

Miljøstyrelsen

nr. 714, 2002

Afprøvede teknologier under
Miljøstyrelsens Teknologiprogram
for jord- og grundvandsforurening

Indhold

FORORD	6
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
1.1 AFPRØVEDE TEKNIKKER	11
1.2 LÆSEVEJLEDNING	13
1.3 OVERSIGTSSKEMA	13
2 TEKNIKKER TIL KILDEOPRENSNING	15
2.1 VAKUUMVENTILATION	15
2.1.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	15
2.1.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	16
2.1.3 <i>Økonomi</i>	17
2.2 AIR SPARGING	18
2.2.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	19
2.2.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	19
2.2.3 <i>Økonomi</i>	20
2.3 DAMPSTRIPNING	20
2.3.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	21
2.3.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	25
2.3.3 <i>Økonomi</i>	26
2.4 TERMISK LEDNINGSEVNE	27
2.4.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	28
2.4.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	29
2.4.3 <i>Økonomi</i>	30
2.5 FRAKTURERING	30
2.5.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	31
2.5.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	33
2.5.3 <i>Økonomi</i>	35
2.6 PASSIV VENTILATION	37
2.6.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	38
2.6.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	40
2.6.3 <i>Økonomi</i>	40
2.7 ACCELERERET NEDBRYDNING MED PETROTECH	41
2.7.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	41
2.7.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	42
2.7.3 <i>Økonomi</i>	42
2.8 ELEKTRODIALYTISK JORDRENSNING	42
2.8.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	43
2.8.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	44
2.8.3 <i>Økonomi</i>	45
2.9 FORCERET UDVASKNING AF TJÆREFORURENING	45
2.9.1 <i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	45
2.9.2 <i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	47
2.9.3 <i>Økonomi</i>	48
2.10 JORDVASK	48

2.10.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	49
2.10.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	50
2.10.3	<i>Økonomi</i>	50
2.11	TERMISK JORDBEHANDLING	50
2.11.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	51
2.11.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	51
2.11.3	<i>Økonomi</i>	52
2.12	GEOOXIDATION	52
2.12.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	53
2.12.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	55
2.12.3	<i>Økonomi</i>	56
2.13	FYTOOPRENSNING AF OLIE- OG TJÆREFORURENINGER	56
2.13.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	57
2.13.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	58
2.13.3	<i>Økonomi</i>	59
2.14	FYTOOPRENSNING AF METALFORURENET JORD	59
2.14.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	60
2.14.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	60
2.14.3	<i>Økonomi</i>	61
2.15	FYTOOPRENSNING I KOMBINATION MED GENMODIFICERED BAKTERIER	61
2.15.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	61
2.15.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	62
2.15.3	<i>Økonomi</i>	63
3	TEKNIKKER TIL SPREDNINGSKONTROL	65
3.1	REAKTIVE PERMEABLE VÆGGE	65
3.1.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	66
3.1.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	68
3.1.3	<i>Økonomi</i>	69
3.2	JERNFILTER TIL RENSNING FOR CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER	70
3.2.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	71
3.2.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	72
3.2.3	<i>Økonomi</i>	72
3.3	JERNFILTER TIL RENSNING FOR CHROMFORURENING	73
3.3.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	73
3.3.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	74
3.3.3	<i>Økonomi</i>	74
3.4	KEMISK-BIOLOGISK JERNFILTER	74
3.4.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	75
3.4.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	75
3.4.3	<i>Økonomi</i>	76
3.5	FORCERET NEDBRYDNING MED HRC	76
3.5.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	77
3.5.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	78
3.5.3	<i>Økonomi</i>	78
3.6	BIOLOGISK NEDBRYDNING AF MTBE	79
3.6.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	79
3.6.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	79
3.6.3	<i>Økonomi</i>	80
3.7	SORPTIONSFILTRE FOR MTBE	80
3.7.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	80
3.7.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	81
3.7.3	<i>Økonomi</i>	81
3.8	BIOLOGISK LUFTFILTER	81
3.8.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	82

3.8.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	82
3.8.3	<i>Økonomi</i>	83
3.9	PASSIV VENTILATION	83
3.10	NATURLIG NEDBRYDNING	83
3.11	MODIFICERET STRIPNINGSMETODE, IWA	84
3.11.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	84
3.11.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	87
3.11.3	<i>Økonomi</i>	88
3.12	SIMPLE OG HURTIGE TEKNIKKER TIL SIKRING AF INDEKLIMA	89
3.12.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	89
3.12.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	92
3.12.3	<i>Økonomi</i>	93
4	UNDERSØGELSE-/MÅLETEKNIKKER	95
4.1	FLUXMÅLINGER MED FOLIEMETODE	95
4.1.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	95
4.1.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	96
4.1.3	<i>Økonomi</i>	97
4.2	PASSIV PORELUFTSCREENING MED GORESORBERE	97
4.2.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	97
4.2.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	98
4.2.3	<i>Økonomi</i>	99
4.3	UDVASKNINGSTESTS	100
4.3.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	100
4.3.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	101
4.3.3	<i>Økonomi</i>	102
4.4	UNDERSØGELSE AF POREVANDSPRØVER	102
4.4.1	<i>Formål og teknologiaktiviteter</i>	102
4.4.2	<i>Resultater af teknologiaktiviteter</i>	103
4.4.3	<i>Økonomi</i>	104
5	REFERENCER	105

Forord

Med denne rapport gøres status for aktiviteterne under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening.

Rapporten udgør en sammenskrivning af statusnotater for en række innovative teknikker til oprensning af kildeområder for forurening, til hindring af uacceptabel spredning af forurening fra kildeområder samt for teknikker af mere måleteknisk karakter.

Statusnotaterne er dels udarbejdet af Miljøstyrelsen og dels af eksterne "faglige sekretærer" engageret af Miljøstyrelsen til at bidrage med specifik viden om bestemte teknikker og til at varetage Miljøstyrelsens interesser i forbindelse med afviklingen af projekter under Teknologiprogrammet.

Juni 2002. Tom Heron, NIRAS

Sammenfatning og konklusioner

Siden 1996 har Miljøstyrelsen under Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening ydet støtte til udviklingen af rensnings- og afværgeteknologier på jord- og grundvandsforureningsområdet. Den årlige bevilling til programmet har ligget på ca. 15 millioner kroner og pengene anvendes primært til særlige undersøgelses-, monitorings- eller dokumentationsaktiviteter i tilknytning til amtsligt eller privat finansierede oprensninger.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har til formål at tilvejebringe supplerende information og dokumentation for rensnings- og afværgeteknikker til vurdering af teknologiernes tekniske og økonomiske anvendelighed i Danmark. Tanken er, at det efter kortlægning af forureningsforholdene på en lokalitet er muligt på forhånd at forudsige hvilket oprensningsniveau der kan opnås med de forskellige teknikker. Desuden er det hensigten at lette implementeringen i Danmark af teknikker anvendt internationalt, når forudsætninger vedrørende forureningstype, geologi og dimensionering mv. er beskrevet via en afprøvning under Teknologiprogrammet.

Der er ydet og ydes støtte til dokumentation, udvikling og afprøvning af et bredt spektrum af oprensnings-, monitorings- og måleteknikker. Det er dog meget væsentligt at holde for øje, at teknikkerne afprøvet under Teknologiprogrammet kun udgør et mindre udsnit af samtlige eksisterende teknikker, og at en lang række veldokumenterede metoder ikke omtales i denne rapport.

De afprøvede teknikker under Teknologiprogrammet er i denne rapport overordnet inddelt i hovedgrupperne; "Teknikker til kildeoprensning", "Teknikker til spredningskontrol" og "Undersøgelses-/måleteknikker". Teknikkerne i disse hovedgrupper er beskrevet i denne rapport's kapitel 2, 3 og 4. Endvidere er der i bilag 1 vedlagt et oversigtsskema med nøgledata for samtlige afprøvede teknikker.

Med oversigtsskemaet i bilag 1 som indgang er nærværende rapport tænkt at kunne anvendes som et opslagsværk.

Med de udførte aktiviteter under Teknologiprogrammet er der opnået en væsentligt udbygget viden om et stort antal innovative måle-, undersøgelses- og oprensningsteknikker indenfor jord- og grundvandsområdet. Endvidere er der for en række teknikker etableret et betydeligt erfaringsgrundlag omkring design, anlæg, drift og monitoring.

Hjulpet på vej af teknologiaktiviteterne er der således gennem de seneste år introduceret flere lovende teknikker indenfor jord- og grundvandsområdet herhjemme. Ligeledes er visse af de afprøvede teknikker fundet mindre egnede eller uegnede til danske forhold.

Udbyttet af Teknologiprogrammet vil formentlig først ses på 5 – 10 års sigt i forhold til programmets igangsættelse og vil kræve en løbende vurdering af nye teknikker samt forbedring af eksisterende teknikker.

Summary and conclusions

Since 1996 the Danish Environmental Protection Agency has, under the program for technology development of soil and groundwater contamination, supported the development of technologies within the fields of decontamination and remediation.

The yearly grant for the program is approx. DKK 15 mill and the money is spent primarily on special investigations, monitoring or documentation activities. Typically the projects are co-financed privately or by counties.

The activities under the technology program aim at procurement of supplementary information and at documentation of techniques for decontamination and remediation, in order to evaluate the technical and financial applicability of these technologies in Denmark. The purpose is to make it possible, after thorough site characterizations, to predict the level of remediation, which can be achieved with the different techniques. Furthermore, it is intended, that the implementation in Denmark of techniques used internationally is made easier, when assumption regarding type of contamination, geology and dimensioning etc. have been described via testing under the technology program.

Support has been granted, and still is, for documentation, development and testing of a wide range of techniques for remediation monitoring and measuring. However, it is very important to keep in mind that the techniques tested under the technology program only constitute a small section of all existing techniques and that a lot of well-documented methods is not mentioned in this report.

The tested techniques have been divided into these main groups: "Techniques for source remediation", "Techniques for plume control (dissolved and vapor phase)" and "Characterization techniques/measuring techniques". The techniques in these main groups are described in chapter 2, 3 and 4 of the report. Furthermore, an outline plan with key data for all tested techniques is enclosed in appendix 1.

With the outline plan in appendix 1 as a starting point, the present report is intended to be used as a source of reference.

With the activities carried out under the technology program, our knowledge about a large number of innovative techniques for measuring, characterization and remediation of contaminated soil and groundwater has been expanded substantially. Furthermore, an important level of experience has been established for a series of techniques regarding design, implementation, operation and monitoring.

Thus, with help from the technology program, a range of promising techniques for contaminated soil and groundwater has over the latest years been introduced in Denmark. Also, some of the tested techniques have been found less suitable or unsuitable for the conditions in Denmark.

The full benefit of the technology program will probably not become apparent until 5-10 years after the start of the program and will require a continuous evaluation of new techniques and improvement of existing techniques.

1 Indledning

Med denne rapport gøres der status for aktiviteterne under Miljøstyrelsens "Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening", som i det følgende betegnes "Teknologiprogrammet". Udarbejdelsen af denne status med et katalog over afprøvede teknologier fem år efter ordningens ikrafttræden er foreskrevet i Teknologiprogrammet.

Siden 1996 har Miljøstyrelsen under Teknologiprogrammet ydet støtte til udviklingen af rensnings- og afværgeteknologier på jord- og grundvandsforureningsområdet. Den årlige bevilling til programmet har ligget på ca. 15 millioner kroner og pengene anvendes primært til særlige undersøgelses-, monitorings- eller dokumentationsaktiviteter i tilknytning til amtsligt eller privat finansierede oprensninger.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har til formål at tilvejebringe supplerende information og dokumentation for rensnings- og afværgeteknikker til vurdering af teknologiernes tekniske og økonomiske anvendelighed i Danmark. Tanken er, at det efter kortlægning af forureningsforholdene på en lokalitet er muligt på forhånd at forudsige hvilket oprensningsniveau der kan opnås med de forskellige teknikker. Om muligt ønskes således opstillet prognoser for oprensningsniveauet ved anvendelse af teknikkerne. Desuden er det hensigten at lette implementeringen i Danmark af internationalt anvendt teknikker, når forudsætninger vedrørende forureningstype, geologi og dimensionering mv. er beskrevet via en afprøvning under Teknologiprogrammet.

1.1 Afprøvede teknikker

I tabel 1.1 nedenfor ses en oversigt over teknikker som har modtaget støtte fra Teknologiprogrammet. Oversigten udgør ikke en samlet liste over alle anvendelige teknikker vedrørende jord- og grundvandsforurening, men er blot en status over de teknikker som er afprøvet under Teknologiprogrammet. 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 2001.

De afprøvede teknikker under Teknologiprogrammet er i nedenstående tabel 1.1 og i nærværende rapport inddelt i hovedgrupperne; "Teknikker til kildeoprensning", "Teknikker til spredningskontrol" og Undersøgelses-/måleteknikker.

Tabel 1.1. Oversigt over teknikker under Teknologiprogrammet.

Kildeoprensning	Anvendes overfor
Vakuumentilation	Benzin, chlor. opl., BTEX
Airsparging	Benzin, let gasolie, BTEX, chlor. opl.
Dampstripping	Benzin, BTEX, chlor. opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot
Termisk ledningsevne med varmelegemer	Benzin, BTEX, chl.opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære
Frakturering, vertikale og horisontale boringer	Benzin, let og tung gasolie, BTEX, chlor. opl., næringssalte
Passiv ventilation	Benzin, BTEX, chlor. opl.
Accelereret nedbrydning, PetroTech	Let og tung gasolie
Elektrodialytisk jordrensning	Metaller
Forceret udvaskning af tjæreforurening	Tjærekomponenter, PAH, BTEX
Jordvask	Benzin, let gasolie, chlor. opl.
Termisk jordbehandling	Tjærekomp., PAH, chlor. opl, BTEX, olie mv.
Geooxidation	Benzin, let gasolie
Fytoprensning af organiske stoffer	Olie, PAH
Fytoprensning af tungmetaller	Metaller
Fytoprensning i kombination med genmodificerede bakterier	PCB, TCE, PAH
Spredningskontrol	Anvendes overfor
Reaktive permeable jernvægge	PCE, TCE, TCA, hexavalent chrom
Jernfilter til rensning for chlorerede opløsningsmidler	PCE, TCE, TCA
Jernfilter til rensning for chromforurening	Hexavalent chrom
Biologisk jernfilter	PCE, TCE, DCE, VC
Forceret nedbrydning med HRC	Chlorerede opløsningsmidler
Biologisk nedbrydning af MTBE	MTBE
Sorptionsfiltre for MTBE	MTBE
Sorption af MTBE til aktivt kul	MTBE
Biologisk luftfilter	Chlorerede opløsningsmidler
Passiv ventilation	Benzin, BTEX, chlor. opl.
Naturlig nedbrydning	Benzin, let gasolie, chlor. opl.
Modificeret stripningsmetode, IWA	Chlor. opl., BTEX
Simple, hurtige og billige teknikker til sikring af indeklime	Chlor. Opl., BTEX
Måleteknik	Anvendes overfor
Fluxmålinger	Benzin, let gasolie, chlor. opl.
Passiv poreluftscreening, Goresorber	Benzin, BTEX, chlor.opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære
Udvaskningstests, PCB, TCE, PAH	Olie, chlor. opl. og PAH'er
Undersøgelse af porevandsprøver	TCE, benzin, phenanthren, MTBE

Amterne og private firmaer har fungeret og/eller fungerer som bygherrer på feltprojekterne for teknikkerne i ovenstående tabel 1.1. En række af disse projekter er fulgt og styret af Miljøstyrelsen, mens denne opgave for andre projekter er varetaget af personer fra institutioner udenfor Miljøstyrelsen, de såkaldte faglige sekretærer.

1.2 Læsevejledning

Som nævnt udgør denne rapport en sammenskrivning af statusnotater for ovennævnte teknologier udarbejdet af Miljøstyrelsen og de faglige sekretærer. Disse statusnotater er refereret i kapitel 5 og publiceres løbende på Miljøstyrelsens hjemmeside. Der henvises hertil for mere detaljerede oplysninger om teknologier, gennemførte aktiviteter, resultater, vurderinger mv. I statusnotaterne findes der desuden henvisninger til yderligere litteratur om lokaliteter, undersøgelser, teknikker mv.

Nærværende rapport er tænkt som en generel orientering om de opnåede resultater under Teknologiprogrammet og kan anvendes som et opslagsværk. Således er der i bilag 1 vist en skematisk opstilling af samtlige afprøvede teknikker med angivelse af anvendelighed overfor forskellige forureningskomponenter, jordlagsforhold, hydrogeologi, lokalitetsstørrelse mv. I bilag 1 er der anvendt samme underinddeling af teknikkerne som illustreret ovenfor.

Med udgangspunkt i bilag 1 kan der søges yderligere oplysninger om de enkelte teknikker i kapitel 2, 3 og 4. Kapitel 2 omhandler teknikker til oprensning af kildeområder (områder med betydende jordforurening; residual eller mobil fri fase). Kapitel 3 omhandler teknikker til eliminering af forurening spredt fra kilder (grundvands- og poreluftforurening) samt opløst eller gasformig forurening oppumpet som led i en oprensning. Det skal bemærkes, at enkelte teknikker kan henføres til såvel kapitel 2 som 3. I kapitel 4 behandles projekter omhandlende forskellige former for måleteknik indenfor forureningsområdet.

Kapitel 2, 3 og 4 er underopdelt efter teknik og indeholder en struktureret fremstilling af nøglebeskrivelser og resultater herfor. For mere detaljerede oplysninger henvises til de relevante statusnotater som er anført i kapitel 5.

1.3 Oversigtsskema

Som nævnt ovenfor er der i bilag 1 vedlagt et skema med nøgleoplysninger for samtlige afprøvede teknikker anført i tabel 1.1. Disse oplysninger omfatter blandt andet angivelse af teknikernes anvendelighed overfor forskellige forureningskomponenter, jordlagsforhold, hydrogeologi, lokalitetsstørrelse mv.

Oplysningerne er dels baseret på erfaringer og data indhentet som led i aktiviteter under Teknologiprogrammet og dels baseret på den nationale og internationale litteratur. Desuden er angivelserne for "parametrene" lokalitetsstørrelse, oprensningsperiode, anlægsudgifter og driftsudgifter i høj grad subjektive og baseret på helt overordnede sammenligninger med mulige alternative teknikker i de aktuelle tilfælde. Angivelserne omkring økonomi er desuden meget grove og simplificerede. F.eks. beslaglægger visse teknikker de forurenede arealer i meget lange oprensningsperioder, og der er ikke taget højde for det mulige tab af leje- eller salgsindtægt, mv.

2 Teknikker til kildeoprensning

I dette kapitel gives en overordnet præsentation af virkemåde, udførte teknologiaktiviteter samt hovedresultater og vurderinger heraf for teknikker beregnet til oprensning af kildeområder (områder med betydende jordforurening; residual eller mobil fri fase).

2.1 Vakuumentilation

Vakuumentilation er en in situ afværgeteknik baseret på oppumpning af luft fra den umættede zone. Den engelske betegnelse for teknikken er Soil Vapor Extraction (SVE).

Vakuumentilation er baseret på fjernelse af gasfasen af stoffer med et højt damptryk fra jordlagene, så som BTEX'er og chlorerede opløsningsmidler (flygtige stoffer). Som en sidegevinst medfører ekstraktionen typisk en tilførsel af iltholdig jordluft til oprensningsområdet, hvorved en eventuel biologisk nedbrydning af f.eks. oliekomponenter kan forceres.

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.

Jordventilation 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.

2.1.1 Formål og teknologiaktiviteter

Følgende projekter er udført med særlige teknologiudviklende aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens teknologiprogram:

2.1.1.1 Strøget, Ikast

Projektet omfattede oprensning af en PCE forurening fra den umættet zone, fra toppen af den mættede zone i sandede jordlag samt i et terrænnært lerlag. Den umættede zone havde en vertikal udbredelse på ca. 18 meter. Oprensningen blev foretaget ved en kombination af vakuumentilation i det umættede sand og ler samt afværgepumpning.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At tilvejebringe vidensgrundlag med henblik på at optimere anvendelsen af vakuumentilation under danske forhold.
- At dokumentere effekten af vakuumentilation på den aktuelle grund.
- At identificere nøgleparametre for dimensionering, monitorering og afslutning af oprensninger med vakuumentilation.
- 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 on-line GC-system til fastlæggelse af forureningsniveau i ekstraheret poreluft.
- Detaljeret monitorering af forureningsudbredelsen i poreluften (ved hjælp af borer) terrænnært og dybt i den umættede zone samt i grundvandet i et udvalgt område.
- 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.).

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 1.

2.1.1.2 Drejøgade, København

Projektet omfattede oprensning af forurening med terpentiner 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 vakuumentilation og airsparging fra vandrette borer. Aktiviteter og resultater vedrørende airsparging er præsenteret i afsnit 2.2.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dokumentere vakuumentilation under danske forhold.
- At fastlægge dimensionsgivende parametre.
- At fastlægge det nødvendige monitoreringsprogram til drift og indkøring.
- At fastlægge det nødvendige monitoreringsprogram 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 er 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 monitorering under forskellige driftsformer (kontinuert, cyklisk, ekstraktion fra forskellige filtre mv.).
- Tracertest til vurdering/kontrol af anlæggets dimensionering.
- Monitorering for tilbageslag.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 1/.

2.1.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- 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. Dette skyldes langsom diffusiv frigivelse af forurening fra de lavpermeable lag samt langsom opløsning/afdampning af stof fra eventuel fri fase. Problemerne med at opnå tilstrækkelig oprensning kunne ikke elimineres ved en højere ekstraktionsrate for poreluften. Det var således ikke luftudskiftningen som begrænsede forureningsfjernelsen.

- 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 samholdende vakuume ekstraktion med mobilt udstyr af poreluft fra en boring og registrering af vakuumbredelsen i omkringliggende boringer eller poreluftsonder. Oprensningsstrategien bør dog løbende revurderes og korrigeres under driften.
- Den markant største reduktion af poreluftens forureningsniveau er opnået indenfor de første få dage til to uger. Herefter blev forureningsfjernelsen bestemt af diffusion fra lavpermeable lag samt opløsning/afdampning fra fri fase som nævnt ovenfor.
- Efter pumpestop ses signifikante tilbageslag i poreluftens forureningsniveau. Tilbageslagene var omtrent fuldt udviklede efter ca. en måned og aftog i niveau med antallet af ekstraktionscykluser. På denne baggrund anbefales tilsvarende anlæg drevet cyklisk med genstart af ekstraktionen, når tilbageslaget er omtrent fuldt udviklet.
- 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.
- Monitorering 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 vurderes, 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.

2.1.3 Økonomi

I tabel 2.1 er de omtrentlige omkostninger til den gennemførte oprensning angivet. Det skal bemærkes, at udgifterne omfatter projektets totale omkostninger til såvel vakuumentilation som air sparging. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen.

Tabel 2.1. Skønnede samlede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projekterne henvises til reference 1. De anvendte teknikker har i projektperioden været under udvikling/afprøvning, hvorfor overslagene i tabel 2.1 kan være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Strøget, Ikast	820	1.950	1.192	1.136	3,0	Delvist	Nej
Drejøgade, København	750	4.500	750	1.000	2,5	Delvist	Ja

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.2 Air sparging

Air sparging er en in situ afværgeteknik 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 stoffer med et højt damptryk fra jordlagene, såsom BTEX'er og chlorerede opløsningsmidler (flygtige stoffer), og dels med henblik på at øge den mikrobielle omsætning af aerobt nedbrydelige stoffer, såsom 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 vakuumventilations system til opsamling af flygtige stoffer som overføres (strippes) fra grundvandszonen til den indblæste luft.

Air sparging 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.

Air sparging 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.

2.2.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der på en enkelt lokalitet udført særlige teknologiudviklende aktiviteter.

Projektet blev gennemført på Drejøgade i København og 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 air sparging fra vandrette borer. Aktiviteter og resultater vedrørende vakuumventilationen er præsenteret i afsnit 2.1.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dokumentere anvendelsen af air sparging 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 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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 1 og 1b/.

2.2.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- 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.

- 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.

2.2.3 Økonomi

I tabel 2.2 er de omtrentlige omkostninger til den gennemførte oprensning angivet. Det skal bemærkes, at udgifterne omfatter projektets totale omkostninger til såvel vakuumventilation som air sparging. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen.

Tabel 2.2. Skønnede samlede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises til reference 1 og 1b. De anvendte teknikker har i projektperioden været under udvikling/afprøvning, hvorfor overslagene i tabel 2.2 kan være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Drejøgade	750	4.500	750	1.000	2,5	Delvist	Ja

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.3 Dampstripping

Dampstripping tilhører en gruppe af termiske teknikker 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 chlorerede opløsningsmidler, olieprodukter og creosot i sandede jordlag med indlejrede horisonter af silt og ler.

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 til 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 omkring dampzonen. Ved oprensning i den umættede zone kan det i visse tilfælde være fordelagtigt at tilsætte atmosfærisk luft til den injicerede damp.

Ved dampinjektionen tilføres ilt med dampen og typisk også som led i vakuumventilationen til opsamling af damp, forurening og poreluft. Herved hæves redoxpotentialen 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 der forskes stadig intensivt i emnet.

Til brug for design af anlæg til dampstripping har Miljøstyrelsen udviklet en regnearksbaseret model, hvormed dampzoners og injektionsraters udvikling over tid kan estimeres. Modellen samt brugermanual kan downloades fra Miljøstyrelsens hjemmeside.

2.3.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsen er der gennemført to projekter med dampstripping og yderligere to oprensninger pågår. Det følgende omhandler kortfattet disse projekter.

2.3.1.1 Brüel og Kjær, Nærum

Projektet er afsluttet i 1998 og omfattede oprensning af PCE fra en 15 meter tyk umættet zone primært bestående af sand med indslag og indlejrede silt- og lerlag. Oprensningen blev foretaget ved dampinjektion på skift i tre borer centralt i kildeområdet og samtidig vakuumventilation i syv til ni borer omkring injektionsstedet.

Miljøstyrelsen blev engageret i projektet relativt sent i forløbet - efter at anlægget var sat i drift og driftsstrategien fastlagt. Aktiviteterne under teknologipuljen har derfor primært omhandlet supplerende monitoring og redegørelse for teorien bag dampoprensning samt rapportering af data fra oprensningen.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At beskrive teorien bag dampstripping som oprensningsmetode.
- At foretage supplerende monitoring til belysning af udbredelsen af dampzoner og oprensningseffekt.

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

- Foretaget en grundig teoretisk gennemgang og beskrivelse af dampstripping som oprensningsmetode.
- Foretaget supplerende monitoring af temperatur og tryk. Monitoringen af temperatur er foretaget med termofølere med automatisk dataopsamling, mens trykmålingerne er foretaget ved terræn på målerør på forskellig dybde i den umættede zone.
- Foretaget supplerende monitoring af forureningsniveauet i den ekstraherede gasfase ved hjælp af måleudstyr udviklet af Brüel og Kjær suppleret med akkrediterede kulrørsmålinger.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 2/.

2.3.1.2 Industrivej, Hedehusene

Projektet omfatter oprensning primært af PCE i en ca. 6 - 8 meter tyk umættet zone primært 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 bliver foretaget i tre delområder på skift og er netop afsluttet i det første delområde. 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 foretages ved dampinjektion i forureningens periferi og ekstraktion af poreluft, damp, grundvand og kondensat centralt i kildeområderne.

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:

- Sonderinger 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 boringer opkoblet til SRO samt for hver 0,5 til 0,75 m i boringer 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 boringer i en treårig periode efter standsning af opvarmningen.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 2/.

2.3.1.3 Østerbro, Aalborg

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 et foretaget ved dampinjektion i forureningens periferi og ekstraktion af poreluft, damp, grundvand og kondensat centralt i kildeområderne. Projektet er afsluttet i foråret 2001.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At tilvejebringe en detaljeret dokumentation af den horisontale temperaturudbredelse i og omkring kildeområdet.
- At tilvejebringe en detaljeret belysning af dampfrontens vertikale udseende og udvikling over tid udvalgte steder i kildeområdet.
- At belyse eventuel vertikal mobilisering af fri fase ned i lerlaget under oprensningens område.
- At dokumentere trykforholdene i og omkring dampzonen under forskellige driftsscenerier.
- På et helt overordnet niveau at dokumentere en eventuel forureningsfjernelse ved in situ oxidation (vådoxidation).
- At tilvejebringe en detaljeret dokumentation af forureningsfjernelsen under cyklisk drift.
- At belyse variationer i fugtigheden af den ekstraherede gasfase under cyklisk drift.

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.

2.3.1.4 Vesterbro, Odense

Projektet omfatter oprensning af PCE fra den umættede zone i sandede og siltede jordlag fra ca. 2 – 6 m u.t. Oprensningen foretages ved en termisk assisteret vakuumventilation, hvor der foretages dampinjektion i en boring under forureningen samt vakuumventilation fra to sektionerede horisontale boringer og én vertikal boring i de forurenede jordlag. Sideløbende hermed foretages grundvandsoppumpning fra områdets terrænnære magasin umiddelbart under oprensningsområdet.

Aktiviteterne finansieret af Miljøstyrelsens teknologiprogram har følgende formål:

- At styrke designgrundlaget for oprensningen ved modelstudier af varmeudbredelsen i forbindelse med dampinjektionen.
- At tilvejebringe en detaljeret dokumentation af fjernelsesraten for PCE.
- At foretage en detaljeret monitoring af forureningsforholdene i den mættede zone under oprensningsområdet.
- At foretage en detaljeret temperaturmonitoring horisontalt og vertikalt under oprensningen.
- At dokumentere en eventuel forureningsspredning i grundvandszonen.
- At dokumentere en eventuel forureningsspredning i den umættede zone.
- At dokumentere eventuelle geotekniske sætninger som følge af oprensningen.
- At opstille et totalt miljøregnskab for oprensningen.

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

- Modelsimuleringer 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.
- Monitoring af forureningsniveauet i den ekstraherede gasfase ved laboratorieanalyser og ved automatiske samt manuelle PID-målinger.
- Monitoring af forureningsforholdene i den mættede zone under oprensningsområdet ved laboratorieanalyse af ekstraheret grundvand/kondensat.
- Temperaturmonitoring ved hjælp af temperaturboringer til manuel aflæsning og boringer 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.

2.3.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- 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 chlorerede 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 og bør som udgangspunkt ikke foretages.
- 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 kondensatudskilning 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 CO₂ i den ekstraherede gasfase. Dette indhold af CO₂ kan ikke alene stamme fra afgasning 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 pejletidsserier bør filtersætninger og estimater af nødvendig grundvandsoppumpning 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 og undersøges nærmere.
- 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. Metoderne er beskrevet i /ref. 2/.
- 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.

2.3.3 Økonomi

I tabel 2.3 er de omtrentlige omkostninger til de gennemførte oprensninger angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da dampstripping i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Udgifterne for et

tilsvarende efterfølgende projekt svarende til Østerbro, Aalborg er baseret på grove skøn.

Tabel 2.3. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises til reference 2. De anvendte teknikker har under projekterne været under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Brüel & Kjær, Nærum	750	2.050	1.000	860	1	Delvist	Ja, grunden afmeldt
Industrivej, Hedehusene	2.200	22.000	2.080	8.000	0,8	Ja/vides ikke endnu	Ja/vides ikke endnu
Østerbro, Aalborg	200	400	480	1.500	0,4	Ja/usikkert	Ja
Østerbro, Aalborg: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	150	400	300	1.300	0,3	-	-
Vesterbro, Odense	100	1.000 ⁵⁾	60	400 ⁵⁾	0,3	Usikkert	Ja
Vesterbro, Odense :Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	100	600	80	300	0,2	-	-

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuell eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Udgifter til den udførte vakuumeekstraktion er ikke medtaget, da lokalitetens beliggenhed har medført behov for etablering af horisontale ventilationsboringer med sektionerede filtre. Anlægget til vakuumeekstraktion har således af denne årsag – og ikke på grund af dampinjektionen - været væsentligt dyrere ved traditionelle anlæg.

2.4 Termisk ledningsevne

Oprensningsmetoden "Termisk ledningsevne" tilhører en gruppe af termiske teknikker 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.

Termisk ledningsevne som oprensingsmetode er udviklet i USA og i første omgang tiltænkt oprensning af stoffer med høje kogepunkter, som PCB, creosot og tjære, der ikke - eller kun meget vanskeligt - kan oprenses med andre in situ metoder. Teknikken forventes at være effektiv til oprensning af stoffer med forholdsvis lave kogepunkter, såsom chlorerede opløsningsmidler og gasolie.

Ved oprensning med termisk ledningsevne placeres filtersatte borer (stål) udstyret med varmelegemer i det forurenede område. Varmelegemerne opvarmes til 700 - 1.000 °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. 700 °C. Ved denne opvarmning bringes al jordvæske samt langt de fleste forureningskomponenter på gasfase. Ved vakuumelekstraktion fra borerne med varmelegemerne samt eventuelle supplerende vakuumborer fjernes vanddamp og forureningskomponenter på gasfase. En stor del af forureningskomponenterne vil oxideres i de ekstremt 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.

Varmelegemerne installeres typisk i borer placeret centralt i forureningen og opvarmningen foretages således "indefra- og ud". Ved den meget kraftige opvarmning bringes forureningskomponenterne på gasform og ekstraheres i retning mod varmeboringerne. Opvarmningen ved varmeledning foregår forholdsvis langsomt, mens forureningsfjernelsen ved ekstraktion af gasfasen er hurtig. Endvidere er den pneumatiske ledningsevne i de opvarmede og udtørrede jordlag markant højere end i de omkringliggende ikke-udtørrede områder. Herved minimeres risikoen for utilsigtet spredning af forureningen fra den centrale del af kildeområdet.

Metodens største ulempe er, at opvarmningen ved termisk ledningsevne er langsom og meget energikrævende. Metoden kan 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. Endelig medfører de høje arbejdstemperaturer risiko for sætninger samt behov for sikring af udstyr, sikring mod opvarmning af bygninger/ledninger mv.

2.4.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsen gennemføres i 2001 og 2002 en oprensning ved termisk ledningsevne af PCE forurenede moræneler på en tidligere rensrigrund på Ravnsbjergvej, Alsønderup. Forureningen er beliggende fra ca. 1 - 10 m u.t. i et velafgrænset kildeområde (radius på 2 - 3 meter) delvis under den tidligere rensribygning.

Oprensningen foretages ved termisk ledningsevne fra tre kombinerede varme- og ekstraktionsboringer. Anlægget er etableret men er på grund af tekniske problemer med varmelegemerne ikke i planmæssig drift.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har til formål:

- At dokumentere temperaturudbredelsen i oprensingsområdet rummeligt og tidsmæssigt. Temperaturen monitoreres i to traceer fra centrum af forureningskilden og bort herfra.

- At belyse risikoen for væsentlige geotekniske ændringer af jordlagene som følge af opvarmningen
- At dokumentere eventuelle sætninger af terræn, bygninger mv. samt geotekniske ændringer som følge af oprensningen.
- At belyse hvilke effekter opvarmningen har på bakterieantallet i jorden der har været opvarmet.
- At udarbejde et totalt miljøregnskab for oprensningen.
- At foretage en detaljeret dokumentation af oprensningseffekten.
- At foretage en detaljeret dokumentation af forureningsniveauet i den ekstraherede poreluft samt chlorid indholdet i kondenseret væske.

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

- Detaljeret monitoring af temperaturen i to traceer gennem centrum af forureningskilden.
- Laboratorieundersøgelse med opvarmning og belastning af intakte jordprøver udtaget på lokaliteten til dokumentation af volumen og styrkeændringer.
- Præcisionsnivelementer før og efter opvarmningen til dokumentation af eventuelle sætninger af terræn, bygninger mv.
- Analyse af total kimal på jordprøver før og efter opvarmningen
- Udarbejdelse af overordnet og detaljeret miljøregnskab for projektet ved hjælp af en model udviklet af Banestyrelsen under LIFE 96. Til sammenligning opstilles et tilsvarende regnskab for en tænkt oprensning af samme forurening ved opboring af kilden efter nedrivning af bygningen på grunden.
- Udtagelse af intakte jordkerner til 15 m u.t. før og efter oprensningen samt analyse af et stort antal prøver.
- Analyse af ekstraheret poreluft og headspace fra kondensat. Endvidere registreres NaOH forbruget i behandlingsanlægget samt chlorid i den ekstraherede væske til estimering af mængden af PCE som oxideres under ekstraktionen.

2.4.2 Resultater af teknologiaktiviteter

I det følgende præsenteres de væsentligste resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne som er igangsat i slutningen af 2001:

- Laboratorieundersøgelser af jordprøver fra lokaliteten har vist, at opvarmningen af en 10 meter jordsøjle kan medføre vertikale sætninger på ca. 2 cm. Desuden viser undersøgelserne, at der kan forekomme signifikante svind i horisontal retning. Dette kan medføre horisontale differenssætninger mellem fundament og vægge/tagkonstruktion og monitoreres under driften.
- Ved opvarmning terrænnært kan der opnås væsentlige energibesparelser ved isolering af terrænoverfladen i oprensningsområdet.
- 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 helt specielle legeringer til boringsinstallationen og beskyttelseskapperne omkring varmelegemerne.
- For at hindre sammensmeltning af varmelegemer er det afgørende, at effekten til varmelegemerne reguleres individuelt ud fra temperaturen ved de enkelte varmelegemer.

2.4.3 Økonomi

I tabel 2.4 er de omtrentlige omkostninger til den planlagte oprensning angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da termisk ledningsevne i projektperioden er under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til det aktuelle projekt være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Derfor er der i tabel 2.4 desuden angivet groft skønnede beløb for tilsvarende efterfølgende projekter.

Tabel 2.4. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet henvises til reference 2. Den anvendte teknik er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne i tabel 2.4 typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Beløbene angivet for de efterfølgende projekter udgør således grove skøn.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Ravnsbjergvej, Alsønderup	714	3.650	Budget: 500	Budget: 1.000	¾	Forventet, Ja	Forventet, Ja

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.5 Frakturering

Frakturering er en in situ teknik, hvor en kunstig sprække dannes ved injektion af gas eller vand/boremudder i jordlagene ved hjælp af borer med en særlig indretning.

Princippet i frakturering er, at der i lavpermeable og muligt opsprækkede jordlag (ler, kalk, hårde bjergarter) etableres tynde horisonter (lag) med en høj ledningsevne. Disse høypermeable lag vil dels have kontakt til den lavpermeable jordmatrice over en stor flade og vil dels stå i hydraulisk forbindelse med eventuelle naturlige høypermeable sprækkezoner i jordlagene. Herved øges muligheden for 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 oppumpning fra olie- eller grundvandsreservoirer.

Gennem de senere år er fraktureringsteknikkerne tilpasset anvendelse terrænnært (fra ca. 1-2 m u.t. til ca. 8 m u.t.) og brugt ved oprensning af jord og grundvandsforurening. I opretningsprojekter anvendes frakturering

således ofte i kombination med vakuumventilering, dobbeltfase ekstraktion (Engelsk: Dual Phase Extraction, DPE) og oppumpning af fri fase.

De kunstige frakturer kan etableres på flere måder. Der kan således anvendes følgende typer af væske og gas til etablering af sprækkerne: Trykluft/gas, rent vand, samt en specielt udformet geléagtig klæbende boremudder, der består af guar gummi gelé, sand og vand. Når der injiceres luft eller gas benævnes metoden **pneumatisk frakturering**. Såfremt der anvendes rent vand eller vand tilsat gelé (oftest guar gummi) og eventuelt sand benævnes metoden **hydraulisk frakturering**.

En kunstig sprækkes form og geometri vil være bestemt af lokalitetsspecifikke geologiske og geotekniske forhold. Sprækken vil ideelt set formes som en oval tallerken, men opnår i praksis ofte andre former og udbredelser. Erfaringer viser, at sprækkerne ofte vil få en foretrukken vandret udbredelse i dybder fra én til otte 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.

2.5.1 Formål og teknologiaktiviteter

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. Hovedresultater fra udredningsprojekterne ses i afsnit 2.2.2, mens feltprojekterne beskrives kortfattet i det følgende:

2.5.1.1 Vestergade 10, Haslev

På lokaliteten er der i moræneler 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 uforurenede 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 borerer ved hydraulisk frakturering.
- Registrering af sprækkernes udbredelse ved registrering af jordhævningen i en afstand op til 5 m fra injektionsstedet.
- Udført kerneprøvetagning til bestemmelse af sprækkeudbredelsen for de to testsprækker samt tykkelse og orientering af sprækkerne.
- Foretaget tests med to fase ekstraktion på de to borerer før og efter etableringen af de kunstige sprækker.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 3/.

2.5.1.2 Slagelsevej, Næstved

På lokaliteten er der i moræneler 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 borerer/dræn i fem meters dybde blev etableret. Langs delstykker af de vandrette borerer/dræn blev der etableret et antal horisontale sprækker ved horisontal hydraulisk frakturering (Engelsk: Horizontal Hydraulic Fracturing, HHF). 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 borerer / dræn er en økonomisk fordelagtig og effektiv afværgeteknik i en lavpermeabel leraflejring som findes på 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 borerer 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 dræne/sprækkerne.
- Dokumentation for og sammenligning af opnåede hydrauliske ydelser for vandrette dræn etableret i ufraktureret henholdsvis fraktureret moræneler.

- Dokumentation af den opnåede hydrauliske afsenkning ("grundvandssenkning") 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 /ref. 3/.

2.5.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- For mættet zone i moræneler er der tendens til øget influensradius/hydraulisk effekt af lodrette borer med horisontale frakturer.
- Det er rimeligt at forvente en afkortet driftstid af oprensningen på danske afværgeprojekter i moræneler. Ingen danske erfaringer er opnået endnu.
- Fraktureringsmetoden står sjældent alene men kan anvendes i kombination med en lang række andre afværgeteknikker.
- Indgående geologisk og geoteknisk karakterisering af en potentiel fraktureringslokalitet er nødvendig, da den opsprækkede geologiske formation muligvis har tilstrækkelig permeabilitet, så en yderligere frakturering ikke behøves.
- Frakturering nær bygninger og rørledninger behøver 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 sprækkemodeller 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 med en hydraulisk ledningsevne på omkring 3 størrelsesordener større end formationens.
- Fyldmaterialer der anvendes i hydraulisk inducerede sprækker skal være så velsorterede som muligt med meget lille kornstørrelsesvariation i sandfraktionen. 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 dybde. Nettohævningen er ligefrem proportional med sprækkens apertur efter at injektionstrykket er taget af sprækken. Sprækkens længde bliver i mange situationer typisk 3 gange afstanden fra jordoverfladen til injektionspunktet i dybder indtil 5-8 m u.t. Når en sprække etableres i mere end ca. 5-8 meters dybde bliver forholdet mellem sprækkelængde og dybde normalt mindre end 3, da sprækken til start udvides ved, at overjorden komprimeres før en egentlig jordhævning finder sted.
- 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 pneumatisk frakturering kræves typisk et noget højere initial injektionstryk end ved hydraulisk frakturering, da der normalt ikke laves indskæringer i boringsvæggen ved denne fraktureringsmetode. Trykgradienten ved brug af luft stiger med 0,67-1,11 atm pr. meters injektionsdybde.
- Ved hjælp af lodrette boringer 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. Hvorvidt den fulde effekt af fraktureringen er varig, eller hvorvidt frakturerne lukkes med tiden, er p.t. usikkert.
- Erfaringer fra etableringen af testsprækker fra lodrette boringer 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 boringer har vist, at det er vanskeligt at forudsige sprækkernes resulterende orientering.
- Projektet med frakturering fra vandrette boringer 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 boringer 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 betydende forøgelse af den hydrauliske kapacitet i forhold til et ikke fraktureret vandret dræn.

2.5.3 Økonomi

Tabel 2.5. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet henvises til reference 2. Den anvendte teknik er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne i tabel 2.5 typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Beløbene angivet for de efterfølgende projekter udgør således grove skøn.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Vestergade 10, Haslev	-	250 ⁵⁾	-	-	-	-	-
Vestergade 10, Haslev, efterfølgende projekt	-	110 – 135 ⁵⁾	-	-	-	-	-
Slagelsevej, Næstved	-	500 ⁵⁾	-	-	-	-	-
Slagelsevej, Næstved, efterfølgende projekt	-	700 – 1.050 ⁵⁾	-	-	-	-	-

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuell eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Udgifterne omfatter entreprenør, amerikansk konsulent, indledende geotekniske undersøgelser og vurdering af stand af bygninger.

2.5.3.1 Frakturering fra lodrette borer - litteraturværdier

Som udgangspunkt er prisen på at etablere kunstige sprækker fra lodrette borer med luft eller vand/boremudder ens. Erfaringen viser, at stykprisen for en kunstig sprække er afhængig af flere forhold, hvor den mest betydelige er antallet af sprækker der skal etableres i den enkelte boring.

Den amerikanske miljøstyrelse har beregnet en typisk pris til mellem 950 og 1.450 US\$ (1993 pristan) pr. sprække dvs. omkring kr. 10.000 (1 US\$ = kr. 8.0). En anden opgørelse af sprækkeprisen er foretaget af det amerikanske rådgivende firma FrX. Denne opgørelse er foretaget på baggrund af projekter udført de seneste fem år i USA. Projekterne omfatter frakturering i kombination med vakuumeekstraktion, biologisk oprensning og dobbeltfaseekstraktion. Priserne for etableringen af sprækkerne har varieret fra under 1.500 US\$ og op til 2.500 US\$ svarende til ca. kr. 28.000,-. Prisen per sprække for eksperimentelle forskningsprojekter med elektrosmose og barrierteknologi er noget højere; over 2.500 US\$.

2.5.3.2 Frakturering fra lodret boring – værdier fra teknologiprojekter

Jævnfør tabel 2.5 er anlægsudgiften forbundet med komplet installation af to lodrette testboringer med frakturering i én dybde i hver boring har beløbet sig til i alt ca. kr. 250.000,- eller ca. kr. 125.000,- pr. boring udbygget med frakturering (2001 prisniveau, ekskl. moms). I de angivne priser er indregnet alle udgifter til entreprenør, amerikansk konsulent, udgifter til indledende geotekniske undersøgelser og vurdering af byggeriets tilstand. Derimod er udgifter forbundet med sprækkeidentifikation, hydrauliske tests, etablering af monitoringsboringer, tilsynsrapport samt udgifter til rådgiverydelser ikke indeholdt. Dette skyldes, at disse aktiviteter ikke forventes at være del af etablering af en "kommerciel dansk sprække" fra en lodret boring.

De anførte priser vurderes af projektets rådgiver at være høje, idet der er afsat beløb til forsøgsopstilling samt amerikansk konsulent i fuld tid under etableringen. Endvidere havde entreprenøren kalkuleret med ekstra mandskab under frakturering for at sikre succesfuld og problemfri projekt gennemførelse. Det vurderes, at etablering af en afværgeboring (5-10 m dyb) udbygget med en hydraulisk sprække på kommercielle vilkår kan udføres for ca. kr. 50.000,- - 75.000,- pr. stk. Herudover skal der regnes med ca. kr. 50.000,- til geotekniske undersøgelser samt ca. kr. 10.000,- per lokalitet til tilstandsvurdering af bygninger. Enhedsprisen vil naturligvis være afhængig af den aktuelle opgaves omfang, herunder antal af boringer og sprækker, samt de aktuelle dybder. Med en stigende erfaringsopbygning hos entreprenøren og rådgiver må det desuden forventes, at behovet for ekstern konsulent bliver mindre.

2.5.3.3 Frakturering fra horisontal boring / dræn – værdier fra teknologiprojektet

Jævnfør tabel 2.5 beløber anlægsudgiften, ved komplet etablering af to horisontalt frakturerede dræn (Ø 110 mm) på 35 meter, sig til kr. 7.100,- per løbende meter dræn (lbm) eller en totaludgift på ca. kr. 500.000,- (prisniveau 2000, ekskl. moms). I den angivne pris per lbm er indregnet totaludgifterne til entreprenør, amerikansk konsulent, samt udgifter forbundet med indledende geologiske og geotekniske undersøgelser (sigteanalyse, OCR-værdi bestemmelse, mv.). Derimod er udgifterne forbundet med den gennemførte sprækkeidentifikation, hydrauliske tests, supplerende geologiske undersøgelser (sonderinger, incl. georadarsondering), etablering af nye monitoringsboringer samt udgifter til rådgiverydelser ikke indeholdt.

I det konkrete projekt skønnede rådgiveren, at to frakturerede dræn ville have samme hydrauliske effekt som 3-5 almindeligt etablerede horisontale dræn (uden frakturering). Anlægsudgiften til de frakturerede dræn skal derfor sammenholdes med udgiften til etablering af 3-5 ikke frakturerede dræn med en længde på 35 m. Denne udgift er anslået til ca. kr. 3.400,- pr. lbm., eller en totaludgift på mellem kr. 360.000,- og kr. 600.000,-. Den anførte lbm-pris for komplet etablering af frakturer fra vandrette dræn vurderes dog at være for lav i relation til efterfølgende projekter. Dette skyldes, at fraktureringsarbejdet på den aktuelle lokalitet skønnes at være udført af entreprenøren uden fortjeneste.

Set i lyset af ovenstående, samt ud fra det faktum, at hydraulisk frakturering ved horisontal boreteknik stadig er på forsøgsstadiet i Danmark, og hermed kræver store udgifter til såvel rådgivnings- og entreprenørydelser, vurderes pris per løbende meter på kr. 10.000,- - 15.000,- at være realistisk ved fremtidige projekter herhjemme.

Det har ikke været muligt at finde udenlandske opgørelser på anlægsudgifter ved frakturering af horisontale dræn / borer.

2.6 Passiv ventilation

Afværgeteknikken passiv ventilation er udviklet i USA gennem de senere år. Teknikken har primært været benyttet til fjernelse af flygtige organiske komponenter (chlorerede opløsningsmidler og benzin) fra den umættede zone. Afhængig af de geologiske og forureningsmæssige forhold samt kravene til oprensingsniveau og -hastighed kan metoden anvendes såvel i som udenfor kildeområder.

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 vejfronter.

Trykgradienterne mellem atmosfæren og jordmiljøet skyldes forsinkelsen af trykforplantningen mellem atmosfæren og den umættede zone. Størrelsen af trykforskellen samt -forsinkelsen afhænger blandt andet af den overliggende jords tykkelse og effektive permeabilitet samt den hastighed, hvormed atmosfæretrykket ændrer sig. På grund af trykforsinkelse og -dæmpning vil der stort set altid være en trykgradient af varierende størrelse og retning. 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. 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 svanehal 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 forurenede umættede zone være et lavpermeabelt lag 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.

2.6.1 Formål og teknologiaktiviteter

I Danmark gennemføres der tre oprensninger med passiv ventilation støttet af Teknologiprogrammet. Projekterne er igangsat ultimo 1999 og forventes afsluttet i 2002. Herudover er der i Danmark igangsat en række andre projekter med metoden. På de tre teknologiprojekter undersøges en række faktorer indflydelse på massefjernelsen af klorerede opløsningsmidler, idet alle tre grunde er forurenet med PCE. På den ene grund undersøges udover den passive ventilation også virkning af små sol- og vinddrevne pumper til understøtning af udpumpningen i perioder med stigende eller stabilt atmosfæretryk.

De tre projekter som udføres med særlige teknologiudviklende aktiviteter under Teknologiprogrammet er:

2.6.1.1 Allerød

Lokaliteten i Allerød omfatter tre grunde i samme område og med omtrent samme geologiske opbygning. Grundene er primært forurenet med PCE fra tidligere renservirksomhed. Området er opbygget af ca. 10 meter moræneler fra terræn, underlejret af minimum 10 meter smeltevandssand, hvoraf de øverste to til fem meter er umættede. Niveaue af PCE i moræneleren var før oprensningen ca. 50 – 500 mg/m³.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet er:

- 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/udføres følgende:

- Etablering af afværgeboringer centralt i de forurenede områder. Boringerne er forsynet med envejsventiler og kulfiltre.
- 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.

2.6.1.2 Askov

Forureningen i Askov består overvejende af PCE fra et tidligere renseri. Geologien på lokaliteten er karakteriseret ved et ca. 10 meter tykt lag af moræneler som er underlejret af skiftende smeltevandsaflejringer ned til 90 m u.t. Det frie vandspejl findes ca. 30 m u.t., og den umættede zone under ler er således ca. 20 m tyk. Koncentrationen af PCE i poreluften i den sandede del af den umættede zone var før oprensningen på 40-600 mg/m³. I porevand i moræneleren er der fundet op til 350 µg-PCE/l, og i toppen af grundvandszonen er der konstateret ca. 100 µg-PCE/l.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet er:

- 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/udføres følgende:

- Etablering af seks boringer med i alt 11 filtre i det forurenede område. Filtrene er etableret henholdsvis fra ca. 10 – 14 m u.t. og fra 14 – 16 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.

2.6.1.3 Fakse

Forureningen i Fakse består overvejende af PCE fra et tidligere renseri. Geologien på lokaliteten består 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.

Ved forureningsundersøgelserne er der i den terrænnære moræneler påvist indhold af PCE på op til 390 mg/kg svarende til forekomst af fri fase. I poreluften i det underliggende sandlag er der konstateret indhold af PCE på op til ca. 260 mg/m³ og i poreluften i kalken op til 80 mg/m³.

Formålet med aktiviteterne under Teknologiprogrammet er:

- 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 filtre i det trufne sandlag og to filtre i den opsprækkede kalk. 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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 4/.

2.6.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Anvendelse af passiv ventilation forudsætter en speciel geologi, med lavpermeabelt lag tæt på terræn underlejret af tørt sand/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.
- Metoden 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 har lave etableringsomkostninger.
- Metoden har lave driftsomkostninger, men oftest en lang driftsperiode.
- Passiv ventilation er "lavintensiv" og kan ikke anvendes til akut indsats overfor kraftig forurening.
- Metoden 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 en underjordisk brønd.
- Afhængig af design forventes metoden at kunne anvendes til fysisk fjernelse af forurening eller til stimuleret biologisk nedbrydning ved lufttilførsel.
- Ved forsøgsprojekterne er der i de udvalgte måleperioder opnået gennemsnitlige luftflow (udstrømning) på 0,75 – 2 m³/time per lokalitet med maksimale luftflow på 6 – 25 m³/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 forsøgsprojekterne er der i 2000 fjernet henholdsvis ca. 5, 70 og 1 kg PCE. 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.
- På de tre forsøgsprojekter er der ikke påvist 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.

2.6.3 Økonomi

I tabel 2.6 er de omtrentlige omkostninger til de gennemførte projekter angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i

tabellen. Da passiv ventilation i projektperioden er under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 2.6. Skønnede samlede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises til reference 4.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. Teknologitaktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Allerød	155	180	55	0	2-3	Vides ikke	Vides ikke
Askov	155	180	55	0	2-3	Vides ikke	Vides ikke
Fakse	240	220	55	0	2-3	Vides ikke	Vides ikke

1. Projekteringen omfatter skitse- og detaljprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuell eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.7 Accellereret nedbrydning med 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.

2.7.1 Formål og teknologiaktiviteter

Følgende projekter er udført med særlige teknologiudviklende aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens teknologiprogram:

2.7.1.1 Laboratiestudium

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

Formålet med forsøgene var:

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

2.7.1.2 Feltforsøg

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

- 20 tons dieselurenet 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 respirationstests (iltforbrugsbestemmelser), mineraliseringstests og bakterietællinger.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 5/.

2.7.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Tilsætning af PetroTech medfører ikke væsentlige analytiske problemer og indvirker ikke i nævneværdig grad på fordampningen af dieselkomponenter fra forurenede 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.

2.7.3 Økonomi

Da der er ikke er påvist nogen oprensningseffekt af PetroTech ved teknologiaktiviteterne anses det ikke for relevant at angive økonomioverslag for teknikken.

2.8 Elektrodialytisk jordrensning

Med henblik på oprensning af tungmetallforurenede jord er der gennemført en 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 forureningsfront 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.

2.8.1 Formål og teknologiaktiviteter

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

2.8.1.1 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.

2.8.1.2 "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 /ref. 6/.

2.8.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 altafgørende 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/m² vil være passende, medens der i det store pilotanlæg blev rensset med 0,3 til 0,5 A/m². 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/m². 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/m³. Med en massefylde på 1,6 ton/m³ 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

2.8.3 Økonomi

Metoderne til elektrodialytisk jordrensning er under udvikling, og der er endnu ikke grundlag for økonomiske overslag for jordrensning i kommerciel skala.

2.9 Forceret udvaskning af tjæreforurening

Forceret udvaskning af tjærekompener er en billig og simpel in situ teknik som kan anvendes overfor store områder med diffus tjæreforurening i moderat til højpermeable jordlag. Hovedideen bag teknologien 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 tjærekompenerne i den umættede og mættede zone ved, at anvende behandlet grundvand som bæremedie for ilt, alternative iltningmidler, næringstoffer mv.

Den forøgede infiltrationen opnås typisk ved etablering af et cirkulationssystem, hvormed forurenede grundvand oppumpes, behandles og reinfiltres. Reinfiltrationen kan med fordel foretages nær terræn, hvorved det infiltrerende vand formentlig vil følge samme transportveje, hvorigennem forureningen i sin tid er spredt. Metoden forudsætter relativt gode og veldefinerede strømningforhold 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 iltningmetoder som indblæsning af luft eller ren ilt (bioventilation jf. afsnit 2.1), 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.

2.9.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens program for forsøgsprojekter til oprensning af gasværksgrunde og program for teknologiudvikling inderfor jord- og grundvandsforurening er der i tilknytning til en oprensning af diffus tjæreforurening på Hjørring gasværk udført følgende:

2.9.1.1 Laboratorieforsøg

Parallelt med oprensningen 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 BTX, 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.

2.9.1.2 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 m² 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 m² ved hjælp af ø 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).

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 fuldskaalanlæg 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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 7/.

2.9.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 BTX'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 monitoring 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 forurenings sammensætning 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.

2.9.3 Økonomi

I tabel 2.7 er de omtrentlige omkostninger til det gennemførte projekt angivet. Tabel 2.7 omfatter udelukkende udgifter til etablering, monitorering og drift af det beskrevne anlæg til forceret udvaskning. Herudover har projektet omfattet en række andre aktiviteter der, ligesom aktiviteterne under teknologipuljen, ikke er medtaget i prisoverslaget. Da forceret udvaskning i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til det aktuelle projekt være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 2.7. Skønnede samlede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet henvises til reference 7.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Hjørring Gasværk	500	1.500	500	400	ca. 7	Ja	(Ja)
Hjørring Gasværk: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	300	1.500	400	400	⁵⁾	Ja ⁵⁾	Ja ⁵⁾

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Afhænger af de konkrete forhold på den enkelte lokalitet (geologi, forureningsituation mv.)

2.10 Jordvask

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 forurenings typer, 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 renevæske. Denne væske kan eksempelvis udgøres af vand tilsat overfladeaktive stoffer 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 gennemskyllles 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.

2.10.1 Formål og teknologiaktiviteter

I 1999 blev der på KK Miljøteknik AS' anlæg i Rødby igangsat et projekt med jordvask. Projektet blev støttet af Teknologiprogrammet og omfattede rensning af jord forurenet 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 forurenet 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.

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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 8/.

2.10.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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.

2.10.3 Økonomi

Med udgangspunkt i de udførte forsøgsrensning af seks batches forurenede jord kan der estimeres udgifter for jordvasken (separationen) til energi, vand, transport, arbejds løn og deponering på cirka 300,- til 500,- kr. per tons rensede jord.

2.11 Termisk jordbehandling

Termisk jordbehandling er en gruppe af teknikker til ex site eller on site rensning af jord forurenede med en lang række organiske forureningskomponenter, herunder chlorerede opløsningsmidler, gasolie, tjæreprodukter, PAH mv. Metoderne 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.

2.11.1 Formål og teknologiaktiviteter

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 røggasscrubber 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 /ref. 9/.

2.11.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 fyldjorden.

2.11.3 Økonomi

I tabel 2.8 er de omtrentlige omkostninger til de gennemførte projekter angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da den termiske jordbehandling som led i projektet var under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 2.8. Skønnede samlede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises til reference 9.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
RGS 90, København	200 0,013 per tons	1.000 0,065 per tons	0	11.000 0,71 per tons	-	-	-

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.12 Geooxidation

”Geooxidation” er betegnelsen for en elektrokemisk metode til in situ oprensning af organiske forureningskomponenter fra jord og grundvand, herunder specielt benzol og gasolie. Metoden er baseret på, at den forurenede jordmatrice 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 den mættet som i den umættet zone og er specielt rettet mod lerede jordlag, da lerets relativt høje ledningsevne tillader udbredelse af den svage jævnstrøm.

Geooxidation udbydes af to tyske entreprenører. Der foreligger ikke en fyldestgørende dokumentation for metodens opremsningsmekanismer samt for tidligere udførte opremsninger. Den angivne opremsningseffekt kan skyldes flere mekanismer, hvor der overordnet skelnes mellem elektrokinetisk transport og elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen.

De **elektrokinetiske transportprocesser** er teoretisk velbeskrevet processer, hvor opløste stoffer kan transporteres i det elektriske 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 jf. afsnit 2.6. 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, chlorerede 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 mangelfulde. På baggrund af det udførte projekt støttet af Miljøstyrelsen har det med metoden ikke været muligt at påvise nogen signifikant oprensningseffekt.

2.12.1 Formål og teknologiaktiviteter

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 moræner 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 CO₂ og O₂ 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 potentiale 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 m² 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 kimtal, 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 CO₂, O₂ og CH₄ i det oppumpede luft. Prøverne er analyseret for indhold af oliekomponenter.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 10/.

2.12.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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.

2.12.3 Økonomi

I tabel 2.9 er de omtrentlige omkostninger for den gennemførte oprensning angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da geooxidation i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgiften til det gennemførte projekt være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 2.9. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises reference til 10.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År	Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Østergade, Gram	140	250	150	650	2	Nej	Nej

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuell eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.13 Fytooprensning af olie- og tjæreforureninger

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 oprensning af organiske forureningskomponenter, som omtales i dette afsnit, og metoder til opkoncentrering og fiksering af tungmetaller i planter jf. afsnit 2.14.

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 rodtybde kan fytooprensningen kun anvendes forholdsvis terrænnært (til ca. 2 m u.t.). Den væsentligste ulempe ved teknikkerne er dog, at opretningsperioden er meget lang, og at det er usikkert, om relevante kvalitetskriterier kan nås.

2.13.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende aktiviteter:

2.13.1.1 Litteraturstudium

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

2.13.1.2 Laboriestudium

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

Formålet med laboriestudierne 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 vækstofforsøg med pil og energipil i jord med forskelligt forureningsniveau samt løbende monitoreret for en række relevante parametre. Laborieforsøgene er publiceret i /ref. 11c, d, e og f / hvortil der henvises for detaljerede oplysninger.

2.13.1.3 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 m².
- 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 m².
- 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 m² som benævnes "Valbyparken".

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet har 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 under udførelse, og for mere detaljerede oplysninger henvises til /ref. 11/.

2.13.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 forureningen 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 5 – 15 år), og at der ikke er dokumentation for muligt oprensningsniveau. Endvidere udgør den opnåelige roddebyde en begrænsning i teknikens anvendelighed. Generelt anses oprensningsdybder 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 oprensningsniveau, 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 oprensningsniveau, oprensningsperiode mv.
- Planterne til fyto Remediering udvælges i hvert enkelt tilfælde ud fra forureningens 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 ilttransport 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.
- For en af feltlokaliteterne (tidligere servicestation) er der på baggrund af pils vandforbrug og effekt på ilt nedtrængning i jorden gennemført en estimeret beregning af oprensningsperioden til ca. 12 år.

- 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.
- 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.

2.13.3 Økonomi

I tabel 2.10 er de anslåede omkostninger til de gennemførte feltprojekter angivet. Da oprensningsteknikkerne i projektperioden er under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 2.10. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, priseniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet/erne henvises til reference 11. De anvendte teknikker er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År	Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Axelvej	-	76 2.000 m ³ jord	-	58	3	-	-
Vassingrød	-	50 2.000 m ³ jord	-	65	3	-	-
Valbyparken	436	0	801	0	4	Vides ikke	Vides ikke

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

2.14 Fytooprensning af metal forurenede jord

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 oprensning af forurening med tungmetaller, som omtales i dette afsnit, og metoder til fiksering, nedbrydning eller evapotranspiration af organiske forureningskomponenter jf. afsnit 2.13.

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 metalopbejdning.

Som følge af planternes begrænsede roddebyde kan fyto Remedieringen 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 ikke anbefales anvendt i felt skala herhjemme.

2.14.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende aktiviteter:

2.14.1.1 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 /ref. 11b/.

2.14.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 tungmetallforurenede jord i Danmark. Metoden bør dog revurderes om ca. 10 år, idet udvikling og forædling af plantesorter kan gøre teknikken attraktiv fremover.

2.14.3 Økonomi

Med det gennemførte projekt er der ikke grundlag for at estimere udgifterne forbundet med anvendelse af teknikken i fuld skala. Udgifter til udplantning og høst af afgrøder må dog forventes at være af samme størrelse som ved fytooprensning af organiske forureningskomponenter jf. afsnit 2.13. Ved fytooprensning af tungmetaller kan bortskaffelsen af metallerne foretages relativt billigt ved deponering, eller der kan gennemføres en mere omkostningskrævende oparbejdning og genanvendelse af metallerne.

2.15 Fytooprensning i kombination med genmodificerede bakterier

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 oprensning af henholdsvis organiske forureningskomponenter og tungmetaller. Disse teknikker er omtalt i afsnit 2.13 og 2.14 samt i /ref. 11 og 11b/.

I det følgende omhandles et projekt, hvor mulighederne for forøget planteoptag/nedbrydning af PCB, TCE og PAH ved anvendelse af gensplejsede bakterier er undersøgt. Ideen i denne teknik er, at genmodificerede bakterier vokser i tilknytning til planterodnet 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.

Kombinationen af genmodificerede bakterier og fytooprensning undersøges 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.

2.15.1 Formål og teknologiaktiviteter

Det overordnede formål med projektet var at udvikle og afprøve bakteriel teknologi til anvendelse i fytooprensning primært af PCB forurenede 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 /ref. 12/.

2.15.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 landbrugsmæssig 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 lavtchlorerede 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 forberedt. 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 rodeksudater 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 rodeksudater.
- 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.

2.15.3 Økonomi

Med de gennemførte undersøgelser er der ikke grundlag for at estimere udgifterne forbundet med anvendelse af gensplejsede bakterier som led i fytooprensning i fuld skala.

3 Teknikker til spredningskontrol

I dette kapitel gives en overordnet præsentation af virkemåde, udførte teknologiaktiviteter samt hovedresultater og vurderinger heraf for teknikker som sigter mod at oprense eller kontrollere udbredelsen af stoffer som på opløst- eller gasform er spredt fra kildeområder.

3.1 Reaktive permeable vægge

Reaktive permeable vægge anvendes til at afskære grundvandsbåren forureningsspredning fra kildeområder primært med chlorerede 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, Fe^0 .

Ved kontakt med de store mængder 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, Fe^{2+} .

Det kraftige fald i redoxpotentiale medfører, at blandt andet de chlorerede opløsningsmidler kan oxidere det metalliske jern og nedbrydes ved såkaldt 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.

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 chlorerede opløsningsmidler og chrom regnes for at være abiotiske og begrænses således ikke af 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 Environmental 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 tværsnittet således, at vandet i hele fanen ledes gennem det reaktive jernmateriale (funnel and gate). For at undgå, at grundvandet strømmer udenom væggene/barriererne er det i begge tilfælde vigtigt, at væggene udføres således, at den hydrauliske ledningsevne er væsentligt større 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.

3.1.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført tre fuldskala projekter med in situ oprensning af henholdsvis chlorerede opløsningsmidler og en blanding af TCE og hexavalent chrom. Projekterne beskrives overordnet i det følgende:

3.1.1.1 Hårdkrom

Lokaliteten er anvendt til forchromning, fornikling og forzinkning efter forudgående affedtning 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 /ref. 13/.

3.1.1.2 Vapokon

Lokaliteten er anvendt til oparbejdning af opløsningsmidler hvilket har medført en kraftig forurening af jord- og grundvand med chlorerede 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 forureningens 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 chlorerede 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 forurenat grundvand fra lokaliteten. Forsøgene blev udført til bestemmelse af halveringstider samt dannelse af nedbrydningsprodukter.
- To dimensionelle modelstudier af strømningsforholdene 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 /ref. 13/.

3.1.1.3 Godsbanegården

På lokaliteten har udslip af chlorerede 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 chlorerede 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.

- Slugtests til vurdering af udviklingen i væggenes hydrauliske ledningsevne.
- Analyse af intakte kerner efter oprensningen til vurdering af udfældninger i væggen.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 13/.

3.1.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 chlorerede 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 væggs 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.

3.1.3 Økonomi

I tabel 3.1 er de omtrentlige omkostninger til de gennemførte oprensninger angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da reaktive vægge i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Derfor er der i tabel 3.1 desuden angivet groft skønnede beløb for tilsvarende efterfølgende projekter.

Tabel 3.1. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projekterne henvises reference 13. Teknikken er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Beløbene angivet for de efterfølgende projekter udgør således grove skøn.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Hårdkrom	-	-	-	-	-	-	-
Hårdkrom: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-
Vapokon	1.562	6.360	945	906	20 ⁵⁾	Ja/usikkert ⁶⁾	Usikkert
Vapokon: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	800	4.000	600	600	20 ⁵⁾	-	-
Godsbanegård-en	290	1.652	150	300	10	-	-
Godsbanegård-en: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	200	1.250	150	200	10	-	-

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Der forventes en driftsperiode på 20 år for anlægget. Men heraf er kun 2 år indeholdt i teknologiprojektet.
6. Den reaktive væg er en af tre dele (afgravning, reaktiv væg og naturlig nedbrydning) som tilsammen udgør afværgeforanstaltningen. De to første dele lever isoleret set op til amtets forventninger. Der vil dog gå en årrække før det med sikkerhed kan fastslås om den tredjedel, og dermed hele projektet, er en succes.

3.2 Jernfilter til rensning for chlorerede opløsningsmidler

Nulvalent jern kan anvendes til abiotisk nedbrydning af opløste niveauer af chlorerede 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, Fe²⁺.

Det kraftige fald i redoxpotentiale medfører, at chlorerede opløsningsmidler kan oxidere det metalliske jern og nedbrydes ved reduktiv 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.

På det foreliggende grundlag må det konkluderes, at jernspånefilter til rensning for chlorerede opløsningsmidler med den afprøvede anlægsopbygning ikke kan anbefales i forhold til filtre med aktivt kul.

3.2.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et projekt med on site rensning af oppumpet grundvand forurennet med chlorerede opløsningsmidler. Projektet beskrives overordnet i det følgende:

3.2.1.1 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 forurennet 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 m³/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 forurennet 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 m³.
- Detaljeret monitorering af fjernelsesrater og styrende faktorer.
- Prøvetagning af jernspåner med henblik på at fastslå omfanget af og årsagen til konstaterede udfældninger.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 13/.

3.2.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 filterne.
- Såvel ved opstart som efter udskiftning af jernspåner er der konstateret markant trykopybygning på indgangssiden af filterne efter en kortere driftsperiode.
- Anlægget er taget ud af drift tidligere end oprindeligt planlagt for at studere udfældningsproblemerne.
- Med den afprøvede anlægsopbygning kan jernspånefiltere ikke anbefales i forhold til kulfiltere til rensning for chlorerede opløsningsmidler.

3.2.3 Økonomi

I tabel 3.2 er de omtrentlige omkostninger til det gennemførte projekt angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da filtre med jernspåner til rensning for chlorerede opløsningsmidler i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle gennemførte projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Derfor er der i tabel 3.2 desuden angivet groft skønnede beløb for tilsvarende efterfølgende projekter.

Tabel 3.2. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet henvises reference 13. Den anvendte teknik er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne til det gennemførte projekt typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Beløbene angivet for eventuelle efterfølgende projekter udgør således grove skøn.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologiaktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År	Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Lyndby Rens	320 ⁵⁾	465 ⁵⁾	331 ⁵⁾	280 ⁵⁾	2	Nej	Ja ⁶⁾
Lyndby Rens: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁴⁾	150 ⁵⁾	400 ⁵⁾	40 per år	20 per år	-	-	-

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Projektet er 100 % finansieret af Teknologiprogrammet. Amtets sagsbehandlers tidsforbrug er ikke medregnet.
6. Jernspåneanlægget i Lyndby behandlede en delstrøm af vand fra en eksisterende afværgepumpning med filtrering i aktivt kul før udledning.

3.3 Jernfilter til rensning for chromforurening

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 forurennet med hexavalent chrom i jernspåner opnås således en stabilisering af chrom. Denne proces kan udnyttes til on site behandling af oppumpet chromforurennet 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, 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.

3.3.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med støtte fra Miljøstyrelsens teknologiprogram er der gennemført et projekt med on site rensning af oppumpet grundvand forurennet med chromat. Projektet beskrives overordnet i det følgende:

3.3.1.1 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 forurennet jord er der foretaget grundvandssænkning. 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 skal reducere chromniveauet til maksimalt 10 $\mu\text{g/l}$.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At dimensionere og afprøve et filter med jernspåner til on site rensning af grundvand forurennet 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.
- Monitorering af chromat i ind- og udløb til de etablerede filtre under drift.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 13/ samt miljøprojekt nr. 566 fra Miljøstyrelsen.

3.3.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 m³ jernspånefilter til et flow på 1,5 m³/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.

3.3.3 Økonomi

I tabel 3.3 er de omtrentlige omkostninger til det gennemførte projekt angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen.

Tabel 3.3. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projektet henvises reference 13.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År	Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Skt. Clara Vej ⁵⁾	26/10	90/210	20/20	20/30	15/30	Ja	Ja
Skt. Clara Vej: Tilsvarende efterfølgende projekt ⁵⁾	26/10	90/210	20/20	20/30	15/30	Ja	Ja

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.
5. Tal før og efter skråstregerne er for henholdsvis et midlertidigt og et permanent anlæg.

3.4 Kemisk-Biologisk jernfilter

Kemiske-biologiske jernfiltre er under udvikling med henblik på anvendelse til rensning af oppumpet grundvand for indhold af opløste chlorerede opløsningsmidler. Sådanne filtre vil således kunne udgøre et alternativ til anvendelse af filtre baseret på aktivt kul.

Som beskrevet i afsnit 3.1 medfører anaerob jernkorrosion - som anvendt i reaktive permeable vægge - dels en reduktiv dechlorering af chlorerede opløsningsmidler og dels en frigivelse af fri brint. Denne brint kan anvendes af anaerobe bakterier som led i en biologisk omsætning af chlorerede ethylenere. Dette foregår ved en biologisk betinget dechlorering som er beskrevet yderligere i afsnit 3.5.

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.

3.4.1 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 chlorerede 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 chlorerede ethener i on site filtre for oppumpet grundvand.

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

- Udført litteratursøgning for kemiske og biologiske metoder til fjernelse af chlorerede ethener fra grundvand.
- Udført 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 $\mu\text{g/l}$ 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.
- Udført måling af pH, E_{H} , temperatur og ilt samt indhold af chlorerede opløsningsmidler i ind- og udløb til/fra reaktorerne i forsøgenes samlede varighed på et år.

For yderligere oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 24/.

3.4.2 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 chlorerede ethener i udløbet fra disse reaktorer. Effektiviteten af filtrene er afhængig af strømnings hastigheden. Meget lave flow bør undgås. Tilsætning af nikkel forøgede den initiale nedbrydningsrate for de chlorerede 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 filtrenes anvendelighed overfor forskellige chlorerede ethener og robusthed overfor forskellige vandtyper.
- P.t. kan der ikke opstilles retningslinier for design og dimensionering af kombinerede filtre.

3.4.3 Økonomi

Anvendeligheden af kemisk-biologiske filtre til fjernelse af opløste chlorerede opløsningsmidler undersøges p.t. i laboratoriet. Hvorvidt teknikken er anvendelig i fuld skala - samt i givet fald hvorledes filtrene skal udformes - er uvist. Der er således ikke grundlag for at opstille præcise økonomiske overslag for sådanne filtre.

I /ref. 24/ er der dog opstillet et regneeksempel, hvor der foretages en sammenligning af anlægs- og driftsudgifter for et kulfilter og et kombineret kemisk-biologisk filter. Sammenligningen er baseret på data for et kulfilteranlæg som er etableret i 1998. Anlægs- og driftsudgifterne for kulfilteret var cirka kr. 630.000,- og kr. 150.000,-/år. Anlægsudgiften for et tilsvarende kemisk-biologisk filter er anslået til kr. 950.000,-. På baggrund af formodet lave driftsudgifter til det kombinerede filter er det vurderet, at dette filter kan være økonomisk fordelagtigt, såfremt det kan udvikles til at have en levetid på mere end to til tre år.

3.5 Forceret nedbrydning med HRC

De fleste chlorerede opløsningsmidler nedbrydes ikke naturligt under aerobe forhold i jord- og grundvandsmiljøet. Under sulfatreducerende og

methandannende forhold kan der dog ske en biologisk nedbrydning af en række chlorerede opløsningsmidler, herunder PCE og TCE ved såkaldt "reduktiv dechlorering". Ved den reduktive dechlorering mister opløsningsmidlet et chloratom og modtager et brintatom. Herved dannes lavere chlorerede forbindelser. For PCE er nedbrydningsrækken således; TCE, DCE (tre isomerer), VC, ethen og ethan. Ved den reduktive dechlorering af PCE og TCE dannes således de toksiske DCE og VC.

Dechloreringen er en redoxproces hvor opløsningsmidlet fungerer som elektronacceptor, og der kræves en elektrondonor. Nedbrydningshastigheden er ofte begrænset af utilstrækkelig tilstedeværelse af elektrondonorer - let nedbrydelige kulstofkilder - og den mest effektive reduktive dechlorering ses typisk i lossepladsperskolat eller i blandingsforureninger af chlorerede opløsningsmidler og kulbrinter.

Den reduktive dechlorering kræver således dels et stærkt reduceret miljø og tilstedeværelsen af brint. Med henblik på forcering af dechloreringen er der i USA udviklet produktet HRC (Hydrogen Releasing Compound) som er en polylactatester der ved kontakt med vand (hydrering) langsomt omdannes til mælkesyre (laktat). Denne laktat nedbrydes biologisk, hvorved naturlige oxiderede forbindelser (elektronacceptorer) forbruges, og redoxniveauet falder. Som led i nedbrydningen frigives brint som kan indgå i den omtalte reduktive dechlorering.

HRC anvendes primært overfor opløst forurening i faneområder og kan anvendes i reaktive permeable barrierer (tætliggende boringer eller deciderede vægge), ved injektion fra prober, i bund af udgravninger, eller i cirkulationssystemer med oppumpning, behandling og reinjektion af grundvand.

Af økonomiske årsager og på grund af problemer med at opnå en tilstrækkelig stor injektion og jævn fordeling af HRC'en er teknikken ikke umiddelbart oplagt at anvende i kildeområder med kraftig jordforurening eller forekomst af fri fase.

3.5.1 Formål og teknologiaktiviteter

Følgende projekt er udført med særlige teknologiudviklende aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens teknologiprogram.

3.5.1.1 Jægersborg Allé 24, Charlottenlund

Projektet omfattede et pilotforsøg med injektion af HRC i et øvre frit grundvandsmagasin i sandede jordlag forurenede med opløst PCE fra to opstrøms beliggende renserigrunde. Forureningsniveauet i grundvandsfanen udgjorde op til flere mg-PCE/l. Forureningens kildeområder er oprenset særskilt udenfor nærværende projekt. Ved at injicere HRC er det forsøgt at manipulere de naturlige redoxforhold i grundvandsmagasinet, således at der opnås reducerede forhold, hvorunder reduktiv dechlorering af PCE kan finde sted.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At belyse oprensningseffekten af HRC til stimulering af reduktiv dechlorering.

- At belyse effekten af stimuleret reduktiv deklorering på redoxforholdene i den mættede zone.
- At belyse spredning og skæbne af de klorerede opløsningsmidler og deres nedbrydningsprodukter i den mættede zone.
- At belyse spredning og skæbne af de tilsatte produkter i den mættede zone.
- At belyse ændringer i strømningsforhold (clogging) og grundvandskvalitet generelt som følge af injektionen af HRC.
- At opstille overordnede økonomiske vurderinger af oprensning baseret på HRC.

Med henblik på at opfylde disse formål er det med støtte fra Teknologiprogrammet valgt at udføre følgende:

- Dokumentere redoxforholdene i flere niveauer i grundvandsmagasinet dels i et felt nær forureningskilden (5 meter nedstrøms) og dels i et fjernfelt.
- Injicere to typer substrat i hele magasinets dybde: HRC i 5 sonder og HRC primer i 4 sonder i zig-zag mønster på tværs af forureningsfanen. HRC primer består af laktat og glycerin og har til formål at medføre en hurtig reduktion af redoxpotentialen i behandlingsområdet.
- Monitoring i to rækker af boringer i hhv. nær- og fjernfeltet. I nærfeltet er der fokuseret på ændringer i redoxforhold og cloggingfænomener. I fjernfeltet er effekten af HRC forventet at være aftaget, og der er i højere grad lagt vægt på at undersøge en eventuel reduktion af PCE og forekomst af nedbrydningsprodukter. Måleprogrammet omfattede chlorerede opløsningsmidler samt nedbrydningsprodukter, mellemprodukter fra HRC, elektronacceptorer og reducerede produkter (jern²⁺, methan mv.).

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 14.

3.5.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Injektionen af HRC ved hjælp af sonder er forløbet tilfredsstillende med mindre problemer.
- HRC er en forholdsvis tyktflydende væske, og injektion heraf ved hjælp af sonder kræver meget kraftige stempelpumper. Opvarmning af HRC'en til 40 °C kunne ikke afhjælpe dette problem.
- Hvis behandlingsområdet indeholder væsentlige mængder oxiderede forbindelser (metaloxider, ilt, nitrat, sulfat mv.) kan der med fordel indledes med injektion af en tyndflydende HRC primer til hurtig nedbringelse af redoxpotentialen.
- 2½ måned efter injektionen er der i nærfeltet påvist faldende redoxniveau.

3.5.3 Økonomi

Der foreligger endnu ikke sikre vurderinger af teknikken effekt og bearbejdede oplysninger vedrørende anlægs- og driftsudgifter.

3.6 Biologisk nedbrydning af MTBE

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 tert.butylalkohol. Hvorvidt dette sker i kritiske koncentrationer er ikke afklaret p.t.

3.6.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende projekter med biologisk nedbrydning af MTBE:

3.6.1.1 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 ref. 15.

3.6.1.2 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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 15.

3.6.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 $\mu\text{g/l}$. 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 $\mu\text{g/l}$.
- 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 $\mu\text{g/l}$. 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.

3.6.3 Økonomi

Arbejdet med teknikkerne til biologisk rensning for MTBE har endnu ikke nået et stade, hvor der kan udarbejdes estimater over omkostninger ved etablering af anlæg i fuld skala.

3.7 Sorptionsfiltre for MTBE

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.

3.7.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der udført følgende projekter med sorptionsfiltre for MTBE:

3.7.1.1 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.

3.7.1.2 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 ref. 15.

3.7.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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.

3.7.3 Økonomi

Ud fra de udførte teknologiaktiviteter kan der ikke gives estimater af omkostningerne ved etablering af anlæg til kulfiltrering for MTBE i fuld skala.

I litteraturen er det dog angivet, at udgifterne til rensning for MTBE er ca. 40 – 80 % højere end tilsvarende rensning for benzen.

3.8 Biologisk luftfilter

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 chlorerede opløsningsmidler, herunder dichlorethylener (DCE) og vinylchlorid (VC) har udenlandske erfaringer vist, at biofiltre kan være et alternativ til den traditionelle rensning med aktiv kul.

3.8.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der igangsat første fase af et program om anvendelse af biofiltre til rensning af chlorerede 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 N₂ 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 chlorerede 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 chlorerede opløsningsmidler og specielt vinylchlorid i biofiltre.
- At redegøre for om biofiltre kan anvendes til reduktion af indholdet af chlorerede opløsningsmidler, herunder specielt vinylchlorid i ekstraheret poreluft og, om biofiltre kan være økonomisk attraktive i forhold til traditionel rensning med aktivt kul.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 16.

3.8.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 chlorerede 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 butan nedbrydende 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 chlorerede 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.

3.8.3 Økonomi

Ud fra de udførte teknologiaktiviteter kan der ikke gives estimater af omkostningerne ved etablering af anlæg til luftrensning med biofiltre i fuld skala.

3.9 Passiv ventilation

Passiv ventilation er en afværgeteknik som - afhængig af de lokalitetsspecifikke forhold og krav - kan bruges såvel i kildeområder som til hindring af forureningsspredningen udenfor kildeområder. For en gennemgang af teknikken henvises til afsnit 2.6.

3.10 Naturlig nedbrydning

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der igangsat et projekt med naturlig nedbrydning. Resultaterne fra projektet er dog endnu ikke klar til publikation.

3.11 Modificeret stripningsmetode, IWA

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, chlorerede 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.

3.11.1 Formål og teknologiaktiviteter

Med henblik på afprøvning af Aeratoren og belysning af oprensningseffekt, anlægs- og driftsudgifter mv. er der fra Miljøstyrelsens teknologiprogram ydet støtte til tre projekter:

3.11.1.1 Ulstrup

På lokaliteten i Ulstrup er In Well Aeratoren etableret på en virksomhedsgrund, hvorfra der er sket en udsivning af chlorerede 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 er:

- 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 ø315 rør fra 4,0 – 7,0 m u.t.
- Installeret en In Well Aerator med en pumpekapacitet på 1,5 m³/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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 18/.

3.11.1.2 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 moræneler 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 er:

- 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 m³/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.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 18/.

3.11.1.3 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 underlejres 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 chlorerede 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 chlorerede opløsningsmidler.

Med henblik på at opfylde disse formål er der med støtte fra teknologiprogrammet:

- Gennemført datalogning af grundvandsspejlet samt monitoring på forureningsudbredelsen, med henblik på at vurdere effekten af IWA.
- Installeret en In Well Aerator med en pumpekapacitet på 0,2 m³/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 monitoring af forureningsniveauet i det oppumpede grundvand før og efter vandbehandlingen.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 27/.

3.11.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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 afværgeboring/boringer, ønsket luftmængde, forventet tryk, valg af kompressor eller blæser, antal beluftningskamre, 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, foreksempel 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 grundvandets indhold af opløste chlorerede 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 chlorerede 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 beluftningstrin.
- 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 chlorerede 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.

3.11.3 Økonomi

I tabel 3.4 er de omtrentlige omkostninger til de udførte projekter angivet. Udgifterne til aktiviteter under teknologipuljen er ikke indeholdt i tabellen. Da in well aeratoren i projektperioden har været under udvikling/afprøvning, kan udgifterne til de aktuelle projekter være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager.

Tabel 3.4. Skønnede projektomkostninger eksklusiv udgifter til aktiviteter afholdt under Teknologiprogrammet. Hele 1000 kr. ekskl. moms, prisniveau 2001. For detaljerede oplysninger vedrørende projekterne henvises reference 18. Den anvendte teknik er under udvikling/afprøvning, hvorfor udgifterne i tabel 3.4 typisk vil være højere end ved tilsvarende efterfølgende sager. Beløbene angivet for de efterfølgende projekter udgør således grove skøn.

Projekt	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Rådgiver	Entreprenør, laboratorium mv.	Driftstid ³⁾	Oprensningsniveau ⁴⁾	
						Er/kan de relevante kvalitetskriterier nået/nås?	Er/kan risikoen elimineret/-es?
Aktuelt projekt, ekskl. teknologi-aktiviteter	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring 1.000 kr.	Projektering ¹⁾ anlæg og indkøring ¹⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	Drift ²⁾ 1.000 kr.	År		
Ulstrup	50	210	20	255	3	Ja	Ja
Askov	60	340	20 per år	105 per år	-	Vides ikke	Vides ikke
Åbenrå							

1. Projekteringen omfatter skitse- og detailprojekt herunder eventuelle specielle undersøgelser og tests som den aktuelle teknologi måtte forudsætte.
2. Udgiften omfatter de samlede driftsudgifter i hele projektperioden.
3. Aktuel eller anslået driftstid.
4. Besvarelsen heraf vil i høj grad være usikker og/eller baseret på et skøn.

I /ref. 18/ er der foretaget en sammenligning af udgifterne til in well aeratoren med tilsvarende udgifter til traditionel grundvandsoppumpning med dykpumpe og rensning med kulfilter. Nøgledata fra denne sammenligning ses i tabel 3.5.

Tabel 3.5. Omkostninger ved behandling af vand ved traditionel oppumpning i forhold til In well aerator metoden.

Lokalitet/pumpe	Løftehøjde m	Vandmængde m ³ /h	Energiforbrug kW	Driftomk. kr./m ³
Ulstrup – In well aerator	5	1,5	3 ¹⁾	2,02
Ulstrup – traditionel (SP2A-6 og kulfilter)	5	1,5	0,37 ²⁾	-1,25
Askov – In well aerator	30	1,5	5,5	3,70
Askov – traditionel (SP3A-12 og kulfilter)	30	1,5	0,75 ²⁾	-1,51

1. Energiforbruget er beregnet på baggrund af blæserens ydelse – ved kontinuerlig drift vil energiforbruget være mindre end blæserens maksimale ydelse.
2. Energiforbruget er ved kontinuerlig drift

Som det fremgår af tabel 3.5 vil den traditionelle pumpe- og rensemetode umiddelbart være billigere end in well aeratoren for de aktuelle projekter. I sammenligningen er der dog ikke taget højde for, at traditionel oppumpning og kulfiltrering ofte kræver hyppige tilsyn på grund af udfældningsproblemer. Erfaringerne med in well aeratoren indikerer derimod, at der ikke opstår lignende problemer med udfældninger, og kun er behov for meget begrænset tilsyn og vedligeholdelse. På baggrund af erfaring fra de fire lokaliteter, hvor metoden er anvendt i Danmark, vurderes det at være tilstrækkeligt med cirka halvårslige tilsyn.

Ovenstående prissammenligning viser desuden, at in well aerator metoden er mere rentabel at anvende ved små løftehøjder, som i Ulstrup (3 m), end ved forholdsvis store løftehøjder som i Askov (30 m).

3.12 Simple og hurtige teknikker til sikring af indeklima

I en række forureningssager konstateres det forholdsvis tidligt i forløbet, at der med stor sandsynlighed forekommer uacceptable påvirkninger af indeklimaet i bygninger. Elimineringen af disse påvirkninger må ofte afvente en række supplerende forureningsundersøgelser samt projektering og anlæg af tekniske tiltag.

I visse situationer er denne forsinkelse af indsatsen dog ikke acceptabel, og i det følgende beskrives dele af et projekt, hvor der sammenstilles og udvikles metoder til en såkaldt "tidlig indsats" overfor forurening med flygtige stoffer under og i bygninger.

3.12.1 Formål og teknologiaktiviteter

Fra Miljøstyrelsens teknologiprogram ydes støtte til et projekt som har til formål at opstille et katalog over simple og billige teknikker til hurtig eliminering af uacceptable indeklimapåvirkninger på grunde forurenede med flygtige stoffer. Den samlede udgift til afværgetiltagene i kataloget må ikke overstige kr. 30.000,- til 40.000,- ekskl. moms, og behovet for løbende monitorering og driftstilsyn skal være minimalt.

Projektet udføres i tilknytning til en sag i Odense, hvor grundvandsbåren forureningsspredning fra et renseri har medført risiko for uacceptable

indeklimapåvirkninger i flere boliger nedstrøms. Projektet omfatter blandt andet feltafprøvning og/eller beskrivelse af følgende teknikker:

3.12.1.1 Sikring af indeklima ved maling af vægge, tætning af revner, vandlase mv.

Denne type tiltag sigter mod at reducere den konvektive indtrængning af forurening til indeklimaet ved tætning af revner, sprækker og mellemrum. Desuden søges den diffusive indtrængning reduceret ved maling af vægge, gulve og eventuelt lofter i kældre med en diffusionshæmmende maling.

I rum med direkte kontakt til forurenede jordlag foretages afrensning af tapet fra vægge, fjernelse løstsiddende puds samt tætning af revner og sprækker i gulve og vægge. Tætningen af revner i gulv og vægge foretages med almindeligt puds, mens tætning af revner ved rørgennemføringer, vandlase og mellemrum ved overgang fra vægge til gulve udføres med en fleksibel diffusionshæmmende fugemasse uden indhold af sundhedsskadelige stoffer som kan afdampe til indeklimaet.

Efter tætning kan gulve og vægge samt eventuelt lofter i kældre påføres en diffusionshæmmende maling.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 19/.

3.12.1.2 Sikring af indeklima ved ventilation af bygning.

Ved denne type tiltag sigtes i første række ikke mod en reduktion af forureningsindtrængningen i bygningen. I stedet reduceres koncentrationen i indeklimaet ved fortynding som følge af et øget luftskiftet i bygningen.

Luftskiftet kan øges dels ved at etablere udsug af rumluft eller indblæsning af udeluft.

Ved udsugning af rumluft placeres udtag i relevante rum, og der anvendes typisk elektriske ventilatorer. Ved udsugningen etableres et undertryk i bygningen i forhold til omgivelserne, hvorved luft strømmer ind i bygningen. Det forøgede undertryk i forhold til under gulv kan medføre en forøget indtrængning af gasformig forurening.

Indblæsning af udeluft kan ligeledes foretages med elektriske ventilatorer. Herved opnås den ønskede fortynding af rumluften, og der opnås desuden en forøgelse af trykket i bygningen i forhold til under gulve. Herved nedsættes eller vendes gradienten for konvektiv forureningsindtrængning i bygningen, hvorved belastningen af indeklimaet nedsættes. En væsentlig ulempe ved en sådan indblæsning er, at varm rumluft som følge af det etablerede overtryk vil trænge ud bygningskonstruktionen, hvorved der kan opstå væsentlige gener/skader som følge af kondensation.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 19/.

3.12.1.3 Sikring af indeklima ved ventilation under gulv

Ventilation under gulv udføres passivt i form af riste i fundamenter, ventilationsrør under gulve samt luftindtag fra svanehalse afsluttet umiddelbart over terræn. Ventilationen kan desuden foretages aktivt ved montage af sol-, vind-, eller eldrevne ventilatorer samt ved udnyttelse af

termisk energi (varm lufts opdrift) ved etablering af aftræksrør indvendigt i bygninger (skorstenseffekt).

Med passive metoder sigtes mod en reduktion af forureningsspredningen til indeklimaet ved øget luftskifte under bygningen og hermed reduktion af forureningsniveauet under gulv.

Med de aktive metoder opnås dels en fortynding som med passive metoder og dels en mere markant påvirkning af trykforholdene under gulv. Afhængig af hvilken aktiv teknik der vælges, vil der således konstant eller i perioder kunne opretholdes et lavere tryk under gulv end i indeklimaet. Herved elimineres den konvektive transport af forurening til indeklimaet.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 19/.

3.12.1.4 Sikring af indeklima ved luftrensning i bygning

Sikring mod sundhedsskadelige påvirkninger fra indeklimaet kan foretages ved rensning af luften i bygninger. Som led i projektet er der udviklet to forskellige luftrenseenheder beregnet på opstilling henholdsvis i kælderrum og i opholdsrum. Rensningen af rumluften foretages med aktivt kul.

Renseenheden til brug i ubeboede kældre har en kapacitet på 50 - 230 m³-luft/time, indeholder et udskifteligt støvfilter samt et kulfilter til ca. 4 kg aktivt kul. Et supplerende filter til ca. 2 kg kul kan monteres. Renseenhedens støjniveau undersøges nærmere for forskellige opstillinger men ligger i området 35 - 45 dbA. Luftrenserens dimensioner er; L, H, B: 25, 40 og 60 cm.

Renseenheden til brug i opholdsrum har en kapacitet på 35 - 95 m³-luft/time, indeholder et udskifteligt støvfilter samt et kulfilter til ca. 4 kg aktivt kul. Renseenhedens støjniveau undersøges nærmere for forskellige opstillinger men ligger i området 30 - 35 dbA. Luftrenserens dimensioner er; L, H, B: 40, 25 og 60 cm.

Luftrensningen medfører en øget cirkulation af luften i bygningerne men forventes ikke at påvirke bygningens trykforhold i nævneværdig grad.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 19/.

3.12.1.5 Sikring af indeklima ved periodisk vakuumventilation nær/under bygningen

På naboejendomme til forurenede lokaliteter skyldes eventuelle uacceptable indeklimapåvirkninger ofte spredning med poreluften af jordforurening på nabomatriklen eller grundvandsforurening under bygningen.

I sådanne tilfælde kan indeklimapåvirkningerne eventuelt elimineres ved periodisk vakuumelekstraktion af luft fra den umættede zone ved hjælp af en eller flere boringer nær bygningen. Ved vakuumventilationen udskiftes luften under bygningen, og tilbageslaget til et kritisk niveau foregår ofte over mange uger eller måneder. Ved et kritisk tilbageslag gentages ekstraktionen. Vakuumventilationen foretages med et mobilt ekstraktionsanlæg indbygget i en lukket trailer og er således nemt at flytte. Dette medfører, at anlægget kan anvendes på flere lokaliteter i samme periode. På en lokalitet har det været muligt at afskære uacceptable indeklimapåvirkninger i boliger over en relativt

svag grundvandsofane (ca. 200 µg-PCE/l i sand 5,5 til 7,5 m u.t.) ved ekstraktion nær bygningerne en til to gange om året i en til to uger.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 19/.

3.12.2 Resultater af teknologiaktiviteter

Projektet har ikke nået et stade, hvor der foreligger afrapportering af tidligere udførte tiltag eller resultater fra de planlagte feltafprøvninger. I det følgende præsenteres således de foreløbige erfaringer og indtryk fra arbejdet med projektet:

- For samtlige tiltag til reduktion af indeklimapåvirkninger fra forurening under/nær bygninger anbefales udført en grundig byggeteknisk gennemgang, herunder afklaring af fundamentsforhold, type, tykkelse og stand af gulve, kapillarbrydende lag mv.
- Diffusionshæmmende maling indeholder epoxy og påføres under samme sikkerhedsmæssige foranstaltninger som almindelige terpentinbaserede malinger. Malingens effekt kan nedsættes eller ødelægges ved slid, beskadigelse, fugtindtrængning mv.
- Indblæsning eller udsugning af luft i/fra bygninger kan medføre støjgener og øgede udgifter til rumopvarmning.
- Ved indblæsning af atmosfærisk luft i bygninger ændres/påvirkes trykforholdene således, at den konvektive indtrængning af forureningskomponenterne nedsættes. Det modsatte gør sig gældende ved udsug af rumluft.
- Indblæsning af udeluft i bygninger medfører risiko for væsentlige gener og/eller bygningskader som følge af kondensation i vægge, gulve og lofter. Specielt kan der opstå skader som følge af råd i trækonstruktioner.
- Ved passiv ventilation under gulv opnås en fortynding af forureningsniveauet og hermed en reduktion af den diffusive og konvektive spredning til indeklimaet. Den passive ventilation medfører dog ikke med sikkerhed en konstant bortledning af forurening. Ved aktiv ventilation under gulv opnås en konstant bortledning af forurening under gulvet og desuden afskæres den konvektive spredning op gennem gulvkonstruktionen permanent i driftsperioden.
- Anvendelse af ventilation under gulv forudsætter ofte at der etableres udtag under samtlige gulve adskilt af fundamenter. Desuden kombineres metoden ofte med luftindtag gennem fundamentet, hvorved der opnås en kontrolleret luftstrømning under gulvene.
- Ved aktiv ventilation under gulv, kan der i sjældne tilfælde opstå støjgener fra ventilationsdrænene.
- Anvendelse af luftrenseenheder i kældre eller opholdsrum medfører en forøget cirkulation af rumluften uden væsentlige trækgener. Ventilationen kan dog give anledning til støjgener i de berørte rum. Herudover er ulemperne overvejende af æstetisk karakter.
- Eliminering af indeklimapåvirkninger ved periodisk vakuume-kstraktion med et mobilt anlæg fra boringer nær bygninger forudsætter, at der opnås aftale om tilslutning til elnettet. Anlægget giver sjældent anledning til støjgener. Metoden medfører et begrænset tilsyn ved indkøring og eventuel flytning af anlægget.

3.12.3 Økonomi

Der foreligger endnu ikke detaljerede opgørelser over de faktiske udgifter for de enkelte teknikker. Som omtalt ovenfor er det dog en forudsætning for optagelsen i det endelige katalog, at teknikkerne inklusiv projektering, anlæg og drift totalt set ikke medfører udgifter over cirka. kr. ekskl. moms 30.000,- til 50.000,-.

Med undtagelse af vakuumventilation nær bygninger vurderes dette at kunne opfyldes for de nævnte teknikker ovenfor.

Et mobilt anlæg til vakuumventilation indbygget i en lukket trailer kan opbygges for kr. 80.000 – 130.000,- ekskl. moms. Etablering af en enkelt boring kan i de fleste tilfælde udføres for få tusinde kroner, som led i andet arbejde i området, og kan i næsten alle tilfælde udføres for under kr. 10.000,-. Ved samtidig anvendelse på mere end cirka fire lokaliteter er denne metode således økonomisk sammenlignelig med de øvrige teknikker.

4 Undersøgelser-/Måleteknikker

I dette kapitel gives en overordnet præsentation af virkemåde, udførte teknologiaktiviteter samt hovedresultater og vurderinger heraf for måleteknikker som kan anvendes som led forureningsundersøgelser eller som tests forud for detailplanlægning af afværgeforanstaltninger.

4.1 Fluxmålinger med foliemetode

Den gennemsnitlige diffusive og konvektive transport af forureningskomponenter op gennem gulvkonstruktionen og ind gennem fundamenter og vægge er en nøgleparameter når der skal foretages en risikovurdering overfor indeklimaet af forureninger under og nær bygninger. Transporten estimeres oftest ved forsimplede og teoretiske beregninger på baggrund af målinger af forureningskoncentrationer under gulv og oplysninger om bygningernes konstruktion og stand.

Bestemmelsen af forureningsniveauet under gulv foretages oftest som en punktmåling i tid, og oplysningerne om bygningernes konstruktion og stand er i reglen meget upræcise og mangelfulde. Estimatet af den aktuelle forureningspåvirkning af indeklimaet i bygninger over/nær forurenede jordlag er således oftest behæftet med meget stor usikkerhed.

Foruden en eventuel nærliggende forurening kan der desuden i de fleste bygninger være adskillige andre kilder til forurening i indeklimaet. Således er det ikke muligt entydigt at henføre en målt forureningskoncentration i indeluften til en eventuel forurening nær bygningen.

Med henblik på at tilvejebringe et mere veldokumenteret grundlag for risikovurdering overfor indeklima arbejdes der med udvikling af teknikker til direkte måling af forureningsspredningen gennem gulve og vægge, såkaldte fluxmålinger. Tidligere er der udviklet målemetoder baseret på såkaldte fluxkamre udført i hård plast, glas mv. Da sådanne kamre ikke er fleksible, indebærer disse metoder en uønsket påvirkning af trykforholdene og medførte en række fejlkilder eller forudsatte en forholdsvis omfattende instrumentering.

4.1.1 Formål og teknologiaktiviteter

Det udførte projekt er finansieret under Miljøstyrelsens teknologiprogram og har haft som formål at udvikle og teste en operationel metode til at måle mængden af gasformig forurening som trænger ind i bygninger gennem gulve med revner og sprækker samt omkring rørgennemføringer mv. Der er udført følgende aktiviteter:

4.1.1.1 Udvikling af metode og test i laboratoriet

Der er udviklet en målemetode som kaldes "foliemetoden". Metoden er baseret på, at et veldefineret areal afdækkes med en diffusionstæt folie, som danner et kammer over arealet. Folien fæstnes til gulv/væg mv. ved hjælp af tape, og der tilføres ren, forureningsfri luft under folien. Gasformige forureningskomponenter, som transporteres gennem gulvkonstruktionen fra

forurening under bygningen, opblandes med luften under folien, og mængden af den tilførte forurening bestemmes ved måling på den luft, der blæser ud af folien.

Metodens anvendelighed er testet under kontrollerede laboratoriebetingelser. Det blev i en specielt opbygget laboratorieopstilling undersøgt, om metoden kunne måle den "sande" gennemtrængning af et betongulv af flygtige organiske forbindelser placeret i et kammer under gulvet.

Laboratorieopstillingen bestod af et lukket kammer af rustfrit stål omkring en betonplade med areal på 1 m². Under betonpladen var der et bundkammer, som kunne tilføres en kendt mængde forurenede luft. Over betonpladen var der et topkammer, som kunne tilføres forureningsfri luft eller benyttes uden lag, idet diffusionen i så fald skete til rumluften. Diffusionen fra bundkammeret til topkammeret blev herefter bestemt dels ved måling af indtrængningen til det lukkede topkammer, dels ved afdækning af betonpladen med folie.

4.1.1.2 Feltmålinger

Til yderligere evaluering af metoden blev der gennemført feltmålinger under realistiske forhold. Felttesten omfattede:

- En række målinger af indtrængningen af PCE til et kælderlokale på en nedlagt renserigrund, og den målte indtrængning blev vurderet i forhold til den beregnede indtrængning efter Miljøstyrelsens vejledning 6/98.
- Fastlæggelse af procedurer til brug for fremtidige målinger i felten.
- Målinger af indtrængningen fra åbne gulvarealer, og som et supplement blev der udført måling af bidraget fra kraftige revnedannelser i gulvet, bl.a. omkring gennemføring af kloakrør.
- Udeluft- og indeluftmålinger, målinger af koncentrationen i jordluft under gulv, luftskiftmålinger, måling af temperaturer samt trykforskelle ude/inde og over/under gulv.
- Måling på et betongulv i kælderen i en nærliggende, ikke-forurenede bygning med henblik på at undersøge eventuelle baggrundsbidrag.

For detaljerede oplysninger om projektet henvises til /ref. 20/.

4.1.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Der er udviklet en operationel metode til måling af bidraget af gasformige komponenter fra forurenede jord til indeluften.
- Der er beskrevet en procedure for metoden til bestemmelse af bidraget af forurening fra gulvarealer der ligger på områder med forurenede jord.
- Forsøg med målinger på gulvområder med særligt høje bidrag har vist, at metoden med fordel kan bruges til bestemmelse af indtrængning af forurening til indeluften via sprækker og revner i gulve. Sådanne områder vil især ligge omkring rørgennemføringer mv. Målingerne viste, at afgrænsede gulvområder med revner og sprækker kan udgøre helt dominerende kilder til bidraget af forurening til indeluften. Bidrag fra sådanne kilder kan være vanskelige at forudsige ved beregning, og målemetoden vurderes derfor at være et nyttigt supplement til den traditionelle beregning af bidraget.

- Ud fra forsøgene i laboratoriet og i felten blev metodens samlede usikkerhed vurderet at være fuldt acceptabel i forbindelse med målinger i felten, og for standardiserede forhold er der fundet god overensstemmelse mellem målte bidrag og bidrag beregnet efter Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 og 7 af 1998.

4.1.3 Økonomi

De omtrentlige omkostninger til at gennemføre en fluxmåling i et enkelt målepunkt må forventes at være ca. kr. 20.000,-. På grund af relativt store udgifter til opsætning af udstyr m.m., vil udgiften til yderligere målinger i supplerende punkter være betydeligt lavere.

4.2 Passiv pored uftscreening med Goresorbere

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der afprøvet en metode til passiv poreluftscreening af jordlag forurenet med flygtige komponenter. Metoden kaldes Gore-Sorber Screening Survey og er baseret på, at et kraftigt sorberende materiale i en GoreTex strømpe placeres i et ikke-foret borehul med en dimension på minimum ca. fire centimeter. GoreTex er vandafvisende men gennemtrængeligt for gasser. Borehullet forsegles, og opsamlingen af flygtige stoffer fra jordlagene foretages typisk over en til to uger. Ved analyse af opsamlerne kvantificeres hvor stor en masse af de undersøgte komponenter som er afsat på monitorerne.

Da luften i og omkring borehullerne ikke kan regnes for at være i konvektiv bevægelse, er det ikke muligt at bestemme en gennemsnitlig koncentration af stofferne i borehullerne over opsamlingsperioden. Ved måling med GoreSorberne i mange punkter fås således et relativt billede af forureningens fordeling på lokaliteten, herunder lokalisering af kildeområder mv. Koncentrationen af forureningskomponenterne i jord, grundvand og poreluft kan herefter bestemmes ved traditionel prøvetagning de ønskede steder.

GoreSorberne installeres i den umættede zone i kilde- eller faneområder og kan principielt anvendes i alle jordtyper. Den mest oplagte anvendelse af teknikken er dog i lavpermeable jordlag (silt og ler) hvor traditionel prøvetagning af poreluft ikke er velegnet på grund af dårlige strømningforhold for poreluften og risiko for lækage fra terræn.

4.2.1 Formål og teknologiaktiviteter

Følgende projekt er udført med særlige teknologiudviklende aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens teknologiprogram:

4.2.1.1 Ravnsbjergvej, Alsønderup

Ved traditionelle forureningsundersøgelser var der konstateret en kraftig forurening med PCE under og omkring en tidligere renseribygning. Forureningen var knyttet til et tykt lag af moræneler og var tilsyneladende spredt til et større område fra et kildeområde ved det tidligere renseri.

Aktiviteterne under Teknologiprogrammet havde til formål:

- At afgrænse den trufne forurening.
- At belyse tilstedeværelsen af eventuelle kildeområder for forurening som ikke var lokaliseret ved de tidligere undersøgelser.

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

- Installation af 45 GoreSorber ca. 1 m u.t. i et fem gange fem meter net over hele grunden.
- Analyse af GoreSorberne for 18 forskellige chlorerede forbindelser, herunder PCE, TCE samt nedbrydningsprodukter herfra.
- Sammenstilling af resultaterne fra de tidligere udførte undersøgelser med resultaterne fra GoreSorberne.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til /ref. 21/.

4.2.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Ved sammenligning med resultater fra traditionelle forureningsundersøgelser på Ravnsbjergvej, Alsønderup har GoreSorber metoden vist sig at være velegnet til at undersøge fordelingen af forureningen i moræneler, i en situation hvor traditionel måling af poreluft ikke kan bruges.
- Installationen af GoreSorber foretages manuelt med håndudstyr og stiller ingen særlige krav til adgangsforhold mv.
- GoreSorber metoden kræver, at der i et veldefineret undersøgelsesområde installeres et tilstrækkeligt antal sorbere til at opfylde kravet om detaljeringsniveau i forureningskortlægningen. Resultaterne af undersøgelsen foreligger først efter indsamling af sorberne og laboratorieanalyse. Set i forhold til traditionel poreluftmåling med feltanalyse, hvor man successivt kan tilrettelægge undersøgelsen, kan dette være en ulempe ved metoden.
- Samme GoreSorber modul kan anvendes til samtidig kvantificering af en lang række forskellige stoffer, herunder bl.a. olieprodukter, opløsningsmidler, chlorerede forbindelser og tjærestoffer. For blandingsforureninger kan dette medføre betydelige besparelser.
- Da opsamlingen foretages over en til to uger, er metoden relativt ufølsom overfor korttidsfluktuationer i temperatur, lufttryk mv.
- Metoden er beregnet til anvendelse i den umættede zone, og er ikke følsom overfor selv meget høje vandindhold i jordlagene. Dette skyldes, at det adsorberende materiale er indkapslet i GoreTex, som hindrer vand i at trænge ind i selve sorberen og dermed nedsætte adsorbtionen af forureningskomponenter.
- Den væsentligste ulempe ved metoden er, at der er tale om en relativ målemetode, hvor absolutte koncentration af forureningskomponenter i poreluften ikke kan bestemmes. I mange tilfælde er metoden desuden dyrere end traditionelle poreluftmålinger.
- Det bedste resultat fås, hvis GoreSorber modulerne installeres i et finmasket net over lokaliteten. Maskevidden bør dog varieres i forhold til størrelsen af den forventede forureningsudbredelse. For at dække en 1.000 m² grund med en maskevidde på 5 x 5 m kræves 40 moduler, mens f.eks. et 7,5 m net ville fordr 17 moduler

4.2.3 Økonomi

Analyseprogrammet for GoreSorberne kan sammensættes individuelt for den enkelte sag ud fra en meget lang række forureningskomponenter. De mulige analyser omfatter blandt andet chlorerede opløsningsmidler samt nedbrydningsprodukter, kulbrinter, tjærestoffer, PAH og sprængstoffer.

For den anvendte analysepakke på Ravnsbjergvej, Alsønderup (18 chlorerede stoffer) var prisen per GoreSorber modul cirka US\$ 215, svarende til cirka kr. 1.500,-.

Stofspecifikke analyseprogrammer (f.eks. chlorerede opløsningsmidler, brændstoffer, en kombination af disse samt enten tjære eller sprængstoffer mv.) ligger i prislaget US\$ 200,- til 215,- per modul. Ekstraparametre, som f.eks. vinylchlorid eller et total kulbrinteindhold, kan tilføjes for US\$ 5,- til 10,- per parameter. Desuden kan der vælges mellem to ikke-stofspecifikke analyseprogrammer; henholdsvis totalt kulbrinteindhold og totalt benzin/diesel-kulbrinteindhold. Disse analyseprogrammer koster US\$ 150 – 160,- per modul.

Prisen inkluderer levering af GoreSorber moduler, kemisk analyse i USA samt rapport med optegning af konturerede kort. Hertil kommer udgifter til installation og indsamling af modulerne samt afsætning/indmåling m.m.

Den beskrevne GoreSorber screening har kostet cirka kr. 110.000,- ekskl. moms. Heraf udgør omkostningerne til de 45 GoreSorber moduler, analyser og analyserapport cirka kr. 70.000,-.

I den aktuelle undersøgelse var man interesseret i stor detaljeringsgrad i det nære område, hvorfor der blev udlagt et 5 x 5 meter net omkring forventet "hot spot". Yderligere blev der for at afgrænse den totale forurening udlagt et 7,5 x 7,5 m net uden om det indre net.

På lokaliteten er der tidligere udført 13 miljøtekniske boringer filtersat i det terrænnære grundvand. Disse boringer gav nogenlunde samme billede af forureningen som Gore-Sorber Screening Survey. Til sammenligning skønnes det, at omkostningerne til en sådan undersøgelse, baseret på boringer, udtagning og analyse af 13 vandprøver for chlorerede kulbrinter og nedbrydningsprodukter, udgør omkring kr. 130.000,-.

I tabel 4.2 er der til sammenligning vist overslagsmæssige omkostninger til indledende undersøgelse foretaget ved henholdsvis traditionel poreluftmåling og Gore-Sorber Screening Survey. Den indledende undersøgelse skal klarlægge, om der er forurening på lokaliteten som følge af de identificerede, potentielle forureningskilder samt afgrænse eventuel forurening horisontalt. Sammenligningen tager udgangspunkt i en lokalitet på 1.000 m² med 4-5 potentielle kilder til jord- og/eller grundvandsforurening. Antallet af prøvetagningssteder sættes i begge tilfælde til 15 for at gøre sammenligningsgrundlaget mest rimeligt.

Tabel 4.2. Overslagsmæssige omkostninger til indledende undersøgelse foretaget ved hhv. traditionel poreluftmåling og Gore-Sorber Screening Survey.

	Antal undersøgelsespunkter	Omkostningsoverslag, kr. ekskl. moms
Poreluft	15	25.000-30.000
Gore-Sorber	15	35.000

Ved sammenligningen af de to undersøgelsesmetoder er der ikke medtaget omkostninger til udførelse af borer og verificering af forurening i jord og grundvand, da dette vil være det samme for de to metoder. Begge metoder bør suppleres med borer og analyse af jord- og grundvandsprøver ved de konstaterede "hot spots", således at forureningens styrke og betydning/risiko for grundvandet kan vurderes.

Poreluftmåling i 15 punkter vurderes at omfatte cirka en dags feltarbejde inkl. analyse i mobilt laboratorium. Hertil kommer afsætning og indmåling af punkter, optegning af situationsplan og rapportering.

Gore-Sorber Screening Survey omfatter ud over ovennævnte priser per modul ligeledes omkostninger til afsætning og indmåling af punkter, installation og indsamling af moduler samt optegning af situationsplan.

Som det ses, er omkostningerne til udførelse af Gore-Sorber Screening Survey lidt højere end traditionel poreluftmåling, men dog af samme størrelsesorden.

4.3 Udvaskningstests

En lang række tidligere industrigrunde udgør en grundvandsrisiko som følge af udvaskning af miljøfremmede stoffer fra forurening knyttet til - og tilbageholdt i terrænnære jordlag. Ofte er det såvel den samlede flux af forurening - som koncentrationen af en given forureningskomponent - der udvaskes fra det forurenede jordvolumen, som er kritisk. I risikovurderinger af jordforurening er det således relevant at kunne vurdere/estimere fluxen og koncentrationen af givne forureningskomponenter, som under naturlige infiltrations- og strømningsforhold udvaskes i retning mod underliggende grundvandsmagasiner.

Denne flux og koncentration kan søges fastlagt ved gennemførelse af såkaldte udvaskningstests. Disse tests udføres i laboratoriet ved, at intakte eller forstyrrede jordprøver (kolonner eller batches) fra en forurennet grund udvaskes med vand, som i kemisk sammensætning tilnærmes infiltrerende grundvand.

Udvaskningstests er velkendte og anvendte ved estimeringen af udvaskningen af uorganiske forureningskomponenter som salte og metaller, jf. bekendtgørelse nr. 655 af 27. juni 2000, men er endnu ikke udviklede til anvendelse overfor organiske forureninger.

4.3.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der iværksat et projekt med henblik på at udvikle en metode til bestemmelse af udvaskningen af organiske forureningskomponenter som olieprodukter (undtaget benzin), chlorerede opløsningsmidler og PAH'er. Projektet er indledt med et litteraturstudium for at sammenstille den eksisterende viden på området. Herefter er der gennemført en serie udvaskningstests på batches af forurennet jord.

Formålet med projektet var:

- At identificere de organiske stoffer, som der bør kunne gennemføres udvaskningstests for.

- At vurdere mulighederne for at bruge udvaskningstests til at bestemme risikoen for udvaskning af organiske stoffer fra forurenede jord og restprodukter med fokus på jord.

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

- Etableret en oversigt over "state of the art" med hensyn til de processer og faktorer, som er styrende for udvaskningen/desorptionen af organiske stoffer fra forurenede jord og restprodukter.
- Foretaget en vurdering af anvendelsesbetingelser og begrænsninger for forskellige testmetoder og testprincipper i relation til udvaskning af organiske stoffer fra jord og restprodukter.
- Foretaget en klassifikation af relevante organiske stoffer i forhold til mulighederne for og relevansen af at teste deres udvaskning fra jord og restprodukter.
- Gennemført eksperimentelle afprøvninger af testmetodikker på 5 udvalgte forskellige jordprøver.
- Foretaget en samlet vurdering af den indsamlede viden, de gennemførte beregninger og resultaterne fra de eksperimentelle undersøgelser samt opstillet anbefalinger for den eventuelle videre udvikling af en testmetodik.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 22.

4.3.2 Resultater af teknologiaktiviteter

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

- Litteraturgennemgangen har vist, at erfaringerne med at teste udvaskningen af organiske stoffer fra forurenede jord og restprodukter er begrænsede. Der eksisterer stort set ingen veletablerede udvaskningstests til dette formål.
- Hvis den forurenede jord indeholder fri fase af organiske stoffer, vil opløsningen heraf være styrende for udvaskningen af forureningskomponenter. Såfremt der ikke er indhold af fri fase, vil udvaskningen være styret af desorption af forureningskomponenter fra de faste partikler i jorden.
- Opløsning fra frie og residuale faser af organiske stoffer i jord er en relativt hurtig proces (minutter/timer).
- Desorptionen af organiske stoffer fra jord er i mange tilfælde langsom (dage/uger) og vanskelig at forudsige.
- Bestemmelse af jordmaterialets indhold af naturligt organisk kulstof kan benyttes til at få et generelt indtryk af prøvens forventede sorptionskapacitet.
- Udvasningen af organiske stoffer fra jord er i mange tilfælde styret af desorptionskinetik. I udvaskningstests er kontakttiden mellem jorden og udvaskningsmediet således en nøgleparameter.
- For flygtige stoffer kan tab i forbindelse med prøvehåndtering og –forbehandling i praksis hindre anvendelsen af udvaskningstests.
- Udvasningstestene vanskeliggøres af finkornet materiale, som suspenderes i eluatet og komplicerer separationen.
- Ved anvendelse af rustfrit stål og teflon i forsøgsopstillingen er der ikke konstateret tab af organiske stoffer. Anvendelse af glas medførte målbare tab.

- For oliestoffer, chlorerede opløsningsmidler og PAH'er findes der et godt fagligt grundlag for at arbejde videre med en testmetodik for stofudvaskningen. Der er således udarbejdet et indledende forslag til en testmetode til bestemmelse af udvaskningen af ikke-flygtige organiske stoffer som olieprodukter (benzin undtaget) og PAH'er fra jord. Stoffer som MTBE og DEHP er i mindre grad undersøgt.

4.3.3 Økonomi

Ud fra de udførte teknologiaktiviteter er der ikke grundlag for at estimere omkostningerne ved udførelse af udvaskningstests på kommercielle vilkår.

4.4 Undersøgelse af porevandsprøver

På lokaliteter som er omfattet af en forurening, hvor kildeområdet er afgrænset til den umættede zone, kan undersøgelser af porevandsprøver udtaget over grundvandsspejlet udgøre en vigtig del af grundlaget for en risikovurdering overfor grundvandsinteresser. Porevandsprøver er således blandt andet velegnede til bestemmelse af kildestyrken for større punktkilder, hvor kildeområdet er velafgrænset (f.eks. kilder med oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler) eller fladekilder (f.eks. pesticidudvaskning fra gårdspladser).

Porevandsprøver kan i felten udtages fra lysimetre installeret i eller under rodzonen/fyldlag eller fra sugeceller placeret i forskellige dybder i den umættede zone. Lysimetre udgøres typisk af en stålcylander (uden top) med et opsamlingsssystem til porevand i bunden. Med lysimetret opsamles vand, som infiltrerer jordprofilen over et areal på ca. 0,1 – 0,3 m². Lysimetre kan ligeledes anvendes i laboratorieforsøg, hvor intakte jordkerner udtages på den aktuelle lokalitet og placeres i en forsøgsopstilling. Sugeceller udgøres af porøse filtre (diameter på få centimeter og en længde på ca. 10 - 15 cm.) samt et opsamlingskammer, som typisk er forbundet med en slange til terræn. Det porøse materiale danner en kapillær kontakt til formationen, hvorved de meget fine porer i sugecellen opnår et højt residualt vandindhold (nær 100%). Ved hjælp af et vakuum i sugecellen opnås en strømning af porevand ind i opsamlingskammeret.

I forureningsundersøgelser er metoden med sugeceller den mest anvendte.

4.4.1 Formål og teknologiaktiviteter

Under Miljøstyrelsens teknologiprogram er der iværksat et projekt med henblik på at bestemme forureningskoncentrationen i mobilt porevand i den umættede zone.

Formålet med projektet er:

- At danne grundlag for konkrete anvisninger på en bedre bestemmelse af forureningskoncentrationen i porevandet end der opnås med de gængse metoder. Disse baseres på antagelser om, at koncentrationen i det nedsivende vand svarer til den maksimale opløselighed for det aktuelle stof eller på ligevægtsberegninger ud fra målte indhold i poreluft og jordprøver.
- At beskrive og afprøve kolonne/sugecelle- og lysimetermetoden til bestemmelse af forureningskoncentrationen i mobilt porevand. Dette

foretages under kontrollerede laboratorieforhold, som tilnærmes naturlige forhold.

- At beskrive usikkerhederne ved henholdsvis kolonne/sugecelle- og lysimeterforsøg.
- At give anbefalinger med hensyn til valg af metode til bestemmelse af forureningskoncentrationer i porevandet.

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

- Forsøg med kolonner forsynet med sugeceller. Forsøgene er udført i laboratorium, og der er anvendt uforstyrrede sandkerner med gennemsivning af vand med konstant forureningsindhold. Kolonnerne er tilsat henholdsvis TCE eller benzin/phenanthren. Fra kolonnerne er der udtaget porevandsprøver med sugeceller udført i henholdsvis PTFE og stål. Desuden er der udtaget jord- og poreluftprøver til analyse, og der er udført udvaskningstest med bestemmelse af porevandskoncentrationen, dels ud fra en simpel opblandingsbetragtning og dels ved anvendelse af fugacitetsprincippet. Der er monitoreret på tilsat og afledt vand samt vand udtaget fra sugecellerne.
- Lysimeterforsøg. Der er anvendt fire lysimetre (diameter på 60 cm og højde på 100 cm): To med intakte lerkerner og to som er pakket med sand, svarende til det anvendte i kolonneforsøgene. Lysimetrene er tilført TCE, benzin/phenanthren og/eller MTBE. Der er foretaget forsøg med henholdsvis en "low-flow" konstant tilsætning af vand (svarende til en nettonedbør på 3 mm/dag) og en "high flow" tilsætning af to pulser af 50 mm vand. Efter vandgennembrud er der etableret sugeceller i lysimetrene. Der er monitoreret på tilsat og afledt vand samt vand udtaget fra sugecellerne.
- Sammenligning af de målte/beregne porevandskoncentrationer fra kolonne- og lysimeterforsøgene med indløbs- og udløbskoncentrationer fra kolonnerne. Der er desuden udført jord- og poreluftanalyser og foretaget beregninger af ligevægtskoncentrationer, massebalancer for forureningskomponenter mv.
- Modelsimuleringer af den vertikale dynamiske diffusive forureningstransport op gennem lysimetrene. Simuleringerne er udført med programmet Hydrus-1D.

For detaljerede oplysninger om projektet og teknologiaktiviteterne henvises til ref. 23.

4.4.2 Resultater af teknologiaktiviteter

Forsøgene er endnu ikke afsluttede. Samtlige resultater foreligger således endnu ikke, og vurderingerne af resultaterne er ikke tilendebragt. I det følgende præsenteres de væsentligste foreløbige resultater og vurderinger fra teknologiaktiviteterne:

- Ved kolonneforsøgene er der opnået størst genfindelse af forureningskomponenterne (i forhold til niveauet i det tilførte vand) i prøver udtaget med sugeceller. Sugecellerne i stål gav klart større genfindelse end sugecellerne i PTFE, specielt ved forureninger med phenanthren. Dette skyldes, at phenanthren absorberede til PTFE-sugecellerne.
- Kolonneforsøgene viste, at den mængde forurening, som sidder adsorberet til jordmatricen i batchbeholderne ikke kan negligeres i beregningerne.

- Ved kolonneforsøgene er de målte poreluftkoncentrationer af forureningskomponenterne væsentligt lavere end forventet ud fra ligevægtsberegninger.
- Ved lysimeterforsøgene med "low flow" har detektion af benzin, BTEX'er og phenanthren i vandprøver voldt vanskeligheder. Den oprindeligt anvendte GC/FID-metode er erstattet af en purge-and-trap metode med henblik på at opnå lavere detektionsgrænser.
- Ved lysimeterforsøgene med "low flow" er der ikke påvist nogen klar forskel i stål- og PTFE-sugecellernes evne til at opsamle de tilsatte forureningskomponenter.
- I lysimetrene med lerjord har TCE-koncentrationerne i porevæsken været stadigt stigende gennem forsøgsperioden. Koncentrationerne ligger over de koncentrationer, som er forventet ud fra modelsimuleringer.
- I lysimetrene med sandjord har TCE-koncentrationerne i porevæsken været svagt faldende gennem perioden. Dette skyldes formentlig fordampning fra lysimetrene. Koncentrationerne i porevæsken svarer nogenlunde til det forventede ud fra modelberegninger.

4.4.3 Økonomi

Ud fra de udførte teknologiaktiviteter er der ikke grundlag for at estimere omkostningerne ved udførsel af porevandsmålinger på kommercielle vilkår.

5 Referencer

- Ref. 1. Jordventilation. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 1b. Air sparging. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 2. Termisk assisteret oprensning. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 3. Frakturering, vertikale og horisontale boringer. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen.
- Ref. 4. Passiv ventilation – oversigt og status for Teknologiprogrammets projekter. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 5. Accelereret nedbrydning, PetroTech. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 6. Elektrolytisk jordrensning. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 7. Forceret udvaskning af tjæreforurening. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 8. Jordvask. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 9. Termisk jordbehandling. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 10. Geooxidation. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 11. Fytoremediering. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen. December 2001.
- Ref. 11b. Fytoekstraktion. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen. December 2001.
- Ref. 11c. Trapp, S., A. Köhler, L.C. Larsen, K.C. Zambrano and U. Karlson. 2001. Phytotoxicity of fresh and weathered diesel and gasoline to willow and poplar trees. *J. Soils & Sediments*, 1:71-76.
- Ref. 11d. Larsen, Lars C.; Zambrano, Kim C.; Christiansen, Helle; Köhler, Almut; Karlson, Ulrich; Trapp, Stefan. 2001. Bepflanzung einer Tankstelle mit Weiden. *UWSF Umweltwissenschaften & Schadstoff-Forschung* 13:227-236.
- Ref. 11e. Trapp, S., and U. Karlson. 2001. Aspects of phytoremediation of organic pollutants. *J. Soils & Sediments*, 1:37-43.
- Ref. 11f. S. Trapp, K.C. Zambrano, K.O. Kusk, U. Karlson. 2000. A Phytotoxicity Test Using Transpiration of Willows. *Arch. Env. Contam. Toxicol.*, 39:154-160.
- Ref. 11g. Fytoprensning af metaller. Miljøprojekt nr 536, Miljøstyrelsen 2000.
- Ref. 12. Fytoprensning i kombination med genmodificerede organismer. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 13. Reaktive permeable vægge. Statusnotat, teknologiprogram for jord-

- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 14. Stimuleret nedbrydning af klorerede opløsningsmidler i grundvand. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 15. On-site rensning af MTBE forurenede grundvand. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen.
- Ref. 16. Biologisk luftfilter. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 17. Naturlig nedbrydning. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 18. Afprøvning af in well aerator. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 19. Projekt for bedre information og tidlig indsats på boliggrunde med moderate indeklimapåvirkninger fra chlorerede opløsningsmidler. Rapport under udarbejdelse af Fyns Amt og Miljøstyrelsen. Publiceres i 2002.
- Ref. 20. Måling af stof flux gennem konstruktioner. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen.
- Ref. 21. Passiv poreluftscreening, Goresorber. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 22. Udvaskningstests. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 23. Undersøgelser af porevandsprøver. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen
- Ref. 24. Forsøg med kombineret kemisk og biologisk filter til rensning af grundvand forurenede med klorerede opløsningsmidler. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen. December 2001.
- Ref. 25. Air sparging. Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen. December 2001.
- Ref. 26. Orientering nr. 5 2001 fra Miljøstyrelsen. Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening, 2001.

Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening

Sted	Teknik	Forurening ²⁾	Anvendelse In situ On site Ex. site Virker ikke	Geologi ³⁾ Ler Silt Sand Grus Kalk, opsprækket Tørv Gytje	Hydrogeologi Umættet zone Mættet zone (frit og spændt magasin)	Lokalitets- størrelse ⁴⁾ (relativt) Lille Mellem Stor	Effekt (oprensning- /afskæring) Høj > 90 % Mellem 50-90% Lav < 50 % Virker ikke	Oprensnings- periode Kort < ¼ år Mellem ¼ - 3 år Lang. > 3 år	Anlægsud- gifter (relativt) Høje Mellem Lave	Driftsud- gifter (relativt) Høje Mellem Lave	Læs mere i: Reference/afsnit	
Kildeoprensning	Vakuumentilation	Benzin, chlor. opl., BTEX	In situ	Sand - grus (kalk)	Umættet zone	Lille - stor	Mellem	Mellem	Mellem	Mellem	1	2.1
	Airsparging	Benzin, let gasolie, BTEX, chlor. opl.	In situ	Sand - grus	Mættet zone (frit)	Lille - stor	Mellem	Mellem	Mellem - høje	Mellem	1b	2.2
	Dampstripping	Benzin, BTEX, chlor. opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot	In situ	Sand - grus (kalk)	Umættet og mættet zone (frit)	Mellem - stor	Høj	Kort	Mellem - høje	Høje	2	2.3
	Termisk ledningsevne	Benzin, BTEX, chl.opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære	In situ	Ler, silt, sand	Umættet og mættet zone (frit)	Lille	Høj ⁷⁾	Kort	Høje	Høje	2	2.4
	Frakturering, vertikale og horisontale borer	Benzin, let og tung gasolie, BTEX, chlor. opl., næringssalte	In situ	Ler, silt, kalk, klippe	Umættet og mættet zone	Mellem - stor	¹⁾	¹⁾	Høje	Høje	3	2.5
	Passiv ventilation	Benzin, BTEX, chlor. opl.	In situ	Sand - kalk	Umættet	Lille - stor	Lav	Lang	Lave	Lave	4	2.6
	Accelereret nedbrydning, PetroTech	Let og tung gasolie	On site	Ler - kalk	-	Lille - stor	Virker ikke	Kort	Lave	Lave	5	2.7
	Elektrodialytisk jordrensning	Metaller	On site, ex site	Ler - kalk	-	Lille	Lav - virker ikke	Kort	Høje	Høje	6	2.8
	Forceret udvaskning af tjæreforurening	Tjærekomponenter, PAH, BTEX	In situ	Sand - grus	Umættet og mættet	Mellem - stor	Lav - mellem	Lang	Lave	Lave	7	2.9
	Jordvask	Benzin, let gasolie, chlor. opl.	Ex site	Blandet med grove fraktioner	Umættet og mættet	Lille	Virker ikke	Kort	⁵⁾	⁵⁾	8	2.10
	Termisk jordbehandling	Tjærekomponenter, PAH, chlor opl., BTEX, gasolie mv.	Ex situ, on site	Alle	Umættet og mættet	Mellem - stor	Høj	Kort	Høje	Høje	9	2.11
	Geooxidation	Benzin, let gasolie	In situ	Ler	Umættet og mættet	Lille - stor	Virker ikke	-	Lave - mellem	Lave	10	2.12
	Fytooprensning af olie- og tjæreforureninger	Olie, PAH	In situ	Alle	Umættet	Stor	Lav - mellem	Lang	Lave	Lave	11,11b-f	2.13
Fytooprensning af tungmetaller	Metaller	In situ	Alle	Umættet	Stor	Lav	Lang	Lave	Lave	11b	2.14	
Fytooprensning i kombination med genmodificerede organismer	PCB, TCE, PAH	In situ	Alle	Umættet	Stor	Lav	Lang	Lave	Lave	12	2.15	
Spredningskontrol	Reaktive permeable jernvægge	PCE, TCE, TCA, hexavalent chrom	In situ	Sand, grus	Mættet	Lille - stor	Mellem - høj	Lang	Høje	Lave	13	3.1
	Jernfilter til rensning for chlorerede opløsningsmidler	PCE, TCE, TCA	On site	-	-	Lille - stor	Lav - høj	-	Høje	Lave	13	3.2
	Jernfilter til rensning for kromforurening	Hexavalent chrom	On site	-	-	Lille - stor	Høj	-	Lave	Lave	13	3.3
	Biologisk jernfilter	PCE, TCE, DCE, VC	On site	-	-	Lille - stor	-	-	Høje	Lave	24	3.4
	Forceret nedbrydning med HRC	Chlorerede opløsningsmidler	In situ	Sand	Mættet	Lille - stor	Mellem	Mellem	Lave - mellem	Lave	14	3.5
	Biologisk nedbrydning af MTBE	MTBE	On site	-	-	Lille - stor	-	-	-	-	15	3.6
	Sorptionsfiltre for MTBE	MTBE	On site	-	-	Lille - stor	-	-	-	-	15	3.7
	Biologisk luftfilter	Chlorerede opløsningsmidler	On site	-	Umættet	-	-	-	-	-	16	3.8
	Passiv ventilation	Benzin, BTEX, chlor. opl.	In situ	Sand - kalk	Umættet	Lille - stor	Stor effekt lokalt	Lang	Lave	Lave	4	3.9
	Naturlig nedbrydning	Benzin, let gasolie, chlor. opl.	In situ	-	-	-	-	-	-	-	17	3.10
	Modifieret stripningsmetode, IWA	Chlor. opl., BTEX	In Situ	Sand - kalk	Mættet	Lille - stor	Stor	Lang	Lave	Høje	18/27	3.11
	Simple og hurtige teknikker til sikring af indeklime	Chlor. opl., BTEX	On site	-	-	-	Lav ⁶⁾	Lang	Lave	Lave	19	3.12
Måleteknik	Fluxmålinger	Benzin, let gasolie, chlor. opl.	On site	-	-	-	-	-	-	-	20	4.1
	Passiv poreluftscreening, Goresorber	Benzin, BTEX, chl.opl., naphthalen, let og tung gasolie, creosot, tjære	In situ	Alle	Umættet	Lille - stor	-	-	-	-	21	4.2
	Udvaskningstests	Olie, Chl. opl. og PAH'er	Ex site	Ler - grus	Mættet og umættet	-	-	-	-	-	22	4.3
	Undersøgelse af porevandsprøver	TCE, benzin, phenanthren, MTBE	Ex site	Ler - grus	Umættet	-	-	-	-	-	23	4.4

- 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) Der opnås ingen egentlig oprensning, men en forholdsvist markant reduktion af forureningsindtrængning i bygninger.
- 7) Vurderingen er baseret på oplysninger fra litteraturen og ikke fra feltafprøvning i Danmark.