

## Konceptuel forståelse af fordeling af residual og mobil DNAPL

**Broholm, Mette Martina; Lange, Ida Vedel; Bjerg, Poul Løgstrup**

*Published in:*  
Fri fase (DNAPL)

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Broholm, M. M., Lange, I. V., & Bjerg, P. L. (2012). Konceptuel forståelse af fordeling af residual og mobil DNAPL. I Fri fase (DNAPL): Temadag (s. 1-3). Kgs. Lyngby: ATV Jord og Grundvand.

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

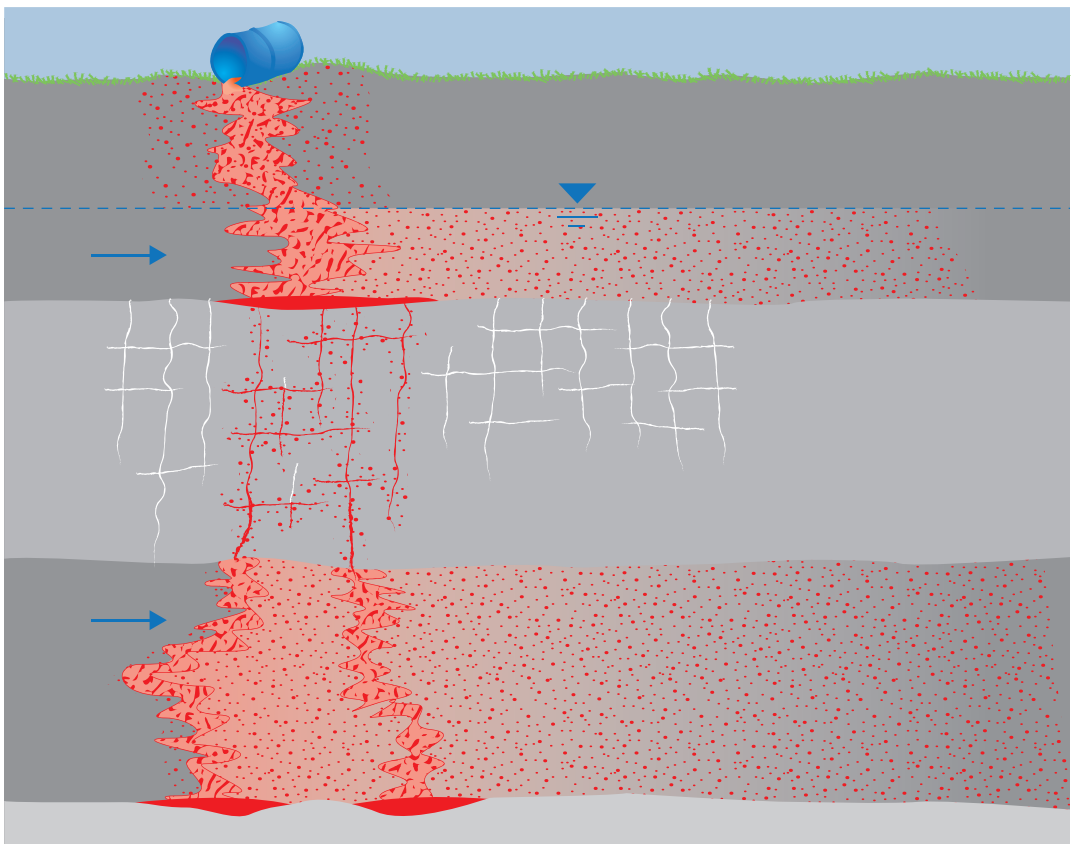
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# TEMADAG

## Fri fase (DNAPL)

5. marts 2012  
- Vintermøde om jord- og grundvandsforurening



## Indholdsfortegnelse

	Side
KONCEPTUEL FORSTÅELSE AF FORDELING AF RESIDUAL OG MOBIL DNAPL Lektor Mette M. Broholm, DTU Miljø	1
CURRENT AND EMERGING TECHNIQUES FOR DNAPL SITE CHARACTERIZATION M.Sc., Ph.d. Gary Wealthall, Geosyntec Consultants, Inc.	5
INTRODUKTION TIL UDVIKLINGSPROJEKT PÅ DNAPL- LOKALITETEN NAVERLAND 26 Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden	7
GEOLOGISK, GEOFYSISK OG HYDROLOGISK KARAKTERISERING PÅ NAVERLAND 26; OPSTILLING AF HYDROGEOLOGISK KONCEPTUEL MODEL Civilingeniør Jesper Damgaard, COWI	11
APPLICABILITY OF AN ACTIVATED CARBON STRIP ON NAPL FLUTE® FOR DNAPL CHARACTERIZATION IN A CHALK AQUIFER Monique Beyer, MSc-Student, DTU Miljø	15
DNAPL KARAKTERISERING PÅ NAVERLAND 26 RESULTATER AF DNAPL KARAKTERISERING I MORÆNELER OG KALK, SAMMENLIGNING AF METODER Post.doc. Gry Sander Janniche, DTU Miljø	17
SAMLEDE ERFARINGER MED DNAPL SCREENINGSMETODER PÅ NAVERLAND 26 OG ANBEFALINGER TIL FORTSAT ARBEJDE Post.doc. Annika S. Fjordbøge, DTU Miljø	19
APPROACHES TO QUANTIFYING UNCERTAINTY IN MASS ESTIMATES AT DNAPL SITES M.Sc., Ph.d. Gary Wealthall, Geosyntec Consultants, Inc.	21
MASSEBESTEMMELSE I PRAKSIS: CASE HØFDE 42. HVORDAN ER MASSEBEREGNINGER UDFØRT, OG HVOR LIGGER UDFORDRINGERNE PÅ EN DNAPL LOKALITET? Civilingeniør, ph.d. Lars R. Bennedsen, Rambøll	23
SUCCEFULDT PILOTFORSØG MED OPRENSNING AF RESIDUAL FRI FASE PCE VED HJÆLP AF STIMULERET REDUKTIV DEKLORERING I KÆRGÅRD PLANTAGE. Civilingeniør Torben Jørgensen, COWI	25



# KONCEPTUEL FORSTÅELSE AF FORDELING AF RESIDUAL OG MOBIL DNAPL

Lektor Mette M. Broholm, DTU Miljø, mibr@env.dtu.dk.  
Ida V. Lange, Poul L. Bjerg, DTU Miljø

## Baggrund og formål

På en lang række danske lokaliteter er der gennem årene håndteret og spildt chlorerede opløsningsmidler som fri fase (DNAPL). Da forekomst af DNAPL er af afgørende betydning i forbindelse med risikovurdering og valg af afværgeteknologi, er god karakterisering af DNAPL fordelingen i kildeområder på de forurenede lokaliteter afgørende. For at kunne planlægge og gennemføre en sådan karakterisering er det vigtigt at have en god konceptuel forståelse for DNAPL transport, fordeling og opløsning af DNAPL under forskellige geologiske forhold samt for den tidlige udvikling i sådanne DNAPL kildeområder.

I et udviklingsprojekt for Region Hovedstaden (Jørgensen et al. 2010, Bjerg et al. 2011) er udført viden opsamling bl.a. med henblik på at opsætte state-of-the-art konceptmodeller for transport, fordeling og opløsning af DNAPL, for at etablere den nødvendige baggrund til at forstå problematikken omkring karakterisering af DNAPL-kildeområder.

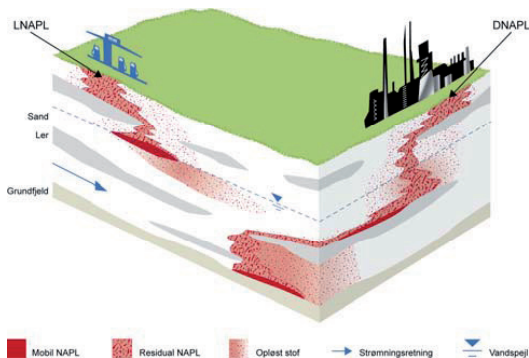
Der er særligt lagt vægt på DNAPL fordeling under danske geologiske forhold og på den tidlige udvikling i DNAPL kildeområder. Dette præsenteres på Temamødet med henblik på at give deltagerne den fornødne konceptuelle forståelse for et godt udbytte af dagens øvrige indlæg. I dette abstract er vist eksempler på konceptuelle modeller og givet en kort opsamling/resume fra Jørgensen et al. (2010) kapitel 2.

## Overordnet konceptuel model for NAPL

Ved udslip af DNAPL på/under terræn transporteres denne som en separat væskefase ned i jorden. På grund af den høje densitet vil DNAPL kunne trænge ned gennem vandspejlet og spredes i den mættede zone. Under transport ned gennem et porøst medie som sand afsnøres dråber og "ganglia" (korte strenge i sammenhængende porer) af immobil DNAPL i porerne mellem sandkornene – også kaldet residual DNAPL.

Ved møde med mindre permeable lag spredes DNAPL langs overfladen af disse, og der kan ske en ophobning af mobil DNAPL (pool). Ved mobil DNAPL eller DNAPL-pools forstås længere sammenhængende strenge eller egentlige søer/ophobninger af DNAPL, som er mobile eller kan mobiliseres ved f.eks. gennemboring af underliggende lag eller pumpning.

Ved DNAPL-mætning forstås den andel af porøsiteten, som udgøres af DNAPL. Dette er illustreret ved en general konceptuel model for fordelingen af DNAPL i en sandformation med indlejrede ler- eller siltlag og underlejret af grundfjeld kort efter udslip til formationen i figur 1. For sammenligning er fordelingen af en LNAPL også illustreret i figuren.



Figur 1.

### Betydningen af den opdaterede konceptuelle forståelse for udførelse af undersøgelser i DNAPL-kildeområder

Længere tid efter udslip af DNAPL til sandmagasiner træffes DNAPL overvejende i tynde lag af residual eller mobil DNAPL typisk i moderat permeable lag og ofte klemt inde mellem mindre permeable lag i overgangszoner eller ved overfladen af underliggende lavpermeabelt lag. Diskretisering på cm-skala i minimum 3-4 punkter i et kildeområde (f.eks. ved kerneprøvetagning eller kombinerede kontinuerte målinger over dybden og prøvetagning) er nødvendigt for opnåelse af god konceptuel model for DNAPL-fordelingen i disse zoner.

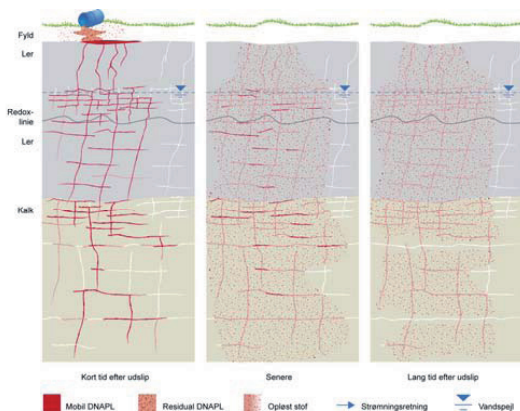
Hvad der i filtersatte borerer giver indtryk af en sammenhængende pool af DNAPL er ved diskretiserede undersøgelser observeret reelt at bestå af tynde hængende lag af residual og mobil DNAPL. At basere masseestimer på NAPL pool tykkelse i filtersatte borerer kan således give anledning til grov overestimering.

Ved undersøgelser på grundvand fra transekter placeret umiddelbart nedstrøms DNAPL-kildeområder i sandmagasiner kom 60% af forureningsmassen fra mindre end 5% af det monitorerede tværsnitsareal, og der blev observeret 2-4 størrelsesordener forskel i koncentrationer over vertikale afstande på 15-30 cm. En diskretisering på 15-30 cm vertikalt og få meter horisontalt var afgørende for at opnå konceptuel forståelse og rimelige estimater af forureningsflux.

I moræneler kan matrixdiffusion resultere i komplet opløsning af DNAPL bestående af chlorerede opløsningsmidler indenfor få år. Hvor sprækkerne er tilstrækkeligt store eller afstanden mellem DNAPL-invaderede sprækker er begrænset, kan ske en mætning af matrix, som kan føre til at små "lommer" af DNAPL rester i sprækkerne gennem meget længere tid. Tilsvarende gælder for isolerede sandslirer i ler. Ved kortlægning af DNAPL-kildeområder i moræneler er detaljeret kortlægning af sandslirer og sprækker essentielt. Som følge af tilbagediffusion fra kraftigt påvirket lermatrix til grundvandsprøver er det særdeles vanskeligt på basis af vandprøver at skelne, om der er resterende residual eller mobil DNAPL, eller det blot tidligere har været tilstede.

I sprækkede kalkbjergarter træffes hovedparten af forureningsmassen i matrix omkring mellem til små hydraulisk aktive sprækker og ikke i de større mere sammenhængende sprækker, som typisk kan identificeres ved pumpetest, televisering, etc. Filtersatte monitoringsbo-

ringer med filtre i intervaller, hvor der er truffet større frakturer kan resultere i underestimering af forureningsudbredelse og flux, idet de mellem-mindre sprækker med de højeste koncentrationer ikke erkendes og derved ikke medtages.



Figur 2.

## Referencer

Jørgensen, I.V., Broholm, M.M., Bjerg, P.L., 2010. DNAPL i kildeområder - konceptuelle modeller, karakterisering og estimering af forureningsmasse. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden, Kgs. Lyngby. [www.sara.env.dtu.dk](http://www.sara.env.dtu.dk)

Bjerg, P.L., Broholm, M.M., Lange, I.V., Trolborg, M., Janniche, G.S., Lemming, G., Santos, M., Binning, P.J., 2011. Forekomst af fri fase og kvantificering af forureningsflux for chlorerede opløsningsmidler. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, og Region Hovedstaden. [www.sara.env.dtu.dk](http://www.sara.env.dtu.dk)





## **CURRENT AND EMERGING TECHNIQUES FOR DNAPL SITE CHARACTERIZATION**

Gary Wealthall, Geosyntec Consultants, Inc., 130 Research Lane, Guelph, Ontario, Canada,  
N1G 5G3 Phone: +1.519.822.2230 ext. 333 Mobile: +1.519.400.8033,  
gwealthall@geosyntec.com

Chlorinated solvents have been used extensively in industry and are common groundwater contaminants. Their limited aqueous solubility often leads to the presence of dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) source zones, where the distribution of DNAPL is controlled by both the fluid properties and the geologic environment. Recent advances in the development of a site investigation 'toolbox' has significantly enhanced our ability to characterise the spatial architecture of DNAPL in both sedimentary and fractured bedrock environments.

A range of site investigation tools is presented, based on the principle of combined lines of evidence and the premise that a single technique is not available to fully delineate DNAPL distribution in the subsurface. Key to this strategy is the selection of technologies with multiple scales of measurement and data quality, of which there are two main categories. The first category provides qualitative, dense spatial data, often with higher detection limits over a preset value. These methods are generally of lower cost, produce vertical profiles of real-time data and are primarily used to identify site areas that require further investigation. Examples of such "decision quality" methods are laser-induced fluorescence profiling and membrane interface probing.

These first category methods produce qualitative data that are used to guide the sampling strategy for the application of the second category of technologies that are typically compound-specific and generate quantitative, precise data that have low detection limits. These second category methods tend to be higher cost with longer turnaround times that preclude on-site decision making, hence applying them to quantify, rather than produce a conceptual model, facilitates a key cost saving. Examples include the use of fully cored boreholes (and associated subsampling) and high resolution multilevel well completions. Where these two categories of measurement technologies are used in tandem, a more complete and accurate dataset is achieved and additional site mobilizations are limited.

The use of this toolbox approach is described for a number of case studies and by reference to published literature and best practice guidance. New and emerging trends are discussed and recommendations are given for a range of geological environments and DNAPL types. Obstacles for the development and application of innovative techniques will be discussed for site characterization, remediation design, technology verification and regulatory acceptance.



## INTRODUKTION TIL UDVIKLINGSPROJEKT PÅ DNAPL- LOKALITETEN NAVERLAND 26

Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden, [hkj@regionh.dk](mailto:hkj@regionh.dk)

Formålet med præsentationen er at fremlægge baggrund for og formål med regionens iværksættelse af et omfattende udviklingsprojekt om DNAPL af klorerede opløsningsmidler. Herudover introduceres lokaliteten, der er massivt forurenede og anses som en af landets 10 mest forurenede punktkilder.

Der er 3 formål med projektet:

- at belyse forekomst af DNAPL på Naverland 26 for at forbedre risikovurderingen og grundlaget for prisestimering af evt. oprensingsprojekt.
- at opnå større viden om og dokumentation for typen af anvendelige metoder til vurdering og afgrænsning af DNAPL forurening
- at danne grundlag for interne retningslinier for på hvilket grundlag en DNAPL undersøgelse bør iværksættes samt hvilken undersøgelsesmetoder og -strategi, der bør anvendes.

Tilstedeværelse af DNAPL har afgørende betydning for risikovurdering og dermed prioritering af en lokalitet til yderligere offentlig indsats i form af afværgeforanstaltninger. Region Hovedstadens erfaring er, at de afgrænsende undersøgelser ofte ikke er tilstrækkelige til at afgøre, om der er DNAPL eller ej. Det ses især tydeligt i et termisk oprensingsprojekt, ved at sammenligne de estimerede forureningsmængder forud for oprensningen med den forureningsmængde, der faktisk fjernes med oprensningen.

Lokaliteten Naverland 26 er beliggende i Albertslund kommune i område med drikkevandsinteresser.

### Historik

På Naverland 26 har der fra 1965-1983 været håndteret og opbevaret klorerede opløsningsmidler. Aktiviteterne på ejendommen bestod af import og videreförhandling af klorerede opløsningsmidler til renseserier. Det er anslået, at der i driftsperioden er håndteret ca. 5.000 tons PCE, 1.500 tons TCE og 200 tons TCA.

### Tidligere undersøgelser

I 1996 og 1997 gennemførte dels kommunen og dels grundejer de første undersøgelser, der viste kraftig forurening. Lokaliteten blev V2-kortlagt og i 2002 gennemførte Københavns Amt en videregående undersøgelse. Amtet besluttede, at formålet med den videregående undersøgelse var at belyse sagen, men ikke en egentlig undersøgelse af kildeområdet eller afgrænsning af forureningen. Denne beslutning skyldtes, at grunden med sin beliggenhed udenfor områder med særlige drikkevandsinteresser ikke var højest prioriteret.

Alligevel er der i løbet af årene iværksat forskellige tiltag. Eksempelvis koordinerer regionen og Vestegnens Vandsamarbejde en overvågning af forureningsfanen. Herudover er der i 2007 gennemført en undersøgelse af potentialet for naturlig nedbrydning i fanen. Der er i 2008 iværksat en tidsbegrænset oppumpning i kildeområdet og nu forløber DNAPL-undersøgelsen.

Overvågning af forureningsfanen har vist, at fanen strækker sig i flere retninger da lokaliteten er beliggende på et grundvandskel. Udbredelsen er længst i nordøstlig retning mod Kildeplads Vestskoven. Afstanden til indvindingsboringerne er ca. 1100 m fra Naverland- og det kan ikke udelukkes, at det er Naverland forureningen, der forårsager cis-DCE i indvindingsboringen (<1 µg/l).

Den tidsbegrænsede afværgepumpning sker fra en kalkboring (8-18 mut) placeret i kanten af hot spot området. Der oppumpes mellem 3-4 m<sup>3</sup>/h. Forureningsniveauet i afværgeboringen er faldet i løbet af den 3,5 årige pumpeperiode fra ca. 19.000 til 5.000 µg/l TCE og fra 7.500 til 2.500 µg/l PCE. Der er i alt fjernet ca. 1.600-1.700 kg klorerede opløsningsmidler, hvoraf størstedelen er TCE. Koncentrationsniveauet i de øvrige borer på lokaliteten har i samme periode været aftagende.

### **Konceptuel model (baseret på viden før DNAPL-projektet)**

Den konceptuelle model uddybes i den mundtlige præsentation, men overordnet set er der 1 meters fyld på lokaliteten, herunder moræneler stedvis med indslag af silt-, sand- og grusstriber. Mellem 7-8 meter under terræn træffes kalken. Grundvandet står ca. 7,3 meter under terræn svarende til overgangen mellem moræneler og kalk.

Undersøgelserne har vist udbredt forurening i poreluften og massiv forurening op til 520 mg/l TCE og 250 mg/l PCE i toppen af kalken (2007). I 40 mut svarende til 30 meter nede i kalken blev målt 5,6 mg/l klorerede opløsningsmidler. Der blev udtaget 18 prøver til Sudan IV i undersøgelsen i 2002. På en del af dem var der svage indikationer på tilstedeværelse af DNAPL (såvel moræneler som kalken). På trods af at Sudan IV-prøverne ikke klart indikerede forekomst af DNAPL, giver de høje forureningsniveauer anledning til en forventning om, at der er DNAPL på lokaliteten.

### **Udviklingsprojektet**

Både nye og gamle metoder er anvendt til undersøgelse af forekomst af DNAPL på Naverland. Metoderne: DNAPL FACT FLUTE, MIP, Radon, poreluftmålinger og hydrofobe farvetest (Sudan IV og DNAPL spray) er sammenlignet indbyrdes og med niveauspecifikke vandprøver, prøver fra kalkkerner og prøver fra intakte jordkerner. Prøvetagningen er gennemført med en høj grad af datatæthed. Herudover er der gennemført geofysiske undersøgelser.

Projektgruppen består af DTU, Region Hovedstaden, COWI og NIRAS. Derudover har Gary Wealthall, Geosyntech været sparringspartner og amerikanske FLUTE har gennemført DNAPL FACT FLUTE undersøgelser, hydraulisk profilering og niveauspecifik vandprøvetagning (marts 2012).

I løbet af dagen præsenteres de foreløbige resultater af henholdsvis COWI og DTU.

Projektet er forsinket. Det betyder, at de afsluttende og meget vigtige niveauspecifikke vandprøver endnu ikke er udtaget. Vi mangler derfor et vigtigt element til sammenligningen. Det betyder også, at de generelle anbefalinger af, hvornår og hvordan en DNAPL undersøgelse bør gennemføres, endnu ikke foreligger.

### **Overvejelser ifm borearbejde i område med risiko for DNAPL**

Borearbejdet skulle gennemføres til 13 m nede i kalken i område med risiko for DNAPL. Derfor blev der i fællesskab udarbejdet retningslinier for kontrol af DNAPL under borearbejdet samt en aktionsplan, såfremt der blev konstateret mobil DNAPL undervejs.

En permanent casing blev placeret i moræneleret og støbt i toppen af kalken for at undgå spredning fra moræneler til kalk. Der skulle udtages intakte kalkkerner med GeoBorS metoden. Det blev valgt at tilføre ren vand som kølevand og til transport af cuttings, mens borearbejdet stod på. Normalt recirkuleres køle- og transportvand (af cuttings) under borearbejdet, men vi frygtede at recirkulering kunne øge risikoen for utilsigtet spredning af kraftig forurenede vand i formationen.

COWI og DTU skiftedes til visuelt at bedømme cuttings og kølevand for DNAPL. Hver gang der blev optaget en kerne (å 1,5 m ) blev borehullet undersøgt med DNAPL pejler.

Det var aftalt, at såfremt der var tegn på mobil DNAPL, så skulle det fjernes med engangspumpe. Hvis der skete væsentlig gentilstrømning, så skulle borearbejdet afsluttes og boringen filtersættes, således at den fremover kunne anvendes som afværgeboring.

Der blev ikke observeret tegn på mobil DNAPL undervejs i borearbejdet. Efter udførelsen af kalboringen blev der installeret en blankliner, der "forsegler" kalkvæggen og hindrer spredning i boringen.

### **Det videre forløb**

Sommer 2012 forventes udviklingsprojektet afsluttet og retningslinier til DNAPL undersøgelser at være udarbejdet. Arbejdet vil danne grundlag for en revideret risikovurdering for Naverland 26.

Region Hovedstadens endelige stillingtagen til det videre forløb på Naverland 26 afventer, at Regionen inden for de kommende 2-3 år får skabt et samlet overblik over, hvilke kritiske forureninger, der truer grundvandet i det samlede indvindingsopland, som forureningen på Naverland 26 påvirker. På den baggrund kan regionen identificere og prisfastsætte oprensingsprojekterne i indvindingsoplandet og det danner grundlag for prioritering af sager i områder med drikkevandsinteresser.



## **GEOLOGISK, GEOFYSISK OG HYDROLOGISK KARAKTERISERING PÅ NAVERLAND 26; OPSTILLING AF HYDROGEOLOGISK KONCEPTUEL MODEL**

Civilingeniør Jesper Damgaard, COWI, dam@cowi.dk  
Bernt Grosen, Kerim Martinez, Ole Frits Nielsen og Torben H. Jørgensen (COWI)  
Gry Sander Janniche og Mette Broholm (DTU Miljø)  
Henriette Kerrn-Jespersen (Region Hovedstaden)  
Gary P. Wealthall (Geosyntec)

### **Baggrund**

På lokaliteten Naverland 26 har der været håndteret og opbevaret klorerede opløsningsmidler, hvilket har givet anledning til en massiv forurening med TCE og PCE. Geologien i området viser ca. 1 meters fyld, herunder moræneler, stedvis med indslag af silt-, sand- og grusstriber, inden kalken træffes 7-8 meter under terræn. De foreløbige resultater viser kraftig jordforurening med fri fase i moræneleren men kun relativt lave koncentrationer i kalken med kun få steder med residual fri fase.

### **Formål**

I forbindelse med de undersøgelser, der gennemføres på lokaliteten i 2011-2012, har COWI fået som opgave at udføre geologiske og geofysiske undersøgelser i samarbejde DTU samt udarbejde en detaljeret konceptuel hydrogeologisk model, som kan være med til at forklare, hvordan de klorerede stoffer kan have spredt sig fra kildeområdet og ned til kalkmagasinet.

Et af hovedhovedformålene med de gennemførte undersøgelser har været at fastlægge sprækkemønstre i moræneler og kalk. Dette skyldes, at DNAPL i opsprækkede lavpermeable aflejringer som moræneler kan spredes via makroporer og sprækker, i hvilke der også kan afsnøres residual DNAPL. I første omgang sker der ikke indtrængen i den lavpermeable lermatrix, men med tiden vil der også ske indtrængen i den lavpermeable matrix. Mange af de samme betragtninger gør sig gældende for DNAPL i kalk. Her er de største sprækker imidlertid oftest så store, at vandgennemstrømningen udvasker DNAPL. I sprækkede kalkbjergarter træffes hovedparten af forureningsmassen derfor i matrix omkring mellem til små hydraulisk aktive sprækker og typisk ikke i de større mere sammenhængende sprækker.

### **Agenda**

I selve præsentationen på Vingsted-mødet vil projektet blive gennemgået vha. følgende hovedpunkter:

- Hvordan så den konceptuelle hydrogeologiske model ud, da projektet startede?
- Hvilke geologiske og geofysiske undersøgelser er der udført og hvorfor?
- Hvad viser resultaterne enkeltvist?
- Hvad viser resultaterne, når de sammentolkes?
- Hvordan ser den konceptuelle hydrogeologiske model ud nu? - hvad har ændret sig og hvor er vi blevet klogere?
- Hvilke undersøgelser har haft høj værdi/udbytte, og hvilke har ikke bidraget med så meget ny information?

Undersøgelserne er gennemført i to faser. Ved projektets opstart forelå der en konceptuel model, der antog sprækker som værende den dominerende spredningsvej. Formålet med

undersøgelserne i Fase 1 har derfor været at be- eller afkræfte antagelserne fra den eksisterende konceptuelle model samt udpege hotspot. Fokus var derfor på at fastlægge overfladen af moræneler og kalk. I Fase 2 har fokus været på detaljeret information fra hotspot-området, herunder udtagelse af kerneprøver, kemiske analyser samt flowlogging.

### **Fase 1 undersøgelser**

**Georadar:** Der er foretaget georadar undersøgelser langs en række profiler med såvel 100 som 250 MHz antenner samt en screening med en 3D-georadarantenne. Formålet med undersøgelserne har været at kortlægge (1) de helt overfladenære lag (fyldlaget/top moræneler), (2) toppen af kalken samt (3) en detaljeret kortlægning af de øverste meter under terræn bl.a. med henblik på at kortlægge fyldlaget, selve tanken, ledninger, fundamenter m.v. Der er opnået gode resultater mht. (1) og (3), mens tolkning af kalkoverfladen kun har været mulig efter også at have inddraget seismik. Der var ved georadar målingerne indikationer på fri fase nord for tankområdet, men efterfølgende boringer har ikke kunnet verificere dette.

**Seismik:** Der er udført seismiske undersøgelser både med S-bølge refleksion og overfladebølge analyse (MASW) med henblik på (1) at kortlægge toppen af kalkoverfladen og (2) at undersøge mulige strukturer i kalken. Der er målt såvel S- som P-bølger, hvor det bedste datasæt er fra S-bølgerne. Resultaterne viser tre-fire karakteristiske zoner, der efterfølgende er tolket som to typer moræneler samt en-to kalkenheder.

**Ny boring til kalkoverfladen:** Der er indledningsvist udført en enkelt ny boring til kalkoverfladen for at kunne vurdere moræneleren mere detaljeret. En ny oplysning fra boringen er, at moræneleren kan opdeles i to enheder. Den geologiske beskrivelse af boringen viser, at moræneleren i den øvre del (0,7-2,5 m.u.t.) er leret til svagt sandet, mens den under 2,5 m.u.t bliver mere sandet og stenet ned til 6,5 m.u.t. Dette skift fra leret, svagt sandet moræneler til stenet, sandet moræneler indikerer en to-delning af moræneleren, der er tolket som aflejret ved to forskellige isfremstød. Denne opdeling af moræneleren stemmer overens med resultater fra gamma-logs fra boringer på lokaliteten.

**Litteraturgennemgang:** Det har været diskuteret, om der skulle udgraves et 2-3 m dybt geologisk profil for at kunne vurdere sprækkestrukturerne nærmere i moræneleren. Dette blev dog bl.a. af sikkerhedshensyn ikke udført, og i stedet blev der anvendt oplysninger fra nærliggende lokaliteter, hvor GEUS har lavet undersøgelser. På baggrund heraf er den konceptuelle model udbygget med information omkring retning, størrelse og antal af sprækkerne i moræneleren.

### **Opdateret konceptuel hydrogeologisk model efter fase 1**

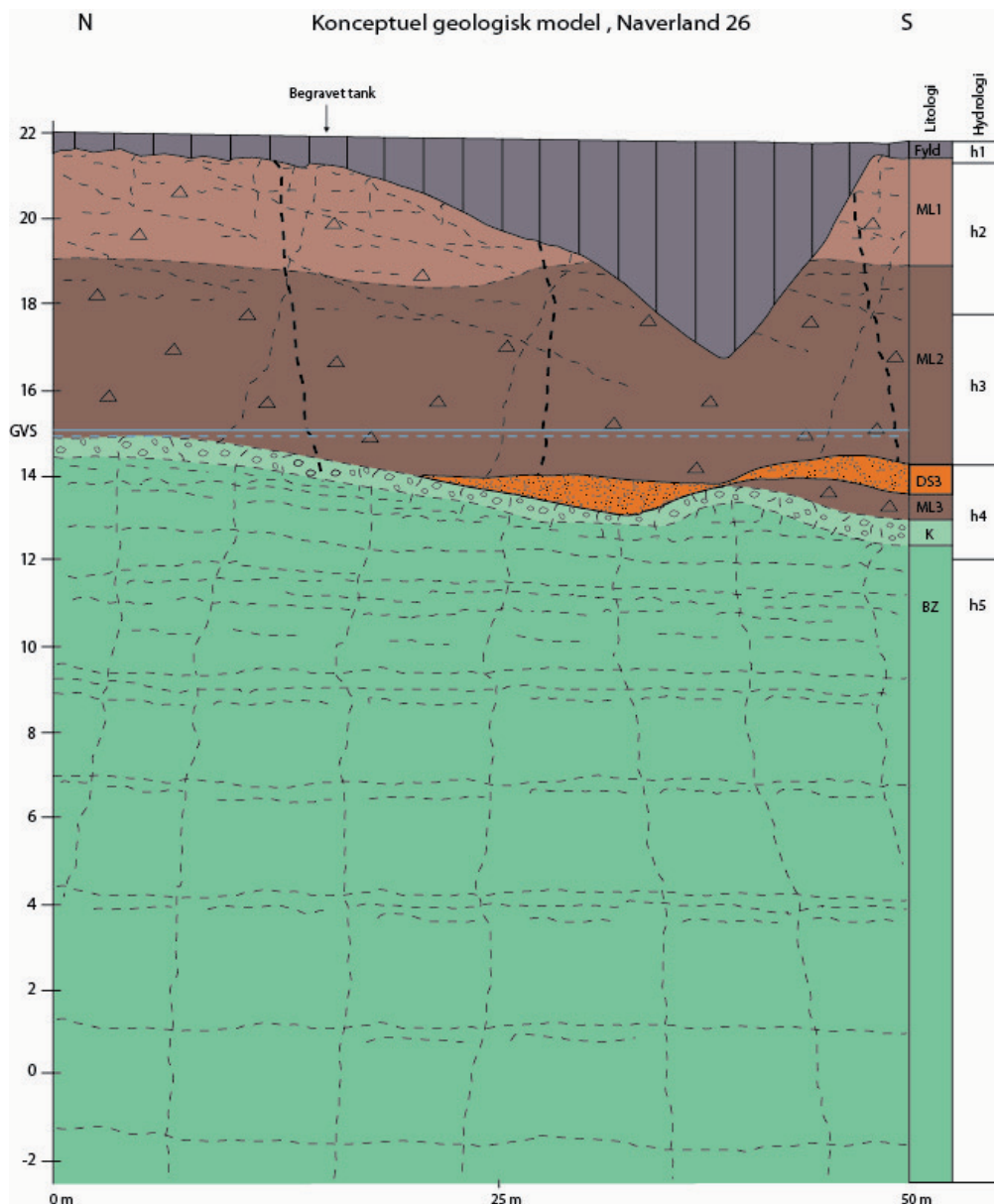
Figur 1 på næste side viser den opdaterede konceptuelle model. Modellen er optegnet i oktober 2011 og viser, hvorledes de geologiske enheder kan opdeles i fem overordnede hydrogeologiske enheder; H1-H5. For hver enhed er der foretaget en detaljeret tolkning og beskrivelse af sprækkeforhold, grundvandsstrømningsforhold, betydning for spredning/tilbageholdelse af DNAPL samt nuværende vidensniveau.

### **Fase 2 undersøgelser**

I fase 2 (oktober 2011 - januar 2012) er der udført en lang række yderligere undersøgelser, herunder fem boringer med intaktprøver i moræneleren samt tre boringer med udtagning af intaktkerner i kalken. Intaktprøverne fra kalken og moræneleren er analyseret hos GEO for porøsitet og permeabilitet. Desuden er der udført bestemmelse af de hydrauliske forhold i kalken med Water Flute (tilsvarende flowlog). Et af hovedformålene med disse undersøgel-



ser har været at opnå en bedre forståelse for strømnings- og spredningsforhold i kalken. Data skal derfor sammentolkes med de tidligere indsamlede data og anvendes til en endelig opdatering af den konceptuelle hydrogeologiske model. Resultater fra disse undersøgelser vil blive præsenteret på Vingsted.



Figur 1: Opdateret konceptuel hydrogeologisk model fra Naverland 26 udarbejdet af COWI i oktober 2011



## APPLICABILITY OF AN ACTIVATED CARBON STRIP ON NAPL FLUTE® FOR DNAPL CHARACTERIZATION IN A CHALK AQUIFER

Monique Beyer<sup>1</sup>, MSc-Student, s101186@student.dtu.dk, DTU Miljø, Miljøvej B113, 2800 Kgs. Lyngby; Gry S. Janniche<sup>1</sup>, Poul L. Bjerg<sup>1</sup>, Carl Keller<sup>2</sup>, Anders G. Christensen<sup>3</sup>, Henriette Kern-Jespersen<sup>4</sup>, and Mette M. Broholm<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DTU Miljø, <sup>2</sup>Flexible Liner Underground Technologies, LLC, <sup>3</sup>NIRAS, <sup>4</sup>Region Hovedstaden

### Background

Chlorinated solvents (PCE, TCE and TCA) are expected to be present as Dense Non Aqueous Phase Liquid (DNAPL) in the chalk aquifer at the site Naverland in Albertslund. The behavior of DNAPLs in fractured media, in particular chalk, is poorly understood and characterization is a difficult task. There is a need for a high vertical resolution with respect to contaminant distribution in a difficult media to access. A new characterization method namely FACT FLUTE®, combining an activated carbon strip and a NAPL FLUTE Liner®, was one of several characterization methods which were tested at the Naverland site and compared in terms of their applicability for DNAPL characterization in the chalk aquifer. The scope of the MSc thesis was to evaluate the applicability of the carbon strip through laboratory testing and application of laboratory results to field data from the site.

### Methodology

The application of the FACT FLUTE as a characterization method is developed and described in this study by conducting adsorption and desorption experiments. Adsorption and desorption curves for PCE on an activated carbon strip were obtained and conclusions made for the adsorption/desorption behavior of a mix (TCE, TCA, cis-DCE and PCE) of the given chlorinated solvents in form of DNAPL and dissolved chlorinated solvents. Moreover the method with the highest recovery and the equilibrium times to adapt exposure time of the FACT liner in the aquifer and during extraction were found.

The evaluation of field data was conducted and the site was evaluated based on laboratory results. The common characterization by groundwater sampling (depth discreet) does not allow for differentiation of DNAPL presence and high aqueous concentrations in features such as fractures or in the matrix. The carbon strip was expected to be a useful tool to differentiate the presence of DNAPL phase and high dissolved concentrations of chlorinated solvent with a high vertical resolution. Hence, it was expected to be of high value in the evaluation of the field data.

### Results

Adsorption experiments showed equilibrium time is reached after 180 h, however due to fast adsorption during the first 12 h, a minimum contact/application time of 24 h of the liner in the bore hole is set. Pentane extraction was found to be the best extraction method for analysis. Extraction with water showed very low recovery, however arising also the opportunity to store/preserve the samples in water. Furthermore the minimum time of 48 h is set for extraction to reach a state close to equilibrium. In contrast to pentane analysis, other extraction techniques (e.g. with use of acetone or methanol) require handling/addition of chemicals in the field.

Results regarding chlorinated solvent concentrations on activated carbon show good analogy of evaluation over depth to obtained data from soil sampling, PID and soil air (MIP, only obtained in clay till) data. Furthermore the combination of staining and concentration data was found to be very useful to trace hot spots with high chlorinated solvent content or DNAPL presence and to distinguish between probable DNAPL presence (according to the staining) or high aqueous chlorinated solvent concentration (high concentration on carbon strip). However as disadvantage it is important to mention that back calculation to water or soil concentration is not possible, due to too high complexity of adsorption processes. Unfortunately water concentration data will be obtained in week 13, so comparison with these data could not be made. However different types of staining on the FLUTE liner were observed and reproduced leading back to DNAPL presence and high chlorinated solvent content in the water phase.

## **DNAPL KARAKTERISERING PÅ NAVERLAND 26 RESULTATER AF DNAPL KARAKTERISERING I MORÆNELER OG KALK, SAMMENLIGNING AF METODER**

Gry Sander Janniche<sup>1,\*</sup>, Annika Sidelmann Fjordbøge<sup>1</sup>, Monique Beyer<sup>1</sup>, Anders G. Christensen<sup>2</sup>, Bernt Grosen<sup>3</sup>, Henriette Kerrn-Jespersen<sup>4</sup>, Mette M. Broholm<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DTU Miljø, Miljøvej 113, 2800 Kgs. Lyngby, \*gsja@env.dtu.dk, tlf. 45251596, <sup>2</sup>NIRAS, Sortemosevej 19, 3450 Allerød, <sup>3</sup>COWI, Parallelvej 2, 2800 Kgs. Lyngby, <sup>4</sup>Region Hovedstaden, Kongens Vænge 2, 3400 Hillerød.

### **Baggrund og formål**

For at opnå øget viden om DNAPL karakteriseringsmetoder, der er relevante for typiske danske geologiske formationer, har Region Hovedstaden iværksat et samarbejdsprojekt med DTU Miljø, hvor direkte og indirekte metoder til påvisning af DNAPL i moræneler og kalk afprøves på Naverland 26, Albertslund. Metoderne er primært dybde diskretiserende undersøgelser. Projektet gennemføres i samarbejde med COWI og NIRAS.

Fokus i denne præsentation vil være på resultaterne fra de vertikale diskretiserede metoder, der sammenlignes med koncentrationerne af PCE og TCE i de intakte ler- og kalkkerner. Den efterfølgende præsentation af Annika S. Fjordbøge vil give en konceptuel forståelse for Naverland 26 samt vores foreløbige anbefalinger til DNAPL screeninger.

### **Metoder**

Geologien på Naverland 26, der er beskrevet detaljeret af COWI, består overordnet set af 8 m moræneler, der overligger en kalkformation med vandspejlet stående omkring overgangen. I moræneleren er metoder bl.a. omfattende MIP (ledningsevne, FID og ECD), poredluftskoncentrationer, NAPL FLUTE med aktivt kul (FACT) og hydrophobe farvetest (Sudan IV test kit og DNAPL-spray) afprøvet og dokumenteret ved jordprøver fra intakte kerner.

I kalk er NAPL FLUTE med aktivt kul og hydrophobe farvetest (Sudan IV test kit og DNAPL-spray) benyttet og sammenholdes med diskrete grundvandsprøver og jordprøver fra intakte kerner.

### **Resultater**

Der blev konstateret DNAPL i moræneleren, både vha. sudan IV, NAPL FLUTE, og total koncentration i leren, som nogle steder var ganske overfladenær (ca. 40 cm under terrænoverflade (u.t.)). Den højeste PCE koncentration blev fundet 2,4 m u.t., og var 23 g/kg, mens den højeste TCE koncentration var 2 g/kg i 0,6 m u.t. I moræneleren blev 13 MIP sonderinger udført med næsten konstant "overflow" på ECD'en (specifik detektor for chlorerede stoffer), hvorfor FID-udslag i stedet blev benyttet til forureningsfortolkningen. I præsentationen vil FID-data fra tre områder i moræneleren (radius på ca. 1 m) blive sammenlignet med resultater fra poredluft, kerneprøver, NAPL FACT FLUTE, og vandprøver udtaget i bunden af morænelerspakken.

Der er generelt god overensstemmelse mellem metoderne på trods af relativ stor variation inden for korte afstande (2-3 m).

Der blev udført tre kalkboringer med udtag af intakte kerner. På trods af den kraftige DNAPL forurening i moræneleren blev der kun fundet begrænset DNAPL i kalken: der blev maksimalt fundet 184 mg/kg PCE og 53 mg/kg TCE. Dette kan dog være påvirket af, at der blev benyttet borevand til kerneboringen, som kan have "skyllet" kernerne.

I det åbenstående borehul blev NAPL FACT FLUTE installeret i 48 timer, uden der blev observeret entydig DNAPL farvemarkering. Herefter blev der udført hydraulisk profilering, der viste en relativ stor vertikal variation i grundvandsstrømningen. Resultaterne vil blive præsenteret og sammenlignet, samt den planlagte vandprøvetagning – der vil medio marts blive udtaget diskrete vandprøver vha. WATER FLUTE (12-13 prøver pr boring). Disse vandprøver vil fungere som en endelig verifikation af forureningsniveauet i den pågældende dybde.

## **SAMLEDE ERFARINGER MED DNAPL SCREENINGSMETODER PÅ NAVERLAND 26 OG ANBEFALINGER TIL FORTSAT ARBEJDE**

Post.doc. Annika S. Fjordbøge, DTU Miljø, asfj@env.dtu.dk  
Gry Sander Janniche, Monique Beyer, Mette Broholm, DTU Miljø  
Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden  
Bernt Grosen, COWI  
Anders G. Christensen, NIRAS

### **Baggrund og formål**

Tilstedeværelsen af DNAPL på en forurenede lokalitet har stor betydning for risikovurdering og den videre håndtering af lokaliteten. En ordentlig karakterisering af DNAPL er derfor vigtig, og der er et behov for at undersøge screeningsmetoder til karakterisering af DNAPL i moræneler og kalk. DTU Miljø, Region Hovedstaden, COWI og NIRAS samarbejder om, at afprøve en række DNAPL screeningsmetoder på Naverland 26. Lokaliteten, den konceptuelle model og de anvendte metoder er beskrevet i de foregående præsentationer.

Formålet med denne præsentation er at give et overblik over de opnåede erfaringerne med metoderne med henblik på forekomst og spredning af DNAPL på lokaliteten, samt give foreløbige anbefalinger for metodernes anvendelse.

### **Geologiske og geofysiske undersøgelser**

DNAPL screeningsmetoderne blev afprøvet i flere etaper. Indledningsvis blev geologien undersøgt for bl.a. at klarlægge orienteringen af sprækkerne i moræneleret. COWI udførte også geofysisk til bestemmelse af overfladen af moræneler og kalk. Refleksioner af georadarbølger har af bl.a. US Geological Survey tidligere været anvendt til at bestemme DNAPL i undergrunden. Der blev på lokaliteten observeret en lovende refleksion, men dette i et område, hvor DNAPL ikke senere kunne eftervises. Undersøgelserne var dog velegnede i forbindelse med den efterfølgende etape, hvor prøvetagningspunkter blev bestemt på baggrund af den mulige spredning i sprækker og langs overfladen af moræneleret.

### **Poreluftmålinger og MIP sonderinger**

Poreluftmålinger (klorerede opløsningsmidler og radon) blev udført i op til 3 dybder i 0,3-5,5 m u.t. Målingerne var nemmest at udføre i fyldlaget, mens moræneleret havde et højt modtryk (vakuum). Dette var ikke alene svært at arbejde med, men skaber også tvivl om sammenhængen mellem resultaterne fra forskellige dybder (forskellig tryk). Der var ingen direkte korrelation mellem koncentrationerne i poreluften og i kerneprøverne. Målingerne i fyldlaget viste dog meget høje koncentrationer over selve kildeområdet, mens en vertikal afgrænsning af kilden ikke umiddelbart var mulig. For radon målingerne var der store variationer i de målte emanationer, der ikke umiddelbart havde en sammenhæng med de målte koncentrationer af klorerede opløsningsmidler. Variationen skyldes formodentligt heterogeniteten af moræneler.

MIP sonderingerne var velegnede til både horisontal og vertikal afgrænsning af forureningen. Af de to detektorer (ECD og FID), vurderes ECD'en at være for følsom til DNAPL screening i et kildeområde med klorerede opløsningsmidler (overbelastet ved ca. 20 mg/kg). FID'en gav et godt overblik over forureningsudbredelsen, og den manglende selektivitet blev kompensert af de sideløbende målinger af komponenter i bæregassen. På baggrund af MIP sonderingerne blev der dannet en bedre konceptuel forståelse af DNAPL spredningen, der både inkluderede overfaldespild (PCE og TCE) og en dybere PCE forurening (tank relateret). Over-

ordnet konkluderes det, at MIP sonderingerne med analyse af bæregassen var den bedst egnede metode til en initial horisontal og vertikal afgrænsning af DNAPL i moræneler. Poreluftmålingerne af klorerede forbindelser kan anvendes til en horisontal afgrænsning af kildeområdet i moræneleret, mens den naturlige variation i radonemanationen forhindrer anvendelsen af denne metode.

### **Screening af jordprøver med PID målinger og farvetest**

De udtagne kerneprøver blev undersøgt vha. PID målinger og to typer farvetest. PID screeningen (håndholdt) gav et godt indtryk af hvilke områder/dybder der var af størst interesse. Dette blev anvendt i forbindelse med udtagning af delprøver. For farvetestene blev den ene type (DNAPL spray) fundet uanvendelig for moræneler, da selv totalconcentrationer på over 20 g/kg ikke resulterede i et udslag. Den anden type (Sudan(IV) testkit) kan påvise DNAPL. Metoden skal dog anvendes med forbehold, da testens farveudslag kan være svært at aflæse i den relativt mørke leropslemning og detektionsgrænsen for DNAPL er relativt høj.

Det blev fundet, at Sudan(IV) testkittet i kombination med PID screening kan give et godt indtryk af, hvor der findes den kraftigste DNAPL forurening af jorden. DNAPL kan dog pga. detektionsgrænsen være til stede uden at der opnås et positivt udslag, mens et positivt udslag giver en entydig indikation af DNAPL.

### **NAPL FLUTE liners**

Der blev installeret NAPL FLUTE liners i de områder på lokaliteten, hvor det var forventet, at DNAPL med størst sandsynlighed var til stede. Selve metoden er forbundet med en vis risiko for DNAPL spredning, da den i kalken installeres i et åbent borehul. FLUTE linerne blev, som tidligere præsenteret, brugt til at undersøge koncentrationer i vandet i formationen (sorption til aktiv kulstof), samt til direkte at undersøge tilstedeværelsen af DNAPL. Generelt var der en god overensstemmelse mellem koncentrationerne i kerneprøverne og på kulstoffet, uden der dog var fuld overensstemmelse (horisontal afstand på 1-2 m). Det blev fundet, at høje koncentrationer i kernerne, eller på kulstoffet, ikke var ensbetydende med en farvereaktion. På baggrund af koncentrationerne i kerneprøverne er det vurderet i hvilke dybder, det forventes, at der er DNAPL til stede. Der blev dog ikke dannet farveplamager på linerens materiale i alle disse dybder. Eftersom kernerne er udtaget op til 2 m fra punktet hvor lineren er installeret, kan dette skyldes en heterogen spredning af DNAPL over selv korte afstande. Metoden må formodes at være afhængig af, hvor mobil en DNAPL der er tale om. Metoden er altså velegnet til at detektere DNAPL i direkte kontakt med lineren, mens tilstedeværelsen af residual DNAPL relativt tæt på lineren kan overses. Kombinationen med målinger af vandkoncentrationerne er dermed anbefalelsesværdig, da det giver et bedre indtryk af, om der er andre områder som evt. også er interessante.

### **Opsamling og fremtidige fokusområder**

Arbejdet på Naverland 26 er stadig igangværende, vurderingen af de enkelte metoder kan dermed ændre sig efter det fulde overblik er opnået. Det vurderes dog generelt, at de forskellige undersøgelsesmetoder har resulteret i et relativt godt overblik over spredningen af DNAPL i moræneleret. Baseret på de omfattende resultater for moræneler var det forventet, at der ville blive fundet DNAPL i kalken. Det lykkedes dog kun at finde residual DNAPL (>150 mg/kg) i ét punkt i kalken, hvilket har begrænset de indsamlede erfaringer. Desuden var flere af metoderne ikke anvendelige i kalken, hvormed et fremtidigt fokusområde kan være yderligere undersøgelser af screeningsmetoder for kalkmagasiner. Specifikt for Naverland, da inkluderer det fremtidige arbejde en opdatering af den konceptuelle forståelse, når de sidste undersøgelser er gennemført.



## **APPROACHES TO QUANTIFYING UNCERTAINTY IN MASS ESTIMATES AT DNAPL SITES**

Gary Wealhall, Geosyntec Consultants, Inc., 130 Research Lane, Guelph, Ontario, Canada,  
N1G 5G3 Phone: +1.519.822.2230 ext. 333 Mobile: +1.519.400.8033,  
gwealhall@geosyntec.com

Since the true distribution of DNAPL at a site can never be known, methods are required to understand the sensitivity of numerical models to specific input parameters, identify the sources of uncertainty, and hence increase confidence in predictive capability.

Uncertainty in the characterization of DNAPL source zones arises from a number of sources, including i) the inherent complexity of heterogeneous subsurface environments, ii) limitations in the tools that are available to delineate contaminant distribution in 3D space and iii) the simplifying assumptions that are adopted for the reconstruction, visualization and quantification of contaminant mass. Whilst process understanding of the fate of DNAPLs in geological media at the microscopic scale has advanced significantly in the past decade, one of the remaining challenges is the development of a methodology to reduce uncertainty in the selection of conceptual site models early in an investigation program in order to limit the application of unwarranted field methods and minimize the amount of redundant data.

Assessment of uncertainty in environmental studies often includes an evaluation of two types of information that define the processes governing DNAPL distribution in the subsurface. Firstly, analytical information that arises from the qualitative and quantitative determination of environmental parameters. Here it is important to recognise that the sampling and preservation of samples may result in more significant variability than the error from an instrument used to measure a specific parameter. Secondly, spatial information concerns the distribution of environmental parameters in the subsurface and includes geological, hydrogeological and geochemical data. The spatial representativeness of a single measurement depends on the parameter, the technique and the site features. Spatial uncertainty is strongly correlated to changes in sample density, which is different from variability observed in analytical information, and is often a problem of time and cost at DNAPL sites.

The use of Monte Carlo methods for estimating uncertainty in DNAPL mass will be discussed for a range of geological environments and DNAPL types, by reference to published literature and best practice guidance. Examples of case studies from highly instrumented research sites will be compared to sites where standard site investigation tools have been used to reduce uncertainty in the prediction of DNAPL mass.



## **MASSEBESTEMMELSE I PRAKSIS: CASE HØFDE 42. HVORDAN ER MASSEBEREGNINGER UDFØRT, OG HVOR LIGGER UDFORDRINGERNE PÅ EN DNAPL LOKALITET?**

Civilingeniør, ph.d. Lars R. Bennedsen, Rambøll, lrsb@ramboll.dk  
Mette Christophersen, Rambøll  
Kirsten Rügge, Torben H. Jørgensen og Lars Nissen, COWI  
Freddy S. Petersen, Kogsgaard Miljø  
Leah MacKinnon og Neal D. Durant, Geosyntec Consultants, USA  
Morten Bondgaard og Børge Hvidberg, Region Midtjylland

### **Baggrund**

Høfde 42 er i dag kraftigt forurenede med 200-300 tons pesticidprodukter (primært parathion), da området mellem 2 sandklitter tæt på Vesterhavet i perioden fra 1953 til 1962 med myndighedernes tilladelse blev anvendt til deponering af store mængder kemisk affald. Der er fundet mere end 100 forskellige forureningskomponenter på lokaliteten. I dag er området på 20.000 m<sup>2</sup> omkranset af en 14 m dyb jernspuns, som er banket ned i en lerformation, hvorefter der er afdækket med en plastmembran. Forureningen med pesticider findes primært som DNAPL, hvor hovedparten er til stede som residual fri fase.

### **Formål**

En serie forsøg med metoden in situ basisk hydrolyse bliver gennemført ved Høfde 42 i perioden 2011–2013 under projektet NorthPestClean ([www.NorthPestClean.dk](http://www.NorthPestClean.dk)), som finansieres af EU under Life+ 2009 programmet, Miljøstyrelsen og Region Midtjylland. Formålet med forsøgene er at dokumentere effektiviteten af oprensningsmetoden in situ basisk hydrolyse ved pilotforsøg i stor skala.

Formålet med denne præsentation er at illustrere og diskutere udfordringerne forbundet med karakterisering af DNAPL og udførelsen af masseberegninger, når den frie fase findes i forskellige geologiske lag og er til stede både som residual og mobil fri fase. Udfordringerne med DNAPL pesticider er den samme som for klorerede opløsningsmidler.

### **Projektet**

Pilotforsøgene udføres i tre spunsede testceller på hver 100 m<sup>2</sup>. Som første led i projektet er der udført en detaljeret karakterisering af geologi samt koncentrationer og fordeling af forurening i vand og jord. Pga. det kraftigt toksiske miljø er der anvendt specialiserede metoder til udførelse af undersøgelsen.

I hver testcelle er der etableret 9-10 karakteriseringsboringer, hvorfra der er udtaget blandede prøver for hver ½ meter gennemboret lagserie. Geologi og tilstedeværelse af DNAPL er beskrevet i detaljer. Hver boring er filtersat i 3 niveauer, som repræsenterer indsatsområdet for kote 0,0 m til ca. kote -2,9 m. Ved den indledende karakterisering er der i alt udtaget over 400 jordprøver og 90 vandprøver. Hver prøve er analyseret for 18 forureningskomponenter og hydrolyseprodukter.

### **Resultater**

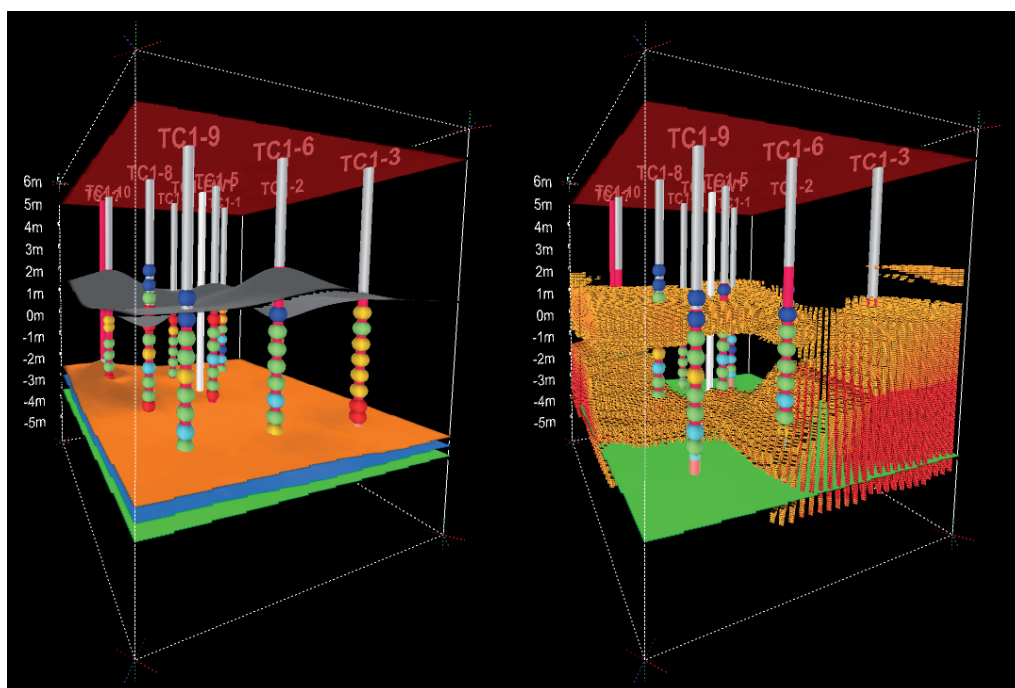
Resultaterne fra den indledende karakterisering er anvendt til udarbejdelse af 3D-modeller for geologi og forureningsfordeling i testcellerne for bedre at kunne forstå og evaluere den

planlagte basiske hydrolyse, se eksempel i figur 1. Desuden er der udført masseberegninger på samtlige analyserede forureningskomponenter og hydrolyseprodukter i både jord og grundvand.

Resultaterne viser bl.a., at forureningen med DNAPL er fordelt over et større vertikalt interval end forventet og at en stor andel af forureningsmassen ligger over indsatsområdet. Der er ligeledes påvist et højt indhold af kviksølv i jordprøver udtaget over indsatsområdet.

På temadagen gives et overblik over de opnåede resultater og erfaringer fra den indledende karakterisering af DNAPL i testcellerne ved Høfde 42. Specielt lægges der vægt på udfordringerne ved at bestemme forureningsmassen af parathion, når den findes dels som sorberet til sandpartiklerne, dels som residual og mobil fri fase og endelig også delvist opløst i vandfasen.

Principper for masseberegningen samt korrelationer/manglende korrelationer mellem observeret fri fase og målte koncentrationer i jordprøver vil desuden blive diskuteret.



Figur 1. Eksempler på 3D optegning af geologiske lag (til venstre) og fordelingen af fri fase (til højre).

## SUCCEFULDT PILOTFORSØG MED OPRENSNING AF RESIDUAL FRI FASE PCE VED HJÆLP AF STIMULERET REDUKTIV DEKLORERING I KÆRGÅRD PLANTAGE.

Civilingeniør Torben Jørgensen, COWI, tjr@cowi.dk  
Lars Nissen, COWI  
Lars Bennedsen, Mette Christophersen, Rambøll  
Neal Durant og Leah MacKinnon, Geosyntec Consultants, USA  
Jørgen Fjeldsø Christensen, Region Syddanmark  
Preben Bruun, Miljøstyrelsen

### Baggrund

Stimuleret reduktiv deklorering (SRD) er i Danmark en moden teknologi til oprensning af klorerede ethener i grundvandszonen. Metoden er dog ikke så veludviklet til oprensning af fri fase, men det er et område med igangværende forskning og udvikling. Ved oprensning af fri fase forurening er der nogle særlige udfordringer, som typisk ikke ses ved oprensning af opløst forurening med lavere koncentrationer: Der kan ske inhibering af dekloreringen pga. de høje koncentrationer af klorerede ethener. Ved den trinvis nedbrydning af PCE til ethen sker der produktion af syre (HCl), hvorved pH værdien kan falde til under det ønskede niveau (pH 6,5-8,1). Det er især nedbrydning af vinylchlorid til ethen, som er meget følsom over for lav pH

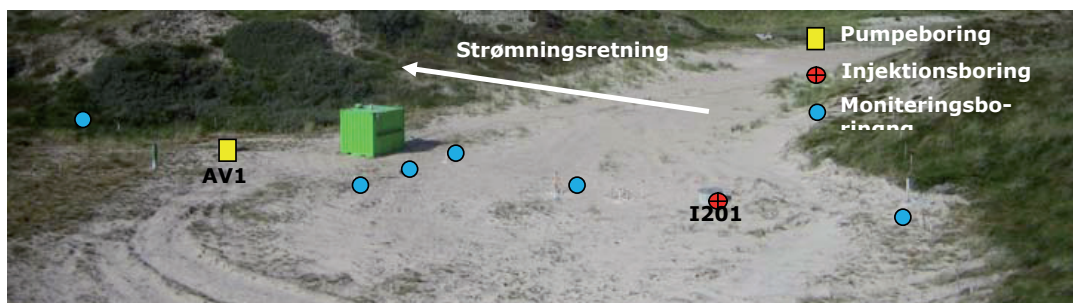
Erfaringerne fra Nordamerika viser, at SRD kan være en kosteffektiv metode til oprensning af fri fase forurening med klorerede opløsningsmidler sammenholdt med mere aggressive metoder som kemisk oxidation og termiske metoder. SRD har derfor indgået som én af de testede metoder til oprensning af den kraftige forurening med klorerede opløsningsmidler under grube 1 og 2 på Kærgård Plantage. I perioden 2009-2011 er der således gennemført både laboratorie- og pilotforsøg med SRD.

### Formål

Formålet med pilot testen var at undersøge om SRD er en kosteffektiv afværgemetode til oprensning af forureningen med klorerede opløsningsmidler under grube 1 og 2, i et område med mindre mængder af fri fase forurening. Testen blev designet og udført for at fremskaffe data til design af en fuldskala-oprensning med SRD, for at undersøge oprensningsgraden og for at estimere omkostninger og tidshorisont for en fuldskalaoprensning.

### Projektet

Pilottestområdet i grube 2 dækker et område på ca. 25 m x 7,5 m og i dybdeintervallet 6-10 m u.t. Pilottesten blev udført med et anlæg til recirkulering af grundvandet. Grundvandet blev oppumpet fra pumpeboring AV1. Det oppumpede grundvand blev tilsat elektrondonor og pH buffer og herefter reinfiltret i injektionsboring I201. Boringsplacering fremgår af figur 1.



Figur 1 Boringsplacering

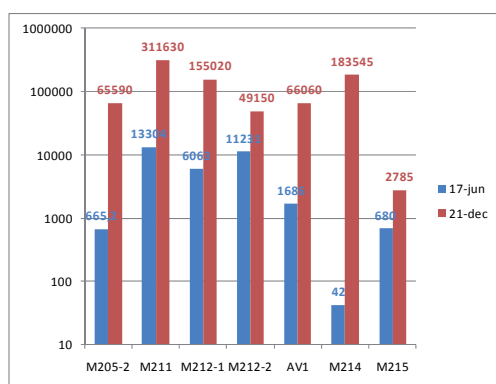
Testen blev startet i juni 2010 og stoppet i juni 2011. Der blev dagligt oppumpet og infiltreret 10-25 m<sup>3</sup> grundvand med enten 12 eller 24 timers drift. Der blev anvendt en blanding af ethanol og laktat som elektrondonor og flere forskellige kombinationer og koncentrationer af pH buffer (NaHCO<sub>3</sub> og Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) blev anvendt i forsøget på at opnå en optimal pH i intervallet 6,5-8,1. Der blev udført en tracertest ved at tilsætte bromid til vandet, som blev infiltreret. I november 2010 blev der tilsat deklorerende bakterier (KB-1®) i infiltrationsboringen for at fremme den biologiske nedbrydning. Under testen foregik en løbende monitoring af de hydrauliske forhold, geokemiske ændringer, transport af elektrondonor, nedbrydning af klorerede opløsningsmidler og tilstedeværelse af deklorerende bakterier.

## Resultater

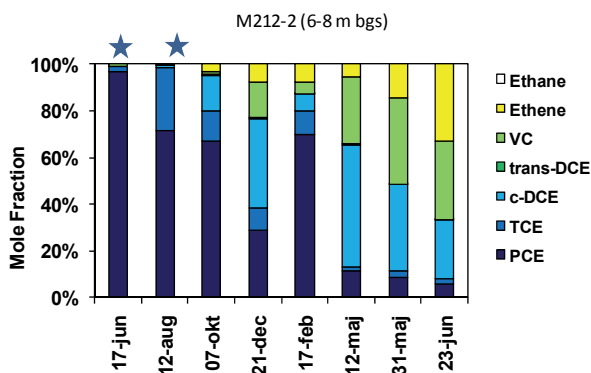
Resultater fra pilottesten har vist, at det anvendte recirkulationssystem kan anvendes i Kærgård Plantage. Forøget deklorering blev observeret i hele behandlingsområdet, men operationelle problemer med pH-kontrol, tilstopning af rør og borer samt tilsætning af elektrondonor kan have begrænset behandlings-effekten.

På designtidspunktet var det forventet, at der ikke var væsentlig fri fase forurening med klorerede opløsningsmidler i testområdet, men efter opstart af pilottesten blev det tydeligt at fri fase var til stede og koncentrationer af klorerede opløsningsmidler i grundvandet steg kraftigt. Stigningen i koncentrations-niveau efter opstart af anlæg ses af figur 2. Udviklingen i sammensætningen af PCE og nedbrydningsprodukter i en monitoringsboring placeret 15 m nedstrøms injektionsboringen ses af figur 3, hvoraf det fremgår, at stort set al PCE er nedbrudt efter 1 års drift med ligeligt fordelte koncentrationer af cDCE, VC og ethen.

Resultater fra pilottesten viser, at SRD kan være en kosteffektiv metode til nedbrydning af høje koncentrationer (>100 mg/l) af PCE til ethen, hvis der sikres tilstrækkelig tilførsel af elektrondonor, pH-buffer og deklorerende bakterier i forbindelse med recirkulering af grundvandet. Baseret på de opnåede resultatet kan det konkluderes, at SRD systemet var effektivt selv ved tilstedeværelsen af fri fase forurening samt høje koncentrationer af PCE og at pilottesten accelererede opløsning og behandling af fri fase. Det blev beregnet, at 200-400 kg PCE blev nedbrudt under pilottesten.



**Figur 2** Totale koncentrationer i µg/l af klorerede opløsningsmidler i vandprøver udtaget før opstart af pilottest (17. juni 2010) og efter 6 måneders drift (21. december 2010).



**Figur 3:** Molfraktioner for klorerede opløsningsmidler i boring M212-2 (6-8 m u.t.) placeret 15 m nedstrøms injektionsboring I201. \*ethen ikke analyseret.