

## Statusprojekt

Teknologiudvikling inden for  
afværge-foranstaltninger over for  
jord- og grundvandsforureninger  
i Danmark

Jacob Skou, Tom Heron, Inger Asp Fuglsang,  
Charlotte E. Riis og Anders G. Christensen

NIRAS A/S

Miljøprojekt **Nr. 1261** 2009  
Teknologiudviklingsprogrammet for  
jord- og grundvandsforurening

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

# Indhold

<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING</b>	<b>7</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>15</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>23</b>
1.1 BAGGRUND	23
1.2 FORMÅL	24
1.3 DATAINDSAMLING	24
1.4 LÆSEVEJLEDNING	25
1.5 OVERSIGTSSKEMA	26
<b>2 TEKNIKKER TIL KILDEOPRENSNING</b>	<b>29</b>
2.1 VAKUUMVENTILATION	29
2.2 AIRSPARGING	35
2.3 MULTI-FASE EKSTRAKTION	39
2.4 FORCERET UDVASKNING AF TJÆREFORURENING	42
2.5 FLUSHING	46
2.6 JORDVASK (EX-SITU)	49
2.7 DAMPSTRIPNING	51
2.8 TERMISK LEDNINGSEVNE	60
2.9 TERMISK JORDBEHANDLING (EX-SITU, ON-SITE)	65
2.10 ELEKTROKEMISK JORDRENSNING (EX-SITU, ON-SITE)	67
2.11 STIMULERET BIOLOGISK NEDBRYDNING - OXIDATION	70
2.12 STIMULERET BIOLOGISK NEDBRYDNING - REDUKTION	75
2.13 FYTOOPRENSNING	88
2.14 KEMISK OXIDATION	95
2.15 GEOOXIDATION	103
2.16 HYDRAULISK FRAKTURERING	107
2.17 PNEUMATISK FRAKTURERING	114
<b>3 TEKNIKKER TIL SPREDNINGSKONTROL</b>	<b>121</b>
3.1 PASSIV VENTILATION	121
3.2 REAKTIV PERMEABEL VÆG (PERMEABEL JERNVÆG)	127
3.3 BIOLOGISK REAKTIV BARRIERE - OXIDATION	132
3.4 BIOLOGISK REAKTIV BARRIERE - REDUKTION	134
3.5 MONITERET NATURLIG NEDBRYDNING	137
3.6 IN-WELL AERATOR	143
3.7 JERNFILTER TIL RENSNING FOR KLOREREDE OPL. (ON-SITE)	148
3.8 JERNFILTER TIL RENSNING FOR KROM (ON-SITE)	150
3.9 KEMISK-BIOLOGISK JERNFILTER (ON-SITE)	152
3.10 BIOLOGISK NEDBRYDNING AF MTBE (ON-SITE)	154
3.11 RENSNING AF MTBE FORURENET GRUNDEVAND (ON-SITE)	156
3.12 BIOLOGISK LUFTFILTER (ON-SITE)	158
<b>4 TEKNOLOGIUDVIKLINGSBEHOV</b>	<b>161</b>
4.1 BAGGRUND	161
4.2 AFVÆRGETEKNIKKER	161
4.3 UDREDNINGSPROJEKTER	165

# Bilag

**Bilag 1: Spørgeskemaer**

**Bilag 2: Oversigtstabel – Afprøvede teknikker**

# Forord

I denne rapport gøres status for teknologiudvikling inden for afværgeforanstaltninger over for jord- og grundvandsforurening i Danmark. Rapporten tager primært udgangspunkt i aktiviteter gennemført under Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening, men der er ligeledes indhentet oplysninger vedrørende udvalgte afværgeforanstaltninger udviklet og/eller afprøvet i andet regi.

Rapporten er en opfølgning på rapporterne "Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", Miljøprojekt nr. 714, 2002, samt "Evaluering af Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", Miljøprojekt nr. 751, 2003.

Rapporten er udarbejdet under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening. I tilknytning til projektets gennemførelse har der været nedsat en styregruppe bestående af Irene Edelgaard, Arne Rokkjær og Ole Kiilerich fra Miljøstyrelsen.

Rapporten er udarbejdet af Jacob Skou, Tom Heron, Inger Asp Fuglsang, Charlotte E. Riis og Anders G. Christensen, alle fra NIRAS A/S.



# Sammenfatning

Siden 1996 har Miljøstyrelsen under ”Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening” ydet støtte til udviklingen af rensnings- og afværgeteknikker på jord- og grundvandsforureningsområdet. Støtten anvendes primært til særlige undersøgelses-, monitorings- eller dokumentationsaktiviteter i tilknytning til oprensninger finansieret af regionerne (de tidligere amter) eller i privat regi.

Ved siden af aktiviteterne under Teknologiprogrammet er der ligeledes gennemført udvikling og afprøvning af rensnings- og afværgeteknikker i andet regi. Disse projekter har været finansieret af regionerne (tidligere amter), af kommuner eller private bygherre og endeligt af uddannelses- og forskningsinstitutioner.

Med denne rapport gøres status for den samlede generelle udvikling inden for rensnings- og afværgeteknikker i Danmark til dato (udgangen af 2007). Rapporten tager primært udgangspunkt i aktiviteterne under Teknologiprogrammet, men der er ligeledes indhentet oplysninger vedrørende afværgeteknikker udviklet og/eller afprøvet i andet regi. Rapporten udgør ikke en samlet liste over alle anvendelige rensnings- og afværgeteknikker overfor jord- og grundvandsforurening, men er blot en status over de væsentligste teknikker som ved udgangen af 2007 er afprøvet i Danmark.

Rapportens beskrivelser er baseret på en omfattende dataindsamling foretaget på baggrund af statusbeskrivelserne i Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening 2007, Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 1 (2007), samt på baggrund af en spørgeskemaundersøgelse blandt de danske regioner, private bygherre samt uddannelses- og forskningsinstitutioner. Spørgeskemaundersøgelsen har taget udgangspunkt i 2 forskellige spørgeskemaer, der blev udført med henblik på dels at opnå et generelt overblik over gennemførte feltaktiviteter i Danmark (pilot eller fuld skala), dels med henblik på at indsamle informationer om, hvor meget teknikkerne anvendes, og hvor stort behovet for yderligere teknologiudvikling vurderes at være.

Der er foretaget en gennemgang af hver enkelt afværgeteknik med hensyn til afværgeprincip, udførte aktiviteter samt resultaterne heraf. Efter beskrivelserne af hver teknik gives en overordnet perspektivering. Teknikkerne er inddelt i de to hovedgrupper; ”Teknikker til kildeoprensning” og ”Teknikker til spredningskontrol” og er opstillet i et oversigtsskema i bilag 2. Med oversigtsskemaet som indgang er rapporten tænkt at kunne anvendes som et opslagsværk.

Endelig gives i rapporten en overordnet vurdering/perspektivering i forhold til fremtidige teknologiudviklingsbehov på baggrund af erfaringer fra de tidligere amter, regioner, kommuner og private bygherre.

På baggrund af gennemgangen har følgende overordnet kunne konkluderes vedrørende de pågældende afværgeteknikker.

## Teknikker til kildeoprensning

**Vakuumentilering.** Teknikken er velafprøvet og finder anvendelse på et stort antal forurenede lokaliteter i Danmark i dag. Teknikken har vist sig effektiv til reduktion af forurening på gasform i den umættede zone. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af vakuumentilering, og at der kun vurderes at være et mindre behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Airsparging.** Teknikken anvendes på en række danske lokaliteter og er baseret på forureningsfjernelse ved stripping til luftfasen eller ved stimuleret aerob nedbrydning. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering, og at der kun vurderes at være et mindre behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Multi-fase ekstraktion.** Teknikken finder anvendelse i begrænset omfang på danske lokaliteter til reduktion af kildeforurening i kapillarzonen mellem den mættede og umættede zone. Der er ikke gennemført aktiviteter under Teknologiprogrammet inden for afværge med multi-fase ekstraktion. Spørgeskemaundersøgelsen pegede dog på, at der vurderes at være et behov for teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Forceret udvaskning af tjærekomponenter.** Teknikken finder anvendelse på få danske lokaliteter til udvaskning og stimuleret nedbrydning af diffus tjæreforurening i den umættede zone. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet kun er anvendt i begrænset omfang, og der vurderes at være et behov for teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Flushing.** Der er ikke fundet data, der dokumentere anvendelse af flushing i Danmark. Spørgeskemaundersøgelsen pegede dog på, at der vurderes at være et behov for teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Jordvask (ex-situ).** Teknikken har været anvendt i begrænset omfang i Danmark og omfatter en gruppe af metoder til enten jordvask eller separation af jordens forskellige fraktioner. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der i de danske regioner ikke er kendskab til om resultater opnået under Teknologiprogrammet er anvendt i forbindelse med jordvask på behandlingsanlæg, og der ikke vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Dampstripping.** Teknikken tilhører gruppen af termiske metoder til in situ oprensning af jord og grundvand i kildeområder og har fundet anvendelse på få række danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Termisk ledningsevne.** Teknikken tilhører ligeledes gruppen af termiske metoder til in situ oprensning af jord og grundvand i kildeområder, der har fundet anvendelse på en række danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen



pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologi-programmet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering, og at der vurderes at være stort behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Termisk jordbehandling (ex-situ, on-site).** Teknikken har været anvendt i begrænset omfang i Danmark til ex-situ behandling af forurenede jord. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der i de danske regioner ikke er kendskab til om resultater opnået under Teknologi-programmet er anvendt i forbindelse med termisk jordbehandling, og der ikke vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Elektrokemisk jordrensning (ex-situ, on-site).** Der er ikke kendskab til at teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at udviklingsbehovet inden for anvendelse af elektrokemisk jordrensning vurderes at være mindre.

**Stimuleret biologisk nedbrydning – oxidation.** Teknikken anvendes på en række danske lokaliteter til stimulering af in situ nedbrydning af organiske forureningskomponenter under iltholdige forhold. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologi-programmet er blevet anvendt i begrænset omfang i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering. Der vurderes i regionerne at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

**Stimuleret biologisk nedbrydning – reduktion.** Teknikken anvendes på en række danske lokaliteter til stimulering af in situ nedbrydning af organiske forureningskomponenter under anaerobe forhold. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologi-programmet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering. Der vurderes i regionerne at være stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

**Fytooprensning.** Teknikken har fundet anvendelse på få danske lokaliteter til fiksering, nedbrydning eller evapotranspiration af forureningskomponenter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologi-programmet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af fytooprensninger, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Kemisk oxidation.** Teknikken anvendes på en række danske lokaliteter til in situ kemisk nedbrydning af primært opløst og sorberet forurening i mættede formationer. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologi-programmet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af oprensninger med kemisk oxidation, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Geooxidation.** Der er ikke kendskab til at teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af geooxidation.

**Hydraulisk frakturering.** Teknikken har fundet anvendelse på flere danske lokaliteter til opsprækning af lavpermeable formationer for derved at muliggøre kontakt mellem ”oprensningsmiddel” og forureningsstoffer. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering. Der vurderes i regionerne at være stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

**Pneumatisk frakturering.** Teknikken er fortsat på udviklingsstadiet men anvendes på enkelte danske lokaliteter til opsprækning af lavpermeable formationer for derved at muliggøre kontakt mellem ”oprensningsmiddel” og forureningsstoffer. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering. Der vurderes i regionerne at være stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

#### Teknikker til spredningskontrol

**Passiv ventilation.** Teknikken finder anvendelse på et stort antal forurenede lokaliteter i Danmark i dag til reduktion af forurening i den umættede zone. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af vakuumentilering, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Reaktiv permeabel væg (Permeabel jernvæg).** Teknikken er fortsat på udviklingsstadiet men anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte danske lokaliteter til nedbrydning eller immobilisering af forurening i den mættede zone. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af vakuumentilering, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Biologisk reaktiv barriere – oxidation.** Teknikken er fortsat på udviklingsstadiet men anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte danske lokaliteter til nedbrydning af forurening i den mættede zone. Der er ikke gennemført aktiviteter under Teknologiprogrammet med denne teknik. Der vurderes dog i regionerne at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling vedrørende denne teknik.

**Biologisk reaktiv barriere – reduktion.** Teknikken anvendes på en række danske lokaliteter til stimulering af in situ nedbrydning af organiske forureningskomponenter under anaerobe forhold. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering. Der vurderes i regionerne at være stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

**Moniteret naturlig nedbrydning.** Teknikken anvendes som en del af afværgestrategien på en række danske lokaliteter til kontrol af forureningsspredning i såvel umættet som mættet zone. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået igennem udviklingsprojekter under Teknologiprogrammet er

blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering, og at der vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for denne teknik.

**In-Well Aerator.** Teknikken er på udviklingsstadiet og har kun fundet anvendelse på få danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der i de danske regioner ikke er kendskab til om resultater opnået under Teknologiprogrammet er anvendt i forbindelse med anvendelse af In-well aeratorer, og at der ikke vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for anvendelsen af denne teknik.

**Jernfilter til rensning for klorerede opl. (on-site).** Der er gennemført et projekt under Teknologiprogrammet med denne teknik. Der er dog ikke kendskab til om teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på andre danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af jernfilter til rensning for klorerede opløsningsmidler.

**Jernfilter til rensning for krom (on-site).** Der er gennemført et projekt under Teknologiprogrammet med on-site jernfilter til rensning for krom. Der er dog ikke kendskab til om teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på andre danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Kemisk-biologisk jernfilter (on-site).** Der er gennemført et laboratorieforsøg støttet af Teknologiprogrammet med kemisk-biologisk jernfilter til rensning for klorerede stoffer. Der er dog ikke kendskab til om teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Biologisk nedbrydning af MTBE (on-site).** Der er gennemført laboratorieforsøg støttet af Teknologiprogrammet med biologisk nedbrydning af MTBE. Der er dog ikke kendskab til om teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Rensning af MTBE forurenede grundvand (on-site).** Under Teknologiprogrammet er der gennemført laboratorieforsøg med sorption af MTBE til forskellige materialer til rensning af MTBE-forurenede grundvand. Der er dog ikke kendskab til om teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

**Biologisk luftfilter (on-site).** Der er ikke kendskab til at teknikken har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter. Spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke vurderes at være behov for teknologiudvikling inden for anvendelse af denne teknik.

## Teknologiudviklingsbehov

Det vurderes, at der generelt er behov for fortsat overførsel, tilpasning, forfining og videreudvikling af nye og gamle afværgeteknikker. Der er behov for at udvikle og afprøve metoder på pilotskala, for at vurdere om de er realistiske at arbejde videre med, og der er behov for at vurdere afværgemetoders bæredygtighed. I den forbindelse er det vigtigt at fokusere på en bæredygtig udvikling af afværgeteknikker.

Ved en markant reduktion af CO<sub>2</sub> på oprensningsprojekter kan der skabes opmærksomhed om bæredygtige afværgeteknikker til klimakonferencen i 2009. Bæredygtighed i forhold til afværgeteknikker skal defineres.

Nedenfor er listet en række teknikker som det ud fra det indhentede datamateriale vurderes relevant at arbejde videre med.

### **Jernpartikler i nano-eller mikrostørrelse**

Udenlandske erfaringer og danske laboratorieforsøg peger på, at jernpartikler i nano- eller mikrostørrelse kan anvendes til afværgeforanstaltninger overfor grundvandsforureninger med klorerede opløsningsmidler og en række andre stoffer.

### **Mikrobiologiske oprensningsmetoder**

Mikrobiologiske oprensningsmetoder vurderes at have et stort potentiale som oprensningsmetoder. Der er fortsat et behov for erfaringsopsamling og dokumentation af velkendte biologiske processer samt en videreudvikling af metoderne f.eks ved tilsætning af enzymer, næringsstoffer og/eller bakterier.

### **Stimuleret reduktiv deklorering**

Stimuleret reduktiv deklorering vinder frem som in situ oprensningsteknik overfor forureninger med klorerede opløsningsmidler både i USA og Europa. Det vurderes at der er et stort potentiale i denne teknik og at der er behov for at arbejde videre med at dokumentere og optimere teknikken.

### **Kemisk oxidation**

Metoden vinder frem, men der er behov for yderligere afprøvning og dokumentation, herunder vurdering af forskellige oxidationsmidler, yderligere forståelse af afledte geokemiske effekter og optimal håndtering og injektion af kemikalier.

### **Frakturering**

Der er behov for udvikling og afprøvning af metoder til oprensning i lavpermeable aflejringer. Metoderne vurderes at have et potentiale men der er behov for yderligere afprøvning og dokumentation.

### **Termiske metoder**

De termiske metoder er dokumenteret velegnede til effektiv oprensning af kildeområder i en række jordlag. Elektrisk opvarmning er ikke anvendt i Danmark, men vurderes at have et potentiale.

### **Oprrensning af fri fase chlorerede opløsningsmidler**

Der er behov for udvikling og afprøvning af oprensningsmetoder til at håndtere fri fase af chlorerede opløsningsmidler.

### **Injektionsmetoder**

For f.eks. oprensninger ved reduktiv dechlorering og kemisk oxidation er projekternes succes oftest meget nært koblet til i hvor høj grad det lykkes at opnå en præcis og tilstrækkelig fordeling af de tildelte behandlingsvæsker. Det vurderes relevant dels at forbedre eksisterende og udvikle nye metoder hertil.

### **Reaktive vægge – soil mixing**

Der vurderes at være et potentiale for at videreudvikle og afprøve af reaktive vægge i første omgang via erfaringsopsamling fra eksisterende projekter. Metoden er under udvikling og afprøvning i USA og Danmark og vurderes at have et potentiale i Danmark.

### **Ex-site jordbehandling**

Det vurderes, at der er behov for udvikling og afprøvning af ex-site metoder, der kan rense for f.eks. tungmetaller.

### **In Situ Airsparging, IAS**

In situ airsparging som anvendes overfor flygtige eller aerobt nedbrydelige stoffer i den mættede zone havde tidligere stor fokus og der blev identificeret en række begrænsninger for metoden. Udviklingen af metoden er dog fortsat i udlandet, og anvendeligheden af metoden er forbedret væsentligt på flere punkter. Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling for metoden.

### **Undersøgelsesmetoder**

Der er et stort behov for fortsat udvikling af undersøgelsesmetoder, ikke mindst til detektion og kvantifikation af fri fase samt metoder til fastlæggelse af pålidelige gennemsnitlige niveauer i poreluft samt i grundvand/vandløb.



# Summary

Since 1996, the Danish Environmental Agency has rendered financial support for the development of cleanup and remediation techniques in the field of soil and groundwater pollution under “The Technology Development Programme for Soil and Groundwater Pollution”. The financial support is primarily applied for special investigations, monitoring or documentation of activities in relation to cleanup projects financed by the Danish Regions (the former counties) or under private management.

Parallel to the activities under the Technology Programme, development and testing of the cleanup and remediation techniques has been conducted under other management. These projects have been financed by the Danish Regions (the former counties), Municipal authorities, private builders, and by education and research institutions.

This report gives a status for the total general development within cleanup and remediation techniques in Denmark up to ultimo 2007. The report is primarily based on the activities under the Technology Programme, but also on information on remediation techniques developed and/or tested elsewhere. The report does not include a total list of all cleanup and remediation techniques applied in connection with soil and groundwater pollution, but is merely a status of the most significant techniques tested in Denmark up to ultimo 2007.

The descriptions in the report are prepared from the extensive data collection made on basis of the status descriptions in the “Technology Programme for Soil and Groundwater Pollution 2007”, Information from the Danish Environmental Protection Agency No. 1 (2007), and on the basis of an interview survey in the Danish Regions (the former counties), private builders, and education and research institutions. The interview survey was based on two different questionnaires, which were drawn up partly to achieve a general overview of the activities carried out in Denmark (pilot or full-scale), partly to collect information on the extent of the application of the different techniques, and the need for further technology development.

Each of the remediation techniques has been examined with respect to the principle of the technique, activities carried out, and the remediation results. Hereafter, the overall perspective for each technique is characterised. The techniques are divided into two main groups: “Techniques for cleanup of sources” and “Techniques to prevent pollution spreading”, and listed in a block diagram with key-figures, Appendix 2. Using the block diagram, the report can be used as a reference manual.

Finally, the report gives an overall assessment/perspective with regard to future technology development needs based on experience from the Danish Regions, Municipalities, and private builders.

On background of the examination, the following overall conclusions concerning the remediation techniques have been made.

## Techniques for cleanup of source zones

**Vacuum ventilation.** The technique is well-documented and is today applied at a large number of polluted sites in Denmark. The technique is proven effective for reduction of gaseous pollution in the unsaturated zone. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, the design of the system and vacuum ventilation, and that the need for further technology development of this technique is minimal.

**Air sparging.** The technique has been applied at a number of Danish sites, and is based on removal of the pollution by stripping to the air phase or by stimulated aerobic degradation. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique and the design and planning of the system, and that the need for further technology development of this technique is minimal.

**Multi-phase extraction.** The technique has only been applied at a limited number of sites for reduction of source pollution in the capillary zone between the saturated and the unsaturated zone. No investigation activities using multi-phase extraction have been made under the Technology Programme. However, the interview survey pointed out that there is a need for technology development of this technique.

**Enhanced leaching of tar components.** The technique has only been applied at a limited number of Danish sites for leaching and stimulated degradation of diffuse tar pollution in the unsaturated zone. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have only been used to a minor extent, and that there is a need for further technology development of this technique.

**Flushing.** No data to document the application of flushing in Denmark has been identified. However, the interview survey pointed out that there is a need for further technology development of this technique.

**Soil washing (ex-situ).** The technique has only been applied at a limited number of sites in Denmark and includes a group of methods for either soil washing or separation of the different fractions of soil. The interview survey pointed out that the Danish Regions have no knowledge as to whether results achieved under the Technology Programme have been used in connection with soil washing at treatment plants, and it is assessed that there is no need for further technology development of this technique.

**Vapour stripping.** The technique belongs to the group of thermic methods for in-situ cleanup of soil and groundwater in source areas and is applied at only few Danish sites. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with choice of technique, the design and planning of the system, and that there is a need for further technology development of this technique.

**Thermic conductivity.** The technique belongs to the group of thermic methods for in-situ cleanup of soil and ground water in source areas, and has been applied at a number of Danish sites. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Pro-



gramme have been used in connection with the choice of technique, the design and planning of the system, and that there is a great need for further technology development of this technique.

**Thermic soil treatment (ex-situ, on-site).** The technique has only been applied to a limited extent in Denmark. The interview survey pointed out that the Danish Regions have no knowledge as to whether results achieved under the Technology Programme have been used in connection with thermic treatment of soils, and it is assessed that there is no need for further technology development of this technique.

**Electrochemical soil treatment (ex-situ, on-site).** There is no knowledge of application of this technology as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that the need for further technology development of this technique is minimal.

**Enhanced biological degradation – oxidation.** The technique has been applied at a number of Danish sites to enhance in-situ degradation of organic pollution components under oxygenic conditions. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used to a limited extent in connection with the choice of technique, and the design and planning of the system. The Danish Regions assess that there is a need for further technology development of this technique.

**Enhanced biological degradation – reduction.** The technique has been applied at a number of Danish sites for enhancing in-situ degradation of organic pollution components under anaerobic conditions. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, and the design and planning of the system. The Danish Regions assess that there is a great need for further technology development of this technique.

**Phytoremediation.** The technique has only been applied at few Danish sites for fixation, degradation or evapotranspiration of pollution components. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, the design and planning of phytoremediation projects, and furthermore that there is a need for further technology development of this technique.

**Chemical oxidation.** The technique has been applied at a number of Danish sites primarily for the in-situ chemical degradation of dissolved and adsorbed pollution in saturated formations. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, the design and planning of cleanup projects using chemical oxidation, and that there is a need for further technology development of this technique.

**Geo oxidation.** There is no knowledge of any application of this technology as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of this technique.

**Hydraulic fracturing.** The technique has been applied at several Danish sites for formation fracturing of low-permeable formations to allow contact between the “remediation agent” and the pollution components. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique and the design and planning of the system. The Danish Regions assess that there is a great need for further technology development of this technique.

**Pneumatic fracturing.** The technique is still in the development stage, but has already been applied at a few Danish sites for formation fracturing of low-permeable formations to allow contact between the “remediation agent” and pollution components. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, and the design and planning of the system. The Danish Regions assess that there is a great need for further technology development of this technique.

#### Techniques for spreading control

**Passive ventilation.** The technique has been applied at a large number of polluted sites in Denmark for reduction of pollution in the unsaturated zone. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique and the design and planning of vacuum ventilation systems, and that there is a need for further technology development of this technique.

**Reactive permeable wall (permeable iron wall).** The technique is still in the development stage, but has already been applied as part of the remediation strategy at a few Danish sites for degradation or immobilization of pollution in the saturated zone. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, and the design and planning of vacuum ventilation systems, and that there is a need for further technology development of this technique.

**Biological reactive barrier – oxidation.** The technique is still in the development stage, but has already been applied as part of the remediation strategy at a few Danish sites for degradation of pollution in the saturated zone. No investigation activities using this technique have been made under the Technology Programme. However, the Danish Regions assess that there is a great need for further technology development of this technique.

**Biological reactive barrier – reduction.** The technique has been applied at a number of Danish sites to enhance in-situ degradation of organic pollution components under anaerobic conditions. The interview survey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique, and the design and planning of the system. The Danish Regions assess that there is a great need for further technology development of this technique.

**Monitored natural degradation.** The technique has been applied as part of the remediation strategy at a number of Danish sites for control of the pollution spreading in the unsaturated as well as the saturated zone. The interview sur-

vey pointed out that results achieved through development projects under the Technology Programme have been used in connection with the choice of technique and the design of system, and that there is a need for further technology development of this technique.

**In-Well Aerator.** The technique is still in the development stage, and has only been applied at a few Danish sites. The interview survey pointed out that the Danish Regions have no knowledge as to whether results achieved under the Technology Programme have been used in connection with In-well aerators, and that there is no need for further technology development of this technique.

**Iron filter for cleanup of chlorinated solvents (on-site).** A project using this technology has been carried out under the Technology Programme, but there is no information about any application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of iron filters for cleanup of chlorinated solvents.

**Iron filter for cleanup of chromium (on-site).** A project using this technology has been carried out under the Technology Programme, but there is no information about any application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of iron filters for cleanup of chromium.

**Chemical-biological iron filters (on-site).** A laboratory test using this technology has been carried out under the Technology Programme for cleanup of chlorinated solvents, but there is no information about any application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of this technique.

**Biological degradation of MTBE (on-site).** A laboratory test using this technology has been carried out under the Technology Programme, but there is no information about any application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of this technique.

**Cleanup of MTBE pollution in ground water (on-site).** A laboratory test with sorption of MTBE to different materials for cleanup of MTBE polluted groundwater has been carried out under the Technology Programme. There is, however, no information about any application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of this technique.

**Biological air filters (on-site).** There is no information about application of the technique as part of the remediation strategy at Danish sites. The interview survey pointed out that there is no need for further technology development of this technique.

## Technology development - needs

It is assessed that there is general need for a continued transfer, adaptation, refining, and redevelopment of new as well as old remediation techniques. Furthermore, there is a need to develop and test methods at pilot-scale to evaluate whether it is realistic to continue the development of these methods. There is also a need to evaluate the sustainability of the remediation techniques. In this connection, it is important to focus on a sustainable development of the remediation techniques.

Significant reductions of CO<sub>2</sub> emissions in cleanup projects will help to draw the attention to the sustainable remediation techniques at the Climate Conference to be held in Copenhagen in Denmark in 2009. The concept of sustainability in relation to remediation techniques has yet to be defined.

A number of techniques which on the basis of the data material collected are assessed to be relevant to develop are listed below.

### **Iron particles - nano or micro size**

International experience and Danish laboratory tests show that iron particles of nano or micro size can be applied for remediation of groundwater pollution with chlorinated solvents and many other components as well.

### **Microbiological cleanup methods**

Microbiological methods are assessed to have a great potential as cleanup methods. There is a continued need for knowledge collection and documentation of well-known biological processes, and for further development of the methods for example by addition of enzymes, nutrients, and/or bacteria.

### **Enhanced reductive dechlorination**

Enhanced reductive dechlorination is making progress as an in-situ cleanup technique for pollution with chlorinated solvents in both the USA and Europe. It is assessed that there is a great potential for this technique, and that there is a need for further documentation and optimization of the technique.

### **Chemical oxidation**

The application of the method is in growth, but there is a need for further testing and documentation. Furthermore, there is the need for assessment of different means of oxidation, and a deeper understanding of related geochemical effects as well as better methods for optimal management of the injection of chemicals.

### **Fracturing**

There is a need for development and testing of methods for cleanup in low-permeable sediments. The methods are assessed to have potential, but there is still a need for further testing and documentation.

### **Thermic methods**

The thermic methods are well-documented for efficient cleanup of source areas in different soil layers. Electrical heating is not used in Denmark, but is considered to have potential.

**Cleanup of free phase chlorinated solvents**

There is a need for development and testing of cleanup methods for management of free phase chlorinated solvents.

**Injection methods**

The success of cleanup by reductive dechlorination and chemical oxidation is very much dependent on the extent of the distribution of the treatment additives. It is considered relevant to improve the existing method and also develop new methods for this technique.

**Reactive walls – soil mixing**

It is assessed that there is a potential for further development and testing of reactive walls – to begin with via knowledge collection from existing projects. The method is being developed and tested in the USA and Denmark, and is assessed to have a potential in Denmark.

**Ex-site soil handling**

It is assessed that there is a need for development and testing of ex-site methods that can remediate for example heavy metals.

**In-Situ Air sparging, IAS**

In-situ air sparging is applied as remediation method for volatile or aerobic degradable components in the saturated zone, and previously there has been much focus on this technique. However, a number of limitations have been identified for this method. The development of the method is, however, continuing in other countries, and the applicability of the method has been improved in many ways. There is a need for a survey of experience with this method.

**Investigation methods**

There is a great need for further development of the investigations methods, not least for the detection and quantification of free phase and methods for the determination of reliable average levels in soil gas, groundwater and surface water/streams.



# 1 Indledning

## 1.1 Baggrund

Der anvendes i dag en lang række rensnings- og afværgeteknikker, der skal afhjælpe risiko for forureningspåvirkning af mennesker og miljø. Mange teknikker er velafprøvede og deres effekt er veldokumenteret, men der sker ligeledes fortsat en hurtig udvikling af nye innovative teknikker såvel internationalt som i Danmark.

Udgangspunktet for anvendelse af forskellige afværgeteknikker kan være meget forskelligt fra sag til sag. En lang række lokalitetsspecifikke forhold som f.eks. forureningsomfang og -type, geologi og hydrogeologi samt de bygningsmæssige forhold på den konkrete lokalitet har afgørende betydning for forskellige teknikkers anvendelighed.

Målsætningen med implementering af afværgeteknikker på forskellige lokaliteter kan ligeledes være meget varierende. Nogle teknikker tager således udgangspunkt i en oprensning af kildeområdet, hvor forureningsspildet er sket (kildeoprensning), mens andre teknikker sigter mod en begrænsning af spredningen fra kilden til f.eks. grundvand eller indeklime (spredningskontrol).

Siden 1996 har Miljøstyrelsen under "Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening", som i denne rapport betegnes "Teknologi-programmet", ydet støtte til udviklingen af rensnings- og afværgeteknikker på jord- og grundvandsforureningsområdet. Den årlige bevilling til programmet har ligget på ca. 15 millioner kroner i perioden fra 1996 til 2002 og ca. 5 millioner kroner i perioden fra 2002 til 2007, jf. Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening 2007, Orientering fra Miljøstyrelsen Nr. 1 2007. Pengene anvendes primært til særlige undersøgelses-, monitorings- eller dokumentationsaktiviteter i tilknytning til oprensninger finansieret af de tidligere amter (nuværende regioner) eller i privat regi.

Ved siden af aktiviteterne under Teknologiprogrammet er der ligeledes gennemført udvikling og afprøvning af rensnings- og afværgeteknikker i andet regi. Disse projekter har været finansieret af de tidligere amter, af kommuner eller private bygherre og endeligt af uddannelses- og forskningsinstitutioner.

Med denne rapport gøres status for den samlede generelle udvikling inden for rensnings- og afværgeteknikker i Danmark til dato (udgangen af 2007). Rapporten tager primært udgangspunkt i aktiviteterne under Teknologiprogrammet, men der er ligeledes indhentet oplysninger vedrørende udvalgte afværgeteknikker udviklet og/eller afprøvet i andet regi. Rapportens beskrivelser er baseret på en omfattende dataindsamling, jf. afsnit 1.3.

Der er foretaget en gennemgang af hver enkelt afværgeteknik med hensyn til afværgeprincip, udførte aktiviteter samt resultaterne heraf. Efter beskrivelserne af hver enkelt teknik gives en overordnet perspektivering vedrørende den pågældende teknik primært på baggrund af dataindsamlingen, jf. afsnit 1.3. Teknikkerne er beskrevet hver for sig, men i praksis vil det ofte være en fordel

at kombinere flere forskellige teknikker for at efterkomme den ønskede målsætning.

Rapporten er en opfølgning på rapporterne "Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", Miljøprojekt nr. 714, 2002, samt "Evaluering af Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", Miljøprojekt nr. 751, 2003.

## 1.2 Formål

Rapportens overordnede mål er at gøre status for den generelle teknologiudvikling inden for rensnings- og afværgeteknikker over for forurenede jord og grundvand i Danmark til dato (udgangen af 2007).

På baggrund af erfaringer fra de tidligere amter, regioner, kommuner og private bygherre gives ligeledes en overordnet vurdering/perspektivering i forhold til fremtidige teknologiudviklingsbehov.

Statusrapporten tager udgangspunkt i udviklingsprojekter, hvor rensnings- og afværgeteknikker har været afprøvet i praksis enten som pilotforsøg eller i fuld skala på aktuelle lokaliteter i Danmark. Rensnings- og afværgeteknikker, der er afprøvet i laboratorieskala vil således som udgangspunkt ikke indgå som en del af rapporten. Projekter af mere driftsmæssig karakter vil ligeledes ikke indgå.

Det skal bemærkes, at rapporten omfatter beskrivelser af den generelle viden, der er opnået i Danmark på nuværende tidspunkt. De enkelte afsnit vil derfor variere i omfang og detaljeringsgrad.

## 1.3 Dataindsamling

Gennemgangen af aktiviteterne under Teknologiprogrammet er foretaget på baggrund af statusbeskrivelserne i Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening 2007, Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 1 (2007), samt statusrapporten "Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", Miljøprojekt nr. 714, 2002.

Beskrivelserne i Miljøprojekt 714 (2002) er gengivet i denne rapport dog med de opdateringer og erfaringer, der er gjort efter 2002.

Gennemgangen af aktiviteter, der er gennemført i andet regi, er foretaget på baggrund af en spørgeskemaundersøgelse. Spørgeskemaundersøgelsen har taget udgangspunkt i 2 forskellige spørgeskemaer, der er udformet med henblik på følgende:

- Spørgeskema 1 – At opnå et generelt overblik over gennemførte feltaktiviteter i Danmark (pilot eller fuld skala), hvor afværgeteknologier er blevet udviklet og/eller afprøvet uden støtte fra Miljøstyrelsens Teknologiprogram. På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen er der efterfølgende indhentet supplerende informationer vedrørende udvalgte projekter, der vurderedes relevante i forhold til denne rapport.
- Spørgeskema 2 – På et overordnet niveau at indsamle informationer om, hvor meget teknikkerne anvendes, og hvor stort behovet for yderligere teknologiudvikling er. Disse informationer er inddraget i perspektiveringerne



af de enkelte teknikker i rapporten og udgangspunktet for besvarelsen af spørgeskemaet er regionernes egen erfaring med anvendelse af teknikkerne.

Spørgeskemaerne er vedlagt som bilag 1.

Der er rettet henvendelse til følgende aktører inden for jord- og grundvandsområdet i forbindelse med spørgeskemaundersøgelsen:

- Region Hovedstaden
- Region Sjælland
- Region Syddanmark
- Region Midtjylland
- Region Nordjylland
- Danmarks Tekniske Universitet, DTU
- Danmarks Miljøundersøgelser, DMU
- Videntcenter for Jordforurening, VJ
- Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser, GEUS
- Det Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet, KU
- Syddansk Universitet, SU
- Ålborg Universitetscenter, AAU
- Oliebranchens Miljøpulje, OM
- Forsvarets Bygnings- & Etablissementstjeneste, FBE

Spørgeskema 1 er fremsendt til samtlige aktører mens spørgeskema 2 udelukkende er fremsendt til de 5 regioner i Danmark.

Der gøres opmærksom på, at rapporten ikke omfatter en komplet dokumentation af samtlige gennemførte teknologiudviklende feltaktiviteter i Danmark, da der formentlig er en række projekter som ikke er beskrevet i de besvarede spørgeskemaer. Det vurderes imidlertid, at beskrivelserne giver et overordnet overblik.

Som kontrol er en række større rådgivende ingeniørvirksomheder kontaktet for umiddelbart at få en fornemmelse af om væsentlige erfaringer fra gennemførte projekter er undladt. Herved er der fremkommet oplysninger om enkelte projekter som ligeledes er beskrevet i rapporten.

#### 1.4 Læsevejledning

Som nævnt udgør denne rapport en overordnet sammenskrivning af gennemførte feltaktiviteter af teknologiudviklende karakter inden for rensnings- og afværgeteknikker over for forurenede jord- og grundvandsforurening i Danmark. I hvert afsnit refereres til mere detaljerede rapporter vedrørende de beskrevne aktiviteter. Der henvises til referencerne for mere detaljerede oplysninger om teknologier, gennemførte aktiviteter, resultater, vurderinger mv.

Nærværende rapport er tænkt som en generel orientering om de opnåede resultater under Teknologiprogrammet såvel som i andet regi og kan anvendes som et opslagsværk. I bilag 2 er vist en skematisk opstilling af samtlige afprøvede teknikker beskrevet i rapporten med angivelse af anvendelighed overfor forskellige forureningskomponenter, jordlagsforhold, hydrogeologi, lokalitetsstørrelse mv.

Med udgangspunkt i bilag 2 kan der søges yderligere oplysninger om de enkelte teknikker i kapitel 2 og 3. Kapitel 2 omhandler teknikker til oprensning af kildeområder (områder med betydelig forurening; residual eller mobil fri fase). Kapitel 3 omhandler teknikker til spredningskontrol, hvilket i denne rapport karakteriseres som forureningsspredning i poreluft eller grundvand fra et kildeområde. Det skal bemærkes, at enkelte teknikker kan henføres til såvel kapitel 2 som 3.

Kapitel 2 og 3 er underopdelt efter teknik og indeholder en struktureret fremstilling af nøglebeskrivelser og resultater herfor. For mere detaljerede oplysninger henvises til de relevante referencer i slutningen af hvert afsnit.

## 1.5 Oversigtsskema

I tabel 1.1 nedenfor ses en oversigt over teknikker som er beskrevet i rapporten. Tabellen omfatter samtlige teknikker afprøvet under Teknologiprogrammet samt udvalgte teknikker afprøvet i andet regi. Oversigten udgør ikke en samlet liste over alle anvendelige rensnings- og afværgeteknikker overfor jord- og grundvandsforurening, men er blot en status over de væsentligste teknikker som på nuværende (udgangen af 2007) tidspunkt er afprøvet/dokumenteret i Danmark.

Ud over de nævnte projekter er der udført en lang række udredningsprojekter som ikke er beskrevet i nærværende rapport. For en nærmere beskrivelse af disse henvises til "Teknologiprogrammet for jord- og grundvandsforurening", Miljøstyrelsen 2007.

De afprøvede teknikker er i nedenstående tabel 1.1 og i nærværende rapport inddelt i hovedgrupperne; "Teknikker til kildeoprensning", "Teknikker til spredningskontrol".

Det skal bemærkes, at forskellige afværgeteknikker i mange konkrete sager med fordel kan kombineres således, at de enten gennemføres samtidig eller således, at én teknik baner vejen for gennemførelse af den næste (treatment train). I rapportens beskrivelser af hver enkelt afværgeteknik fremgår det, hvilke andre teknikker den kan kombineres med.

Tabel 1.1: Afprøvede teknikker og forureningskomponenter

<b>Teknikker til kildeoprensning</b>	<b>Anvendes overfor</b>
Vakuumentilation	Benzin, klorerede opl., BTEX
Airsparging	Benzin, let gasolie, BTEX, klorerede opl.
Multi-fase ekstraktion	Olie- og benzinprodukter, klorerede opl.
Forceret udvaskning af tjæreforurening	Tjærekomponenter, PAH, BTEX
Flushing	Fri fase forurening af olie- og benzinprodukter, klorerede opl.
Jordvask (ex-situ)	Benzin, let gasolie, klorerede opl.
Dampstripping	Benzin, BTEX, klor. opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot
Termisk ledningsevne med varmelegemer	Benzin, BTEX, klor. opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære
Termisk jordbehandling (ex-situ, on-site)	Tjærekomp., PAH, klorerede opl., BTEX, olie mv.
Elektrokemisk jordrensning (ex-situ, on-site)	Metaller
Stimuleret biologisk nedbrydning – oxidation	Olie- og benzinprodukter
Stimuleret biologisk nedbrydning – reduktion	Klorerede opl.
Fytooprensning	Olie, PAH, Metaller, PCB, TCE,
Kemisk oxidation	Klorerede opl., olie- og benzinprodukter, PAH'er, mange pesticider
Geooxidation	Benzin, let gasolie
Hydraulisk frakturering	Distributionsmetode til optimering af diverse afværgeteknikker
Pneumatisk frakturering	Distributionsmetode til optimering af diverse afværgeteknikker
<b>Teknikker til spredningskontrol</b>	<b>Anvendes overfor</b>
Passiv ventilation	Benzin, BTEX, klorerede opl.
Reaktiv permeabel væg (permeabel jernvæg)	PCE, TCE, TCA, hexavalent chrom
Biologisk reaktiv barriere - oxidation	Olie- og benzinprodukter
Biologisk reaktiv barriere – reduktion	Klorerede opl.
Moniteret naturlig nedbrydning	Olie- og benzinkomponenter, PAH'er, klorerede opl., pesticider
In-well aerator	Klorerede opl., BTEX
Jernfilter til rensning for klorerede opl. (on-site)	PCE, TCE, TCA
Jernfilter til rensning for krom (on-site)	Hexavalent chrom
Kemisk-Biologisk jernfilter (on-site)	PCE, TCE, DCE, VC
Biologisk nedbrydning af MTBE (on-site)	MTBE
Rensning af MTBE forurenede grundvand (on-site)	MTBE
Biologisk luftfilter (on-site)	Klorerede opl.



## 2 Teknikker til kildeoprensning

I dette kapitel gives en overordnet præsentation af en række rensnings- og afværgeteknikker, der har været afprøvet i Danmark enten under Teknologiprogrammet eller i andet regi. Der tages udgangspunkt i teknikker, der har været anvendt til kildeoprensning, hvilket her karakteriseres som oprensning af forurening med tilstedeværelse af betydelig forurening (residual eller mobil fri fase). Der henvises til kapitel 3 for teknologier, der har været anvendt til spredningskontrol.

### 2.1 Vakuumentilation

#### 2.1.1 Afværgeprincip

Vakuumentilation er en velafprøvet in situ afværgeteknik, der er baseret på fysisk fjernelse og således reduktion af flygtige forureningskomponenter (klorerede opløsningsmidler, benzin, BTEX'er mv.) fra den umættede zone.

Ved vakuumentilation etableres en række filtersatte ventilationsboringer centralt i det forurenede område (behandlingszonen) som påtrykkes et vakuum vha. en ventilator. Herved pumpes poreluft og forureningskomponenter på gasform gennem jordmatricen til de filtersatte boringer og videre til et vakuumentilationsanlæg på terræn. Som en sidegevinst medfører vakuumentilationen typisk en tilførsel af iltfyldt jordluft til behandlingszonen, hvorved en eventuel aerob biologisk nedbrydning af f.eks. oliekomponenter kan stimuleres (bioventilation).

Vakuumentilation kan anvendes i sandede jordlag (eller grovere) og en typisk begrænsning i oprensningseffekten er langsom diffusiv frigørelse af forureningskomponenter fra finkornede lavpermeable/vandmættede jordlag i den umættede zone samt fra kapillarzonen.

Vakuumentilation anvendes typisk overfor kildeområder for forurening, men i særlige tilfælde kan små simple ekstraktionsanlæg desuden med fordel anvendes udenfor kildeområder, f.eks. til afværge af forureningsspredning til huse over grundvandsfaner.

Afhængig af forureningstype og forureningskoncentrationer vil det typisk være nødvendigt at foretage rensning af luftafkastet.

I tabel 2.1.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.1.1. Overordnede karakteristika for vakuumventilation som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter mod en reduktion af forurening i den umættede zone såvel terrænnært som i større dybde. Teknikken kan således anvendes til at reducere risikoen for forureningsspredning til grundvand og/eller indeklima i huse.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker til spredningskontrol i grundvandet (f.eks. afværgepumpning, stimuleret biologisk nedbrydning, reaktive permeable vægge mv.), eller den kan kombineres med teknikker til kildeoprensning (f.eks. termiske metoder eller airsparging).
Forureningskomponenter	Teknikken er baseret på forureningsfjernelse i luftfasen og kan derfor primært anvendes overfor flygtige forureningskomponenter som klorerede stoffer, benzin, BTEX'er mv. Teknikken kan dog også anvendes overfor mindre flygtige, men aerobt nedbrydelige stoffer (bioventing)
Geologi i behandlingszone	Behandlingszonen omfatter umættede relativt homogene formationer af sand, grus eller opsprækket kalk med relativ høj permeabilitet.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Under permeable og relativt homogene forhold i den umættede zone sikrer teknikken en effektiv udluftning og således bortventilering af flygtige forureningskomponenter.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der er tale om en simpel og velafprøvet afværgeteknik.</li> <li>• Er behandlingszonen umættet, højpermeabel og relativt homogen er teknikken forbundet med stor sikkerhed for effekt.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ved mindre inhomogeniteter i den umættede zone er der risiko for tilbageslag (rebound) af forureningen efter endt behandling.</li> <li>• Etablering vil være forbundet med visse støjgener.</li> <li>• Driften af anlægget er forbundet med omkostninger til bl.a. strøm, kulfiltre mv.</li> <li>• Afværgeteknikkens effekt er meget begrænset i lerjord og teknikken har ingen direkte effekt i vandmættet jord.</li> </ul>

## 2.1.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført to afværgeprojekter med vakuumventilation støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 480 (1999), 487 (1999), 678 (2002) og 898 (2004). Herudover er der i 1998 under Teknologiprogrammet ligeledes foretaget en gennemgang af afværgesager med vakuumventilering gennemført af Oliebranchens Miljøpulje (OM), jf. Miljøprojekt 421 (1998).

Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter. Disse projekter er primært finansieret af Miljømyndighederne i forbindelse med den offentlige indsats over for jord- og grundvandsforurening samt af en række private bygherre-, f.eks. OM og Forsvarets Bygnings- & Etablisementtjeneste (FBE).

I nedenstående afsnit tages der udgangspunkt i udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet, mens erfaringer fra sager af mere driftsmæssig karakter indgår som en del af en samlet perspektivering af afværgeteknikken senere i kapitlet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater og perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

### **2.1.2.1 Strøget, Ikast**

På Strøget i Ikast har Rambøll Vand & Miljø gennemført et fuldskala afværgeprojekt med vakuumventilation. Projektet er gennemført for det tidligere Ringkjøping Amt (nuværende Region Midtjylland) og Miljøstyrelsen, som et led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 898 (2004).

Projektet omfattede oprensning af en forurening med primært PCE fra den umættede zone. Geologien på lokaliteten bestod overordnet af sand med indskudte lerlag af varierende tykkelse. På hovedparten af lokaliteten fandtes ligeledes et terrænnært lerlag på op til 6,5 meters tykkelse. Den umættede zone havde en vertikal udbredelse på ca. 17 meter.

Oprensningen blev foretaget ved en kombination af vakuumventilation (fra 6 ventilationsboringer med 1-2 filtre i hver) i det umættede sand og ler samt afværgepumpning (gennemsnitsydelse 4 m<sup>3</sup>/t). Vakuumventilationen foregik over 3 år fordelt på 7 forskellige driftsscenerier, adskilt af en pause mellem hver. Ud over oprensningseffekten har hvert scenarie haft til formål at belyse ét af flere forskellige aspekter ved vakuumventilationen.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At tilvejebringe videngrundlag med henblik på at optimere anvendelsen af vakuumventilation under danske forhold.
- At dokumentere effekten af vakuumventilation på den aktuelle grund.
- At identificere nøgleparametre for dimensionering, monitorering og afslutning af oprensninger med vakuumventilation.
- At udarbejde retningslinier for etablering, drift, monitorering og afslutning af oprensningen på den aktuelle grund.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Etablering af et automatisk on-line GC-system til løbende fastlæggelse af forureningsniveau i ekstraheret poreluft.
- Detaljeret monitorering af forureningsudbredelsen i poreluften (ved hjælp af monitoringsboringer) terrænnært og dybt i den umættede zone samt i grundvandet i et udvalgt område. Monitoreringen har fundet sted henholdsvis før og efter hvert driftsscenario.
- Udtagning af jordprøver omkring en ventilationsboring efter driftsscenario 6 til vurdering af ligevægte mellem forureningsindholdet i jorden og i poreluften.
- Valg af modelværktøj og opstilling af en model til brug for vurdering af design, tests og driftsresultater.
- Detaljeret monitorering under forskellige driftsformer (kontinuert, cyklisk og ved ekstraktion fra forskellige grupper af filtre mv.).

### **2.1.2.2 Drejøgade, København**

Projektet omfattede oprensning af forurening med terpentin og PCE/TCE samt nedbrydningsprodukter fra ca. 8-9 meter umættet zone og toppen af grundvandszonen i sandede jordlag. Oprensningen blev foretaget ved en kombination af vakuumventilation og airsparging fra vandrette boringer. Aktiviteter og resultater vedrørende airsparging er præsenteret i afsnit 2.3.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dokumentere vakuumentilation under danske forhold.
- At fastlægge dimensionsgivende parametre.
- At fastlægge det nødvendige monitoringsprogram til drift og indkøring.
- At fastlægge det nødvendige monitoringsprogram til afslutning af sagen.
- At udarbejde retningslinier for dimensionering, drift og afslutning af sådanne oprensninger, der kan anvendes af bygherrer, myndigheder og rådgivere.

Med henblik på at opfylde disse formål blev der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Design og installation af multilevel samplere.
- Indledende tests til fastlæggelse af hydrauliske/pneumatiske parametre.
- Modellering af konfigurationer og længder af ekstraktionsfiltre.
- Installation af horisontale ventilationsfiltre.
- Etablering af et on-line GC-system til fastlæggelse af forureningsniveau i ekstraheret poreluft.
- Detaljeret monitoring under forskellige driftsformer (kontinuert, cyklisk, ekstraktion fra forskellige filtre mv.).
- Tracertest til vurdering/kontrol af anlæggets dimensionering.
- Monitoring for tilbageslag.

#### **2.1.2.3 Yderligere aktiviteter**

Ud over udviklingsprojekterne finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor vakuumentilation har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Projekterne er primært gennemført af Miljømyndighederne samt af private bygherre som OM og FBE.

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af driftsmæssig karakter. Dokumentationsmaterialet i relation til metodens principper, begrænsninger og effekt vurderes derfor at være for spinkelt. Projekterne ligger imidlertid til grund for besvarelsen af spørgeskemaerne, jf. afsnit 1.3 og bilag 1, og har således betydning for den samlede perspektivering af vakuumentilation som afværgeteknik.

#### **2.1.3 Resultater af aktiviteter**

Nedenfor præsenteres de væsentligste overordnede resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

- Vakuumentilation er en anvendelig teknik til oprensning af flygtige stoffer fra den umættede zone. Forekomst af lavpermeable forurenede jordlag samt puljer af fri fase kan dog afføde vanskeligheder med at nå oprensningsniveauer svarende til eliminering af forureningsrisici og forlænge driftstiden betydeligt.
- En grundig kortlægning af den geologiske lagfølge i behandlingszonen er vigtig for at kunne placere ventilationsboringerne optimalt og derved opnå størst mulig afværgeeffekt.



- Der kan tilvejebringes et rimeligt dimensioneringsgrundlag ved in situ tests med mobilt ekstraktionsudstyr. Disse tests udføres typisk på et mindre antal boringer på lokaliteten og består i samhørende vakuumekstraktion med mobilt udstyr af poreluft fra en boring og registrering af vakuumbredelsen i omkringliggende boringer eller poreluftsonder. Oprensningstrategien bør dog løbende revurderes og korrigeres under driften.
- Gennemførelse af en længerevarende ventilationstest kan give information om, hvordan sænkings- og stigningskurver for forureningskoncentrationer i poreluften forløber. Denne information anvendes til planlægning af pumpestrategi og til en vis grad til forudsigelse af oprensningsforløbet.
- Den markant største reduktion af poreluftens forureningsniveau opnås typisk indenfor de første få dage til uger. Herefter bestemmes forureningsfjernelsen generelt af diffusion fra lavpermeable lag samt opløsning/afdamning fra fri fase og evt. fra afdampning fra grundvandsforurening.
- Efter pumpestop er der observeret tilbageslag i poreluftens forureningsniveau. På Drejøgade i København var tilbageslagene omtrent fuldt udviklede efter ca. en måned og aftog i niveau med antallet af ekstraktionscykluser. På strøget i Ikast forsatte tilbageslaget med en næsten lineær stigning (især i kildeområdet) i mere end et halvt år. Gennemsnitskoncentrationen i kildeområdet var oppe på 15 % af startkoncentrationen 15 måneder efter pumpestop. Generelt vurderes tilbageslagets omfang og hastighed at afhænge af lokalitetsspecifikke faktorer, herunder primært geologi (forekomst af lavpermeable formationer) samt forureningstype og omfang (tilstedeværelse af fri fase, påvirkning fra grundvand mv.).
- Effektiviteten af vakuumentilation er hæmmet af desorption af forureningsstoffet fra indlejrede lerlag samt fordampning af forureningsstoffer fra grundvandet og eventuel fri fase forurening. Disse faktorer kan bevirke, at oprensningen tager betydeligt længere tid end forventet ud fra koncentrationerne i poreluften alene.
- Det vurderes i mange tilfælde at være en teknisk og økonomisk fordel at drive vakuumentilationsanlæg cyklisk med korte driftsperioder efterfulgt af lange pauseperioder, hvor tilbageslag af forurening forekommer.
- På projekterne er der opnået større forureningsfjernelse ved samtidig ekstraktion fra boringer i periferien af og centralt i kildeområdet end ved ekstraktion kun fra centrum af kildeområdet.
- Pumpeydelsen er påvist at betyde mindre for oprensningseffekten, idet en fordobling af ydelsen ikke medførte væsentlig bedre oprensningseffekt.
- Der er observeret størst effekt ved ekstraktion fra dybe filtre, idet luften trækkes ned fra terræn. Derved opnås både påvirkning af terrænnære og dybere forurenede områder. Effekten er dog mindre i områder med et terrænnært lerlag.
- Resultater af ligevægtsberegninger indikerer, at ligevægt mellem en grundvandsforurening og poreluft er flere år om at indstille sig. Derimod indikerer resultaterne at ligevægtsindstillingen mellem jordforureninger og poreluft sker hurtigere.
- Monitering af forureningsniveauet i afkastluft med on-line GC-systemer har medført en lang række forskellige problemer. Systemerne har gennemgående været meget omkostningskrævende, ustabile og har ikke givet data af den forventede kvalitet. På denne baggrund kan den anvendte type GC-systemer først anbefales ved lignende oprensninger efter en væsentlig videreudvikling.
- Anvendelse af modeller i forbindelse med vakuumentilationsprojekter skal ske ud fra en meget klart defineret målsætning, og det bør kritisk vur-

deres, hvorvidt der foreligger eller kan tilvejebringes et tilstrækkeligt detaljeret datagrundlag for modellen. Simuleringer af forureningsfjernelse fordrer modeller med moduler til dynamisk beregning af fasefordelinger. Sådanne modeller kræver dog en erfaren operatør og er forholdsvis omkostningskrævende at opstille og anvende.

#### 2.1.4 Perspektivering

Erfaringerne med anvendelse af vakuumentilation i forbindelse med projekter gennemført under Teknologiprogrammet såvel som projekter gennemført i andet regi er generelt gode. Teknikken er velafprøvet i forbindelse med såvel små som større afværgeprojekter og har vist sig effektiv til reduktion af forurening med flygtige forureningskomponenter i den umættede zone.

Der er på nuværende tidspunkt ikke foretaget en tilbundsgående samlet dokumentation af resultater og erfaringer opnået igennem de sidste 5-10 års drift af vakuumentilationsanlæg på en række udvalgte repræsentative fuldskala afværgeprojekter i Danmark. En sådan dokumentation ligger uden for formålet med dette statusprojekt men vurderes at kunne bidrage med nyttig viden til anvendelse i forbindelse med projektering, etablering og drift af fremtidige afværgeprojekter med vakuumentilation.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. vakuumentilation som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Vakuumentilation anvendes som en del af afværgestrategien på et stort antal danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater, opnået ved aktiviteter gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af vakuumentilation som afværgeteknik på andre danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige at der i regionerne kun vurderes at være et mindre behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med vakuumentilation.

#### 2.1.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.2.1/ Miljøprojekt Nr. 421, 1998: Vakuumentileringssager fra Oliebranchens Miljøpulje. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.2.2/ Miljøprojekt Nr. 480, 1999: Airsparging og vakuumentilation fra vandrette borer på Drejøgade 3-5: Design og anlæg. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.2.3/ Miljøprojekt Nr. 487, 1999: Airsparging og vakuumentilation fra vandrette borer på Drejøgade 3-5: Statusrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

- /2.2.4/ Miljøprojekt Nr. 678, 2002: Airsparging og jordventilation med vandrette borer. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.2.5/ Miljøprojekt Nr. 898, 2004: Vakuumentilering - erfaring med monitering og optimering af drift. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.2 Airsparging

### 2.2.1 Afværgeprincip

Airsparging er en in situ afværgeteknik, der er baseret på indblæsning af atmosfærisk luft i og/eller under den forurenede del af den mættede zone. Ofte foretages indblæsningen 1,0- 1,5 meter under de forurenede jordlag.

Indblæsningen kan dels foretages med henblik på fjernelse af flygtige forureningskomponenter (klorerede opløsningsmidler, benzin, BTEX'er mv.) ved stripping til gasfasen, og dels med henblik på at øge den mikrobielle omsætning af aerobt nedbrydelige stoffer (f.eks. let og tung gasolie), ved tilførsel af ilt med den atmosfæriske luft. Air sparging som udelukkende sigter mod forceret biologisk nedbrydning benævnes ofte "bio sparging".

Ved air sparging vil der oftest være behov for at etablere et vakuumentilationsanlæg til kontrolleret opsamling af flygtige forureningskomponenter som overføres (stripes) fra grundvandszonen til gasfasen i den indblæste luft.

Tabel 2.2.1. Overordnede karakteristika for airsparging

Målsætning	Teknikken sigter mod en reduktion af kildeforurening i den mættede zone. Teknikken kan således anvendes til at reducere risikoen for forureningsspredning i grundvandet.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker til spredningskontrol i grundvandet (f.eks. biosparging) eller teknikker til oprensning i den umættede zone (f.eks. vakuumentilering).
Forureningskomponenter	Teknikken er baseret på enten forureningsfjernelse ved stripping til luftfasen eller ved stimulering af aerob biologisk nedbrydning. Teknikken kan derfor anvendes overfor enten flygtige stoffer eller stoffer der nedbrydes naturligt under aerobe forhold. Af forureningskomponenter kan nævnes klorerede stoffer, benzin, BTEX'er, let olie mv.
Geologi i behandlingszone	Behandlingszonen omfatter mættede (frit magasin) relativt homogene formationer af sand, grus med relativ høj permeabilitet.
Fordele og ulemper	<p>Effekt:</p> <p>Under permeable og relativt homogene forhold i den mættede zone sikrer teknikken en effektiv stripping af flygtige forureningskomponenter til luftfasen og en tilførsel af ilt til forureningszonen i umiddelbar nærhed af air-sparge borerne.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der er tale om en relativt simpel og velafprøvet teknik.</li> <li>• Er behandlingszonen mættet (frit vandspejl), permeabel og relativt homogen er teknikken forbundet med stor sikkerhed for effekt i umiddelbar nærhed af air-sparge borerne.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ved mindre inhomogeniteter i den mættede zone er der risiko for tilbageslag (rebound) af forureningen efter endt behandling.</li> <li>• Etableringen vil være forbundet med visse støjgener.</li> <li>• Driftsperioden kan potentielt blive lang.</li> <li>• Driften af anlægget er forbundet med omkostninger til bl.a. strøm, kulfiltrer mv.</li> </ul>

Airsparging kan anvendes i sandede jordlag eller grovere jordtyper. Den typiske begrænsning i oprensningseffekten er langsom diffusiv frigørelse af forureningskomponenter fra finkornede lavpermeable jordlag i den mættede zone samt fra kapillarzonen. Endvidere kan sådanne lavpermeable jordlag i den mættede zone udgøre en barriere for luftstrømningen og medføre, at den indblæste luft under opstigningen i grundvandszonen strømmer ud af oprensningsområdet og ikke berører de forurenede jordlag. Anvendelse af air sparging i opsprækkede medier som kalk er overordentligt problemfyldt på grund af vanskeligheder med at kontrollere strømningen af den indblæste luft.

Airsparging anvendes overfor kildeområder for forurening på residual fri fase. Større puljer af mobil fri fase bør oppumpes før etableringen af air sparging. På grund af forholdsvis høje driftsudgifter kan air sparging som hovedregel ikke anbefales anvendt overfor forureningsfaner i grundvandet.

I tabel 2.2.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

### 2.2.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført ét afværgeprojekt med airsparging støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 480 (1999), 487 (1999) og 678 (2002). Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes gennemført en række andre afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter. Disse projekter er primært finansieret af Miljømyndighederne i forbindelse med den offentlige indsats over for jord- og grundvandsforurening samt af en række private bygherre, f.eks. Oliebranchens Miljøpulje (OM) og Forsvarets Bygnings- & Etablisementtjeneste (FBE).

I nedenstående afsnit tages der udgangspunkt i udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet, mens erfaringer fra sager af mere driftsmæssig karakter indgår som en del af en samlet perspektivering af afværgeteknikken senere i kapitlet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater og perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### 2.2.2.1 Drejøgade, København

På Drejøgade i København har NIRAS A/S gennemført et fuldskala afværgeprojekt med kombineret airsparging og vakuumventilering. Projektet er finansieret af den tidligere Københavns Kommunes Miljøkontrol (nuværende Region Hovedstaden) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet.

Lokaliteten var primært forurenede med terpentin og PCE/TCE samt nedbrydningsprodukter og geologien udgøres af fint sand med et frit vandspejl ca. 8,5 m u.t. Lokaliteten blev således fundet velegnet til både airsparging og vakuumventilation. Aktiviteter og resultater vedrørende vakuumventilationen er præsenteret i afsnit 2.2 "Vakuumventilation".

Afværgeprojektets primære formål var at reducere forureningspåvirkningen af indeklimaet i beboelserne på ejendommen.

Airsparging blev gennemført ved installation af vandrette filtre 2,5 m under grundvandsspejlet ved "blind-hole" boreteknik, hvorved der fra en grube udenfor selve ejendommen kunne installeres filtre op til 130 m ind under lokaliteten. Driften af airsparging skete ved forskellige driftcykler, for at vurdere effekten af pulserende henholdsvis kontinuerlig airspargingdrift.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dokumentere anvendelsen af air sparging under danske forhold.
- At fastlægge dimensionsgivende parametre for design af filtre samt tilhørende behandlingsanlæg.
- At fastlægge det nødvendige monitoringsprogram til drift, indkøring og afslutning af afværgeindsatsen.
- At udarbejde retningslinier for dimensionering, drift og afslutning af sådanne oprensninger, der kan anvendes af bygherrer, myndigheder og rådgivere.

Med henblik på at opfylde disse formål er der i det samlede projekt med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Design og installation af multilevel samplere i den umættet og mættet zone.
- Indledende test til fastlæggelse af hydrauliske parametre.
- Installeret horisontale borer med filtre til indblæsning af atmosfærisk luft.
- Etableret et on-line GC-system til fastlæggelse af forureningsniveau i ekstraheret poreluft. Systemet blev anvendt til registrering af eventuelle ændringer i forureningsniveauet som følge af start eller standsning af air spargingen.
- Detaljeret monitoring under forskellige driftsformer (kontinuert og cyklisk).
- Monitoring for tilbageslag.

#### ***2.2.2.2 Yderligere aktiviteter***

Ud over udviklingsprojekterne finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor airsparging har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Projekterne er primært gennemført af Miljømyndighederne samt af private bygherre som OM og FBE.

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af driftsmæssig karakter. Dokumentationsmaterialet i relation til metodens principper, begrænsninger og effekt vurderes derfor at være for spinkelt. Projekterne ligger imidlertid til grund for besvarelsen af spørgeskemaerne, jf. afsnit 1.3 og bilag 1, og har således betydning for den samlede perspektivering af airsparging som afværgeteknik.

#### **2.2.3 Resultater af teknologiaktiviteter**

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

- På lokaliteter med dårlige plads- og adgangsforhold kan horisontale filtre over og under grundvandsspejlet installeres ved hjælp af såkaldt "blind-hole" teknik. Denne installation stiller dog særlige krav til materialevalg og erfaringsgrundlag hos entreprenør og rådgiver. Forekomst af større sten i jordlagene kan komplicere eller umuliggøre installationen.
- Air sparging er en anvendelig teknologi til oprensning af flygtige stoffer fra den mættede zone. Forekomst af lavpermeable forurenede jordlag samt puljer af fri fase kan dog medføre betydelige vanskeligheder med at nå tilstrækkelig høj oprensningseffekt. Dette skyldes langsom diffusiv frigivelse af forurening fra de lavpermeable lag samt langsom opløsning/afdamning af stof fra eventuel fri fase.
- På Drejøgade i København har monitorering af forureningsniveauet i afkastluft med on-line GC-systemer medført en lang række forskellige problemer. Systemerne har gennemgående været meget omkostningskrævende, ustabile og har ikke givet data af den forventede kvalitet. På denne baggrund kan den anvendte type GC-systemer først anbefales ved lignende oprensninger efter en væsentlig videreudvikling.

#### 2.2.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. airsparging som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Airsparging anvendes som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af airsparging som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne kun vurderes at være et mindre behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med airsparging.

#### 2.2.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.3.1/ Miljøprojekt Nr. 480, 1999: Airsparging og vakuumventilation fra vandrette borer på Drejøgade 3-5: Design og anlæg. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.3.2/ Miljøprojekt Nr. 487, 1999: Airsparging og vakuumventilation fra vandrette borer på Drejøgade 3-5: Statusrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.3.3/ Miljøprojekt Nr. 678, 2002: Airsparging og jordventilation med vandrette borer. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.3 Multi-fase ekstraktion

### 2.3.1 Afværgeprincip

Multi-fase ekstraktion er en in situ afværgeteknik, der er baseret på en samtidig oppumpning af flygtige organiske forureningskomponenter fra poreluft og grundvand samt eventuel forurening på fri fase. Dette sker fra borer, hvor filteret er placeret delvis i den mættede og delvis i den umættede zone. Boringerne skal være lufttætte for at skabe vakuum, så der kan oppumpes poreluft.

Idet der oppumpes poreluft vil metoden virke bedst i finsandede eller siltede aflejringer ( $k = 10^{-5} - 10^{-7} \text{ m/s}$ ), fordi der ved lerede aflejringer ( $k < 10^{-8} \text{ m/s}$ ) vil være en ringe virkningsgrad og ved højermeable aflejringer vil være risiko for tab af effektivitet pga. kortslutning af luftens strømningsveje og utilstrækkeligt vakuum.

En fordel ved metoden er, at der ved hjælp af vakuumpumpe kan frigøres residual fri fase forurening, som ellers er bundet i kapillarzonen af kapillarkræfter, som er mindre end det atmosfæriske tryk.

Der anvendes typisk en af to følgende konfigurationer for ekstraktionen:

1. Oppumpning ved hjælp af to pumper
2. Oppumpning ved hjælp af en enkelt pumpe

Ved begge metoder ledes vand og luft til videre behandling, eksempelvis adskillelse i luft- og vandfase af eventuelt emulgeret olieprodukt (fra fri fase forekomster i formationen), kulfiltrering af luftafkast, beluftning eller kulfiltrering af vand til en renhedsgrad, der kan ledes ud til recipient.

#### **2.3.1.1 Oppumpning ved hjælp af to pumper**

I denne opsætning sker oppumpningen af grundvand på traditionel vis ved hjælp af en dykpumpe, mens der ved hjælp af en vakuumpumpe etableres et vakuum til oppumpning af poreluft fra den umættede zone.

Udover at vakuumpumpen fjerner flygtig forurening, som fordamper til poreluften, øger vakuumpumpe samtidig effektiviteten af den konventionelle grundvandsoppumpning. Denne forbedring sker ved at der skabes en større trykgradient hen mod pumpeboringen, hvilket er specielt nyttigt i tilfælde, hvor der ikke kan skabes en større sænkning. Den øgede trykgradient øger således den mulige oppumpning af vand samtidig med at flygtige forbindelser i den umættede zone samt evt. fri fase i kapillarzonen mobiliseres og fjernes ved hjælp af vakuumpumpe.

#### **2.3.1.2 Oppumpning ved hjælp af en enkelt pumpe**

Ved anvendelse af en enkelt pumpe oppumpes der en blanding af grundvand og poreluft ved nedsenkning af en ekstraktionsslange (drop-tube) i boringen koblet til en vakuumpumpe på terræn. Denne metode er generelt begrænset til dybder, der er mindre end 10 m, da vand ikke kan løftes højere ved totalt vakuum. Er ekstraktionsslangen imidlertid dimensioneret tilstrækkelig tynd vil luftens hurtige bevægelse i slangen medvirke til at rive vand med op i en søjle bestående af luft, vand, luft, vand osv. (entrainment/medrivning), hvilket kan øge løftehøjden. I praksis vil metodens effektivitet dog ofte være begrænset, hvis grundvandsspejlet står dybere end 7-8 m u.t. Placeres ekstraktionsslansens indsugning lige i overfladen af en fri forureningsfase, kaldes metoden ofte for bio-slurping.

### 2.3.1.3 Dimensionering

Antal og placering af filtre samt størrelse af pumper vurderes og beregnes på baggrund af en række tests i nye boringer indrettet til formålet. Disse tests skal bl.a. belyse påvirkningsradius og afsenkning målt ved forskellige oppumpninger fra mættet zone samt tryktab i umættet zone målt i forskellige afstande fra en vakuumboring. Kombinationen af oppumpning og vakuum skal ligeledes testes for at vise forøgelsen af oppumpningens effektivitet.

Vakuumsystemet dimensioneres og specificeres således, at der er et rimeligt kraftoverskud. Rørforbindelser, ventiler, samlinger m.m. dimensioneres ud fra luftflowet således, at tryktabet over disse komponenter er minimalt set i forhold til tryktabet over filtrene og således, at der opnås en entrainment-/medrivningseffekt (for én-pumpe systemer).

Når delelementerne i anlægget er dimensioneret fastlægges designet af systemet bestemt ud fra forureningens placering i forhold til indretningen af ejendommen herunder adgangsveje, bygninger m.m.

I tabel 2.3.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.3.1. Overordnede karakteristika for multi-fase ekstraktion

Målsætning	Teknikken sigter mod en reduktion af kildeforurening i kapillarzonen mellem den mættede og umættede zone. Teknikken kan således anvendes til at reducere risikoen for forureningsspredning i grundvandet.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker til spredningskontrol (f.eks. stimuleret biologisk nedbrydning) eller teknikker til oprensning i den umættede zone (f.eks. termisk assisteret oprensning).
Forureningskomponenter	Primært lettere fraktioner af olie- og benzinprodukter (LNAPL's) men også klorerede opløsningsmidler (DNAPL's).
Geologi i behandlingszone	Fint sand eller silt.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Teknikken har primært effekt i kapillarzonen mellem den umættede og mættede del af behandlingszonen.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Teknikken er effektiv i finsandende eller siltede aflejringer.</li><li>• Teknikken øger virkningsgraden og influensradius af pumpeboringer.</li><li>• Evt. fri fase af lettere olie- og benzinprodukter fjernes effektivt.</li><li>• Teknikken medfører samtidig afværge på jord og i grundvand.</li><li>• I visse tilfælde er det en fordel, at der som følge af ekstraktionen af poreluft tilføres iltholdig luft fra de omgivende jordlag/atmosfæren.</li></ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Teknikken forudsætter relativt homogent fint sand eller silt.</li><li>• Heterogeniteter øger risikoen for mangelfuld oprensning af lavpermeable zoner.</li><li>• Etablering og drift er forbundet med mindre støjgener.</li><li>• Anlægskomponenter (boringer, rørføringer, ventilatorer, kulfiltre) beslaglægger plads i driftsperioden.</li><li>• Driften af anlægget er forbundet med omkostninger til bl.a. strøm, kulfiltre mv.</li></ul>



### 2.3.2 Udførte aktiviteter

Der er ikke gennemført særlige teknologiudviklende aktiviteter med anvendelse af multi-fase ekstraktion støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet i Danmark. I et udredningsprojekt vedrørende metoder til oprensning af en restforurening af benzin på Nykøbingvej i Radsted er der imidlertid foretaget en gennemgang af teknikken og dens anvendelsesmulighed på den aktuelle lokalitet, jf. Miljøprojekt 1117, 2006.

Ved den gennemførte dataindsamling i forbindelse med dette projekt, jf. afsnit 1.3, er der ligeledes ikke blevet fundet projekter af særlig teknologiudviklende karakter. Der er dog kendskab til at teknikken anvendes som en del af afværgestrategien på en række sager i Danmark. Oprensningsaktiviteterne har på disse sager dog mere driftsmæssig karakter og vil ikke blive beskrevet i forbindelse med dette projekt.

### 2.3.3 Resultater af aktiviteter

Der er ved dataindsamlingen, jf. afsnit 1.3, ikke fundet oplysninger om teknologiudviklende aktiviteter gennemført i forbindelse med etablering af multi-fase ekstraktion som afværgete metode.

### 2.3.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. multi-fase ekstraktion som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Multi-fase ekstraktion anvendes som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør anvendelse.
- Der er på nuværende tidspunkt ikke gennemført feltaktiviteter finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet inden for afværge med multi-fase ekstraktion.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et behov for teknologiudvikling inden for afværge med multi-fase ekstraktion.

### 2.3.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

Miljøprojekt Nr. 1117, 2006: Metoder og økonomi til fjernelse af restforurening af benzin - Nykøbingvej 295, Radsted. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.4 Forceret udvaskning af tjæreforurening

### 2.4.1 Afværgeprincip

Forceret udvaskning af f.eks. tjærekomponenter er en billig og simpel in situ afværgeteknik som kan anvendes overfor store områder med diffus tjæreforurening i moderat til højpermeable jordlag. Den primære idé bag teknikken er at øge infiltrationen af vand gennem de forurenede jordlag, og herved forøge udvaskning af diffus forurening i den umættede zone. Endvidere sigter teknikken mod, at optimere de naturlige nedbrydningsforhold for tjærekomponenterne i den umættede og mættede zone ved, at anvende behandlet grundvand som bæremedie for ilt, alternative iltningssmidler, næringsstoffer mv.

Den forøgede infiltrationen opnås typisk ved etablering af et cirkulationssystem, hvormed forurenede grundvand oppumpes, behandles og reinfiltreres. Reinfiltrationen kan med fordel foretages nær terræn, hvorved det infiltrerede vand formentlig vil følge samme transportveje, hvorigennem forureningen i sin tid er spredt. Metoden forudsætter relativt gode og veldefinerede strømningssforhold i den umættede og mættede zone og kan således som udgangspunkt ikke anvendes i lavpermeable eller opsprækkede medier.

Den relativt lave opløselighed af ilt i vand betyder, at forceret udvaskning ikke er den mest effektive metode til iltning af den umættede og mættede zone. Andre iltningssmetoder som indblæsning af luft eller ren ilt, indblæsning af ozon eller tilsætning af hydrogenperoxid, kaliumpermanganat eller Fentons reagens (Hydrogenperoxid og ferro-jern) kan i mange situationer have væsentligt højere iltningseffekt men har ligeledes markant højere omkostninger. Der vil dog være mulighed for at opnå en forøget effekt af den forcerede udvaskning ved kombination af teknikker.

Udvaskning af tjærestoffer fra dråber eller klumper af fri tjære medfører dannelsen af en sej, lavpermeabel skal på overfladen af tjæren. Denne indkapsling medfører, at forceret udvaskning ikke kan anbefales på lokaliteter med forekomst af større mængder tjære på fri fase.

I tabel 2.4.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

### 2.4.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført ét afværgeprojekt med forceret udvaskning af diffus tjæreforurening støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 492 (1999) og 1059 (2006). I nedenstående afsnit beskrives udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet, der omfatter forsøg gennemført i forbindelse med en fuldskala oprensning af diffus tjæreforurening på Hjørring gasværk.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

Tabel 2.4.1. Overordnede karakteristika for forceret udvaskning af tjæreforurening

Målsætning	Teknikken sigter mod en udvaskning og en stimuleret biologisk nedbrydning af diffus jordforurening med tjærekomponenter i den umættede zone.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre kemiske eller biologiske teknikker til kildebehandling.
Forureningskomponenter	Tjærekomponenter
Geologi i behandlingszone	Sand eller grus
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Teknikken har primært effekt i den umættede zone, hvor diffus forurening udvaskes eller nedbrydning stimuleres.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativt lave etablerings- og driftsudgifter.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der vil forekomme nabogener i forbindelse med etablering (gravearbejder).</li> <li>• Teknikken kræver et lukket hydraulisk kredsløb med henblik på at undgå utilsigtet spredning af forurening. Dette kan i praksis være svært at opnå.</li> <li>• Hidtidige erfaringer indikerer, at det er vanskeligt at opnå tilstrækkelig oprensningseffekt.</li> </ul>

#### **2.4.2.1 Fuldskalaoprensning- Hjørring gasværk**

Som nævnt har projektet omfattet en fuldskala oprensning af diffus tjæreforurening på det tidligere Hjørring gasværk. Efter opgravning af de værst forurenede dele af lokaliteten er der i et område på cirka 8.000 m<sup>2</sup> efterladt en diffus forurening med typiske tjærelaterede komponenter; PAH, BTEX, phenoler, NSO-forbindelser, cyanider og sulfat. Forureningen er truffet fra terræn og var primært beliggende i den umættede zone. Den øvre del af grundvandszonen var dog ligeledes belastet med opløste forureningskomponenter. Jordlagene på lokaliteten er overvejende sandede.

Oprensningen er foretaget ved oppumpning, behandling og reinfiltration af grundvand. Grundvandsoppumpningen er foretaget fra en boring på lokaliteten. Vandbehandlingen har bestået af iltning og filtrering i et sandfilter. Grundvandet er reinfiltreret over et område på cirka 8.000 m<sup>2</sup> ved hjælp af 63 mm infiltrationsrør etableret i et terrænnært lag af nøddesten (16 – 31 mm). Anlægget er drevet cyklisk (aktivt en uge, standset to uger), og der er opnået en forøgelse af den naturlige infiltration på cirka 30 gange (9.000 mm/år).

#### **2.4.2.2 Laboratorieforsøg**

Parallelt med oprensningen på Hjørring gasværk er der udført kolonne og batch forsøg samt målinger med TDR-prober (bestemmelse af vandindhold) på jord fra lokaliteten. Forsøgene er udført på Aalborg Universitets Center med henblik på:

- At belyse nedbrydningsforholdene og -potentialet for BTEX, phenol og methylphenoler under aerobe og anaerobe forhold i forskellige jordtyper udtaget på lokaliteten fra henholdsvis den umættede og mættede zone. Forsøgene er udført med forskellige stofkoncentrationer.
- At undersøge adsorptionsforholdene for ammonium og naphthalen.
- At udvikle en model til at belyse tidsforløbet for naturlig geniltning af den umættede zone efter standsning af den forcerede infiltration.

Aktiviteterne støttet af Miljøstyrelsen havde til formål:

- At tilvejebringe erfaringer med fuldskala design, drift og monitorering af et anlæg til forceret udvaskning af tjærekomponenter.
- At beskrive det hydrauliske system på lokaliteten før og under driften af anlægget, herunder bestemmelse af vandets strømningshastighed og – retning.
- At dokumentere effekten af den forøgede infiltration på udvaskningen samt nedbrydningen af de forskellige forureningskomponenter.

Med henblik på at opfylde ovennævnte formål er der:

- Etableret og drevet et fuldskalaanlæg gennem en periode på i alt otte år, heraf de sidste fire år under Teknologiprogrammet.
- Udført et stort antal monitoringsboringer til forskellig dybde i det forurenede grundvandsmagasin.
- Foretaget detaljeret monitorering af grundvandskemien samt potentiale- og forureningsforhold før under og efter driften af infiltrationsanlægget.
- Udført tracerforsøg til vurdering af hydrauliske parametre, grundvandshastigheder mv.
- Opstillet en strømningsmodel for grundvandet på og omkring lokaliteten.

#### 2.4.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Forceret udvaskning har relativt lave etablerings- og driftsudgifter.
- Teknikken kan kombineres med andre afværgeteknologier, f.eks. kemisk oxidation med henblik på at forbedre nedbrydningen og begrænse behandlingstiden. Herved kan omkostningerne dog stige væsentligt.
- I anlægsfasen forstyrres arealanvendelsen meget væsentligt som følge af omfattende gravearbejder. I driftsfasen er der derimod næsten ingen begrænsninger eller gener for lokalitetens anvendelse.
- Metoden har et lavt tilsynsbehov og mulighed for fuldautomatisk drift.
- Ved laboratorieforsøgene er der påvist et højt nedbrydningspotentiale for BTEX'er og phenoler i såvel den umættede- og mættede zone på Hjørring Gasværk.
- Laboratorieforsøgene indikerer at de undersøgte hovedforureningskomponenter nedbrydes ved både høje og lave stofkoncentrationer inden for få døgn under aerobe forhold. Nedbrydningstiden forlænges under anaerobe forhold med en faktor 5-15 i forhold til aerobe forhold. En undtagelse herfra er benzen, hvor der indenfor 78 dage ikke kunne konstateres nedbrydning under anaerobe forhold.
- Vurderet ud fra laboratorieforsøgene vil omsætningen af hovedforureningskomponenterne selv under anaerobe forhold være tilendebragt inden for få meter fra kilden ved den aktuelle grundvandshastighed på cirka 10 cm/døgn. Specielt benzen vil dog kræve tilstedeværelse af ilt for at blive omsat.
- Den udførte monitorering dokumenterer, at infiltrationsvandet bidrager til en væsentlig forøget udvaskning af forureningskomponenter fra restforureningen i den umættede zone, men der er kun i et begrænset område registreret væsentligt gennembrud til grundvandszonen.

- Da infiltrationsvandet bidrager til en væsentlig udvaskning af forureningskomponenter i den umættede zone vurderes det, at nedbrydningsprocesser i den umættede zone reducerer de udvaskede forureningskomponenter, inden disse når grundvandsspejlet i hovedparten af området.
- I et mindre område er der konstateret gennembrud af de udvaskede forureningskomponenter til grundvandszonen. Resultaterne indikerer, at denne forurening nedbrydes i toppen af den mættede zone inden for kort afstand fra kildeområdet. Dokumentationsgrundlaget for benzenforureningen i den dybere anaerobe del af magasinet er dog ikke tilstrækkeligt til en endelig konklusion vedrørende transport og nedbrydning for dette stof i større dybde.
- Med den anvendte driftsstrategi med naturlig iltning ved hjælp af det reinfiltrede grundvand er ikke lykkedes at ændre væsentligt på redoxforholdene dybt i den umættede og i den mættede zone. Arbejdet med ilt-diffusionsprocesserne viser således, at afdræningsforløbet og den efterfølgende naturlige geniltning af jordprofilen i den umættede zone efter stop af grundvandsinfiltration er en langvarig proces (flere måneder).
- Resultaterne indikerer således, at perioden mellem to infiltrationsforløb skal være længere for at tillade en optimal naturlig diffusion af ilt ned i de forurenede jordlag. Fuld geniltning af et jordprofil på 10 m som på Hjørring gasværk vil dog i praksis kræve urealistisk lange pauser mellem infiltrationsforløbene.
- Såfremt oprensningen er afhængig af en væsentlig og hurtig ændring af redoxforholdene i den umættede og mættede zone, vil det være nødvendigt med tilsætning af et iltningmiddel.
- Idet udvaskningen af forureningskomponenter fra tjæreforureninger ofte er diffusionsstyret, må der afhængig af de aktuelle forureningskomponenter og forureningssammensætning forventes relativt lange behandlingstider i forhold til mere radikale oprensningsteknologier.
- Metoden kræver, at der kan etableres et lukket hydraulisk kredsløb med henblik på at undgå utilsigtet forureningsudbredelse udenfor lokaliteten. Dette kan imidlertid være svært at opnå i praksis og er blandt andet ikke opnået på lokaliteten i Hjørring.

#### 2.4.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. forceret udvaskning som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Forceret udvaskning anvendes kun som en del af afværgestrategien på få danske lokaliteter.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, kun er anvendt i begrænset omfang i forbindelse med design og projektering af forceret udvaskning som afværgeteknik på danske lokaliteter.

- Besvarelsene påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med forceret udvaskning.

#### 2.4.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.4.1/ Miljøprojekt Nr. 492, 1999: Resumerapport over gasværkspakke. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.4.2/ Miljøprojekt Nr. 1059, 2006: Forceret udvaskning på Hjørring Gasværk - Afslutningsrapport. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.5 Flushing

#### 2.5.1 Afværgeprincip

Flushing er en in situ afværgeteknik til oprensning af forureningskilder, hvor fri fase forurening er til stede. Flushing er baseret på afværgepumpning, der er velkendt for sin værdi i situationer, hvor forureningsspredning ønskes stoppet ved hydraulisk kontrol. Afværgepumpning er imidlertid ikke egnet til oprensning af fri fase, hvor målsætningen er kildeoprensning.

Opsrensning af fri fase ved hjælp af almindelig afværgepumpning begrænses af flere forhold, der resulterer i et behov for oppumpning af u hensigtsmæssigt mange porevoluminer for at opnå en massereduktion. De vigtigste af disse forhold er:

- **Kapillarkræfter:** Disse kræfter fikserer fri fase (residual fase) i sedimentet, således at de ofte ikke mobiliseres ved afværgepumpning. I områder med residual fri fase forurening nedsættes den hydrauliske ledningsevne for grundvandet drastisk, hvorved grundvandsstrømningen (herunder ved afværgepumpning) fortrinsvist sker uden for området med fri fase og således udenfor området som ønskes oprenset. Dette fører til en begrænset masse-reduktion.
- **Langsom opløsning:** På grund af overfladespænding mellem grundvand og forurening på fri fase bliver overfladearealet af den fri fase minimeret ved, at den trækker sig sammen i dråber og stave. Den høje overfladespænding og det lille areal medfører en langsom opløsning af den fri fase i vandfasen.
- **Langsom desorption:** For stoffer med et højt oktanol/vand-forhold sker desorptionen fra sedimentet langsomt.

Ved tilsætning af forskellige overfladeaktive forbindelser (surfactants eller co-solvents) via injektionsboringer til behandlingszonen ændres en række fysisk-kemiske forhold omkring en fri fase forurening, der fremmer forureningens opløsning og/eller mobilisering, hvorefter forureningen kan fjernes via strategisk placerede pumpeboringer (en slags kemisk assisteret afværgepumpning). Flushing egner sig således til situationer, hvor målsætningen er at opnå masse-reduktion i kildeområder med fri fase.

De overfladeaktive forbindelser har principielt to virkemåder. Visse forbindelser nedsætter således overfladespændingen mellem grundvandet og den frie

forureningsfase og øger herved opløseligheden af den pågældende frie fase. Andre overfladeaktive forbindelser har en hydrofob og en hydrofil ende, som "griber fat i" henholdsvis vandmolekyler og den frie forureningsfase. Herved løsriver mikroskopiske dråber af fri fase (mi-celler) som efterfølgende "svæver" i vandfasen og kan ekstraheres ved afværgepumpning.

Flushing har et meget specifikt anvendelsesområde. Hvis teknikken anvendes udenfor dette specifikke område, kan der ikke nødvendigvis forventes succes. Flushing er en såkaldt aggressiv metode (i modsætning til passive metoder) og er dermed en relativt hurtig metode. Flushing bør kun anvendes, hvis der er tale om tilstedeværelse af fri fase. Da omkostningerne stiger kraftigt med størrelsen af det behandlede område, er flushing kun egnet til mindre kildeområder.

Valg af overfladeaktiv komponent er en af de mest centrale opgaver ved dimensionering af oprensning med flushing. Dette valg afhænger hovedsageligt af det forurenende stof, der skal oprenses, men også af sedimentets og grundvandets sammensætning.

En anden opgave ved dimensionering er fastlæggelse af boringskonfiguration. Den hydrogeologiske situation skal være meget velbeskrevet før boringskonfigurationen kan fastlægges. Ofte vil det være en fordel at have en grundvandsmodel opstillet for det aktuelle område. En typisk opstilling består af en afstand mellem injektionsboringer på 1-3 m.

Det skal bemærkes, at behandlingsanlægget for ekstraheret forurening skal designes under hensyntagen til, hvilken overfladeaktiv komponent der anvendes. Således er fase-separation oftest vanskeligere ved dannelse af uni-celler og visse overfladeaktive komponenter har udpræget sæbe-karakter og skummer voldsomt ved beluftning.

En typisk fremgangsmåde for gennemførelse af flushing består i at tilsætte et kemisk stof over en periode på dage eller uger i flere injektionsboringer samtidigt med, at der oppumpes fra flere afværgeboringer. Efter injektion af det tilsatte stof ophører, fortsættes oppumpning i en længere periode for at fjerne forureningen og det tilsatte stof.

I tabel 2.5.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

## 2.5.2 Udførte aktiviteter

Der er ikke gennemført særlige teknologiudviklende aktiviteter med anvendelse af flushing støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet i Danmark. Der er imidlertid gennemført et udredningsprojekt, hvor teknikken beskrives på baggrund af internationale erfaringer, jf. Miljøprojekt 725, 2002.

Ved den gennemførte dataindsamling i forbindelse med dette projekt, jf. afsnit 1.3, er der ligeledes ikke blevet fundet projekter af særlig teknologiudviklende karakter. Der er ligeledes ikke kendskab til at teknikken anvendes som en del af afværgestrategien på sager i Danmark.

Tabel 2.5.1. Overordnede karakteristika for flushing som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter mod en udvaskning af fri fase forurening i kildeområder. Teknikken egner sig således ikke til behandling af opløst forurening i en forureningsfane.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre kemiske eller biologiske teknikker til kildebehandling eller spredningskontrol.
Forureningskomponenter	Fri fase forurening af olie- og benzinprodukter og klorerede opløsningsmidler.
Geologi i behandlingszone	Homogent sand eller grus
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Teknikken har kun effekt i kildeområder, hvor fri fase forurening kan udvaskes.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativt lave etablerings- og driftsudgifter.</li> <li>• Teknikken kan potentielt mobilisere fri fase forurening, der på grund af kapillarkræfter er tilbageholdt/fastlåst i poreskelettet.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der vil forekomme nabogener i forbindelse med etablering (gravearbejder).</li> <li>• Teknikken kræver et lukket hydraulisk kredsløb med henblik på at undgå utilsigtet spredning af forurening. Dette kan i praksis være svært at opnå.</li> <li>• Teknikken vil være forbundet med risiko for uønsket mobilisering/spredning af forurening.</li> <li>• Teknikken er forbundet med tilsætning af kemikalier til undergrunden, hvorfor giftigheden af disse skal vurderes.</li> <li>• Teknikken kræver evt. specielle arbejdsmiljømæssige foranstaltninger pga. arbejdet med kemikalier.</li> <li>• Teknikken kan stille særlige krav til design og indretning af behandlingsanlæg for ekstraheret forurening.</li> </ul>

### 2.5.3 Resultater af aktiviteter

Der er ved dataindsamlingen, jf. afsnit 1.3, ikke fundet oplysninger om teknologiudviklende aktiviteter gennemført i forbindelse med etablering af flushing som afværgeteknik.

### 2.5.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. flushing som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Flushing anvendes kun som en del af afværgestrategien på få danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med flushing. Internationalt er der erfaringer med at kombinere flushing med andre kemiske eller biologiske metoder til kildeoprensning og teknikken vurderes at have udviklingsmuligheder i Danmark.



## 2.5.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

Miljøprojekt Nr. 725, 2002: Afværge af grundvandsforurening ved kombination af Flushing og MPPE-vandrensning. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.6 Jordvask (ex-situ)

### 2.6.1 Afværgeprincip

Jordvask er en gruppe af metoder til rensning af forurenede jord on-site eller på et jordbehandlingsanlæg. Metoderne er principielt velegnede til en række forskellige forureningstyper, og i udlandet er der gennem årene afprøvet en række forskellige teknikker til vask af jord eller til separation af jordens forskellige fraktioner. De fleste eksisterende anlæg anvender en kombination af vask og separation.

Formålet med vask af jord er at frigøre forureningskomponenterne fra jordmatricen og overføre disse til en rensningsvæske. Denne væske kan eksempelvis udgøres af vand tilsat overfladeaktive forbindelser eller methylenchlorid som fungerer som et ekstraktionsmiddel.

Formålet med separationen af jordens forskellige fraktioner er at adskille de grove - og ofte svagt forurenede - dele af jorden (sten, grus og evt. sand) fra de finkornede - og ofte kraftigere forurenede - dele af jorden (ler, silt, finsand mv.). Efter separationen kan de forskellige fraktioner afhængig af forureningsniveau deponeres eller renses yderligere. Separationen kan foretages ved hjælp af specielle sigter eller i anlæg, hvor der tilsættes vand for at fremme separationsprocessen eventuelt med overfladeaktive stoffer. Som nævnt kan vandet tilsættes overfladeaktive stoffer der kan nedsætte overfladespændingen mellem fri fase forurening og vand og herved øge opløseligheden og mobiliteten af visse stoffer. Jorden kan gennemskylles med vand og hjælpestoffer, eller der kan foretages indblæsning af luft i den væskefyldte jord, hvorved der kan dannes en slags skum, hvori forureningskomponenterne opkoncentreres.

### 2.6.2 Udførte aktiviteter

I 1999 blev der på KK Miljøteknik A/S' anlæg i Rødby igangsat et projekt med jordvask. Projektet blev støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet og omfattede rensning af jord forurenede med tungmetaller og tjære/PAH. Det anvendte anlæg er udelukkende baseret på separation af jordens forskellige fraktioner. Projektet omfattede rensning af i alt seks forskellige typer forurenede jord. Projektet blev afbrudt midt i forløbet af årsager som ikke vedrører teknologiprojektet eller de foreløbige resultater heraf. Det planlagte undersøgelsesprogram blev således ikke fuldt gennemført. For detaljerede beskrivelser henvises til Miljøprojekt 616, 2001.

Formålet med projektet var:

- At dokumentere at det pågældende jordvaskanlæg var velegnet overfor danske jordtyper, herunder at vurdere dets egnethed overfor forskellige jordfraktioner, forureningstyper og -koncentrationer.

- At vurdere jordrensningsmetodens konkurrencedygtighed.
- At udvikle en test som kan indgå i forundersøgelserne og som har til formål at bestemme en jordtypes egnethed til jordvask i det pågældende anlæg.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udvalgt fem forskellige jordtyper forurenet med et eller flere af følgende stoffer: Kulbrinter, bly, kobber og zink. Med støtte fra Teknologiprogrammet er der:

- Foretaget rensning af seks batches af de udvalgte jordtyper, hvoraf rensning af en batch skete med støtte fra Teknologiprogrammet.
- Udført jordanalyser før og efter rensning.

### 2.6.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne med en separationsteknik:

- Jordvask blev fundet anvendelig til rensning af visse jorde.
- Der kunne ikke dokumenteres forskel på resultaterne af rensningen for tungmetaller og for tunge olieprodukter.
- Det kunne ikke vurderes om behandlingen af jorden under rensningen flyttede forurening mellem de forskellige jordfraktioner.
- På grund af inhomogeniteter i jordtyper og forureningsfordeling var det ikke muligt at vurdere rensningseffektiviteten. De udførte forsøg giver således ikke grundlag for konklusioner med hensyn til separationsteknikkens anvendelighed og effektivitet overfor danske jorde.
- Teknikker som udelukkende er baseret på separation har væsentlige begrænsninger: Den forurenede jordtype skal have en tilpas geologisk sammensætning, hvor de fine fraktioner ikke må udgøre for stor en andel. Jorden må ikke indeholde metallisk bly, olie- eller tjæreklumper, slagger eller andet, som vil gøre den grove fraktion uanvendelig til genbrug eller deponering på fyldplads.
- Der er behov for udvikling af metoder til fjernelse af forskellige typer af forurening i større partikler/klumper, i det disse ødelægger muligheden for genanvendelse eller billig deponering af de grove fraktioner.
- Separationen bør optimeres/justeres, således at de fine og grove fraktioner kan separeres bedst muligt.
- Det vurderes, at effektiv jordvask forudsætter tilsætning af hjælpestoffer. Disse hjælpestoffer skal således være harmløse for miljøet og bør desuden ikke påvirke mulighederne for genanvendelse af de mindst forurenede fraktioner.

### 2.6.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. jordvask som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Der er ikke kendskab til om resultaterne opnået ved de gennemførte aktiviteter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af jordvask på behandlingsanlæg.
- Der vurderes ikke at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med jordvask.

### 2.6.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

Miljøprojekt Nr. 616, 2001: Afprøvning af jordvask. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.7 Dampstripping

Dampstripping tilhører en gruppe af termisk assisterede afværgeteknikker som kan anvendes ved in situ oprensning af forurenede jord og grundvand i kildeområder.

De termiske teknikker er baseret på en række mekanismer som optræder når temperaturen i det forurenede kildeområde hæves markant, herunder: At flygtigheden af de fleste stoffer øges markant, at bindingen til jorden ved sorption svækkes for de fleste stoffer, at mobiliteten af frie faser i jordmiljøet øges, at kogning af fri fase og vand starter ved en relativ lav temperatur, at kogning af porevand medfører dannelse af gasfase overalt i jordlagene, at reduceret vandindhold som følge af kogning medfører større pneumatisk ledningsevne, at visse stoffer nedbrydes kemisk in situ mv.

Oprensningsmetoden dampstripping er udviklet i USA og anvendes ved oprensning af blandt andet klorerede opløsningsmidler, olieprodukter og creosot i sandede jordlag evt. med tynde indlejrede horisonter af silt og ler samt i opsprækket kalk eller klippe.

Ved dampstripping opvarmes jordlagene af den varme som afgives, når damp kondenserer ved kontakt med kold jord/grundvand. Ved opstart af dampinjektionen opvarmes jordlagene umiddelbart omkring borerne gradvis til damptemperatur, hvorefter der udbredes en dampzone fra injektionsboringerne. Dampinjektionen indledes typisk fra en række borer i periferien af kildeområdet, således at der opnås en sammenhængende ring af damp omkring kildeområdet og herefter en mobilisering af forureningen mod den centrale del af kilden. I den centrale del af kildeområdet foretages ekstraktion af poreluft, grundvand og damp med henblik på at opnå en dampstrømning fortrinsvis ind mod kildeområdet samt for at opnå en opsamling af den mobiliserede forurening på gas- og væskeform.

Dampstrippingen foretages typisk med kontinuert injektion indtil hele oprensningsområdet har nået damptemperatur efterfulgt af en periode med cyklisk drift. Ved cyklisk drift foretages en pludselig trykafledning i det opvarmede område, hvorved der kan opnås en forøget oprensningseffekt i grundvandszonen samt i lavpermeable jordlag som ligger i eller omkring dampzonen. I visse situationer kan det være fordelagtigt at tilsætte atmosfærisk luft til den injice-

rede damp, hvorved en del af den mobiliserede forurening ekstraheres umiddelbart med den ikke-kondenserbare gas.

Ved dampinjektionen tilføres ilt med dampen og typisk også som led i vakuumentilationsen til opsamling af damp, forurening og poreluft. Herved hæves redoxpotentialet i oprensningsområdet, og det er dokumenteret, at der i det varme, vandholdige, iltede miljø kan forekomme en kemisk oxidation (vådoxidation) af forureningskomponenter.

De væsentligste ulemper ved dampstripping er knyttet til opvarmning af bygninger, brugsvand, kloakledninger mv. En teoretisk mulig ulempe ved dampstripping er risikoen for vertikal mobilisering af fri fase forurening som følge af ansamlinger heraf i kondensationsfronten. Dette har været genstand for både teoretiske og praktiske undersøgelser. P.t. tyder intet på, at problemet eksisterer, men problemstillingen undersøges stadig.

Tabel 2.7.1. Overordnede karakteristika for dampstripping som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter primært mod kildeoprensning af fri fase forurening såvel som forurening på damp- eller opløst form eller sorberet forurening i både den mættede og umættede zone. Teknikken er ikke velegnet til faneoprensning.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker som f.eks. vakuumentilering, naturlig nedbrydning eller kemisk oxidation til oprensning af evt. restforurening eller diverse teknikker til spredningskontrol. Ofte er oprensningseffekten dog så høj, at yderligere tiltag ikke er påkrævet.
Forureningskomponenter	Klorerede opløsningsmidler, BTEX, benzin, lette og tunge olieprodukter, creosot og flygtige eller vandopløselige tjærestoffer mv.
Geologi i behandlingszone	Sand, grus eller opsprækket ler/kalk/klippe.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Kan der etableres en dampzone med temperaturer over forureningsstoffernes eutektiske kogepunkter (kogepunkter når den frie fase er i kontakt med vand) i hele behandlingszonen er teknikken effektiv til hurtig nedbringelse af kildestyrken.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden kan effektivt reducere omfanget af en kildeforurening over en relativt kort tidshorisont.</li> <li>• Metoden er forbundet med stor sikkerhed for effekt.</li> <li>• Geologiske inhomogeniteter (f.eks. indslag af mindre lavpermeable lag) oprenses også.</li> <li>• Metoden omfatter en kort driftsperiode, hvilket begrænser varigheden af gener for evt. naboer.</li> <li>• Der er ikke behov for længerevarende monitoring efter driftsperioden.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden er ikke effektiv over for lavpermeable formationer af f.eks. ler eller silt (kræver <math>K &gt; 10^{-5}</math> m/s).</li> <li>• I anlægs- og driftsperioden kan metoden være årsag til visse nabogener (støj, støv, rådhedsindskrækning mv.).</li> <li>• Teknikken kan være forbundet med risiko for indtrængning af damp og således opvarmning af kloakledninger, huse og andre bygningsinstallationer.</li> <li>• Metoden er forbundet med forholdsvis store anlægs- og driftsomkostninger såvel som et stort energiforbrug.</li> </ul>

Til brug for design af anlæg til dampstripping har Miljøstyrelsen udviklet en regnearkbaseret model, hvorved dampzoners og injektionsraters udvikling over tid kan estimeres. Modellen samt brugermanual kan downloades fra Miljøstyrelsens hjemmeside, jf. Miljøprojekt 679 (2002).

I tabel 2.7.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

### 2.7.1 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført 4 feltprojekter med dampstripping samt en litteraturgennemgang og erfaringsopsamling støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet. I de følgende afsnit tages der udgangspunkt i erfaringer opnået igennem aktiviteter gennemført med støtte fra Teknologiprogrammet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet for hver lokalitet, hvorefter der følger en samlet præsentation af de opnåede resultater i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### 2.7.1.1 *Brül & Kjær, Nærum*

Brül & Kjær har på deres ejendom i Nærum gennemført frivillig afværge med dampstripping i perioden 1997-1998. Projektet er gennemført med Jord & Miljø A/S som rådgiver og er støttet af Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Miljøstyrelsen blev først engageret efter at anlægget var sat i drift og driftsstrategien fastlagt. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 543 og 552 (2000).

Afværgeprojektet omfattede oprensning af en blanding af PCE og TCE fra en 15 meter tyk umættet zone primært bestående af smeltevandsaflejringer af sand med indslag og indlejrede silt- og lerlag. Under oprensningszonen træffedes et sekundært grundvandsspejl i ca. 15 meters dybde.

Oprensningen blev foretaget ved dampinjektion på skift i 5 forskellige borerer centralt i kildeområdet og samtidig vakuumventilation i syv til ni borerer omkring injektionsstedet. Boringernes indbyrdes afstand var ca. 6-8 m. Dampen blev produceret i en dampgenerator med en kapacitet på op til 1.000 kg damp per time. Der blev injiceret damp i 29 døgn med en samlet injektion på ca. 700 tons damp. Ekstraktionen blev drevet af 3 vakuumpumper, der ydede 200 m<sup>3</sup>/time med et vakuum på 200 mbar.

Målsætningen med afværgeprojektet var overordnet at oprense forureningen således, at ejendommen kunne blive afmeldt som affaldsdepot. Den samlede stoffjernelse forbundet med både et indledende injektionsforsøg (pilottest) såvel som fuldskalaoprensningen blev estimeret til 1.400-1.500 kg. I poreluften vurderes forureningen generelt at være nedbragt med 1-2 størrelsesordener men forureningen vurderes at være spredt til et større område.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde overordnet til formål at beskrive teorien bag dampstripping som oprensningsmetode samt at foretage supplerende monitoring til belysning af udbredelsen af dampzoner og oprensningseffekt.

Der blev i denne forbindelse gennemført supplerende monitoring af temperatur- og trykudvikling i en udvalgt del af behandlingszonen samt supplerende monitoring af forureningsniveauet i den ekstraherede gasfase. De supplerende målinger blev gennemført med det formål, at tilvejebringe dokumentation for oprensningseffekten samt at udarbejde retningslinier for drift og monitoring af dampstripping.

Afværgeprojektet mundede på denne baggrund ud i en række retningslinier for etablering af afværge med dampstripping og vakuumventilation. Der henvises til nedenstående afsnit 2.8.3 for en samlet præsentation af resultaterne.

### **2.7.1.2 Østerbro, Ålborg**

På Østerbro i Ålborg har NIRAS A/S i samarbejde med Ove Arkil A/S gennemført et afværgeprojekt med dampstripping i efteråret 2000 og foråret 2001. Projektet er gennemført for det tidligere Nordjyllands Amt (nuværende Region Nordjylland) og er støttet af Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 749 (2003).

Projektet omfattede oprensning af terpentin og PCE i umættet og mættet zone. Forureningen var knyttet til umættet sand til ca. 1,7 m u.t. og mættet sand til ca. 3,7 m u.t. Herunder er der smeltevandsler til stor dybde. Den største del af forureningens kildeområde var beliggende under det tidligere renseri og tilstødende bygninger.

Oprensningen er foretaget ved dampinjektion i 8 boringer i forureningens periferi og 3 boringer centralt i behandlingszonen. Ekstraktion af poreluft, damp, grundvand og kondensat er foretaget fra 2 boringer centralt i kildeområderne. Boringernes indbyrdes afstand var ca. 5-8 m. Dampen blev produceret i en dampgenerator med en kapacitet på op til 1.200 kg damp per time. Der blev foretaget kontinuert dampinjektion i knap 3 måneder med enkelte driftsstop (samlet ca. 70 dages injektion) efterfulgt af cyklisk drift i ca. 1 måned. Der er injiceret op til 950 kg damp per time.

Målsætningen med afværgeprojektet var overordnet at oprense forureningskilden på ejendommen så den fremtidige arealanvendelse ikke var forbundet med risiko for indånding af gasarter og så en fremtidig forureningsspredning til dybereliggende grundvand hindredes. Den samlede stoffjernelse forbundet med 4 måneders drift (3 måneders kontinuert og 1 måneds cyklisk drift) blev estimeret til ca. 1.000 kg, og det vurderes, at mere end 99 % af den tilstedeværende forurening i behandlingszonen blev fjernet ved oprensningen.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål at udvide monitoreringen af udviklingen af temperatur og tryk til belysning af dampfrontens udbredelse og vertikale udseende samt at vurdere omfanget af vådoxidation og evt. vertikal mobilisering af fri fase forurening. Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Foretaget manuelle temperaturmålinger i et stort antal boringer, herunder injektions-/ekstraktionsboringer, i alt ca. 280 termofølere.
- Foretaget automatisk registrering af temperaturen hvert femte minut i udvalgte boringer - forsynet termofølere for hver 10 cm.
- Udtaget intakte jordkerner fra toppen af lerlaget og udført analyser centralt i kildeområdet før og efter oprensningen.
- Etableret målerør for tryk i fem forskellige dybder i to boringer. Målingerne udført ved at etablere (påtrykke målerørene) og registrere det nødvendige tryk for netop at etablere et svagt luftflow.
- Hyppig måling af ilt og kuldioxid i den ekstraherede luft før under og efter dampinjektionen.
- Hyppig registrering af forureningsniveauet i den ekstraherede luft under den cykliske drift. Målingerne blev foretaget med PID apparat suppleret med akkrediterede kulrørsanalyser.

- Automatisk registrering af fugtigheden i den ekstraherede gasfase inden køling og væskeudskilning ved hjælp af en sensor af typen Rense HX-730-M-02 monteret med datalogger.

Afværgeprojektet mundede på denne baggrund ud i en række overordnede resultater og erfaringer vedrørende dampstripping, der er beskrevet i nedenstående samlede resultat-/erfaringsafsnit 2.8.3.

### **2.7.1.3 Vesterbro, Odense**

På Vesterbro i Odense har COWI A/S gennemført et afværgeprojekt med dampstripping i starten af 2001. Projektet er gennemført for det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syddanmark) og er støttet af Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 823 (2003).

Projektet omfatter oprensning af PCE fra den umættede zone i sandede og siltede jordlag fra ca. 2 – 6 m u.t. Oprensningen blev foretaget ved en termisk assisteret vakuumventilation, hvor der foretages dampinjektion i en boring under forureningen samt vakuumventilation fra to sektionerede horisontale borer og én vertikal boring i de forurenede jordlag. Der blev således injiceret damp i ca. 3,5 måneder med en samlet injektion på ca. 231 tons damp. Sideløbende hermed foretages grundvandsoppumpning fra områdets terrænnære magasin umiddelbart under oprensningsområdet.

Målsætningen med afværgeprojektet var overordnet at oprense forureningskilden, så den fremtidige arealanvendelse i berørte boliger ikke var forbundet med risiko. Efter samlet 16 måneders drift af vakuumventilationsanlægget, herunder 3,5 måneder med dampinjektion, var indholdet af PCE i aftræksluften faldet til under 1 mg/m<sup>3</sup>. Det vurderes at dampinjektionen reducerede driftstiden med minimum 2 år. Resultater af tilbageslagsmålinger viser koncentrationer af PCE på mellem 1,3 og 5,7 mg/m<sup>3</sup> i kildeområdet. Før oprensningen blev der målt op til 66.000 mg/m<sup>3</sup>.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde overordnet til formål at dokumentere, om opvarmningen af den umættede zone fremmede massefjernelsen i forhold til en normal "kold" vakuumventilation. Herudover skulle det undersøges, om det var muligt at styre opvarmningen samt om opvarmningen medførte en u hensigtsmæssig spredning af forureningen. Endelig skulle eventuelle sætninger på bygninger dokumenteres og der skulle udarbejdes et samlet miljøregnskab for oprensningen. Med henblik på at opfylde disse formål udføres der med støtte fra Teknologiprogrammet følgende:

- Modellsimuleringer af damp-, varme- og trykudbredelse for forskellige injektions- og ekstraktionsscenerier. Arbejdet udføres med henblik på at kunne designe dampanlægget og indrette driften således, at uacceptabelt høje temperaturer terrænnært undgås.
- Monitering af forureningsniveauet i den ekstraherede gasfase ved laboratorieanalyser og ved automatiske samt manuelle PID-målinger.
- Monitering af forureningsforholdene i den mættede zone under oprensningsområdet ved laboratorieanalyse af ekstraheret grundvand/kondensat.
- Temperaturmonitering ved hjælp af temperaturboringer til manuel aflæsning og borer opkoblet til SRO-anlæg og placeret nær/under bygninger eller eksterne ledninger.
- Analyse af grundvandsprøver før, under og efter opvarmningen.
- Analyse af poreluftprøver før, under og efter opvarmningen.

- Fotodokumentation og præcisionsnivelementer før, under og efter oprensningen.
- Udarbejdelse af overordnet og detaljeret miljøregnskab for projektet ved hjælp af en model udviklet af Banestyrelsen under LIFE 96.

Afværgeprojektet mundede på denne baggrund ud i en række overordnede erfaringer og konklusioner vedrørende dampstripping, der er beskrevet i nedenstående samlede resultat-/erfaringsafsnit 2.8.3.

#### **2.7.1.4 Industrivej, Hedehusene**

På Industrivej i Hedehusene har det tidligere Hedeselskabet Miljø og Energi A/S (nuværende Orbicon) gennemført et afværgeprojekt med dampstripping i perioden 1998 til 2002. Ove Arkil A/S har været hovedentreprenør. Projektet er gennemført for det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden) og er støttet af Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 877 (2005).

Projektet omfattede oprensning af primært PCE i en ca. 6 - 8 meter tyk umættet zone bestående af sand med indslag og indlejrede lag af silt og ler. Desuden søges den øverste ca. halve meter af et underliggende lerlag oprenset. Oprensningen blev foretaget i tre delområder på skift. Der er i alt etableret ca. 150 kombinerede injektions- og ekstraktionsboringer og boringer til oppumpning af sekundært grundvand umiddelbart over ovennævnte lerlag. Grundvandsoppumpningen er suppleret med sugespidsanlæg. Oprensningen blev gennemført ved dampinjektion i forureningens periferi og ekstraktion af poreluft, damp, grundvand og kondensat centralt i kildeområderne.

Målsætningen med afværgeprojektet var overordnet at reducere mængden af forureningsstoffer således, at der ikke var risiko for overskridelser af henholdsvis grundvandskvalitetskriteriet i det primære magasin og risiko over for indeklimaet i bygninger på arealerne, der anvendes til beboelse. Efter afslutningen af afværgeprojektet var der opnået stor oprensningseffekt på henholdsvis 97 % eller mere i umættet zone og 93 % i den mættede zone (sekundært magasin). Den efterladte restforurening har i størstedelen af området været begrænset og målsætningen vurderedes at være nået. Oprensningen i det underliggende lerlag var imidlertid begrænset primært pga. at tilstrømmende grundvand har forhindret en effektiv opvarmning.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At belyse oprensningseffekten i oprensningsintervallet og i den øvre del af den underliggende moræneler.
- At belyse en mulig horisontal forureningsspredning.
- At tilvejebringe en detaljeret belysning af dampfrontens udseende og udvikling over tid.
- Dokumentere oprensningseffekten under cyklisk drift.
- At dokumentere eventuelle geotekniske ændringer.
- At undersøge ændringer i terrænnær jordstruktur samt plante- og dyrelivet i de terrænnære jordlag.
- At dokumentere eventuelle ændringer i den grundvandskemiske sammensætning af vandet i det opvarmede sekundære magasin umiddelbart over lerlaget.
- At dokumentere tidshorizonten for afkøling af jordlagene efter standsning af dampinjektionen.



Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Sondringer med MIP sonde før og efter oprensningen i udvalgte felter samt analyse af et stort antal jord- og vandprøver.
- Poreluftmålinger i og udenfor oprensningsområdet før og efter oprensningen.
- Detaljeret temperaturmonitoring horisontalt og vertikalt ved hjælp af termofølere for hver 10 – 25 cm i udvalgte borer opkoblet til SRO samt for hver 0,5 til 0,75 m i borer som aflæses manuelt.
- Udvidet dokumentation af forureningsniveauet i den ekstraherede gas- og vandfase under cyklisk drift ved henholdsvis felt-GC og akkrediterede analyser.
- Præcisionsnivelementer før, under og efter oprensningen.
- Analyse af jordprøver samt plante- og dyrearts bestemmelser og tællinger før og efter opvarmningen.
- Grundvandsprøvetagning i det opvarmede sekundære magasin over lerlaget før og efter oprensningen.
- Halvårlig temperaturmonitoring i udvalgte borer i en treårig periode efter standsning af opvarmningen.

Afværgeprojektet mundede på denne baggrund ud i en række overordnede erfaringer og konklusioner vedrørende dimensionering, etablering og drift af anlæg til dampstripping, der er beskrevet i nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.8.3.

#### **2.7.1.5 Yderligere aktiviteter**

Ud over udviklingsprojekterne finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, er der ligeledes kendskab til andre gennemførte afværgeprojekter, hvor dampstripping har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Udvalgte projekter gennemført af Miljømyndighederne, hvor dampstripping blev etableret som en del af afværgestrategien, er f.eks.:

- Cliprens, Hærvejen i Rødekro (Region Syddanmark)
- Hedensted (tidligere Vejle Amt, nuværende Region Syddanmark)

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af driftsmæssig karakter.

Med opstart i juni 2008 gennemfører Region Syddanmark et projekt under Teknologiprogrammet, hvor dampstripping anvendes i kombination med in situ termisk desorption. Data fra dette projekt forventes publiceret i 2009.

#### **2.7.2 Resultater af aktiviteter**

Nedenfor præsenteres de væsentligste overordnede resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

- Dampstripping er en effektiv teknik til opvarmning af sandede jordlag og kan være effektiv til at øge forureningsfjernelsen i forhold til konventionel vakuumventilation.

- Opvarmning til kogepunktet af et tre meter tykt lavpermeabelt lag mellem to dampzoner tager generelt omkring en måned.
- Ved jordkoncentrationer af PCE i den umættede zone på over ca. 1.000 mg/kg kan der ved yderligere opkoncentrering i kondensationsfronten forekomme vertikal mobilisering af fri fase. For de klorerede opløsningsmidler generelt har TCM størst potentiale for vertikal mobilisering. For TCM anses niveauer i jorden på ca. 125 mg/kg at udgøre den nedre grænse for hvornår vertikal mobilisering eventuelt kan forekomme.
- En strategi med dampudbredelse udefra ind mod hot spot sikrer bedst mod utilsigtet forureningsspredning, men medfører desuden energitab til opvarmning af jordlag som støder op til kildeområdet.
- Iblanding af luft i dampen medfører en løbende fjernelse af mobiliseret forurening på gasfase og nedsætter risikoen for vertikal mobilisering. Efter damp/luft gennembrud til ekstraktionsboringen/-erne kan der opnås højere temperaturer ved injektion af ren damp. Iblandingen af luft under grundvandsspejlet forudsætter meget grundige overvejelser med hensyn til geologisk lagdeling.
- Cyklisk dampinjektion efter fuld opvarmning af kildeområdet kan lette oprensningen af lavpermeable jordlag og forurening i kondensationsfronter.
- Ved dampinjektion overfor dybtliggende forurening er varmetabet til terræn negligeabelt.
- Der bør ikke anvendes forseglingsmaterialer baseret på bentonit alene. På ét projekt blev bentonitforseglingen utæt (forsvandt) i flere injektions/ekstraktions- og monitoringsboringer og måtte udskiftes med storebæltsblanding (lav-alkali, sulfatbestandig cement, bentonit, støbesand og beto-kem). Denne type forsegling har p.t. fungeret efter hensigten.
- Ved anvendelse af kombinerede injektions- og ekstraktionsboringer med tilhørende manifold/ventilsystem kan der opstå problemer med tilkitning med ekstraheret finkornet materiale af ventiler, måleudstyr, måleflanger mv.
- Ved placering af ekstraktionspumpen/-erne for gasfase før enheder til køling og kondensatudsikling kan der opstå store problemer med tilkalkning.
- Når forurenede jord og grundvand opvarmes bliver det ekstremt aggressivt overfor anlægskomponenterne. Kraftig korrosion af boringer, rørledninger og anlægskomponenter kan – specielt ved lange driftsperioder – medføre behov for omkostningsfulde servicearbejder/udskiftninger. Forsyningsledninger, anlægskomponenter mv. kan med fordel etableres overjordisk med gode adgangsforhold for inspektion og reparation. På ét projekt er der med succes anvendt en speciel Grundfos dykpumpe med overdimensioneret motor og køleribber. På to projekter har det været nødvendigt at installere varmevekslere udført i rustfrit syrefast stål.
- Detaljeret vertikal temperaturmonitoring har meget stor værdi i vurderingerne af forløbet af afdræning af grundvand og/eller vurderinger af forløbet af oprensninger.
- I to projekter er der påvist signifikant forhøjede indhold af CO<sub>2</sub> i den ekstraherede gasfase. Dette indhold af CO<sub>2</sub> kan ikke alene stamme fra afgang fra grundvand som følge af opvarmningen, men kan også skyldes vådoxidation af betydelige mængder forureningskomponenter.
- Forud for design af anlægget bør variationen i grundvandsstanden i området dokumenteres med længst mulige tidsserier. Foreligger der ikke pejetidsserier bør filtersætninger og estimater af nødvendig grundvandsop-

pumpning baseres på vurderinger af de seneste års nedbørsforhold, og hvorvidt disse er repræsentative.

- Opvarmning af jorden og specielt påvirkning af kloakker i og udenfor oprensningsområdet kan medføre væsentlige lugtgener primært ved lavtrykspassager.
- Anvendes recirkulation af procesvand, kan bakterievækst medføre problemer med bio-fouling. Således er der på et projekt fjernet 30 – 50 liter biologisk materiale fra en koalescensudskiller.
- Ved oprensninger under bygninger hvor temperaturen hæves væsentligt terrænnært, er der risiko for, at der sker en betydelig opvarmning af rum i stueniveau, og at der forekommer mindre sætninger af de pågældende bygninger samt revnedannelser. I visse tilfælde kan damp direkte slå op i vægge og hulrum. Monitoringen på en sag indikerer, at sætningerne helt eller delvist retableres under afkølingen af jordlagene efter opvarmningen. Dette er dog usikkert.
- Sikker hydraulisk kontrol med oprensningsområdet er meget vigtig. Eventuel uhindret indstrømning af grundvand kan markant forlænge driftstiden eller eventuelt hindre fuld oprensning.
- Korte driftsstop på ekstraktionsanlægget ved samtidig dampinjektion kan medføre en meget hurtig temperaturudbredelse bort fra oprensningsområdet.
- Dampstripping kræver intensiv monitoring, hyppige tilsyn og hurtig beslutningsgang for bygherre, rådgiver og entreprenør.
- De anvendte metoder til monitoring af tryk i dampzonen og fugtighed i den ekstraherede gasfase på projektet i Ålborg viste sig ikke at være velegnede.
- Modellering med modellen T2VOC er med rimelig succes på én sag anvendt som led i design af anlægsopbygning og planlægning af driftsstrategi.
- Registrering af forureningsniveauet i ekstraheret luft ved PID måling med et automatisk system var forbundet med mange tekniske vanskeligheder og blev aldrig anvendeligt.
- I visse tilfælde kan der som led i opvarmning og afkøling af injektionsboringer forekomme udfældninger af kalk i filteråbningerne i et omfang som markant nedsætter boringernes injektionskapacitet.

### 2.7.3 Perspektivering

Dampinjektion er en udviklet, dokumenteret og afprøvet teknik til oprensning af semi-permeable formationer med en permeabilitet på mere end ca. 1 darcy. Et fremtidigt potentielt vigtigt anvendelsesområde for dampstripping er oprensning af opsprækkede medier, herunder specielt kalk. Den store udfordring ligger i at der i opsprækket kalk ikke med sikkerhed kan etableres hydraulisk/pneumatisk kontakt mellem injektions- og ekstraktionspunkter. Opvarmningen og ekstraktion af forureningskomponenter skal således foretages fra samme punkt, hvilket kræver en udvikling af oprensningskonceptet for at risikoen for spredning af forurening imødegås.

Et andet potentielt fremtidigt anvendelsesområde er på mindre projekter, hvor dampstripping som afværgeteknik implementeres på en standardiseret måde for hurtigt og effektivt at fjerne små kildeforureninger.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. dampstripping som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har

været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Dampstripping anvendes som en del af afværgestrategien på få danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af dampstripping som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med dampstripping. Det vurderes, at der f.eks. er et behov for en opsamling, dokumentation og sammenfatning af resultater og erfaringer opnået efter de første 8-10 års drift med teknikken på udvalgte repræsentative fuldskala afværgeprojekter.

#### 2.7.4 Referencer

I kapitlet er der refereret til følgende projekter:

- /2.8.1/ Termisk assisterede oprensninger. Miljøprojekt Nr. 409, 1998. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.2/ Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved dampstripping. Miljøprojekt Nr. 543, 2000. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.3/ Dampoprensning med vacuume ekstraktion. Miljøprojekt Nr. 552, 2000. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.4/ Dampoprensning under en bygning. Miljøprojekt Nr. 749, 2003. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.5/ Termisk assisteret vacuume ekstraktion af PCE. Hovedrapport. Miljøprojekt Nr. 823, 2003. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.6/ Termisk assisteret vacuume ekstraktion af PCE. Bilagsrapport. Miljøprojekt Nr. 824, 2003. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.8.7/ Dampoprensning af klorerede opløsningsmidler på tidligere industrigrund i Hedehusene. Miljøprojekt Nr. 877, 2004. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.8 Termisk ledningsevne

#### 2.8.1 Afværgeprincip

Termisk ledningsevne tilhører en gruppe af termisk assisterede afværgeteknikker som kan anvendes ved in situ oprensning af forurenede jord og grundvand i kildeområder.

De termiske teknikker er baseret på en række mekanismer som optræder, når temperaturen i det forurenede kildeområde hæves markant, herunder: At flygtigheden af de fleste stoffer øges markant, at bindingen til jorden ved sorption svækkes for de fleste stoffer, at mobiliteten af frie faser i jordmiljøet øges, at kogning af fri fase og vand starter ved en relativt lav temperatur, at kogning af

porevand medfører dannelse af gasfase overalt i jordlagene, at reduceret vandindhold, som følge af kogning, medfører større pneumatisk ledningsevne, at visse stoffer nedbrydes kemisk in situ mv.

Ved oprensning med termisk ledningsevne placeres borer (udført i stål) udstyret med varmelegemer i det forurenede område. Varmelegemerne opvarmes til 300 - 700 °C hvorved de omkringliggende jordlag opvarmes som følge af varmeledning. Afhængig af opvarmningstiden og afstanden til varmelegemerne kan der i praksis opnås jordtemperaturer på op til ca. 400 °C. I de fleste oprensninger er det dog ikke nødvendigt at foretage en opvarmning til højere temperaturer end porevands kogepunkt. Ved opvarmningen mobiliseres forureningskomponenterne på gas- og vandfasen og fjernes ved vakuumelekstraktion samt supplerende grundvandsboringer. En del af forureningskomponenterne vil oxideres i de meget varme områder umiddelbart omkring og i borerne. Der vil dog være behov for køling af den ekstraherede gasfase, udskilning af kondensat samt rensning af poreluft og kondensat.

Da den termiske ledningsevne – i modsætning til den hydrauliske ledningsevne – ikke varierer væsentligt mellem sand, silt og ler vil opvarmningen ved termisk ledningsevne foregå forholdsvis jævnt over oprensingsdybden. Da opvarmningen ved varmeledning desuden foregår forholdsvis langsomt er varmeudbredelsen forholdsvis nem at styre, så uønsket opvarmning af installationer mv. kan undgås.

Den pneumatiske ledningsevne i de opvarmede og delvist udtørrede jordlag vil være markant højere end i de omkringliggende mere vandfyldte områder. Hermed sikres mulighed for vakuumventilation i lerlag og herved en hurtig fjernelse af forurening på gasfase, hvorved risikoen for utilsigtet spredning af forureningen fra oprensingsområdet minimeres.

Metodens største ulempe er, at jordlag med kraftig grundvandsstrømning kan være vanskelige at opvarme pga. vandets kølende effekt. Metoden kan således ikke anvendes på steder, hvor der er stor tilstrømning af grundvand til det opvarmede område, idet kogning af dette vand vil være bekosteligt og nedsætte energitilførslen til de omkringliggende jordlag. Anvendelsen af metoden under sådanne forhold forudsætter således etablering af hydraulisk kontrol med grundvandet og eventuelt sænkning af vandspejlet i oprensingsområdet.

I tabel 2.8.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.8.1. Overordnede karakteristika for termisk ledningsevne som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter primært mod kildeoprensning af fri fase forurening såvel som forurening på damp- eller opløst form eller sorberet forurening i umættet og mættet zone. Teknikken er ikke velegnet til faneoprensning.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker som f.eks. vakuumventilation eller kemisk oxidation til oprensning af evt. restforurening eller diverse teknikker til spredningskontrol. Ofte er oprensningseffekten dog så høj, at yderligere oprensning ikke er påkrævet.
Forureningskomponenter	Klorerede opløsningsmidler, BTEX, benzin, lette og tunge olieprodukter, creosot og flygtige eller vandopløselige tjærestoffer mv.
Geologi i behandlingszone	Ler, silt, sand, kalk. Teknikken kræver dog, at der ikke er en væsentlig vandgennemstrømning af oprensingsområdet.

Fordele og ulemper	<p>Effekt: Kan der etableres en zone med temperaturer over forureningsstofferne eutektiske kogepunkter (kogepunkter når den frie fase er i kontakt med vand) i hele behandlingszonen er teknikken effektiv til hurtig nedbringelse af kildestyrken.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden kan effektivt reducere omfanget af en kildeforurening over en relativt kort tidshorisont.</li> <li>• Metoden er særligt velegnet til oprensning af lavpermeable jordlag.</li> <li>• Metoden er forbundet med stor sikkerhed for effekt.</li> <li>• Finkornede formationer kan oprenses med metoden.</li> <li>• Metoden omfatter en relativ kort driftsperiode, hvilket begrænser varigheden af gener for evt. naboer.</li> <li>• Der er ikke behov for længerevarende monitoring efter driftsperioden.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• I anlægsperioden kan metoden være årsag til visse nabogener (støj, støv, rådighedsindskrænkning mv.).</li> <li>• Der er risiko for opvarmning af bygninger og installationer i jorden.</li> <li>• Metoden er forbundet med relativt store anlægs- og driftsomkostninger såvel som et stort energiforbrug.</li> <li>• Erfaringerne i Danmark omfatter endnu kun få feltprojekter.</li> </ul>
--------------------	---

## 2.8.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført ét projekt med termisk ledningsevne støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet. Der er ligeledes gennemført enkelt pilotforsøg i andet regi. I de følgende afsnit tages der udgangspunkt i erfaringer opnået igennem aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet såvel som udvalgte aktiviteter gennemført i andet regi.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af de opnåede resultater i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projektet henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

### 2.8.2.1 *Ravnshjergvej, Alsønderup*

På Ravnshjergvej i Alsønderup har det tidligere Hedeselskabet Miljø og Energi A/S (nuværende Orbicon) i samarbejde med entreprenørfirmaet Vand-Schmidt A/S opstartet et afværgeprojekt med termisk ledningsevne i 2001. Projektet skulle gennemføres for det tidligere Frederiksborg Amt (nuværende Region Hovedstaden) og blev støttet af Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet.

Projektet omfattede en planlagt oprensning ved termisk ledningsevne af PCE forurenede moræneler beliggende fra ca. 1 – 10 m u.t. i et velafgrænset kildeområde (ca. 75 m<sup>2</sup>) delvis under en tidligere renseribygning. Oprensningen skulle foretages ved termisk ledningsevne fra tre kombinerede varme- og ekstraktionsboringer. På baggrund af simpel modellering blev en afstand på ca. 5 meter mellem varmelegemerne og en temperatur på 5-600 °C blev fundet til at være optimal, ud fra et tids- og fordelingsmæssigt synspunkt.

På grund af anlægsnedbrud umiddelbart efter opstart blev oprensningen imidlertid ikke ført til ende. Efter ca. 24 timers drift opstod der således fejl på varmelegemerne og anlægget blev stoppet. Ved undersøgelse af varmelegemerne blev det konstateret, at disse var ødelagt pga. gennemtæring og oprensningen blev derfor ikke gennemført med denne metode.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har på denne baggrund haft til formål at uddrage erfaringer fra det gennemførte afværgeprojekt, herunder hvad der gik galt samt en beskrivelse af den nuværende viden på området. Der henvises til nedenstående afsnit 2.9.3 for en samlet præsentation af erfaringsopsamlingen som ligeledes er afrapporteret i Miljøprojekt 1177 (2007).

### **2.8.2.2 Vestergade, Skuldelev**

På Vestergade i Skuldelev har NIRAS A/S i samarbejde med Krüger A/S gennemført et pilotprojekt med termisk ledningsevne i slutningen af 2006. Projektet er gennemført for det tidligere Frederiksborg Amt (nuværende Region Hovedstaden).

På lokaliteten er der fundet markant forurening med PCE, herunder store mængder fri fase. I pilottestfeltet består geologien overordnet af ca. 1,5 m fyld underlejret af 1,5-2 m højorganiske moseaflejringer. Herunder træffes vekslende lag af ler og sand med varierende tykkelse. I ca. 5,5 m u.t. findes et tykt gennemgående lerlag, der afgrænser testfeltet nedadtil. Forureningen med PCE er udbredt i et terrænnært sekundært magasin, der er knyttet til moseaflejringerne og de underliggende lag af ler og sand.

Pilottesten blev gennemført ved etablering af 4 varme- og ekstraktionsboringer, 9 temperatur-moniteringsboringer samt grundvandsoppumpning for hydraulisk kontrol. Testperioden varede 60 dage.

Formålet med pilotprojektet var at dokumente opvarmningen i testfeltet og den følgende effekt på forureningskoncentrationerne. Det har ligeledes været et formål at teste udstyrets bestandighed under de givne forhold samt at optimere designet af en evt. efterfølgende fuldskalaoprensning.

Generelt blev der konstateret en reduktion af forureningskoncentrationer under testforløbet. Af procesmæssige erfaringer var primært tilstedeværelsen af vand en udfordring. Der blev ikke konstateret indikationer på tæring på boringer eller problemer med overbelastning af varmeboringerne. Der har således været 100 % drift på systemet igennem hele testperioden.

### **2.8.2.3 Yderligere aktiviteter**

Ud over ovennævnte projekter pågår der på nuværende tidspunkt projektering af en oprensning med klorerede opløsningsmidler på Knullen, Odense, fra en formation af moræneler og et sandmagasin ved en kombination af termisk ledningsevne og dampstripning. Som et uundværligt led i designet af den samlede oprensning er der anvendt det termiske simuleringværktøj STARS (Steam, Thermal and Advanced processes Reservoir Simulator) udviklet af CMG Ltd., Canada. For yderligere informationer vedrørende STARS henvises til [www.cmgl.ca](http://www.cmgl.ca). Simuleringerne har været afgørende for at dimensionere den samlede afværgeforanstaltning.

Der er ligeledes foretaget en pilottest på en lokalitet i Søborg, hvor termisk ledningsevne er testet som afværgeteknik overfor en forurening med terpentin-stoffer (primært Xylen). Pilottesten er gennemført af Krüger A/S i første halvdel af 2007. Ved pilottesten blev det konstateret muligt at oprense terpentin-komponenterne i jorden ved termiske ledningsevne selv i en lavpermeabel formation af moræneler. Ved en afstand på 3 meter mellem varmeboringerne var det muligt at opnå fuldstændig opvarmning af jorden.

### 2.8.3 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste overordnede resultater, erfaringer og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

- Metoden er dokumenteret meget effektiv både overfor de flygtige forureninger som PCE, TCE, TCA etc., men også for mindre flygtige komponenter som PAH, pentachlorphenol, gasolier mv. I danske såvel som amerikanske oprensninger er oprensningseffektiviteten i de fleste tilfælde større end 99 %.
- I forhold til teknikkens anvendelse vurderes det, udover prisen, at der er udfordringer i to retninger. Dels er der en række patenter der beskytter metoden og således reducerer konkurrencen, dels er der muligvis geotekniske problemer, specielt ved udtørring af jorden. Laboratorieforsøg udført af GEO i forbindelse med evalueringen af metoden i Alsønderup indikerer mulige volumenreduktioner på op til 2-3 %. Det er dog usikkert om ændringerne under feltforhold er de samme.
- De meget høje temperaturer, der opnås i behandlingsboringer og ekstraktionsanlæg, nødvendiggør brug af robuste materialer. Det er observeret, at høje temperaturer i forbindelse med jordens naturlige indhold af klorider, samt dannet klorid og syre ved termisk oxidation af PCE, giver endog meget reaktive miljøer. Kombinationen af de høje temperaturer og korrosive gasser øger destruktionshastigheden af selv højt legerede ståltyper i et omfang, der kræver specielle legeringer til boringsinstallationen og beskyttelseskapperne omkring varmelegemerne. I mange sammenhænge kan korrosionsproblematikken takles ved valg af større godstykke af standard ståltyper.
- For at hindre sammensmeltning af varmelegemer er det afgørende, at effekten til varmelegemerne reguleres individuelt ud fra temperaturen ved de enkelte varmelegemer. Der findes patenterede driftsikre varmelegemer.
- Ved pilottesten i Skuldelev betød gennemstrømmende vand i oprensningsområdet, at der ikke kunne etableres kogepunktstemperaturer i de permeable aflejringer, hvor den kraftigste forurening var samlet.
- Metoden er relativt dyr og energikrævende. For flygtige stoffer er det beregnet ved dimensioneringen, at der skal anvendes ca. 300 kWh/m<sup>3</sup>. I amerikanske oprensninger er der ved samme typer stoffer i et dokumenteret tilfælde brugt ca. 360 kWh/m<sup>3</sup>.

### 2.8.4 Perspektivering

Termisk ledningsevne er en af kun få metoder, hvorved det er muligt at foretage en fuldstændig oprensning af kildeområder med store mængder forurening på fri fase. Endvidere rummer teknikken mulighed for oprensning af mange komplekse stofblandinger samt af stoffer med lav flygtighed og mobilitet.

Termisk ledningsevne kunne anvendes til målrettet oprensning af små volumener forurenet jord placeret på stor dybde, eller svært tilgængelige steder, f.eks. restforurening med olie eller klorerede opløsningsmidler under veje, bygninger mv.

Endelig rummer teknikken mulighed for oprensning af opsprækkede bjergarter, herunder kalk, såfremt det foregår under umættede forhold, eller der kan etableres hydraulisk kontrol med oprensningsområdet.



Der er fortsat et behov for tilpasning af teknikken til danske forhold, herunder nedskalering og konceptudvikling i forhold til f.eks. oprensning af små vanskeligt tilgængelige forureninger. Endvidere er der behov for at videreudvikle designværktøjer for metoden.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. termisk ledningsevne som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Termisk ledningsevne er stadig kun afprøvet på få lokaliteter i Danmark.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af termisk ledningsevne som afværgeteknik på andre danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med termisk ledningsevne.

## 2.8.5 Referencer

I kapitlet er der refereret til følgende projekter:

- /2.9.1/ Termisk assisterede oprensninger. Miljøprojekt Nr. 409, 1998. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.9.2/ Termisk assisteret vakuumventilation. Miljøprojekt Nr. 1177, 2007. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.9.3/ ISTD pilottest, Vestergade 5, Skuldelev. Udarbejdet for Frederiksborg Amt af Krüger A/S, Februar 2007.
- /2.9.4/ ISTD pilotoprensning (ikke offentliggjort rapport), Udført af Krüger, August 2007.

## 2.9 Termisk jordbehandling (ex-situ, on-site)

### 2.9.1 Afværgeprincip

Termisk jordbehandling tilhører en gruppe af termisk assisterede afværgeteknikker, som kan anvendes til ex-site eller on-site rensning af jord forurenet med en lang række organiske forureningskomponenter, herunder klorerede opløsningsmidler, gasolie, tjæreprodukter, PAH mv.

Teknikken er baseret på opvarmning af jorden til mellem 200 og 700 °C, typisk 500 – 550 °C, og kan dels bestå i en egentlig forbrænding af jorden, hvor der er direkte kontakt mellem jord og forbrændingsgasser/flamme og dels i en indirekte termisk behandling ved opvarmning af et kammer indeholdende den forurenede jord. I dette kammer er der ikke direkte kontakt mellem jord og forbrændingsgasser. Ved opvarmningen desorberer og fordampes forureningskomponenterne (termisk desorption) og ved de høje temperaturer vil en del forureningskomponenter oxideres eller omdannes ved pyrolyse. Anlæg uden direkte kontakt mellem forbrændingsgasser/flamme og jord vil typisk indrettes med en efterbrænding af de fordampede forureningskomponenter.

Anlæg til termisk jordbehandling omfatter desuden forskelligt udstyr til for- og efterbehandling mv.

### 2.9.2 Udførte aktiviteter

Med støtte fra Teknologiprogrammet er der gennemført en rensning af jord forurennet med PAH, oliekomponenter og tungmetaller på RGS 90's anlæg i København. Rensningen er foretaget i en roterende ovn med en kapacitet på 10 – 15 tons jord per time. Før behandling er sten, bygningsaffald og andre større emner frasorteret. Herefter er jorden opvarmet indirekte i den forreste del af rotéovnen til i alt 550°C, efterfulgt af en yderligere direkte opvarmning med en oliebrænder i den bageste del af ovnen. De dannede gasser er rensset i røggasfiltre og ledt til en efterbrænder. Røggassen er vasket i en røggassscrubber før udledning til atmosfæren.

Formålet med projektet var:

- At dokumentere det pågældende jordbehandlingsanlægs rensningseffekt for forskellige jordtyper forurennet med PAH-forbindelser, olieprodukter og tungmetaller.
- At belyse forandringer af den behandlede jord af betydning for produktets genanvendelse herunder specielt geotekniske egenskaber og frigivelse af tungmetaller og/eller uorganiske salte.
- At skabe grundlag for en økonomisk og miljømæssig vurdering af den termiske behandlingsmetode.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Termisk behandling over 24 timer af to forskellige typer jord (hhv. fyld og ler) med forskellige forureningsniveauer af PAH, oliekomponenter (hhv. 3.900 og 650 mg/kg) og tungmetaller. Under testen blev der udtaget prøver forskellige steder i anlægget for at tilvejebringe bedst mulig dokumentation for anlæggets rensningseffekt.
- Registreret forbrug af el, olie, vand mv. under rensningen.
- Spildevand og røggas er analyseret.
- Geotekniske undersøgelser før og efter behandlingen, herunder analyse af kornstørrelsesfordeling, udførelse af komprimeringsforsøg, jordkemiske analyser og mikroskopi af tyndslib af jordprøver.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til Miljøprojekt 705, 2002.

### 2.9.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Den termiske jordbehandling medførte en drastisk reduktion af indholdet af olie- og tjærestoffer. Oprensningsgraden for de enkelte olie-/tjæreparametre lå på 96,4 – 99,8 % for fyldjorden og over 99 % for alle parametre for lerjorden. Indholdet af kviksølv blev reduceret med godt 95% som følge af afdampning.

- Forsøget viste en forøget udvaskning af arsen med en faktor tre fra den behandlede jord, hvorimod udvaskningen af samtlige andre tungmetaller blev reduceret signifikant ved jordbehandlingen.
- Opvarmningen medførte en markant sortfarvning af jorden. Desuden observeredes en stigning i kornstørrelsen, og jorden blev mere grynet/sandet ved behandlingen. Jordens geotekniske egenskaber blev ligeledes forandret som følge af den termiske behandling. Således kunne den behandlede jord komprimeres til en større rumvægt.
- Anlægget havde et relativt stort energiforbrug per rensede tons jord. Opgørelsen er præget af, at energiforbruget ved opstart og nedlukning vægter forholdsvis meget i så kort en driftsperiode. Olieforbruget var væsentligt større ved behandling af lerjorden end ved fildjorden.

#### 2.9.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. termisk jordbehandling som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikken anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Der er ikke kendskab til om resultater opnået ved de gennemførte aktiviteter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af termisk jordbehandling på behandlingsanlæg.
- Der vurderes ikke at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med termisk jordbehandling (ex-situ, on-site).

#### 2.9.5 Referencer

I kapitlet er der refereret til følgende projekter:

/2.10.1/ Miljøprojekt Nr. 705, 2002. Rensning af jord med blandingsforureninger ved hjælp af termisk jordbehandlingsanlæg. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.10 Elektrokemisk jordrensning (ex-situ, on-site)

#### 2.10.1 Afværgeprincip

Med henblik på oprensning af tungmetalforurenede jord er der gennem en år-række udført forsøg med forskellige elektrokemiske metoder.

Elektrokemisk oprensning omfatter dels elektrokinetiske metoder og dels elektrodialytiske metoder. Fælles for disse to grupper af teknikker er, at den forurenede jord tilføres en elektrisk jævnstrøm, hvorved positive (metal)ioner transporteres mod den negative elektrode (katoden), og negative ioner vil transporteres mod den positive elektrode (anoden). Transporten sker i jordvæsken.

Ved elektrokinetisk oprensning etableres tre kamre adskilt af selektivt permeable membraner. Således vil elektroderne placeres i de yderste kamre omkring den forurenede jord. Alle kamre tilføres en elektrolytopløsning, og der påføres en jævnstrøm. Med tiden vil metallerne fra den forurenede jord opkoncentreres i elektrolytopløsningen omkring elektroderne og kan genvindes herfra. Samtidig vil produktion af brintioner ved anoden medføre udbredelse af en forsuringsfront herfra, mens en basisk front vil udbredes fra katoden. Disse pH påvirkninger er af betydning for mobiliseringen af en del metaller. Generelt vil tungmetaller som Cu, Zn, Pb og Cd således desorbere under sure forhold og adsorbere til jordpartiklerne ved højere pH-værdier.

I forhold til de elektrokinetiske metoder indskydes der ved elektrodialytisk oprensning yderligere to kamre mellem elektroderne og den forurenede jord. Disse kamre huser elektrolytopløsning og ionbyttermembraner for henholdsvis anioner og kationer. Ionbyttermembranerne tillader kun passage af henholdsvis anioner og kationer og har til formål at hindre udbredelsen af en basisk front gennem jorden samt at øge den del af strømmen, som går til at fjerne tungmetaller. Ionbyttermembranerne forhindrer således transport gennem jorden af harmløse ioner i elektrolytopløsningen. Ionbyttermembranerne medfører, at der ved elektrodialytisk jordrensning kan opnås lavere slutkoncentrationer af tungmetaller i jorden end ved elektrokinetisk oprensning.

De elektrokemiske jordrensningsmetoder er særligt velegnede til at rense lerede og siltede jorde, og kan umiddelbart anvendes til fjernelse af kobber, zink, bly, nikkel og cadmium. Ved rensningsprocessens afslutning er tungmetallerne opkoncentreret i elektrolytvæske, hvorfra genindvinding er mulig.

Elektrokemiske metoder kan teoretisk set anvendes både in-situ, on-site og ex-site. Der er dog en række forhold som gør, at in-situ rensning ofte ikke kan lade sig gøre.

## 2.10.2 Udførte aktiviteter

Med speciel fokus på oprensning af kobber, chrom og arsen, som i stor udstrækning har været anvendt til træimprægnering, er der med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram udført følgende:

### 2.10.2.1 Laboratorieforsøg

Formålet med laboratorieforsøgene var at belyse, hvorvidt effekten af den elektrodialytiske oprensning af chrom, kobber og arsen kan øges ved tilsætning af specielle elektrolytopløsninger.

Forsøgene blev udført i et kammer som kunne rumme 1 kg jord, og der blev anvendt jordprøver fra tre forskellige lokaliteter. Elektrodeafstanden var 15 cm. Til jord forurenede med kobber og arsen blev der tilsat ammoniakvand, mens der til jord forurenede med kobber, chrom og arsen blev tilsat henholdsvis ammoniakvand og en blanding af ammoniakvand og citronsyre.

### 2.10.2.2 "Lille" og "stort" pilotanlæg

Med henblik på opskalering af metoden til feltskala blev der etableret et "lille" og et "stort" anlæg til pilotforsøg.

Det lille pilotanlæg kunne rumme 200 kg jord og blev opbygget med en elektrodeafstand på ca. 60 cm. Anlægget blev drevet i to perioder af ni måneders varighed, og der blev blandt andet udført forsøg med kobber- og arsenforurenede jord.

Det store forsøg blev udført på 8.000 kg jord i en fire meter lang container forsynet med fire elektrodeenheder med en indbyrdes afstand på 110 cm. Forsøgene blev udført over seks måneder med tilsætning af ammoniakvand.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til Miljøprojekt 626, 2001.

### 2.10.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Ved laboratorieforsøg blev det vist, at tilsætning af ammoniakvand til elektrolytopløsningen medfører en forøget mobilisering af kobber og arsen men ikke af chrom. Laboratorieforsøgene viste desuden, at såvel chrom, kobber som arsen kunne mobiliseres ved samtidig tilsætning af citronsyre og ammoniakvand.
- Forsøg i et lille pilotanlæg (200 kg jord), hvor der kun er tilsat ammoniakvand, viste efter ni måneders rensning gode resultater for kobber og mindre gode resultater for arsen. Der blev ikke fjernet chrom af betydning. Det blev vist, at effektiviteten blev øget ved forudgående blanding af jorden med koncentreret ammoniak. Ved forsøgene kunne det desuden konstateres, at rensningsprocessen foregår, selvom jorden er placeret udendørs i perioder med frostvejr.
- Ved forsøg over et halvt år i et "stort" pilotanlæg med tilsætning af koncentreret ammoniak blev der beregnet en kobberfjernelse på 430 g, men dette afspejlede sig ikke i en signifikant reduktion af det samlede forureningsniveau i jorden.
- Erfaringerne fra pilotanlæggene viser, at såfremt rensningen skal foregå indenfor et acceptabelt tidsinterval, skal den strækning, som forureningskomponenterne skal vandre gennem jorden, være mindre end i pilotanlæggene i dette projekt (hhv. 60 og 110 cm). En oprensning af jorden anvendt i pilotforsøgene (Niveau af Cr, Cu og As på ca. 1.000 mg/kg) indenfor et halvt år vil således overslagsmæssigt forudsætte, at der anvendes en elektrodeafstand på højst 30 cm eller etableres specielle opsamlingsenheder mellem elektroderne med dette interval.
- Rensningstiden afhænger af startkoncentrationerne i jorden, således at høje startkoncentrationer generelt medfører lange oprensningstider.
- Rensningsprocessen bør ikke forløbe i mere end seks måneder, idet holdbarheden af nogle centrale membraner i anlægget ser ud til at være af denne størrelsesorden.
- En alafgørende faktor for at der kan udføres en rensning er, at den væske, som skal frigøre tungmetallerne fra jorden, bliver blandet godt i jorden i en forholdsvis høj koncentration fra starten. Der skal tillige løbende tilledes væske til jorden. Ved in situ oprensning kan det være vanskeligt at styre denne væsketilsætning og dermed sikre, at forureningen ikke spredes utilsigtet. Derfor kan en in situ rensning af arealer forurenet med chrom, kobber og arsen ikke umiddelbart anbefales. Jordrensningen skal således foregå on site eller ex site.
- Det vurderes, at den elektrodialytiske metode kan forbedres ved god forbehandling af jorden med reagens (sandsynligvis ammoniumcitrat ved forurening med Cu, Cr og As) samt ved anvendelse af en højere strømtæthed end der blev benyttet i det store pilotanlæg. Det vurderes, at ca. 3-4 A/m<sup>2</sup> vil være passende, medens der i det store pilotanlæg blev rensset

med 0,3 til 0,5 A/m<sup>2</sup>. Endelig anbefales en tæt overdækning af jord for at undgå fordampning af ammoniak.

- Ved optimeringer af anlægget/processen som foreslået ovenfor vurderes det, at det vil være muligt at rense en træimprægneringsjord forurenet med kobber, chrom og arsen i niveauer på ca. 3000 mg/kg på seks måneder med en strømtæthed på 3 A/m<sup>2</sup>. Spændingen skønnes, ved denne strømtæthed og ved god tilledning af reagens, at ligge på ca. 20 V, hvilket svarer til et effektforbrug på 259 kWh/m<sup>3</sup>. Med en massefylde på 1,6 ton/m<sup>3</sup> svarer det til 160 kWh/ton. Endvidere forventes der forbrugt 30-40 l koncentreret ammoniak pr. ton jord. Forbruget af citronsyre kan ikke estimeres ud fra de gennemførte forsøg

#### 2.10.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. elektrokemisk jordrensning som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette projekt.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Der er ikke kendskab til anvendelse af elektrokemisk jordrensning som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter.
- Der er ikke kendskab til om resultater opnået ved de gennemførte aktiviteter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med evt. design og projektering af elektrokemisk jordrensning.
- Udviklingsbehovet inden for elektrokemisk jordrensning vurderes at være mindre.

#### 2.10.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

/2.10.2/ Miljøprojekt Nr. 626, 2001: Elektrodialytisk rensning af jord fra træimprægneringsgrunde. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.11 Stimuleret biologisk nedbrydning - oxidation

#### 2.11.1 Afværgeprincip

Stimuleret biologisk nedbrydning er en in situ afværgeteknik, hvor naturligt forekommende bakteriers nedbrydning af organiske forureningskomponenter stimuleres/optimeres. I dette kapitel fokuseres på den type biologisk nedbrydning, der forløber i aerobe miljøer, hvor forureningskomponenter (primært olie- og benzinkomponenter) kan oxideres under aerobe forhold. Stimuleringen kan enten ske ved at tilsætte nødvendige næringsstoffer og/eller ved at tilføre ilt til behandlingszonen. Teknikken kan kombineres med tilsætning af specifikke bakterier (bioaugmentation). I kapitel 2.13 "Stimuleret biologisk nedbrydning - reduktion" fokuseres på jord- og grundvandsmiljøer, hvor nedbrydningen sker uden tilstedeværelse af ilt.

Mange forureningskomponenter kan nedbrydes under aerobe forhold, men ved kraftige forureninger kan alt tilgængeligt ilt være opbrugt ved nedbrydningsprocesserne. I disse situationer kan tilførsel af ilt derfor fremme nedbrydningen.

Ilt kan tilføres på flere forskellige måder. I den umættede zone benyttes bio-ventilationsanlæg ofte, hvor atmosfærisk luft eller ren ilt pumpes ned i behandlingszonen. Denne teknik virker bedst i permeable aflejringer og er derfor blandt andet sensitiv overfor et højt vandindhold.

Luft, ren ilt, iltholdigt vand eller faste iltholdige materialer (f.eks. ORC<sup>®</sup>) kan pumpes ned i borer i den mættede zone. Luft kan f.eks. tilføres ved at pumpe det ned gennem slanger i borerne, hvorigennem ilten diffunderer ud i vandet. Designet kan f.eks. udføres som en iltholdig biobarriere på tværs af strømningsretningen. Ved alle iltleveringssystemerne i den mættede zone er en af de primære udfordringer, at der kan ske en tilklogning på overfladen af borerne. Tilklogning kan både skyldes bakterievækst samt oxidation og udfældning af reducerede komponenter i vandet omkring boringen.

Inden etablering af stimuleret biologisk nedbrydning som afværgeforanstaltning er det afgørende at sandsynliggøre, at det fysisk er muligt, at tilføre de nødvendige mængder ilt og næringssalte inden for den planlagte oprensingsperiode.

Det skal nævnes, at afværgeproceduren vil være uforholdsmæssigt tidskrævende (mange årtier), på lokaliteter med tilstedeværelse af væsentlig/stor forureningsmasse og evt. fri fase. Forekomst af kraftig kildeforurening bør derfor fjernes indledningsvist ved anvendelse af en anden afværgeprocedure.

I tabel 2.11.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.11.1. Overordnede karakteristika for stimuleret biologisk nedbrydning - oxidation

Målsætning	Teknikken tilsigter stimulering af naturlig nedbrydning af forureningskomponenter i både den umættede og den mættede formation.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan med fordel kombineres med teknikker til kildefjernelse (f.eks. kemisk oxidation, arisprøng, vakuumentilering mv.).
Forureningskomponenter	Teknikken kan anvendes overfor aerob nedbrydelige forureningskomponenter som oliekomponenter, BTEX, MTBE, PAH'er, udvalgte pesticider mv.
Geologi i behandlingszone	Primært forurening i sand i såvel den mættede som den umættede zone.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Teknikken har primært effekt den del af formationen, hvor der kan skabes aerobe forhold.</p> <p>Fordele: Teknikken er baseret på en biologisk proces, som kan fortsætte, selvom injektionen af ilt stoppes.</p> <p>Ulemper: I heterogene aflejringer kan det være vanskeligt at bringe ilt og forureningskomponenter i kontakt.</p>

## 2.11.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført to afværgeprojekter med stimuleret biologisk nedbrydning støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 519 (2000), 860 (2003) og 1060 (2006). Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter. Disse projekter er finansieret af Miljømyndighederne i forbindelse med deres lovpligtige oprensning af forurenede grunde eller private bygherre, f.eks. oliebranchens Miljøpulje (OM).

I nedenstående afsnit tages der udgangspunkt i udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet såvel som erfaringer fra udvalgte sager fra private bygherre (OM). Sager af mere driftsmæssig karakter indgår som en del af en samlet perspektivering af afværgeteknikken sidst i kapitlet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

### **2.11.2.1 PetroTech**

Produktet Petrotech er et effektivt og miljøvenligt brandslukningsmiddel, som anvendes i forbindelse med oliebrande. Efter producentens oplysninger kan produktet desuden forøge den biologiske nedbrydning af oliestoffer in situ eller on site. Oprydningen efter brande skulle således kunne begrænses, idet den forurenede jord renses biologisk på stedet.

Forud for en planlagt feltafprøvning af stoffet PetroTech er der gennemført laboratoriestudier med tilsætning af PetroTech til dieselforurenede jord.

Formålet med forsøgene var:

- At undersøge om tilsætning af Petrotech til dieselloleforurenede jord medfører analytiske problemer.
- At undersøge om tilsætningen af PetroTech har en effekt på fordampningen og udvaskningen af kulbrinter fra jorden.

Med henblik på at dokumentere hvorvidt tilsætningen af PetroTech forøgede den biologiske nedbrydning af oliekomponenter, blev der udført et feltforsøg med dieselforurenede jord. Forsøget omfattede følgende:

- 20 tons dieselforurenede jord blev manuelt iblandet fem tons sand for at forbedre den meget lerede jords struktur.
- Den blandede jord blev udlagt i to flade bunker med en højde på 20-40 cm, og der blev tilsat 20 l Petrotech som en 8% opløsning til den ene af de to bunker.
- I en periode på tre måneder blev der udført monitoring af oliekomponenter, ilt, temperatur, pH, vandindhold. Endvidere blev der udført respirations-tests (iltforbrugsbestemmelser), mineraliseringstests og bakterietællinger.

### **2.11.2.2 BioGel/BioVand**

I forbindelse med at Hvidovre Kommune i 2001 igangsatte en forsøgsrensning af olieforurenede moræner ved tilsætning af Bio-Gel, har Miljøstyrelsen



ydet støtte under Teknologiprogrammet til supplerende monitoring på oprensingsforløbet.

Der er gennemført et forsøg på at foretage en in-situ biologisk rensning af et 1.500 m<sup>2</sup> stort område, som er forurenet med let fyringsolie. Forsøget er gennemført ved at tilføre jorden Bio-Gel og Bio-Vand (en blanding af bakterier, næringsstoffer og elektronacceptor i form af ilt) dels ved injektion med højtrykslanser, dels ved tilførsel via horisontale, perforerede rør, som er nedboret i den forurenede horisont. Den forurenede horisont består af fast moræneler, som er forurenet fra 1-4 meters dybde.

#### **2.11.2.3 Høgelundvej, Give**

Dansk Miljørådgivning A/S (DMR) iværksatte på foranledning af Oliebranchens Miljøpulje (OM) og Topdanmark Forsikring, samt efter aftale med Vejle Amt og Give Kommune, en biologisk oprensning af en konstateret fyringsolieforurening på lokaliteten Høgelundvej, Give.

Der er tale om et spill på mellem 555 og 685 l fyringsolie beliggende i et velafgrænset jordvolumen af en 3 meter dyb umættet zone bestående af sand.

Afværgen er baseret på tilførsel af olienedbrydende mikroorganismer, næringssalte og ilt til behandlingszonen. Mikroorganismer og næringssalte tilføres via infiltration ned gennem behandlingszonen og tilførsel af ilt (bioventilering) sker ved en nænsom vakuumentilation i centrum af behandlingszonen samt nænsom indblæsning af atmosfærisk luft i filtersatte boringer i periferien af behandlingszonen.

For at sikre hydraulisk kontrol med grundvandsforurening, infiltrerede mikroorganismer og næringssalte er der endvidere etableret en afværgeboring umiddelbart nedstrøms behandlingszonen.

#### **2.11.2.4 Yderligere aktiviteter**

Ud over ovennævnte aktiviteter er der kendskab til at Dansk Geo-service A/S (DGE) har udviklet en metode der omfatter tilsætning af overiltet vand til behandlingszonen for på den måde at stimulere biologisk nedbrydning. Metoden er på nuværende tidspunkt anvendt på flere danske lokaliteter til oprensning af primært olie- og benzinprodukter.

### **2.11.3 Resultater af aktiviteter**

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

#### **2.11.3.1 Petrotech**

Følgende kunne konkluderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter med PetroTech:

- Tilsætning af PetroTech medfører ikke væsentlige analytiske problemer og indvirker ikke i nævneværdig grad på fordampningen af dieselkomponenter fra forurenet jord.
- Feltforsøget viste, at der indenfor forsøgsperioden ingen forskel var på koncentrationen af dieselolie i jorden henholdsvis med og uden Petrotech. Petrotech havde altså ingen effekt på den biologiske nedbrydning af dieselolie i den undersøgte jord.

### **2.11.3.2 Biogel/Biovand**

Følgende kunne konkluderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter med bio-gel og bio-vand:

- Der kunne ikke i monitoringsperioden påvises en reduktion af olieforureningen i det forurenede område.
- Der har ikke kunnet påvises nogen sikre tegn på en forøget biologisk aktivitet i det forurenede område som følge af tilsætningen af Bio-Gel og Bio-Vand.

En af de bakterier, som Bio-Gel og Bio-Vand angiveligt skulle indeholde kunne ikke genfindes i prøver af Bio-Gel og Bio-Vand eller i jordlagene i det behandlede område. Imidlertid har det vist sig at være forbundet med store vanskeligheder at presse Bio-Vand ud i den tætte lerformation, og det er således vanskeligt at afgøre om Bio-Vand har kunnet udøve sin ønskede virkning ude i formationen i den aktuelle situation.

### **2.11.3.3 Høgelundvej, Give**

På baggrund af de gennemførte aktiviteter er der efter 2,5 års afværge vurderet følgende:

- Der vurderes at være etableret kontrol med luftstrømningerne i og omkring behandlingszonen via den etablerede ventilation, dels til sikring af indeklimaet i boligen og dels til sikring af en effektiv ilttilførsel til behandlingszonen. Endvidere er der i behandlingszonen konstateret indhold af kulbrinter i poreluften, der er reduceret med mere end 98 % siden afværgens igangsætning (efter 2,5 år).
- Der vurderes ikke at være sket en uacceptabel mobilisering af forureningen til grundvandszonen som følge af infiltration af næringssalte eller i forbindelse med afværgepumpningen.
- Der vurderes at være opnået stimulering af den biologiske nedbrydning af olieforureningen i hele behandlingszonen, og der er især sket en væsentlig fjernelse af de lettere oliefraktioner (BTEX'er) i alle prøvetagningsmedier (poreluft, grundvand og jord).
- Der vurderes at være fjernet mellem ca. 305 og 435 liter olie siden igangsætning af den biologiske afværge, svarende til mellem ca. 55 og 64 % af den samlede mængde fyringsolie ved afværgens igangsætning. Heraf vurderes den biologiske massefjernelse at udgøre mere end ca. 97 % af den samlede massefjernelse.
- Overordnet konkluderes det, at det efter ca. 2½ år af det planlagte oprensingsforløb på 3 år er opnået en betydelig reduktion i forureningsmængden i behandlingszonen, og at det er muligt, at videreføre dette forløb til en yderligere nedbringelse af forureningsmængden i behandlingszonen.
- Overordnet vurderes metoden at være bedst egnet til mindre koncentrerede forureninger (f.eks. med maksimale koncentrationer på ca. 5.000 mg/kg TS).

### **2.11.4 Perspektivering**

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. stimuleret biologisk nedbrydning som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelsene har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Stimuleret biologisk nedbrydning (oxidation) anvendes som en del af afværgestrategien på et stort antal danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, kun er anvendt i begrænset omfang i forbindelse med design og projektering af stimuleret biologisk nedbrydning som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med forceret udvaskning.

### 2.11.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.10.3/ Miljøprojekt Nr. 519, 2000: Effekt af tilsætning af Petrotech til dieselurenet jord. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.10.4/ Miljøprojekt Nr. 860, 2003.: Forsøg med Bio-Gel/Bio-Vand til rensning af olieforurenet jord. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.10.5/ Miljøprojekt Nr. 1060, 2006: BioGel til rensning af olieforurenet jord. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.10.6/ Stimuleret biologisk nedbrydning af fyringsolie – Feltresultater der viser muligheder og begrænsninger. ATV Vintermøde 2007.
- /2.10.7/ Statusrapport nr. 4 for stimuleret biologisk nedbrydning af fyringsolie. Høgelundvej, Give. Udarbejdet Af Dansk Miljørådgivning A/S, 30. april 2007.

### 2.12 Stimuleret biologisk nedbrydning - reduktion

Miljøstyrelsen gennemførte i 2005 en vidensopsamling vedrørende stimuleret reduktiv deklorering, jf. Miljøprojekt 983, 2005. Nedenstående beskrivelser af afværgeprincippet er primært baseret på denne udgivelse, som der henvises til for yderligere detaljer.

De efterfølgende afsnit vedrørende udførte aktiviteter i Danmark er baseret på indhentet materiale primært fra regionerne såvel som materiale udgivet under Teknologiprogrammet.

#### 2.12.1 Afværgeprincip

Stimuleret reduktiv deklorering anvendes i dag som en in situ afværgeteknik til oprensning af lokaliteter forurenet med klorerede opløsningsmidler. Teknikken er baseret på naturligt forekommende mikrobiel nedbrydning af forure-

ningskomponenterne under anaerobe forhold til uskadelige nedbrydningsprodukter.

Teknikken har primært været anvendt over for forureninger med klorerede ethener (perklørethylen (PCE) eller triklørethylen (TCE)), hvorfor nedenstående beskrivelser tager udgangspunkt i disse stoffer. Det er dog påvist, at 1,1,1-triklørethan (1,1,1-TCA) kan dekloreres til klørethan (CA), hvilket åbner mulighed for, at teknikken også kan anvendes over for forureninger af denne type. Det skal dog bemærkes, at CA ikke nedbrydes ved reduktiv deklorering og derfor potentielt ophobes.

#### **2.12.1.1 Mikrobiel nedbrydning**

Reduktiv deklorering er en redoxproces, hvor visse bakterier under anaerobe forhold anvender de klorerede ethener som elektronacceptorer og hydrogen som primær elektrondonor til generering af energi i en respirationsproces kaldet (de)halorespiration. Ved dekloreringen substitueres kloratomer sekventielt med hydrogenatomer, så der fra PCE sker en trinvis dannelse af først TCE efterfulgt af diklørethylen (primært *cis*-DCE), vinylklorid (VC) og endelig ethen. I naturlige jord- og grundvandsmiljøer er den reduktive deklorering af klorerede ethener imidlertid ofte begrænset af utilstrækkelig tilstedeværelse af elektrondonor.

Reduktiv deklorering af PCE eller TCE til *cis*-DCE kan forestås af en lang række naturligt forekommende halorespirerende bakterier i jord- og grundvandsmiljøet. Der er imidlertid i dag kun kendskab til en enkelt gruppe mikroorganismer tilhørende typen *Dehalococcoides* (*Dhc*), der er påvist i stand til at reducere PCE eller TCE fuldstændigt til ethen. Reduktiv deklorering anvendt i forbindelse med afværge over for jord- og grundvandsforureninger med klorerede ethener er derfor betinget af tilstedeværelsen af *Dhc*.

Det er dog ikke alle typer *Dhc*, der er i stand til reduktivt at deklorere VC til ethen, da denne del af dekloreringsfølgen er betinget af, at bakterierne besidder genet vinylkloridreduktase (*Vcr*). Besidder *Dhc* ikke *Vcr* kan omdannelsen af VC til ethen i nogle tilfælde ske ved anaerob oxidation eller ved co-metabolisme.

Da den fuldstændige nedbrydning af klorerede ethener således er betinget af tilstedeværelsen af *Dhc* (og typisk *Vcr*) blandt de halorespirerende bakterier, kan der på lokaliteter forurenet med klorerede ethener i mange tilfælde observeres en ophobning af *cis*-DCE eller VC.

#### **2.12.1.2 Afværgeteknik**

Når reduktiv deklorering anvendes som afværgeteknik tilsigtes en optimering af forholdene i jord- og grundvandsmiljøet, så den reduktive dekloreringsproces stimuleres (Stimuleret Reduktiv Deklorering, SRD). Dette involverer som udgangspunkt tilførsel af en elektrondonor som oftest i form af organisk stof samt næringsstoffer for at stimulere mikrobiologisk vækst i zonen, der ønskes behandlet (behandlingszonen). Ved den mikrobiologiske vækst omdannes den tilførte elektrondonor til brint og organiske fede syrer (f.eks. acetat og propionat) i en række redoxprocesser, hvor uorganiske elektronacceptorer (f.eks. jern(III) og sulfat) reduceres. Tilførsel af elektrondonor skaber således anaerobe forhold, tilfører brint til dekloreringsprocessen og sikrer opretholdelse af mikrobiologisk aktivitet.

Viser det sig ved indledende dimensionerende laboratorieforsøg med jord og/eller grundvand fra den aktuelle lokalitet, at de nødvendige deklorerende mikroorganismer (*Dhc*) ikke er til stede eller at nedbrydningen ikke er tilstrækkelig hurtigt ved tilsætning af elektrondonor alene, må en bakteriekultur af deklorerende mikroorganismer tilføres behandlingszonen sammen med elektrondonor. Tilsætning af elektrondonorer alene (uden tilsætning af en deklorerende bakteriekultur) benævnes "biostimulering". Tilsættes der samtidig bakteriekultur benævnes det "bioaugmentation".

Der findes i dag en række forskellige donortyper på markedet med forskellige karakteristika. De forskellige donortyper opdeles overordnet i hurtigt omsættelige elektrondonorer og langsomt omsættelige elektrondonorer. Elektrondonorer, der karakteriseres som hurtigt omsættelige er f.eks. fødevarebaserede syrer (acetat eller laktat), alkoholer (metanol eller ethanol) mv., mens elektrondonorer, der karakteriseres som langsomt omsættelige f.eks. omfatter laktatbaserede polymerer, oliebaserede langsomt frigivende forbindelser, opløselige forbindelser såsom sukkerstoffer (melasse) mv.

Grundlaget for valget af elektrondonor afhænger primært af de lokalitetsspecifikke forhold og det konceptuelle design for afværgestrategien på de konkrete lokaliteter, og der kan ikke generelt udpeges en donortype, der er mere effektiv end en anden. Forhold vedrørende geologi, hydrogeologi, forureningssituation og adgangsforhold danner således sammen med afværgestrategien/-formålet (f.eks. behandlingszone og oprensningstid) grundlaget for valget af injektionsmetode og donortype.

Overordnet er de hurtigt omsættelige elektrondonorer dog typisk anvendelige i permeable aflejringer som sand- og grusmagasiner eller sprækkede formationer som kalkmagasiner, hvor en hurtig kontakt mellem donor og klorerede ethener kan forventes, og hvor afværgestrategien ikke beror på en lang levetid af elektrondonor. Injektionsstrategien omfatter i denne sammenhæng ofte et aktivt system, jf. nedenstående afsnit. De langsomt omsættelige elektrondonorer er typisk anvendelige i lavpermeable aflejringer, hvor kontakten mellem donor og klorerede ethener er baseret på diffusive processer, og hvor afværgestrategien beror på lang levetid af elektrondonor. Her er der typisk tale om passive injektionssystemer, jf. nedenstående afsnit.

### **2.12.1.3 Injektionsstrategi**

Afhængig af de lokalitetsspecifikke forhold og afværgestrategien på en given lokalitet anvendes forskellige metoder til injektion og fordeling af elektrondonor og evt. bakteriekultur i behandlingszonen. Der opereres typisk med aktive og passive injektionssystemer.

Ved aktive systemer bliver grundvand oppumpet fra det forurenede magasin, tilsat elektrondonorer (og evt. bakteriekulturer, næringsstoffer og pH buffere) og reinjiceret i behandlingszonen. Konstant eller pulserende tilførsel af elektrondonorer er med til at udvikle en biologisk aktiv zone. Herved sikres den bedst mulige spredning af både elektrondonoren og evt. bakteriekulturen. Aktive systemer kan anvendes i aflejringer med god hydraulisk ledningsevne som sand/grus aflejringer samt opsprækkede formationer som kalkmagasiner.

Ved passive systemer injiceres elektrondonor og bakteriekultur typisk i en række behandlingspunkter i kildeområdet eller på tværs af forureningsfanen. Ved anvendelse af langsomt omsættelige elektrondonorer kan en biologisk aktiv barriere (bio-barriere) herved etableres. Barrieren har til formål at ned-

bryde de klorerede ethener, der transporteres med grundvandet. For at sikre en langtidsholdbar kapacitet af en bio-barriere skal elektrondonoren tilsættes i den rette mængde, så der for en given tidshorizont og grundvandshastighed kan behandles et planlagt antal porevolumener.

Passive systemer er generelt teknisk simple at implementere, idet der ikke er behov for boringsbestykning, rørføringer, elinstallationer mv. Det kan imidlertid være vanskeligt at opnå en jævn fordeling af donor og evt. bakteriekultur i behandlingszonen, da et passivt system ikke er forbundet med hydraulisk kontrol og da passive systemer ofte anvendes i mere lavpermeable formationer. Behandlingsboringerne influensradius vil ligeledes typisk være mindre end i et aktivt system, hvilket betyder, at det ofte vil være nødvendigt med et større antal behandlingspunkter.

Det må vurderes konkret i hver enkelt sag hvilken injektionsstrategi, der er optimal på en given lokalitet. Dette er ikke nødvendigvis kun aktiv eller passiv tilførsel men kan også være en kombination af de to injektionsmetoder. På nogle lokaliteter kan der således med fordel etableres en biologisk aktiv zone med et aktivt injektionssystem, hvorefter zonen opretholdes biologisk aktiv ved efterfølgende periodevis passiv tilførsel af elektrondonor og evt. bakteriekultur.

Ved anvendelse af stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknik bør det i øvrigt undersøges om de injicerede stoffer kræver en særskilt godkendelse fra miljømyndighederne inden tilsætning.

Tabel 2.12.1. Overordnede karakteristika for stimuleret reduktiv deklorering (SRD)

Målsætning	Teknikken sigter mod en oprensning af opløst forurening i den mættede zone. Teknikken er specielt velegnet til faneoprensning, men kan også anvendes i mindre forurenede kildeområder. Teknikken kan på nuværende tidspunkt ikke anvendes i den umættede zone.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker som f.eks. frakturering ved oprensning i lavpermeable formationer.
Forureningskomponenter	Klorerede ethener (PCE, og TCE) 1,1,1-TCA (nedbrydning til CA påvist)
Geologi i behandlingszone	Sand, grus eller opsprækket ler/kalk.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Nedbrydningen kan forløbe hurtigt, hvis der er gunstige redoxforhold, og hvis de rette deklorerende bakterier er til stede i behandlingszonen.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden er baseret på naturligt forekommende bakterier i jord- og grundvandsmiljøet.</li> <li>• Metoden omfatter ikke energikrævende og omkostningstunge installationer som f.eks. termiske metoder.</li> <li>• Erfaringsgrundlaget er voksende, specielt internationalt.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opretholdes de optimale forhold for SRD ikke, er der risiko for op-hobning af nedbrydningsprodukter, herunder f.eks. vinylklorid, klorethan mv.</li> <li>• I heterogene eller lavpermeable behandlingszoner kan det være vanskeligt at skabe en effektiv fordeling af elektrondonor og evt. bakteriekultur.</li> <li>• Driften af et aktivt anlæg er forbundet med omkostninger til bl.a. strøm, regelmæssigt tilsyn mv.</li> </ul>

Tabel 2.12.2: Oversigt over projekter med stimuleret reduktiv deklorering præsenteret i kapitlet

Lokalitet	Formål	Skala	Geologi	Forurening	Donor	Kultur	Injektion
Jægersborg Allé 24, Gentofte	Faneafskæring	Pilotprojekt	Sand	PCE	HRC	-	Injektion
Rugårdsvej 234-238, Odense (sandprojekt)	Kildeoprensning, spredningskontrol	Pilotprojekt	Sand	TCE, Cis-DCE	Natriumlaktat (Newman Zone)	KB-1™	Recirkulation (direkte injektion)
Rugårdsvej 234-238, Odense (lerprojekt)	Kildeoprensning	Pilotprojekt	Moræneler	Cis-DCE, Ethen	Newman Zone	KB-1™	Injektion, hydraulisk frakturering
Sortebrovej 26, Tommerup	Kildeoprensning, spredningskontrol	Fuldskala oprensning	Ler	TCE, cis-DCE	EOS®	KB-1™	Injektion
Industrivej 3, Glostrup	Kildeoprensning	Pilotprojekt	Gytje	Cis-DCE, VC	Melasse	-	Pneumatisk frakturering
Flensborggade 24, København	Kildeoprensning, spredningskontrol	Pilotprojekt	Sand	PCE	EOS®	Kultur fra deklorerende bioreaktor	Injektion
Gl. Kongevej 33, København	Spredningskontrol	Fuldskala oprensning	Kalk	Cis-DCE, VC	Natriumacetat, Mælkesyre	Kultur fra deklorerende bioreaktor	Recirkulation (kontinuert, periodevist)

#### **2.12.1.4 Opsummering**

I tabel 2.12.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

#### **2.12.2 Udførte aktiviteter**

I Danmark er der gennemført 2 større afværgeprojekter med stimuleret reduktiv deklorerings støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 833 og 834 (2003) samt Miljøprojekt 1146, 1148 og 1149 (2007). Herudover er der gennemført en erfaringsopsamling støttet af Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 983 og 984 (2005).

Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der i Danmark ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter med denne teknik i andet regi.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet for hver lokalitet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

I tabel 2.12.2 er der en samlet oversigt over de projekter der præsenteres i kapitlet.

##### **2.12.2.1 Jægersborg Allé, Gentofte**

Der henvises til afsnit 3.3 "Biologisk reaktiv barriere – reduktion" i kapitlet vedrørende spredningskontrol for beskrivelser af aktiviteter gennemført på denne lokalitet.

##### **2.12.2.2 Rugårdsvej (Sandprojekt)**

På Rugårdsvej 234-238 i Odense er der gennemført et afværgeprojekt med stimuleret reduktiv deklorerings for det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syd) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Projektet er gennemført i et samarbejde mellem COWI A/S, Orbicon A/S, Miljø & Ressourcer DTU, GeoSyntec samt GEUS i perioden 2004 til 2006.

Afværgeprojektet omfattede en række indledende dimensionerende undersøgelser, jf. Miljøprojekt 1146 (2007), og et efterfølgende pilotforsøg med stimuleret reduktiv deklorering, jf. Miljøprojekt 1148 og 1149 (2007).

Lokaliteten er primært forurenet med TCE og *cis*-DCE. Den geologiske lagfølge består overordnet af ca. 50 m kvartære aflejringer af moræneler med forekomst af vandførende lag af smeltevandssand. I dybder fra ca. 10 til 15 m u.t. træffes således 1-2 m vandførende smeltevandssand (sekundært magasin). Forureningskilden er lokaliseret i en formation af moræneler over det sekundære grundvand.

Der er generelt reducerede forhold i det sekundære grundvand i kildeområdet, og der er ved analyse konstateret indhold af bakteriekulturen *Dehalococcoides* på mellem  $1 \times 10^3$  og  $2,4 \times 10^4$  celler per liter.

Pilotforsøgets formål var at belyse anvendeligheden af stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi i det sekundære grundvandsmagasin. Konkret skulle pilotforsøget belyse forhold vedrørende nødvendigheden af at tilsætte bakterier (bioaugmentation), udviklingen af redox-forhold samt oprensningseffekten i forsøgsfeltet. Herudover skulle pilotforsøget belyse forskellige ingeniørmæssige problemstillinger (f.eks. injektionsstrategi, tilklogning af borer, blanding af elektrondonorer/næringsstoffer/bakterier, monitoring mv.).

Pilotforsøget blev gennemført ved tilsætning af elektrondonor (natriumlaktat) og en bakteriekultur (KB-1<sup>TM</sup>) i det sekundære grundvandsmagasin. Der er etableret et aktivt system med recirkulation, hvor injektion og ekstraktion er foretaget i henholdsvis 3 injektionsboringer og 1 ekstraktionsboring. Grundvandets hastighed i testfeltet er ved tracerforsøg bestemt til ca. 0,5 m/dag, svarende til at ca. 3 porevolumener er blevet recirkuleret i forsøgsperioden.

Det oppumpede grundvand blandes med natriumlaktat (60 w/w % opløsning) ved pulstilsætning inden reinjektion. Der er samlet tilsat 273 kg natriumlaktat (ca. 20 % mindre end planlagt). Efter 70 dage med laktatilsætning blev der foretaget injektion af bakteriekulturen KB-1<sup>TM</sup> (ca. 27 l) i 3 injektionsboringer. Efter injektionen af bakteriekultur fortsatte den aktive fase i ca. 180 dage med tilsætning af natriumlaktat til injektionsvandet. Efter 250 dages aktiv drift af anlægget er driften overgået til passiv drift med injektion af langsomt frigivende donor (Newman Zone).

Pilotforsøget mandede ud i en række generelle anbefalinger vedrørende dimensionering af afværge i form af stimuleret reduktiv deklorering på lokaliteten. Der henvises til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.13.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **2.12.2.3 Rugårdsvej (Ierprojektet)**

På Rugårdsvej i Odense er der tillige gennemført et pilotprojekt finansieret af det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syd). Projektet er gennemført i et samarbejde mellem COWI A/S, Orbicon A/S, Miljø & Ressourcer DTU og GeoSyntec.

Lokaliteten er primært forurenet med TCE og *cis*-DCE. Den geologiske lagfølge består overordnet af ca. 50 m kvartære aflejringer af moræneler med forekomst af vandførende lag af smeltevandssand. Forureningskilden er lokaliseret i en formation af moræneler.



Pilotforsøgets formål var at belyse anvendeligheden af stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi i lavpermeable aflejringer. Konkret skulle pilotforsøget belyse forhold vedrørende:

- Injektionsstrategi (herunder hydraulisk frakturering) i de lavpermeable aflejringer på lokaliteten.
- Redoxforhold samt forhold vedrørende naturligt forekommende nedbrydning af klorerede ethener.
- Behovet for elektrondonorer og bakteriekultur samt afprøvning af potentielle elektrondonorer (5 forskellige) ved nedbrydningsforsøg.
- Oprensningseffekt ved tilsætning af elektrondonor og bakteriekultur i lavpermeable aflejringer i feltskala.
- Generel vurdering af teknikkens potentiale i forhold til en fuldskala oprensning på lokaliteten.
- Overordnet vurdering af omkostninger forbundet med en oprensning.

Pilotforsøget blev gennemført i to områder ved tilsætning af elektrondonor og en bakteriekultur. Tilsætningen af elektrondonor og bakteriekultur skete i det ene forsøgsområde (sandslirefeltet) til naturligt forekommende tynde sandlag og sandstriber mens tilsætningen i det andet område (frakturfeltet) skete til kunstigt sandfyldte sprækker etableret ved hydraulisk frakturering i moræneleren. I begge forsøgsområder har oprensningsstrategien taget udgangspunkt i et passivt system, hvor elektrondonor og bakteriekultur injiceres til behandlingszonen, hvorefter oprensningseffekten følges ved monitoring.

Som elektrondonor og bakteriekultur blev anvendt de kommercielle produkter, henholdsvis Newman Zone™ (emulgeret sojabønneolie tilsat laktat) og KB-1™. Inden injektion blev Newman Zone blandet (5 % opløsning) med svagt reduceret grundvand. Bakteriekulturen blev injiceret direkte til injektionsboringen under anaerobe forhold ved pulsinjektion af skiftevis elektrondonor og bakteriekultur. Der blev samlet tilsat ca. 200 l elektrondonor, svarende til 10 kg Newman Zone™, og ca. 7,5 l bakteriekultur til hvert forsøgsområde.

Pilotforsøget mundede ud i følgende overordnede erfaringer:

- Der sker nedbrydning af klorerede ethener i selve lermatrix, idet der findes specifikke nedbrydere og fermenteringsprodukter fra donor i lermatrix.
- Da hovedparten af forureningsmassen findes i selve lermatrix vil diffusionsprocesser være styrende for oprensningen.
- Behandling i sprækker/sandlinser med en indbyrdes afstand på op til 30-50 cm i en formation af moræneler kan medføre en betydelig reduktion af koncentrationerne i lermatrixen over en periode på ca. 10 år.
- Udfordringerne er at få elektrondonor og bakteriekultur spredt i formationen af moræneler og at holde gang i systemet i behandlingsperioden.

Der henvises i øvrigt til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.13.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

For beskrivelser af resultaterne af frakturforsøget henvises til afsnit 2.17 vedr. hydraulisk frakturering.

#### **2.12.2.4 Sortebrovej, Tommerup**

På Sortebrovej i Tommerup har det tidligere Hedeselskabet Miljø og Energi A/S (nuværende Orbicon) i 2006 gennemført et fuldskala afværgeprojekt med

stimuleret reduktiv deklorering. Projektet er finansieret af det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syd).

Afværgeprojektet omfattede indledningsvis en række dimensionerende undersøgelser, herunder treatabilityforsøg med stimuleret reduktiv deklorering.

Lokaliteten er primært forurenet med TCE og den geologiske lagfølge udgøres overordnet af moræneler, hvori der findes vandførende sandslirer og tynde sandlag. Der er generelt konstateret reducerede forhold i grundvandsprøver fra både sekundært og primært grundvand, og der er konstateret et lavt indhold af bakteriekulturen *Dhc*.

Afværgeprojektets formål var at reducere nedsivningen af klorerede opløsningsmidler til det primære grundvandsmagasin, således at risikoen for en uacceptabel påvirkning af den nærtliggende vandindvinding minimeredes.

Afværgeprojektet blev gennemført ved tilsætning af elektrondonor og en bakteriekultur (passivt system) til 47 injektionsboringer (filtersat i flere niveauer). Der er således foretaget injektion i 93 filtre, hvoraf 80 er filtersat i sprækker og sandslirer i moræneler (10-20 m u.t.) og 13 er filtersat i sandlag i moræneler (20-30 m u.t.). Injektionen i moræneleren havde til formål at reducere forureningens kildestyrke, mens injektionen i sandlaget havde til formål at etablere en bufferzone, der hindrer fortsat nedsivning mod det primære magasin.

Som elektrondonor og bakteriekultur blev anvendt de kommercielle produkter, henholdsvis EOS<sup>®</sup> (emulgeret vegetabilsk olie) og KB-1<sup>™</sup>. Inden injektion blev EOS<sup>®</sup> blandet (ca. 10 % opløsning til morænelerformationen og ca. 1 % opløsning til sandlaget) med reduceret grundvand. Bakteriekulturen blev injiceret direkte til injektionsboringen under anaerobe forhold.

For at sikre optimale forhold for bakterierne blev der indledningsvist tilsat 25-33 % af den samlede mængde substrat, for at sikre anaerobe forhold i formationen. Der blev foretaget pulsinjektion af skiftevis elektrondonor og bakteriekultur. Der blev samlet tilsat ca. 4.640 l EOS<sup>®</sup> som blev opblandet i 100.617 l grundvand, og ca. 220 liter bakteriekultur.

Selve oprensningen forventes at ville strække sig over en længere årrække og der kan på nuværende tidspunkt ikke konkluderes på effekten af den gennemførte afværge. I en flerårig periode fremover skal der gennemføres monitoring med henblik på at overvåge, om forholdene i grundvandet betinger, at der kan foregå en stadig nedbrydning af de klorerede opløsningsmidler i behandlingsområdet ved reduktiv deklorering. Ud fra monitoringsresultaterne kan det vise sig, at der på et tidspunkt bliver behov for at skulle tilføre yderligere substrat til borerne i behandlingsområdet.

Afværgeprojektet mundede ud i en række generelle erfaringer vedrørende gennemførelse af stimuleret reduktiv deklorering i fuldskala som er beskrevet i det samlede erfarings- og resultat afsnit 2.13.3.

#### **2.12.2.5 Industrivej, Glostrup**

På Industrivej i Glostrup (Glostrup Regnvandsbassin) har NIRAS A/S i samarbejde med Miljø & Ressourcer DTU, gennemført et pilotforsøg til afprøvning og dokumentation af stimuleret reduktiv dechlorering kombineret med pneumatisk frakturering. Projektet er finansieret af det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden).

Forureningen på lokaliteten omfatter primært triklorethylen (TCE) og *cis*-DCE i kildeområdet og geologien består overordnet af moseaflejringer (tørv og gytje) over et lag af sand, morænesand og silt underlejret af moræneler. Sandlaget udgør et lokalt sekundært magasin. Der er påvist methanogene forhold i kildeområdet og igangværende reduktiv dechlorering i stort omfang i sand- og gytjelaget og et stort potentiale for yderligere stimulering ved tilsætning af elektrondonor.

Pilotforsøgets formål var dels at undersøge fordelingen af substrat i gytje-/siltlaget som følge af pneumatisk frakturering og dels, at belyse effekten af substratinjektion ved pneumatisk frakturering på den igangværende nedbrydning af klorerede ethener, herunder specielt spredning og omsætning af substrat, udvikling i redoxforhold, stimulering af anaerob dechlorering samt vækst af specifikke dechlorerende bakterier. Endelig skulle pilotforsøget give grundlag for anbefalinger vedrørende anvendelse af pneumatisk frakturering til kildereduktion i fuld-skala på Industrivej 3, Glostrup.

Pilotforsøget blev gennemført ved udførelse af frakturering i et interval (3-4 m u.t.) og efterfølgende injektion af substrat i to intervaller (2-3 og 3-4 m u.t.). Der er injiceret ufortyndet protomylasse ved hydraulisk injektion, hhv. ca. 425 liter i intervallet 3-4 m.u.t. og ca. 375 liter i intervallet 2-3 m u.t. Protomylasse er et hollandsk restprodukt fra kartoffelstivelsesproduktion. Substratet er injiceret hydraulisk.

Pilotforsøget mundede ud i følgende overordnede erfaringer:

- Det er lykkedes at injicere og sprede substrat i testfeltet
- Som følge af substrattilsætning er der sket en øget stimulering den reduktive dechlorering af klorerede ethener.
- Stimuleret reduktiv dechlorering har et potentiale som afværgeteknologi på lokaliteten.

Pilotforsøget mundede i øvrigt ud i en række generelle erfaringer vedrørende gennemførelse af stimuleret reduktiv dechlorering som er beskrevet i det samlede erfarings- og resultat afsnit 2.13.3.

For beskrivelser af resultaterne af frakturforsøget henvises til afsnit 2.18 vedr. pneumatisk frakturering.

#### **2.12.2.6 Flensborggade, Kbh. V**

På Flensborggade i København har NIRAS A/S gennemført et pilotforsøg med stimuleret reduktiv dechlorering. Forsøget er gennemført for den tidligere Københavns Kommunes Miljøkontrol (nuværende Region Hovedstaden).

Pilotforsøget er gennemført i et sekundært magasin i ca. 3-4 m u.t., der er kraftigt forurenet med primært PCE. Der er generelt svagt reducerede forhold, og der er ved analyse af grundvandsprøver ikke konstateret indhold af bakteriekulturen *Dehalococcoides*.

Formålet med pilotforsøget var at belyse anvendeligheden af stimuleret reduktiv dechlorering som afværgeteknologi til kildereduktion og afskærende horisontal barriere på lokaliteten under faktiske forhold. Konkret skulle de tekniske forhold i relation til etablering af injektionsboringer og gennemførelse af væskeinjektion (substrat og dechlorerende bakteriekultur), den resulterende forde-

ling, spredning og levetid af substrat og deklorerende bakteriekultur samt oprensningseffekten vurderes.

Pilotforsøget blev gennemført ved infiltration af det kommercielle substrat EOS<sup>®</sup> sammen med en bakteriekultur fra en deklorerende bioreaktor i 3 injektionsboringer i testfeltet (passivt system). Infiltrationen blev foretaget ved gravitation (ca. 15 l/time) i én boring ad gangen fra serieforbundne tanke. Under infiltrationen blev systemet holdt anaerobt ved kontinuert tilførsel af nitrogen til infiltrationstankene. Der blev i alt infiltreret ca. 25 kg EOS<sup>®</sup> opblandet i ca. 1.750 l væske fra en bioreaktor indeholdende bakteriestammen **Dhc**.

Pilotforsøget mundede ud i følgende overordnede erfaringer:

- I influensområdet på ca. 0,9 m på tværs af strømningsretningen og ca. 1,2-1,5 m i nedstrøms retning af injektionsboringerne konstateredes efter 9 måneder fortsat høje koncentrationer af substrat.
- I influensområdet er der skabt stærkt reducerede (methanogene) forhold i magasinet.
- Injektionen af substrat og biomasse har igangsat en omfattende reduktiv dechlorering i influensområdet.
- De væsentligste problemer i forbindelse med injektionen relaterede sig til trykopbygning på grund af tilklogning i injektionsboringerne.
- Stimuleret reduktiv deklorering vurderes på baggrund af pilotforsøget at have potentiale til oprensning af klorerede ethener på lokaliteten.

Der foretages på nuværende tidspunkt monitoring på lokaliteten og der kan derfor ikke konkluderes noget endeligt hvad angår den samlede afværgeeffekt.

Pilotforsøget mundede i øvrigt ud i en række generelle erfaringer vedrørende gennemførelse af stimuleret reduktiv deklorering som er beskrevet i det samlede erfarings- og resultat afsnit 2.13.3.

#### **2.12.2.7 Gl. Kongevej, Kbh. V**

Der henvises til afsnit 3.3 "Biologisk reaktiv barriere – reduktion" i kapitlet vedrørende spredningskontrol for beskrivelser af aktiviteter gennemført på denne lokalitet.

#### **2.12.2.8 Yderligere aktiviteter**

Ud over ovenstående udviklingsprojekter, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor stimuleret reduktiv deklorering har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Udvalgte projekter gennemført af Miljømyndighederne og private bygherre, hvor stimuleret reduktiv deklorering er etableret som en del af afværgestrategien, er f.eks.:

- Gl. Kongevej 39, København
- Vesterbrogade 116, København
- Industrigrund, Sydfyn

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af driftsmæssig karakter. Dokumentationsmaterialet i relation til metodens principper, begrænsninger og effekt vurderes derfor at være for spinkelt. Projekterne ligger imidlertid til grund for besvarelsen af spørgeskemaerne, jf. afsnit 1.3 og

bilag 1, og har således betydning for den samlede perspektivering af passiv ventilation som afværgeteknik.

### 2.12.3 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

Generelt kan følgende konkluderes:

- Stimuleret reduktiv deklorering vurderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter at have stort potentiale til oprensning af klorerede ethener på et stort antal forurenede lokaliteter i Danmark.
- I forbindelse med de gennemførte aktiviteter er det således ved adskillige projekter påvist, at der i områder med effektiv fordeling af substrat kan skabes stærkt reducerede redoxforhold og således optimale forhold for reduktiv deklorering.
- For at opnå tilstrækkelig hurtig og effektiv reduktiv deklorering indikerer erfaringer fra flere gennemførte projekter, at det er nødvendigt at tilsætte en deklorerende bakteriekultur (*Dhc*).
- En af de afgørende faktorer for omkostningerne forbundet med stimuleret reduktiv deklorering er substratbehovet, der afhænger af redoxforholdene og de hydrauliske forhold i behandlingsområdet.
- I forbindelse med de gennemførte aktiviteter er flere forskellige elektrondonorer blevet anvendt. Der kan imidlertid ikke gives en entydigt anbefaling af en specielt egnet elektrondonor, idet dette afhænger af de lokalitetsspecifikke forhold og det konceptuelle design for afværgestrategien.

Generelt kan følgende konkluderes vedrørende behandling af højpermeable formationer af sand eller grus:

- Ingeniørteknisk er der gode erfaringer med at designe, etablere og drive et aktivt system med oppumpning og recirkulation af grundvand tilsat substrat (og evt. deklorerende bakterier) under hydraulisk kontrol i behandlingszonen. En grundig indledende karakterisering af den konkrete lokalitet mht. bl.a. hydrogeologi og forureningsfordeling vurderes at være af stor betydning i designfasen.
- De væsentligste problemer i relation til driften af et aktivt recirkulationssystem har været trykopygning i sammenhæng med tilklogning i injektionsboringerne.
- Stimuleret reduktiv deklorering vurderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter at have stort potentiale til oprensning af klorerede ethener i permeable formationer. Forureninger domineret af TCE/cis-DCE er således blevet påvist nedbrudt til under kvalitetskriterierne ved drift af et aktivt recirkulationssystem med tilsætning af substrat og deklorerende bakterier til injektionsvandet.
- Injektion af substrat med Geoprobe "open tip" nedefra og op i en højpermeabel formation har resulteret i ujævn fordeling over dybden, hvor substrat primært blev fordelt i bunden af magasinet. Forskelle i massefylde, viskositet og temperatur mellem substrat og grundvand vurderedes ikke at have signifikant betydning for den ujævne fordeling.

Generelt kan følgende konkluderes vedrørende behandling af lavpermeable formationer af (opsprækket) ler eller kalk:

- Resultater fra kerneprovur udtaget i en lavpermeabel formation af ler i forbindelse med et pilotprojekt med stimuleret reduktiv deklorering viser, at der sker nedbrydning af klorerede ethener i selve lermatrix. Der blev således påvist specifikke nedbrydere og fermenteringsprodukter fra donor i lermatrix.
- I lavpermeable formationer vil diffusionsprocesser være styrende for oprensningen, idet hovedparten af forureningsmassen findes i selve lermatrix.
- Resultater af en pilottest i lavpermeable formationer indikerer, at behandling i sprækker/sandlinser med en indbyrdes afstand på op til 30-50 cm i en formation af moræneler kan medføre en betydelig reduktion af koncentrationerne i lermatrixen over en periode på ca. 10 år. Udfordringerne er at få elektrondonor og bakteriekultur spredt i formationen af moræneler og at holde gang i systemet i behandlingsperioden.
- Det er ved et pilotforsøg lykkedes at injicere og sprede substrat i lavpermeable aflejringer ved anvendelse af både hydraulisk og pneumatisk frakturering. Der henvises til afsnit 2.17 og 2.18 vedrørende henholdsvis hydraulisk og pneumatisk frakturering for yderligere detaljer.

#### 2.12.4 Perspektivering

Feltaktiviteter gennemført med støtte fra Miljøstyrelsen under teknologiprogrammet såvel som feltaktiviteter gennemført i andet regi med stimuleret reduktiv deklorering viser lovende resultater. Der er dog fortsat behov for udvikling af teknikken.

Nedenstående emner viser, hvor der bl.a. vurderes at være behov for udvikling af inden for stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi på feltskala i Danmark.

- ***Injektionsstrategier:***  
Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling og sammenligning af de strategier, der på nuværende tidspunkt er afprøvet, for tilførsel af substrat og bakteriekultur (passive eller aktive systemer) under forskellige geologiske og hydrogeologiske forhold. Bl.a. bør den resulterende fordeling af bakterier i behandlingzonen samt zonen robusthed under forskellige forhold vurderes.
- ***Geologi i behandlingszonen:***  
Der vurderes at være behov for en større procesmæssig forståelse for etablering af stimuleret reduktiv deklorering specielt i lavpermeable formationer som opsprækket kalk/ler, herunder f.eks. interaktion mellem sprækker og matrix for såvel substrat som bakterier.
- ***Substrat***  
Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling og sammenligning samt yderligere afprøvning af forskellige substrattyper i forskellige geologiske formationer og ved forskellig dosis. Der er f.eks. kun ringe kendskab til levetiden af forskellige substrattyper og hvilke parametre (dosis, geologi, redoxforhold mv.), der influerer på levetiden.

Yderligere er der behov for at belyse forholdene vedrørende problematikker omkring methanproduktion, under den biologiske aktivitet, herunder hvad der skal til for at belyse denne problematik bedre.

- ***Bakteriekultur***

Der vurderes at være behov for yderligere forståelse af under hvilke forhold bakterier går fra at være aktive til at være inaktive og om de efterfølgende kan aktiveres igen (f.eks. mellem 2 substratinjektioner i en passiv fase).

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af tekniken.

- Stimuleret reduktiv deklorering anvendes som en del af afværgestrategien på flere danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af stimuleret biologisk nedbrydning (reduktion) som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med stimuleret biologisk nedbrydning (reduktion).

#### 2.12.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.13.1/ Miljøprojekt Nr. 833, 2003: Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved stimuleret reduktiv deklorering. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.13.2/ Miljøprojekt Nr. 834, 2003: Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved stimuleret reduktiv deklorering - bilagsrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.13.3/ Miljøprojekt Nr. 983, 2005: Stimuleret in situ reduktiv deklorering - Hovedrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.13.4/ Miljøprojekt Nr. 984, 2005: Stimuleret in situ reduktiv deklorering - Appendiksrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.13.5/ Miljøprojekt Nr. 1148, 2007.: Pilotprojekt med stimuleret in situ reduktiv deklorering - Hovedrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.13.6/ Miljøprojekt Nr. 1149, 2007: Pilotprojekt med stimuleret *in situ* reduktiv deklorering - Bilagsrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.13 Fytooprensning

### 2.13.1 Afværgeprincip

Begrebet ”fytooprensning” har fået følgende generelle definition: „Anvendelsen af grønne planter og disses mikroflora, jordtilsætninger, og agronomiske teknikker til at fjerne, tilbageholde eller uskadeliggøre uønskede kemiske stoffer i miljøet“.

Teknikkerne til fytooprensning kan opdeles i metoder til fiksering, nedbrydning eller evapotranspiration af organiske forureningskomponenter og metoder til opkoncentrering og fiksering af tungmetaller i planter.

#### **2.13.1.1 Organiske forureningskomponenter**

Fytooprensningen af organiske komponenter har til formål at oprense grundvands- og/eller jordforurening i kildeområder, og de mest anvendte planter er poppel, pil, rajgræs og lucerne. Mekanismerne bag oprensningen af de organiske komponenter er ikke endeligt kortlagte. For vandopløselige stoffer er optag, ophobning og nedbrydning i planterne samt fordampning herfra mulige mekanismer, mens fjernelsen for sværtopløselige stoffer overvejende foregår ved mikrobielle processer i planternes rodzone. Planternes rodnet og vandoptag påvirker desuden jordstrukturen samt ilt- og vandindhold, hvilket ligeledes kan stimulere biologisk nedbrydning af mange stoffer.

Som følge af planternes begrænsede roddybde kan fytooprensningen kun anvendes forholdsvis terrænnært (til ca. 2 m u.t.). Den væsentligste ulempe ved teknikkerne er dog, at oprensningsperioden er meget lang, og at det fortsat er usikkert, om relevante kvalitetskriterier kan nås.

#### **2.13.1.2 Tungmetaller**

Fytoekstraktion af tungmetaller udnytter visse planters evne til at ekstrahere metaller fra jorden samt optage og opkoncentrere disse i visse plantedele. Princippet i metodens anvendelse som *in situ* jordrensningsteknik er, at planterne via jordvæsken optager metal, der frigives fra jorden. I planten optages metaller i rødderne, hvorefter der sker en større eller mindre transport fra rødderne til overjordiske dele af planten. Disse (og i nogle tilfælde underjordiske plantedele) kan efterfølgende høstes, hvorved planternes metalindhold fjernes fra arealet.

Der er herefter flere muligheder for efterbehandling af det høstede plantemateriale. Det er ønskeligt at kunne genanvende eller nyttiggøre plantematerialet direkte eller efter foraskning i forbindelse med metaloparbejdning.

Som følge af planternes begrænsede roddybde kan fytooprensningen kun anvendes forholdsvis terrænnært (til ca. 0,5 – 1 m u.t.). Den væsentligste ulempe ved teknikkerne er dog, at oprensningsperioden er meget lang, og at det er usikkert, om relevante kvalitetskriterier kan nås. Med det aktuelle udviklingsstade kan teknikkerne til oprensning af tungmetaller ikke anbefales anvendt i feltskala herhjemme.

#### **2.13.1.3 Genmodificerede bakterier**

Fytooprensning kan ligeledes etableres ved anvendelse af gensplejsede bakterier for forøget planteoptag. Ideen i denne teknik er, at genmodificerede bakterier vokser i tilknytning til planternes rodnet og nedbryder forureningskomponenterne ved cometabolisme. Herved udbredes bakterierne i hele rodzonen og



planternes vandoptag medvirker til transport af opløste forureningskomponenter til de områder hvor nedbrydningen finder sted.

#### **2.13.1.4 Sammenfatning af karakteristika**

I tabel 2.13.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

### 2.13.2 Udførte aktiviteter

#### **2.13.2.1 Olie- og tjæreforureninger**

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende aktiviteter:

##### **Litteraturstudium**

Litteraturstudiet er udført med henblik på at beskrive teknologiens stade internationalt. I studiet er der fokuseret på olie- og tjæreprодукter, og sammenkrivningen omfatter særskilte afsnit om PAH, BTEX og MTBE. Litteraturstudiet er publiceret som Miljøprojekt nr. 644 (2001), hvortil der henvises for yderligere oplysninger.

Tabel 2.13.1. Overordnede karakteristika for fytooprensning

Målsætning	Teknikken sigter mod en fiksering, nedbrydning eller evapotranspiration af organiske forureningskomponenter eller en opkoncentrering og fiksering af tungmetaller i planter.
Kombination med andre teknikker	--
Forureningskomponenter	Tungmetaller, cyanider, oliestoffer, MTBE, PAH'er, pesticider, klorerede opløsningsmidler mv.
Geologi i behandlingszone	Sand eller ler i de øvre jordlag. Både i den umættede og i toppen af den mættede zone.
Fordele og ulemper	Fordele: <ul style="list-style-type: none"><li>• Fytooprensning er en æstetisk teknik, der omdanner et forurenet område til et grønt område.</li><li>• Teknikken er lavteknologisk, og der kræves kun begrænset vedligeholdelse efter anlægsfasen.</li></ul> Ulemper: <ul style="list-style-type: none"><li>• De fleste planter har en maksimal dybde af rødder på 1-3 meter – derfor begrænser fytooprensning sig til forureninger i de øvre jordlag.</li><li>• Da fytooprensning kræver tilplantning af det forurenede område, egner metoden sig kun på områder, der i en længere periode ikke skal anvendes til bebyggelse el. lign.</li><li>• På stærkt forurenede grunde, kan indholdet af stofferne være toksiske overfor planterne, hvilket kan føre til hæmmet vækst eller plantedød.</li><li>• Oprensningsperioden er lang (&gt;10-20 år) og det er fortsat usikkert om relevante kvalitetskriterier kan nås.</li></ul>

##### **Laboratoriestudium**

Projektet omfattede forsøg med jord udtaget på en af tre lokaliteter, hvor der sideløbende blev udført feltforsøg.

Formålet med laboratoriestudierne var:

- At identificere de relevante processer under fytooprensning.
- At vurdere toxiciteten af dieselolie og benzin på piletræer.
- At videreudvikle en matematisk model for forudsigelse af oprensningseffekten.

Med henblik på at opfylde disse formål er der foretaget vækstforsøg med pil og energipil i jord med forskelligt forureningsniveau samt løbende monitoreret for en række relevante parametre. Laboratorieforsøgene er publiceret som Miljøprojekt nr. 644 (2001), hvortil der henvises for yderligere oplysninger.

### ***Feltforsøg***

Projektets feltaktiviteter omfattede tre lokaliteter:

- Et nedlagt tankanlæg ved Rønnede, "Axelved", hvor jorden indtil 3 meter under terræn var forurenede primært med gasolie. Det forurenede areal udgjorde cirka 1.400 m<sup>2</sup>.
- En nedlagt asfaltfabrik i Vassingerød "Villadsens fabrikker", hvor jorden indtil maksimalt 5,5 meter under terræn var forurenede med dieselolie og kultjære. Det forurenede areal udgjorde cirka 3.500 m<sup>2</sup>.
- Et område i Valby som er opfyldt blandt andet med slam fra et renseanlæg. Forureningen består overvejende af oliekomponenter og PAH. Der er desuden påvist indhold af LAS, plastblødgørere og tungmetaller. Forureningen dækker et område på 1.300 m<sup>2</sup> som benævnes "Valbyparken".

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At belyse oprensningseffekten overfor olie- og tjæreprodukter.
- At undersøge tidshorizonten for en oprensning samt anlægs- og driftsomkostninger.
- At undersøge hvorledes det hydrologiske kredsløb påvirkes af beplantningen.

Med henblik på at opfylde disse formål udføres der med støtte fra Teknologiprogrammet følgende:

- Beplantning med pil og poppel på ovennævnte tre lokaliteter.
- Monitorering af relevante forurenings- og dyrkningsmæssige parametre.

Feltforsøgene er fortsat under udførelse, og for mere detaljerede oplysninger henvises til Miljøprojekt nr. 644 (2001). Endvidere udgives i 2008/2009 en statusrapport vedrørende de tre feltforsøg. Konklusionerne fra statusrapporten er medtaget i denne rapport.

### ***2.13.2.2 Cyanider***

På Søllerød gasværk i Holte har det tidligere Hedeselskabet Miljø & Energi A/S (nuværende Orbicon) i samarbejde med Miljø & Ressourcer DTU gennemført et afværgeprojekt med fytooprensning kombineret med afværgepumpning. Projektet blev opstartet i 2000 for det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden) og omfattede delvis tilplantning af området, der skulle oprenses, med ca. 2.500 små poppeltræer.

Området er primært forurenede med cyanid og geologien består overordnet af tørv/fyld i de øverste jordlag underlejret af hovedsageligt moræneler og smeltevandssand.

Der udarbejdes på nuværende tidspunkt dokumentation af oprensningseffekten af fyto Remedieringen, og resultaterne er således ikke medtaget i denne rapport.

### **2.13.2.3 Tungmetaller**

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende aktiviteter:

#### ***Forsøg i drivhus***

Forud for planlagte fuldskala oprensninger på fire lokaliteter er der gennemført forsøg i drivhus med jordprøver fra lokaliteterne.

Forsøgene havde til formål at tilvejebringe et forbedret vidensgrundlag vedrørende valg af plantearter, betydningen af jordbundsforhold og metodens effektivitet.

Forsøgene omfattede følgende aktiviteter:

- Vækstforsøg med fire forskellige planter i to jordprøver fra hver lokalitet.
- Analyse af plantematerialer for indhold af tungmetaller.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til Miljøprojekt 536, 2000.

### **2.13.2.4 Genmodificerede organismer**

Kombinationen af genmodificerede bakterier og fytooprensning er undersøgt i det fælleseuropæiske forsknings- og udviklingsprojekt "Integrated Plant/GEM Systems for *in situ* Soil Bioremediation" (Bioremediering ved hjælp af planter og gensplejsede bakterier), som er støttet af Teknologiprogrammet og Europakommissionens bioteknologiprogram. Der er via Teknologiprogrammet givet støtte til den danske del af projektet.

Det overordnede formål med projektet var at udvikle og afprøve bakteriel teknologi til anvendelse i fytooprensning primært af PCB forurenet jord og sekundært af forurening med TCE og PAH. Forurening med PCB på tidligere industrigrunde er et stort problem specielt i USA og i tidligere østeuropæiske lande. Projektet havde følgende underformål:

- At tilvejebringe en markant forøget produktion af nedbryderenzymmer ved hjælp af alternativ genregulering med højere aktivitet, og desuden opnå en styring af generne med "miljø-signaler", f.eks. rodeksudater.
- At udvikle en bakterie og styre dens overlevelse efter podning ved at splejse gener der styrer bakteriestammens konkurrencedygtighed under kontrol af rodeksudater.
- At udvikle metoder for effektiv podning af planterødder med bakterier til anvendelse i fytooprensning.
- At udvide konceptet fra nedbrydning af PCB'er til nedbrydning af andre forureningsstoffer, herunder TCE og PAH.
- At udvikle værktøj for specifikt at overvåge de gensplejsede bakterier i forbindelse med udsættelsesforsøg.
- At forberede og søge om tilladelse til udsættelse af mindst én gensplejset bakteriel nedbryder og at gennemføre udsættelsesforsøget.

Arbejdet er foretaget ved forsøg i laboratoriet. For en mere detaljeret beskrivelse af de udførte forsøg henvises til Miljøprojekt 714, 2002.

### 2.13.3 Resultater af aktiviteter

#### 2.13.3.1 Olie- og tjæreforureninger

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne. Feltforsøgene er endnu ikke afsluttet, hvorfor det er begrænset hvad der p.t. kan konkluderes. De foreløbige hovedresultater er:

- Litteraturstudier indikerer, at fytooprensning af organiske forureninger er en billig og lavteknologisk teknik med lille miljøbelastning. I denne vurdering er der ikke taget højde for eventuelle manglende indtægter på det forurenede areal i oprensningsperioden. Teknikken er på forsøgsstadiet herhjemme og en række grundlæggende mekanismer er ikke klarlagt.
- I henhold til den internationale litteratur kan metoden tilsyneladende anvendes overfor de fleste organiske forureningskomponenter herunder blandingsforureninger. Den naturlige biologiske omsætning af forurenin-gen stimuleres ved øget ilttilførsel og opvækst af biomasse som følge af etableringen af flerårige rodnet.
- For vandopløselige stoffer er optag, ophobning og nedbrydning i planterne samt fordampning herfra mulige mekanismer, mens fjernelsen for sværtopløselige stoffer overvejende må forventes at foregå ved mikrobielle processer i planternes rodzone. Planternes rodnet og vandoptag påvirker desuden jordstrukturen samt ilt- og vandindhold, hvilket ligeledes kan stimulere biologisk nedbrydning af mange stoffer.
- På de enkelte lokaliteter anbefales plantetypen primært udvalgt ud fra evnen til vækst under de aktuelle betingelser. I Danmark regnes lucerne, pil og poppel blandt de hurtigst voksende plantearter.
- Metodens største ulemper er, at der kræves en meget lang oprensningsperiode (formentlig 10 – 20 år, måske flere), og at der ikke er dokumentation for muligt oprensingsniveau. Det kan på basis af de eksisterende data fra feltforsøg ikke beregnes, hvad tidshorisonten ved fyto-remediering er. Datagrundlaget er fortsat for lille.
- Endvidere udgør den opnåelige rodtybde en begrænsning i teknikkens anvendelighed. Generelt anses oprensingsdybder på op til 2 m for realistiske (lucerne muligvis op til 4 m), men i specielle tilfælde vil der med pælerødder kunne optages forurenede grundvand fra ned til 10 m u.t. Til overfladenær grundvandsforurening (indtil max. 5 m u.t.) med BTEX, MTBE og TCE kan der formentlig anvendes planter med pælerødder som poppel, lucerne og pil.
- Det er påvist, at opløst forurening med MTBE kan reduceres ved planteoptag og efterfølgende fordampning. Der foreligger ikke oplysninger om start- og oprensingsniveau, oprensningsperiode mv.
- I laboratoriestudier er det vist, at visse planter, herunder pil, kan tåle meget høje koncentrationer af cyanid, og at cyaniderne hurtigt optages og nedbrydes i pileplanter. Der foreligger ikke oplysninger om start- og oprensingsniveau, oprensningsperiode mv.
- Planterne til fyto-remediering udvælges i hvert enkelt tilfælde ud fra forurenin-gens karakter og beliggenhed og ud fra planternes specifikke egenskaber. Således er rug karakteriseret ved et stort rodnet, poppel for hurtig vækst, pil for hurtig vækst samt evnen til iltransport og lucerne for stor rodvækst og symbiosen med nitrogenfikserende bakterier.
- Energipil er relativt robust overfor BTEX og hexadecan. Grænsen for vækst af energipil er estimeret til ca. 5.000 – 8.000 mg-total kulbrinter/kg. I praksis betyder dette, at der ikke kan etableres energipil i kraftige forureningskilder.

- Opvæksten af såvel pil som poppel er følsom overfor kraftig vind, mangelfuld lugning og naturligvis ringe nedbør. Følsomheden er mest udtalt i den første vækstsæson.
- Generelt har det være nemmere at etablere plantedække af pil end af poppel.
- Overordnet blev det observeret på alle tre lokaliteter, der har været undersøgt med støtte fra Miljøstyrelsen, at etablering af vegetationen varede omkring 3 vækstsæsoner..
- Da jorden på forurenede lokaliteter ofte ikke er forberedt til etablering af plantedække (næringsstoffer, jordart og -struktur mv.) kan det anbefales at anvende længere stiklinger end ved etablering på landbrugsarealer. For pil og poppel anbefales således anvendt stiklinger på minimum 60 cm.
- Behovet for gødskning bør vurderes nøje, og fjernelse af sten kan undlades for at bevare jordens hydrauliske egenskaber.
- Ved planlægningen af fytooprensninger bør der foretages tests for fytotoxicitet, og der bør inddrages fagfolk med erfaring i etablering af plantedække under dårlige jordforhold.
- Ved de 3 feltforsøg viste det sig, at de overjordiske plantematerialer ikke indeholdt toksiske organiske stoffer. Dog var der på en af lokaliteterne en mistanke om toksicitet ved tungmetalloforureninger, især Cd. Under forudsætning af, at der ikke dyrkes føde- eller fodervarer på forurenede grunde, opstår der ikke problemer pga. af eksponering af de overjordiske plantedele til mennesker og naturen. Ved betydelig tungmetalloforurening bør plantematerialerne tjekkes for tungmetallindhold af hensyn til muligvis nødvendige sikkerhedsforanstaltninger.
- Pile- og poppeltræer kan under danske forhold anvendes til at fremme nedbrydning af kulbrinter, naftalen og BTEX i jordens umættede zone, samt zoner med fluktuerende vandstand. Anvendelse af nitrat for at forøge nedbrydningsraten bør i de fleste tilfælde overvejes. Der er ikke fundet forskel mellem pilearter eller mellem pile- og poppeltræer med hensyn til deres evne til at fremme nedbrydning af kulbrinter.
- Fytoremediering er på nuværende tidspunkt ikke egnet til at oprense jord for tjærestoffer (PAH'er og NSO-forbindelser) indenfor en overskuelig tidsramme. Ligeledes er fytoremediering ikke egnet som oprensningsteknologi for visse slamrelaterede stoffer (DEHP, NPE og LAS).

### ***2.13.3.2 Tungmetaller***

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- De udførte drivhusforsøg har vist, at raten for optag af tungmetaller i plantearterne alpepengeurt, sareptasennep, opret amarant og pil generelt er lille. Oprensningsperioden ved fytooprensning af cadmium vil være 10 – 20 år og for de øvrige metaller væsentligt længere. Desuden er det meget usikkert, om jordkvalitetskriterierne for metallerne kan nås.
- En yderligere ulempe er, at der ofte forekommer forurening med flere metaller samtidig, og at det formentlig er problematisk at finde/udvikle en plante, som er effektiv for flere metaller. Desuden indgår bly meget ofte i metalforureninger i Danmark, og tilsyneladende er effekten af fytooprensning meget lille overfor dette metal.
- På baggrund af drivhusforsøgene kan det p.t. ikke anbefales at anvende fytooprensning overfor tungmetalloforurenede jord i Danmark. Metoden bør dog revurderes om ca. 10 år, idet udvikling og forædling af plantesorter kan gøre teknikken attraktiv fremover.

### 2.13.3.3 *Genmodificerede organismer*

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra det udførte projekt:

- Fytooprensning med gensplejsede bakterier vil potentielt kunne anvendes in situ, og feltaktiviteterne adskiller sig ikke væsentligt fra skov- eller landbrugs mæssig dyrkning af planter. Ved en tilstrækkelig effekt kan fytooprensning således udgøre en billig, lavteknologisk metode med ringe miljøbelastning.
- Der mangler dokumentation for oprensningens effekt, og for hvilke oprensningsniveauer der kan opnås.
- En af de største ulemper ved fytooprensning er at oprensningsperioden må forventes at være lang, formentlig 10 år eller mere.
- Ved gensplejsning er der udviklet rodkoloniserende bakterier, der nedbryder lavtklorede PCB'er i jord. De gensplejsede bakterier kan anvendes ved podning af frø eller stiklinger.
- Udsættelsen af en gensplejset bakteriel nedbryder af PCB er blevet forbedret. Den økologiske og sikkerhedsmæssige karakterisering er afsluttet og resultaterne er fremlagt i en ansøgning om et udsættelsesforsøg.
- Der er udviklet værktøjer til at overvåge de gensplejsede bakterier ved udsættelsesforsøg. Metoderne er dog under fortsat udvikling, og der arbejdes blandt andet på at udvikle en stamme af *Pseudomonas fluorescens* F113 som detektorer med et specifikt PCR primer sæt.
- Forøget ekspression af nedbryder genkomplekset *bph* blev opnået med konstruktion af en specifik stamme af *Pseudomonas fluorescens* F113 (L:1180), hvori en genregulator fra *Sinorhizobium meliloti* anvendes. Men som en stor overraskelse er regulatoren i *Pseudomonas fluorescens* F113 altid aktiv. Det var forventet, at genekspression var under kontrol af rodesudater fra lucerne, dvs. at den kun er aktiv i rodzonen af lucerne.
- Der blev udviklet stammer af *Pseudomonas fluorescens* F113 med begrænset overlevelse, men det lykkedes ikke at udvikle en bakteriestamme med overlevelse under kontrol af rodesudater.
- Metoder til effektiv podning af planterødder til anvendelse i fytooprensning af organiske stoffer blev udviklet og er klare til brug.
- Under projektet blev der ikke som planlagt udviklet bakteriestammer til nedbrydning af TCE, PAH mv.
- Teoretisk kan teknikken anvendes overfor et stort antal organiske forureninger, herunder forureningsblandinger. Teknologien kræver dog formentlig udvikling af specielle gensplejsede bakteriestammer for hver enkelt forureningskomponent eller grupper heraf.
- Anvendelse af gensplejsede bakterier forudsætter omfattende økologiske tests og risikovurderinger.

### 2.13.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. fyto remediering som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelsene har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Fytoremediering anvendes som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af fytoremediering som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med fytoremediering.

### 2.13.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.14.1/ Miljøprojekt Nr. 536, 2000.: Phytooprensning af metaller. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.14.2/ Miljøprojekt Nr. 644, 2001: Fytoremediering af forurening med olie- og tjæreprodukter. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.14 Kemisk oxidation

### 2.14.1 Afværgeprincip

Ved kemisk oxidation som afværgeteknik tilsættes stærke oxidationsmidler til forureningszonen, for på den måde at nedbryde de aktuelle forureningskomponenter ved aggressive oxidationsreaktioner. Ved nedbrydningen kan en lang række forureningskomponenter blive omdannet til ufarlige nedbrydningsprodukter, eller de kan blive mineraliseret (nedbrudt totalt) til kuldioxid, vand og uorganiske salte. Oxidationen af sediment og grundvand kan i øvrigt medføre en stimulering af efterfølgende aerob biologisk nedbrydning af nogle forureningskomponenter.

Kemisk oxidation er anvendelig til oprensning af de fleste klorerede opløsningsmidler, lettere og tungere olieprodukter samt mange pesticider. Også PAH'er kan nedbrydes ved kemisk oxidation.

Oxidationsmidler, der anvendes i dag, omfatter ozon, hydrogen peroxid (specielt som Fentons reagens), persulfat samt natrium- og kaliumpermanganat. Oxidationsmidlerne kan enten tilsættes som fast stof, på opløst form eller som gas (O<sub>3</sub>). Endvidere findes der en lang række varemærkebeskyttede kommercielle oxidationsmidler som f.eks. ORC, RegenOx mv.

Fentons reagens og ozon er hurtige reagenser med kort levetid, der kun virker ved lave pH-værdier. Der findes dog også en modificeret Fentons reagens, som virker ved neutrale pH. Fentons reagens tilføres i vandig opløsning og ozon tilføres som gas.

Permanganat og persulfat er i modsætning hertil langsommere reagenser med længere levetid. De kan tilsættes som vandige opløsninger eller som fast fase, som så opløses af infiltrerende regnvand eller gennemstrømmende grundvand. Persulfat kan aktiveres ved opvarmning samt ved tilsætning af metaller eller base, hvorved reaktionshastigheden og effektiviteten øges.

Under danske forhold (med ofte velburede forhold) vurderes permanganat og persulfat ofte at være de bedst egnede oxidationsmidler.

På nuværende tidspunkt er det imidlertid kun kaliumpermanganat, hydrogenperoxid og ozon, der har været afprøvet og anvendt som oxidationsmidler i Danmark. Hovedparten af alle afværgeprojekter med kemisk oxidation i Danmark er dog gennemført med kaliumpermanganat som oxidationsmiddel til nedbrydning af klorerede ethener (PCE, TCE mv.).

Den helt afgørende faktor for at opnå succes ved anvendelse af kemisk oxidation er at få kontakt mellem forureningskomponent og oxidationsmiddel. Herudover kræver anvendelse af metoden et kendskab til den naturlige kemi i undergrunden, der kan have væsentlig indflydelse på de kemiske reaktioner og således dimensioneringen af afværgeproceduren. Den kemiske oxidation er således ikke stofspecifik, og ved siden af nedbrydning af forureningskomponenter vil der ske reaktion med en lang række andre naturligt forekommende organiske og uorganiske forbindelser i jorden. Denne reaktion karakteriseres som "naturligt forbrug" af oxidationsmiddel og vil i mange sager være dimensiongivende i forhold til det samlede forbrug af oxidationsmiddel i jorden.

Afhængig af de lokalitetsspecifikke forhold og afværgestrategien på en given lokalitet anvendes forskellige metoder til injektion og fordeling af oxidationsmiddel i behandlingszonen. Der opereres typisk med aktive injektionssystemer med recirkulation eller punktinjektion, hvor oxidationsmiddel tilføres behandlingszonen under tryk eller med passive injektionssystemer, hvor oxidationsmiddel tilføres ved gravitation.

Ved recirkulationssystemer bliver oppumpet grundvand tilsat oxidationsmiddel inden det reinjiceres til behandlingszonen, hvorved spredningen/fordelingen af oxidationsmiddel optimeres. Recirkulationssystemer kan anvendes i aflejringer med god hydraulisk ledningsevne som sand/grus aflejringer.

Ved punkttilsætning tilføres oxidationsmiddel typisk i en række behandlingspunkter i kildeområdet eller på tværs af en forureningsfane. Tilsætningen kan ske via boringer, jordspyd (Geo-probe), permeable vægge (reaktive barrierer) samt gravninger herunder omblanding af kemisk oxidationsmiddel i den jord, der benyttes til opfyldning. Systemer med punkttilsætning er generelt teknisk simple at implementere, idet der ikke er behov for boringsbestykning, rørføringer, elinstallationer mv. Det kan imidlertid være vanskeligt, at opnå en jævn fordeling af oxidationsmiddel i behandlingszonen, da et system baseret på punkttilsætning ikke er forbundet med hydraulisk kontrol. Til gengæld kan injektion med f.eks. jordspyd målrettes områder med lav permeabilitet, hvilket ikke er muligt med recirkulationssystemer.

Det må vurderes konkret i hver enkelt sag hvilken injektionsstrategi, der er optimal på en given lokalitet. De forskellige metoder har forskellige fordele og ulemper således at én metode er bedre på en given lokalitet sammenlignet med en anden metode, mens det på en anden lokalitet kan forholde sig omvendt.

Der skal i øvrigt foretages en løbende monitoring af afværgeforanstaltningernes effektivitet samt kontrol af oxidationsmidlets spredning (pga. oxidationsmidlernes potentielle toksiske egenskaber er det essentielt at sikre, at der ikke sker en uønsket påvirkning af recipienter eller det primære magasin og eventuelle vandindvindinger). Derudover kan anvendelse af et oxidationsmiddel medføre uønsket afledte geokemiske effekter i jord- og grund-



vandsmiljøet (f.eks. mobilisering af metaller, påvirkning af pH mv.). Et monitoringsprogram bør således justeres i henhold til forureningskomponenter, oxidationsmiddel samt lokalitetsspecifikke faktorer.

De væsentligste parametre, der afgør om en oprensning med kemisk oxidation bliver en succes er listet nedenfor:

- Geologisk opbygning af behandlingszonen, herunder inhomogeniteter. Succesen er afhængig af, at forurening og oxidationsmiddel bringes i kontakt. Oprensning af lavpermeable jordlag (ler/silt) med kemisk oxidation er således særdeles vanskelig.
- Valg af korrekt doseringsmetode og oxidationsmiddel.
- Mulighed for tildeling af tilstrækkelige mængder oxidationsmiddel i områder med kraftig forurening uden tilklogning af udstyr eller formation.
- Tilstedeværelsen af større mængder organisk stof i jorden. Dette kan forøge forbruget af oxidationsmiddel og i værste fald betyde alvorlige geotekniske ændringer efter endt oprensning.
- Nærhed af overfladevand/recipienter. Hvis der er overfladerecipienter i umiddelbar nærhed, skal det meget nøje overvejes, om risikoen ved anvendelsen er uacceptabel i forhold til recipienterne.
- Lokalitetens/behandlingszonens sårbarhed overfor urenheder i det tilførte oxidationsmiddel (metaller). En vurdering af risikoen for uønsket spredning/mobilisering af metaller i eller omkring behandlingszonen bør indgå som en del af grundlaget for valget af denne metode.

Ved anvendelse af kemisk oxidation som afværgeteknik bør det i øvrigt undersøges om oxidationsmidlet kræver en særskilt godkendelse fra miljømyndighederne inden tilsætning.

I tabel 2.14.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.14.1. Overordnede karakteristika for kemisk oxidation som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter mod en oprensning af primært opløst og sorberet forurening i den mættede zone. Teknikken er specielt velegnet til kildeoprensning men kan også anvendes i forureningsfaner. Metoden er dog ofte ikke velegnet til oprensning af kildeområder med væsentlige mængder fri fase.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan med fordel kombineres med andre teknikker som f.eks. frakturering ved oprensning i lavpermeable formationer.
Forureningskomponenter	Klorerede opløsningsmidler, oliestoffer, PAH'er, mange pesticider.
Geologi i behandlingszone	Forurening i sand (og visse tilfælde ler) i den mættede og umættede zone.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: De omtalte oxidationsmidler kan meget effektivt nedbryde forskellige forureningskomponenter. Afværgeeffekten afhænger derfor af, at oxidationsmiddel og forureningskomponent bringes i kontakt.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknikken er effektiv og forårsager hurtig nedbrydning af forureningskomponenter.</li> <li>• Teknikken kan anvendes overfor mange typer forureningskomponenter.</li> <li>• Erfaringsgrundlaget er voksende både nationalt og internationalt.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risikoen for påvirkning af evt. nærtliggende recipienter skal vurderes nøje inden etablering.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kemisk oxidation kan medføre afledte geokemiske effekter, herunder mobilisering af metaller (f.eks. oxidation af Cr(III) til Cr(IV)).</li> <li>• Flere oxidationsmidler har toksiske egenskaber, hvorfor arbejdet med dem kræver særlige arbejdsmiljømæssige foranstaltninger.</li> <li>• I heterogene aflejringer kan det være vanskeligt at bringe oxidationsmiddel i kontakt med forureningskomponenterne, hvilket nedsætter afværgeeffekten betydeligt.</li> <li>• Ved kemisk oxidation nedbrydes kun forureningskomponenter på opløst eller sorberet form. Større mængder fri fase forurening vil således ofte medføre tilbageslag "rebound" af forureningskoncentrationer i behandlingszonen, når oxidationsmidlet har reageret.</li> <li>• Tilstedeværelse af større mængder organisk stof i behandlingszonen vil øge behovet for oxidationsmiddel og kan i værste fald udgøre en risiko for geotekniske ændringer i jorden.</li> <li>• Driften af anlægget er forbundet med visse omkostninger til bl.a. strøm, tilsyn mv.</li> </ul>
--	--

### 2.14.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført 2 fuldskala afværgeprojekter med kemisk oxidation støttet af miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 872 (2003) samt et Miljøprojekt, der er under udarbejdelse. Herudover er der under Teknologiprogrammet gennemført en række forsøg i laboratorieskala vedrørende omsætningshastigheder og behandling af lavpermeable formationer af ler, jf. Miljøprojekt 1066 (2006).

Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter med denne teknik. Disse projekter er primært finansieret af miljømyndighederne i forbindelse med deres lovpligtige oprensning af forurenede grunde samt af private bygherre, herunder f.eks. Oliebranchens Miljøpulje (OM).

I nedenstående afsnit tages der primært udgangspunkt i udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet, mens erfaringer fra sager af mere driftsmæssig karakter indgår som en del af en samlet perspektivering af afværgeteknikken senere i kapitlet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### 2.14.2.1 Vesterbro, Odense

På Vesterbro i Odense har COWI A/S i samarbejde med Miljø & Ressourcer DTU gennemført et afværgeprojekt med kemisk oxidation for det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syddanmark) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er afrapporteret i Miljøprojekt 872 (2003).

Projektet omfattede oprensning af primært PCE fra kildeområdet på lokaliteten. Geologien bestod overordnet af 1-2 m fyld, herunder ca. 8 sandede og siltede jordlag underlejret af moræneler. Grundvandsspejlet stod frit i ca. 6 m u.t. Oprensningen med kemisk oxidation blev foretaget i den mættede del af formationen, mens den umættede del blev oprenset ved hjælp af dampstripping, jf. afsnit 2.8.

Målsætningen med etablering af afværgeforanstaltninger med kemisk oxidation var at oprense den mættede zone i kildeområdet, således at grundvands-

forureningen ikke fortsat ville udgøre en potentiel risiko overfor indeklimaet i de overliggende beboelsesejendomme.

Kemisk oxidation blev implementeret ved injektion af i alt ca. 60 m<sup>3</sup> opløst kaliumpermanganat (5 %) under tryk via perforerede jernspyd i niveau med grundvandsspejlet opstrøms kildeområdet. For at opnå maksimal horisontal spredning i behandlingszonen, blev der gennemført afværgepumpning nedstrøms for at trække kaliumpermanganaten i denne retning.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet var at skaffe dokumentation for metodens effektivitet for oprensning af klorerede stoffer i den mættede zone. Med henblik på at opfylde disse formål blev der gennemført udvidet monitoring ved udtagning af vandprøver til undersøgelse af farveændringer, redoxforhold, indhold af klorerede opløsningsmidler, uorganiske makroioner og spormetaller. Der er desuden tilført og analyseret for bromidtracer sammen med kaliumpermanganaten til vurdering af den horisontale og vertikale spredning af injektionsvæske.

Ved projektet blev det konstateret, at koncentrationerne af PCE blev reduceret markant både i kildeområdet og i nedstrøms retning, og det vurderes, at der her er sket en næsten fuldstændig oprensning både horisontalt og vertikalt.

Der henvises i øvrigt til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.15.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **2.14.2.2 Grønnegade, Fåborg**

På Grønnegade i Fåborg har COWI A/S gennemført et afværgeprojekt med kemisk oxidation for det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syddanmark) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er på nuværende tidspunkt ved at blive afrapporteret.

Forureningen på lokaliteten bestod primært af PCE og geologien i behandlingszonen (sekundært magasin) bestod overordnet af smeltevandssand med stedvise siltindslag underlejret af moræneler.

På lokaliteten er der tidligere gennemført airsparging og vakuumeekstraktion, men der er efterladt en relativt kraftig restforurening i jorden og grundvandet, som er forsøgt oprenset med kemisk oxidation. Afværgeforanstaltningerne er således gennemført med henblik på at reducere restforurening for på den måde at minimere risikoen for indeklimaet i beboelsesejendomme på lokaliteten. Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål at belyse forskellen i oprensningseffekten ved airsparging og kemisk oxidation i den mættede zone.

Kemisk oxidation blev gennemført ved tilsætning af kaliumpermanganat over flere injektionsrunder. Der blev samlet tilsat 82 m<sup>3</sup> opløst kaliumpermanganat (ca. 3 %).

For at undersøge oprensningseffekten er der udtaget og analyseret af vandprøver for farveændringer, klorerede opløsningsmidler, uorganiske makroioner og spormetaller. Der er desuden tilført og analyseret for bromidtracer sammen med kaliumpermanganaten til vurdering af den horisontale og vertikale spredning af injektionsvæske.

Ved projektet blev det konstateret, at injektionen af kaliumpermanganat resulterede i at koncentrationerne af PCE blev markant reduceret både i kildeområdet og nedstrøms herfor. Det blev vurderet at den residuale fri fase i kildeområdet stort set er oprenset. I områder, hvor fordelingen af kaliumpermanganat ikke har været effektiv, er oprensningseffektiviteten tilsvarende lav.

Det kunne overordnet konstateres at kemisk oxidation på lokaliteten var betydeligt mere effektiv end airsparging til oprensning af kildeområdet.

Der henvises i øvrigt til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.15.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **2.14.2.3 Yderligere aktiviteter**

Ud over udviklingsprojekterne finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologi-programmet, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor kemisk oxidation har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Udvalgte projekter gennemført af Miljømyndighederne, hvor kemisk oxidation blev etableret som en del af afværgestrategien, er f.eks.:

- Dalumvej, Odense (Region Syddanmark)
- Ravnsbjergvej, Alsønderup (Region Hovedstaden)
- Frydensbergvej, Stenløse (Region Hovedstaden)
- Godthåbsvej, København (Region Hovedstaden)
- Tværvej (Region Syddanmark)
- Hedensted (Vejle Amt, Region Syddanmark)

Kerneprøver af moræneler fra lokaliteten Dalumvej i Odense har indgået i en række laboratorieforsøg gennemført af Miljø & Ressourcer DTU med støtte fra Teknologi-programmet, jf. Miljøprojekt 1066, 2006. Da der er tale om laboratorieforsøg indgår resultaterne ikke i denne opsamling. Udvalgte relevante resultater er dog medtaget i nedenstående resultatafsnit.

Kemisk oxidation indgår desuden som en mulig strategi for oprensningsindsatsen på Kærgård Plantage (Grindstedværket), hvor der er gennemført dimensionerende laboratorieforsøg og på Høfde 42 (Cheminova), hvor der ligeledes er gennemført laboratorieforsøg i forbindelse med vurderingen af mulige afværgestrategier.

Ved siden af den offentlige indsats pågår der ligeledes aktiviteter med kemisk oxidation for private bygherre. F.eks. gennemføres på nuværende tidspunkt et projekt for oliebranchens Miljøpulje (OM), hvor persulfat afprøves som oxidationsmiddel.

#### **2.14.3 Resultater af aktiviteter**

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

Generelt kan følgende konkluderes:

- Kemisk oxidation vurderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter at have stort potentiale til oprensning af specielt klorerede stoffer men også olie- og benzinkomponenter, PAH'er og pesticider på et stort antal forurenede lokaliteter i Danmark.

- I forbindelse med de gennemførte projekter blev der således påvist, at i områder, hvor oxidationsmidlet er fordelt effektivt er koncentrationerne af klorerede stoffer reduceret markant. Det vurderes at der er sket næsten fuldstændig oprensning i disse områder.
- Fordelingen af oxidationsmiddel i behandlingszonen er helt central for effektiviteten af oprensningen.
- Den horisontale spredning af opløst kaliumpermanganat er observeret at ske hurtigere end forventet. Årsagen til den hurtigere spredning blev i den konkrete sag vurderet at skyldes den forøgede gradient, som opstod, da der både blev pumpet og injiceret samtidig og strømmingen var sandsynligvis hurtigere i de mere grovkornede lag i magasinet.
- Kaliumpermanganaten har været udbredt i både top og bund af magasinet. Den horisontale udbredelse er dog primært sket i de sandede aflejringer og mindre i de siltede lag.
- Den noget højere vægtfylde for opløst kaliumpermanganat (ca. 1,07 kg/l), har på en sag haft en væsentlig betydning for observeret nedsynkningen i magasinet.
- Tilførsel af kaliumpermanganat medfører tilførsel af tungmetaller (urenheder i kaliumpermanganaten) til grundvandet. Desuden kan den kraftige oxidation medføre mobilisering af f.eks. krom og zink. Ved de gennemførte projekter er der imidlertid ikke konstateret en uønsket spredning af tungmetaller som følge af tilsætningen af kaliumpermanganat.
- På en lokalitet er der påvist indikationer på en meget stor omsætning af oxidationsmiddel (permanganat) i en formation af moræneler indenfor det første år dog med begrænset effekt på koncentrationerne af PCE ikke blot i lermatrix, men også i de vandførende sandlinser og -slirer.
- Indtrængningen af permanganat i lermatrix ved diffusion på et år er observeret at være ca. 15 cm i forvitret og 2-3 cm i uforvitret moræneler.
- I gennemførte boksforsøg er der påvist en kraftig tilbageholdelse af permanganats diffusion ind i lermatrix. Diffusion af forureningskomponenter fra den centrale del af matrix ud i zonen indenfor reaktionsfronten og sandlag må på baggrund af laboratorieforsøgene formodes at være af større betydning for oprensning, end det var forventet.
- Ingeniørteknisk er der opnået gode erfaringer med tilsætning af opløst kaliumpermanganat ved punktinjektion. Kaliumpermanganaten er blevet opløst i vand i et mobilt lukket anlæg, der er designet til formålet.

#### 2.14.4 Perspektivering

Feltaktiviteter gennemført med støtte fra Miljøstyrelsen under teknologiprogrammet såvel som feltaktiviteter gennemført i andet regi med kemisk oxidation viser lovende resultater. Metoden anvendes således også i dag som en del af afværgestrategien i forbindelse med oprensning på flere lokaliteter. Da teknikken imidlertid stadig er ny, er der fortsat behov for udvikling af teknikken.

Nedenstående emner viser, hvor der bl.a. vurderes at være behov for udvikling af inden for kemisk oxidation som afværgeteknologi på feltskala i Danmark.

- ***Injektionsstrategier:***

Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling og sammenligning af de strategier, der på nuværende tidspunkt er afprøvet nationalt såvel som internationalt, for tilførsel af oxidationsmiddel (punktinjektion, recirkulation mv.) under forskellige geologiske og hydrogeologiske forhold. Bl.a. bør

den resulterende fordeling af oxidationsmiddel i behandlingzonen under forskellige forhold vurderes.

Endvidere bør det belyses/undersøges, ved hvilken injektionsstrategi fordelingen af oxidationsmiddel (injektion, recirkulation) optimeres i henholdsvis højpermeable og lavpermeable formationer, og ved hvilke mængder og injektionshyppigheder oprensningerne optimeres.

Yderligere er der behov for at belyse muligheden for at kombinere kemisk oxidation med frakturering (hydraulisk, pneumatisk) i lavpermeable formationer for at vurdere, om der kan etableres et tilstrækkeligt fint/ensartet (forudsigeligt) sprækkenetværk.

- **Geologi i behandlingszonen:**

Der vurderes at være behov for en større procesmæssig forståelse for etablering af kemisk oxidation i forskellige geologiske formationer. Specielt i lavpermeable formationer som opsprækket kalk/ler er der behov for viden vedrørende interaktion mellem sprækker og matrix for forureningskomponenterne og oxidationsmidlet.

Metoden er endnu ikke afprøvet i kalk.

- **Oxidationsmidler**

Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling og sammenligning samt yderligere afprøvning af forskellige oxidationsmidler i forskellige geologiske formationer og ved forskellig dosis. Der er f.eks. kun ringe kendskab til levetiden og hvilke parametre (dosis, geologi, redoxforhold mv.), der influerer på levetiden.

Persulfat er internationalt blevet afprøvet med lovende resultater og der er på nuværende tidspunkt netop foretaget projektering af en oprensning med oxidationsmidlet herhjemme. Oprensningen er finansieret af OM.

- **Geoteknik**

Der vurderes at være behov for en vurdering af de geotekniske implikationer ved anvendelse af kemisk oxidation i stærkt organisk holdige jorde.

- **Risikovurderinger**

Der vurderes at være behov for yderligere udvikling af risikovurderingsværktøjer/-metoder til vurdering af risikoen forbundet med at anvende forskellige oxidationsmidler til nedbrydning af forureningskomponenter i undergrunden, herunder uønsket spredning, afledte geokemiske effekter, geotekniske forhold mv.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. kemisk oxidation som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Kemisk oxidation anvendes som en del af afværgestrategien på flere danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af kemisk oxidation som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med kemisk oxidation.

#### 2.14.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.15.1/ Miljøprojekt Nr. 872, 2003: Oprensning af PCE ved kemisk oxidation med kaliumpermanganat. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.15.2/ Miljøprojekt Nr. 1066, 2006: Kemisk oxidation med permanganat - Omsætningshastigheder og spredning i moræneler. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.15 Geooxidation

#### 2.15.1 Afværgeprincip

”Geooxidation” er betegnelsen for en elektrokemisk metode til in situ oprensning af organiske forureningskomponenter fra jord og grundvand, herunder specielt benzin og gasolie. Metoden er baseret på, at den forurenede jordmatrix påføres en relativ svag elektrisk jævnstrøm. Strømmen påføres ved hjælp af elektroder, som oftest i form af jernspuns eller jernrør. Metoden kan anvendes såvel i mættet som i umættet zone og er specielt rettet mod lerede jordlag, da lerets relativt høje ledningsevne tillader udbredelse af den svage jævnstrøm.

Der foreligger ikke en fyldestgørende dokumentation for metodens oprensningsmekanismer samt for tidligere udførte oprensninger. Den angivne oprensningseffekt kan skyldes flere mekanismer, hvor der overordnet skelnes mellem elektrokinetisk transport og elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen.

De elektrokinetiske transportprocesser er teoretisk velbeskrevne processer, hvor opløste stoffer kan transporteres i et elektrisk felt som følge af bl.a. elektromigration, elektroosmose og diffusion. Fordelene ved de elektrokinetiske metoder er især muligheden for at behandle lavpermeable jorde in situ. Inden for de sidste ca. 10 – 15 år er der sket en kraftig udvikling i anvendelsen af elektrokinetiske metoder til oprensning af tungmetalforurenet jord. De seneste år er der endvidere udviklet og afprøvet elektrokinetiske metoder til oprensning af organiske forureningskomponenter. De elektrokinetiske metoder er i laboratorieforsøg og enkelte feltforsøg blandt andet anvendt til oprensning af svage organiske syrer og phenoler, PAH'er, BTEX'er og kulbrinteblandinger, klorerede opløsningsmidler og herbicidet 2,4-dichlorphenoxy-carboxylsyre (2,4 D).

De elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen er ikke tidligere studeret/anvendt som led i oprensning af jord og grundvand. Sideløbende med ovennævnte elektrokinetiske processer forventer de entreprenører, der anvender metoden, at den påtrykte jævnspænding medfører en række elektrokemisk

inducerede reaktioner, hvorved forureningskomponenter i jordmatricen mellem elektroderne nedbrydes. Det er således angivet, at metoden "Geooxidation" overvejende er baseret på de elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen. Selve forureningsfjernelsen foregår angiveligt enten ved kemisk oxidation på sedimentkornenes overflade med stærke oxidationsmidler som dannes i det svage spændingsfelt eller ved elektrokemisk inducerede redox reaktioner på overfladen af naturligt forekommende ledende mineraler som grafit og magnetit. I begge tilfælde er det angivet, at forureningskomponenterne omdannes til kuldioxid og vand.

Baggrunden for teknologiprojektet er således, at der uden forudgående videnskabelig dokumentation er iværksat en række oprensninger med den elektrokemiske metode, og at der er konstateret en væsentlig generel interesse for at tilvejebringe et udbygget kendskab til metodens eventuelle oprensningseffekt.

Sammenfattende må det konkluderes, at dokumentationen af mekanismerne bag og effekten af geooxidation er meget mangelfuld. På baggrund af det udførte projekt støttet af Miljøstyrelsen har det ikke været muligt at påvise nogen signifikant oprensningseffekt med metoden.

### 2.15.2 Udførte aktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologipulje er det valgt at foretage en erfaringsopsamling for geooxidation med henblik på at sammenstille den eksisterende viden om metodens virkemåde og effekt. Desuden er der i tilknytning til et oprensningsprojekt på en lokalitet på Østergade i Gram udført undersøgelse af korrosionsrisici samt en række supplerende monitoringsaktiviteter.

På lokaliteten i Gram er der kortlagt en omfattende jord- og grundvandsforurening med benzin, gasolie og MTBE primært i moræneler fra ca. 1 – 6 m u.t. Moræneleret indeholder sandede partier samt tynde sandlag. Forureningen var beliggende delvis under en bygning. Oprensningen er søgt foretaget ved hjælp af i alt 12 elektroder udført som nedborede jernrør til ca. 6 m u.t. Fire elektroder har været anvendt som anoder, fire som katoder og fire har været placeret midt i feltet. Der er anvendt et fast spændingsfald på 120V mellem anoder og katoder. Strømstyrken har afhængig af jordmodstanden været 90-95A. Under oprensningen har entreprenøren sideløbende udført en relativt svag vakuumventilation i ventilationsboringer midt i oprensningsområdet. Formålet hermed har ifølge entreprenøren været dels at opnå en fjernelse af flygtige kulbrinter, dels at monitorere oprensningseffektiviteten via målinger af CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> i afkastluften.

Under Teknologiprogrammet er der udført følgende:

- Erfaringsopsamling for ni projekter. Formålet med erfaringsopsamlingen var at sammenstille og vurdere resultaterne fra samtlige oprensninger udført med metoden i Danmark. Herved etableres et grundlag for mere generelle vurderinger af metodens effekt overfor forskellige forureningstyper og i forskellige jordlag.
- Undersøgelse af korrosionsrisici. Ved anvendelse af geooxidation påtrykkes behandlingsområdet en jævnspænding i hele oprensningsperioden. Elektrisk ledende materialer som er i kontakt med den behandlede jord påvirkes ligeledes af spændingsfeltet og vil være udsat for galvanisk tæring (korrosion). Med henblik på at belyse omfanget af en sådan korrosion og angive mulige forebyggende foranstaltninger er der udført målinger af



spændingsfeltet på og omkring lokaliteten på Østergade, Gram og potenti-ale skift ved afbrydelse/tilslutning af strømmen.

Endvidere er der udført supplerende monitoring for at:

- Belyse metodens oprensningseffekt.
- Undersøge risikoen for en forøget spredning af forureningen med grundvandet som følge af oprensningen.
- Undersøge risikoen for forøget afdampning af flygtige forureningskomponenter.
- Vurdere risikoen for opkoncentrering af tungmetaller ved elektroderne.
- Undersøge ændringer i kemiske ligevægte i jord og grundvand samt jordens temperatur som følge af den påførte elektriske jævnstrøm.
- Fastlægge eventuelle andre negative sideeffekter som den elektrokemiske metode kan give anledning til, herunder risikoen for overgang i, og tæring af installationer, risikoen for sætninger og påvirkning af mikrobiologiske parametre.
- Vurdere eventuelle udviklingsmæssige perspektiver for metoden

Med henblik på at tilfredsstille ovennævnte formål har monitoringen omfattet følgende:

- En kortvarig prøvepumpning til fastlæggelse af hydrauliske parametre for et vandførende sandlag.
- Udvælgelse af fire målestationer: 1 m<sup>2</sup> store områder ved en katode, midt i feltet, ved en anode og opstrøms det forurenede område. Ved hver målestation er der etableret en ø63 mm monitoringsboring.
- Prøvetagning af jord før, under og efter oprensningen. Prøverne er analyseret for indhold af oliekomponenter, tungmetaller samt for kimalt, ledningsevne, pH og temperatur.
- Prøvetagning af grundvand før, under og efter oprensningen. Under prøvetagningen er der registreret pH, ledningsevne, temperatur og iltindhold i det oppumpede vand. Prøverne er analyseret for indhold af oliekomponenter, MTBE og som udvidet boringskontrol.
- Prøvetagning af poreluft fra de etablerede boringer ved målestationerne. Under prøvetagningen er der registreret CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i det oppumpede luft. Prøverne er analyseret for indhold af oliekomponenter.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til Miljøprojekt Nr. 554, 2000.

### 2.15.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Der eksisterer ikke p.t. et velunderbygget teoretisk fundament, der kan forklare en eventuel fjernelse af organiske forureningskomponenter i jordmatricen mellem elektroderne som følge af en elektriske jævnstrøm. Metoden er primært udviklet in situ, og den er ikke kritisk testet og dokumenteret under kontrollerede laboratorieforhold.
- Resultaterne fra det gennemførte feltprojekt samt de generelle erfaringer fra øvrige forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode; geooxidation i Danmark viser, at der generelt ikke er dokumenteret en oprensningseffekt

i forhold til jord- og grundvandsforureninger med olieprodukter. Ingen af de gennemførte oprensninger har således kunnet afsluttes alene på baggrund af den elektrokemiske oprensning.

- Oprensningerne er søgt gennemført på både benzin- og dieselolieforureninger i en række forskellige jordtyper og under varierende redoxbetingelser. Der har ikke kunnet påvises en sammenhæng mellem oprensningseffekt og oprensningsbetingelser.
- Forud for eventuelle fremtidige anvendelser af teknikken bør der tilvejebringes et betydeligt bedre dokumentationsgrundlag fra kontrollerede laboratorieforsøg samt feltforsøg i pilot skala.
- Der er generelt konstateret meget varierende forureningskoncentrationer i monitoringsboringer, hvor prøver er udtaget omkring samme boring i samme dybde. Datamaterialet fra forsøgsprojekterne er derfor ikke tilstrækkeligt til entydigt at vurdere, hvorvidt der er opnået en massefjernelse, der kan henføres til den elektrokemiske oprensning på forsøgsprojekterne.
- De sikkerhedsmæssige forhold, risikoen for korrosionsskader og potentielt også risikoen for sætningsskader, bør vurderes i hvert enkelt tilfælde ved anvendelse af elektrisk jævnstrøm in situ. Der bør bl.a. foretages en kortlægning af alle installationer i og omkring spændingsfeltet med henblik på at foretage en vurdering af behovet for korrosionsbeskyttelse af udsatte installationer.
- Der er ikke konstateret væsentlige ændringer i den grundvandskemiske sammensætning, herunder pH og iltindhold, ved de relativt svage feltstyrker, der er anvendt under feltprojektet. Der er endvidere ikke sket ændringer i tungmetalkoncentrationen eller pH ved elektroderne under gennemførelsen af feltprojektet.
- Det er observeret, at metoden kan resultere i en temperaturstigning som følge af afsætning af energi i jorden. Specielt ved katoden kan modstanden øges under oprensningen som følge af udfældning af metaller og mineraler eller som følge af udtørring. Der er indikationer på, at ovenstående afsætning af energi i jorden (opvarmning) kan resultere i en øget afdampning af forureningskomponenter.
- Den elektrokemiske metode, som er vurderet i dette projekt, har ikke været designet til at udnytte de elektrokinetiske transportprocesser ved påføring af en elektrisk jævnstrøm til jordmatricen. En række af de felterfaringer mht. installation, monitoring og sikkerhedsaspekter, der er gjort i nærværende projekt, vil dog givetvis kunne overføres til andre in situ metoder, hvor der anvendes en elektrisk jævnstrøm til oprensning af forurenede jord.

#### 2.15.4 Perspektivering

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen gennemført blandt regionerne i Danmark, jf. afsnit 1.3, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende teknikkens anvendelse og behovet for yderligere teknologiudvikling:

- Der er ikke indhentet oplysninger, der dokumenterer kendskab til projekter, hvor geooxidation har været anvendt som en del af afværgestrategien på danske lokaliteter.
- Spørgeskemaundersøgelsen, jf. afsnit 1.3, pegede på, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med geooxidation.

## 2.15.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

/2.16.1/ Miljøprojekt Nr. 554, 2000: Afprøvning af ny elektrokemisk metode til oprensning af olieforurenede jord og grundvand. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 2.16 Hydraulisk frakturering

### 2.16.1 Afværgeprincip

Princippet i frakturering er, at der i lavpermeable og muligt opsprækkede jordlag (ler, kalk, hårde bjergarter) etableres kunstige sprækker, som i visse tilfælde udfyldes med sand og derved fungerer som lange højpermeable zoner og i andre tilfælde kun anvendes én gang til injektion af en behandlingsvæske/behandlingsmedium. Disse kunstige sprækker vil dels have kontakt til den lavpermeable jordmatrice over en stor flade og vil dels stå i hydraulisk forbindelse med eventuelle naturlige højpermeable sprækkezoner i jordlagene. Herved øges muligheden for fordeling af behandlingsvæsker og/eller ekstraktion af væske og gas fra formationen.

Fraktureringsteknikkerne er oprindeligt udviklet i olieindustrien og indenfor vandforsyning med henblik på at øge ydelsen af borer og den samlede op-pumpning fra olie- eller grundvandsreservoirer.

Hydraulisk frakturering kan udføres både med vandret og lodret boreteknik i umættet eller mættet zone.

Ved etablering af permanente sandfyldte sprækker med fraktureringsteknikken injiceres der i den ønskede dybde under terræn en højviskos væske bestående af vand, sand og guar gummi ved et tryk, der overstiger in-situ spændingstilstanden i den aktuelle aflejringszone. Hermed dannes en sprække, hvorved permeabiliteten i aflejringszonen øges.

Metoden er grundlæggende ikke mulig at gennemføre tæt på terræn, idet der her vil være stor risiko for optrængning af fraktureringsvæske til terræn samt mulighed for beskadigelse af terrænnære fysiske installationer, såsom bygningsdele, ledninger, tanke mv. Metoden fungerer bedst i dybdeintervallet 2 til 8 m u.t. En nedre etableringsdybde vurderes at være 8 til 9 m u.t.

Der kan fraktureres fra såvel lodrette, vandrette og skrå borer. Lokalt specifikke forhold vil ofte ligge til grund for endeligt valg af boreteknik. Frakturering via skråboringer udføres identisk med teknikken for lodrette borer og muliggør frakturering under bygninger.

En kunstig sprækkes form og geometri vil være bestemt af lokalitetspecifikke geologiske og geotekniske forhold. Sprækken vil ideelt set formes som en cirkulær tallerken, men opnår i praksis ofte andre former og udbredelser. Erfaringer viser, at sprækkerne ofte vil få en foretrukket vandret udbredelse i dybder fra 1 til 8 meter under jordoverfladen, mens sprækker der etableres i den øverste meter eller dybere end otte meter oftest bliver orienteret skråt eller lodret. Diameteren af sprækkerne kan blive op til 20 meter, og sprækkeåbningen kan være fra få mm til 2 cm.

Det er på nuværende tidspunkt ikke muligt at forudsige sprækkeudbredelsen i jorden og sprækketætheden er fortsat for stor, hvis diffusive processer er styrende for oprensningen af den lavpermeable formation.

I tabel 2.16.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.16.1. Overordnede karakteristika for hydraulisk frakturering

Målsætning	Teknikken sigter mod en opsprækning af lavpermeable formationer, for herved at skabe sprækker, som øger formationens permeabilitet. Dette giver mulighed for en mere effektiv kontakt mellem "oprensningsmidler" og forureningsstoffer, idet større volumener "oprensningsmiddel" kan fordeles i formationen og adgangen til hydraulisk isolerede dele af formationen muliggøres. Hvis frakturerne fyldes med sand, kan de anvendes til gentagne injektioner eller ekstraktioner.
Kombination med andre teknikker	Metoden kan anvendes til at øge in situ massefjernelse i formationer med lav permeabilitet ved hjælp af f.eks. stimuleret reduktiv deklorering, kemisk oxidation, nulvalent jern mv.  Metoden åbner i øvrigt mulighed for at øge permeabiliteten i formationer med lav permeabilitet med henblik på vakuume ekstraktion, hydraulisk fiksering, dual phase extraction mv.
Forureningskomponenter	Distributionsmetode til optimering af diverse afværgeteknikker .
Geologi i behandlingszone	Lavpermeable formationer (ler). Umættet og mættet.
Fordele og ulemper	Effekt: Teknikken vil primært have effekt i lavpermeable formationer.  Fordele: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Øger influensradius/hydraulisk effekt ved oprensning i såvel mættede som umættede behandlingszoner.</li> <li>• Afkorter driftstid for oprensninger.</li> <li>• Åbner mulighed for direkte dosering af midler til oprensning (kemikalier, substrat, biomasse mv.).</li> </ul> Ulemper: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknikken kræver indgående geologisk og geoteknisk karakterisering.</li> <li>• Sprækkemønstret og sprækketætheden kan fortsat ikke forudsiges, hvilket medfører stor usikkerhed om den opnåelige effekt.</li> <li>• Etablering af sprækker i nærheden af bygninger eller underjordiske installationer kræver forudgående geotekniske og byggetekniske vurderinger.</li> <li>• Det er vanskeligt at dokumentere udbredelse af sprækker.</li> <li>• Metoden er forbundet med forholdsvis store anlægsomkostninger.</li> </ul>

## 2.16.2 Udførte aktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et udredningsprojekt vedrørende stødvis ventilation og pneumatisk frakturering, et litteraturstudium vedrørende fraktureringsteknikker generelt samt to feltprojekter med hydraulisk frakturering. I feltprojekterne blev der etableret horisontale sprækker fra henholdsvis vertikale og horisontale borer. Feltprojekterne beskrives kortfattet i det følgende.

### 2.16.2.1 Vestergade, Haslev

På Vestergade i Haslev er der gennemført et projekt med hydraulisk frakturering for det tidligere Vestsjællands Amt (nuværende Region Sjælland) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Projektet er gennemført af NIRA A/S i samarbejde med NCC og Brøker IS (etablering af borer og hy-

drauliske frakturer) og under rådgivning af FRx Inc. (USA) i perioden 2000 til 2001.

På lokaliteten er der i moræner kortlagt en kraftig jord- og grundvandsforurening med PCE overvejende fra 2,5 – 5,0 m u.t. ved og under en bygning. Med henblik på at hindre fortsat spredning af opløst PCE i retning mod områdets primære grundvandsmagasin er det valgt at etablere frakturer fra lodrette borer. Disse borer står i hydraulisk kontakt til frakturerne og er anvendt til afværgepumpning ved såkaldt dobbeltfase ekstraktion, hvor poreluft og porevand ekstraheres fra jorden ved hjælp af et kraftigt vakuum.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er udført på en uforurenet del af lokaliteten og havde til formål:

- At dokumentere anvendeligheden af fraktureringsteknikken på den aktuelle lokalitet.
- At dokumentere udbredelse, tykkelse og orientering af sprækker etableret på lokaliteten.
- At foretage en specifik kvantificering af effekten af frakturering ved sammenligning af de hydrauliske egenskaber af borer med og uden frakturering.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Etablering af to testsprækker på hhv. 4,5 og 8,0 meters dybde fra to forskellige borer ved hydraulisk frakturering.
- Registrering af sprækkernes udbredelse ved registrering af jordhævningen i en afstand op til 5 m fra injektionsstedet.
- Udført kerneprovtagning til bestemmelse af sprækkeudbredelsen for de to testsprækker samt tykkelse og orientering af sprækkerne.
- Foretaget tests med to fase ekstraktion på de to borer før og efter etableringen af de kunstige sprækker.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten sidst i kapitlet.

#### ***2.16.2.2 Slagelsevej, Næstved***

På Slagelsevej i Næstved er der gennemført et projekt med hydraulisk frakturering for det tidligere Storstrøms Amt (nuværende Region Sjælland) og Miljøstyrelsen som led i Teknologiprogrammet. Projektet er gennemført af NIRAS A/S. I forbindelse med design og projektering var ingeniørfirmaet Veizades & Associates Inc. (USA) tilknyttet projektet.

På lokaliteten er der i moræner kortlagt en kraftig jord- og grundvandsforurening med klorbenzen, klornitrobenzen og kloraniliner fra en tidligere sødemiddel- og galvaniseringsproduktion. Forureningen er påvist under og omkring bygningerne på grunden. Med henblik på at hindre fortsat spredning af opløste forureningskomponenter i retning mod områdets primære grundvandsmagasin er det valgt at iværksætte et projekt, hvor to vandrette borer/dræn i fem meters dybde blev etableret. Langs delstykker af de vandrette borer/dræn blev der etableret et antal horisontale sprækker ved horisontal hydraulisk frakturering. Efterfølgende dobbeltfase ekstraktion på den horisontale boring med de kunstige sprækker i ca. 5 meters dybde skulle medvirke til

at skabe en opadrettet hydraulisk gradient i grundvandsmagasinet under forureningskilden.

På baggrund af modelberegninger blev det vurderet, at horisontale dræn med en sprækkeudbredelse på 4-8 meter og en sprække apertur (sprækkevidde) på max. 25-30 mm fyldt med mellemkornet sand ville have en influensradius på 5-10 meter. Det blev desuden vurderet, at to horisontale dræn med frakturer ville have samme effekt som 3-5 dræn uden frakturer.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet er udført på en uforurennet del af lokaliteten og havde til formål:

- At belyse, hvorvidt hydraulisk frakturering fra vandrette borer / dræn er en økonomisk fordelagtig og effektiv afværgeteknik i en lavpermeabel leraflejring som findes på den aktuelle lokalitet.

Med henblik på at opfylde dette formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Vurdering af designparametre og generelle retningslinier for dimensionering af henholdsvis kunstige sprækker ved hydraulisk frakturering, vandrette dræn og monitoringsboringer.
- Erfaringsopsamling fra gennemførelse af projektets anlægsfase og betydningen heraf for fremtidige projekter.
- Etableret to vandrette borer med i alt otte sandfyldte sprækker samt et vandret dræn uden sprækker.
- Dokumentation for udbredelsen af sprækkerne ved kerneprøvetagning.
- Etableret niveauspecifikke filtre til dokumentation af de hydrauliske forhold omkring drænene/sprækkerne.
- Dokumentation for og sammenligning af opnåede hydrauliske ydelser for vandrette dræn etableret i ufraktureret henholdsvis fraktureret moræneler.
- Dokumentation af den opnåede hydrauliske afsenkning ("grundvands-senkning") omkring ovennævnte to typer dræn.
- Vurdering af anlægsudgifterne forbundet med etablering af vandrette dræn i hydraulisk fraktureret henholdsvis ufraktureret moræneler.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten sidst i kapitlet.

### **2.16.2.3 Rugårdsvej (lerprojekt)**

På Rugårdsvej i Odense er der gennemført et pilotprojekt finansieret af det tidligere Fyns Amt (nuværende Region Syd). Projektet er gennemført i et samarbejde mellem COWI A/S, Orbicon A/S, Miljø & Ressourcer DTU og GeoSyntec.

Lokaliteten er primært forurennet med TCE og *cis*-DCE. Den geologiske lagfølge består overordnet af ca. 50 m kvartære aflejringer af moræneler med forekomst af vandførende lag af smeltevandssand. Forureningskilden er lokaliseret i en formation af moræneler.

Pilotforsøgets formål var at belyse anvendeligheden af stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi i lavpermeable aflejringer. Som injektionsstrategi blev bl.a. anvendt hydraulisk frakturering, hvilket beskrives nedenfor. For beskrivelser vedrørende resultaterne af oprensningen ved stimuleret reduktiv

deklorering henvises til afsnit 2.13. Konkret skulle pilotforsøget belyse forhold vedrørende:

- Injektionsstrategi (herunder hydraulisk frakturering) i de lavpermeable aflejringer på lokaliteten.

Med henblik på at danne kunstige sprækker i den tætte moræneler ca. 6-8 m u.t. blev der udført 2 fraktureringer. Fraktureringerne blev udført henholdsvis 6 og 7,5 m u.t. ved indledningsvis at nedbore et fraktureringsrør (forerør) og med en roterende højtryksdyse (vand) blev to horisontale, cirkulære åbningspalter med ca. 1 cm afstand skåret i de 2 ønskede fraktureringsdybder.

Der blev anvendt en fraktureringsvæske bestående af en gele (vand og "guar" ~gelepulver), som med konstant flow blev pumpet til en roterende snegl, hvor en afmålt mængde epoxyindfarvet sand blev tilsat. Der blev tilsat et stof (borax), der gav geleen en sej konsistens, således at sandet blev suspenderet (båret oppe) i gelemassen. Der blev endvidere tilsat en enzymbrækker, som skulle opløse geleen, når fraktureringen var udført. Der blev anvendt 250 kg rødt sand til frakturen 6 m u.t. og 250 kg grønt sand til frakturen 7,5 m u.t.

Målsætningen med fraktureringsforsøget var at få etableret sprækker på ca. 1 cm tykkelse i henholdsvis 6 og 7,5 m's dybde og med en radius på ca. 2,5 m fra fraktureringsboringen.

Overordnet viste resultaterne fra fraktureringsforsøget, at det var muligt at etablere sprækker og derved forøge permeabiliteten i op til 2 m fra fraktureringsboringen. Den nederste sprække (7,5 m u.t.) i den hårde moræneler havde den mest homogene udbredelse. Den øverste sprække fulgte sandsynligvis mere naturlige sprækker i moræneleren. Udbredelsen af sprækker var ikke homogene eller cirkulære som forventet.

Udtagning af vandprøver indikerede tillige en markant forøgelse af permeabiliteten af moræneleren. Metoden vurderedes at være mest velegnet i hård moræneler.

Der henvises i øvrigt til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.17.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **2.16.2.4 Yderligere aktiviteter**

Ud over ovenstående projekter er der ligeledes kendskab til et forskningsprojekt i EU-regi (STRESOIL), hvor virksomheder fra Danmark (GEUS og Brøker A/S), Polen, Grækenland og Frankrig har samarbejdet om at udvikle metoder til in situ oprensning af organisk forurening i opsprækkede lavpermeable formationer.

Da det er meget vanskeligt at oprense opsprækkede lavpermeable jordarter, med traditionelle metoder baseret på lodrette borer, er det i forskningsprojektet forsøgt at øge permeabiliteten ved hjælp af hydraulisk frakturering. Ved at etablere horisontale sandfyldte sprækker, der forbinder de eksisterende sprækker med hinanden forøges virkningsgraden af oprensningsmetoder.

Projektet foregik i Polen, hvor et stort område med opsprækkede glaciale aflejringer er kraftigt forurenet af olie fra en tidligere flybase. Under STRESOIL projektet er et antal forsøgsceller etableret i testområdet, hvor den oprensende effekt af hydraulisk frakturering samt forskellige metoder til in situ oprensning

er overvåget - for eksempel naturlig bakteriel nedbrydning af olieforureningen og termisk oprensning ved hjælp af dampinjektion.

Forskningsprojektet STRESOIL vil ikke blive gennemgået yderligere i forbindelse med dette statusprojekt, da der ikke er tale om aktiviteter på danske lokaliteter. Der henvises dog til projektets hjemmeside [www.stresoil.com](http://www.stresoil.com) for yderligere beskrivelser af resultater og erfaringer.

### 2.16.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter:

- Hydraulisk frakturering er en distributionsmetode som kan anvendes i kombination med og som optimering af en lang række andre afværgeteknikker.
- Indgående geologisk og geoteknisk karakterisering af en potentiel lokalitet er nødvendig, da den opsprækkede geologiske formation muligvis har tilstrækkelig permeabilitet, så en yderligere hydraulisk frakturering ikke behøves.
- Hydraulisk frakturering nær bygninger og rørledninger forudsætter en forudgående vurdering af eventuelle skader som følge af jordhævning. Bygningsfundamenter kan grundet sin vægt afbøje den kunstige sprække, så den får en utilsigtet udbredelse.
- Den nøjagtige geometri og udbredelse af en kunstig sprække er ikke mulig at dokumentere forud for etablering af sprækken. Eksisterende sprække-modeller som prognoseværktøj for forudsigelse af sprækkeudbredelsen er utilstrækkelige. Det vurderes imidlertid at være nyttigt at benytte CIRFRX modellen til dimensionering af specielt de initiale injektionstryk ved etablering af hydrauliske sprækker.
- Som tommelfingerregel vil gælde, at trykniveauet i den lavpermeable formation, omkring den induceret sprække, påvirkes med en influensradius der er omkring tre gange den inducerede sprækkes egen radius, under forudsætning af at sprækkeaperturen er på omkring 3-6 mm og en propant (sprække-fyld) med en hydraulisk ledningsevne på omkring 3 størrelsesordener større end formationens.
- Fyldmaterialer (sand), der anvendes i hydraulisk inducerede sprækker, skal være så velsorterede som muligt. Derved opnås størst mulig effektiv porøsitet og højest permeabilitet.
- Den mindste sprækkeapertur der kan injiceres med sandfyldning er teoretisk set ca. 1 mm, svarende til en sprække fyldt med et enkelt lag af sandkorn. Erfaringen viser dog i praksis, at de fleste sprækker får en apertur på 5-10 mm.
- Den hyppigst anvendte kornstørrelse for granulære fyldmaterialer er mellem- til grovkornet sand der har en hydraulisk ledningsevne på  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  m/s.
- Permeabilitetskontrasten mellem fyldmaterialet og den omgivende formation har vist sig af være en kritisk faktor. Fyldmaterialets kornstørrelsesfordeling skal dimensioneres således, at permeabiliteten af sandfyldningen er mindst 1000 gange højere end den omgivende lavpermeable jord. Derved opnås optimal hydraulisk influens i den lavpermeable formation ved pumpning på den sandfyldte sprække.
- Ved direkte at opmåle jordoverfladens nettohævning kan sprækkestørrelsen (dvs. sprækkelængde og -apertur) kvantificeres for inducerede sprækker, der etableres i maksimalt 5-8 meters dybe. Nettohævningen er lige-



frem proportional med sprækkens apertur efter at injektionstrykket er taget af sprækken.

- Injektionstryk ved hydraulisk frakturering vil typisk være fra 2,5-3,5 atm i den initiale fase, aftagende til ca. 1 atm i vækstfasen. Trykgradienten med dybden er for vand på 0,15-0,2 atm pr. meters injektionsdybde.
- Ved hjælp af lodrette borer er der uden større tekniske vanskeligheder etableret sprækker henholdsvis 4,5 og 8,0 m u.t. Sprækkerne fik omtrent den forventede udstrækning og orientering. Pumpetest har vist, at der er opnået en væsentlig forøgelse af morænelerens hydrauliske og pneumatiske ledningsevne. Påvirkningsradius for pumpningen blev forøget ca. 10 gange i visse retninger fra boringen.
- Erfaringer fra etableringen af testsprækker fra lodrette borer har vist, at en sprække initieret ca. 4,5 m u.t. resulterede i en maksimal jordhævning på ca. 10 mm og en sprækkeradius på ca. 5 meter. Sprækkens tykkelse var ca. 3 – 10 mm. Den tilsvarende terrænhævning ved etablering af en sprække med udgangspunkt 8 m.u.t var ca. 3 mm, og sprækken havde en radius på ca. 3 meter. Den gennemførte sprækkeidentifikation har vist, at det er muligt at identificere sprækkerne (propanten) op til 1 – 1,5 m fra injektionspunktet, hvilket er en klart mindre afstand end forventet.
- Erfaringer fra etablering af sprækker fra lodrette borer har vist, at det er vanskeligt at forudsige sprækkernes resulterende orientering.
- Projektet med frakturering fra vandrette borer har vist, at det er muligt at etablere sandfyldte sprækker med en tykkelse på 1-20 mm ud til en afstand på mindst 3-4 m fra drænet (svarende til en samlet sprækkebredde på 6-8 meter). Etableringen har dog været forbundet med omfattende tekniske vanskeligheder og det er desuden vanskeligt at forudsige sprækkernes orientering.
- Det anbefales at gennemføre denne type projekter i perioder, hvor temperaturen ikke kommer under ca. 10° C, og hvor lufttemperaturens døgnvariation ikke bliver for store. Er dette forhold ikke opfyldt, bliver dosering af optimal breaker-enzym mængde meget vanskelig, med heraf forøget risiko for tilstopning af injektionssystemet.
- Udfra kortvarige hydrauliske og pneumatiske tests af frakturer etableret fra vandrette borer kan det konkluderes, at det horisontale påvirkningsområde for henholdsvis ufrakturerede og frakturerede dræn er i størrelsesordenen 1- 2 m og ca. 6 m fra drænene (svarende til et samlet påvirkningsområde på henholdsvis 4 og 12 m). Dette er i god overensstemmelse med de gennemførte modelberegninger samt amerikanske erfaringer.
- Ved frakturering fra to vandrette dræn er der ikke opnået nogen betyden- de forøgelse af den hydrauliske kapacitet i forhold til et ikke fraktureret vandret dræn.

#### 2.16.4 Perspektivering

Den grundlæggende forudsætning for, at en jord- eller grundvandsforurening kan oprensnes in situ er, at der kan skabes kontakt mellem forureningen i undergrunden og ”oprensningsmidlet”. Fordeling af væsker eller faste stoffer i lavpermeable aflejringer, såsom gytje, silt og moræneler, er imidlertid en problematik, som fortsat volder problemer ved anvendelsen af in situ oprensningsmetoder.

På baggrund af det indsamlede materiale vurderes hydraulisk frakturering overordnet at have potentiale til skabe et kunstigt sprækkenetværk i lavpermeable formationer og derved optimere aktuelle oprensningsmetoder. Hy-

draulisk frakturering er endnu på udviklingsstadiet, og der vurderes at være behov for supplerende teknologiudvikling og dokumentation af bl.a. ingeniørtekniske problematikker vedrørende etablering samt effekten på den hydrauliske konduktivitet i behandlingszonen ved anvendelse af metoden.

Der vurderes tillige at være behov for afprøvning og dokumentation af metoden med forskellige afværgemidler, herunder substrat, bakterier, oxidationsmidler, reduktionsmidler mv. samt ved termiske metoder.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. hydraulisk frakturering som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelsenerne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Hydraulisk anvendes som en del af afværgestrategien på flere danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (primært geologi og bygningsmæssige forhold) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelsenerne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af hydraulisk frakturering som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelsenerne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med hydraulisk frakturering.

#### 2.16.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.17.1/ Miljøprojekt Nr. 541, 2000: Fakturering. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.17.2/ Miljøprojekt Nr. 699, 2002: Hydraulisk fakturering udført ved vandret boreteknik - Design og anlæg. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.17.3/ Miljøprojekt Nr. 1108, 2006: Frakturer fra lodrette testboringer på Vestergade 10 Haslev. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /2.17.4/ Miljøprojekt Nr. 1113, 2006: Hydraulisk frakturering udført ved vandret boreteknik - Statusrapport for 1. driftsår. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 2.17 Pneumatisk frakturering

#### 2.17.1 Afværgeprincip

Pneumatisk frakturering er en teknologi, ved hvilken der i lavpermeable aflejringer kan genereres sprækker og/eller ske udbygning af de eksisterende sprækker. Denne proces skaber ideelt set et lokalt internt forbundet sprækkenetværk, som øger formationens permeabilitet. Etablering af sprækker kan skabe en mere effektiv kontakt mellem "oprensningsmidler" og forureningsstoffer, idet større volumener "oprensningsmiddel" kan fordeles i formationen og adgangen til hydraulisk isolerede dele af formationen muliggøres. Samtidig forventes det, at en øget opsprækning af de lavpermeable aflejringer vil give en

hurtigere oprensning, idet forureningsstofferne fjernes alle er stærkt begrænset af diffusion ud af lermatrix.

Metoden er patenteret af New Jersey Institute of Technology og bl.a. firmaet ARS Technologies har licensrettighederne til at bruge metoden i felten.

Pneumatisk frakturering baserer sig på injektion af gas i jorden ved tryk, der overstiger det kombinerede hydrostatiske tryk og jordens brudstyrke, samt ved flowrate, der overstiger den effektive permeabilitet af den uforstyrrede jord. Resultatet er en hurtig udbredelse af sprækker ud fra frakturerings-/injektionsboringen til forskellige afstande afhængig af geologien. Sprækkeudbredelser på 1-10 m er almindelige i aflejringer såsom silt og ler.

Selve fraktureringen følger typisk et tredelt forløb: Ved injektion af nitrogen i det forseglede fraktureringsinterval sker der først en trykophobning, der afspejler, at formationen endnu ikke er opsprækket, og at permeabiliteten fortsat er lav. Denne fase er relativt kort og med en typisk varighed på 1-2 sekunder. Idet trykket i boringen overstiger jordens in situ styrke i det forseglede interval, giver formationen efter og opsprækningen påbegyndes. Et stort volumen gas spredes ud i formationen i det forseglede niveau, og der sker en opsprækning af formationen radiært ud fra fraktureringsboringen. Herved falder trykket i boringen og stabiliserer sig på et niveau, mens injektionen fortsættes. Denne trykstabilisering afspejler, at der har indstillet sig en ligevægt for den pågældende flowrate. I denne fase vedligeholdes det inducerede sprækkenetværk. Herefter tilsættes væske (og/eller partikler) til luftstrømmen og trykket fastholdes, indtil det ønskede væskevolumen er spredt i formationen.

Væsken injiceres vha. en specielt udviklet dyse, der forstøver væsken, hvorved den medrives af det kraftige nitrogenflow. Herved sikres det, at væsken transporteres ud til væsentlig større afstand end hvis den blev tilført luftstrømmen som væske. Denne proces betegnes Liquid Atomized Injection.

Ud fra litteraturgennemgang samt informationer fra ARS Technologies vurderes det, at det gængse dokumentationsniveau for projekter med pneumatisk frakturering fokuserer på registrering af feltdata under selve fraktureringen (registrering af trykudvikling i fraktureringsboring, observationer og trykmålinger i observationsboringer under fraktureringer og registrering af hævnninger inden for testfeltet under frakturering). Efter frakturering analyseres vandkvalitet, og oprensningseffektiviteten i etablerede monitoringsboringer vurderes. Parametervalget her afhænger naturligvis af den valgte oprensningstype. Såfremt den pneumatisk frakturering udføres med henblik på at øge formationens permeabilitet, udføres typisk pumpeforsøg med luft eller vand til bestemmelse af permeabiliteten og influensradius før og efter fraktureringen.

I tabel 2.17.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 2.17.1. Overordnede karakteristika for pneumatisk frakturering

Målsætning	Teknikken sigter mod en opsprækning af lavpermeable formationer, for herved at skabe et internt forbundet sprækkenetværk, som øger formationens permeabilitet. Dette giver mulighed for en mere effektiv kontakt mellem "oprensningsmidler" og forureningsstoffer, idet større volumener "oprensningsmiddel" kan fordeles i formationen og adgangen til hydraulisk isolerede dele af formationen muliggøres.
Kombination med andre teknikker	Metoden kan anvendes til at øge in situ massefjernelse i formationer med lav permeabilitet ved hjælp af f.eks. stimuleret reduktiv deklorering, kemisk oxidation, nulvalent jern mv.  Metoden åbner i øvrigt mulighed for at øge permeabiliteten i formationer med lav permeabilitet med henblik på vakuume ekstraktion, hydraulisk fiksering, dual phase extraction mv.
Forureningskomponenter	Distributionsmetode til optimering af diverse afværgeteknikker.
Geologi i behandlingszone	Lavpermeable formationer (ler, gytje mv.).
Fordele og ulemper	Effekt: Teknikken vil primært have effekt i lavpermeable formationer.  Fordele: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Øger influensradius/hydraulisk effekt ved oprensning i såvel mættede som umættede behandlingszoner.</li> <li>• Afkorter driftstid for oprensninger.</li> <li>• Åbner mulighed for direkte dosering af midler til oprensning (kemikalier, substrat, biomasse mv.).</li> </ul> Ulemper: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknikken kræver indgående geologisk og geoteknisk karakterisering.</li> <li>• Metoden er fortsat forbundet med uforudsigelighed, og det er vanskeligt/umuligt at etablere et jævnt og tilstrækkelig tæt sprækkesystem.</li> <li>• Etablering af sprækker i nærheden af bygninger eller underjordiske installationer kræver forudgående geotekniske og byggetekniske vurderinger.</li> <li>• Det er vanskeligt at dokumentere udbredelse af sprækker.</li> <li>• Metoden er forbundet med forholdsvis store anlægsomkostninger.</li> </ul>

## 2.17.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført 2 pilotprojekter med anvendelse af pneumatisk frakturering. Formålet med de gennemførte projekter præsenteres kortfattet nedenfor, hvorefter der følger en samlet præsentation af opnåede resultater, perspektivering og en overordnet vurdering af økonomiske forhold. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

### 2.17.2.1 Vadsbyvej, Hedehusene

På Vadsbyvej i Hedehusene har NIRAS A/S gennemført et pilotforsøg med pneumatisk frakturering i starten af 2006. Pilotforsøget er gennemført for det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden).

Formålet med pilotforsøget var at belyse og dokumentere, hvorvidt det ved hjælp af pneumatisk frakturering var muligt at fordele en væske i en lavpermeabel jordmatrice af moræneler.

Ved pilotforsøget er der udført pneumatisk frakturering fra en enkelt boring med frakturering og tracerinjektion for hver meter fra 3-8 m u.t. i en formation af moræneler. Pilotforsøget har omfattet efterfølgende undersøgelser i felt og laboratorium med henblik på genfindning af de injicerede tracere.

Den pneumatiske frakturering og injektion af tracerblanding er udført ved Liquid Atomized Injection af det amerikanske firma ARS Technologies. Selve fraktureringen er udført fra nedenu og op, dvs. startende i det dybeste interval.

Den anvendte tracerblandingen blev sammensat af fem forskellige tracere bestående af uranine, rhodamine WT, optisk hvidt, methylenblåt og bromid. Der blev injiceret 50 l tracerblanding i hvert fraktureringsinterval, men det vurderes, at det i anden sammenhæng er realistisk at injicere i størrelsesordenen 300-400 liter pr. interval eller muligvis endnu mere.

Pilotforsøget mandede ud i en række generelle anbefalinger vedrørende dimensionering, etablering og dokumentation af pneumatisk frakturering. Der henvises til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.18.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **2.17.2.2 Industrivej, Glostrup**

På Industrivej i Glostrup har NIRAS A/S gennemført et pilotforsøg med pneumatisk frakturering i starten af 2006. Pilotforsøget er gennemført for det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden).

Formålet med pilotforsøget var at undersøge potentialet for senere hen at anvende metoden i forbindelse med oprensning af lokaliteten ved stimuleret reduktiv deklorering.

Ved pilotforsøget er der udført pneumatisk frakturering fra 2 borer etableret i hvert sit testfelt (testfelt 1 og 2). Geologien i behandlingszonen består af gytje.

I testfelt 1 er der udført frakturering i 2 intervaller (2 - 3 og 3 - 4 m u.t.) og efterfølgende injiceret substrat i form af protamylasse til stimulering af reduktiv deklorering, mens der i testfelt 2 er udført frakturering i et interval (1,5 - 2,5 m u.t.) og injiceret en tracerblanding med formålet at undersøge effekten af fraktureringen. Pilotforsøget har omfattet efterfølgende undersøgelser i felt og laboratorium med henblik på genfindning af injicerede tracere og substrat.

Den pneumatiske frakturering og injektion af tracerblanding er udført ved Liquid Atomized Injection af det amerikanske firma ARS Technologies. Selve fraktureringen er udført fra nedenu og op, dvs. startende i det dybeste interval.

Til dokumentation af spredning af tracer har været anvendt en kombination af flere metoder; FFD-sonderinger, UV-belysning samt delprøvetagning af udtagne kerner, samt analyse af vandprøver udtaget fra sugeceller.

Til dokumentation af spredningen af substrat er der anvendt vandkemiske indikatorparametre (TOC, ledningsevne, kationer samt luft ved vandprøvetagning).

Pilotforsøget mandede ud i en række generelle anbefalinger vedrørende dimensionering, etablering og dokumentation af pneumatisk frakturering. Der henvises til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 2.18.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

For en beskrivelse af substratindsættningens effekt på den reduktive deklorering af de klorerede ethener henvises i øvrigt til afsnit 2.13 vedr. stimuleret reduktiv deklorering.

### 2.17.3 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

Vedrørende dokumentationsmetoder kunne følgende generelt konkluderes:

- Uranine har vist sig velegnet til fotodokumentation i kerneprøver under UV-lys.
- Rhodamine WT vurderes velegnet som supplement til uranine i forbindelse med fotodokumentation, om end uranine dominerer under UV-lys.
- Bromid, uranine og rhodamine WT supplerer hinanden godt ved en kombination af fotodokumentation og analyser på jordprøver, kerneprøver og vandprøver.
- Optisk hvidt kan være et godt supplement såfremt der etableres dokumentation for stoffets respons i forhold til den anvendte detektor.
- Anvendelsen af vandkemiske indikatorparametre (TOC, ledningsevne, kationer samt luft ved vandprøvetagning) har vist sig velegnet til genfindning af substrat, idet substratpåvirket porevand fremstår med klar kontrast til upåvirket porevand.

Det vurderes, at måling af trykudbredelse under fraktureringen kan give et umiddelbart indtryk af influensområdets størrelse. Det vurderes imidlertid ikke, at registrering af jordhævninger under og efter fraktureringen giver information om tracerudbredelsen eller at disse data kan korreleres til sprækkeapertura. Hævningsdata vil dog have relevans til vurdering af risiko for påvirkning af bygninger eller ledninger i nærområdet.

Vedrørende inducerede sprækker i moræneler kunne følgende generelt konkluderes:

- Det er ved pilotforsøg med pneumatisk frakturering konstateret muligt at sprede stof (tracer) op til 6,8 m væk fra en fraktureringsboring via distinkte sprækker i moræneler. Der blev foretaget frakturering for hver meter fra 3-8 m u.t. og spredningen af tracer via distinkte sprækker skete i forskellige dybder mellem 1,7-9 m u.t. i alle retninger væk fra fraktureringsboringen. De distinkte sprækker optrådte med en indbyrdes afstand på 0,5-2,5 m.
- Ved analyser af jordprøver er det konstateret at tracer er spredt ud i dele af formationen, hvor der ikke visuelt kunne detekteres tracer eller sprækker.
- En massebalance for pilotforsøget på Vadsbyvej i Hedehusene viste at 90 % af den injicerede tracer masse findes inden for 1 m fra fraktureringsboringen, mens de resterende 10 % findes i 1-4 meters afstand.
- Det vurderes, at der ved pilotforsøget i moræneler er opnået en influensradius på 1-2 meter, inden for hvilken der er opnået en relativt jævn spredning af det injicerede stof.
- Ved pneumatisk frakturering kræves typisk et noget højere initial injektionstryk end ved hydraulisk frakturering, da der normalt ikke laves initiale indskæringer i boringsvæggen ved denne fraktureringsmetode. Trykgradienten ved brug af luft stiger med 0,67-1,11 atm pr. meters injektionsdybde.

Generelt vurderes det, at pneumatisk frakturering har et potentiale til at forbedre fordelingen af stof i en morænelersformation med henblik på oprensning ved in situ massejernelse. I de dele af formationen, hvor der forekommer

mange naturlige sprækker, kan det være svært at kontrollere sprækkedannelsen.

Vedrørende inducerede sprækker i gytje/silt kunne følgende generelt konkluderes:

- Ved pilotforsøg er det konstateret, at det med pneumatisk frakturering har været muligt at injicere mellem 150 og 425 L tracer/substrat i hvert fraktureringsinterval og få spredt tracer/substrat i en radius op til 4 m fra fraktureringsboringen.
- Tracer/substrat spredes primært i et dybdeinterval sammenfaldende med frakturerings- og injektionsintervallet.
- På baggrund af de udførte undersøgelser vurderes det, at hovedparten (90 %) af den injicerede masse findes i en afstand af op til 2 m fra injektionsboringen.
- Ved pilotforsøg er det ligeledes vist, at man med pneumatisk frakturering ikke kan forvente et homogent cirkulært influensområde, men snarere vil se et uforudsigeligt (stjerneformet) influensområde, hvor udbredelse af sprækker sker i forskellige retninger fra fraktureringsboringen.
- Udbredelsen af tracer/substrat vil være styret af de geologiske forhold på lokaliteten.
- Ved fraktureringen er der set en tendens til, at sprækker er skudt opad, således at der genfindes tracer/substrat i højreliggende lag sammenlignet med injektionsniveauet.

Generelt vurderes det, at der som følge af pneumatisk frakturering er sket en opsprækning af gytjen/silt, hvilket har ført til spredning af substrat og tracer til områder, der må formodes ikke at være i direkte hydraulisk kontakt under naturlige forhold. På baggrund af pilotforsøget er det vurderet, at pneumatisk frakturering har et potentiale til at forbedre fordelingen af stof i en formation af silt og gytje med henblik på in-situ oprensning.

#### 2.17.4 Perspektivering

Den grundlæggende forudsætning for, at en jord- eller grundvandsforurening kan oprenses in situ er, at der kan skabes kontakt mellem forureningen i undergrunden og ”oprensningsmidlet”. Fordeling af væsker eller faste stoffer i meget lavpermeable aflejringer, såsom gytje, silt og moræneler, er imidlertid en problematik, som fortsat volder problemer ved anvendelsen af in situ oprensningsmetoder.

Ud fra de erfaringer, der er opnået gennem udførelsen af pilotforsøg, er der vurderet at være følgende muligheder for teknisk at optimere den pneumatiske frakturering:

- Fraktureringen kan udføres fra kortere fraktureringsintervaller, f.eks. ½ meter frem for de anvendte 1 meter intervaller, hvilket forventes at øge sprækketætheden.
- Der kan injiceres større volumen væske, hvilket forventes at forbedre fordelingen af stof tæt på fraktureringsboringen samt medføre en øget influensradius af det område, i hvilket der er en jævn fordeling af stof.
- Frakturering og stofinjektion kan udføres i ét trin, såfremt der ikke skal indsamles trykudbredelsesdata fra testboringer. Dette vil formentlig forhindre nogle af sprækkerne i at lukke inden stoffet injiceres i sprækkerne.

- Efterladte borehuller og evt. testboringer ved fuldskala-implementering bør afproppes med cement frem for bentonit.

En af udfordringerne ved pneumatisk frakturering er at kontrollere sprækkedannelsen og stoffordelingen i den øverste del af lagfølgen, hvor antallet af naturlige sprækker er størst.

I disse niveauer (øverste 3 meter) kunne det derfor være en fordel at injicere uden forudgående frakturering og på den måde benytte det eksisterende sprækkesystem til fordeling af stof i matrix. Hvorvidt injektionen kan foregå ved påtrykt gasflow eller som en simpel pumpning i et forsejlet interval må afgøres af de lokale geologiske forhold.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. pneumatisk frakturering som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Pneumatisk frakturering er stadig på udviklingsstadiet men anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte danske lokaliteter, hvor de lokalitets-specifikke forhold (primært geologi og bygningsmæssige rammer) muliggør anvendelse.
- Der er ikke gennemført aktiviteter med pneumatisk frakturering støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med hydraulisk frakturering.

#### 2.17.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.18.1/ Københavns Amt. Pneumatisk frakturering, Dokumentation af pilotforsøg, Industrivej 3, Glostrup. Udarbejdet af NIRAS A/S, August 2006.
- /2.18.2/ Københavns Amt. Pneumatisk frakturering, Dokumentation af pilotforsøg, Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Udarbejdet af NIRAS A/S, Maj 2006.



## 3 Teknikker til spredningskontrol

I dette kapitel gives en overordnet præsentation af en række afværgeteknologier, der har været afprøvet i Danmark enten under Teknologiprogrammet eller i andet regi. Der tages udgangspunkt i teknologier, der har været anvendt til spredningskontrol, hvilket her karakteriseres som begrænsning af forurenings-spredning i poreluft eller grundvand fra et kildeområde. Der henvises til kapitel 2 for teknologier, der har været anvendt til kildeoprensning.

### 3.1 Passiv ventilation

#### 3.1.1 Afværgeprincip

Passiv ventilation er en in situ afværgeteknik, der primært anvendes til reduktion af flygtige organiske forureningskomponenter (klorerede opløsningsmidler, benzin, BTEX'er mv.) i den umættede zone. Afhængig af de geologiske og forureningsmæssige forhold samt kravene til oprensingsniveau og -hastighed kan metoden anvendes i et kildeområde såvel som udenfor.

Ved passiv ventilation anvendes der i modsætning til den velkendte aktive vakuumventilation ingen former for mekanisk ventilering. I stedet udnyttes udelukkende de naturligt forekommende trykgradienter mellem jordens umættede zone og atmosfæren, forårsaget af ændringer i lufttrykket i forbindelse med passage af vejrfroter.

Trykgradienterne mellem atmosfæren og jordmiljøet skyldes forsinkelsen af trykforplantningen fra atmosfæren til den umættede zone. Størrelsen af trykforskellen og trykforsinkelsen afhænger blandt andet af den overliggende jords tykkelse og effektive permeabilitet samt den hastighed, hvormed atmosfæretrykket ændrer sig. På lokaliteter med den rette geologiske lagfølge vil der stort set altid være en trykgradient af varierende størrelse og retning mellem den umættede zone og atmosfæren på grund af trykforsinkelse og -dæmpning. Størrelsen af luftflowet mellem atmosfæren og den umættede zone er proportionalt med denne trykgradient og luftpermeabiliteten i den umættede zone.

Under faldende atmosfæretryk vil forsinkelsen i trykforplantningen medføre, at trykket i atmosfæren til ethvert tidspunkt er lavere end trykket i den umættede zone, hvorved poreluften fra den umættede zone vil strømme op gennem jordens porer til terræn. Omvendt medfører stigende barometertryk, at atmosfærisk luft vil presses ned i jorden.

Ved passiv ventilation som afværgeteknik etableres filtersatte borer i den umættede zone centralt i det forurenede område (behandlingszonen). Disse borer forsynes med en-vejs ventiler som tillader udstrømning af poreluft ved faldende atmosfæretryk og som lukker ved stigende lufttryk. Den lave strømningsmodstand i blindrør og en-vejs ventil medfører, at udstrømningen af poreluft til atmosfæren under faldende lufttryk overvejende foregår gennem borerne. Ved de naturlige variationer i lufttrykket opnås herved en pulserende strømning af poreluft hen mod borerne og herfra til terræn.

Før udledning til atmosfæren kan luften renses i specielt udviklede radiale kulfiltre med meget lav strømningsmodstand. Ved montage af en svanehals på borerne kan en-vejs ventilerne desuden anvendes til forceret tilførsel af atmosfærisk luft. I denne situation "vender ventilen om" og tillader luft at strømme ned i borerne under stigende lufttryk. Sådanne "injektionsboringer" kan placeres i periferien af en forurening og kan - i situationer hvor der ønskes tilførsel af iltholdig atmosfærisk luft til stimulering af biologisk nedbrydning af forurening - anvendes i kombination med passiv ekstraktion fra forureningens centrum.

For at der opstår trykgradienter af en tilstrækkelig størrelse (minimum ca. 1 mbar) til at muliggøre passiv ventilation, skal der over den umættede zone være et lavpermeabelt lag (eksempelvis et morænelerslag) med en vis vertikal og en stor horisontal udbredelse. Alternativt skal de ventilerede jordlag ligge mere end 10 – 15 m u.t. Eventuelle højpermeable "huller" i dæklaget over de ventilerede lag vil medføre en hurtig trykudligning mellem disse og atmosfæren og vil hermed umuliggøre afværge baseret på passiv ventilation.

Inden valg af passiv ventilation som afværgeteknik bør tilstedeværelsen og størrelsen af en barometereffekt dokumenteres.

I tabel 3.1.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 3.1.1. Overordnede karakteristika for passiv ventilation som afværgeteknik

Målsætning	Teknikken sigter mod en reduktion af risikoen for forureningsspredning fra en forurening i den umættede zone til grundvandet eller fra grundvandet til den umættede zone.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med andre teknikker til spredningskontrol i grundvandet (f.eks. afværgepumpning, stimuleret biologisk nedbrydning, reaktive permeable vægge mv.) eller den kan anvendes efter kildeoprensning (ved f.eks. kemiske eller termiske metoder, vakuumentilation mv.).
Forureningskomponenter	Teknikken er baseret på forureningsfjernelse i luftfasen og kan derfor primært anvendes overfor flygtige komponenter som klorerede stoffer, benzin, BTEX'er mv. Teknikken kan dog også anvendes til stimulering af aerob nedbrydning ved tilførsel af luft til behandlingszonen.
Geologi i behandlingszone	Behandlingszonen omfatter dybereliggende umættede formationer af sand, grus, opsprækket kalk med relativ høj horisontal permeabilitet. Afværgeteknikken forudsætter en geologisk lagfølge, hvor behandlingszonen er overlejret af et dæklag med en relativ lav vertikal permeabilitet og en vis vertikal og en stor horisontal udbredelse. Endvidere kan teknikken anvendes dybt i meget tykke umættede zoner (> 10-15 m).
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Under de rette betingelser (geologi i behandlingszone) sikrer teknikken en effektiv udluftning og således bortventilering af flygtige forureningskomponenter fra den umættede zone.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknikken drives af naturlige variationer i atmosfæretrykket og ressourceforbruget til etablering er begrænset (miljømæssig bæredygtig teknik).</li> <li>• Etableringen er simpel og anlægskomponenter (boringer og kulfiltre) kræver kun begrænset plads.</li> <li>• Nabogener ifm. etablering og drift er meget begrænsede.</li> <li>• Omkostningerne til etablering og drift er begrænsede.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afværgeeffekten er afhængig af den rette geologiske lagfølge.</li> <li>• Teknikken kan ikke anvendes til akut behandling af områder med kraftig forurening.</li> <li>• Teknikken er forbundet med en relativ lang driftsperiode.</li> </ul>

### 3.1.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført tre afværgeprojekter med passiv ventilation støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 805 og 806 (2003). De tre projekter er udført i henholdsvis Allerød (Prins Valdemars Allé og Amtsvej), Askov (Møllevej) og i Fakse (Nygade). Projekterne er gennemført af NIRAS A/S i samarbejde med det tidligere Frederiksborg Amt, Ribe Amt og Storstrøms Amt (nuværende Region Hovedstaden, Region Syddanmark og Region Sjælland).

Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter, hvor passiv ventilation indgår som en del af afværgestrategien. Disse projekter er primært finansieret af Miljømyndighederne i forbindelse med den offentlige indsats over for jord- og grundvandsforurening.

I nedenstående afsnit tages der primært udgangspunkt i udviklingsaktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet, mens erfaringer fra sager af mere driftsmæssig karakter indgår som en del af en samlet perspektivering af afværgeteknikken senere i kapitlet.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater og perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### **3.1.2.1 Prins Valdemars Allé og Amtsvej, Allerød**

På de 2 lokaliteter i Allerød (Prins Valdemars Allé og Amtsvej) består forureningen overvejende af PCE. Lokaliteterne ligger i det samme område og den geologiske lagfølge er omtrent ens bestående af ca. 10 meter moræneler fra terræn, underlejret af minimum 10 meter smeltevandssand, hvoraf de øverste to til fem meter er umættede.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet har været:

- At belyse oprensningseffekten af passiv ventilation i den umættede zone og i toppen af den underliggende mættede zone.
- At belyse sammenhængen mellem trykforhold, luftflow og forureningsfjernelse i udvalgte perioder.

Med henblik på at opfylde disse formål er følgende udført:

- Etablering af henholdsvis fem og seks ventilationsboringer filtersat centralt i de forurenede områder. Boringerne er forsynet med envejsventiler og kulfiltre.
- Logning af atmosfæretryk samt differenstræk mellem atmosfæren og niveauer i den umættede zone i udvalgte perioder.
- Logning af luftflow og forureningskoncentration i den udstrømmende luft i udvalgte perioder.
- Analyse af grundvandsprøver fra den øvre del af den mættede zone.

#### **3.1.2.2 Møllevej, Askov**

På Møllevej i Askov består forureningen overvejende af PCE. Geologien er karakteriseret ved et ca. 10 meter tykt lag af moræneler som er underlejret af skiftende smeltevandsaflejringer ned til ca. 90 m u.t. Det frie vandspejl findes ca. 30 m u.t., og den umættede zone under lerens er således ca. 20 m tyk.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet har været:

- At belyse oprensningseffekten af passiv ventilation i den umættede zone og i toppen af den underliggende mættede zone.
- At belyse sammenhængen mellem trykforhold, luftflow og forureningsfjernelse i udvalgte perioder.

Med henblik på at opfylde disse formål er der udført følgende:

- Etablering af seks borer med i alt 11 filtre i det forurenede område. Filtrene er etableret henholdsvis fra ca. 7-12 m u.t. og fra 15-20 m u.t. Ét filter er etableret fra 6-20 m u.t. Boringerne er forsynet med envejsventiler.
- Logning af atmosfæretryk samt differenstryk mellem atmosfæren og niveauer i den umættede zone i udvalgte perioder.
- Logning af luftflow og forureningskoncentration i den udstrømmende luft i udvalgte perioder.
- Analyse af grundvandsprøver fra den øvre del af den mættede zone.

### **3.1.2.3 Nygade, Fakse**

På Nygade i Fakse består forureningen overvejende af PCE. Geologien består overordnet af seks til syv meter moræneler fra terræn underlejret af et ca. to meter tykt sandlag. Herunder findes et nyt morænelerslag på tre til fire meter underlejret af opsprækket kalk. Der er et frit vandspejl i kalken ca. 50 m u.t.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet har været:

- At belyse oprensningseffekten af passiv ventilation i den umættede zone og i toppen af den underliggende mættede zone.
- At belyse sammenhængen mellem trykforhold, luftflow og forureningsfjernelse i udvalgte perioder.
- At dokumentere effekten af at supplere den passive ventilation med aktiv ventilation ved hjælp af en lille sol- og vinddreven vakuumpumpe.

Med henblik på at opfylde disse formål er der udført/udføres følgende:

- Etablering af otte ventilationsboringer med i alt ti filtre i henholdsvis det trufne sandlag (otte filtre) og i den opsprækkede kalk (to filtre). Filtrene er forsynet med envejsventiler og er placeret med en indbyrdes afstand på ca. 10 meter. De to filtre i kalken er tilsluttet den aktive ventilation.
- Logning af atmosfæretryk samt differenstryk mellem atmosfæren og niveauer i den umættede zone i udvalgte perioder.
- Logning af luftflow og forureningskoncentration i den udstrømmende luft i udvalgte perioder.
- Tracerforsøg med injektion af kulstofmonooxid i en poreluftsonde to meter fra et ventilationsfilter. Koncentrationen af CO er efterfølgende logget i ekstraktionsboringen.
- Analyse af grundvandsprøver fra den øvre del af den mættede zone.

### **3.1.2.4 Yderligere aktiviteter**

Ud over ovennævnte udviklingsprojekter finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor passiv ventilation har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Ud-

valgte projekter gennemført af Miljømyndighederne, hvor passiv ventilation blev etableret som en del af afværgestrategien, er f.eks.:

- Allerødvej, Allerød (Region Hovedstaden)
- Svenskelejren, København (Region Hovedstaden)
- Carlshøjvej, Lyngby-Taarbæk (Region Hovedstaden)
- Læssevej, Værløse (Region Hovedstaden)
- Virumvej, Lyngby-Taarbæk (Region Hovedstaden)
- Skovlundebyvej, Ballerup (Region Hovedstaden)
- Torvegade, Fakse (Region Sjælland)
- Smallegade, Frederiksberg (Frederiksberg Kommune)

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af mere driftsmæssig karakter. Dokumentationsmaterialet i relation til metodens principper, begrænsninger og effekt vurderes derfor at være for spinkelt. Projekterne ligger imidlertid til grund for besvarelsen af spørgeskemaerne, jf. afsnit 1.3 og bilag 1, og har således betydning for den samlede perspektivering af passiv ventilation som afværgeteknik.

### 3.1.3 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste erfaringer, resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

- Anvendelse af passiv ventilation forudsætter en speciel geologi, med lav-permeabelt lag tæt på terræn underlejret af tørt sand eller umættet opsprækket kalk. Desuden forudsætter metoden relativt høje horisontale permeabiliteter for at opnå tilstrækkeligt flow, typisk svarende til mellemkornet sand eller grovere i de lag der filtersættes.
- Teknikken forventes i visse tilfælde at være egnet til hindring af tilbageslag efter en oprensning ved f.eks. traditionel vakuumventilation. Desuden forventes passiv ventilation i visse situationer at kunne hindre eller nedsætte spredning til den mættede zone af forureningskomponenter som langsomt udvaskes fra et kildeområde i den umættede zone.
- Passiv ventilation er "lavintensiv" og kan ikke anvendes til akut indsats overfor kraftig forurening.
- Passiv ventilation har lave etableringsomkostninger.
- Teknikken har lave driftsomkostninger, men oftest en lang driftsperiode.
- Teknikken er en "grøn" teknologi, idet materialebehovet er begrænset, og drivkraften er variationer i atmosfæretrykket.
- Ventilationsboringerne kræver begrænset plads og boringsafslutning samt eventuelt kulfilter kan placeres i en underjordisk brønd.
- Afhængig af design forventes metoden at kunne anvendes til fysisk fjernelse af forurening eller til stimuleret biologisk nedbrydning ved lufttilførsel.
- Ved de 3 forsøgsprojekter er der i udvalgte måleperioder opnået gennemsnitlige luftflow (udstrømning) på 0,75 – 2 m<sup>3</sup>/time per lokalitet med maksimale luftflow på 6 – 25 m<sup>3</sup>/time. For en lokalitet er der estimeret en influensradius for ventilationsboringerne på cirka fem meter. De drivende differenstryk har for de tre lokaliteter været op til henholdsvis 5,0, 7,6 og 8,2 mbar.
- Ved de 3 forsøgsprojekter er der i 2000 fjernet ca. 5 kg, 70 kg og 1 kg PCE i henholdsvis Allerød, Askov og Fakse. Den største fjernelse er opnået i Askov, hvor koncentrationen af PCE i poreluften er reduceret med ca. 60

%. På de øvrige lokaliteter er der ikke påvist generelt aftagende poreluftkoncentrationer.

- Ved de tre forsøgsprojekter er der ikke konstateret signifikante reduktioner af PCE koncentrationen i grundvandszonen under de ventilerede jordlag.
- Ved at supplere den passive ventilation med en sol- og vinddreven aktiv ventilation er der på en lokalitet opnået omtrent en fordobling af den ekstraherede luftmængde i forhold til passiv ventilation alene. Den primære effekt af den aktive ventilation er opnået ved hjælp af solenergi.
- I hvert enkelt tilfælde skal det nøje vurderes, hvorvidt effekten af en eventuel passiv ventilation er tilstrækkelig til at opnå den ønskede reduktion i forureningsspredningen fra et kildeområde, det være sig i retning mod underliggende grundvand eller mod indeklimaet i nærliggende bygninger. Der foreligger ikke en fast og sikker procedure for disse vurderinger.

### 3.1.4 Perspektivering

Erfaringerne med anvendelse af passiv ventilation i forbindelse med projekter gennemført under Teknologiprogrammet såvel som projekter gennemført i andet regi er generelt gode. Teknikken har vist sig effektiv til reduktion af forureningsspredning med flygtige forureningskomponenter i den umættede zone under de rette geologiske og hydrogeologiske forhold.

I 2007/2008 er der gennemført en dokumentation og sammenfatning af resultater og erfaringer opnået igennem de sidste 2-8 års drift på udvalgte repræsentative fuldskala afværgeprojekter med passiv ventilation. Erfaringsopsamlingen er gennemført af NIRAS A/S med støtte fra Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet og forventes afleveret i 2008.

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. passiv ventilation som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Passiv ventilation anvendes som en del af afværgestrategien på et større antal danske (10-15) lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør/favoriserer anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater, opnået ved aktiviteter gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design af anlæg og projektering af passiv ventilation som afværgeteknik på andre danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige at der i regionerne fortsat vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med passiv ventilation.

### 3.1.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /2.1.1/ Miljøprojekt Nr. 805, 2003: Passiv ventilation til fjernelse af PCE fra den umættede zone - Hovedrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

/2.1.2/ Miljøprojekt Nr. 806, 2003.: Passiv ventilation til fjernelse af PCE fra den umættede zone - Bilagsrapport. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 3.2 Reaktiv permeabel væg (Permeabel jernvæg)

#### 3.2.1 Afværgeprincip

Reaktive permeable vægge anvendes til at afskære grundvandsbåren forureningsspredning fra kildeområder primært med klorerede opløsningsmidler og hexavalent chrom. De reaktive vægge etableres på tværs af grundvandsfanen, hvorved forureningskomponenterne som følge af den naturlige grundvandsstrømning bringes i kontakt med det reaktive materiale i væggen. Det hyppigst anvendte reaktive materiale er nul valent jern,  $\text{Fe}^0$ .

Ved kontakt med de store mængder  $\text{Fe}^0$  i væggene opnås som følge af anaerob jernkorrosion et kraftigt fald i grundvandsmiljøets redoxpotentiale. Eventuel opløst ilt i grundvandet fjernes ved rustdannelse, hvorefter jernkorrosionen forløber under dannelse af brint, hydroxylioner og divalent jern,  $\text{Fe}^{2+}$ .

Det kraftige fald i redoxpotentiale medfører, at blandt andet de klorerede opløsningsmidler kan oxidere det metalliske jern og nedbrydes ved en reduktionsproces. Nedbrydningsvejene er ikke klarlagt i detaljer, og for forskellige forureningskomponenter og jernmaterialer ses en varierende produktion af nedbrydningsprodukter, f.eks. dichlorethylener og vinylchlorid. Halveringstiden for PCE og TCE er typisk 0,5 – 3 timer, mens halveringstiden for nedbrydningsprodukterne kan være væsentligt højere, over 10 timer.

Den anaerobe korrosion i jernvæggen kan desuden reducere opløst hexavalent chrom til trivalent chrom, der på grund af en lav opløselighed udfælder i jernvæggen.

Reaktionerne med de klorerede stoffer og chrom regnes for at være abiotiske og begrænses således ikke af utilstrækkelig næringsstofftilførsel mv.

Produktionen af hydroxylionerne hæver grundvandets pH, og i visse situationer kan der forekomme væsentlige udfældninger af blandt andet calcium- og jerncarbonater, hvorved den reaktive overflade af jernet samt væggens hydrauliske ledningsevne kan reduceres afgørende.

I dimensioneringen af reaktive vægge er halveringstiden for forureningskomponenterne samt dannelse af eventuelle nedbrydningsprodukter og udfældninger nøgleparametre. Idet de aktuelle nedbrydningsforhold for forskellige forureningskomponenter og reaktive materialer ikke er endeligt klarlagt, bør materialevalg og tykkelse af væggen bestemmes ud fra laboratorieforsøg.

Anvendelsen af jernmaterialer i reaktive vægge er patenteret af det canadiske firma Environmetal Technologies. Dette firma er involveret i de fleste af de gennemførte fuldskalaprojekter og udfører laboratorieforsøg med forskellige jernmaterialer og forureningskomponenter på kommercielle vilkår.

De permeable vægge kan enten etableres i hele grundvandsfanens tværsnit eller i en del af tværsnittet suppleret med impermeable barrierer i den resterende del af grundvandsfanens tværsnit således, at vandet i hele fanen ledes gennem det reaktive jernmateriale (funnel and gate). For at undgå, at grund-

vandet strømmer udenom væggene/barriererne er det i begge tilfælde vigtigt, at væggene udføres således, at den hydrauliske ledningsevne er væsentligt større i væggen end i de omgivende jordlag. Væggene skal desuden dimensioneres således, at opholdstiden for grundvandet er tilstrækkelig til fuldstændig nedbrydning af såvel moderstoffer som nedbrydningsprodukter eller at reduktion og udfældning af hexavalent chrom kan nå at forløbe.

I tabel 3.2.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 3.2.1. Overordnede karakteristika for reaktive permeable vægge

Målsætning	Teknikken sigter mod en afskæring af forureningsfanen ved nedbrydning eller immobilisering af forureningskomponenter, der strømmer med grundvandet igennem den reaktive permeable væg.
Kombination med andre teknikker	Teknikken kan kombineres med forskellige teknikker til kildereduktion.
Forureningskomponenter	Klorerede opløsningsmidler, hexavalent chrom.
Geologi i behandlingszone	Sand og grus i den mættede zone.
Fordele og ulemper	<p>Effekt: Teknikken har effekt i forureningsfanen.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Passiv og effektiv teknik til afskæring af forureningsspredning i grundvandet.</li> <li>• Tidsbegrænset anlægsperiode, der begrænser varigheden af gener (støj, støv, rådighedsindskrænkning).</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativt høje etableringsomkostninger.</li> <li>• Gener ved anlægsarbejdet (støj, støv, rådighedsindskrænkning).</li> <li>• Reaktive vægge er ikke effektive over for aromatiske hydrocarboner, dichlormethan, dichlorethaner og chlormethan.</li> <li>• Der er risiko for tilklogning af væggen og "flow-bypass".</li> <li>• Driftsperioden er lang.</li> <li>• Væggens levetid er svær at forudsige, og ofte kortere end leverandørangivelserne.</li> <li>• Præferentiel strømning gennem de mest høypermeable dele af væggen kan give utilstrækkelig opholdstid og gennembrud af moder- eller daterprodukter.</li> <li>• Skifter grundvandet strømningsretning står væggen placeret forkert.</li> <li>• Begrænsede erfaringer på danske lokaliteter.</li> </ul>

### 3.2.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført 3 fuldskala afværgeprojekter med etablering af reaktive jernvægge støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 743 (2003), 747 (2003) samt et Miljøprojekt, der er under udarbejdelse og derfor endnu ikke er udgivet. Herudover er der gennemført en erfaringsopsamling støttet af Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 916 (2004).

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet for hver lokalitet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.



### **3.2.2.1 Fabrikvej, Kolding (Hårdkrom)**

Lokaliteten er anvendt til forchromning, fornikling og forzinkning efter forudgående affedning af metalemnerne i bade med TCE. Disse aktiviteter har medført en udbredt jord- og grundvandsforurening primært med TCE og hexavalent chrom. Forureningen træffes dels i terrænnær moræneler med indlejrede sandlag og dels i et underliggende sandlag på cirka fem meters tykkelse. Projektet omfatter rensning af opløst forurening i de indlejrede sandlag i den terrænnære moræneler ved hjælp af en reaktiv væg med et funnel and gate system. Endvidere er der vinkelret på væggen udført tre grusfyldte render til "kortslutning" af de forurenede sandlag. Endelig er der etableret et drænsystem til nedsivning af vand som efter gennemstrømning af den reaktive væg oppumpes og reinfiltres. Dette foretages for at opnå en øget udvaskning af forureningen.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dimensionere og afprøve en reaktiv væg med jernspåner til in situ fjernelse af TCE og hexavalent chrom.
- Gennem detaljeret monitoring at opnå erfaringer vedrørende fjernelsesrater og styrende parametre for oprensningseffekten af væggen.
- At skabe grundlag for dimensionering og drift af tilsvarende fremtidige vægge i Danmark.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Etableret i alt 14 monitoringsboringer henholdsvis opstrøms, i og nedstrøms væggen.
- Udført detaljeret monitoring ved vandprøvetagning fra monitoringsboringerne samt det oppumpede og reinfiltrede grundvand.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten sidst i kapitlet.

### **3.2.2.2 Vapokon**

Lokaliteten er anvendt til oparbejdning af opløsningsmidler hvilket har medført en kraftig forurening af jord- og grundvand med klorerede opløsningsmidler og olieprodukter. Forureningen træffes dels i fyld og moræneler til 3,5 m u.t. og dels i et underliggende sandet grundvandsmagasin med en mægtighed på cirka 10 meter. Der er lokaliseret en kraftig og forholdsvis smal forureningsfane som søges oprenset ved hjælp af et funnel and gate system. For at reducere strømningshastigheden i væggen er der opstrøms forurenings kildeområde etableret et drænsystem til opsamling af uforurenat grundvand.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dimensionere og afprøve en reaktiv væg med jernspåner til in situ fjernelse af klorerede opløsningsmidler, primært TCE.
- Gennem detaljeret monitoring at opnå erfaringer vedrørende fjernelsesrater og styrende parametre for oprensningseffekten af væggen.
- At skabe grundlag for dimensionering og drift af tilsvarende fremtidige vægge i Danmark.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Laboratorieforsøg med en speciel jerntype (Conelly) og forurenede grundvand fra lokaliteten. Forsøgene blev udført til bestemmelse af halveringstider samt dannelse af nedbrydningsprodukter.
- To dimensionelle modelstudier af strømningforholdene i gruslag umiddelbart opstrøms, i og nedstrøms væggen.
- Etableret i alt 45 monitoringsboringer i tre dybder henholdsvis opstrøms, i og nedstrøms væggen.
- Udført monitoring ved vandprøvetagning fra monitoringsboringerne samt i vandet fra drænene.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten sidst i kapitlet.

### **3.2.2.3 Godsbangården**

På lokaliteten har udslip af klorerede opløsningsmidler fra et værksted forårsaget forurening primært med 1,2 dichlorethylen af et sekundært sandet grundvandsmagasin med en mægtighed på cirka to til tre meter. Forureningsfanen søges oprenset ved hjælp af en reaktiv væg i hele fanens bredde. Væggen er etableret med en højde på fire meter efter spunsning ned i et underliggende lerlag. Der er anvendt 75 tons jerngranulat.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dimensionere og afprøve en reaktiv væg med jernspåner til in situ fjernelse af klorerede opløsningsmidler, primært dichlorethylener.
- Gennem detaljeret monitoring at opnå erfaringer vedrørende fjernelsesrater og styrende parametre for oprensningseffekten af væggen.
- At skabe grundlag for dimensionering og drift af tilsvarende fremtidige vægge i Danmark.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført eller planlagt udført følgende:

- Etableret 11 monitoringsboringer i væggen samt boringer op- og nedstrøms herfor.
- Monitoring ved vandprøvetagning samt pejlinger af grundvandsstand.
- Sluttests til vurdering af udviklingen i væggens hydrauliske ledningsevne.
- Analyse af intakte kerner efter oprensningen til vurdering af udfældninger i væggen.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten sidst i kapitlet.

### **3.2.3 Resultater af aktiviteter**

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Reaktive permeable vægge er en passiv og effektiv teknik til afskæring af grundvandsbåren forureningsspredning med de klorerede opløsningsmidler PCE, TCE og TCA (ved nedbrydning) samt hexavalent chrom (stabilisering ved udfældning). Kommercielt tilgængelige jernmaterialers kapacitet for hexavalent chrom er dog kun cirka et til tre mg/l, hvilket ved kraftige chromforureninger forudsætter anvendelse af meget tykke vægge.

- Etableringen af reaktive permeable vægge skal ske på grundlag af grundige kortlægninger af forureningsfanens tredimensionelle udseende samt de hydrogeologiske forhold i området. Det har således været et væsentligt problem ved nogle oprensninger, at en del af grundvandsfanen er strømmet udenom væggen.
- Etableringsomkostningerne er forholdsvis høje mens driftsudgifterne er lave.
- Der foreligger ikke værktøjer til præcist at kunne forudsigelse af væggenes levetid. Levetider på 10 til 20 år er nævnt, men ofte kan udfældninger eller ophobning af gasformig brint medføre nedsat effekt samt øget strømningsmodstand og således reducere væggenes levetid markant.
- Reaktive vægge kan anvendes i iltfrit såvel som iltholdigt grundvand.
- Dimensioneringen af reaktive vægge skal tage hensyn til de målte halveringstider for forureningskomponenterne samt nedbrydningsprodukter målt i vandprøver fra den aktuelle lokalitet med det anvendte jernmateriale. Desuden skal der tages højde for effekten af eventuelle udfældninger på væggenes reaktivitet og hydrauliske ledningsevne.
- Naturlige variationer i jordlagenes hydrauliske parametre medfører, at strømningshastigheden gennem væggene kan variere betydeligt over korte afstande. Kraftig forurening i højpermeable jordlag kan således medføre "gennemslag" af væggene visse steder og hermed reduceret oprensningseffekt. Dette er observeret på et af de udførte projekter. Variationerne i ledningsevnen kan vanskeligt kortlægges i tilstrækkelig detalje, men fænomenet kan formentlig reduceres væsentlig ved opblanding i meget højpermeable zoner (faskiner) umiddelbart op- og nedstrøms den reaktive væg. På et projekt er der på baggrund af modelstudier etableret sådanne grusfyldte faskiner på 100 cm.
- Foreløbige studier viser, at grundvand med stor hårdhed og/eller højt indhold af sulfat kan medføre en betydelig reduktion i den reaktive vægs effekt som følge af udfældninger eller biologisk vækst.
- Reaktive vægge baseret på nul valent jern er ikke effektive overfor aromatiske hydrocarboner, dichlormethan, dichlorethaner og chlormethan.
- På et projekt er det sideløbende med abiotisk omsætning af TCE konstateret tegn på sulfatreduktion samt biologisk nedbrydning af oliekomponenter, DCM og DCA som normalt ikke nedbrydes i jernvægge.
- Reaktive vægge kan kombineres med aggressive teknikker til kildefjernelse. Herved afkortes den nødvendige levetid for væggen, og i visse tilfælde kan der anvendes en tyndere vægtykkelse.
- En væsentlig ulempe ved reaktive vægge er de høje etableringsomkostninger. Desuden er den maksimale etableringsdybde for de permeable vægge med de nuværende teknikker ca. 15 – 20 meter. P.t. foregår der en udvikling af metoder til hurtigere og billigere etablering af vægge og impermeable barrierer (funnels) blandt andet ved hjælp af åbentstående gravehuller med speciel boremudder, og ved hjælp af teknikker som har lighed med hydraulisk frakturering. Herved kan væggene desuden etableres på større dybde end hidtil, og det vil være muligt at installere horisontale "vægge".
- Udenlandsk litteratur viser, at foruden jern kan zink, nikkel, aluminium og palladium anvendes i reaktive vægge. Ved anvendelse af metalblandinger kan der i visse tilfælde opnås større nedbrydningsrater, men omkostningerne øges dog ligeledes væsentligt.
- Der forskes i anvendelse af reaktive metaller overfor en række forskellige forureningskomponenter herunder pesticider, nitrat, nitroaromater.

### 3.2.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. reaktive permeable jernvægge som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Anvendelse af reaktive permeable jernvægge er stadig på udviklingsstadiet men anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (primært geologi og bygningsmæssige rammer) muliggør anvendelse.
- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af reaktive permeable jernvægge som afværgeteknik på danske lokaliteter.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med reaktive permeable jernvægge.

### 3.2.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.1.1/ Miljøprojekt Nr. 743, 2003: Afprøvning af reaktiv jernvæg til grundvandsrensning. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.1.2/ Miljøprojekt Nr. 747, 2003: Reaktiv Jern-Væg til rensning af grundvand for TCE og Chromat, Kolding Hårdkrom A/S. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.1.3/ Miljøprojekt Nr. 916, 2004: Reaktive vægge og filtre med jernspåner - en sammenfatning. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.1.4/ Miljøprojekt Nr. 1050, 2005: Afprøvning af jernspånefilter til rensning af grundvand forurenede med klorerede opløsningsmidler. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 3.3 Biologisk reaktiv barriere - oxidation

Der henvises til afsnit 2.11 "Stimuleret biologisk nedbrydning – oxidation" for en gennemgang af afværgeprincippet.

### 3.3.1 Udførte aktiviteter

Der er ikke gennemført særlige teknologiuudviklende aktiviteter med anvendelse af biologiske reaktive barrierer til spredningskontrol støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet i Danmark.

Der er dog kendskab til at teknikken anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte sager i Danmark. Nedenfor beskrives en udvalgt sag, hvor der er etableret en biologisk reaktiv barriere.

### **3.3.1.1 Odensevej, Langeskov**

På Odensevej i Langeskov er der en forureningsfane med benzinkomponenter, herunder BTEX'er, med en længde på ca. 300 m og en bredde på ca. 20-30 m. Kilden er tidligere oprenset, men der er efterladt betydelige stofmængder i fanen.

For at afskære yderligere forureningsspredning har COWI bl.a. etableret en biobarriere i form af ilt diffusion på tværs af fanen. Projektet er gennemført for OM. Formålet med den iværksatte afværge var om muligt at reducere forureningsmassen i fanen og opnå en fanekontrol, der sikrer, at forureningsfanen bliver stabil eller reduceret og derved ikke længere udgør en risiko for det øvre primære grundvand.

På lokaliteten er der etableret 20 stk. filtersatte boringer med en indbyrdes afstand på 75 cm, således at der skabes en effektiv iltbarriere på tværs af forureningsfanen. Teknikken baserer sig på ilt diffusion, hvor ren ilt langsomt tilføres det benzinholdige grundvand gennem polymermembraner af silikone. Ilten stimulerer den naturlige nedbrydning af benzinkomponenterne i grundvandet.

## **3.3.2 Resultater**

### **3.3.2.1 Odensevej, Langeskov**

Iltforbruget har i gennemsnit været på ca. 10 kg ilt/måned, svarende til knap 1 iltflaske/måned. Det har været muligt at opnå så markant forbedrede redoxforhold, at der er opnået en reduktion af forureningskomponenter indenfor min. 14 m fra ilt diffusorerne. Redoxforholdene er således ændret til jernreducerende forhold mod før stærkt reducerede forhold (sulfat-methanogene forhold). Der er opnået mere end 90 % reduktion af det opløste indhold af kulbrinter og BTEX'er i forhold til indholdet i de opstrømsliggende kontrolboringer. Det vurderes, at der i løbet af de forløbne 2 års drift er opnået min 60 % fjernelse af produktmængden i den yderste del af fanen.

## **3.3.3 Perspektivering**

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. en biologiske reaktive barrierer (oxidation) som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for nedenstående vurdering/perspektivering af teknikken.

- Anvendelse af en biologisk reaktiv barriere (oxidation) som afværgeteknik er stadig på udviklingsstadiet men anvendes som en del af afværgestrategien på enkelte danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (primært geologi og bygningsmæssige rammer) muliggør anvendelse.
- Der er ikke gennemført aktiviteter med anvendelse biologiske reaktive barrierer (oxidation) støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med biologisk reaktiv barriere (oxidation).

### 3.3.4 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

/3.3.1/ Oliebranchens Miljøpulje, Odensevej 2, Langeskov, Kerteminde Kommune, Statusrapport nr. 5. Udarbejdet af COWI, Marts 2007.

## 3.4 Biologisk reaktiv barriere - reduktion

### 3.4.1 Afværgeprincip

Der henvises til afsnit 2.13 "Stimuleret biologisk nedbrydning – reduktion" for en gennemgang af afværgeprincippet.

### 3.4.2 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført ét større afværgeprojekt med stimuleret reaktiv deklorering etableret som en reaktiv barriere støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 833 og 834 (2003). Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat en række andre afværgeprojekter med denne teknik i andet regi.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet for hver lokalitet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater opnået i Danmark og en perspektivering. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### **3.4.2.1 Jægersborg Allé, Gentofte**

På Jægersborg Allé i Gentofte har det tidligere Hedeselskabet Miljø og Energi A/S (nuværende Orbicon) gennemført et pilotforsøg med stimuleret reaktiv deklorering i midten af 2001. Pilotforsøget er gennemført for det tidligere Københavns Amt (nuværende Region Hovedstaden) og Miljøstyrelsen, som et led i Teknologiprogrammet.

Lokaliteten er primært forurenet med PCE og den geologiske opbygning i pilottestfeltet består generelt af 1-4 m fyld eller moræneler underlejret af smeltevandssand til ca. 17 m u.t., hvor et regionalt lag af moræneler træffes. Et sekundært grundvandsmagasin knytter sig til smeltevandssandet. Redoxforholdene er generelt svagt aerobe i toppen af magasinet og anoxiske herunder.

Pilotforsøgets formål var at vurdere muligheden for at initiere reaktiv deklorering ved tilsætning af den kommercielle elektrondonor HRC<sup>TM</sup> til den mættede del af formationen af smeltevandssand. Konkret skulle pilotforsøget belyse ingeniørtekniske forhold vedrørende injektionsmetode og den resulterende fordeling og spredning af elektrondonor i den mættede sandformation. Herudover skulle udviklingen af redox-forholdene samt effekten på den reductive deklorering af PCE som følge af tilsætningen af HRC<sup>TM</sup> belyses.

Pilotforsøget blev gennemført ved injektion af ca. 1.800 kg HRC<sup>TM</sup> og HRC primer i 9 punkter på 2 rækker på tværs af grundvandets strømningsretning. Der blev ikke tilsat en deklorerende bakteriekultur. Selve injektionen blev foretaget nedefra og op med Geoprobe-boringer (open tip injektion) tilkoblet en stempelpumpe, blandekar og kontrolenhed.

Pilotforsøget mandede ud i følgende overordnede erfaringer:

- Elektronondonor (HRC) blev med den valgte injektionsmetode ikke fordelt jævnt over dybden, men blev primært fordelt i bunden af magasinet.
- I områder med elektronondonor blev der observeret stærkt reducerede redox-forhold og således optimale forhold for reduktiv deklorering.
- Der blev ikke konstateret fald i koncentrationerne af PCE eller stigning i koncentrationerne af nedbrydningsprodukter efter injektion af elektronondonor.

Der henvises i øvrigt til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 3.3.3 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **3.4.2.2 Gl. Kongevej, Kbh. V**

På Gl. Kongevej i København har NIRAS A/S gennemført et fuldskala afværgeprojekt med stimuleret reduktiv deklorering. Projektet er finansieret af den tidligere Københavns Kommunes Miljøkontrol (nuværende Region Hovedstaden) og er afrapporteret i /Miljøkontrollen 2007/, hvortil der henvises for en detaljeret gennemgang af projektet.

Lokaliteten er primært forurenet med PCE og geologien består af kvartære aflejringer til ca. 9 m u.t. underlejret af kalk. De kvartære aflejringer består først af et markant fyldlag efterfulgt af en sandet/stenet moræneler med sandlinser.

Afværgeprojektets formål var at etablere en biologisk aktiv zone i toppen af kalken umiddelbart under forureningskilden i moræneleret, hvor der er optimale betingelser for reduktiv dechlorering, for herved at afskære fortsat spredning af forureningen til det primære magasin i kalken og dermed minimere en uacceptabel påvirkning af vandindvindingen i området.

Injektionsstrategien blev opdelt i 2 faser. Indledningsvist en "aktiv" fase efterfulgt af en "passiv" fase. I den aktive fase er der foretaget recirkulation af grundvand oppumpet i 2 ekstraktionsboringer og reinjiceret i 5 injektionsboringer. I forbindelse med recirkulationen er der tilsat substrat (pulsvis) og en bakteriekultur (kontinuert) fra en on-site deklorerende bioreaktor.

Der er i alt tilsat 4.800 l substrat (natriumacetat og mælkesyre) og 1.900 l næringsstoffer til grundvandet i forbindelse med den aktive fase. 1/4 af recirkulationsvandet blev ledt igennem bioreaktoren og dermed tilført deklorerende bakterier.

Efter den aktive fase kunne følgende konkluderes:

- Der er skabt stærkt reducerede (methanogene) forhold i behandlingszonen.
- Der er effektivt fordelt substrat og bakteriekultur i hele behandlingszonen, således at reduktiv deklorering kan opretholdes.
- Der forekommer reduktiv deklorering i behandlingszonen.

Ved den efterfølgende passive fase opretholdes den biologiske aktivitet ved periodevis passiv tilførsel af elektronondonor. Der foretages på nuværende tidspunkt monitoring på lokaliteten og der kan derfor ikke konkluderes noget endeligt hvad angår den samlede afværgeeffekt.

Afværgeprojektet mundede ud i en række generelle erfaringer vedrørende gennemførelse af stimuleret reduktiv deklorering i fuldskala som er beskrevet i det samlede erfarings- og resultat afsnit 3.3.3.

### 3.4.3 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte aktiviteter.

Generelt kan følgende konkluderes:

- Stimuleret reduktiv deklorering vurderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter at have stort potentiale til oprensning/spredningskontrol af klorerede ethener på et stort antal forurenede lokaliteter i Danmark.
- I forbindelse med de gennemførte aktiviteter er det således påvist, at der i områder med effektiv fordeling af substrat kan skabes stærkt reducerede redoxforhold og således optimale forhold for reduktiv deklorering.
- For at opnå tilstrækkelig hurtig og effektiv reduktiv deklorering indikerer resultaterne, at det er nødvendigt at tilsætte en deklorerende bakteriekultur (*Dhc*).
- Det afgørende for omkostningerne forbundet med stimuleret reduktiv deklorering er substratbehovet, der afhænger af redoxforholdene og de hydrauliske forhold i behandlingsområdet.

Generelt kan følgende konkluderes vedrørende behandling af højpermeable formationer af sand eller grus:

- Ingeniørteknisk er der gode erfaringer med at designe, etablere og drive et aktivt system med oppumpning og recirkulation af grundvand tilsat substrat og deklorerende bakterier under hydraulisk kontrol i behandlingszonen.
- De væsentligste problemer i relation til driften af et aktivt recirkulationssystem har været trykopybygning i sammenhæng med tilklogning i injektionsboringerne.
- Injektion af substrat med Geoprobe "open tip" nedefra og op i en højpermeabel formation har resulteret i ujævn fordeling over dybden, hvor substrat primært blev fordelt i bunden af magasinet. Forskelle i massefylde, viskositet og temperatur mellem substrat og grundvand vurderedes ikke at have signifikant betydning for den ujævne fordeling.

### 3.4.4 Perspektivering

Der henvises til afsnit 2.13 "Stimuleret biologisk nedbrydning – reduktion" for en generel perspektivering vedrørende denne afværgeteknik.

### 3.4.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.3.2/ Miljøprojekt Nr. 833, 2003: Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved stimuleret reduktiv deklorering. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.3.3/ Miljøprojekt Nr. 834, 2003: Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved stimuleret reduktiv deklorering - bilagsrapport. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.



### 3.5 Moniteret naturlig nedbrydning

Moniteret naturlig nedbrydning er en in situ afværgestrategi, der primært baserer sig på naturligt forekommende mikrobiel nedbrydning af forureningskomponenter til uskadelige nedbrydningsprodukter, inden der sker uønsket spredning til f.eks. grundvandsboringer, recipienter eller indeklima i bygninger. Der er tale om en "passiv" afværgeteknik, idet der ikke foretages egentlige indgreb. Moniteret naturlig nedbrydning kan anvendes alene eller i kombination med andre teknikker.

Den amerikanske betegnelse for teknikken er "**monitored natural attenuation**" (**MNA**). Betegnelsen **attenuation** dækker i princippet over en lang række naturligt forekommende processer i jord- og grundvandsmiljøer, der samlet bidrager til en reduktion af toksiciteten, mobiliteten og/eller koncentrationen eller massen af en given forurening. Disse processer omfatter nedbrydning (biologisk eller abiotisk), kemisk udfældning/stabilisering, sorption til sedimentmatrix, fordampning og spredning i poreluften samt fortynding og spredning i grundvandet. Af de anførte processer er det imidlertid kun nedbrydning, der bidrager til en fjernelse/reduktion af forureningsmassen og således på længere sigt vil kunne lede til en oprensning af forureningen. Den nuværende praksis er således også kun at betragte nedbrydningsprocesser, når moniteret naturlig nedbrydning planlægges som afværgestrategi.

Ved anvendelse af moniteret naturlig nedbrydning som afværgestrategi skal det derfor verificeres, at den aktuelle forurening nedbrydes naturligt på lokaliteten og at massefjernelsen er tilstrækkelig til at nå oprensningsmålsætningen. Kravene til en sådan verifikation kan variere meget afhængig af forureningens karakter (omfang, komponenter/stofgrupper) og af lokalitetsspecifikke forhold (geologi, hydrogeologi og redoxforhold). Nedbrydning af forskellige forureningskomponenter er f.eks. ofte betinget af bestemte redoxforhold, hvor nogle komponenter kræver aerobe forhold, mens andre komponenter kræver anaerobe forhold. Nedbrydning kan desuden kræve tilstedeværelsen af specifikke bakterier.

Det kan være vanskeligt at bevise en egentlig massefjernelse, eftersom faldende forureningskoncentrationer kan være tvetydige, idet der som beskrevet ovenfor forekommer en række naturlige processer i jord- og grundvandsmiljø, der kan bidrage til faldende forureningskoncentrationer. I en række internationale protokoller og guidelines (f.eks. Wiedemeier et al., 1998 og 1999) foreslås en række "beviser" (line of evidence) anvendt til fastlæggelse af om moniteret naturlig nedbrydning er en anvendelig afværgestrategi på en given lokalitet. Sådanne beviser kan f.eks. tilvejebringes igennem nedenstående aktiviteter:

- Tidslig og rumlig vurdering og tolkning af data vedrørende forurening, geologi, hydrogeologi, geokemi mv. for at dokumentere en evt. reduktion af forureningskoncentrationen over tid samt for at vurdere om forureningsfaren udvider sig, er stabil eller reduceres i størrelse. En identifikation og adskillelse af de forskellige betydende processer (sorption, fordampning, fortynding, nedbrydning mv.) samt evt. en overordnet kvantificering af massefjernelsen kan også indgå i denne analyse.
- Tolkning af in situ indikatorer for mikrobiologisk nedbrydning. Flere in situ indikatorer kan anvendes ved tolkningen af om naturlig nedbrydning finder sted og i hvilket omfang. Mikrobiologisk nedbrydning af forureningskomponenter vil f.eks. kunne sammenholdes med et forbrug af elektronacceptorer og således en ændring i redox-kemien eller med dannelsen

af specifikke nedbrydningsprodukter. Relativt nye analyseteknikker omfatter ligeledes måling af ændringer i isotopfraktionering ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) i forureningskomponenterne, hvilket muliggør beregning af nedbrydningsrater. Tolkning af in situ indikatorer danner sammen med massebalancer for forureningskomponenterne og strømningsberegninger baggrund for en bestemmelse af omfanget af naturlig nedbrydning eller nedbrydningsraten.

- Dokumentation af nedbrydning, herunder nedbrydningsrater, under kontrollerede laboratorieforsøg med forurenede sediment og grundvand fra den aktuelle lokalitet.

Efter tilvejebringelsen af et eller flere af ovennævnte "beviser" skal der opstilles et monitoringsprogram hvormed det sikres, at den aktuelle udvikling i forureningsniveauet dokumenteres. Herunder hører, at opstille en række kriterier for handlinger, der skal iværksættes, hvis forureningsituationen udvikler sig i en ugunstig retning. Modellering kan med fordel indgå som et værktøj til denne opgave.

Naturlig nedbrydning har været implementeret som afværgestrategi i USA og en del europæiske lande – især overfor forureninger med oliestoffer og klorerede opløsningsmidler. Som afværgestrategi har naturlig nedbrydning kun i begrænset omfang været brugt i Danmark, men en del af principperne har været anvendt i vid udstrækning i forbindelse med udvidede risikovurderinger. Det bør i den forbindelse nævnes, at der blandt flere fagfolk, er en opfattelse af, at naturlig nedbrydning ikke er en egentlig afværgestrategi men snarere et sidste trin i en detaljeret risikovurdering.

I tabel 3.5.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 3.5.1. Overordnede karakteristika for monitoreret naturlig nedbrydning

Målsætning	Metoden sigter mod afværge overfor forurening i mættet og umættet zone og kan både bruges i kilde- og faneområde. Ved monitoreret naturlig nedbrydning som afværgestrategi skal det sandsynliggøres at nedbrydningen er tilstrækkelig effektiv til at fjerne risikoen for u hensigtsmæssig forureningsspredning.
Kombination med andre teknikker	Metoden kan kombineres med en lang række andre afværgeteknikker til både kildeoprensning og spredningskontrol.
Forureningskomponenter	Olie- og benzinkomponenter, PAH'er, klorerede stoffer, pesticider mv.
Geologi i behandlingszone	Sand og ler. Mættet og umættet
Fordele og ulemper	<p>Effekt:</p> <p>Under de rette betingelser (redoxforhold, mikrobiologiske -, geologiske - og hydrogeologiske forhold) vil der ske effektiv naturlig nedbrydning af en lang række forureningskomponenter.</p> <p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturlig nedbrydning baserer sig på processer, der allerede foregår.</li> <li>• På nogle lokaliteter findes der ikke andre økonomiske realistiske alternativer.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• For nogle forureningsstoffer kræves meget specifikke forhold, før tilstrækkelig nedbrydning finder sted</li> <li>• I den almene befolkning kan anvendelsen af naturlig nedbrydning opfattes som, at myndighederne "bare lader stå til".</li> </ul>

### 3.5.1 Udførte aktiviteter

I Danmark er der gennemført ét afværgeprojekt med monitoreret naturlig nedbrydning støttet af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, jf. Miljøprojekt 544 (2000). Der er herudover gennemført udredningsprojekter omfattende et litteraturstudier vedrørende nedbrydningsforhold for forskellige forureningskomponenter, herunder olie- og benzinkomponenter samt PAH'er, og der er anvist kontrolmetoder til dokumentation for nedbrydning, jf. Miljøprojekt 408 (1998) og Miljøprojekt 582 (2001).

Ved siden af aktiviteterne gennemført under Teknologiprogrammet er der ligeledes igangsat enkelte andre afværgeprojekter, hvor monitoreret naturlig nedbrydning anvendes som afværgestrategi.

Formålet med de gennemførte aktiviteter præsenteres kortfattet, hvorefter der følger en samlet præsentation af resultater og en perspektivering af teknikken. For detaljerede beskrivelser af projekterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### **3.5.1.1 Ringe Tjære- og Asfaltfabrik**

Som led i en samlet undersøgelse af en større tjæreforurening ved Ringe Tjære- og Asfaltfabrik har Orbicon i samarbejde med bl.a. Miljø & Ressourcer DTU, DHI og GEUS gennemført en række feltundersøgelser og laboratorieforsøg med henblik på at vurdere, hvorvidt monitoreret naturlig nedbrydning er tilstrækkelig som afværgeteknik på lokaliteten. Aktiviteterne er gennemført for det tidligere Fyns Amt og nuværende region Syddanmark.

Forureningen på lokaliteten består primært af tjærekomponenter, herunder PAH'erne pyren og benz(a)pyren samt naphtalen, phenoler og BTEX'er. Der er truffet fri fase tjære under vandspejlet til det primære grundvandsmagasin. Fra kildeområdet udbreder en smal forureningsfane med meget høje koncentrationer af tjærekomponenter sig i nedstrøms retning.

Geologien og hydrogeologien i området er meget kompleks og der henvises til /1/ for en detaljeret beskrivelse. Helt overordnet er der tale om kvartære aflejringer af moræneler med forekomst af såvel umættede som mættede lag af smeltevandssand. I 14-15 m's dybde starter et udbredt dække af sand, som i dybdeintervallet 16-19 m u.t. formodes at strække sig under stort set hele kildegunden. Det primære magasins frie vandspejl træffes ca. 17-18 m u.t., dog med undtagelse af områder, hvor underliggende moræneler træffes i et højere niveau.

I projektet er der foretaget en vurdering af fordeling, transport og naturlig nedbrydning af tjærekomponenter i grundvandsmagasinet. Vurderingen er foretaget på grundlag af:

- Traditionelle feltundersøgelser og analyser af jord og grundvand for indhold af forureningskomponenter og redoxparametre.
- Specialanalyser for specifikke nedbrydningsprodukter, med henblik på dokumentation af nedbrydning af de relaterede moderstoffer.
- Specialanalyser for isotopfraktionering med henblik på at dokumentere, om der pågår nedbrydning af de pågældende stoffer.
- Anaerobe nedbrydningsforsøg med henblik på vurdering af potentialet for naturlig og stimuleret naturlig nedbrydning af udvalgte problemstoffer i grundvandsmagasinet samt for bestemmelse af nedbrydningsrater.

- Stoftransportmodellering på baggrund af karakteristiske parametre vedrørende geologi, hydrogeologi, forureningkoncentrationer, nedbrydningsrater mv.

Undersøgelserne mundede ud i den generelle vurdering, at den naturlige nedbrydning i det primære magasin er tilstrækkelig til, at koncentrationen af samtlige forureningskomponenter holdes på et acceptabelt niveau indenfor de første ca. 200 m nedstrøms kildeområdet.

Der blev i øvrigt gjort nogle generelle vurderinger vedrørende anvendelse af specifikke nedbrydere, isotopfraktionering og/eller nedbrydningsforsøg til verifikation af omfanget af naturlig nedbrydning og således muligheden for at anvende monitoreret naturlig nedbrydning som afværgeteknik. Der henvises til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 3.4.2 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

### **3.5.1.2 Tankområde Guldager, Esbjerg**

Som led i en samlet undersøgelse, herunder opsamling af fri fase flybrændstof, på Tankområde Guldager i Esbjerg har NIRAS A/S gennemført en række feltundersøgelser og laboratorieforsøg med henblik på at vurdere, hvorvidt monitoreret naturlig nedbrydning er tilstrækkelig som afværgeteknik på lokaliteten. Aktiviteterne er gennemført for det tidligere Forsvarets Bygningstjeneste (nuværende Forsvarets Bygnings- & Etablisementservice, FBE).

Forureningen på lokaliteten består af flybrændstof (olie, BTEX), der har spredt sig i en fane ca. 100 m nedstrøms for kilden og ca. 10-12 m under grundvandsspejlet. Geologien er kendetegnet ved forekomst af primært smeltevandssand i stor mægtighed, stedvist med afvekslende lag af smeltevandsler. Det primære grundvand har frit vandspejl i ca. 3,5 meters dybde.

I forbindelse med undersøgelsen er følgende aktiviteter gennemført med henblik på at vurdere betingelserne for naturlig nedbrydning såvel som omfanget heraf:

- Udtagning af grundvandsprøver til analyse for total kulbrinter og BTEXN med henblik på at kortlægge grundvandsforureningens udbredelse.
- Udførelse af boringskontrol-analyser med henblik på at vurdere grundvandskemi, herunder at bestemme indholdet af redoxfølsomme parametre (elektronacceptorer/-donorer), der kan relateres til mikrobiologisk nedbrydning.
- Udtagning af grundvandsprøver til analyse for trimethylbenzener (TMB), der i anaerobe forureningsfaser kan anvendes som konservativ tracer, for at vurdere påvirkningen af forureningskoncentrationerne i grundvandet forårsaget af fysiske processer (f.eks. dispersion og sorption).
- Udtagning af grundvandsprøver til stofs specifikke analyser af stabile <sup>13</sup>C-isotoper til direkte beregning af nedbrydningsrater samt til vurdering af, hvorvidt den konstaterede forurening stammer fra et eller flere spild.
- Udførelse af slugtests til vurdering af de hydrauliske parametre for grundvandsmagasinet.

På baggrund af undersøgelserne vurderedes det overordnet, at forureningen nedbrydes naturligt på lokaliteten. Der vurderes imidlertid fortsat at være risiko for spredning af forureningen. De estimerede nedbrydningsrater svarer godt overens med nedbrydningsrater rapporteret i litteraturen.

Der blev i øvrigt gjort nogle generelle vurderinger vedrørende anvendelse af TMB og isotopfraktionering til verifikation af omfanget af naturlig nedbrydning og således muligheden for at anvende monitoreret naturlig nedbrydning som afværgeteknik. Der henvises til nedenstående samlede resultat- og erfaringsafsnit 3.4.2 for en præsentation af generelle erfaringer og anbefalinger.

#### **3.5.1.3 Drejøgade, København**

På Drejøgade i København har NIRAS A/S implementeret et afværgeanlæg med vakuumentilering og air sparging for Miljøkontrollen, Københavns Kommune og Miljøstyrelsen som et led i Teknologiprogrammet, jf. afsnit 2.2.

Med udgangspunkt i baselinestudiet, hvor der blev observeret tegn på nedbrydning af såvel oliekomponenter som klorerede stoffer, blev der – ligeledes under Teknologiprogrammet – iværksat en undersøgelse af nedbrydningsforholdene, når en forurening med oliekomponenter og klorerede stoffer interfererer.

Formålet med projektet har været at foretage en detaljeret redoxkarakterisering af grundvandet på lokaliteten, at karakterisere og til dels kvantificere de nedbrydningsprocesser, der foregår på lokaliteten, samt at estimere nedbrydningsraterne for de givne processer. På denne baggrund skulle det vurderes, om nedbrydningen under naturlige forhold var så effektiv, at forureningen ikke udgjorde en risiko for grundvandsressourcen.

Overordnet bekræftede undersøgelserne på Drejøgade den formodede sammenhæng mellem olieudbredelsen, redoxkemien og nedbrydningspotentialet for de klorerede forbindelser i grundvandsmagasinet. I den stærkt reducerede zone blev mest PCE nedbrudt og fuldstændig deklorering optrådte. De klorerede forbindelser bestod her hovedsageligt af nedbrydningsprodukter. I den svagt reducerede zone blev kun lidt PCE nedbrudt, og der forekom ikke fuldstændig deklorering. I denne zone observeredes fortrinsvist højere klorerede forbindelser (PCE og TCE).

Der henvises i øvrigt til afsnit 2.13 for en nærmere gennemgang af projekter, hvor klorerede opløsningsmidler nedbrydes af naturligt forekommende bakterier.

#### **3.5.1.4 Yderligere aktiviteter**

Ud over udviklingsprojekterne finansieret af Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet, er der ligeledes kendskab til en række andre gennemførte afværgeprojekter, hvor monitoreret naturlig nedbrydning har været anvendt som afværgeteknik, men hvor aktiviteterne har været af mere driftsmæssig karakter. Projekterne er primært gennemført af Miljømyndighederne samt af private bygherre som OM og FBE.

Projekterne beskrives ikke nærmere i denne rapport, idet der ikke vurderes at være tale om udviklingsprojekter, men snarere afværgeprojekter af driftsmæssig karakter. Dokumentationsmaterialet i relation til metodens principper, begrænsninger og effekt vurderes derfor at være for spinkelt. Projekterne ligger imidlertid til grund for besvarelsen af spørgeskemaerne, jf. afsnit 1.3 og bilag 1, og har således betydning for den samlede perspektivering af passiv ventilation som afværgeteknik.

### 3.5.2 Resultater af aktiviteter

Nedenfor præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra de gennemførte projekter.

Generelt kan følgende konkluderes:

- Moniteret naturlig nedbrydning vurderes på baggrund af de gennemførte aktiviteter at have potentiale som afværgestrategi, herunder særligt overfor olie-, benzin og tjæreprodukter. Teknikken finder allerede i dag anvendelse i en række sager som led i udvidede risikovurderinger.
- Klorerede opløsningsmidler vil også kunne nedbrydes under naturlige forhold, men disse forureningskomponenter nedbrydes kun fuldstændigt under særlige redoxforhold og ved tilstedeværelse af specifikke mikroorganismer, jf. kapitel 2.13.
- En nedstrøms reduktion af forureningskomponenter i grundvandet er ikke i sig selv grundlag nok for at konkludere, at der sker nedbrydning. Flere in situ indikatorer (herunder redoxfølsomme parametre, nedbrydningsprodukter, isotopfraktionering mv.) bør således indgå i vurderingen af om moniteret naturlig nedbrydning er en anvendelig afværgestrategi.
- Analyse af grundvandsprøver for ændringer i isotopfraktionering ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) i forureningsfanen er en relativt ny teknik, der muliggør beregning af nedbrydningsrater. Der er i forbindelse med de gennemførte aktiviteter opnået gode resultater med anvendelse af isotopanalyser, og disse vurderes at være et værdifuldt værktøj til vurdering af anvendeligheden af moniteret naturlig nedbrydning som afværgestrategi.
- Trimethylbenzener (TMB) anbefales i litteraturen anvendt som konservative tracere i anaerobe forureningsfaner i forbindelse med BTEX-forurening. I forbindelse med de gennemførte aktiviteter er der opnået gode resultater ved anvendelse af TMB som tracer til korrektion af nedbrydningsrater.

### 3.5.3 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. moniteret naturlig nedbrydning som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelsene har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Moniteret naturlig nedbrydning anvendes som en del af afværgestrategien på en række danske lokaliteter, hvor de lokalitetsspecifikke forhold (geologi, forureningsomfang mv.) muliggør anvendelse.
- Besvarelsene af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at resultater opnået ved aktiviteter, der er gennemført som en del af Teknologiprogrammet, er blevet anvendt i forbindelse med valg af teknik, design og projektering af moniteret naturlig nedbrydning som afværgeteknik på danske lokaliteter.

- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne vurderes at være et stort behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med monitoreret naturlig nedbrydning.

#### 3.5.4 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.5.1/ Miljøprojekt Nr. 544, 2000: Naturlig nedbrydning af olie og klorerede opløsningsmidler i grundvandet på Drejøgade 3-5. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.5.2/ Region Syddanmark. Ringe Tjære- og Asfaltfabrik, Villavej 15, 5750 Ringe Supplerende undersøgelser og risikovurdering. Hovedrapport. Udarbejdet af Orbicon, April 2007.
- /3.5.3/ Forsvarets Bygningstjeneste. Statusnotat nr. 4. 828 Tankområde Guldager. Udarbejdet af NIRAS A/S, August 2004.

### 3.6 In-Well Aerator

#### 3.6.1 Afværgeprincip

In Well Aerator, IWA er en modificeret stripningsmetode, som kombinerer grundvandsoppumpning ved lufthæveprincippet med forureningsfjernelse ved stripning. Metoden anvendes til afværgepumpning af flygtige, opløste forureningskomponenter (BTEX, klorerede opløsningsmidler mv.) og udgør et alternativ til traditionel grundvandsoppumpning med eldrevne dykpumper og efterfølgende rensning i aktivt kul.

In Well Aeratoren består af et system af PVC rør som nedsænkes i en traditionel boring filtersat i minimum  $\varnothing 200$  mm rør. Aeratoren er opdelt i flere kamre der dels fungerer som stigrør i forbindelse med lufthævepumpningen og dels som beluftningskamre i forbindelse med rensningen af grundvandet ved stripning.

Den primære luftindblæsning foretages i aeratorens inderste rør cirka en meter over bunden af boringen. Hermed opnås at densiteten af væskesøjlen inde i boringen reduceres, hvorved der etableres en trykgradient fra formationen til boringen og således en pumpeeffekt.

Når luftboblerne stiger op gennem vandsøjlen inde i boringen, vil de flygtige stoffer overføres fra vand til luftfase. Den stigende luft transporterer de flygtige stoffer til toppen af boringen/In Well Aeratoren. Vandet ledes videre forbi et eller flere beluftningskamre, hvor der sker en yderligere luftindblæsning og stripning af de flygtige stoffer. Antallet af beluftere afhænger blandt andet af oprensningskravet samt koncentrationerne af de forurenende stoffer.

Afhængigt af forureningsniveauet kan der være behov for rensning af afkastluften fra Aeratoren.

I tabel 3.6.1 fremgår udvalgte overordnede karakteristika for teknikken. I bilag 2 er samtlige teknikker beskrevet i denne rapport sammenstillet med hensyn til nøgleoplysninger og karakteristika.

Tabel 3.6.1. Overordnede karakteristika for In-well aerator

Målsætning	Metoden sigter mod afværgepumpning af flygtige, opløste forureningskomponenter.
Kombination med andre teknikker	BTEX, klorerede stoffer mv.
Forureningskomponenter	Flygtige forureningskomponenter som klorerede opløsningsmidler og lettere fraktioner af olie- og benzinprodukter.
Geologi i behandlingszone	Sand og grus i mættet zone
Fordele og ulemper	<p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektiv oppumpning og rensning af grundvand for flygtige organiske stoffer på opløst form</li> <li>• God til oppumpning fra lavtydende magasiner</li> <li>• Begrænset pladsbehov</li> <li>• Ringe behov for tilsyn og vedligehold.</li> </ul> <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi med begrænset erfaring i Danmark</li> <li>• Moderate driftsudgifter.</li> </ul>

### 3.6.2 Udførte aktiviteter

Med henblik på afprøvning af Aeratoren og belysning af oprensningseffekt, anlægs- og driftsudgifter mv. er der fra Miljøstyrelsens teknologiprogram ydet støtte til tre projekter som beskrives kortfattet nedenfor. Projekterne er afrapporteret i Miljøprojekt nr. 642 (2001) og 866 (2003), hvortil der henvises for yderligere detaljer.

#### 3.6.2.1 Ulstrup

På lokaliteten i Ulstrup er In Well Aeratoren etableret på en virksomhedsgrund, hvorfra der er sket en udsivning af klorerede opløsningsmidler, fortrinsvis TCE og en grundvandsbåren spredning til et nærliggende boligområde.

Forureningens kildeområde er knyttet til tre kar som tidligere har været anvendt til affedtning. Fra en svag restforurening i jorden omkring disse kar (som er fjernet), udvaskes TCE til områdets sekundære grundvandsmagasin som træffes i et lag af smeltevandssand som træffes fra terræn. Det sekundære magasin har frit vandspejl cirka tre meter under terræn, og forureningen er afgrænset til toppen af magasinet. Fra industrigrunden er der udbredt en forureningsfane ind under et nærliggende boligområde.

Med henblik på at afskære fremtidig spredning af TCE fra lokaliteten er der umiddelbart nedstrøms kildeområdet etableret en afværgepumpning ved hjælp af IWA. Omkring afværgeboringen er der før opstart påvist niveauer af TCE på op til 1,5 mg/l.

Formålet med aktiviteterne under teknologipuljen var:

- At tilvejebringe en detaljeret beskrivelse af metoden, herunder retningslinier for design og dimensionering.
- At dokumentere metodens rensningseffekt, anlægs- og driftsudgifter, monitoringsbehov, udfældningsproblemer mv.

Med henblik på at opfylde disse formål blev der med støtte fra Teknologiprogrammet:



- Gennemført hydrauliske tests og grundvandsmodellering som grundlag for vurdering af den nødvendige oppumpning.
- Etableret en afværgeboring filtersat i ø315 rør fra 4,0 – 7,0 m u.t.
- Installeret en In Well Aerator med en pumpekapacitet på 1,5 m<sup>3</sup>/time og to beluftningskamre til vandrensning.
- Foretaget detaljeret monitoring af forureningsniveauet i det oppumpede grundvand før og efter vandbehandlingen samt af forureningsniveauet i afkastluften fra Aeratoren.

### **3.6.2.2 Askov**

Forureningen i Askov består overvejende af PCE fra et tidligere renseri. Geologien på lokaliteten udgøres fra terræn af et ca. 10 meter tykt lag af moræner som underlejres af skiftende smeltevandsaflejringer til 90 m u.t. Det frie vandspejl findes ca. 30 m u.t., og det trufne magasin kan stå i en vis hydraulisk kontakt til områdets primære grundvandsmagasin, hvorfra der indvindes ca. 50 meter nedstrøms lokaliteten. I toppen af grundvandszonen er der før iværksættelse af afværgeforanstaltningerne påvist niveauer af PCE på op til 730 µg/l. Koncentrationen er påvist markant aftagende med dybden.

Afværgepumpningen ved hjælp af In Well Aeratoren er iværksat med henblik på at fjerne det værst forurenede vand i den øvre del af grundvandszonen og hindre en uacceptabel påvirkning af dybereliggende vandførende lag.

Afværgepumpningen udføres sideløbende med en oprensning af den umættede zone ved passiv ventilation.

Formålet med aktiviteterne under teknologipuljen var:

- At tilvejebringe en detaljeret beskrivelse af metoden, herunder retningslinier for design og dimensionering.
- At dokumentere metodens rensningseffekt, anlægs- og driftsudgifter, monitoringsbehov, udfældningsproblemer mv.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet:

- Gennemført hydrauliske tests og grundvandsmodellering som grundlag for vurdering af den nødvendige oppumpning.
- Etableret en afværgeboring filtersat i ø250 rør fra 31,5 til 35,5 m u.t. Fra 35,5 til 45,0 m u.t. er der etableret blindrør med henblik på at opnå et tilstrækkeligt neddykningsforhold for pumpen.
- Installeret en In Well Aerator med en pumpekapacitet på 1,5 m<sup>3</sup>/time. På grund af den store løfte højde er Aeratoren indrettet med to pumpetrin og to beluftningskamre til vandrensning.
- Etableret et ø63 mm monitoringsfilter umiddelbart opad afværgeboringen.
- Foretaget detaljeret monitoring af forureningsniveauet i det oppumpede grundvand før og efter vandbehandlingen samt af forureningsniveauet i afkastluften fra Aeratoren.

### **3.6.2.3 Vestergade, Åbenrå**

Forureningen i Åbenrå består overvejende af PCE fra et tidligere renseri. Geologien på lokaliteten udgøres af et ca. 1,0 meter tykt fyldlag. Herunder træffes fed ler, uden sten, men med tynde sandstriber og sprækker. Fra ca. 4 meter under terræn bliver lerlaget let sandet med skaller og småsten, og un-

derlejres ca. 5 meter under terræn af en fed ler, uden sten og sandstriber. Der er en overfladeafstrømning knyttet til oversiden af lerlaget 1,0 meter under terræn og et grundvandsmagasin knyttet til den sandede ler ca. 4 meter under terræn. Det dybereliggende vandførende lag er lavtydende og nedbørsafhængigt.

I toppen af grundvandszonen er der før iværksættelse af afværgeforanstaltningerne påvist niveauer af PCE på op til 64 mg/l. I grundvandsmagasinet 4 meter under terræn er der lokalt påvist fri fase af klorerede opløsningsmidler.

Afværgepumpningen ved hjælp af In Well Aeratoren er iværksat for at fjerne det værst forurenede vand knyttet til overfladeafstrømningen og etablere en lokal sænkningstragt for opsamling af fri fase og kraftigt forurenede vand i det dybereliggende vandførende lag.

Afværgepumpningen udføres sideløbende med en oprensning af den umættede zone ved aktiv ventilation.

Formålet med aktiviteterne under teknologipuljen er:

- At dokumentere Aeratorens robusthed overfor stærkt varierende grundvandstilstrømning, herunder dens virkningsradius i et lavt ydende magasin ved samtidig recirkulering af behandlet vand og alternerende drift.
- At dokumentere metodens virkningsgrad ved høje forureningskoncentrationer med klorerede opløsningsmidler.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra teknologiprogrammet:

- Gennemført datalogning af grundvandsspejlet samt monitorering på forureningsudbredelsen, med henblik på at vurdere effekten af IWA.
- Installeret en In Well Aerator med en pumpekapacitet på 0,2 m<sup>3</sup>/time, hvor der samtidig pumpes fra zonen over det terrænnære lerlag og fra det dybereliggende magasin.
- Foretaget driftoptimering for anvendelse af IWA på et lavtydende magasin.
- Etableret et ø63 mm monitoringsfilter umiddelbart opad afværgeboringen.
- Foretaget detaljeret monitorering af forureningsniveauet i det oppumpede grundvand før og efter vandbehandlingen.

### 3.6.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Designet af et In Well Aerator anlæg vil variere fra lokalitet til lokalitet. De afgørende parametre er: Type og koncentration af forureningen, udbredelsen af forureningsfanen, dybden til vandspejl, muligheden for at etablere tilstrækkeligt blindrør under vandspejlet under hensyntagen til de geologiske forhold, den krævede influensradius (områdets hydrogeologi), den ønskede pumpemængde, dimensionen af et eventuelt kulfilter, emissionskrav til afkastluft og afledt grundvand.
- I dimensioneringen af anlæggene skal følgende fastlægges: Antal afværgeboringer for at indfange hele fanen, diameter på afværgeboringer,

ønsket luftmængde, forventet tryk, valg af kompressor eller blæser, antal belufts-kamre, eventuelt filter til luftrensning.

- Et centralt forhold ved designet af anlægget er at der opnås et optimalt neddykningsforhold for Aeratoren. Dette skal være i intervallet 0,3-1 og så tæt på 1 som muligt. Eventuelle begrænsninger på boreddybden, for eksempel hvis lavpermeable jordlag ikke ønskes gennembrudt, kan derfor være afgørende for anvendeligheden af metoden.
- Hele installationen kan etableres underjordisk i en brønd, hvilket blandt andet er en fordel i forbindelse med støjemissionen fra kompressoren/blæseren.
- På de gennemførte projekter med velydende magasiner har grundvandet indhold af opløste klorerede opløsningsmidler kunnet reduceres fra henholdsvis ca. 110 og 140 µg/l til under drikkevandskvalitetskriteriet på 1 µg/l, hvorved det behandlede vand kan afledes direkte til en recipient. Dette har specielt betydning, fordi der hermed kan opnås en meget væsentlig reduktion af de sædvanlige afledningsafgifter. For lavtydende magasiner er der påvist en reduktion fra 64 mg/l til 30-60 µg/l for indholdet af klorerede opløsningsmidler.
- Anlægget består af forholdsvis enkle komponenter, hvilket simplificerer vedligeholdelse og reparationer. Ligeledes er det rimeligt nemt at udskifte komponenter, idet hele systemet kan udtages af boringen og reinstalleret i løbet af nogle få timer.
- Anlægget er nemt at regulere/justere og kan således tilpasses eventuelle ændrede krav og specifikationer under afværgeforløbet. Optimering eller tilpasning af flow og rensningsgrad foretages ved justering af indblæst luftmængde, aktivering/deaktivering af beluftere eller beluftsstrin.
- Der er ikke umiddelbart påvist tegn på problemer med udfældning. Aeratoren er dog under de gennemførte projekter med velydende magasiner kun afprøvet på vandtyper uden høje indhold af kalk og jern. I det lavtydende magasin i Åbenrå er vandtypen ustabil, med et indhold af både nitrat og jern. I Åbenrå har der ikke været problemer med udfældning. Det skal dog nævnes, at MP1-pumpen, som blev anvendt i Askov til udtagning af dokumentationsprøver af det ubehandlede vand, blev defekt på grund af tilklogning. Der er derfor tegn på at In Well Aeratoren klarer sig bedre end traditionelle pumper.
- De anvendte materialer i Aeratoren har vist sig resistente ved høje koncentrationer af klorerede opløsningsmidler.
- Metoden er baseret på udvaskning af forurening og rensning af opløste niveauer i selve boringen og er som oprensningsteknik ikke egnet til oprensning af kildeområder med residual eller mobil fri fase forurening. In-Well Aeratoren kan dog uden problemer anvendes overfor høje forureningskoncentrationer.
- I forhold til anvendelse af IWA kunne oppumpningen og rensningen af grundvandet på de gennemførte projekter med velydende magasiner være udført med lavere omkostninger ved anvendelse af traditionel dykpumpe og kulfilter.

### 3.6.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af en in-well aerator som afværgeteknik. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om resultaterne opnået ved de gennemførte aktiviteter under Teknologiprogrammet er blevet anvendt i forbindelse med design og projektering af afværgeforanstaltninger med en in-well aerator i Danmark.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af in-well aerator.

### 3.6.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.5.4/ Miljøprojekt Nr. 642, 2001.: Afprøvning af In-Well Aerator. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.5.5/ Miljøprojekt Nr. 866, 2003: Afprøvning af In-Well Aerator på lavtydende magasin. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 3.7 Jernfilter til rensning for klorerede opl. (on-site)

### 3.7.1 Afværgeprincip

Nulvalent jern kan anvendes til abiotisk nedbrydning af opløste niveauer af klorerede opløsningsmidler. Metoden kan dels anvendes in situ som beskrevet i afsnit 3.1 og dels on site i jernfiltre som beskrevet i det følgende. En eventuel anvendelse af jernspånefiltre on site skal ses som et muligt alternativ til grundvandsrensning med kulfiltre.

Processen er baseret på, at der ved grundvandets kontakt med jerngranulat/spåner foregår en jernkorrosion, hvorved eventuelle oxiderede forbindelser (ilt, nitrat mv.) reduceres under udfældning af jernoxider. Herved sænkes grundvandets redoxpotentiale og jernkorrosionen forløber anaerobt under dannelse af brint, hydroxylioner og divalent jern,  $Fe^{2+}$ .

Det kraftige fald i redoxpotentiale medfører, at klorerede opløsningsmidler kan oxidere det metalliske jern og nedbrydes ved reaktiv dechlorering. Nedbrydningsvejene er ikke klarlagt i detaljer og for forskellige forureningskomponenter og jernmaterialer ses en varierende produktion af nedbrydningsprodukter, f.eks. dichlorethylener og vinylchlorid. Halveringstiden for PCE og TCE er typisk 0,5 – 3 timer, mens halveringstiden for nedbrydningsprodukterne kan være væsentligt højere, over 10 timer.

Produktionen af hydroxylionerne hæver grundvandets pH, og i visse situationer kan der forekomme væsentlige udfældninger af blandt andet calcium- og jerncarbonater, hvorved den reaktive overflade af jernet og filterets hydrauliske ledningsevne kan reduceres væsentligt.

I dimensioneringen af jernfiltrene er halveringstiden for forureningskomponenterne - samt for eventuelle nedbrydningsprodukter samt forekomst af udfældninger - nøgleparametre som bør estimeres ved laboratorieforsøg.

### 3.7.2 Udførte aktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et projekt med on site rensning af oppumpet grundvand forurenede med klorerede opløsningsmidler. Projektet beskrives overordnet i det følgende:

#### 3.7.2.1 Lyndby Rens

På lokaliteten er der påvist en kraftig jord- og grundvandsforurening med PCE fra et tidligere renseri samt fra en holdeplads for en tankvogn for PCE. I det sekundære grundvandsmagasin er der i kildeområdet påvist niveauer af PCE på op til 70 mg/l og nedstrøms herfor op til 4 mg/l. Den mest forurenede del af kildeområdet er bortgravet, og der er etableret vakuumventilation fra en boring. Herudover foretages oppumpning af forurenede grundvand fra to boringer. Det oppumpede vand renses i et sand- og kulfilter. Parallelt med kulfilteret er under Teknologiprogrammet etableret et jernspånefilter. Der oppumpes og behandles ca. 1,2 m<sup>3</sup>/time med et indhold af PCE på cirka fire mg/l.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har til formål:

- At opnå erfaringer med et jernspånefilter til on site rensning af grundvand forurenede med PCE.

Med henblik på at opfylde dette formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Dimensionering af et modulopbygget jernspånefilter med fem tanke på hver en m<sup>3</sup>.
- Detaljeret monitorering af fjernelsesrater og styrende faktorer.
- Prøvetagning af jernspåner med henblik på at fastslå omfanget af og årsagen til konstaterede udfældninger.

### 3.7.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Anlægget har været præget af en del driftsproblemer på grund af defekte ventiler, pumpestop og indtrængning af luft.
- Rensningseffekten var høj i starten af driftsperioden men faldt efter kort tid betydeligt.
- Ved udskiftning af jernspåner er der konstateret kraftig tilkitning af/skorpedannelse på filtrene.
- Såvel ved opstart som efter udskiftning af jernspåner er der konstateret markant trykopbygning på indgangssiden af filtrene efter en kortere driftsperiode.
- Anlægget er taget ud af drift tidligere end oprindeligt planlagt for at studere udfældningsproblemerne.
- Med den afprøvede anlægsopbygning kan jernspånefiltre ikke anbefales i forhold til kulfiltre til rensning for klorerede opløsningsmidler.

### 3.7.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af

bl.a. anvendelse af on-site jernfilter til rensning for klorerede opløsningsmidler. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektivering af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site jernfilter til rensning for klorerede opløsningsmidler.

### 3.7.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

/3.9.1/ Miljøprojekt Nr. 1050, 2005: Afprøvning af jernspånefilter til rensning af grundvand forurenede med klorerede opløsningsmidler. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 3.8 Jernfilter til rensning for krom (on-site)

### 3.8.1 Afværgeprincip

Nulvalent jern kan anvendes til reduktion af chrom fra oxidations trin seks (chromat) til oxidations trin tre. Herved omdannes chrom fra den opløselige og mobile hexavalente form til den tungt opløselige trivalente form som udfældes. Ved filtrering af grundvand forurenede med hexavalent chrom i jernspåner opnås således en stabilisering af chrom. Denne proces kan udnyttes til on site behandling af oppumpet chromforurenede grundvand.

Processen er baseret på det kraftige fald i redoxniveau som forårsages af anaerob jernkorrosion ved grundvandets kontakt med jerngranulatet/-spånerne i filtret. Dette fald i redoxniveau medfører ovennævnte reduktion og stabilisering af chrom.

Ved den anaerobe jernkorrosion dannes desuden brint, hydroxylioner og divalent jern,  $\text{Fe}^{2+}$ . Produktionen af hydroxylionerne hæver grundvandets pH, og i visse situationer kan der forekomme væsentlige udfældninger af blandt andet calcium- og jerncarbonater, hvorved den reaktive overflade af jernet og filterets hydrauliske ledningsevne kan reduceres væsentligt.

Ved dimensioneringen af jernfiltrene er kapaciteten for tilbageholdelse af chrom i jernet samt dannelse af eventuelle udfældninger nøgleparametre som bør belyses ved laboratorieforsøg.

På det foreliggende grundlag vurderes rensning for hexavalent chrom i jernspånefiltre at være en oplagt og attraktiv teknik. Hexavalent chrom fjernes ikke i filtre med aktivt kul.

### 3.8.2 Udførte aktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et projekt med on site rensning af oppumpet grundvand forurenet med chromat. Projektet beskrives overordnet i det følgende. For yderligere beskrivelser henvises til litteraturlisten i slutningen af kapitlet.

#### 3.8.2.1 Skt. Clara Vej

På lokaliteten er der deponeret chromholdigt affald fra et garveri. Dette har medført en opløst forurening med hexavalent chrom i det sekundære grundvandsmagasin. Som led i bortgravningen af det deponerede affald og stærkt forurenet jord er der foretaget grundvandssenkning. Det oppumpede grundvand er rensset i et on site filter med jernspåner. Efter opgravningen er der etableret et drænsystem til opsamling af chromat som udvaskes fra restforurening under bygninger mv. Rensningen af vandet fra dette drænsystem foretages med et nedgravet jernspånefilter i en container. Rensningen skulle reducere chromniveauet til maksimalt 10 µg/l.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dimensionere og afprøve et filter med jernspåner til on site rensning af grundvand forurenet med hexavalent chrom.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Laboratorieforsøg med måling af gennembrudskurver for chromat for forskellige flowscenarier.
- Dimensionering af fuldskala anlæg til filtrering for chromat.
- Monitering af chromat i ind- og udløb til de etablerede filtre under drift.

### 3.8.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Filtrene til fjernelse af hexavalent chrom har været forholdsvis billige i anlæg og drift og har fungeret efter hensigten.
- Ved filtreringsforsøg i laboratoriet er der inden gennembrud af filteret opnået en rensning til et niveau på 3 µg/l. Kravet til fuldskala anlægget var 10 µg/l.
- På baggrund af laboratorieforsøgene er der etableret et 7 m<sup>3</sup> jernspånefilter til et flow på 1,5 m<sup>3</sup>/time og et gennemsnitligt chromatindhold i indløbet på 5 mg/l. Levetiden er anslået til 150 – 300 døgn.
- Driften af filteret har været omtrent problemfrit, og udledningskravet er overholdt i hele driftsperioden.
- Filteret til rensning af drænvand er i drift og fungerer efter hensigten.

### 3.8.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af on-site jernfilter til rensning for krom. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojek-

ter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektivering af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site jernfilter til rensning for krom.

### 3.8.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.7.1/ Miljøprojekt Nr. 497, 1999: Reduktion af krom(VI) i grundvand ved hjælp af jernspåner. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.7.2/ Miljøprojekt Nr. 538, 2000.: Rensning af kromforurenede jord ved hjælp af jernspåner og jernsulfat. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.7.3/ Miljøprojekt Nr. 566, 2000.: Drift af jernspånefiltre til fjernelse af krom(VI) fra grundvand. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

### 3.9 Kemisk-Biologisk jernfilter (on-site)

Kemiske-biologiske jernfiltre er under udvikling med henblik på anvendelse til rensning af oppumpet grundvand for indhold af opløste klorerede stoffer. Sådanne filtre vil således kunne udgøre et alternativ til anvendelse af filtre baseret på aktivt kul.

Som tidligere beskrevet medfører anaerob jernkorrosion - som anvendt i reaktive permeable vægge - dels en kemisk nedbrydning af klorerede opløsningsmidler og dels en frigivelse af fri brint. Denne brint kan anvendes af anaerobe bakterier som led i en biologisk omsætning af klorerede ethylenere.

I kemiske-biologiske jernfiltre er det således hensigten at kombinere kemisk fjernelse af opløsningsmidlerne (ved  $Fe^0$ ) med en forøget biologisk nedbrydning. Den biologiske nedbrydning vil i et vist omfang kunne modvirke den stigning i pH, og hermed den tilbøjelighed til udfældning af metaloxider, som ofte forekommer under den anaerobe korrosion i reaktive jernvægge.

Som nævnt er de kemiske-biologiske jernfiltre under udvikling, og det er endnu for tidligt at vurdere metodens mulige kommercielle anvendelse.

#### 3.9.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et laboratorieforsøg dels med jernfiltre og dels med kombinerede kemiske-biologiske filtre til fjernelse af opløste niveauer af klorerede opløsningsmidler.



Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- Via litteratursøgning og laboratorieforsøg at indhente viden om og erfaringer med at kombinere kemisk og biologisk nedbrydning af opløste niveauer af klorerede ethener i on site filtre for oppumpet grundvand.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra Teknologiprogrammet udført følgende:

- Litteratursøgning for kemiske og biologiske metoder til fjernelse af klorerede ethener fra grundvand.
- Laboratorieforsøg i otte reaktorer (i alt 14 forsøg) med forskellige kombinationer af jern, sand og organiske materialer (spagnum, grøntpiller og poppelflis). Reaktorerne er udført i polypropylenrør med en indre diameter på 15 cm og en højde på 120 cm. Reaktorerne er tilført vand med indhold af TCE på 500 – 2.000 µg/l samt mindre indhold af PCE og 1,1-DCE. Iltindholdet i vandet var 8,0 – 11,5 mg/l mens pH og temperaturen var henholdsvis ca. 8 og 20 – 23 °C.
- Måling af pH,  $E_H$ , temperatur og ilt samt indhold af klorerede opløsningsmidler i ind- og udløb til/fra reaktorerne i forsøgenes samlede varighed på et år.

### 3.9.2 Resultater af teknologiaktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Kombinerede kemiske-biologiske filtre kan eventuelt udvikles til at udgøre et miljømæssigt bæredygtigt alternativt til traditionelle kulfiltre.
- I de rene jernfiltre (jern og sand) er der påvist halveringstider for TCE på 35 – 145 minutter, og der er generelt ikke konstateret nedbrydningsprodukter i form af lavere klorerede ethener i udløbet fra disse reaktorer. Effektiviteten af filtrene er afhængig af strømningshastigheden. Meget lave flow bør undgås. Tilsætning af nikkel forøgede den initiale nedbrydningsrate for de klorerede opløsningsmidler. Denne effekt aftog med tiden.
- Jern/sand filtrene kunne under hele forsøget reducere iltindholdet i det tilførte vand fra cirka 10 til under 0,5 mg/l.
- Resultaterne indikerer, at en jern-sand blanding i forholdet 14/86 w/w % er velegnet i kombinerede filtre. Således medfører dette blandingsforhold kun moderate pH stigninger, moderate udfældningsproblemer, og der er ikke påvist forøget nedbrydning af TCE ved større vægtandel af jern i filtrene.
- I visse jernfiltre er der påvist sammenkitning som følge af udfældninger. Årsagen hertil har ikke kunnet fastlægges.
- For rene biologiske filtermatricer er der ikke konstateret nogen nedbrydning af TCE ved anvendelse af poppelflis, mens der er påvist en moderat nedbrydning af TCE ved anvendelse af spagnum. Ved anvendelse af grøntpiller og plantemateriale er der derimod konstateret nedbrydning af TCE med halveringstider på 20 – 45 minutter. Denne nedbrydning medførte dannelse af cis-DCE.
- Filtre med kombinationer af jern/spagnum og jern/poppelflis havde en lavere nedbrydningseffekt på TCE end tilsvarende rene jernfiltre.

- I filtre med kombinationen af jern/grøntpiller er der opnået en halveringstid for TCE på cirka en time. Der er dog indikationer på, at der med tiden opbygges en vis mængde cis-DCE i afløbet fra sådanne filtre.
- Der forestås et omfattende udviklingsarbejde med de kombinerede kemiske-biologiske filtre, herunder optimering af sammensætningen af filtermaterialerne samt dokumentation af filterenes anvendelighed overfor forskellige klorerede ethener og robusthed overfor forskellige vandtyper.
- P.t. kan der ikke opstilles retningslinier for design og dimensionering af kombinerede filtre.

### 3.9.3 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af on-site kemisk biologisk jernfilter. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site kemisk biologisk jernfilter.

## 3.10 Biologisk nedbrydning af MTBE (on-site)

### 3.10.1 Afværgeprincip

Som følge af MTBE's store vandopløselighed og ringe sorption til jorden foretages afværge af grundvandsforurening ofte ved afværgepumpning. Interessen for biologisk nedbrydning af MTBE knytter sig i første omgang til on site rensning af oppumpet grundvand. Der arbejdes dog ligeledes med stimulering af nedbrydningen af MTBE in situ.

Biologisk nedbrydning af MTBE kan foregå med MTBE som primært og som sekundært substrat.

Som primært substrat optræder MTBE som mikroorganismernes eneste kulstof- og energikilde.

Som sekundært substrat nedbrydes MTBE i tilknytning til mikroorganismernes omsætning af et primært substrat (typisk lavmolekylære alkaner) der optræder som hovedkilden til mikroorganismernes kulstof og energiudbytte. Høje koncentrationer af primær substratet hæmmer nedbrydningen af MTBE ved kompetitiv inhibering.

Ved nedbrydningen af MTBE som primært eller sekundært substrat kan der med bestemte bakteriekulturer dannes nedbrydningsproduktet tertbutylalkohol. Hvorvidt dette sker i kritiske koncentrationer er ikke afklaret p.t.

### 3.10.2 Udførte aktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende projekter med biologisk nedbrydning af MTBE:

#### **3.10.2.1 MTBE nedbrydning i grundvand med propanoxiderende bakterier**

Projektet blev gennemført som et laboratoriestudium og havde til formål at undersøge rater for mikrobiel nedbrydning af MTBE ved tilsætning af propan og isobutan som primært substrat. Endvidere skulle opnåeligt rensningsniveau med teknikken belyses.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

#### **3.10.2.2 Rensning af MTBE i bioreaktor**

Projektet omfattede biologisk nedbrydning af MTBE som primær substrat i reaktorer og blev gennemført i laboratoriet. Formålet med projektet var at belyse nedbrydningsrater, dannelse af nedbrydningsprodukter og eventuelle kritiske pH værdier for tre forskellige biomassekulturer.

### 3.10.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Med propan eller isobutan som primært substrat kan der opnås en omsætningshastighed for MTBE på op til 7 – 16 mg-MTBE/g-protein/time ved 23 °C og ved den optimale koncentration af primærsubstratet på 0,5 – 0,6 mg/l. Monod konstanten,  $K_m$  er ca. 130 – 150 mg-MTBE/l. Dette betyder, at omsætningshastigheden for MTBE vil være meget lav, hvis der ønskes en rensning til et niveau på få µg/l. Herved kan anlægsudgifterne til fuldskalaanlæg blive høje. BTEX'er kan ikke fungere som primærsubstrater. Såfremt det rensede vand skal anvendes til drikkevandsforsyning kræves formentlig efterbehandling ved biostabilisering.
- Biologisk nedbrydning af MTBE ved cometabolisme vurderes at være en potentielt relevant proces ved nedbrydning af MTBE koncentrationer i mg/l området, mens processen næppe er relevant ved rensning til koncentrationer på få µg/l.
- Forsøgene med nedbrydning af MTBE som primærsubstrat har vist, at alle tre anvendte kulturer var istand til at nedbringe MTBE-koncentrationen fra 10 – 50 mg/l til få µg/l. Selv ved de høje initialkoncentrationer observeredes ingen inhibering af bioomsætningen, og nedbrydningshastigheden var således omtrent konstant over hele koncentrationsområdet. Resultaterne er primært opnået med suspenderede kulturer (i vandfasen), mens der arbejdes på at udvikle fastsiddende kulturer (i biofilm) som vil være nemmere at fastholde i filtrene.
- Vækstraten for de testede kulturer til nedbrydning af MTBE som primærsubstrat var meget lav, hvilket i relation til podning til nye reaktorer er kritisk for anvendelse af teknologien i større skala. Der arbejdes med identifikation af substrater som kan stimulere den bakterielle vækst. En af de testede kulturer kan nedbryde MTBE ved 10 °C i et bredt pH område uden dannelse af nedbrydningsproduktet TBA.

### 3.10.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af on-site biologisk nedbrydning af MTBE. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site biologisk nedbrydning af MTBE.

### 3.10.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.9.2/ Miljøprojekt Nr. 613, 2001: MTBE-nedbrydning i grundvand vha. alkanoxiderende mikroorganismer. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.9.3/ Miljøprojekt Nr. 880, 2004: Rensning af MTBE forurenede grundvand i bioreaktor med MTBE som primært substrat. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 3.11 Rensning af MTBE forurenede grundvand (on-site)

### 3.11.1 Afværgeprincip

Som følge af MTBE's store vandopløselighed og ringe sorption til jorden foretages afværge af grundvandsforurening hermed ofte ved afværgepumpning. MTBE koncentrationen i det oppumpede grundvand kan enten søges nedbragt ved biologiske metoder, som beskrevet i afsnit 3.5, eller ved hjælp af filtre med forskellige materialer, hvortil MTBE'en sorberer og hermed tilbageholdes.

### 3.11.2 Udførte aktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende projekter med sorptionsfiltre for MTBE:

#### **3.11.2.1 Sorption af MTBE til organiske polymerer og uorganiske mineraler**

Projektet blev gennemført som et laboratoriestudium og havde til formål at undersøge rensningseffekten af sorptionsfiltre med henholdsvis den organiske polymer, resin og uorganiske mineraler i form af zeoliter.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 15.

### **3.11.2.2 Sorption af MTBE til aktivt kul**

Projektet blev gennemført som et laboratoriestudium og havde til formål at undersøge rensningseffekten overfor MTBE af aktivt kul i et sorptionsfilter.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til referencelisten i slutningen af kapitlet.

### **3.11.3 Resultater af aktiviteter**

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Det vurderes p.t., at det er muligt at rense for MTBE ved hjælp af sorptionsteknikker. Forsøg med organiske sorptionsmaterialer (resiner) har dog ikke vist nogle tekniske eller økonomiske fordele frem for rensning ved hjælp af aktivt kul.
- I litteraturen er der for to typer af organisk resin (Ambersorb) er der fundet sorptionskapaciteter på 11 – 16 mg-MTBE/g-sorptionsmateriale ved en MTBE koncentration på 1 mg/l.
- Med en zeolittype kaldet "high silica moddenite" (uorganisk sorbent) er der i litteraturen fundet en sorptionskapacitet for MTBE svarende til 8 – 12 gange den tilsvarende kapacitet på aktivt kul.
- I teknologiprojektet er der med organiske polymerer Ambersorb 563 og 572 fundet højere sorptionskapaciteter end for aktivt kul af typen Chemviron F400. Ambersorb 563 og 572 er dog relativt dyre og markedsføres ikke mere i Danmark.
- Ved rensning af grundvand for MTBE ved hjælp af aktivt kul må der groft set regnes med et kulforbrug svarende til 10 gange forbruget ved rensning for BTEX.
- Ved rensning fra 1 – få µg-MTBE/l er der observeret en kapacitet for kullene på 4 mg-MTBE/g kul. Brugen af aktivt kul er specielt fordelagtigt ved koncentrationer af MTBE under ca. 500 µg/l.
- Et groft estimat fra litteraturen på kapaciteten af MTBE for aktivt kul er 4 – 11 mg/g- aktivt kul. Kapaciteten afhænger dog af vandets indhold af andre forureningskomponenter, naturligt organisk stof mv.
- Ved laboratoriestudierne under Teknologiprogrammet er der testet 12 typer aktivt kul, hvoraf Chemviron F400 havde højest kapacitet. Yderligere data foreligger ikke p.t.

### **3.11.4 Perspektivering**

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af on-site rensning af MTBE forurennet grundvand. Udgangspunktet for besvarelserne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektiveringen af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.

- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site rensning af MTBE forurenede grundvand.

### 3.11.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.10.1/ Miljøprojekt Nr. 614, 2001: Opdatering af rapporten "Afværgeteknikker for MTBE-forurenede grundvand". Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.10.2/ Miljøprojekt Nr. 745, 2003: Sorptionsmaterialer til on-site rensning af MTBE-forurenede grundvand - screening. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /3.10.3/ Miljøprojekt Nr. 746, 2003: Filtrasorb® 400, aktiv kul til rensning af MTBE-forurenede grundvand - detailundersøgelse. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

## 3.12 Biologisk luftfilter (on-site)

### 3.12.1 Afværgeprincip

I forbindelse med oprensning af forurenede grunde anvendes i mange sammenhænge ekstraktion og rensning af jordens poreluft. Rensningen foretages oftest ved hjælp af filtre med aktivt kul.

Som alternativ til denne traditionelle luftrensning er der inden for det seneste årti udviklet nye teknologier til rensning af oppumpet poreluft, herunder biofiltre. Biofiltre er on-site behandlingsenheder som består af organiske teksturgivende materialer, næringsmidler, vand og mikroorganismer. Forureningskomponenterne i den oppumpede luft nedbrydes biologisk af bakterier i filteret eller tilbageholdes ved adsorptionen til det organiske materiale.

Specielt i forhold til klorerede opløsningsmidler, herunder dichlorethylener (DCE) og vinylchlorid (VC) har udenlandske erfaringer vist, at biofiltre kan være et alternativ til den traditionelle rensning med aktivt kul.

### 3.12.2 Udførte aktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der igangsat første fase af et program om anvendelse af biofiltre til rensning af klorerede opløsningsmidler i oppumpet poreluft. Arbejdet har omfattet et litteraturstudium og laboratorieforsøg med 8 stk. biofiltre. Forsøgsopstillingen bestod af en aerob og en anaerob reaktorlinie med fire biofiltre i hver, to med kompost og to med sphagnum. For hvert filtermateriale var der en biologisk aktiv reaktor og en identisk, biologisk inaktiv referencereaktor, hvis filtermatrice var steriliseret i en autoklave. De aerobe reaktorer blev tilledt gasformig TCE og PCE samt propan/butan-gas som primær kulstofkilde. Til den anaerobe linie anvendtes komprimeret, opfugtet N<sub>2</sub> som bæregas for gasformig TCE og PCE.

Formålet med denne første fase af programmet var:

- At indsamle viden om design af biofiltre med henblik på biologisk nedbrydning af klorerede opløsningsmidler, herunder specielt vinylchlorid.

- At gennemføre laboratorieforsøg med henblik på erfaringsopsamling i forhold til opbygning af biomasse og afprøvning på danske matricematerialer.
- At afprøve og kvantificere oprensningsgraden af klorerede opløsningsmidler og specielt vinylchlorid i biofiltre.
- At redegøre for om biofiltre kan anvendes til reduktion af indholdet af klorerede opløsningsmidler, herunder specielt vinylchlorid i ekstraheret poreluft og, om biofiltre kan være økonomisk attraktive i forhold til traditionel rensning med aktivt kul.

### 3.12.3 Resultater af aktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Ved laboratorieforsøgene blev kompost og sphagnum undersøgt under aerobe og anaerobe forhold.
- De udførte laboratorieforsøg har vist, at der kan opnås omsætning af klorerede opløsningsmidler i biofiltre ved aerob co-metabolsk nedbrydning. Ved forsøgene er der konstateret produktion af kuldioxid og chlorid i filtrene, mens der ikke er påvist indhold af vinylchlorid og dichlorethylen i luftafkastet fra biofiltrene. Dette indikerer, at der under de aktuelle forsøgsbetingelser er opnået en fuldstændig nedbrydning af PCE og TCE til kuldioxid, chlorid og vand. Mineraliseringen startede efter en lag-fase på 20-40 dage.
- Kompost var det mest effektive biofilter, hvor propan- og butannedbrydende mikroorganismer under aerobe betingelser var i stand til at omsætte op til hhv. 39% og 17% af den tilledte mængde TCE og PCE samt 72% af den tilledte propan (0,25 % v/v).
- Biofiltre er baseret på biologiske, fysiske og kemiske processer, hvilket vanskeliggør den praktiske anvendelse af filtrene idet der kræves måling af en række parametre for at vurdere, kontrollere og optimere biofiltrenes funktion.
- Fordelene ved biofiltrene er blandt andet, at de kan adapteres til forskellige temperaturer, at filtermaterialerne er umiddelbart tilgængelige (f.eks. anskaffelse af kompost), at anskaffelsesprisen for filtermateriale er lav, at der under de rette omstændigheder kan opnås fuldstændig mineralisering af de tilstedeværende miljøfremmede stoffer, og at filtrene formentlig vil være velegnede overfor en række blandingsforureninger.
- Ved at optimere driftsbetingelserne vurderes det, at omsætningen af de klorerede opløsningsmidler kan øges væsentligt i forhold til de udførte laboratorieforsøg. Dette vil medføre et potentiale for, at filtrene kan anvendes som renere teknologi til luftrensning ved oprensning af forurenede grunde eller i industrielle sammenhænge.
- Ved mindre anlæg anses biofiltre ikke at være økonomisk konkurrencedygtige i forhold til anvendelse af aktivt kul.
- Ved større anlæg, specielt ved højt indhold af TCE, DCE og VC, vurderes biofiltre at være økonomisk konkurrencedygtige i forhold til anvendelse af aktivt kul.

### 3.12.4 Perspektivering

Som beskrevet i afsnit 1.3 har regionerne i Danmark som led i dette projekt besvaret en række spørgsmål af overordnet karakter vedrørende anvendelse af bl.a. anvendelse af on-site biologisk luftfilter. Udgangspunktet for besvarelser-

ne har været regionernes egen etablering og drift af afværgeprojekter, der således ikke har været støttet af Miljøstyrelsen. Spørgeskemaundersøgelsen ligger til grund for perspektivering af teknikken i dette afsnit.

På baggrund af spørgeskemaundersøgelsen, kan følgende overordnet konkluderes vedrørende regionernes erfaringer i relation til teknikkens anvendelse samt regionernes vurdering af behov for yderligere teknologiudvikling:

- Besvarelserne af spørgeskemaundersøgelsen pegede på, at der ikke er kendskab til om teknikken anvendes.
- Besvarelserne påpegede tillige, at der i regionerne ikke vurderes at være behov for yderligere teknologiudvikling inden for afværge med anvendelse af on-site biologisk luftfilter.

### 3.12.5 Referencer

I dette kapitel er der refereret til følgende projekter:

- /3.11.1/ Miljøprojekt Nr. 670, 2002: Forsøg med biofiltre til rensning af poreluft forurenet med chlorerede opløsningsmidler. Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.



## 4 Teknologiuudviklingsbehov

### 4.1 Baggrund

Nærværende afsnit indeholder en overordnet beskrivelse af teknologiuudviklingsbehovet for afværgeteknikker inden for jord og grundvandsforureninger. Baggrunden for beskrivelsen er gennemgangen af de mange teknologiafprøvninger der allerede er gennemført samt en lang række ideer, der fremkom på TVV -konferencen (Teknologi- og videndeling på jord- og grundvandsområdet).

TVV- konferencen blev afholdt i november 2007 for alle interessenter på jordforureningsområdet med henblik på at samle og optimere ideer til fremtidig teknologiuudvikling. Der deltog ca. 100 personer på konferencen. Formålet med konferencen var dels at gøre status for de teknologiske og metodiske udfordringer der må forventes på jordforureningsområdet de kommende år, dels at samle ideer til udvikling af teknologier og metoder til teknologiuudviklingsprogrammet for 2008.

Den overordnede konklusion fra konferencen var, at der generelt er behov for fortsat overførsel, tilpasning, forfining og videreudvikling af nye og gamle afværgeteknikker. Der er behov for at udvikle og afprøve metoder på pilotskala for at vurdere om de er realistiske at arbejde videre med, og der er behov for at vurdere afværgemetoders bæredygtighed.

I de følgende afsnit er på et meget overordnet niveau beskrevet teknologi udviklingsbehovet.

### 4.2 Afværgeteknikker

Der er behov for udvikling af screeningsværktøjer til valg af afværgeteknikker. Et sådant redskab skal understøtte i valget af de tekniske, økonomiske samt miljø- og energimæssige mest optimale løsninger.

I den forbindelse er det vigtigt at fokusere på en bæredygtig udvikling af afværgeteknikker. Vand og el-forbrug til afværgeanlæg kan minimeres, ligesom en højere anvendelse af in situ teknikker kan reducere transport af forurennet jord. Ved en markant reduktion af CO<sub>2</sub> på oprensningsprojekter kan der skabes opmærksomhed om bæredygtige afværgeteknikker til klimakonferencen i 2009. Bæredygtighed i forhold til afværgeteknikker skal defineres, herunder skal det besluttes, hvorledes og med hvilken vægt projekternes CO<sub>2</sub> regnskab (Carbon Footprint) indregnes. Tidligere erfaringer med miljørigtige oprensninger kan inddrages, herunder projektet "Miljørigtig oprensning af forurennet jord og grundvand" under EU's LIFE ordning.

#### **Jernpartikler i nano-eller mikrostørrelse**

Udenlandske erfaringer og danske laboratorieforsøg peger på, at jernpartikler i nano- eller mikrostørrelse kan anvendes til afværgeforanstaltninger overfor grundvandsforureninger med klorerede opløsningsmidler og en række andre

stoffer. Teknikkernes anvendelighed, design og driftsmæssige samt de miljø- og arbejdsmiljømæssige aspekter bør undersøges. Der vurderes ikke mindst at være behov for vurderinger af nanopartiklers biooptag/-akkumulering og langsigtede effekter på mennesker og miljø.

### **Mikrobiologiske oprensingsmetoder**

Mikrobiologiske oprensingsmetoder vurderes at have et stort potentiale som oprensingsmetoder. En væsentlig del af forureningssagerne i Danmark omfatter biologisk nedbrydelige stoffer, herunder eksempelvis de mange forureninger med aromatiske kulbrinter. Til trods for stoffernes erkendte nedbrydelighed udgør manglende vished om nedbrydningens effekt (opnåeligt oprensningsniveau) og tidsperspektiv ofte en barriere for metodernes anvendelse. Der er således fortsat et behov for erfaringsopsamling og dokumentation af velkendte biologiske processer samt en videreudvikling af metoderne f.eks. ved tilsætning af enzymer, næringsstoffer og/eller bakterier.

En del stoffer kan forekomme i jordmiljøet på forskellige former med forskellig tilgængelighed for mikrobiel nedbrydning. Denne biotilgængelighed er en væsentlig parameter i den konkrete risikovurdering for en given lokalitet, og det kunne være meget værdifuldt, hvis der kunne udvikles en standardiseret metode til test af forureningskomponenters biotilgængelighed under lokalitets-specifikke omstændigheder

I disse år arbejdes der med at udvide anvendelsesområdet for biologiske metoder til også at omfatte stærkt forurenede kildeområder med væsentlige forekomster af residual eller fri fase forurening. I sådanne områder kan oprensningsmulighederne hæmmes af forureningens giftighed, mængde/tilgængelighed (langsommelige opløsnings- og diffusionsprocesser) eller indkapsling/tilklogning af poreskelettet i de forurenede områder som følge af kemiske udfældninger eller biofouling.

Der er behov for at videreudvikle/forbedre de biologiske metoder til i højere grad at kunne anvendes i kildeområder.

### **Stimuleret reduktiv deklorering**

Stimuleret reduktiv deklorering vinder frem som in situ oprensningsteknik overfor forureninger med klorerede opløsningsmidler både i USA og Europa. Ved denne metode injiceres næringssubstrat og specielt tilpassede bakterier, hvorved forureningen nedbrydes biologisk under anaerobe forhold. Det vurderes at der er et stort potentiale i denne teknik og at der er behov for at arbejde videre med at dokumentere og optimere teknikken. Emner kan eksempelvis være benyttelse af teknikken under og omkring huse, tidshorisonter for oprensning, mulighederne for at anvende metoden i markant forurenede kildeområder (jf. omtale under 'mikrobiologiske oprensingsmetoder' ovenfor), anvendelse i kombination med f.eks. surfactants, optimal håndtering og injektion af substrat og/eller bakterier samt myndighedsforhold ved injektion af donor og bioaugmentation. Endvidere er der behov for bedre dokumentation af metodens anvendelighed i kalkmagasiner, herunder diffusions- og sorptionsforholdene for bakterier og substrat i kalkmatricer.

### **Kemisk oxidation**

Ved kemisk oxidation tilsættes forureningszonen oxidationsmidler med det formål at nedbryde forureningskomponenterne. Kemisk oxidation kan benyttes over for forurening med klorerede opløsningsmidler, olieprodukter, PAH'er og mange pesticider. Metoden vinder frem, men der er behov for

yderligere afprøvning og dokumentation, herunder vurdering af forskellige oxidationsmidler, yderligere forståelse af afledte geokemiske effekter og optimal håndtering og injektion af kemikalier.

- Vurdering af forskellige oxidationsmidler (permanganat, fenton, ozon, persulfat mv.) – i dag anvendes primært permanganat
- Evt. kombinationer af oxidationsmidler
- Kombination med f.eks. overfladeaktive stoffer for at øge oprensningseffekten overfor fri fase.
- Oprensning i formationer med lav permeabilitet (herunder betydningen af udfældning af mangandioxid)
- Oprensning i kalkmagasiner
- Anvendelse jordtyper med højt indhold af organisk stof
- Yderligere forståelse af afledte geokemiske effekter (risikovurderinger)
- Optimal håndtering og injektion af kemikalier
- Oprensning af markant forurenede kildeområder, hvor udfældninger og utilstrækkelig tildeling af oxidationsmiddel er oplagte begrænsninger for metoderne

### **Frakturering**

Der er behov for udvikling og afprøvning af metoder til oprensning i lavpermeable aflejringer. For eksempel er videre udvikling af frakturering der er en teknik, hvor der laves en kunstig opsprækning af lavpermeable lag ved at injicere enten gas / luft (pneumatisk frakturering) eller vand / boremudder (hydraulisk frakturering) i bunden af en boring. Metoderne vurderes at have et potentiale men der er behov for yderligere afprøvning og dokumentation.

I flere projekter f.eks med kemisk oxidation er det således vist, at der fra højpermeable zoner i moræneler ved diffusion af oxidationsmidler og forureningskomponenter indenfor en 3 – 5 årig periode kan opnås en betydelig oprensningseffekt op til 15 – 20 cm ind i den tilstødende lermatrice. Ved en sprækkeafstand på 30 – 40 cm i hele oprensningsvolumenet og en effektiv fordeling af behandlingsvæsker i sprækkerne vil det således formentlig være muligt indenfor en realistisk tidsperiode at oprense moræneler med f.eks. kemisk oxidation og muligvis reduktiv dechlorering.

Dette forudsætter dog, at fraktureringsmetoderne udvikles, da det pt. ikke med sikkerhed er muligt at etablere et tilstrækkeligt tæt og jævnt fordelt sprækkesystem. En anden væsentlig ulempe ved metoderne pt. er desuden, at det ikke er muligt at forudsige effektiviteten af fraktureringen på baggrund af en geologisk karakterisering af moræneleren. Dette gør det vanskeligt at inddrage metoden hvor der er behov for en garanti for en stor oprensningseffekt.

### **Termiske metoder**

De termiske metoder er dokumenteret velegnede til effektiv oprensning af kildeområder i en række jordlag. Der er opnået gode felterfaringer med dampinjektion og In Situ Termisk Desorption, mens elektrisk opvarmning ikke er anvendt i Danmark. Der vurderes blandt andet at være følgende teknologiudviklings- behov for de termiske metoder:

- Nedskalering af damp og ISTD anlæg til anvendelse på små lokaliteter (typiske renserier eller mindre olieforurening fra enkelte olietanke mv.)
- Dokumentation af anvendelsen af elektrisk opvarmning i Danmark. Metoden kan have særlige fordele på visse lokaliteter.

- Udvikling og afprøvning af termiske metoder i opsprækkede medier. Oprensning af opsprækket kalk eller hårde bjergarter udgør en helt speciel udfordring, hvor de termiske metoder har betydelige potentialer.
- Dokumentation af forureningsdestruktion in situ samt betydningen af opvarmningen for jordlagenes geotekniske egenskaber.

### **Oprensning af fri fase chlorerede opløsningsmidler**

Der er behov for udvikling og afprøvning af oprensningsmetoder til at håndtere fri fase af chlorerede opløsningsmidler.

### **Injektionsmetoder**

For f.eks. oprensninger ved reduktiv dechlorering og kemisk oxidation er projekternes succes oftest meget nært koblet til i hvor høj grad det lykkes at opnå en præcis og tilstrækkelig og/eller jævn og tilstrækkelig fordeling af de tildelte behandlingsvæsker. Succesfuld tildeling er således en absolut nøgleparameter for mange projekter, hvorfor det vurderes særdeles relevant dels at forbedre eksisterende og udvikle nye metoder hertil og dels at lave en erfaringsopsamling for området, således at der etableres en opdateret 'state og the art' som grundlag for kommende projekter.

### **Reaktive vægge – soil mixing**

Der vurderes at være et potentiale for at videreudvikle og afprøve af reaktive vægge i første omgang via erfaringsopsamling fra eksisterende projekter. F.eks kan metoden kombineres med brug af strøm. En anden potentiale metode er "Soil mixing" hvor forurenede jord iblandes f.eks. nulvalent jern. Metoden er under udvikling og afprøvning i USA og Danmark og vurderes at have et potentiale i Danmark.

### **Ex-site jordbehandling**

En stor del af det forurenede jord bliver i dag kørt til rensning på forskellige jordbehandlingsanlæg, de såkaldte til ex-site anlæg. Anlæggene kan primært rense for flygtige stoffer. Det vurderes, at der er behov for udvikling og afprøvning af metoder, der kan rense for f.eks. tungmetaller. F.eks. afprøvning og dokumentation af jordvask i kombination med elektrodialytisk rensning, hvor de fine partikler separeres fra de grove partikler og renses med elektrodialytisk rensning. Som en del af metoden skal indgå behandling af vandet.

### **In Situ Airsparging, IAS**

IAS er en beluftningsmetode som anvendes overfor flygtige eller aerobt nedbrydelige stoffer i den mættede zone. Metoden havde tidligere stor fokus og der blev identificeret en række begrænsninger for metoden. Gennem de seneste 5 – 7 år er udviklingen af metoden dog fortsat i udlandet, og anvendeligheden af metoden er forbedret væsentligt på flere punkter.

Der vurderes at være behov for en erfaringsopsamling for IAS som grundlag for en nærmere vurdering af det fremtidige udviklings- og dokumentationsbehov i Danmark.

### **Undersøgelsesmetoder**

Der er et stort behov for fortsat udvikling af undersøgelsesmetoder, ikke mindst til detektion og kvantifikation af fri fase samt metoder til fastlæggelse af pålidelige gennemsnitlige niveauer i poreluft samt i grundvand/vandløb.

### 4.3 Udredningsprojekter

Der er et stort antal forureningstrusler der skal håndteres og prioriteres. Det forventes at fremtidens prioriteringer indenfor jord- og grundvandsområdet baseres på risikoscreeninger og risikoanalyser.

#### **Oprensningsniveau**

Ved in situ oprensninger og lignende skal der som regel ske en eftervisning af, at det ønskede opretningsniveau er nået. Tit vil der være en tilbageslagseffekt, når afværgeforanstaltningen stoppes, og der savnes viden om, hvordan og i hvor lang tid forureningsniveauet i fx grundvandet efterfølgende skal monitoreres, for at der er rimelig sikkerhed for, at det ønskede opretningsniveau er nået. Dette kan belyses ved litteraturgennemgang og benchmarking af forskellige monitoringsformer i forhold til det sikkerhedsniveau, der opnås med jordprøver efter en oprensning ved hjælp af afgravning af forurenede jord.

#### **Risikovurdering**

Risikovurdering er et vigtigt redskab til at bestemme, hvornår en forurening skal ryddes op og til hvilket niveau. Risikovurdering kan desuden bruges til at prioritere imellem forureninger. Det er vigtigt med en videreudvikling af risikovurdering, herunder bestemmelse af forureningsflux og håndtering af nedbrydning i mættet og umættet zone.

#### **Forureningsflux**

Forureningsflux er ved at vinde indpas som et supplement til de traditionelle kvalitetskriterier i risikovurdering, men der er stadig en række uafklarede punkter omkring de forskellige fluxbestemmelsesmetoders anvendelighed og de tilknyttede usikkerheder. Der er brug for et modelværktøj til beregning af flux, evt. som en videreudvikling af JAGG, og der er brug for at forbedre de eksisterende metoder til prøvetagning og måling af flux. I første omgang er der behov for at tilvejebringe et fagligt overblik på området.

#### **Naturlig nedbrydning**

Forurenende stoffer bliver nedbrudt i jorden ved naturlig nedbrydning. Der er behov for at eftervise den naturlige nedbrydning, således at den kan indarbejdes i risikovurderinger. Der er desuden behov for yderligere at dokumentere og kvantificere den naturlige nedbrydning, herunder tilvejebringelse af dokumentation for, hvad stofferne nedbrydes til.

#### **Biologiske sensorer og dataopsamling**

På en række andre områder (narkobekæmpelse, detektion af sprængstoffer mv.) sker der i disse år en markant udvikling indenfor biologiske sensorer og trådløs dataoverførsel fra sensorer til centrale enheder. Det vurderes særdeles relevant at foretage en udredning af muligheder og perspektiver for anvendelse af biologiske sensorer samt trådløs datakommunikation på miljøområdet.

#### **Vandrammedirektivet og habitatdirektivet**

Implementering af vandrammedirektiv og habitatdirektiv medfører et større behov for viden om jordforurenings påvirkning af overfladevand og naturområder. I Danmark har man hovedsageligt beskæftiget sig med jordforurening i forhold til grundvand og menneskers sundhed, så der er pt. kun et sparsomt datagrundlag at arbejde ud fra. Der er behov for større viden om interaktion mellem grundvand og overfladevand samt transport og udvaskning af forurenede stoffer til overfladevand. Der er yderligere brug for at udvikle prøvetagningsredskaber/ prøvetagningsprogrammer til overfladevand, der kan give et repræsentativt billede af påvirkning af overfladevand fra jordforure-

ning. Desuden er der brug for en udbygning af tværfaglighed mellem jordområdet og naturområdet. Opbygning af modeller til at beskrive stoftransport og udvaskning af miljøfremmede stoffer fra forskellige jorde kan være relevant, evt. suppleret med en udbygning af JAGG med risikovurdering af overfladevand og naturområder. Inden dette arbejde udføres, er der behov for en erfaringsindsamling fra ind- og udland.

#### **Sikring af indeklimaet**

Det er vigtigt at sikre indeklimaet ved jordforurening under og tæt ved huse. Der kan være problemer med sikring af indeklima mod flygtige forbindelser, blandt andet fordi spredningsvejene for de flygtige forbindelser ind og op gennem bygninger ikke er tilstrækkeligt belyst. Der er behov for udvikling og dokumentation af metoder til fastlæggelse af spredningsveje ind i bygninger (f.eks. tracer- eller røgttest, termografi mv.). Endvidere er der behov for projekter til styrkelse af forståelsen af sammenhængen mellem forureningsniveauet målt under og i bygninger.

#### **Tænk tank på jordområdet**

Der er udtrykt interesse for en tænketank på jordområdet, hvor et ekspertpanel på jordområdet kan vejlede omkring teknologi. Herved kan der ske målretning og udnyttelse af forskningsresultater til gavn for oprensning i Danmark og til støtte for eksport på området. Der ønskes en udredning af, hvordan sådan et samarbejde kan etableres, og hvad behovet er.

# Spørgeskemaer





### Spørgeskema 1: Lokalisering af sager, der IKKE har modtaget tilskud fra Miljøstyrelsens Teknologiprogram

	Region / firma / universitet / bygherre			
	Kontaktperson		Telefon:	
			E-mail:	
	Sagsnavn / adresse			
Generelle data	Teknik/metode der er afprøvet?			
	Start tidspunkt og status?	Måned / år	Afsluttet <input type="checkbox"/>	Ikke afsluttet <input type="checkbox"/>
	Skala?	Laboratorieskala <input type="checkbox"/>	Pilotskala <input type="checkbox"/>	Fuldskala <input type="checkbox"/>
	Behandlingsform?	In situ <input type="checkbox"/>	On site <input type="checkbox"/>	Ex situ <input type="checkbox"/>
	Oprensningsperiode? Kort < ¼ år, Mellem ¼ - 3 år, Lang > 3 år	Kort <input type="checkbox"/>	Mellem <input type="checkbox"/>	Lang <input type="checkbox"/>
Forureningsdata	Primære forureningskomponenter?			
	Forureningsfase?	Poreluft <input type="checkbox"/>	Jord <input type="checkbox"/>	Grundvand <input type="checkbox"/>
	Tilstedeværelse af fri fase?	Ja <input type="checkbox"/>	Nej <input type="checkbox"/>	Ved ikke <input type="checkbox"/>
	Forureningens omfang (relativt)?	Lille <input type="checkbox"/>	Mellem <input type="checkbox"/>	Stor <input type="checkbox"/>
Geologi og hydrogeologi	Geologi i behandlingszonen?	Moræneler <input type="checkbox"/>	Silt <input type="checkbox"/>	Sand <input type="checkbox"/>
		Grus <input type="checkbox"/>	Kalk <input type="checkbox"/>	Tørv <input type="checkbox"/>
		Gytje <input type="checkbox"/>	Slagger <input type="checkbox"/>	Fyld <input type="checkbox"/>
	Hydrogeologi	Mættet <input type="checkbox"/>	Umættet <input type="checkbox"/>	
	Magasin	Sekundært <input type="checkbox"/>	Primært <input type="checkbox"/>	
		Frit <input type="checkbox"/>	Spændt <input type="checkbox"/>	
Målsætning / Effekt	Oprensning af?	Poreluftforurening <input type="checkbox"/>	Jordforurening <input type="checkbox"/>	Grundvandsforurening <input type="checkbox"/>
		Fri fase forurening <input type="checkbox"/>	Andet <input type="checkbox"/>	
	Oprensningseffekt (massefjernelse)? Lav < 50 %, Mellem 50-90 %, Høj > 90 %	Lav <input type="checkbox"/>	Mellem <input type="checkbox"/>	Høj <input type="checkbox"/>
	Blev den planlagte målsætning nået?	Ja <input type="checkbox"/>	Nej <input type="checkbox"/>	Ved ikke <input type="checkbox"/>
Samarbejde	Blev der samarbejdet med universiteter?	Ja <input type="checkbox"/>	Nej <input type="checkbox"/>	Ved ikke <input type="checkbox"/>
	Hvis ja; Hvem?			
	Blev der samarbejdet med udenlandske firmaer?	Ja <input type="checkbox"/>	Nej <input type="checkbox"/>	Ved ikke <input type="checkbox"/>
	Hvis ja; Hvem?			



***Spørgeskema 2: Anvendelse af Miljøstyrelsens teknologiprograms resultater***

For hvert af nedenstående Afværgeteknologier bedes du vurdere forhold vedr. følgende:

- Erfaring med anvendelse af metode
- Anvendelse af resultater fra teknologiprojekterne (både positive og negative)
- Antallet af sager, hvor resultater fra teknologiprojekter har fundet anvendelse
- Om resultaterne fra teknologiprojekterne indgår som grundlag for valg af metode
- Hvordan resultater fra teknologiprojekter indgår i amternes/regionens sager
- Hvor anvendelige resultater fra teknologiprojekterne er for valg og planlægning af metode
- Hvor stort behovet for yderligere teknologiudvikling er for den pågældende metode

I Miljøprojekt nr. 714, 2002 "Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", som findes på Miljøstyrelsens hjemmeside, fremgår en overordnet beskrivelse af de fleste af nedenstående afværgeteknologier.

Region: \_\_\_\_\_

Hvordan sikres den bedst mulige formidling af resultaterne fra Teknologiprojekterne: \_\_\_\_\_

	Har amterne / regionen erfaring med anvendelse af den pågældende teknik / metode?	Har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse på amternes / regionens sager?	På hvor mange sager i amterne / regionen har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse?	Har resultaterne af teknologiprojekterne indgået som en del af grundlaget for valget af den pågældende metode/teknik?	Hvordan indgår teknologiprojektets resultater i amternes / regionens sager?	Hvem sørger primært for at resultaterne af teknologiprojekterne inddrages?	Hvor anvendelige er teknologiprojekternes resultater for valget og planlægningen af metode / teknik?	Hvor stort er behovet for yderligere teknologiudvikling af den pågældende teknik / metode
	Ja Nej Ved ikke	Ja Nej Ved ikke	≤ 2 3 - 9 ≥ 10	Ja Nej Ved ikke	I valg af metode I projektering I kontrol/monitoring	Rådgiver Amt /region Andre	Uanvendelig Beskeden Nogen Meget Ved ikke	Stort Mellem Mindre Unødvendigt Ved ikke
<b>Kildeoprensning</b>								
Passiv ventilation (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Vakuumentilering (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Airsparing (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
In-Well Aerator (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
To-fase ekstraktion (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Forceret udvaskning (Flushing) (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Jordvask (ES)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Dampstripping (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Termisk ledningsevne (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Termisk jordbehandling (ES, OS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Elektrodialytisk jordrensning (OS, ES)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Bioventilation (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Stimuleret biologisk nedbrydning (reduktion/oxidation) (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Stimuleret reduktiv nedbrydning (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Fytoremediering (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

	Har amterne / regionen erfaring med anvendelse af den pågældende teknik / metode?			Har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse på amternes / regionens sager?			På hvor mange sager i amterne / regionen har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse?			Har resultaterne af teknologiprojekterne indgået som en del af grundlaget for valget af den pågældende metode/teknik?			Hvordan indgår teknologiprojektets resultater i amternes / regionens sager?			Hvem sørger primært for at resultaterne af teknologiprojekterne inddrages?			Hvor anvendelige er teknologiprojekternes resultater for valget og planlægningen af metode / teknik?					Hvor stort er behovet for yderligere teknologiudvikling af den pågældende teknik / metode				
	Ja	Nej	Ved ikke	Ja	Nej	Ved ikke	≤ 2	3 - 9	≥ 10	Ja	Nej	Ved ikke	I valg af metode	I projektering	I kontrol/monitoring	Rådgiver	Amt /region	Andre	Uanvendelig	Beskedent	Nogen	Meget	Ved ikke	Stort	Mellem	Mindre	Unødvendigt	Ved ikke
Kemisk oxidation (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geoxidation (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hydraulisk frakturering (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pneumatisk frakturering (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Spredningskontrol</b>																												
Passiv ventilation (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Airsparging (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Moniteret naturlig nedbrydning (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biologisk luftfilter (on-site) (OS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stimuleret biologisk nedbrydning (reduktion/oxidation) (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stimuleret reaktiv dechlorering (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reaktive permeable jernvægge (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jernfilter (OS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biologisk jernfilter (OS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Forceret nedbrydning med HRC (IS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biologisk nedbrydning af MTBE (OS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Har amterne / regionen erfaring med anvendelse af den pågældende teknik / metode?	Har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse på amternes / regionens sager?	På hvor mange sager i amterne / regionen har resultaterne fra teknologiprojekterne fundet anvendelse?	Har resultaterne af teknologiprojekterne indgået som en del af grundlaget for valget af den pågældende metode/teknik?	Hvordan indgår teknologiprojektets resultater i amternes / regionens sager?	Hvem sørger primært for at resultaterne af teknologiprojekterne inddrages?	Hvor anvendelige er teknologiprojekternes resultater for valget og planlægningen af metode / teknik?	Hvor stort er behovet for yderligere teknologiudvikling af den pågældende teknik / metode
	Ja Nej Ved ikke	Ja Nej Ved ikke	≤ 2 3 - 9 ≥ 10	Ja Nej Ved ikke	I valg af metode I projektering I kontrol/monitoring	Rådgiver Amt /region Andre	Uanvendelig Beskeden Nogen Meget Ved ikke	Stort Mellem Mindre Unødvendigt Ved ikke
Sorptionsfiltre for MTBE (OS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Modificeret stripningsmetode, IWA (IS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Byggetekniske foranstaltninger til sikring af indeklima (OS)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Hvordan sikres den bedst mulige formidling af resultaterne fra Teknologiprojekterne: \_\_\_\_\_

*In situ – IS*  
*On site – OS*  
*Ex site - ES*

## Oversigtstabel – Afprøvede teknikker





## Bilag 2. Afprøvede afværgeteknologier inden for jord- og grundvandsforurening

Sted	Teknik	Forurening <sup>2)</sup>	Anvendelse In situ On site Ex. site	Geologi <sup>3)</sup> Ler Silt Sand Grus Kalk, opsprækket Tørv Gytje	Hydrogeologi Umættet zone Mættet zone (frit og spændt magasin)	Lokalitetstørrelse <sup>4)</sup> (relativt) Lille Mellem Stor	Effekt (oprensning-/afskæring) Høj > 90 % Mellem 50-90% Lav < 50 % Virker ikke	Oprensningsperiode Kort < 3/4 år Mellem 3/4 - 3 år Lang. > 3 år	Anlægsudgifter (relativt) Høje Mellem Lave	Driftsudgifter (relativt) Høje Mellem Lave	Afsnit: Nr.
Kildeoprensning	Vakuumentilation	Benzin, BTEX, klorerede opl.	In situ	Sand – grus (kalk)	Umættet	Lille – stor	Mellem	Mellem	Mellem	Mellem	2.1
	Airsparging	Benzin, let gasolie, BTEX, klorerede opl.	In situ	Sand – grus	Mættet zone (frit)	Lille - stor	Mellem	Mellem	Mellem - høje	Mellem	2.2
	Multi-fase ekstraktion	Benzin, let gasolie, BTEX, klorerede opl.	In situ	sand	Kapillarzonen (frit)	Lille - stor	Mellem	Mellem	Mellem - høje	Mellem	2.3
	Forceret udvaskning af tjæreforurening	Tjærekomponenter, PAH, BTEX	In situ	Sand - grus	Umættet og mættet	Mellem - stor	Lav - mellem	Lang	Lave	Lave	2.4
	Flushing	Fri fase af olie- og benzinprodukter samt klorerede opl.	In situ	Sand - grus	Umættet og mættet	-	-	-	-	-	2.5
	Jordvask (ex-situ)	Benzin, let gasolie, chlor. opl.	Ex site	Blandet med grove fraktioner	Umættet og mættet	Lille	Virker ikke	-	<sup>5)</sup>	<sup>5)</sup>	2.6
	Dampstripping	Benzin, BTEX, klorerede opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot	In situ	Sand – grus (kalk)	Umættet og mættet (frit)	Mellem – stor	Høj	Kort	Høje	Høje	2.7
	Termisk ledningsevne med varmelegemer	Benzin, BTEX, klorerede opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære	In situ	Ler, silt, sand	Umættet og mættet (frit)	Lille	Høj <sup>7)</sup>	Kort	Høje	Høje	2.8
	Termisk jordbehandling (ex-situ, on-site)	Tjærekomp., PAH, klorerede opl., BTEX, gasolie mv.	Ex situ, on site	Alle	Umættet og mættet	Mellem - stor	Høj	Kort	Høje	Høje	2.9
	Elektrokemisk jordrensning (ex-situ, on-site)	Metaller	On site, ex site	Ler - kalk	-	Lille	Lav - effekt ikke observeret	Kort	Høje	Høje	2.10
	Stimuleret biologisk nedbrydning – oxidation	Let og tung gasolie	In-situ, on site	Sand - ler - kalk	Mættet	Lille - stor	Mellem - effekt ikke observeret	Kort – Lang	Lave	Lave	2.11
	Stimuleret biologisk nedbrydning – reduktion	Klorerede opl.	In-situ	Sand - ler - kalk	Mættet	Lille - stor	Lav – mellem	Lang	Mellem	Lave - mellem	2.12
	Fytooprensning	Olie, PAH, Metaller, PCB, TCE	In situ	Alle	Umættet	Stor	Lav – mellem	Lang	Lave	Lave	2.13
	Kemisk oxidation	Klorerede opl., olie- og benzinprodukter, PAH'er, mange pesticider	In situ	Sand - grus	Mættet	Mellem - stor	Mellem - høj	Mellem	Mellem - høj	Mellem	2.14
	Geooxidation	Benzin, let gasolie	In situ	Ler	Umættet og mættet	Lille - stor	Effekt ikke observeret	-	Lave – mellem	Lave	2.15
Hydraulisk frakturering	Distributionsmetode til optimering af diverse teknikker	In situ	Ler, silt, kalk, klippe	Umættet og mættet	Mellem - stor	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>	Høje	Høje	2.16	
Pneumatisk frakturering	Distributionsmetode til optimering af diverse teknikker	In situ	Ler, silt, kalk, klippe	Umættet og mættet	Mellem - stor	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>	Høje	Høje	2.17	
Spredningskontrol	Passiv ventilation	Klorerede opl., benzin, BTEX	In situ	Sand – grus (kalk)	Umættet	Lille - stor	Lav	Lang	Lave	Lave	3.1
	Reaktiv barriere (permeabel jernvæg)	PCE, TCE, TCA, hexavalent chrom	In situ	Sand, grus	Mættet	Lille - stor	Mellem – høj	Lang	Høje	Lave	3.2
	Biologisk reaktiv barriere – oxidation	Let og tung gasolie	In situ	Sand, grus	Mættet	Lille - stor	Mellem	Lang	Mellem	Lave	3.3
	Biologisk reaktiv barriere – reduktion	Klorerede opl.	In situ	Sand, kalk	Mættet	Lille - stor	Lav - mellem	Lang	Mellem	Lave	3.4
	Moniteret naturlig nedbrydning	Benzin, let gasolie, klorerede opl.	In situ	-	-	-	-	-	-	-	3.5
	In-Well Aerator	Klorerede opl., BTEX	In Situ	Sand - kalk	Mættet	Lille - stor	Stor	Lang	Lave	Høje	3.6
	Jernfilter til rensning for klorerede opl. (on-site)	PCE, TCE, TCA	On site	-	-	Lille – stor	Lav – høj	-	Høje	Lave	3.7
	Jernfilter til rensning for krom (on-site)	Hexavalent chrom	On site	-	-	Lille - stor	Høj	-	Lave	Lave	3.8
	Kemisk-Biologisk jernfilter (on-site)	PCE, TCE, DCE, VC	On site	-	-	Lille - stor	-	-	Høje	Lave	3.9
	Biologisk nedbrydning af MTBE (on-site)	MTBE	On site	-	-	Lille - stor	-	-	-	-	3.10
	Rensning af MTBE forurenet grundvand (on-site)	MTBE	On site	-	-	Lille – stor	-	-	-	-	3.11
	Biologisk luftfilter (on-site)	Klorerede opl.	On site	-	Umættet	-	-	-	-	-	3.12

- 1) Teknikken kan bruges i vidt forskellige situationer og typisk i kombination med andre oprensningsteknikker. "Svaret" afhænger helt heraf.
- 2) Typiske forureningskomponenter som teknikken kan anvendes overfor. Listen angiver eksempler på stofgrupper og er ikke præcis eller komplet.
- 3) Parentes angiver, at der er særlige forudsætninger som skal være opfyldt for den pågældende jordart
- 4) Her angives ved hvilken minimums størrelse af lokaliteter det er teknisk og økonomisk realistisk at anvende teknikken.
- 5) Kan ikke estimeres på det foreliggende grundlag da metoden tilsyneladende ikke har en signifikant effekt.
- 6) Vurderingen er baseret på oplysninger fra litteraturen og ikke fra feltafprøvning i Danmark.