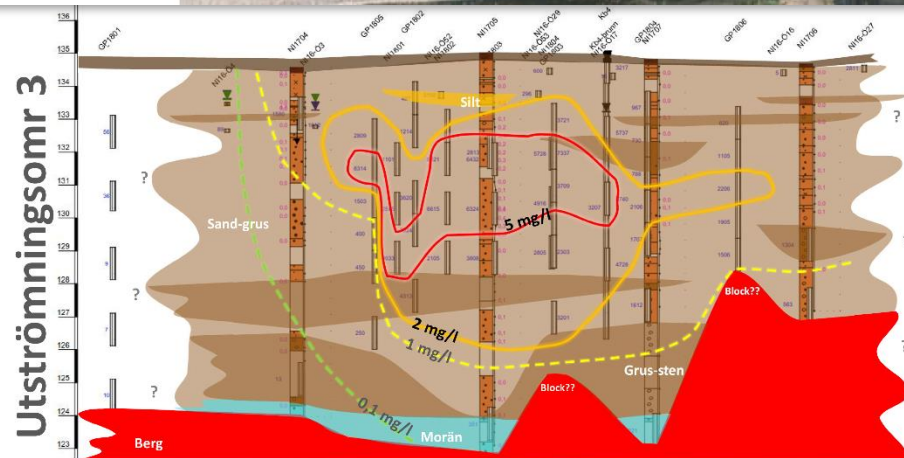
Utströmningsomr 3



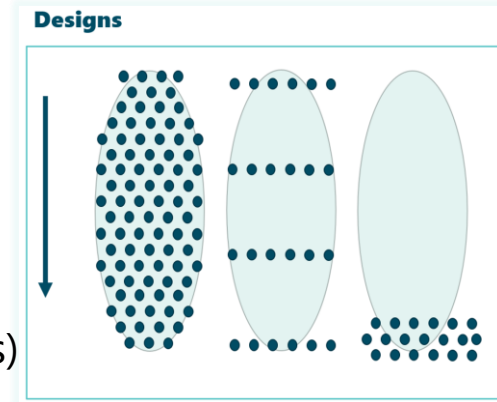
En vellykket injektion

Hvad skal der til?

- En god konceptuel forståelse
 - geologi og hydrogeologi i injektionsområdet
 - forståelse af variation i hydrauliske egenskaber
 - fordeling af forurening (niveauspecifikke vandprøver)

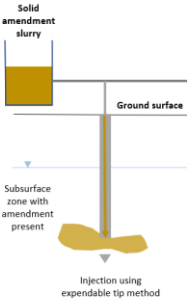
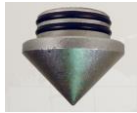
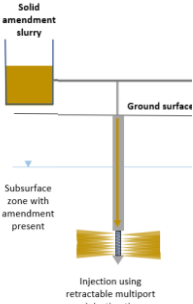
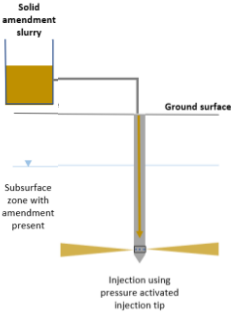


- En forståelse for afværgemål
 - hvad kan lade sig gøre
 - adgangsforhold, minimumskriterie for oprensning, pris
- Overordnet injektionsdesign
- Valg af reaktant
 - Teori/litteraturstudie
 - Flydende eller fast form
 - Laboratorieforsøg (hvad virker og i hvilken dosis)
- Valg af injektionsmetode
 - Injektionsspids
 - Injektionsteknik (top-down, bottom-up)
 - Injektionsplan (i plan og snit)



NIRAS

Valg af injektionsspids og -teknik

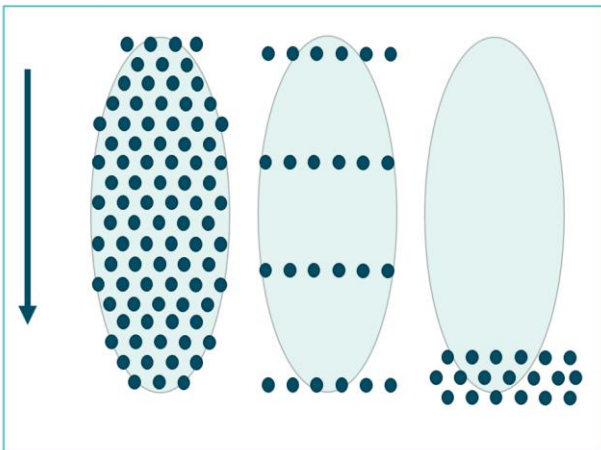
Type			Direction	Pros	Cons
Expendable tip	 The diagram shows a cross-section of the ground with a 'Ground surface' line. A 'Solid amendment slurry' is being injected from the surface into a 'Subsurface zone with amendment present'. The injection is labeled 'Injection using expendable tip method'.	 A close-up photograph of a conical, expendable tip injection nozzle with a blue band near the top.	Bottom-up	• Amendment: mZVI and nZVI • Pressure: low → high	• Risk of downward instead of lateral distribution once injection rod is lifted up
Retractable multiport tip	 The diagram shows a cross-section of the ground with a 'Ground surface' line. A 'Solid amendment slurry' is being injected from the surface into a 'Subsurface zone with amendment present'. The injection is labeled 'Injection using retractable multiport injection tip'.	 A photograph of a long, thin, retractable multiport injection tip with a series of small ports along its length.	Top-down	• Amendment: nZVI • Pressure: High • Choice of different length of exposed ports	• Not suitable for mZVI as guar gum may cause plugging of the nozzles; thus, mZVI may be difficult to inject • Risk of fracking? • Risk of sediment inflow once pressure is released (back flow) • Sediment grains may hinder proper closure of protective cover
Pressure activated injection tip	 The diagram shows a cross-section of the ground with a 'Ground surface' line. A 'Solid amendment slurry' is being injected from the surface into a 'Subsurface zone with amendment present'. The injection is labeled 'Injection using pressure activated injection tip'.	  Two photographs of a pressure activated injection tip. The top photo shows the tip itself, which is a cylindrical device with a conical nozzle. The bottom photo shows the tip being used in a field setting, with a person's hand visible near the nozzle.	Top-down	• Amendment: nZVI and mZVI • Pressure: High	• Guar gum may cause plugging of the nozzles; thus, mZVI may be difficult to inject • Risk of fracking? • Risk of sediment inflow once pressure is released (back flow) • Sediment grains may hinder proper closure of protective cover
Other methods	• Spin-injection • Special injection rods (i.e. conical) • Packers			•	•

Injektionsplan

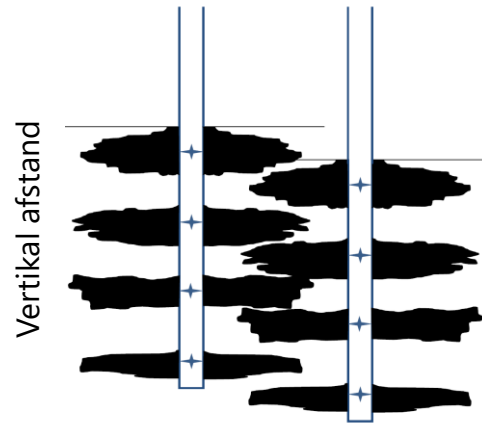
- **Fordelingen af reaktant i jorden er heterogen og kontrolleret af geologi!**
- Pilot-skala test er vigtig i felten for at få et realistisk billede af metodevalg og strategi
→ herunder test af injektionsspids samt injektionstryk/-flow
- Influenradius (ROI) er en parameter, der ofte er svær at bestemme
→ Pilot-skala test
- Evaluering og vurdering af fordeling af reaktanter bør udføres

okt v 40					okt v 41			
3	4	5	6	7	10	11	12	12
mån	tis	ons	tor	fre	mån	tis	ons	tor
NIRAS: Lars + Anders X + Gro SWECO: Pär + 1? NANO IRON: Jan					NIRAS: Lars + Martin SWECO: Ann-Sofie			
nZVI mixing, system and nozzle test	Injection nZVI, 3 points x 3 depths	Probing (EC+OIP+HPT)	Injection nZVI #1	desktop work: ROI evaluation and plan for remaining 4 nZVI injection points	Injection nZVI #2-5	Injection nZVI #2-5	Injection nZVI #2-5	Well installation, 6 wells

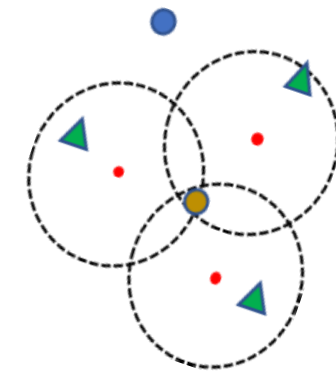
Designs → Afstand mellem injektionspunkter?



Pilot-skala test



Vertikalt forskudt injektion for at sikre overlappende dækning



ROI

Afstand mellem Injektionspunkter!



NIRAS

Metoder til dokumentation af distribution

Flere af disse metoder kan med fordel sammenlignes med baseline målinger

Fysisk

- Injektionstryk og -flow
- Ændring i vandspejl i nærliggende boringer (monitoring m Divers)
- Ændring i terrænfladen (stigning af overfalden, sprækker)
- Daylighting
- Ændring i permeabilitet (HPT log)
- Jord-kerner → direkte analyse af jordprøver (Fe, total; As ...)
- Monitoringsboringer (multilevel eller traditionel) → opstrøms og/eller nedstrøms (hold øje med dannelse af mulige præferentielle strømningsveje)
- Fiber optisk og reflektrometer for at se injektionstryk i jorden → monitorering af trykbølger ("seismisk aktivitet")

Elektrisk

- EC (kontinuer log) → specielt brugbart, hvis der tilsættes en salt tracer til injektionsblandingen
- Magnetic susceptibility → jord-kerner (tørres, hvorefter der anvendes magnetisk separation) eller direkte i boringer
- NMR (Nuclear Magnetic Resonance) → log i boringer eller på jord-kerner
- DCIP → Mellem boringer og/eller på terræn

Kemisk

- Vandprøver – direkte analyser; fx H_2 (dissolved), Fe^{2+} , As, Cr, TOC, bærevæske
- Vandprøver – feltparametre: pH, EC, DO, redox
- Niveauspecifik vandprøve (vertical) → GWP (0,1 m), SP16 (1 m)
- Farvestof (tracer) → fx fluorescerende: fluorescein, eosine, rhodamin WT, sulfo-rhodamine B
- Ledningsevne (tracer) → K_2HPO_4 (DKP), KH_2PO_4 (MKP), NaCl, KBr → OBS ifht nZVI (kan blive udfældet, då salt ændrer blandingens evne til at holde nZVI i suspension)
- EC (kontinuer log) → hvis der er tilsat salt som tracer
- Temperatur (Injektant mixet med varmt vand, fx 60 °C?) → hvordan vil det påvirke injektat og geokemi?

Lys (optisk eller induceret)

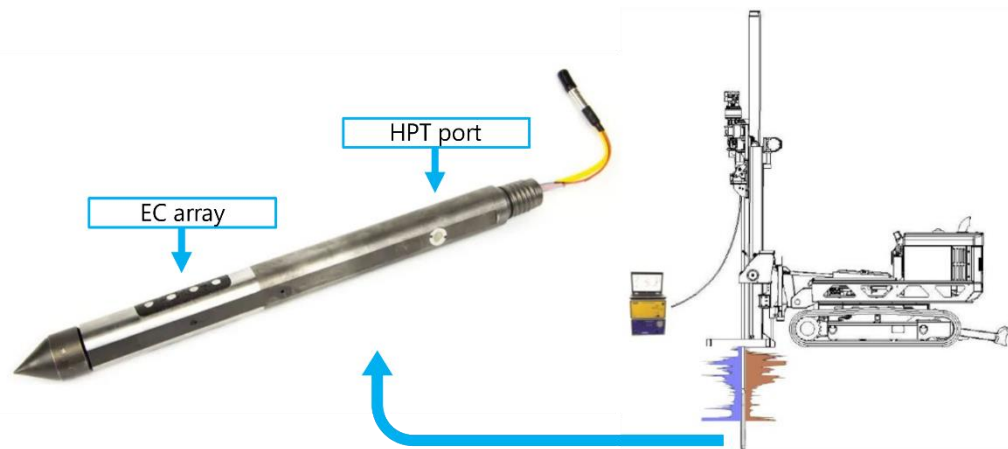
- OIP, LIF (fluorescens)
- Optisk log (OIP VIS)
- Dye OIP
- XRF probe → afhænger af baggrundskoncentrationer

Dokumentation af distribution af reaktanter

Udvalgte real-time metoder

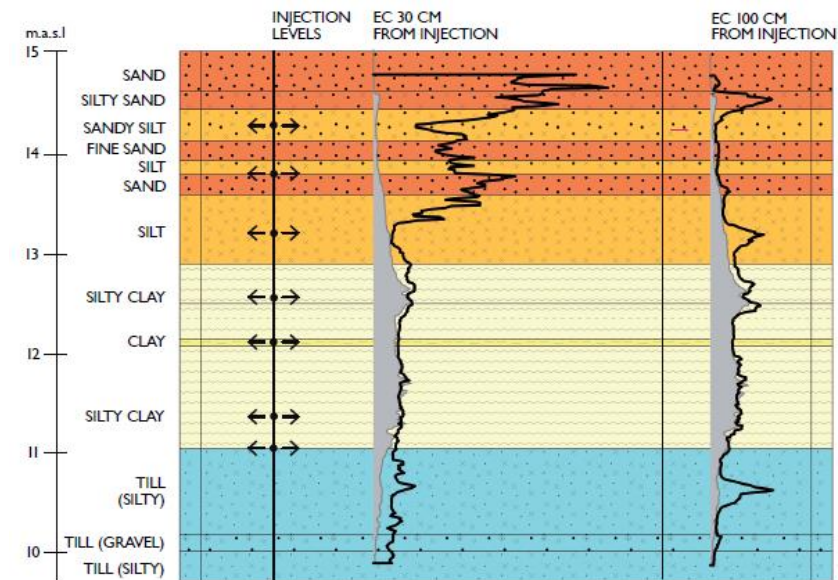
HPT (Hydraulic Profiling Tool)

- Viden om jordens hydrauliske egenskaber in-situ
- HPT tryk: det tryk, der er nødvendigt for at opretholde en konstant strømning af vand ud i formationen
 - Lavt tryk = højpermeabel (sandet)
 - Højt tryk = lavpermeabel (leret)
- Injektion kan ændre jordens permeabilitet i de horisonter, hvor der er injiceret reaktant (afhænger af formation og mængde injiceret)



EC (kontinuert log)

- Formationens tilsyneladende elektriske ledningsevne er relateret til både det geologiske materiales og porevandets elektriske ledningsevne
- Ledningsevne sonden består af en dipol konfiguration med sampling af ca 1 pkt/cm og en vertikal opløsning på ca 5 cm pga elektrodekonfigurationen
- Ledningsevne sonde målinger er relativt hurtige at udføre og resultatet kan vurderes løbende i felten

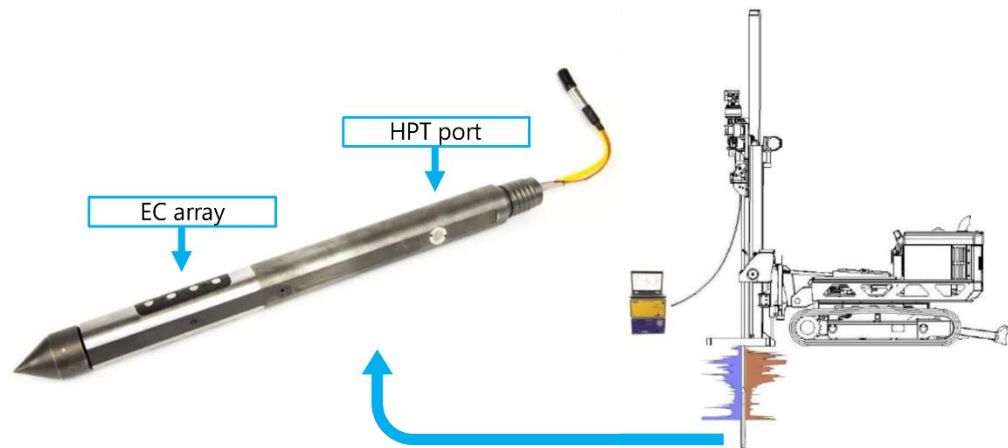


Dokumentation af distribution af reaktanter

Udvalgte real-time metoder

Tracer

- Brug af tracere gør det muligt hurtigt at vurdere distribution af reaktant ved injektion → fx farve eller salt
- Værdifuld viden inden man påbegynder in-situ oprensning af større områder
- Farvestof → fluorescerende eller hæmmende → detektion med **OIP**
- Salt (fx K_2HPO_4 (DKP), KH_2PO_4 (MKP), NaCl, KBr) → booster ledningsevnen → detektion med **EC**



Typiske elektriske ledningsevne-værdier (jord/vand)

Baggrundsniveau

- Ferskvand ~ 50 mS/m
- Brakvand ~ 100 mS/m
- Havvand ~ 3000 mS/m
- Vandmættet jord < 100 mS/m
- Umættet jord (fx. Tørt sand) < 5-10 mS/m

Opløsning af ion-tracere

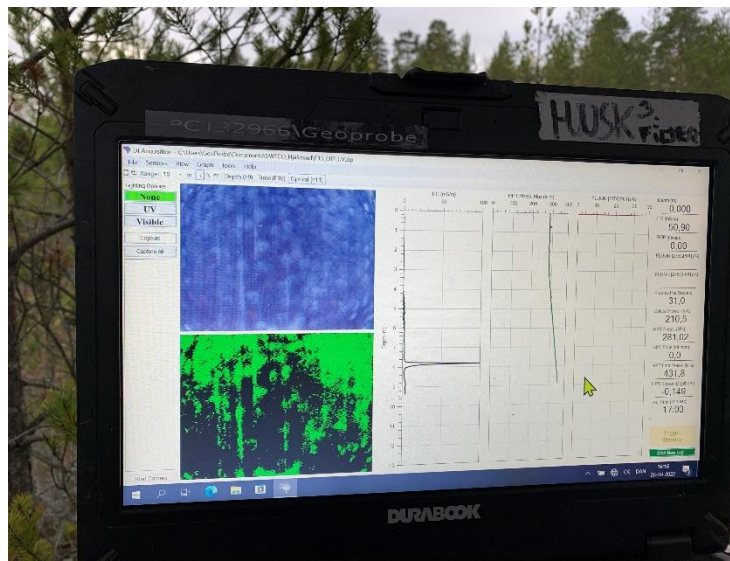
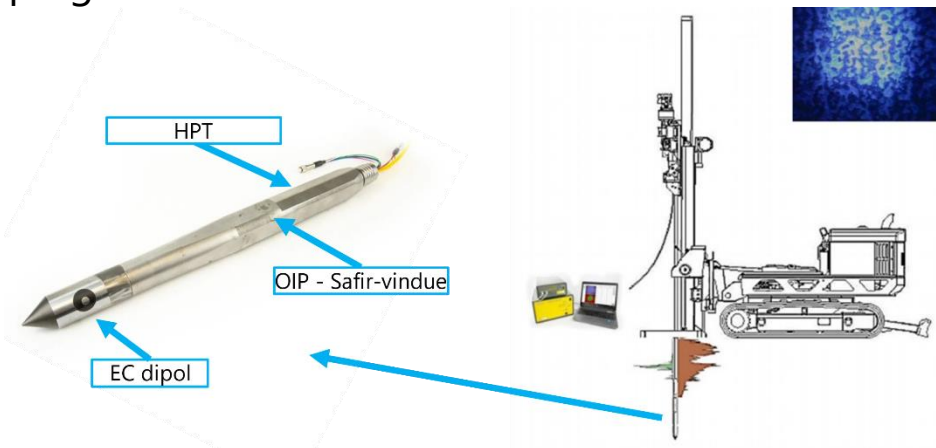
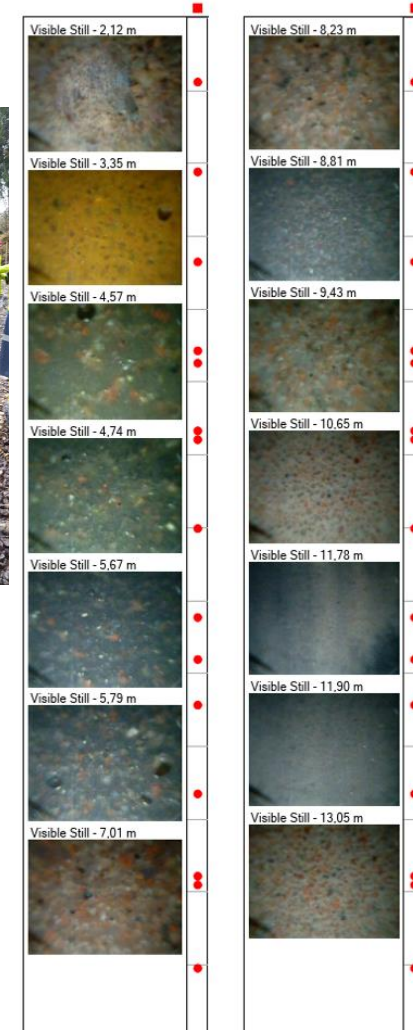
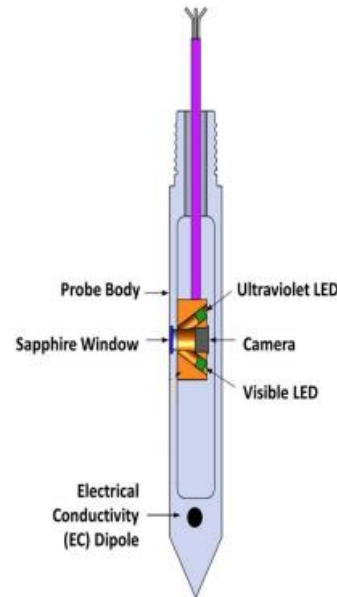
- Natriumklorid (NaCl)
 - 5 g/l (~ 0,5%) = 500 mS/m
 - *Kan inhibere biologiske processer*
- Kaliumhydrogenfosfat (K_2HPO_4 , KH_2PO_4)
 - 50 g/l (~ 5%) = 1500 mS/m
 - 100 g/l (~ 10%) = 2900 mS/m
 - *kan stimulere biologiske processer*

Dokumentation af distribution af reaktanter

Udvalgte real-time metoder

OIP (Optical Image Profiler)

- To forskellige prober
 - UV (275 nm)/VIS → fx benzin, LNAPL, geologi, tracer
 - Green (520 nm)/IR → fx kreosot, råolie, tracer
- Kamera: 30 billeder pr sekund!
 - Logger billeder pr 1,5 cm
 - Ved rør-forlængelse optages billeder med begge typer lys (dette kan også gøres manuelt i løbet af sonderingen)
- Optagelserne ses i 'real-time' i felten



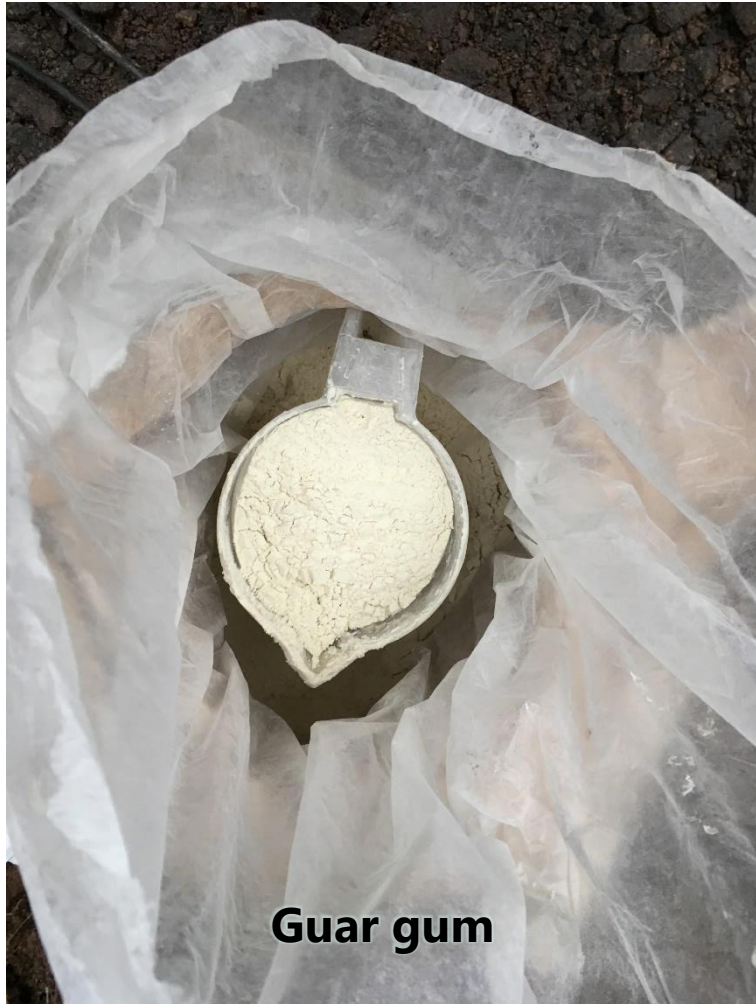
Eksempler fra felten

→ Vurdering af influensradius (ROI)



Injektion af μ ZVI

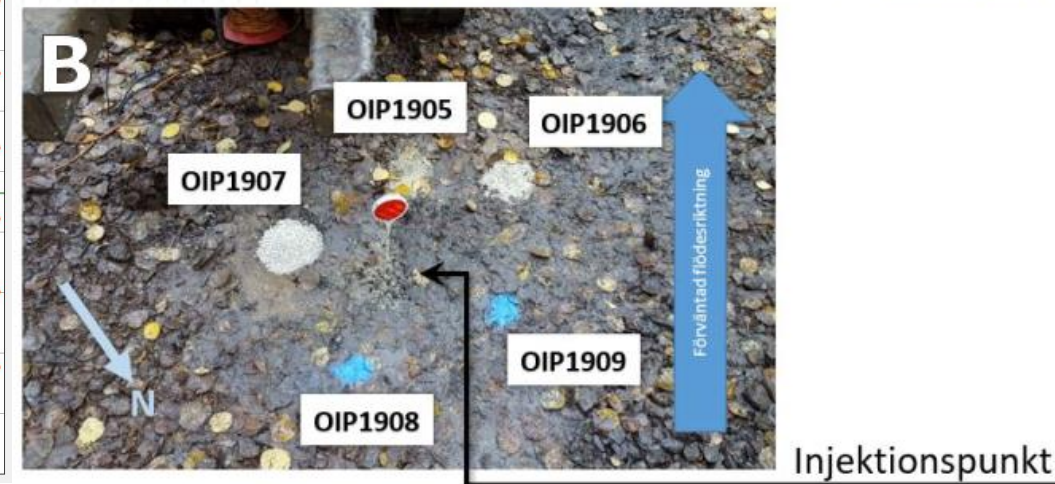
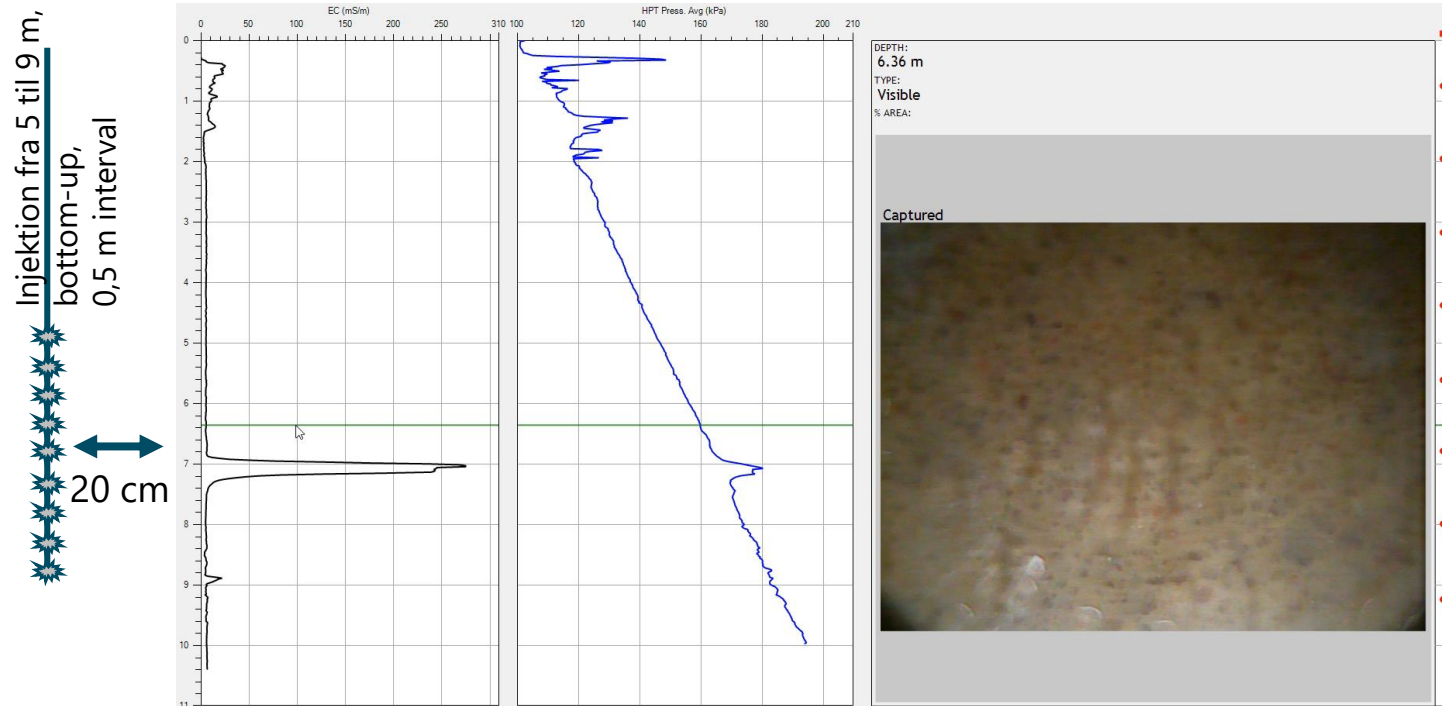
Pilot skala: PRB mod chlorerede opløsningsmidler



Injektion af μ ZVI

Pilot skala: PRB mod chlorerede opløsningsmidler

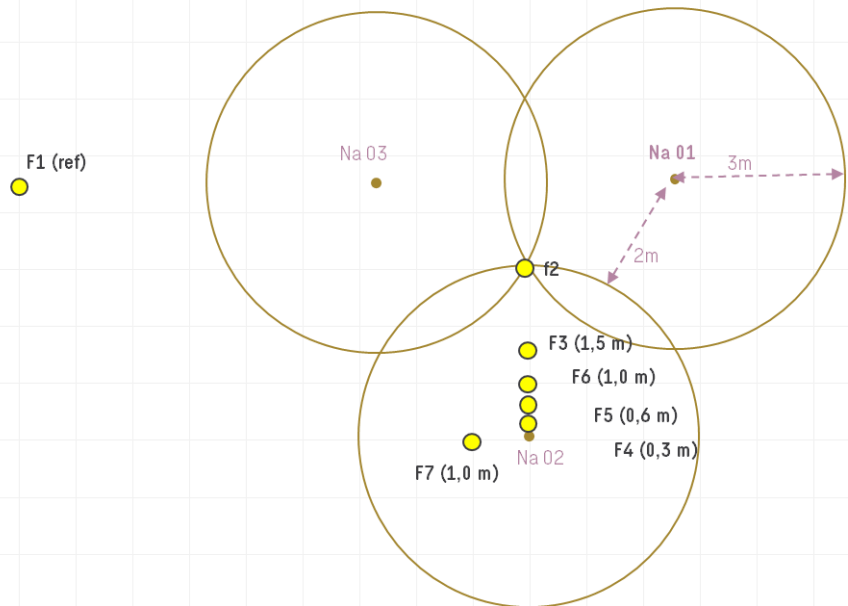
- Sandet formation med koncentrationer op til 5 mg/l
- Injektion (bottom-up) fra 9 til 2 m u.t.



Injektion af nZVI

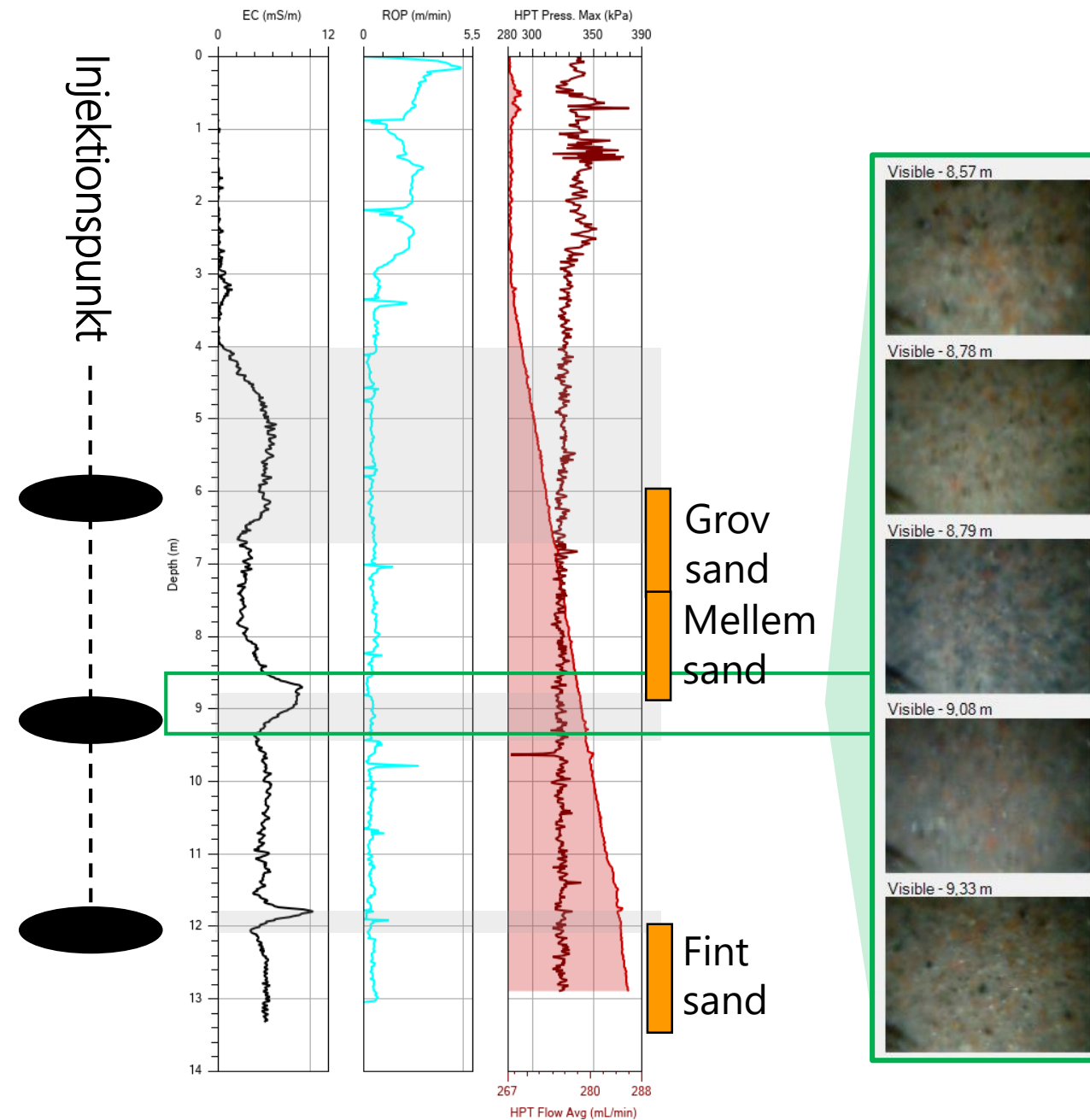
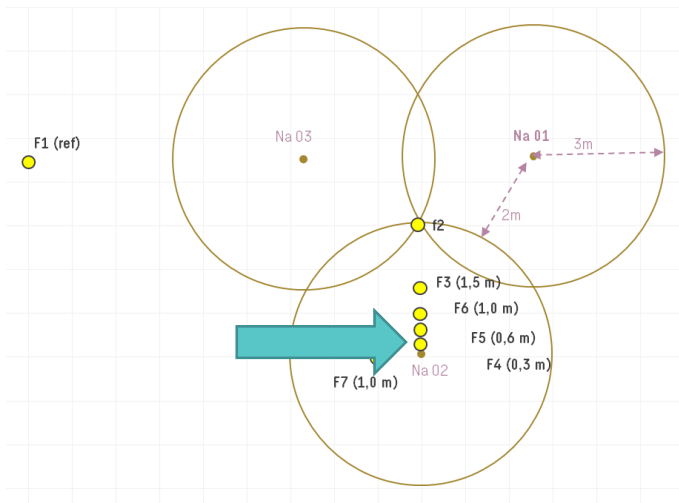
Pilot skala: test af reaktanter på arsen (nZVI vs μ ZVI)

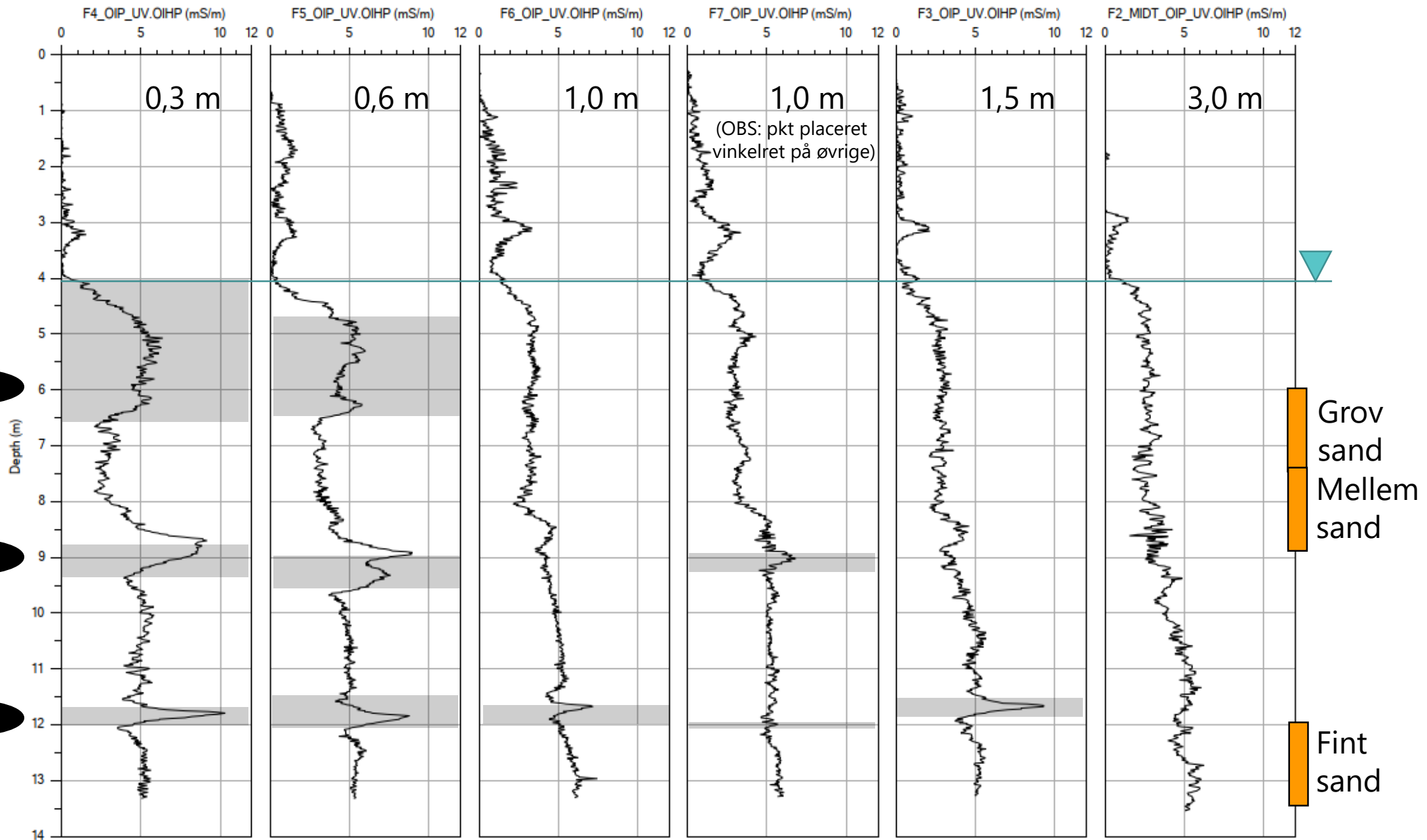
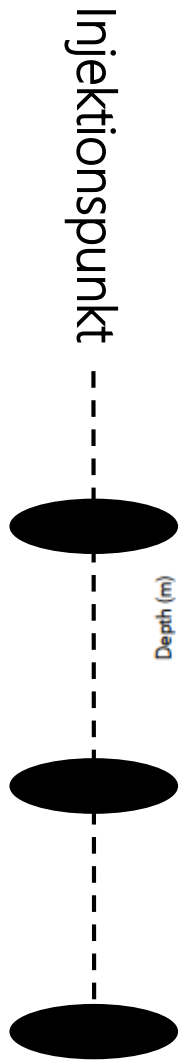
- Sandet formation forurennet med arsen (As)
→ fluvial aflejring, der bliver mere finkornet nedefter (dvs ændring i permeabilitet)
- Test af influensradius (ikke injektion over fuld dybde)



Injektion af nZVI

F04 (0,3 m)





EC

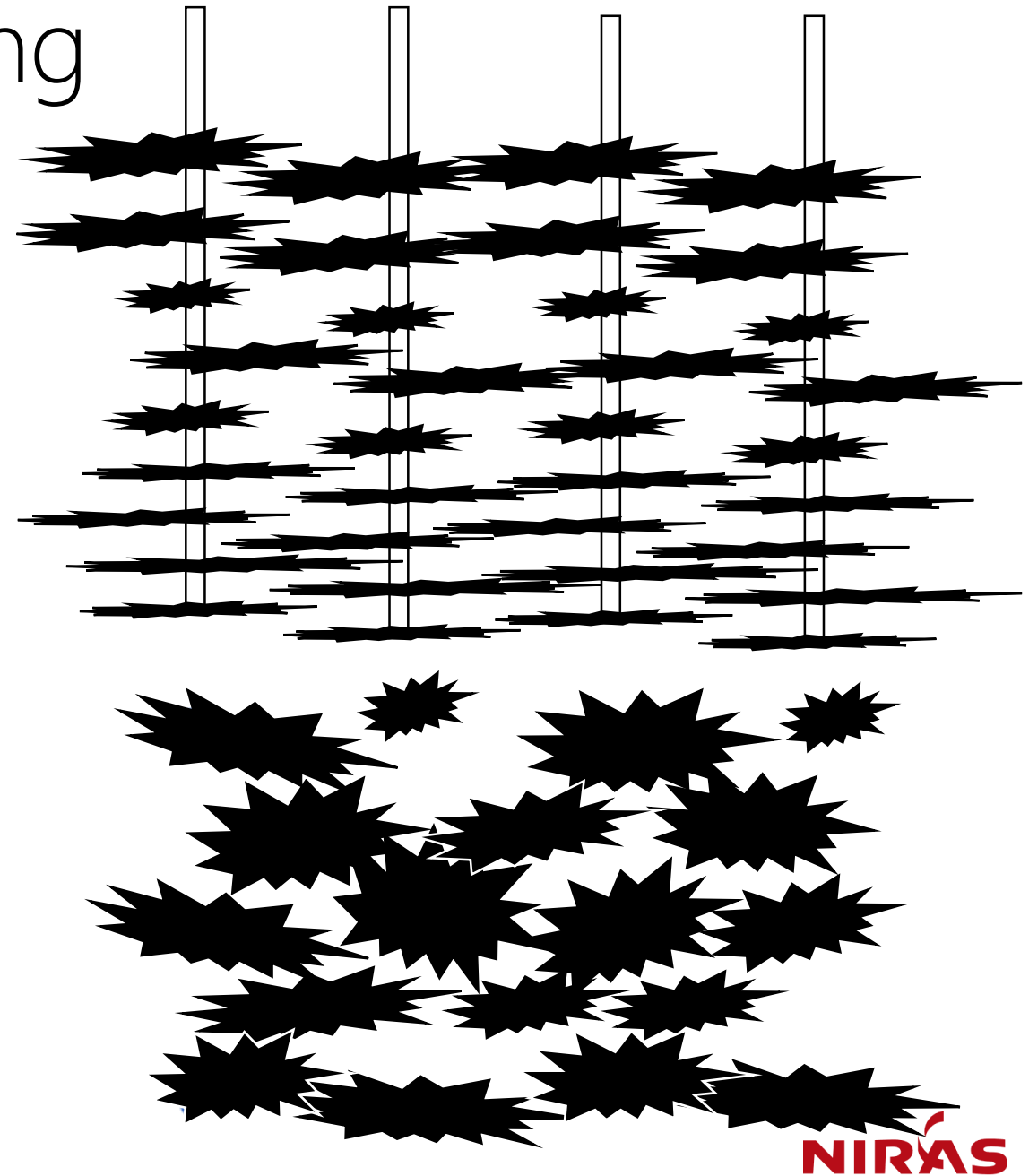
Company:	NIRAS	Operator:	LPH
Project ID:	Hj?ltevad	Client:	SWECO AB

F4_OIP_UV.OIHP	05-10-2022	F7_OIP_UV.OIHP	05-10-2022
F5_OIP_UV.OIHP	05-10-2022	F3_OIP_UV.OIHP	05-10-2022
F6_OIP_UV.OIHP	05-10-2022	F2_MIDT_OIP_UV.OIHP	05-10-2022

Refleksioner ifht opskalering

Fra Pilot-skala test til fuldskala afværge

- Test skala → 1-3 sonderinger, hvor distributionen af reaktanter vurderes
- Ofte ujævn fordeling af reaktant over dybden (Pilot-skala test)
- Monitering af effektivitet over længere periode
- Tillad tid til evaluering af injektionstest og dermed optimering af injektionsdesign
- Øget robusthed ved opskalering
 - Øget injektionstæthed
 - Rumlig forskydning vertikalt og horisontalt
 - Injektant-blandings sammensætning (dosering i de enkelte niveauer)
 - Udstyr for at optimere injektionsprocessen (valg af injektionsspids, -tryk, -flow)
 - Injektionsretning (top-down, bottom-up)



Take home messages

- Konceptuel model
 - Forståelse af *lokalitetens* geologiske og hydrogeologiske forhold
 - Forståelse af variation i hydrauliske egenskaber og kobling til forurening inden for indsatsområdet
- Optimering af injektion
 - *Pilot-skala test på lokalitet for at vurdere:*
 - Hvordan reagerer geologien i praksis?
 - Hvor er de svage punkter?
 - Injektionspunkternes placering skal optimeres ud fra realistisk influensradius
- Robusthed ved opskalering
 - Optimering baseret på pilot-skala resultaterne
 - Opnår viden om, hvor der skal indbygges mere robusthed i fuldskala design
- **Forvent uforudsigelighed**





Tak for opmærksomheden

Gro Lilbæk –  grli@niras.dk