

Sammenhæng mellem
reduktion af masseflux i grundvandet og
reduktion af massefjernelse
i forbindelse med in-situ oprensning af
kildeområde med kulbrinter (LNAPL)

Søren Rygaard Lenschow NIRAS

6. MARTS 2018

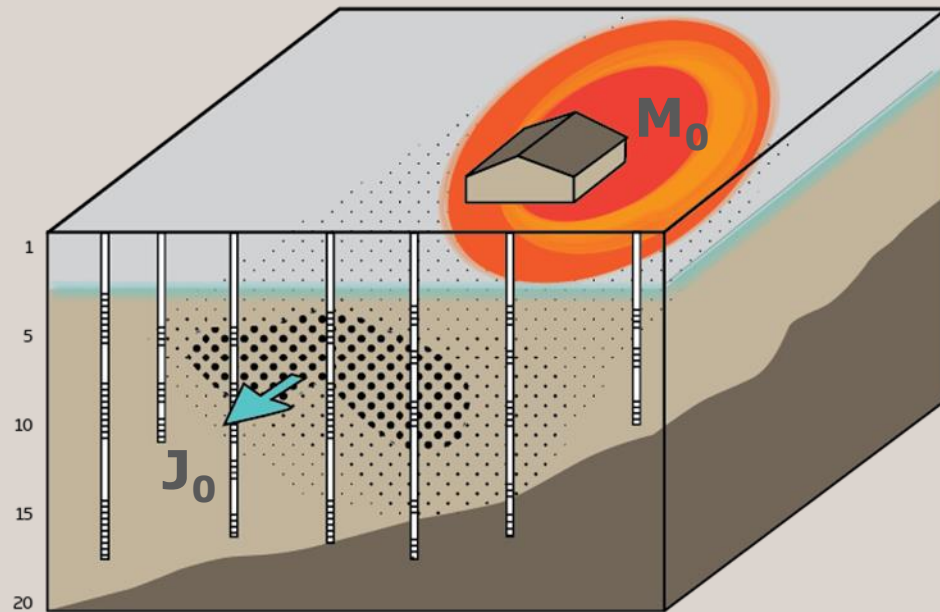
Dagsorden

- Problemstilling
- Baggrund
- Oprensning og reduktion af masse i kildeområde
- Bestemmelse af masseflux
- Resultater
- Sammenfatning og konklusion

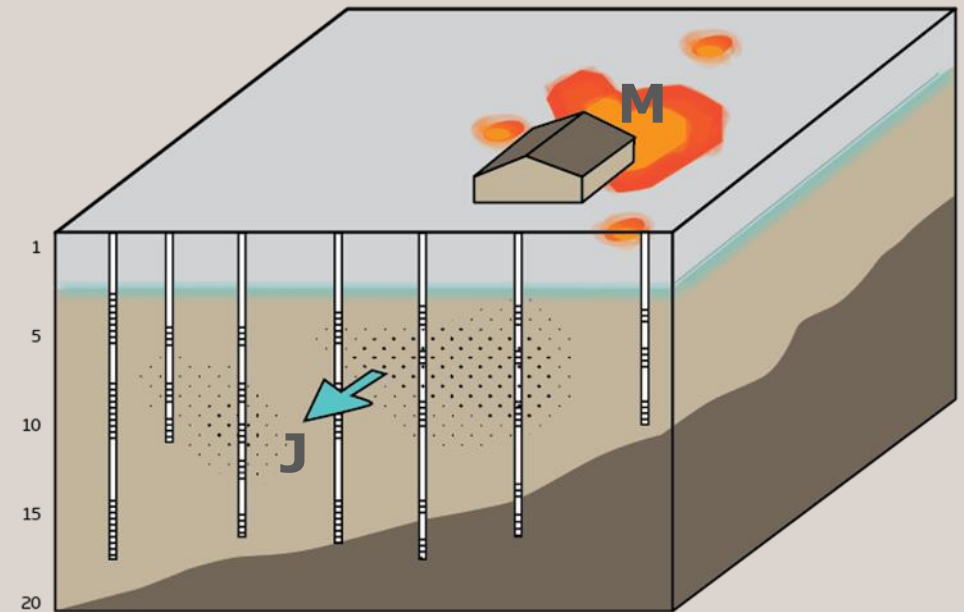
Vurdering af effekt af oprensning

Sammenhæng mellem kildeområde og masseflux til fane

Før oprensning



Efter oprensning



Sammenhæng mellem kildeområde og fane

Gamma model

Sammenhængen mellem reduktion af den relative flux og reduktion af den relative masse kan udtrykkes ved Γ -modellen (Falta et al. 2005):

$$J_t/J_0 = (M_t/M_0)^\Gamma$$

Hvor J_t : Masseflux ved tiden t

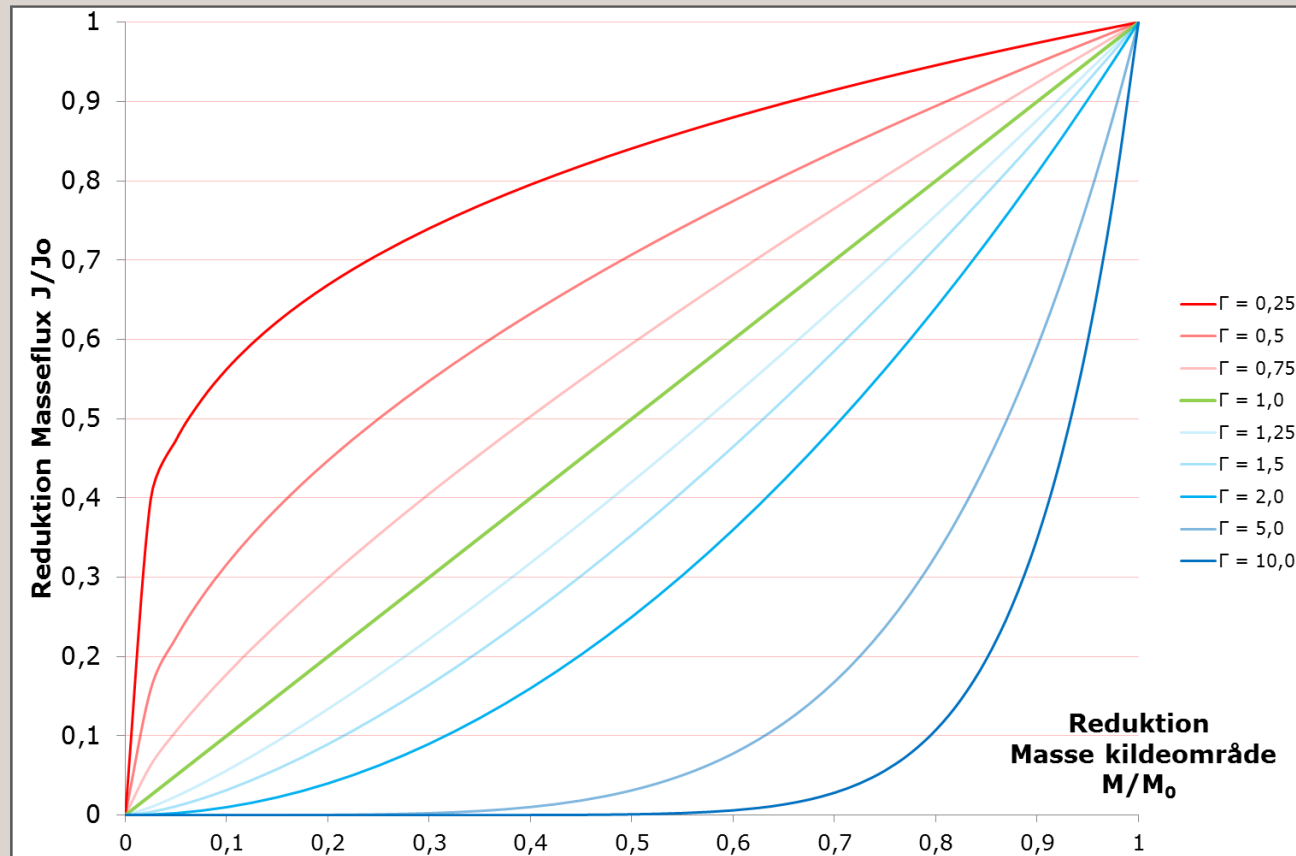
J_0 : Masseflux før oprensning

M_t : Forureningsmasse (NAPL) i kilde til tiden t

M_0 : Forureningsmasse (NAPL) i kilde før oprensning

Γ : Empirisk faktor, som varierer med forskellige typer af forurening og geologi

Sammenhæng Γ -funktion



Miljøprojekt nr. 1479
Miljøstyrelsen, 2013

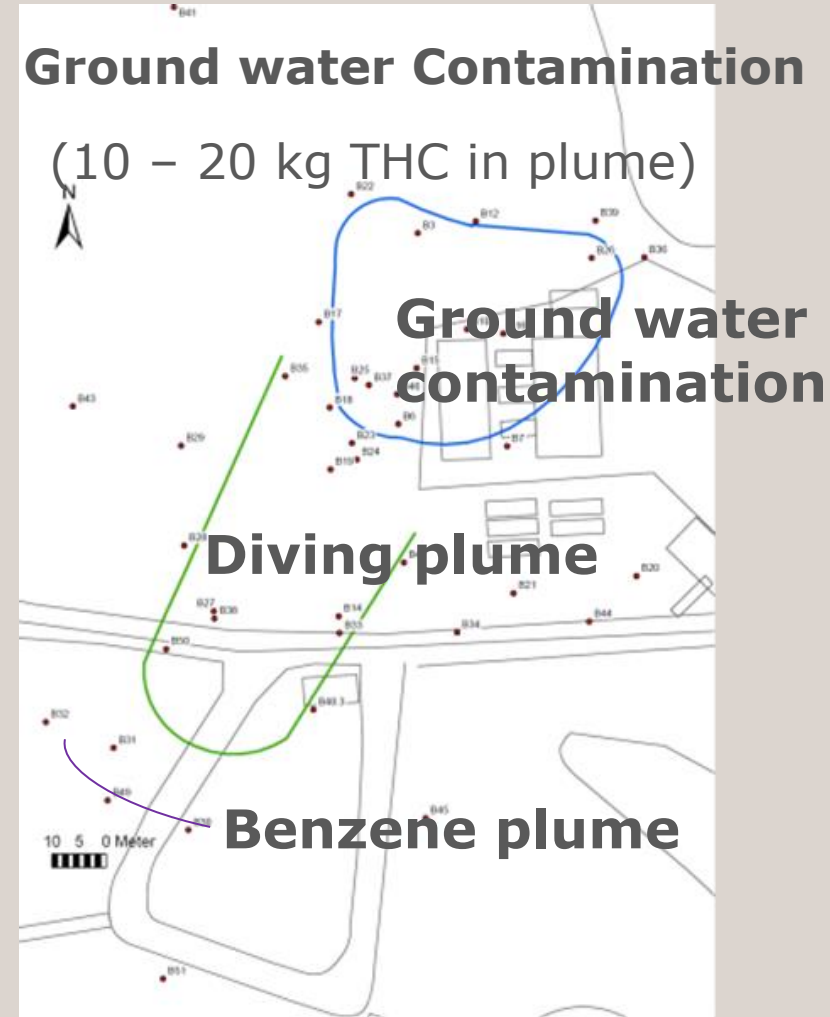
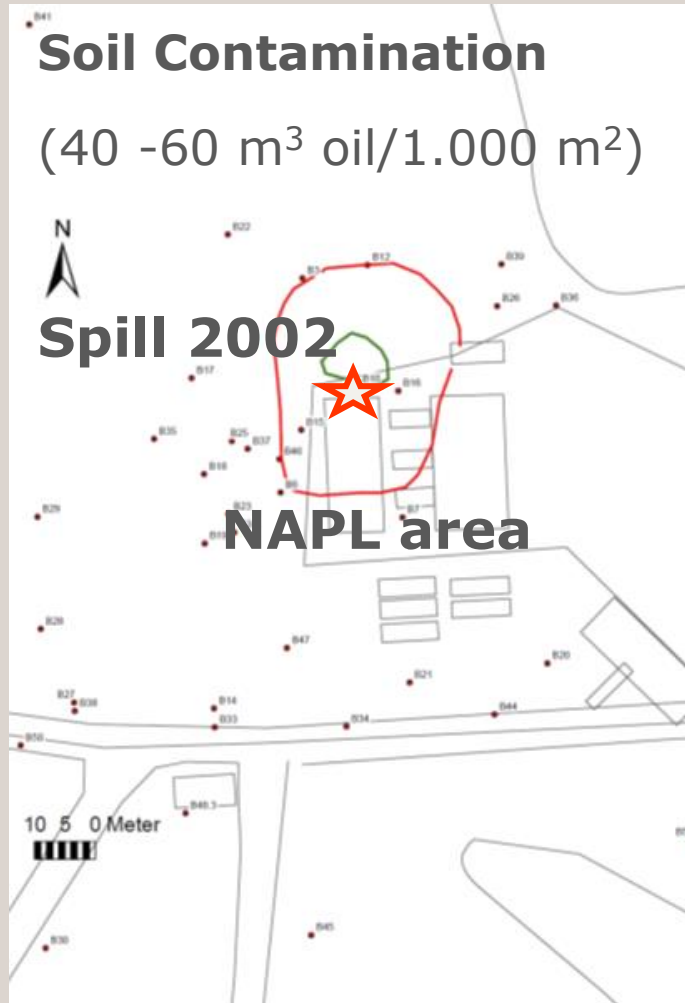


- Litteraturstudier viser, at Γ varierer fra 0,5-2,0 for DNALP-lokaliteter
- For sandede lokaliteter er $\Gamma < 1$, og $M/M_0 > 0,9$ for at få en væsentlig reduktion i masseflux
- Der foreligger ingen erfaringsdata for LNAPL lokaliteter (blandingsforureninger)

LNAPL primarily in a sandy aquifer

Forureningsssituation før oprensning

Spild 2002 - Jet Fuel A1



2002-2005: Removal of 25 m³ LNAPL

Mål og forventninger

Frivillig oprensning

| Område/parametre | Mål | Overvejende forventning til konc. | Forventet maksimal konc. | Tidshorizont |
|--------------------|--|--|--|--|
| Kildeområde | | | | |
| Jord | Reduktion af kildestyrke med minimum 1-2 størrelsesorden (90 – 99 %) | Kulbrinter: 50 – 500 mg/kg Lavt indhold af BTEX | Kulbrinter: 2.500 mg/kg Moderate konc. af BTEX, lavt indhold af benzen | Kort sigt 0,5 - 1 år |
| Grundvand | Reduktion af koncentrationsniveau med minimum 1 størrelsesorden (90 %) | Kulbrinter: 50 – 2.000 µg/l Lave indhold af BTEX primært benzen | Kulbrinter 5.000 µg/l Moderate – høje konc. af BTEX | Kort sigt 0,5 – 1,0 år Yderligere forbedring inden for nogle år |
| Flux | Reduktion af flux med minimum 1 størrelsesorden (90 %) | Kulbrinter reduceres fra 15 kg/år til 1,5 kg/år* | | Kort sigt 0,5 – 1,0 år Yderligere forbedring inden for nogle år |
| Faneområde | | | | |
| Grundvand | Reduktion i flux fra kildeområde med minimum 1 størrelsesorden (90 %) | Kulbrinter: 1-25 µ/l Lavt indhold af BTEX. Benzen på ca. 1 µg/l | Kulbrinter 200-500 µg/l Indhold af BTEX over kriterier – benzen dog mindre overskridelse | Mellemlang sigt 5 år |



Kildeområde :

Jord:

- Reduktion af kildestyrke med minimum 1-2 OOM (90 – 99 %)
- Reduktion af koncentrationsniveau med minimum 1 OOM (90 %)

Fane:

- Reduktion af masseflux fra kildeområde med minimum 1 OOM (90 %)
- Tilbagetrækning/reduktion af fane på sigt

OOM = Orders
Of Magnitude

”det må dog forventes, at der for mindre delområder stedvis findes højere koncentration end de i tabellen ovenfor beskrevne forventninger til reduktioner af oliekoncentration i jord og grundvand”

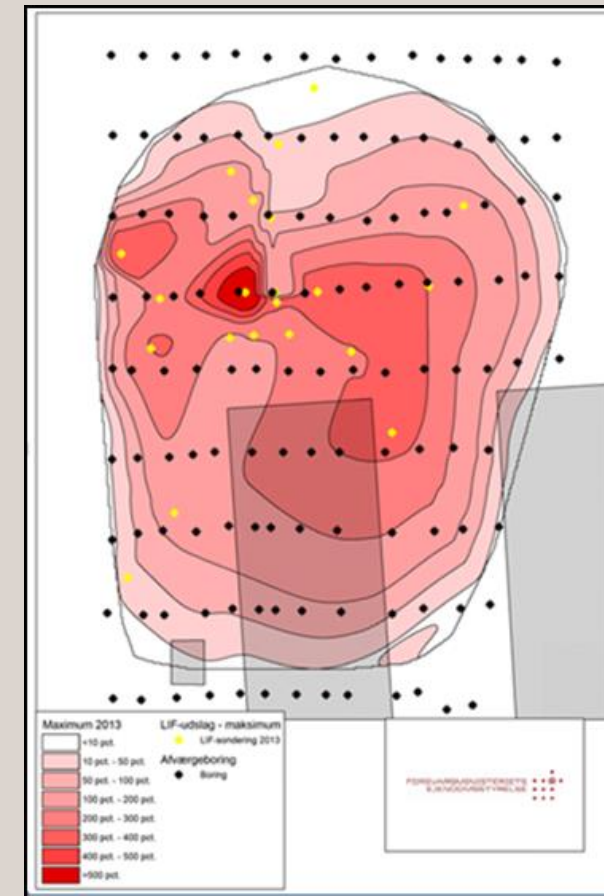
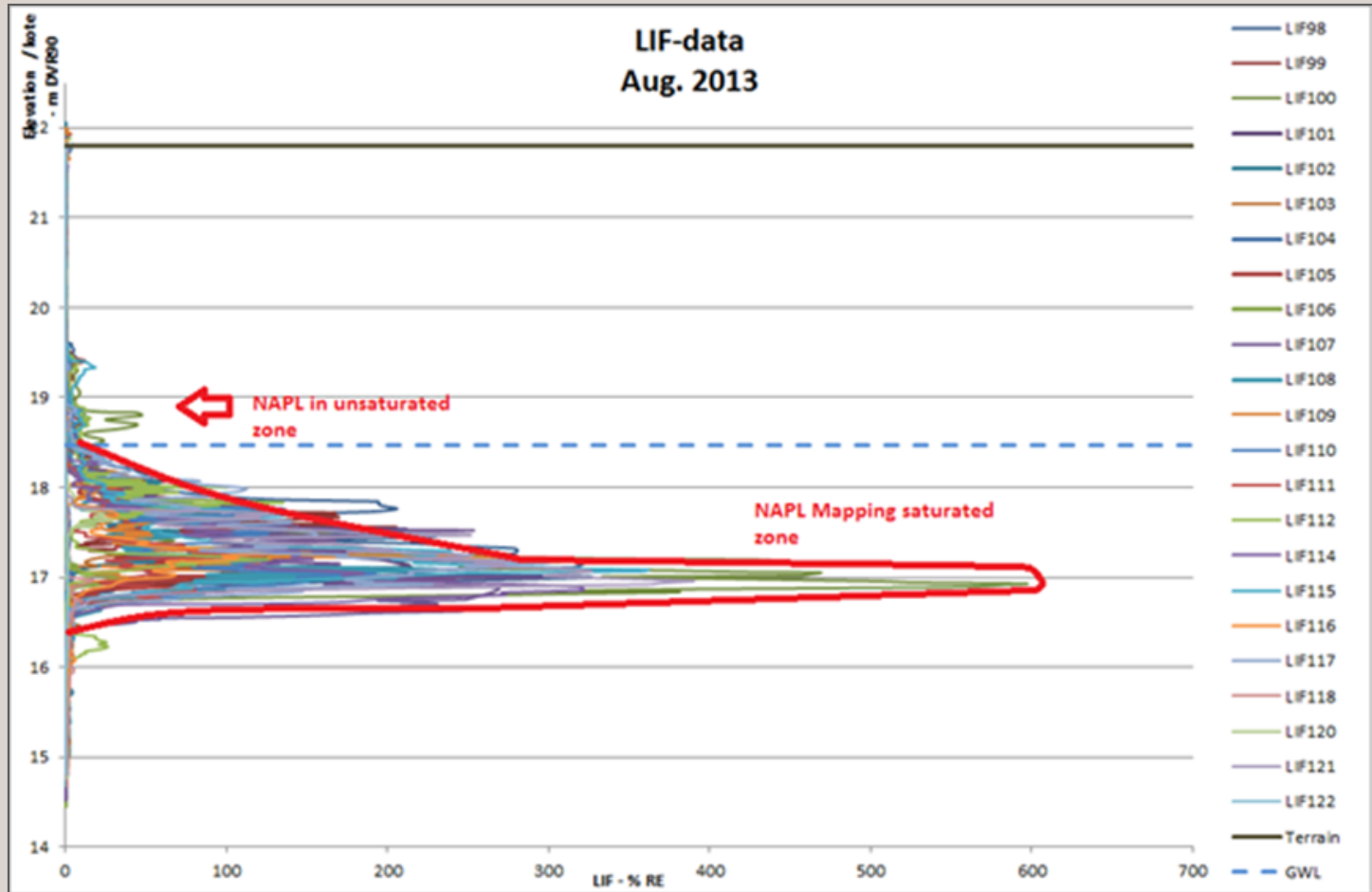
Forureningsssituation

Kortlægning af oliemætning, udført 2013

High Resolution Methods

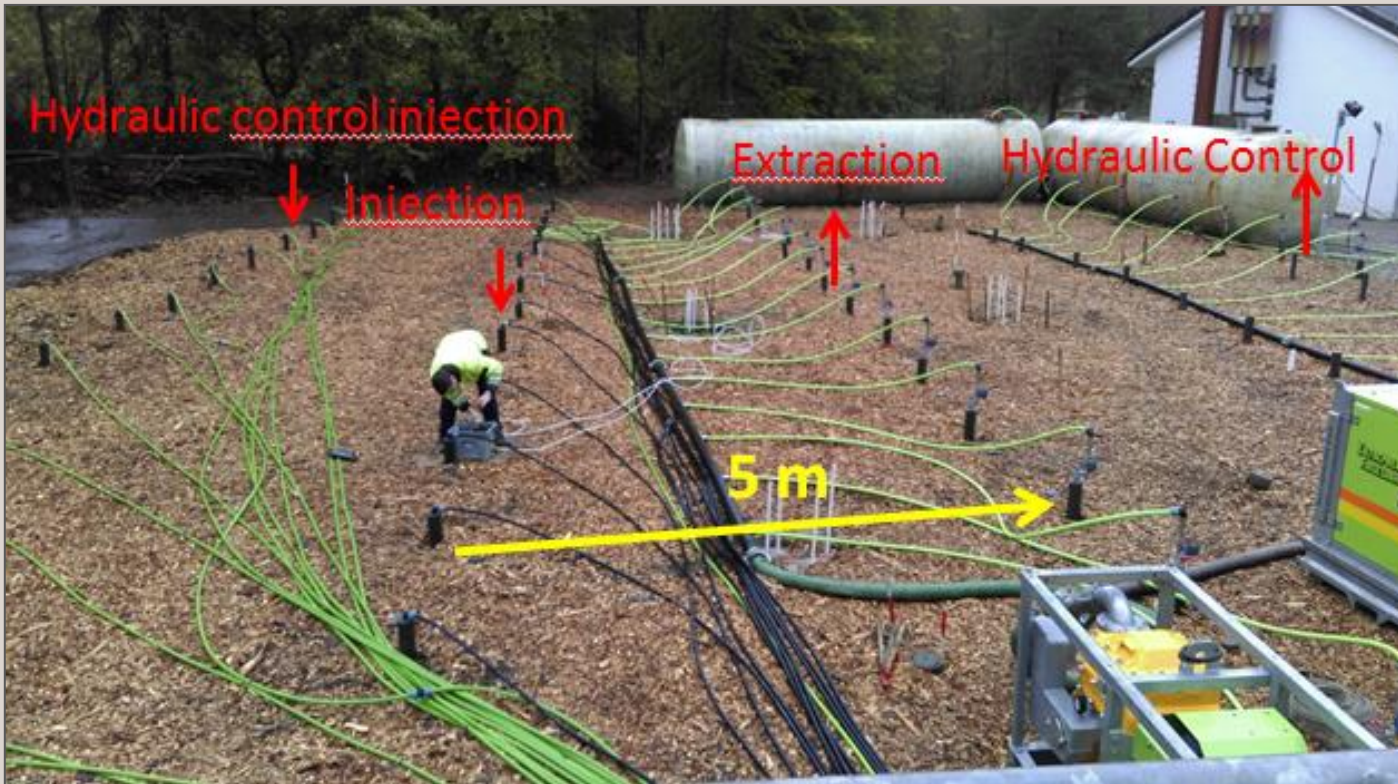
- LIF / UVOST

Oliemætning før oprensning:



Oprensning af kildeområde 2015-2017

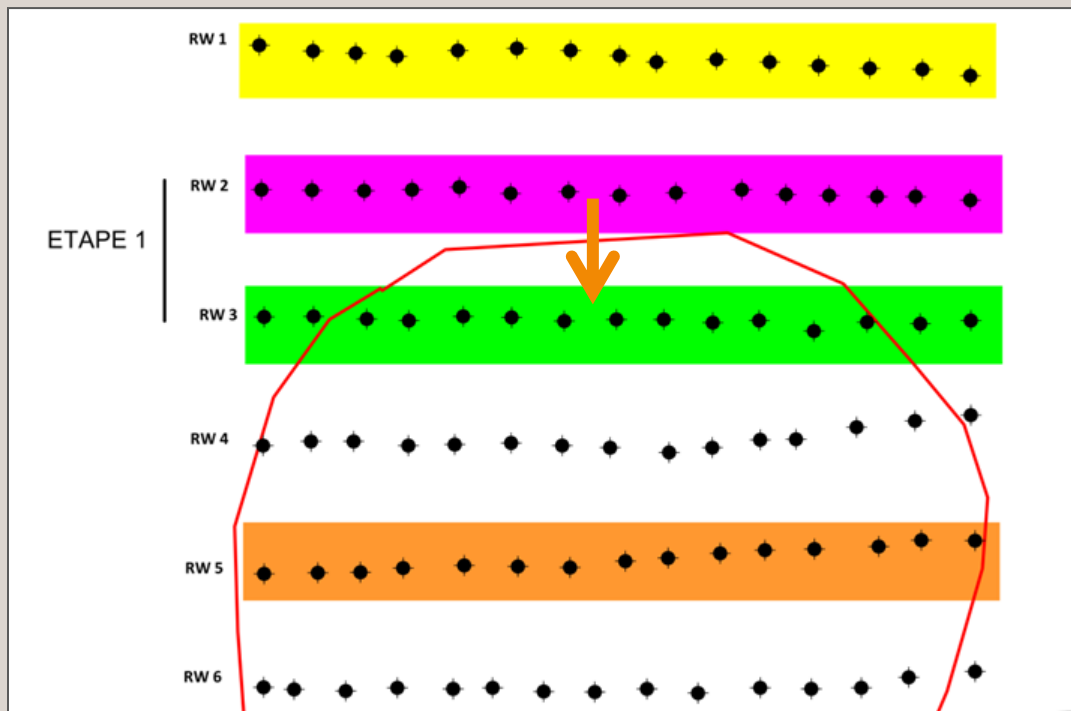
Mobilisering af NAPL med anioniske surfactanter og salt



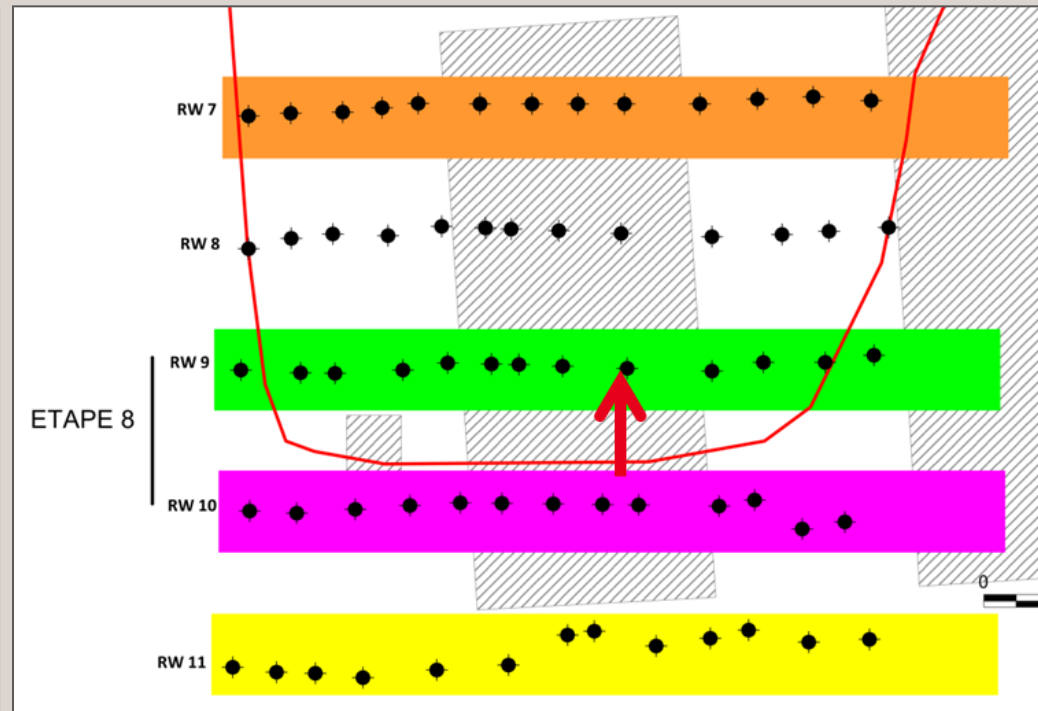
Boringskonfiguration

Gennemført ved 8 etaper á 2 ugers varighed

Etape 1-7

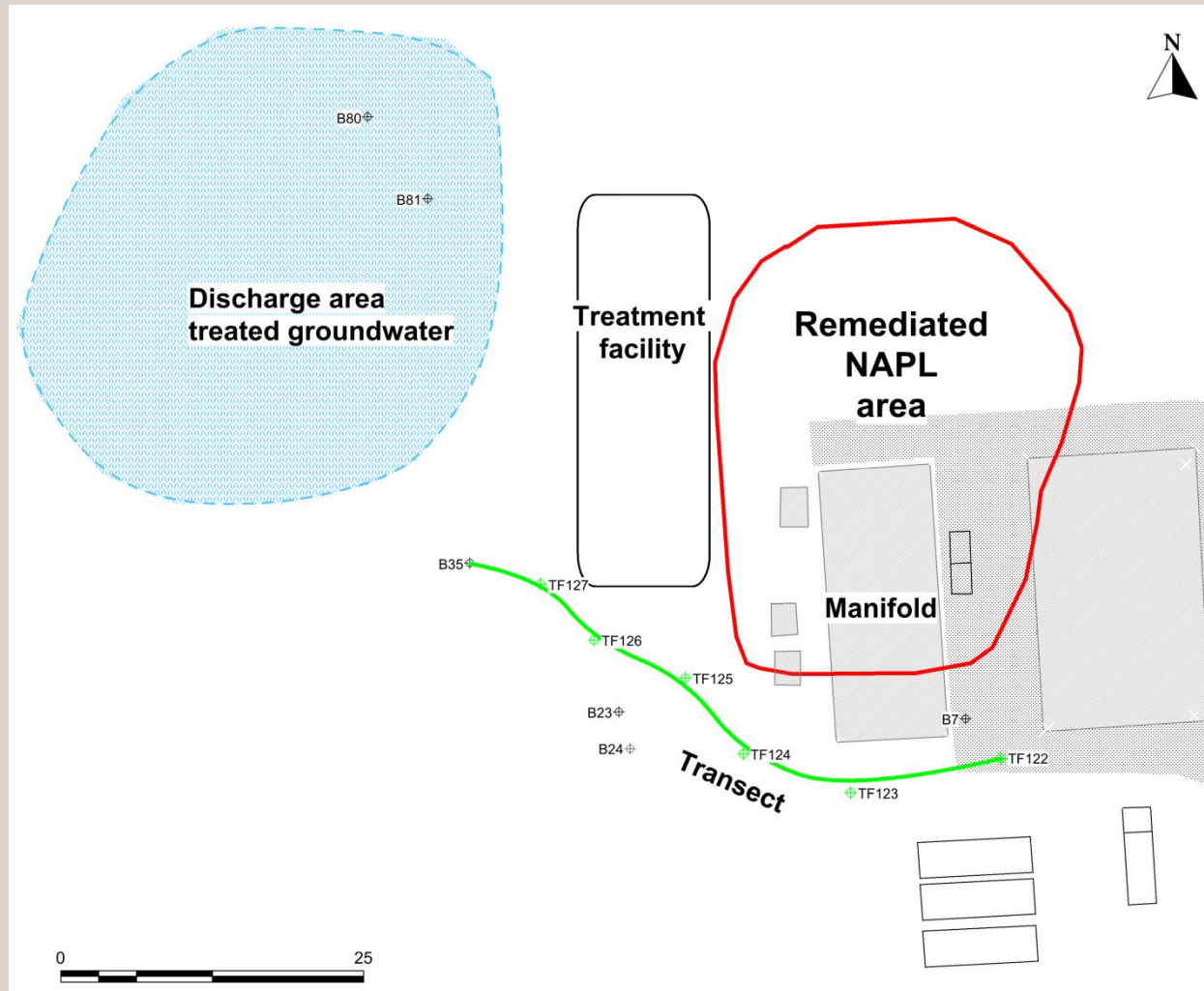


Etape 8



| Signatur | |
|----------|--|
| ◆ | Afværgeboring |
| — | Kildeområde |
| ■ | Hydraulisk kontrol, injektion |
| ■ | Injektion, surfactanter, salt og alkohol |
| ■ | Ekstraktion, fri fase, mikroemulsion |
| ■ | Hydraulisk kontrol, ekstraktion |

Oversigtskort

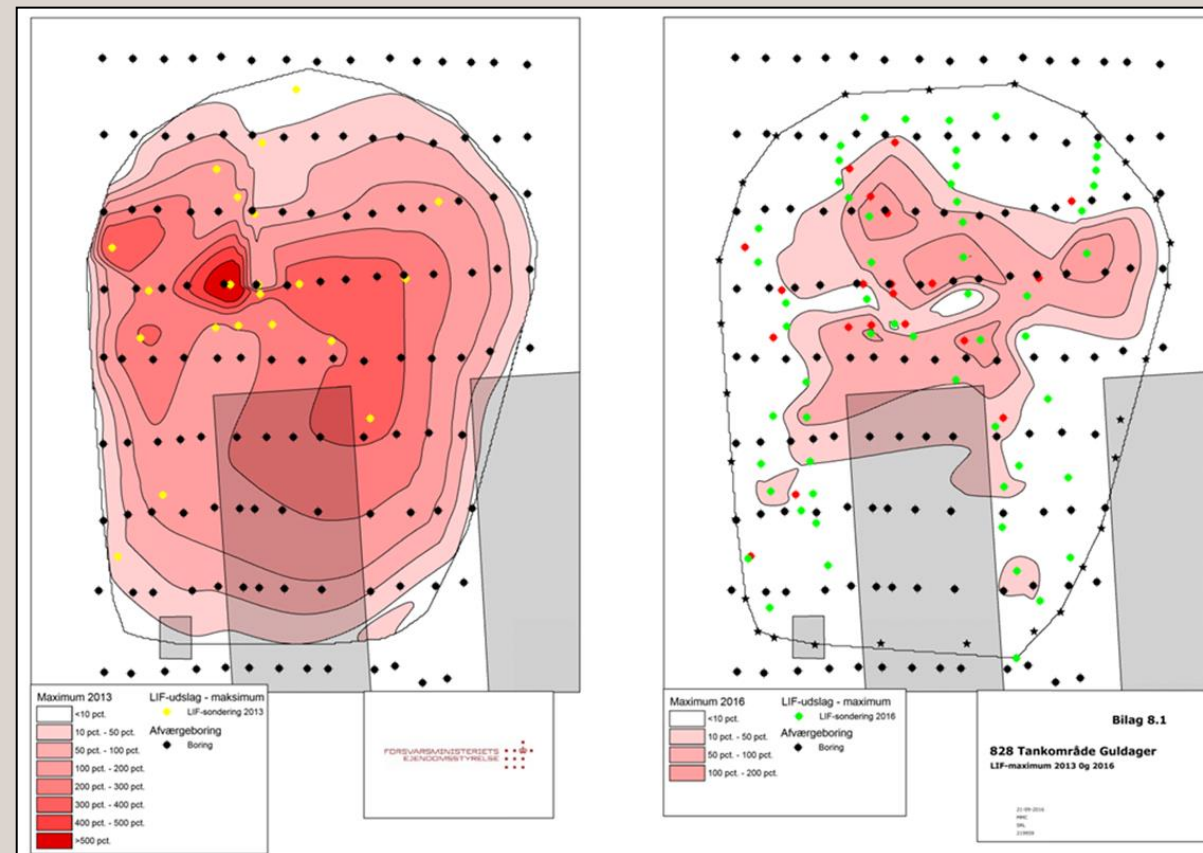
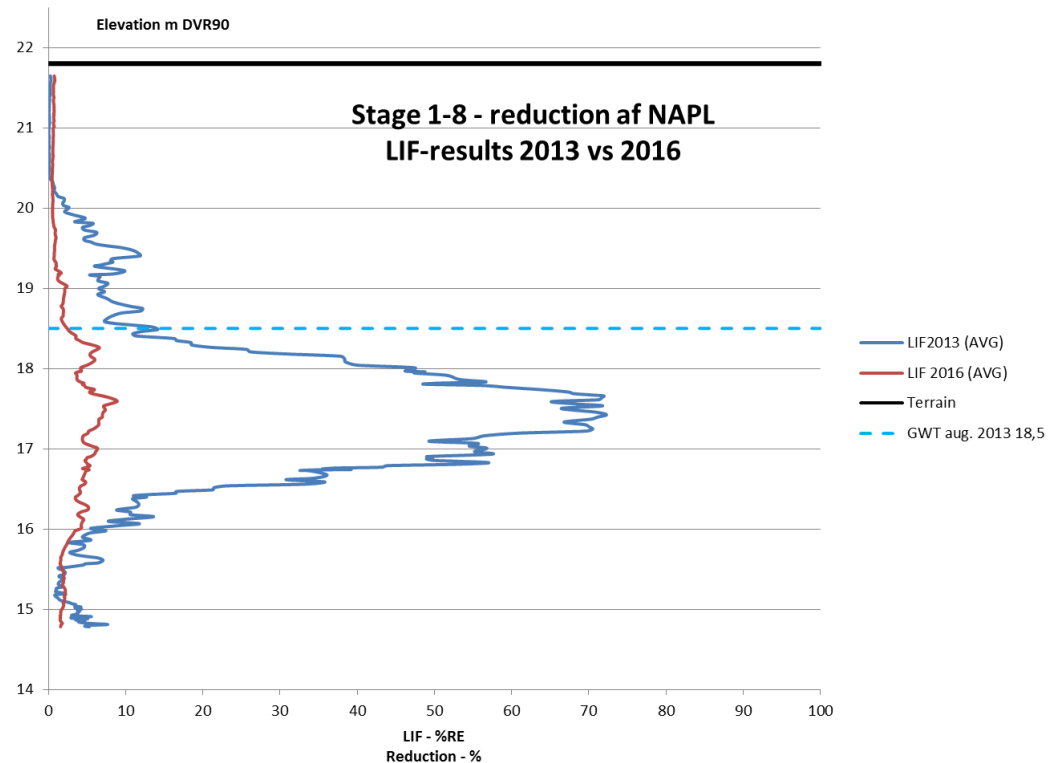


- On-Site vandbehandling:
 - Olieudskiller
 - Stripning/nedbrydning
 - Sandfiltrering
 - Kulfiltrering
- Udledning af overskydende vand i lavning vest for kildeområde
- Problemer med renseseffekt for kulfiltre (gennembrud kulbrinter)
- Både udledning og reinjektion af delvis forurenset grundvand
- Udbygning af vandrensning
 - Basisk hydrolyse

Massefjernelse

Før og efter oprensning

Reduktion oliemætning



**Massebalance fra afværgede: 32.794 kg
(ca. 40 m³) kulbrinter – heraf ca. 93 %
fjernet ved mobilisering (NAPL), mens
opløste komponenter udgør ca. 7 %.**

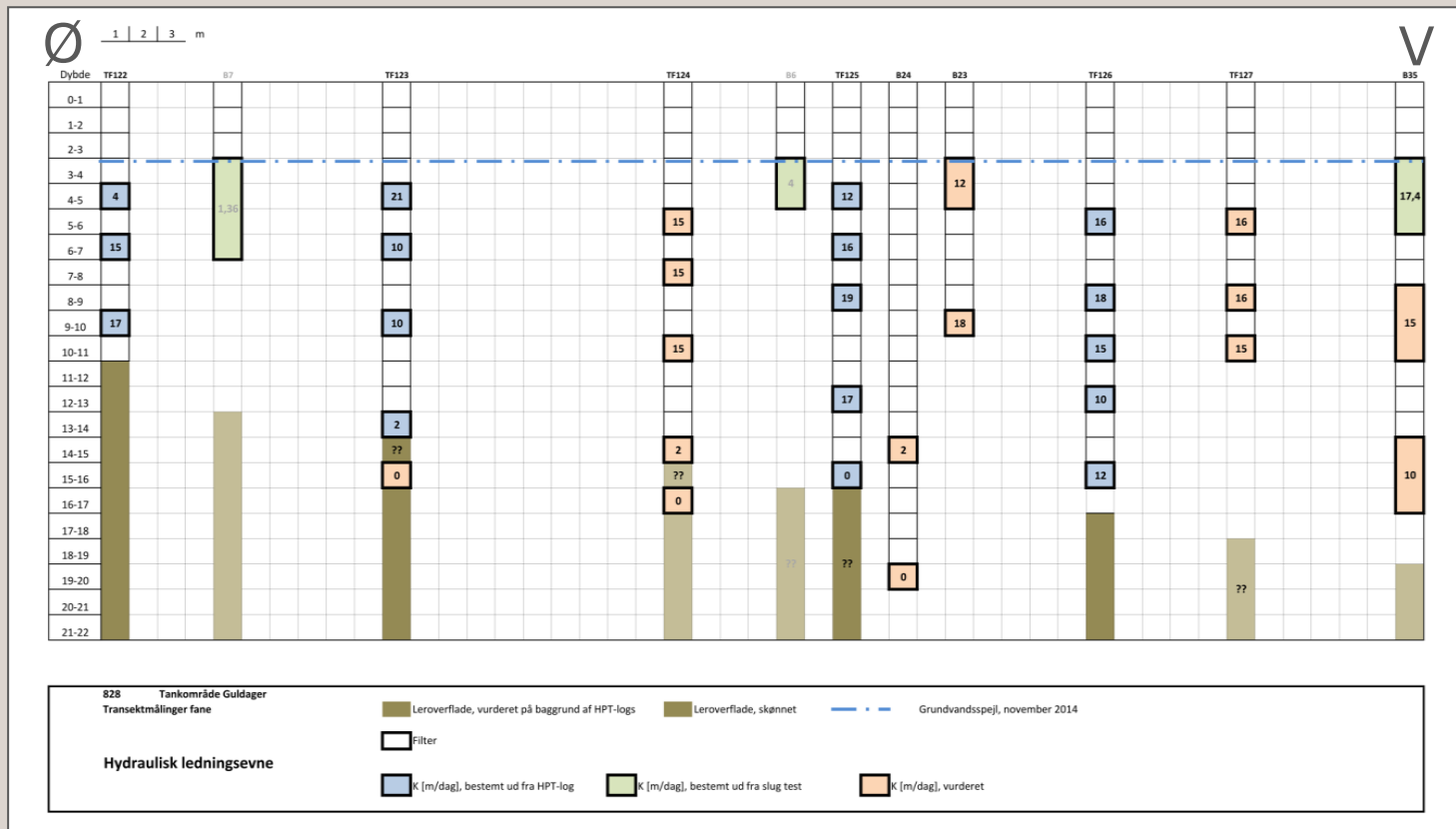
Reduktion jordforurening

- Fjernet > 90 % af massen i kildeområdet
- Koncentrationer generelt under 2.500 mg/kg
- Hot-spots – horisonter med koncentrationer op til 16.000 mg/kg
- Den resterende efterladte mængde olie er estimeret til ca. 2,5 ton, hvor størstedelen er efterladt i etape 3 (40 %), etape 4 (24 %) og etape 5 (22 %)

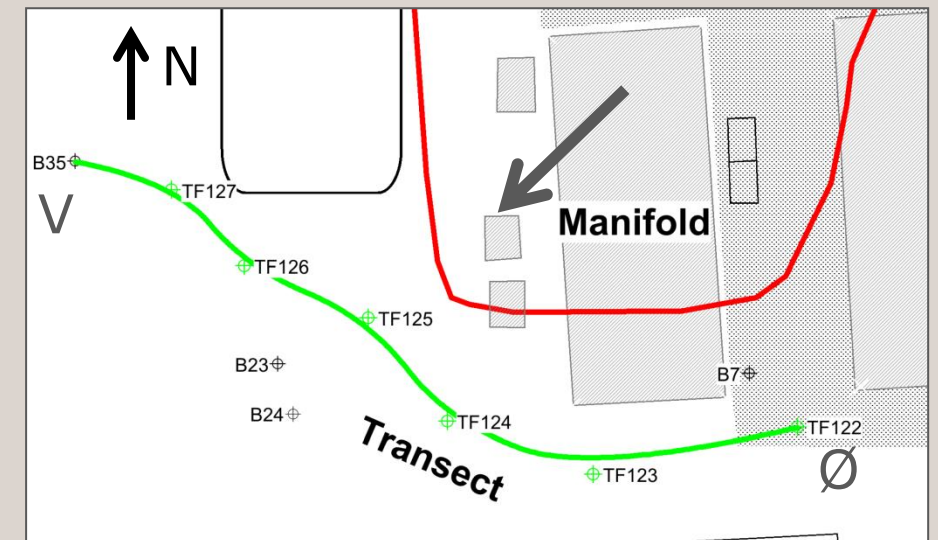
Bestemmelse masseflux

Transekt med 35 filtre

TRANSEKT



- Boringer $\varnothing 63$ mm, $\varnothing 25$ mm og $\varnothing 10$ mm
- Totalkulbrinter + BTEXN
- Gradient bestemt ved pejling
- Hydraulisk ledningsevne bestemt ved slug test og Geoprobe HPT-logs
- GSI Mass Flux Toolkit til beregning
- 3 Baseline-monitoringer inden oprensning
- 1. monitoring udført 3 mdr. efter stop
- Kvartalsvis monitoring efter oprensning
- Gamle boringer med lang tidsserie monitoreres (indgår ikke i beregninger)



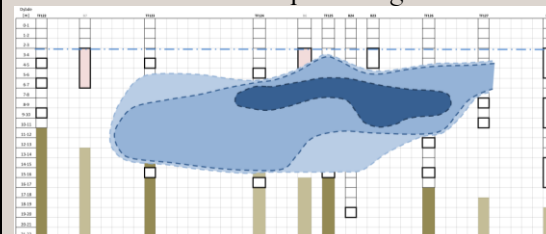
Baseline

3 monitoringer udført 2014 - 2015

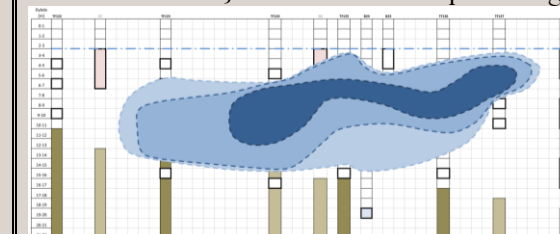
| Parameter | Gradient | Totalkulbrinter | Benzen | BTEX |
|------------------------|----------|-----------------|--------|-------|
| Enhed | % | kg/år | kg/år | kg/år |
| Nov. 2014 | 0,8 | 0,98 | 0,05 | 0,12 |
| Dec. 2014- jan.2015 | 1,1 | 1,42 | 0,05 | 0,17 |
| Marts 2015 | 1,1 | 1,27 | 0,05 | 0,12 |
| $J_{0,avg}$ | 1,0 | 1,22 | 0,05 | 0,14 |

Totalkulbrinter

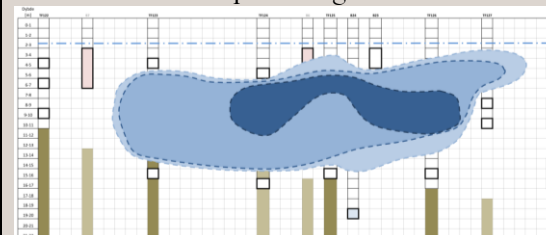
November 2014 – før oprensning:



December 2014-januar 2015 – før oprensning:



Marts 2015 – før oprensning:



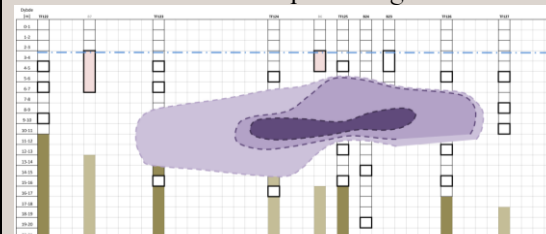
■ Leroverflade, vurderet på baggrund af HPT-logs
 ■ Leroverflade, skønnet
 - - - Grundvandsspejl

Filter
 i.a. ikke analyseret
 i.u. ikke udført
 ikke medtaget i vurdering

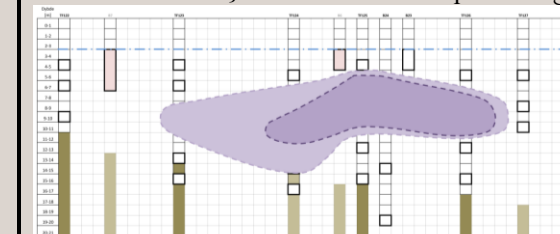
THC > 1000 µg/l
 THC > 100 µg/l
 THC > 9 µg/l
 THC < 9 µg/l

Benzen

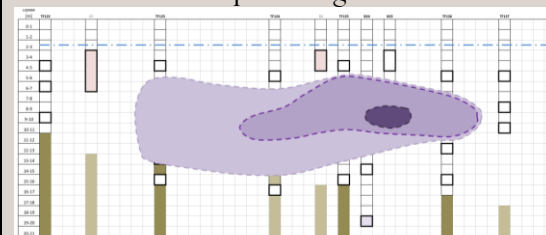
November 2014 – før oprensning:



December 2014-januar 2015 – før oprensning:



Marts 2015 – før oprensning:



■ Leroverflade, vurderet på baggrund af HPT-logs
 ■ Leroverflade, skønnet
 - - - Grundvandsspejl

Filter
 i.a. ikke analyseret
 i.u. ikke udført
 ikke medtaget i vurdering

Benzen > 100 µg/l
 Benzen > 10 µg/l
 Benzen > 1 µg/l
 Benzen < 1 µg/l

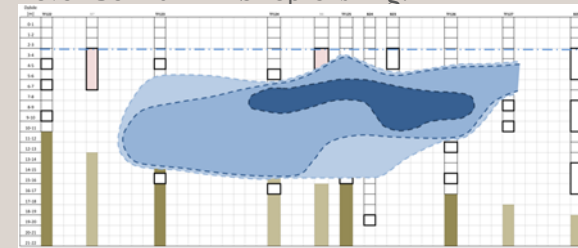
Resultater

Totalkulbrinter

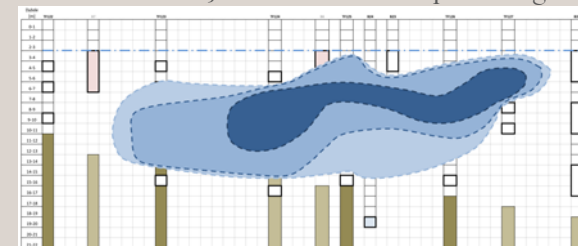
- Lavere koncentrationsniveau efter oprensning
- Vertikal og horisontal spredning
- Forurening ikke afgrænset horisontalt
- Spredning sket ved reinjektion samt evt. udledning af kulbrinteholdigt grundvand

Før oprensning

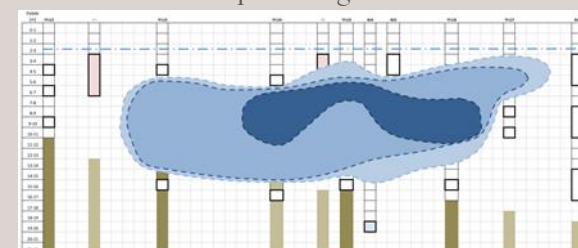
November 2014 – før oprensning:



December 2014-januar 2015 – før oprensning:

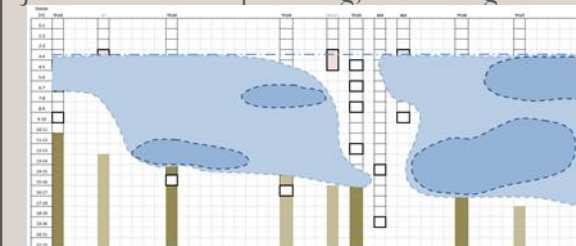


Marts 2015 – før oprensning:

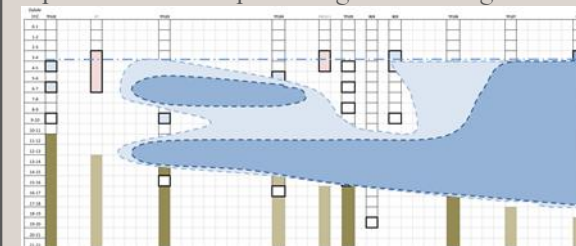


Efter oprensning

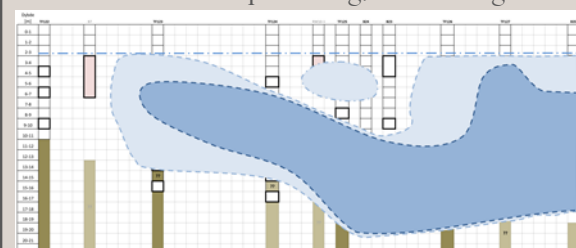
Juni 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 1:



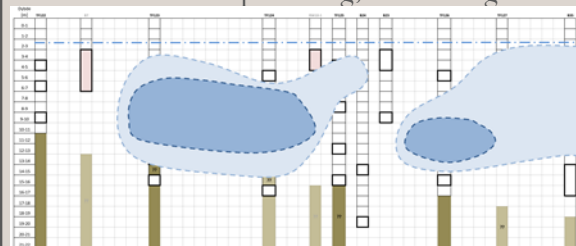
Sep. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 2:



Dec. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 3:



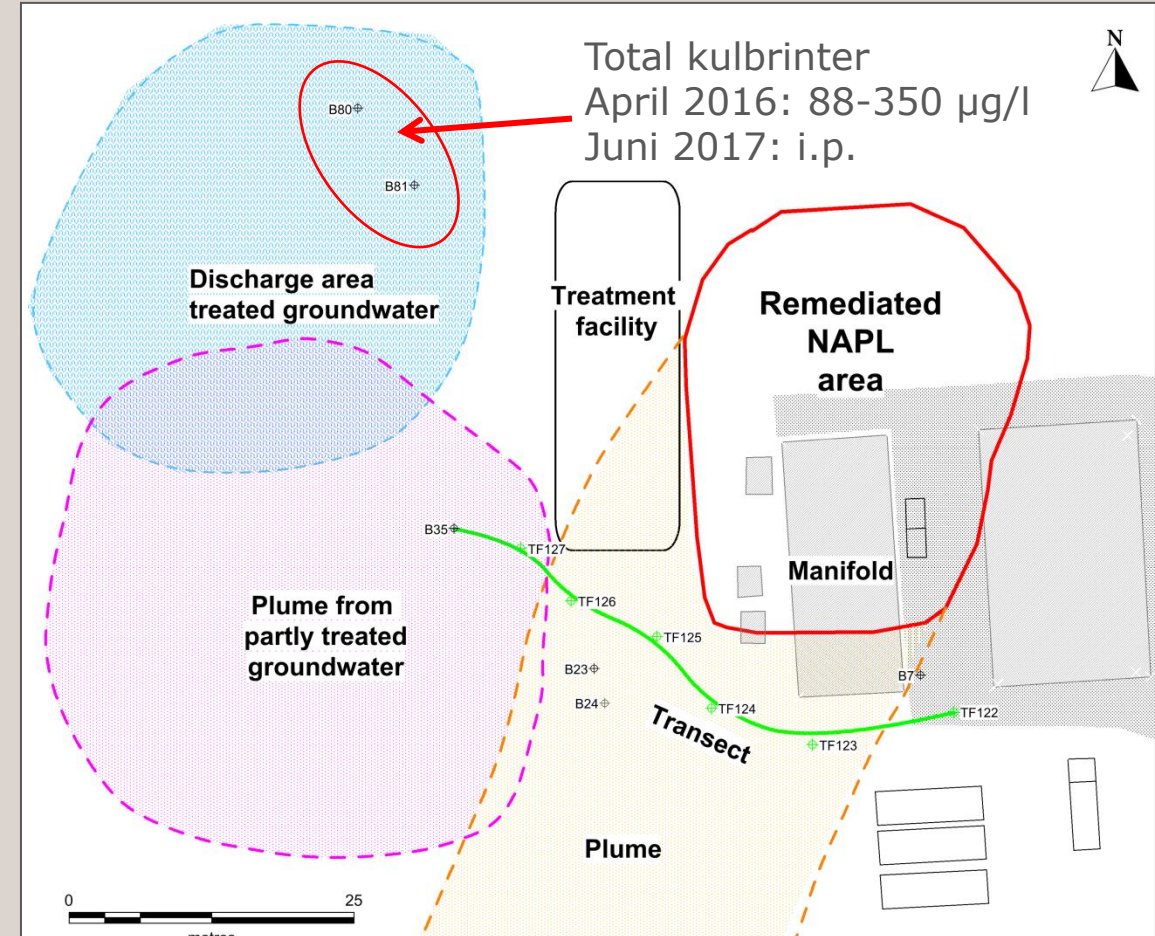
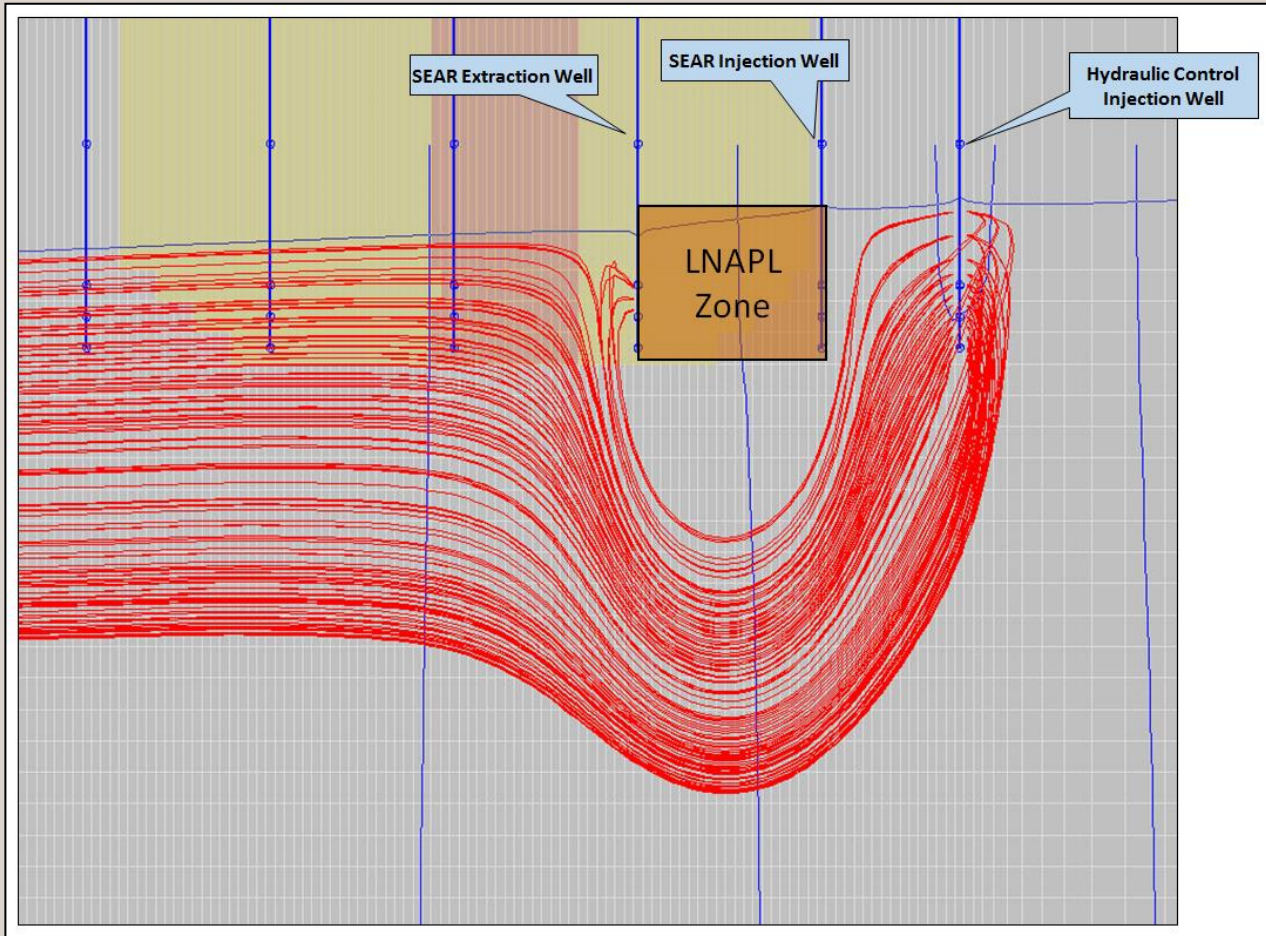
Feb. 2018 – efter oprensning, monitoring nr. 4:



Spredning af opløst forurening til fane

Spredning ved reinjektion

Spredning fra udledning af delvis rensset grundvand

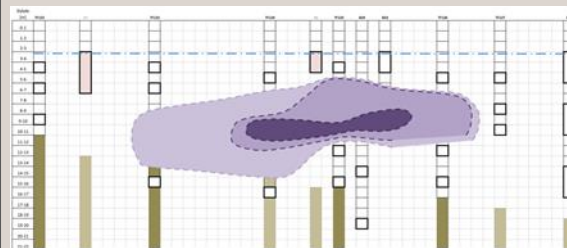


Resultater

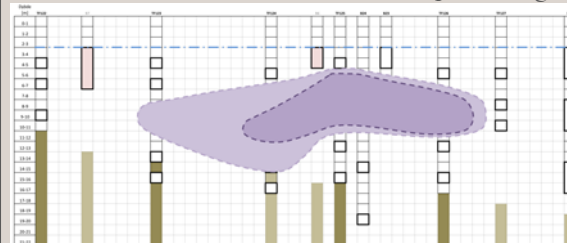
Benzen

Før oprensning

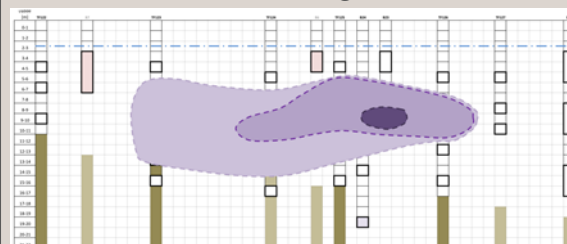
November 2014 – før oprensning:



December 2014-januar 2015 – før oprensning:

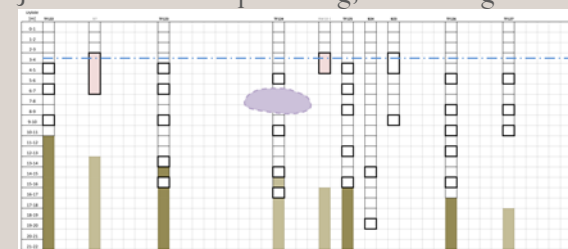


Marts 2015 – før oprensning:

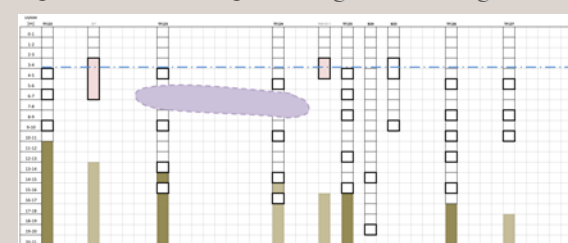


Efter oprensning

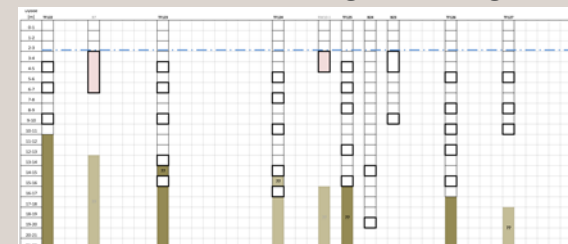
Juni 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 1:



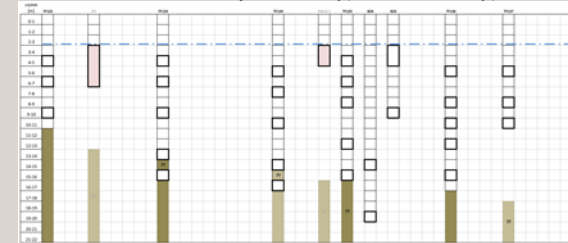
Sep. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 2:



Dec. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 3:



Feb. 2018 – efter oprensning, monitoring nr. 4:

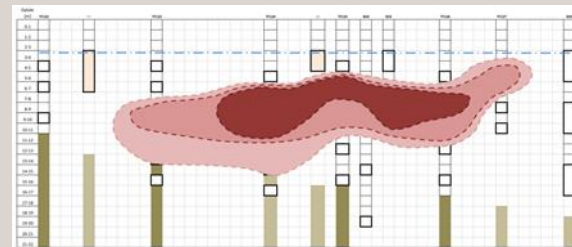


Resultater

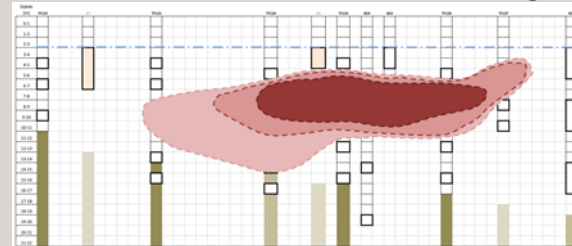
BTEX

Før oprensning

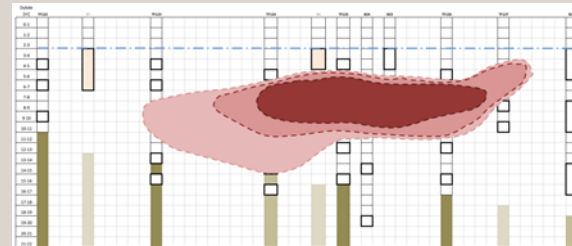
November 2014 – før oprensning:



December 2014-januar 2015 – før oprensning:

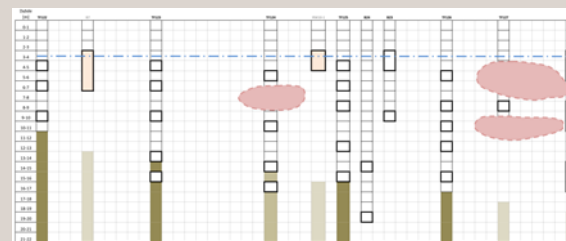


Marts 2015 – før oprensning:

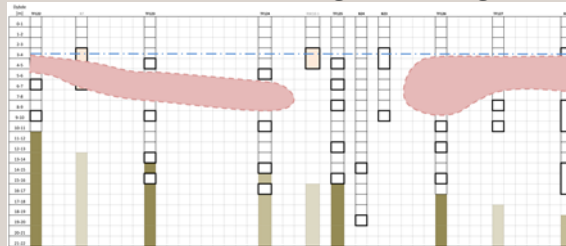


Efter oprensning

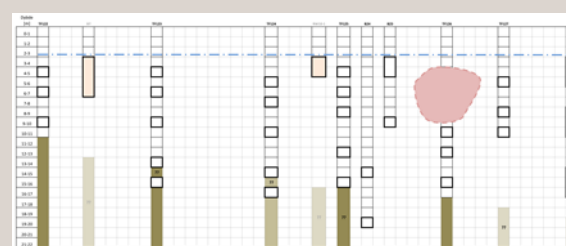
Juni 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 1:



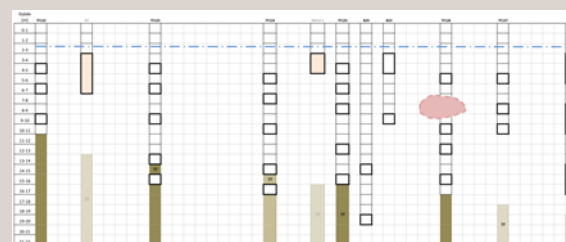
Sep. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 2:



Dec. 2017 – efter oprensning, monitoring nr. 3:



Feb. 2018 – efter oprensning, monitoring nr. 4:



Resultater

Masseflux

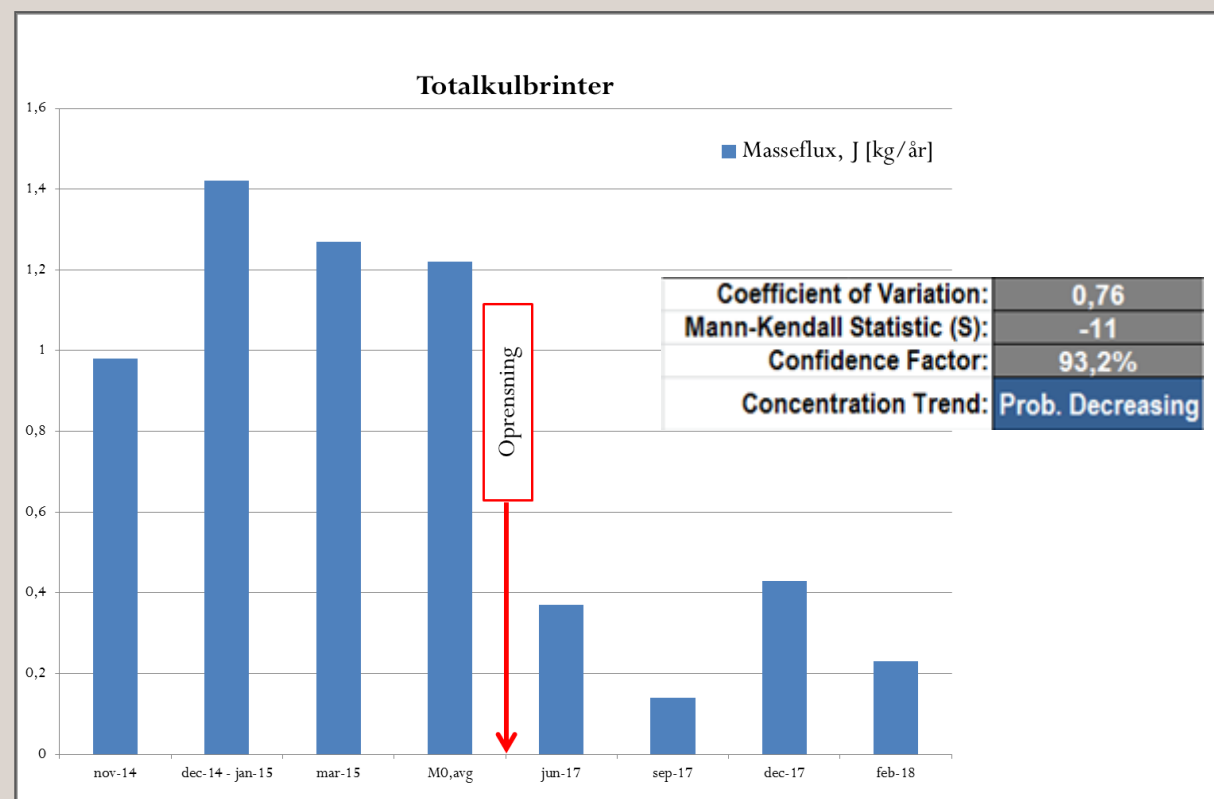
- **Totalkulbrinter < 1 OOM**
- **Benzen og BTEX 1-2 OOM**
- **Stor variation i gradient efter oprensning**
- **Gradient er mest betydende for masseflux!**
- **Anvende fast gradient?**

| Parameter | Gradient | Total- kulbrinter | Benzen | BTEX |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------|---------|
| Enhed | %o | kg/år | kg/år | kg/år |
| <i>Før oprensning</i> | | | | |
| Nov. 2014, J_{nov14} | 0,8 | 0,98 | 0,05 | 0,12 |
| Dec. 2014-jan. 2015 J_{jan15} | 1,1 | 1,42 | 0,05 | 0,17 |
| Marts 2015, $J_{marts15}$ | 1,1 | 1,27 | 0,05 | 0,12 |
| $J_{0,avg}$ | 1,0 | 1,22 | 0,05 | 0,14 |
| <i>Efter oprensning</i> | | | | |
| Juni 2017, J_{jun17} | 2,0 | 0,37 | 0,0006 | 0,003 |
| Sept. 2017, J_{sep17} | 0,5 | 0,14 | 0,00009 | 0,0006 |
| Dec. 2017, J_{dec17} | 1,6 | 0,43 | 0,00023 | 0,0015 |
| Feb. 2018, J_{feb18} | 1,3 | 0,23 | 0,00016 | 0,00099 |
| $J_{2017-2018, avg}$ | 1,3 | 0,29 | 0,00027 | 0,0015 |
| Reduktion % | - | 64-88 | 98-99 | 97-99 |
| Reduktion (OMM) | - | < 1 | 1-2 | 1-2 |

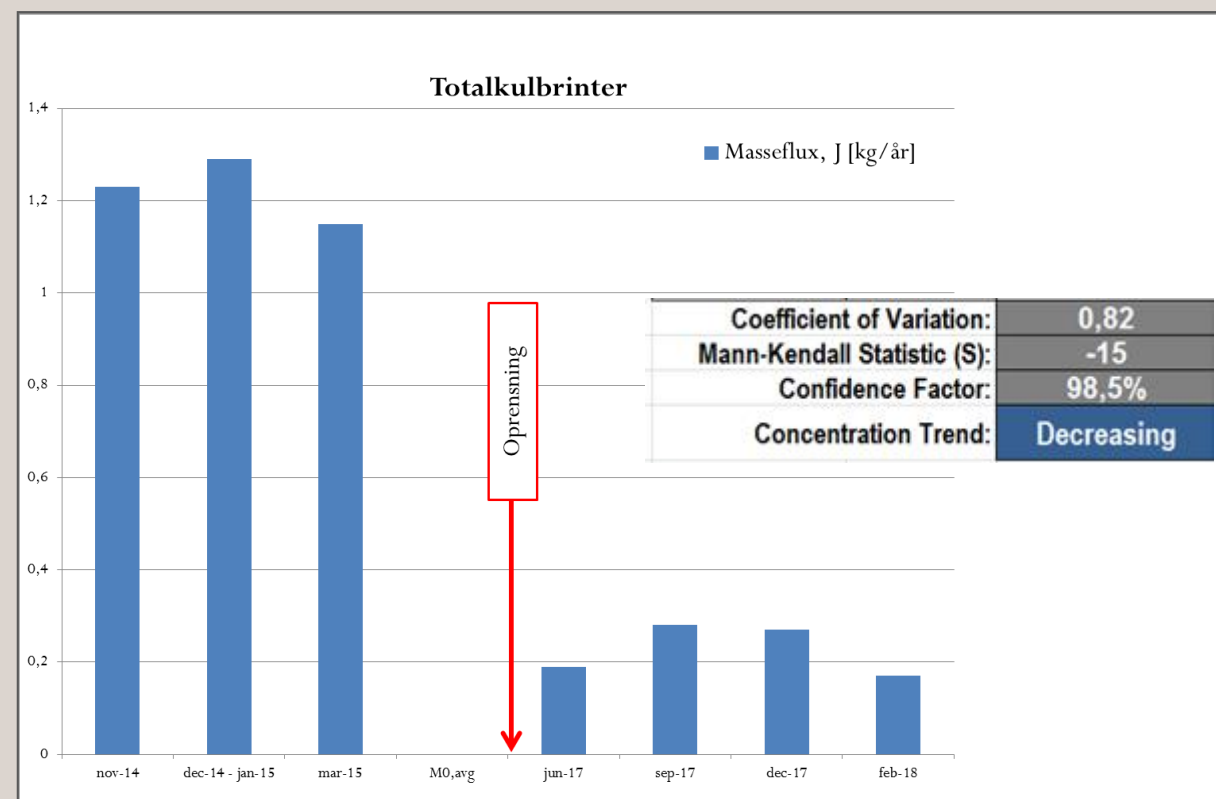
Resultater

Udvikling af masseflux ved hhv. fast og varierende gradient

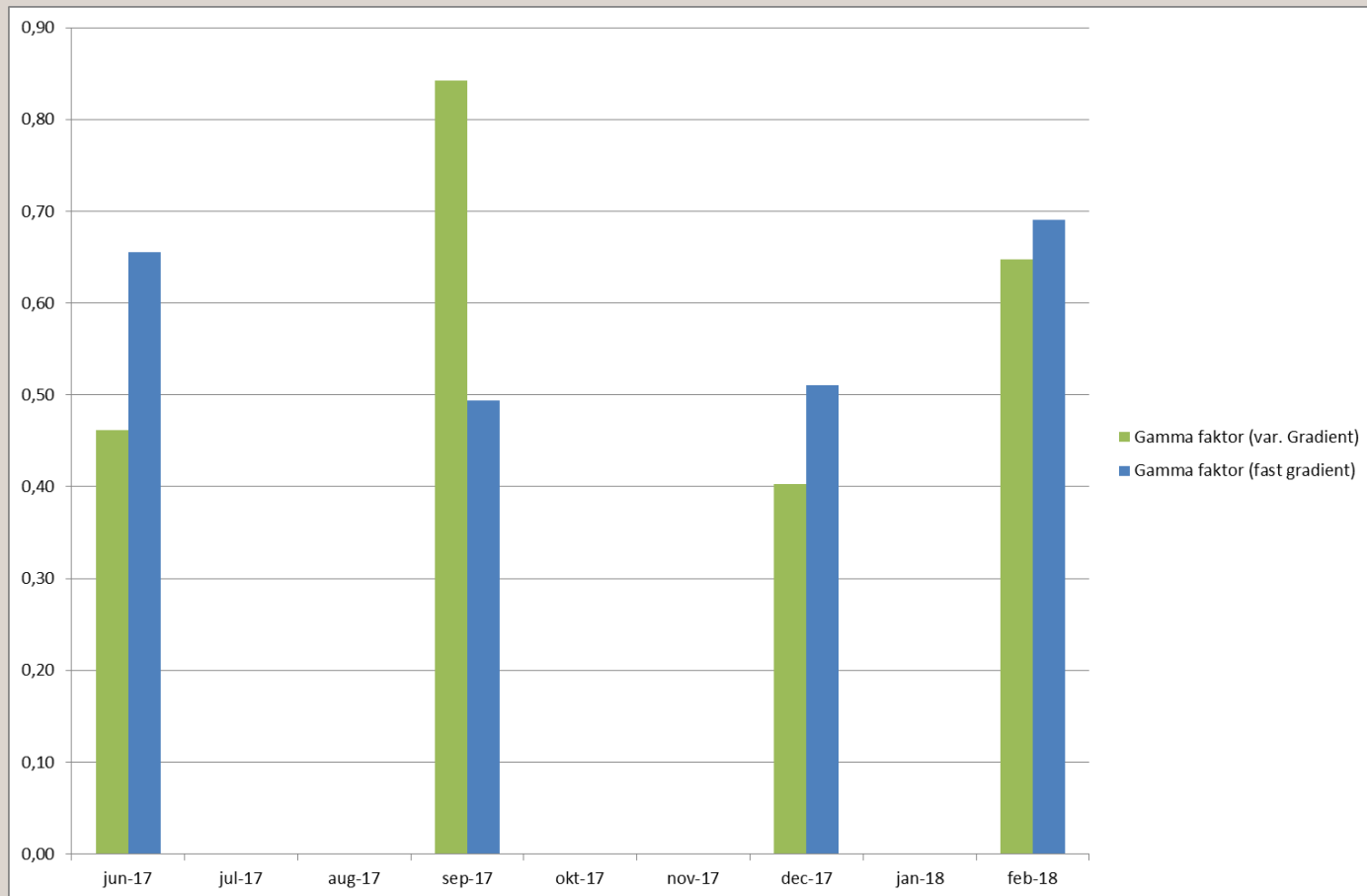
Variierende gradient



Fast gradient (1 ‰)



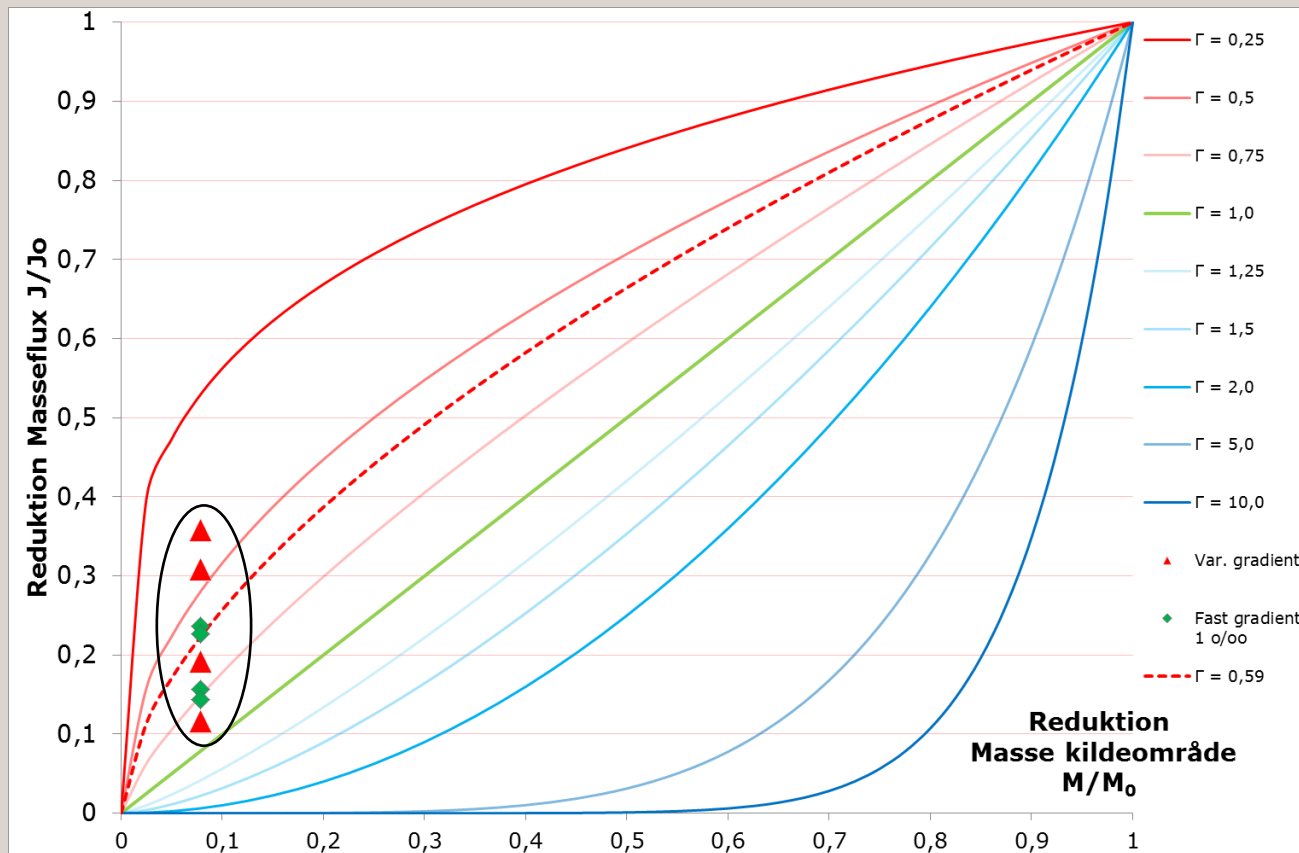
Udvikling af Γ -faktor



Variierende gradient:
 $\Gamma = 0,40 - 0,85$
Gennemsnit = 0,59
Spredning = 0,20

Fast gradient (1 ‰):
 $\Gamma = 0,51 - 0,69$
Gennemsnit = 0,59
Spredning = 0,10

Resultater Γ -funktion



- Gamma funktion var et godt udgangspunkt for dimensionering
- For sandede lokaliteter skal M/M_0 være $> 0,9$ for at få en væsentlig reduktion i masseflux
- Viden fra DNAPL lokaliteter kan overføres til LNAPL lokaliteter

Sammenfatning og konklusion

- Der er faldende koncentrationer af kulbrinter og BTEX ved sammenligning af før/efter oprensning
- Vertikal og horisontal spredning - forurening ikke afgrænset
- Der er sket en ikke-planlagt spredning af primært kulbrinter ved reinjektion samt evt. udledning af delvis rensset grundvand med indhold af kulbrinter
- Varierende gradienter giver ujævn kørsel (hastighed) på landevejen
- Evt. anvende metode med fast gradient
- Reduktion af masseflux J for totalkulbrinter på 64-88 % (< 1 OOM)
- Reduktion af masseflux J for benzen på 98-99 % for benzen (2 OMM)
- Reduktion af masseflux J for BTEX på 97-99 % for BTEX (1-2 OMM)
- Γ -faktor = 0,40 – 0,85 (gennemsnit på 0,59)
- Fremtidig udvikling ?

Tak til

Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse
Geolog Anne Mette B. Lindof



University of Houston, Petroleum Engineering Department
Associate Prof, Ph.D, Konstantinos Kostarellou



GSI Environmental, Houston, Texas
Ph.D. Phillip C. de Blanc



NIRAS
Ekspertisechef civilingeniør Anders G. Christensen

Katrine Oest, Mikkel M. Møller, Uffe S. Boe, Marianne Willemoes, Lau Lomborg m. fl.

Tak for
opmærksomheden

Søren Rygaard Lenschow

E: srl@niras.dk

M: 2321 5487