

MILJØPROJEKT **Nr. 554** 2000

TEKNOLOGIUDVIKLINGSPROGRAMMET FOR
JORD- OG GRUNDVANDSFORURENING

Afprøvning af ny elektrokemisk metode til oprensning af olieforurenede jord og grundvand

Jens-Ole Petersen, Claus Larsen og Mikael E. Nielsen

Dansk Miljørådgivning A/S

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

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

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

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING	7
ENGLISH SUMMARY	9
1 INDLEDNING.....	11
2 BAGGRUND OG FORMÅL	13
2.1 BAGGRUND.....	13
2.2 FORMÅL	15
3 DEN ELEKTROKEMISKE METODE.....	17
3.1 TEKNIK BESKRIVELSE.....	17
3.2 DESIGN	18
4 BESKRIVELSE AF PROJEKTLOKALITETEN	21
4.1 UNDERSØGELSER OG DELVIS OPRENSNING	21
4.2 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI.....	22
4.2.1 <i>Geologi</i>	22
4.2.2 <i>Hydrogeologi</i>	23
4.3 FORURENINGSSITUATION	23
4.3.1 <i>Jordforurening</i>	23
4.3.2 <i>Grundvandsforurening</i>	24
4.3.3 <i>Indeklima</i>	25
5 ELEMENTER I TEKNOLOGIPROJEKTET	27
5.1 OPBYGNING AF ANLÆG.....	27
5.2 MONITERINGSPROGRAM	28
5.2.1 <i>Drift</i>	28
5.2.2 <i>Moniteringsstationer</i>	28
5.2.3 <i>Grundvand</i>	28
5.2.4 <i>Jord</i>	29
5.2.5 <i>Poreluft</i>	29
5.2.6 <i>Korrosionsrisiko</i>	29
5.2.7 <i>Samlet monitoringsprogram</i>	30
6 RESULTATER FRA TEKNOLOGIPROJEKTET	31
6.1 UDVIKLING I FORURENINGSKONCENTRATIONEN	31
6.1.1 <i>Jord</i>	31
6.1.2 <i>Grundvand</i>	33
6.1.3 <i>Poreluft</i>	35
6.2 ANDRE PARAMETRE.....	36
6.3 SIKKERHEDSMÆSSIGE FORHOLD.....	37
7 FELTERFARINGER MED ELEKTROKEMISK OPRENSNING.....	39
7.1 OM'S FORSØGSPROJEKTER	39
7.2 MONITERING OG OPRENSNINGSEFFEKTIVITET	40
8 KONKLUSION	43
8.1 HOVEDKONKLUSIONER.....	43
8.2 DELKONKLUSIONER	44
9 REFERENCER.....	45

Bilag A: Situationsplan	49
Bilag B: Resultater fra Teknologiprojektet.....	51
Bilag C Erfaringer fra andre elektrokemiske oprensninger i Danmark ...	65

Forord

Denne rapport er udført som et led i Miljøstyrelsens program for teknologi-udvikling, der er en særlig ordning for udvikling og afprøvning af nye rensnings- og afværgeteknologier på jordforureningsområdet.

Projektet er udført inden for indsatsområdet for olie- og benzinforurenet jord og grundvand og tager sit udgangspunkt i et feltprojekt, hvor en ny elektrokemisk metode til rensning af olie- og benzinforurenede grunde er undersøgt.

Styringsgruppe i forbindelse med projektet har været:

Steen Berg Pedersen, Oliebranchens Miljøpulje
Inger Asp Fuglsang, Miljøstyrelsen
Michael E. Nielsen, Dansk Miljørådgivning A/S
Tom Heron, Niras (faglig sekretær for Miljøstyrelsen)

Projektrapporten er udarbejdet af Jens-Ole Petersen, Dansk Miljørådgivning A/S i samarbejde med Claus Larsen og Mikael E. Nielsen ligeledes Dansk Miljørådgivning A/S.

Sammenfatning

<i>Baggrund for teknologiprojektet</i>	Dette teknologiprojekt er udarbejdet på baggrund af felterfaringer opnået med en ny elektrokemisk in-situ metode til rensning af olieforurenet jord og grundvand. Ved metoden påføres jordmatricen en elektrisk jævnstrøm.
<i>"Geooxidation"</i>	Metoden blev i 1996 lanceret i Danmark under navnet "Geooxidation". Der er i perioden fra 1996-2000 gennemført en række in-situ oprensninger med metoden på olieforurenede grunde. Hovedparten af oprensningerne er udført som forsøgsprojekter, med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre.
<i>Feltprojekt og monitoring</i>	Teknologiprojektet tager udgangspunkt i ét feltprojekt, udført med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Sideløbende med in-situ oprensningen har Miljøstyrelsens program for teknologiudvikling finansieret gennemførelsen af et udvidet monitoringsprogram, til bestemmelse af metodens indvirkning på forureningskoncentrationen af benzin i jord, og benzin og MTBE i grundvand. Ved monitoringen er en række jord- og grundvandskemiske parametre bestemt, for at opnå en bedre beskrivelse af metoden, og for at vurdere eventuelle risici ved anvendelse af elektrisk jævnspænding til in-situ oprensning. Feltprojektet er gennemført i perioden fra 21. august 1998 til den 31. marts 2000.
<i>Erfaringsopsamling</i>	For at styrke rapportens konklusioner vedrørende metodens generelle anvendelighed er der endvidere gennemført en erfaringsopsamling på baggrund af resultaterne fra de øvrige forsøgsprojekter med metoden, gennemført med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Erfaringsopsamlingen er finansieret gennem Miljøstyrelsens program for teknologiudvikling.
<i>Forventninger til metoden</i>	Den elektrokemiske metode er af de in-situ entreprenører, der udbyder metoden, introduceret som en økonomisk konkurrencedygtig oprensningsmetode, der muliggør oprensning af olieforureninger i lavpermeable jordtyper med en oprensningstid på 3-12 måneder.
<i>Vidensniveau</i>	Det nuværende vidensniveau for hvilke kemiske og/eller biologiske processer det elektriske jævnstrømsfelt kan påvirke, der evt. kan forklare en fjernelse af organiske forureningskomponenter, er mangelfuldt. Der mangler således en fyldestgørende teoretisk beskrivelse og dokumentation fra kontrollerede laboratorieforsøg, som kan dokumentere under hvilke betingelser, der eventuelt kan opnås en øget reduktion i forureningskoncentrationen ved den elektrokemiske metode.
<i>Korrosionsrisiko</i>	Felterfaringerne har vist, at det anvendte elektriske jævnstrømsfelt medfører væsentlig risiko for korrosionsskader. Der bør derfor ved anvendelsen af jævnspænding til in-situ oprensning foretages en kortlægning af alle installationer i og omkring spændingsfeltet, med henblik på at foretage en vurdering af behovet for korrosionsbeskyttelse af udsatte installationer.
<i>Grundvandskemi</i>	Resultaterne fra monitoringen af en række jord- og grundvandskemiske parametre har ikke vist væsentlige ændringer i jord- og grundvandskemien under oprensningen. Velkendte elektrokinetiske fænomener, som pH-ændringer som følge af hydrolyse af vand, iontransport, elektroosmose m.v., vurderes kun at have haft mindre betydning, som følge af de lave feltstyrker, der er anvendt, og som følge af den kontinuerte grundvandstilførsel.

Oprensningseffekt

Resultaterne fra det gennemførte feltprojekt, samt den generelle erfaringsopsamling fra de øvrige af OM's forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode, viser, at resultaterne ikke har stået mål med forventningerne. Der er således ikke påvist en væsentlig oprensningseffekt i forhold til jord- og grundvandsforureninger med olieprodukter. Alle de igangsatte forsøgsprojekter nævnt i dette projekt er derfor p.t. indstillet, og ingen af de gennemførte oprensninger har kunnet afsluttes alene på baggrund af den elektrokemiske oprensning.

Oprensningerne er gennemført på benzin og dieselolieforureninger, i forskellige jordtyper, og under varierende redoxbetingelser. Der er ikke konstateret en forbedret oprensningseffekt ved bestemte forhold.

Behov for dokumentation

Det vurderes, at der bør fremlægges et betydeligt bedre dokumentationsgrundlag fra kontrollerede laboratorieforsøg inden eventuelle yderligere feltforsøg igangsættes med det nuværende koncept. Laboratorieforsøgene skal kunne dokumentere, at elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatri-
cen kan medføre en fjernelse af olieprodukter og i givet fald under hvilke betingelser.

Elektrokinetisk baserede metoder

Den elektrokemiske metode, omtalt i dette projekt, har ikke været designet til at udnytte de elektrokinetiske transportprocesser, der opstår ved påføring af en elektrisk jævnstrøm til jordmatri-
cen. Elektrokinetisk baserede metoder til oprensning af olieforurenet jord er under stadig udvikling, og der ligger således fortsat et stort udviklingspotentiale i de elektrokinetisk baserede metoder.

English Summary

<i>Background for the technology project</i>	The present technology project has been prepared on the basis of field experiences obtained with a new electrochemical in-situ technology for remediation of soil and groundwater contaminated with petroleum hydrocarbons. The technology is based on application of a direct current to the soil matrix.
<i>"Geooxidation"</i>	The technology was introduced in Denmark in 1996 under the name "Geo-oxidation". During the period 1996-2000, a number of in-situ remediation projects were carried out at sites contaminated with petroleum hydrocarbons. Most of the projects were carried out as test projects by Oliebranchens Miljøpulje.
<i>Field project and monitoring</i>	The technology report uses one of the field projects carried out by Oliebranchens Miljøpulje as its starting point. An extensive monitoring program including soil and groundwater related chemical parameters, funded by the "Programme for Technology Development" under the Danish EPA, was carried out at this site concurrently with the remediation effort. The extensive monitoring program was carried out in order to determine the influence of the technology in reducing gasoline content in the soil matrix, as well as gasoline and MTBE contents in the groundwater. Also the monitoring program was carried out in order to facilitate a better description of the technology, and evaluate the possible risks associated with the application of direct current for in-situ remediation. The field project was carried out during the period August 21, 1998, through March 31, 2000.
<i>General experiences</i>	In order to strengthen the report's conclusions regarding the general applicability of the technology, available data from the other field projects applying the technology, carried out by Oliebranchens Miljøpulje, were collected and evaluated. This part of the project was funded by the "Programme for Technology Development" under the Danish EPA.
<i>Expectations for the technology</i>	The contractors providing the electrochemical technology, introduced the technology as cost-effective for remediation of petroleum hydrocarbon contamination in low permeable soils, and with expected clean-up times of 3 to 12 months.
<i>Knowledge level</i>	The present understanding of the degree to which the electrical field induces or enhances chemical and/or biological processes responsible for removal of organic contaminants is insufficient. Hence, an adequate theoretical description and documentation based on laboratory tests, and carried out under controlled conditions, is required in order to document the conditions required for possible enhanced contaminant removal by the electrochemical method.
<i>Corrosion risk</i>	Field experiences have shown that the applied direct current electrical field entails a considerable risk of corrosion damages. Hence, mapping of all installations in and around the imposed electrical field should precede the application of direct current for in-situ site remediation, in order to assess the need for corrosion protection of exposed installations.

<i>Groundwater chemistry</i>	The monitoring results for a number of soil and groundwater related chemical parameters did not reveal notable changes in the soil and groundwater chemistry during site remediation. Hence, it is concluded that well known electrochemical phenomena, such as changes in pH, relating to hydrolysis of water molecules, ion transport, electro-osmosis etc. have occurred only to a minor degree due to the continuous supply of groundwater, and the low-intensity electrical field applied at the project location.
<i>Remediation efficiency</i>	<p>The results from the extensive field project and the general results obtained at all of the field projects carried out in Denmark, show that the technology expectations have not been met. Hence, at this point in time, all remediation efforts based on the technology, and mentioned in the present report, have been terminated, and none of the sites have been able to meet site closure criteria by use of the electrochemical technology alone.</p> <p>The remediation efforts have been carried out at gasoline and diesel polluted sites in different soil types and under varying redox conditions. It was not documented that these conditions influence the remediation efficiency.</p>
<i>Need for further documentation</i>	It is concluded, that a thorough documentation of the technology, based on laboratory experiments under controlled conditions, should be obtained before further field application of the technology in its present form. Laboratory results should document whether electrochemically induced reactions can remove petroleum hydrocarbons in soil, and if so, under which conditions.
<i>Electrokinetic methods</i>	The electrochemical technology, as presented in this project, has not been designed for utilization of electrokinetic transport processes induced by direct current application to the soil matrix. Electrokinetically based technologies, for remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons, are under continuous development, and there is still a large development potential for such technologies.

1 Indledning

Program for teknologi udvikling

Nærværende teknologiprojekt er udført som et led i Miljøstyrelsens program for teknologiudvikling, der er en særlig ordning for udvikling og afprøvning af nye rensnings- og afværgeteknologier på jordforureningsområdet.

Ordningen er etableret med henblik på gennem en koordineret indsats på teknologiområdet m.v. at effektivisere og billiggøre oprydninger på depotområdet samt at fjerne barrierer for udvikling og anvendelse af målrettede teknologier over for jord- og grundvandsforureninger.

Indsatsområde

Projektet er udført inden for indsatsområdet for olie- og benzinforurenet jord og grundvand og tager sit udgangspunkt i et feltprojekt, hvor en ny elektrokemisk metode til rensning af olie- og benzinforurenede grunde er undersøgt. Metoden er mest kendt under det kommercielle navn "Geooxidation", men vil i nærværende rapport blive refereret til som "den elektrokemiske metode".

Indhold af teknologiprojektet

Teknologiprojektet tager udgangspunkt i ét feltprojekt, udført med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Sideløbende med in-situ oprensningen for Oliebranchens Miljøpulje har Miljøstyrelsens program for teknologiudvikling finansieret gennemførelsen af et udvidet monitoringsprogram. Desuden indgår der i teknologiprojektet en data- og erfaringsopsamling på øvrige forsøgsprojekter gennemført af Oliebranchens Miljøpulje.

Opbygning af rapporten

Rapporten indeholder en beskrivelse af baggrund og formål med teknologiprojektet (Kapitel 2) og en generel beskrivelse af den elektrokemiske metode (Kapitel 3). Herefter gives en beskrivelse af projektlokaliteten, monitoringsprogram og resultater fra det gennemførte teknologiprojekt (Kapitel 4, 5 og 6). Derudover gives en gennemgang af de øvrige danske erfaringer med metoden (Kapitel 7). Sidst i hovedrapporten er konklusioner og perspektiver for anvendelsen af den elektrokemiske metode sammenfattet (Kapitel 8).

Bilagsdelen indeholder situationsplan og analyseresultater fra teknologiprojektet (Bilag A og B). Endvidere er der en gennemgang af de enkelte sager der indgår i erfaringsopsamlingen (Bilag C).

2 Baggrund og formål

2.1 Baggrund

Geooxidation

Der er i de seneste år iværksat en række in-situ oprensninger på olieforurenede grunde via en metode lanceret under navnet "Geooxidation".

Størsteparten af sagerne iværksat i Danmark er udført som forsøgsprojekter i forbindelse med oprensninger udført for Oliebranchens Miljøpulje. Det første forsøgsprojekt blev igangsat af Oliebranchens Miljøpulje (OM) i 1996.

Perspektiver

De perspektiver der blev stillet i udsigt af det tyske entreprenørfirma, der introducerede oprensningsmetoden i Danmark, var en økonomisk konkurrencedygtig in-situ metode, der muliggjorde oprensning af olieforureninger også i lavpermeable jordtyper, hvor traditionelle in-situ metoder som air-sparging og ventilation ikke har væsentlig effekt. Metoden har endvidere ifølge de tyske in-situ entreprenører den fordel, at oprensningstiden er 3-12 måneder. Dette er betydeligt mindre end normale in-situ oprensninger.

Dokumentation

På grund af en række mangler i dokumentationen af metodens effektivitet blev det første projekt udført af den tyske entreprenør som et demonstrationsprojekt efter et "no cure, no pay" princip. Efter en driftsperiode på ca. ét år blev der ved to prøvetagningsrunder ikke konstateret indhold af olieprodukter over de fastsatte oprensningskriterier, og oprensningen blev i første omgang godkendt af myndighederne. Efterfølgende kontrolmålinger udført på OM's egen foranledning har dog vist, at der fortsat i et mindre område er oliekoncentrationer over oprensningskriterierne på ejendommen.

På baggrund af de lovende perspektiver mht. pris, tidshorisont og oprensningsmuligheder i lavpermeable jorde m.v., blev en række yderligere forsøgsprojekter igangsat af OM i perioden fra 1997-1998 for at afklare den generelle anvendelighed af metoden.

Valg af lokaliteter

Forsøgsprojekterne er udført på lokaliteter, hvor der ikke har været oplagte alternativer til fjernelse af forureningen. De fleste af forureningerne har således ikke umiddelbart kunnet opgraves. Endvidere har de geologiske forhold på ejendommene generelt vanskeliggjort oprensning med velkendte og vel-dokumenterede oprensningsmetoder.

Virkningsprincip

Den elektrokemiske metodes virkningsprincip består i at påføre den olieforurenede jordmatrice en relativ svag elektrisk jævnstrøm. Strømmen påføres ved hjælp af elektroder, som oftest i form af jernspuns, der vibreres ned i jorden eller som nedborede jernrør.

Forklaringsmodeller

Der er forsøgt opstillet flere forklaringsmodeller for metodens virkningsprincip. Fælles er, at der skelnes mellem to fænomener:

- Elektrokinetisk transport.
- Elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen.

Elektrokinetisk transport

De elektrokinetiske transportprocesser er teoretisk velbeskrevne processer, hvor opløste stoffer kan transporteres i det elektriske felt som følge af bl.a. elektromigration, elektroosmose og diffusion /1, 2/. 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 /3-8/.

De seneste år er der endvidere udviklet og afprøvet elektrokinetiske metoder til oprensning af organiske forureningskomponenter /9-10/. De elektrokinetiske metoder er i laboratorieforsøg og enkelte feltforsøg bl.a. anvendt til oprensning af svage organiske syrer og phenoler /11-12/, PAH'er /13/, BTEX'er og kulbrinteblandinger /14/, chlorerede opløsningsmidler /15/ og herbicidet 2,4-dichlorphenoxycarboxylsyre (2,4 D) /16/.

De elektrokinetiske transportprocesser er bl.a. anvendt til tilsætning og transport af næringssalte /17,18/, kemiske oxidationsmidler /19, 20/, overfladeaktive stoffer /13/ og bakterier /21, 22/. Desuden kan elektrokinetiske metoder integreres med behandlingszoner indlagt i det elektriske felt, hvor forureningen f.eks. enten kan sorberes eller nedbrydes /23/. Endvidere kan den elektrokinetiske transport anvendes til styring af den hydrauliske gradient f.eks. i forbindelse med afværge /4/.

En række faktorer kan indvirke på det elektroosmotiske flow, herunder bl.a. jordens elektroosmotiske permeabilitet, porevandets ledningsevne, vandindhold og ion-sammensætning. Der kan være flere problemer ved anvendelsen af elektrokinetiske metoder til in-situ oprensning af forurenet jord, bl.a. langsom transporthastighed, konditionering- og vandbehandlingsproblemer. Endvidere kan der opstå ustabile driftsforhold som et resultat af f.eks. problemer med pH-styring, udtørring, sprækkedannelse og udfældning af metaller og mineraler ved katoden. /23, 24/

Elektrokemisk inducerede reaktioner

De elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen er en ny indgangsvinkel til anvendelsen af elektrisk jævnstrøm på en jordmatrice. Sideløbende med de elektrokinetiske processer forventer de entreprenører, der anvender metoden, at der sker en række elektrokemisk inducerede reaktioner, som medfører en øget nedbrydning af forureningskomponenter i jordmatricen mellem elektroderne.

Det er således elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen, der er den bærende ide i metoden. I det følgende præsenteres to af de forklaringsmodeller, der er forsøgt opstillet.

Model 1 Kemisk oxidation

Da metoden blev introduceret i Danmark under navnet "Geooxidation" lancerede entreprenøren den som en metode, der vil medføre en fuldstændig kemisk oxidation af næsten alle organiske forureningskomponenter til kuldi-oxid og vand i alle jordtyper /25/. Nedbrydningen forventes at ske som følge af kemisk oxidation ved dannelsen af kraftige kemiske oxidationsmidler på de enkelte jordkorn.

Der er ikke fremlagt fyldestgørende dokumentation, hverken fra in-situ projekter eller laboratorieforsøg, der kan underbygge de postulerede reaktionsveje. De diskuteret forklaringsmodeller indeholder endvidere en række teoretiske problemer, bl.a. kræver de diskuteret reaktionsveje normalt tilførsel af høje energimængder, og vil kun forløbe på elektrisk ledende overflader (de fleste jordmineraler er at betragte som isolatorer).

Model 2: Elektrisk ledende jordmineraler

En anden forklaringsmodel udviklet på Dresden Universitet i Tyskland bygger på tilstedeværelsen af elektrisk ledende jordmineraler i jordmatricen som f.eks. grafit og magnetit /26/. Det forventes, at der sker elektrokemisk inducerede redoxreaktioner på overfladen af de elektrisk ledende partikler, der medfører en nedbrydning af organiske forureningskomponenter.

Der er til dokumentation af sidstnævnte forklaringsmodel udført laboratorieforsøg med tilsætning af elektrisk ledende mineraler til en modeljord. Af forsøgsresultaterne fremgår det, at tilstedeværelsen af elektrisk ledende mineraler tilsyneladende medfører en øget nedbrydning af bl.a. PAH-forbindelsen anthracen /26/.

Forsøgsresultaterne er forsøgt eftervist på Aalborg Universitet, hvor der dog tilsyneladende under de samme forsøgsbetingelser ikke kunne konstateres en nedbrydning af anthracen /27/. Årsagen til problemerne med at reproducere forsøgsresultaterne er ifølge D. Rahner, Dresden Universitet, det forhold, at redoxbetingelserne i jorden har afgørende indflydelse på hvilke reaktioner der vil forløbe, og dermed om en nedbrydning vil forekomme/28/. Ud over tilstedeværelsen af elektrisk ledende jordmineraler kræver forklaringsmodellen således tilsyneladende, at de naturligt forekommende redoxbetingelser, f.eks. tilstedeværelsen af ilt, nitrat, jern(III) m.v., er gunstige i forhold til en nedbrydning af forureningen. Forklaringsmodellen nærmer sig derved en model for stimuleret naturlig nedbrydning.

Status

Sammenfattende må det konkluderes, at der er stor usikkerhed om hvilke kemiske og/eller biologiske processer det elektriske jævnstrømsfelt kan påvirke, der evt. kan forklare en nedbrydning af organiske forureningskomponenter.

2.2 Formål

Teknologiprojektets udgangspunkt

Teknologiprojektet tager sit udgangspunkt i ét feltprojekt med den elektrokemiske metode, der er igangsat med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Teknologiprojektet er endvidere undervejs blevet udvidet til også at inddrage en erfaringsopsamling fra de øvrige forsøgsprojekter udført for Oliebranchens Miljøpulje.

Baggrunden for teknologiprojektet er således, at der uden forudgående videnskabelig dokumentation er iværksat en række oprensninger med den elektrokemiske metode. Miljøstyrelsen og Oliebranchens Miljøpulje har fundet det af væsentlig generel interesse, at tilvejebringe et udbygget kendskab til metodens eventuelle oprensningseffekt. Dette kendskab etableres dels gennem en detaljeret monitoring på ét feltprojekt, og dels gennem en sammenstilling af erfaringer fra de øvrige gennemførte afværgeprojekter med metoden.

Formålet med teknologiprojektet er opdelt i en række hoved- og delmål. Hovedformålet med projektet har været:

Hovedformål

- Med udgangspunkt i ét konkret feltprojekt at dokumentere, hvorvidt påføringen af en elektrisk jævnstrøm medfører en reduktion af en kortlagt jord- og grundvandsforurening med benzin og MTBE.
- På baggrund af en erfaringsopsamling på øvrige forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode, at styrke rapportens konklusioner vedrørende metodens generelle anvendelighed og effektivitet. Desuden belyses erfaringer med anvendelsen af metoden i forskellige jordtyper og under forskellige redoxforhold.

Delformål

Delformål med teknologiprojektet har været med udgangspunkt i det gennemførte feltprojekt:

- At udarbejde en teknisk beskrivelse af metoden.
- At undersøge risikoen for en forøget spredning af forureningen med grundvandet som følge af oprensningen.
- At undersøge risikoen for forøget afdampning af flygtige forureningskomponenter.
- At vurdere risikoen for opkoncentrering af tungmetaller ved elektroderne.
- At undersøge ændringer i kemiske ligevægte i jord og grundvand samt jordens temperatur som følge af den påførte elektriske jævnstrøm.
- At 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.

3 Den elektrokemiske metode

I dette kapitel gives en kort gennemgang af de kendte fysiske og kemiske processer som påvirkes ved påføring af en elektrisk jævnstrøm til en jordmatrice. De forhold som skal tages i betragtning er principielt de samme som ved anvendelse af de elektrokinetiske oprensningsmetoder som bl.a. er anvendt til oprensning af tungmetalforurenet jord, og som er velbeskrevet i litteraturen.

3.1 Teknik beskrivelse

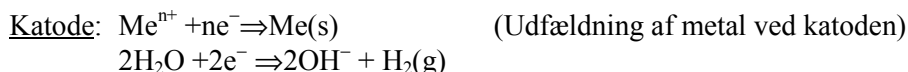
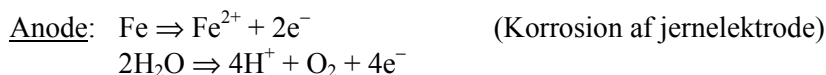
Lave feltstyrker

Generelt er der ved de hidtidige gennemførte forsøgsprojekter i Danmark anvendt væsentligt lavere feltstyrke end der typisk anvendes ved elektrokinetiske oprensningsmetoder. Dette skyldes ifølge de entreprenører, der anvender metoden, at en række af de elektrokinetiske og kemiske effekter ved påføring af jævnstrøm til en jordmatrice enten ikke er ønskede eller er uden betydning for metodens effektivitet. Desuden er der en række sikkerhedsmæssige forskrifter ved anvendelsen af jævnstrøm in-situ, som skal være overholdt.

I det følgende gives en kort beskrivelse af de kendte processer, der vil forløbe ved påføring af en elektrisk jævnstrøm til en jordmatrice.

Elektrodeprocesser

Ved påføring af et elektrisk jævnstrømsfelt til en jordmatrice, vil der på overfladen af elektroderne ske elektrolytiske processer. Processerne sker, som følge af elektronoverførslen mellem elektrodeoverfladerne og reaktanter i jordmatricen. Ved anoden vil oxidationsprocesser forløbe og ved katoden vil reduktionsprocesser forløbe. Umiddelbart kan nedenstående reaktioner forudses ved henholdsvis anode og katode.



Det fremgår af ovenstående, at der ved anoden vil ske en dannelse af H^+ -ioner ved anodisk oxidation af vandmolekyler og en frigivelse af Fe^{2+} , hvilket bevirker en korrosion af anoden.

På katoden vil der ske en udfældning af metaller og en frigivelse af OH^- -ioner ved katodisk reduktion.

En række andre oxidations- og reduktionsprocesser kan endvidere forløbe, afhængigt af elektrodepotentialerne og aktiviteten af de involverede reaktanter i jordvæsken.

Elektromigration

Det elektriske jævnstrømsfelt vil bevirke, at frie ioner i porevæsken vil bevæge sig mod den modsat ladede elektrode. Positivt ladede ioner som f.eks. brintioner og metal-ioner vil bevæge sig mod katoden. Hydroxid-ioner og andre negativt ladede ioner vil bevæge sig mod anoden.

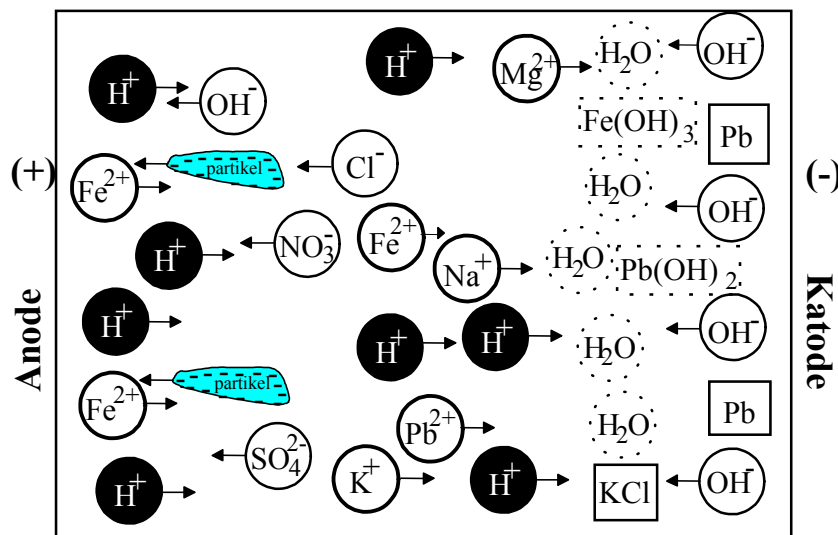
Elektroosmose

Ionerne i jorden vil være mere eller mindre hydratiserede på grund af vandmolekylets dipolære opbygning. Transport af ioner ved elektromigrationen vil derfor indirekte medføre en transport af vand, idet ionerne vil trække vand

med sig. Denne resulterende vandtransport (elektroosmose) vil i stort set alle jorde bevæge sig mod katoden. Dette skyldes bl.a., at kationer typisk er væsentlig mere hydratiserede end anioner. Desuden er nettotransporten af positive ladninger større end nettotransporten af negative ladninger, hvilket skyldes at kationerne i det elektriske dobbeltlag er væsentlig mere mobile end de som oftest immobile negativt ladede jordpartikler.

Elektroforese

Elektroforese er bevægelse af små ladede partikler i et elektrisk felt. I jord vil f.eks. små negativt ladede lerpartikler kunne flyttes i retning af anoden. Transporten vil dog være kraftigt begrænset af friktion mellem jordkornene og elektroforese må derfor forventes at være af mindre betydning i jordmiljøet.



Figur 3.1

Skematisk illustration af elektrokinetiske transportmekanismer. Frit efter /29/

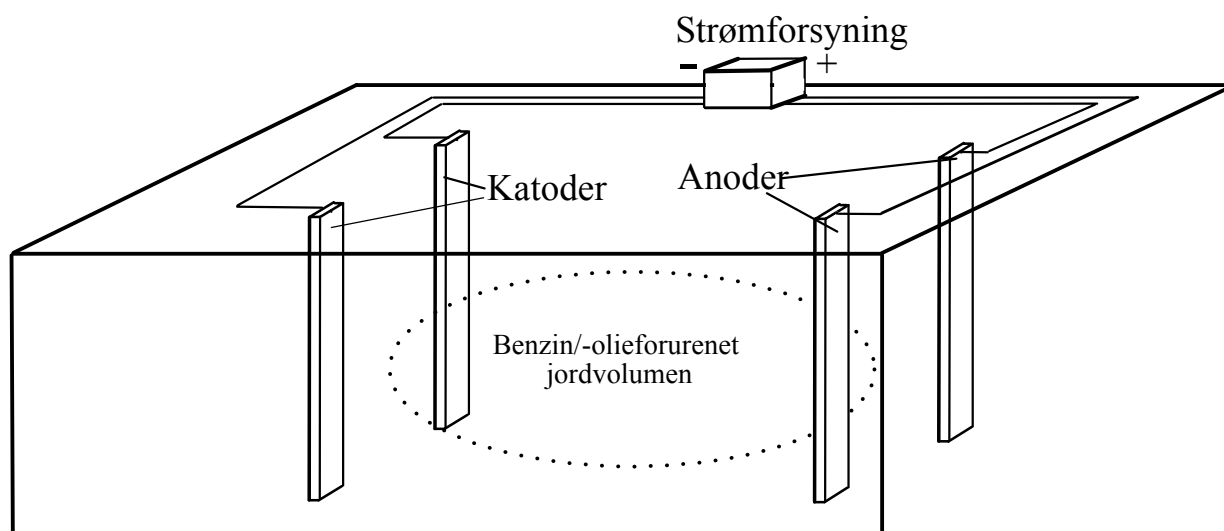
3.2 Design

Dimensionsgivende parametre?

Der er som nævnt i kapitel 2 stor usikkerhed om hvilke kemiske eller biologiske processer forårsaget af det elektriske jævnstrømsfelt, der kan forklare en fjernelse af organiske forureningskomponenter. Der er således ingen tilfredsstillende dokumentation for hvilke parametre, der er styrende for den elektrokemiske metode.

Designet af de anvendte anlæg til elektrokemisk oprensning bygger således primært på in-situ entreprenørernes egne teorier og erfaringer fra foregående projekter.

I figur 3.2 er vist en principskitse af et in-situ anlæg til elektrokemisk oprensning.



Figur 3.2

Principskitse af et in-situ anlæg til elektrokemisk oprensning af olie- og benzinforurenet jord

Nøgletal

I tabel 3.1 er en række nøgletal vedrørende dimensionering af metoden angivet. Tabellen er udarbejdet på baggrund af oplysninger indhentet fra forsøgsprojekter udført med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre.

Tabel 3.1

Nøgletal fra forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode.

Elektroder	
Elektrodetype	Jernspuns/jernrør
Elektrodeafstand (anode-katode)	5-30 m
Elektrodedybde	1,5-12 m
Jord	
Samlet jordmængde pr. elektrodepar	100-1.000 m ³
Strømparametre	
Spænding	45-200 V
Strømstyrke pr. elektrodepar	5-25 A
Feltstyrke	4-30 V/m
Effekt pr. volumenenhed	2-50 W/m ³

Ved de gennemførte forsøgsprojekter i Danmark er der anvendt jernelektroder, i form af nedvibrerede jernspuns eller nedborede jernrør.

I en del af forsøgsprojekterne har entreprenøren valgt at ændre strømretningen, dels for at undgå en for kraftig korrosion af anoden, dels for at hindre at et evt. begyndende pH-fald ved anoden spredt sig ud i jordmatricen.

4 Beskrivelse af projektlokaliteten

I dette kapitel beskrives projektlokaliteten, herunder forudgående afværgetiltag, geologiske forhold og forureningssituationen inden opstart af teknologiprojektet.

4.1 Undersøgelser og delvis oprensning

Servicestation

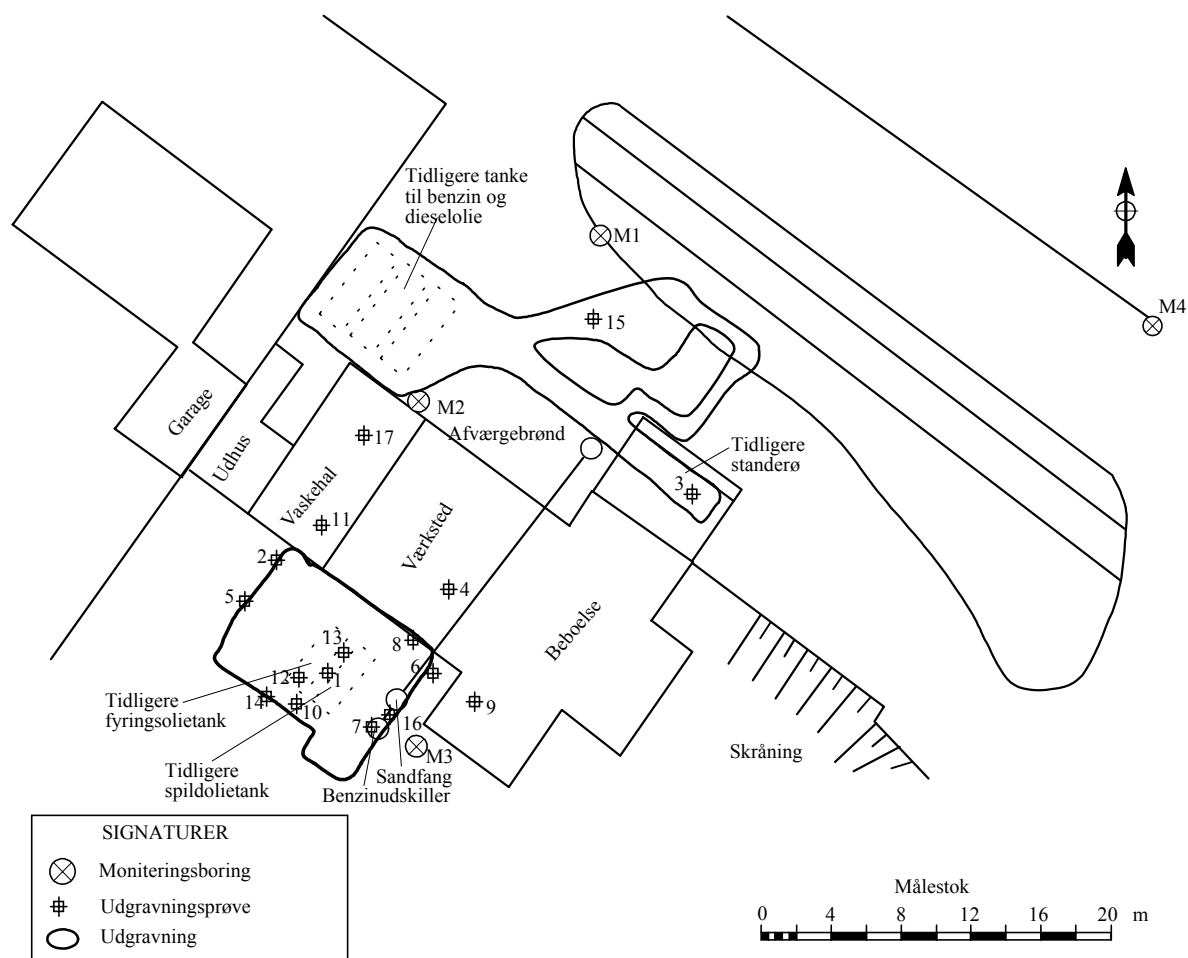
Den valgte projektlokalitet er en tidligere servicestation, hvorfra der har været benzinsalg og værksted i perioden fra 1956-1996. Ejendommen er tilmeldt Oliebranchens Miljøpulje.

Benzinforurening

Ved forureningsundersøgelser udført for Oliebranchens Miljøpulje er der konstateret en betydelig jord- og grundvandsforurening med olieprodukter på ejendommen. Forureningen består primært af benzin.

Afværgepumpning

Kilden til benzinforureningen er bl.a. en lækage på et sugerør til en af de tidligere benzinstandere, konstateret i 1984. I forbindelse med at lækagen blev konstateret, er der bortgravet forurenet jord i ukendt omfang og etableret en 4 meter dyb afværgebrønd til opsamling af forurenet grundvand. Op-pumpet benzinforurenede grundvand er afledt til spildevandssystemet via ejendommens benzinudskiller. Placeringen af afværgebrønd og benzinudskiller fremgår af figur 4.1.



Figur 4.1:

Situationsplan med angivelse af placering af afværgebrønd, og udgravninger, samt prøve-udtagningssteder i forbindelse med gravearbejdet. Analyseresultater er vedlagt i bilag B.

Fjernelse af installationer

I 1997 blev tanke og installationer opgravet og bortskaffet sammen med kraftigt forurenede jord ned til ca. 3,5 m.u.t. ved tankgravene. På figur 4.1 er angivet placeringen udgravninger og opgravede tanke.

Ved en supplerende forureningsundersøgelse, udført inden igangsættelsen af den elektrokemiske oprensning, er det vurderet, at der er efterladt ca. 5.000 tons forurenede jord på ejendommen. Endvidere er der konstateret en kraftig forurening med MTBE og benzin af det sekundære grundvand.

4.2 Geologi og hydrogeologi

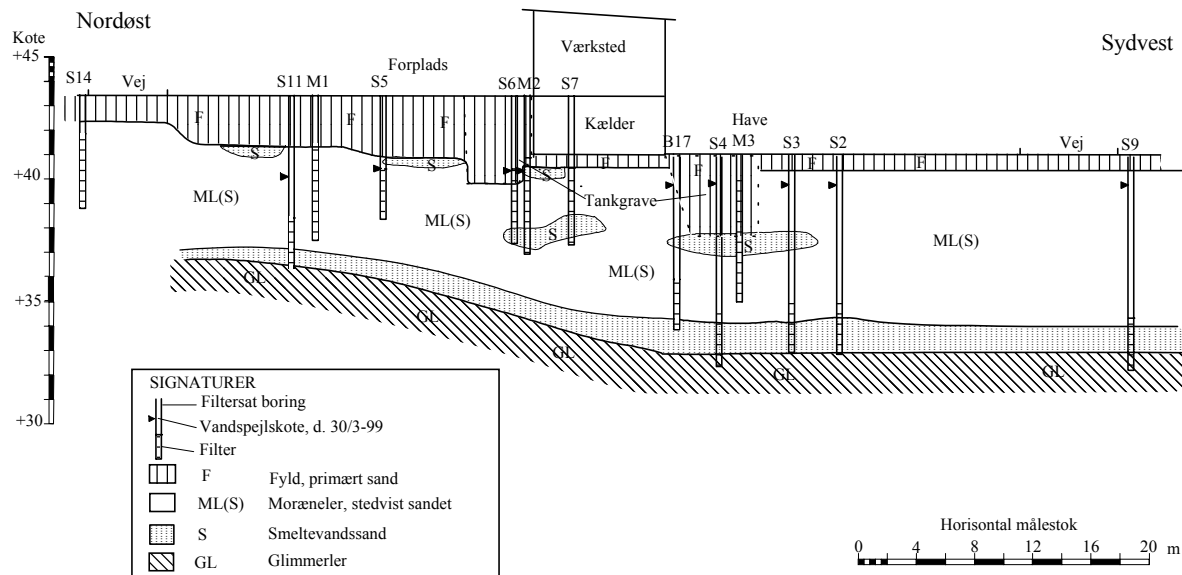
4.2.1 Geologi

Regionale geologiske forhold

Området er generelt opbygget af prækvartære aflejringer af glimmersand og -ler, overlejret af 15-35 meter kvartære aflejringer, hovedsageligt bestående af moræner og vekslende lag af smeltevandssand og -grus.

Lokale geologiske forhold

På figur 4.2 er vist et geologisk tværsnit gennem lokaliteten, udarbejdet på baggrund af de udførte miljøtekniske borer og på ejendommen.



Figur 4.2:

Geologisk tværsnit af lokaliteten. Tværsnittets horisontale placering fremgår af situationsplanen på figur 4.4.

Af det geologiske tværsnit fremgår det, at der på ejendommens forplads træffes ca. 2 meter fyld, primært bestående af sand. Sandet er indbygget i forbindelse med terrænregulering ved etablering af servicestationen og i forbindelse med opgravning af tanke og forurenede jord. Der er således et terrænfald fra ejendommens forplads til haven på ca. 2 meter. Under fyldlaget træffes moræner med indslag af smeltevandssand. Morænersaflejringerne er, især i de øverste ca. 2 meter, flere steder karakteriseret som sande. Der er truffet glimmerler i kote ca. +33-36 på ejendommen, svarende til ca. 8 m.u.t. Umiddelbart over glimmerleret er der konstateret 0,5-1,0 meter vandførende smeltevandssandaflejringer.

Sekundært grundvand

4.2.2 Hydrogeologi

Der er truffet sekundært grundvand i de sandede kvartære aflejringer på ejendommen. På baggrund af pejlinger af grundvandsspejlet vurderes det, at der formentlig er tale om to sekundære grundvandsmagasiner med en begrænset indbyrdes hydraulisk kontakt.

Grundvandsforekomsterne i det øvre sekundære grundvandsmagasin er primært knyttet til fyldlaget og de sandede dele af moræneleren eller sandlag/sandslirer heri. Der er generelt en begrænset vandtilstrømning til boreriger filtersat i det øvre sekundære magasin, og der er ikke truffet vandførende sandlag i alle boreriger.

Det nedre sekundære grundvandsmagasin knytter sig til aflejringerne af smeltevandssand umiddelbart over glimmerleret. Dette grundvandsmagasin er spændt med trykniveau i kote ca. +40. Magasinet har en mægtighed på ca. 1 meter. På baggrund af pejlinger vurderes gradienten i det nedre sekundære magasin at være ca. 0,005. Magasinets transmissivitet er bestemt ved prøvepumpning i boring B3, til ca. $5-8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, jf. bilag B. Porevandshastigheden i det nedre sekundære grundvandsmagasin vurderes på baggrund af ovenstående at være ca. 25-40 meter pr. år.

Trykniveauet i de to magasiner er tæt på hinanden. Det vurderes på baggrund af prøvepumpningen, at der er en begrænset hydraulisk kontakt mellem de to magasiner som følge af lækager.

Strømningsretningen i de to sekundære grundvandsmagasiner er på baggrund af pejlinger begge vurderet som vestlig til sydvestlig, hvilket understøttes af grundvandsforureningens udbredelse, jf. figur 4.4.

Primært grundvand

Det primære grundvandsmagasin knytter sig til de prækvartære sandede aflejringer. Det primære magasin er spændt, med et trykniveau i kote ca. +20 til +30. Det primære grundvandsmagasin er generelt beskyttet af mere end 10 meter glimmerler.

Gradient

Der er en nedadrettet gradient mellem de sekundære og det primære grundvandsmagasin. Trykforskellen er ca. 10-20 meter vandsøjle.

4.3 Forureningssituation

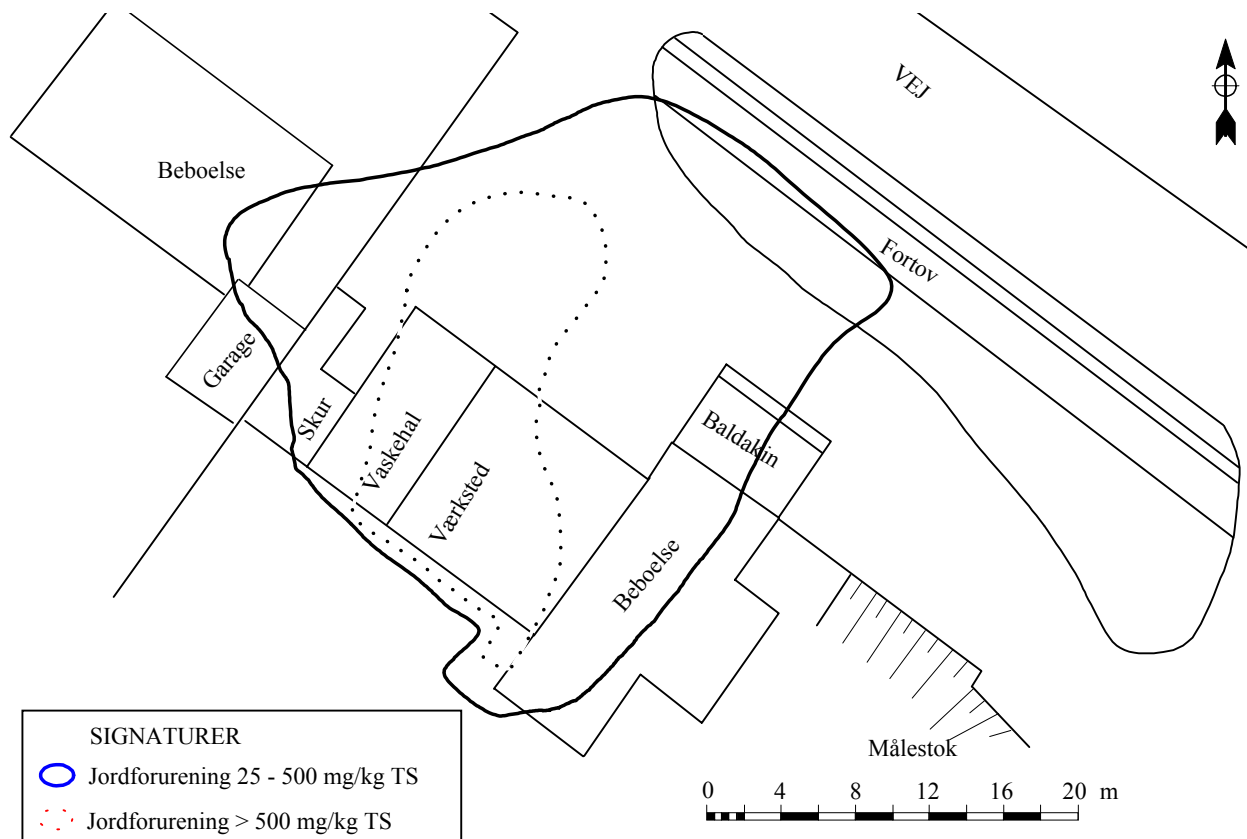
4.3.1 Jordforurening

Den horisontale udbredelse af den konstaterede jordforurening på ejendommen fremgår af figur 4.3.

Den kraftigste tilbageværende jordforurening er konstateret i området umiddelbart op til og under bygningerne på ejendommen. Forureningen består primært af benzin med et højt indhold af let flygtige aromatiske forbindelser (BTEX'er). Der er desuden konstateret indhold af højt kogende kulbrinter i jordprøver udtaget ved de tidligere tanke til spildolie og fyringsolie i haven. I alt vurderes der at være ca. 5.000 tons jord på ejendommen, hvor forureningskoncentrationen overskrider jordkvalitetskriterierne.

Forureningen er konstateret fra kote ca. +41 til +33, svarende til fra ca. 2,5 m.u.t. på ejendommens forplads. Den kraftigste forurening er beliggende fra kote ca. +41 til +38 i området omkring det øvre sekundære grundvandsmagasin.

Horisontalt aftager forureningskoncentrationen som angivet på figur 4.3, hvor det fremgår, at forureningen har bredt sig til naboejendommen.



Figur 4.3:
Situationsplan med angivelse af jordforureningens skønnede horisontale udbredelse.

Benzin og MTBE

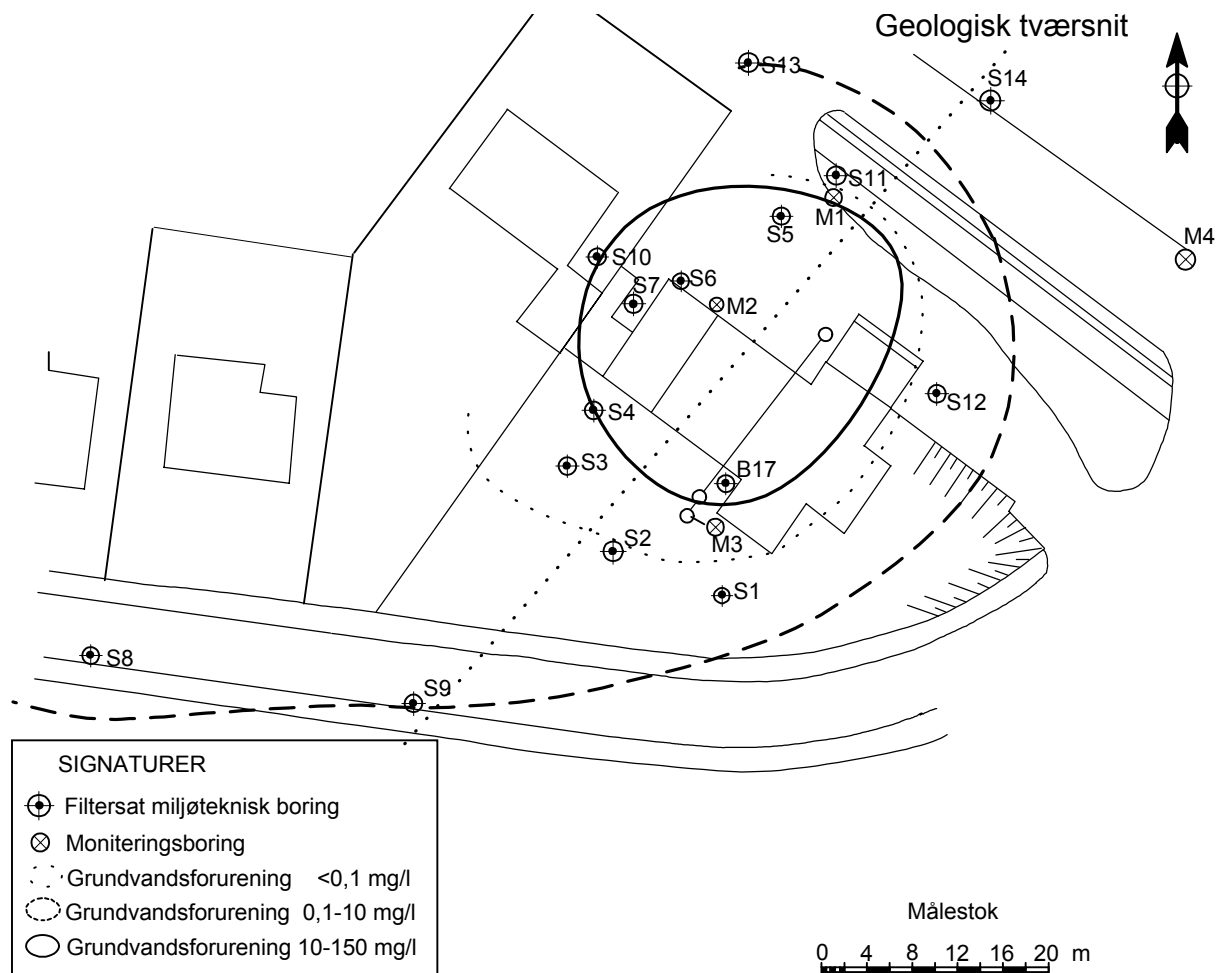
4.3.2 Grundvandsforurening

Der er konstateret en kraftig benzin- og MTBE-forurening af det sekundære grundvand. Grundvandsforureningen er konstateret i området umiddelbart ved den konstaterede jordforurening og i borerne filtersat nedstrøms jordforureningen. Grundvandsforureningens skønnede udbredelse inden opstarten af den elektrokemiske oprensning fremgår af figur 4.4.

Boringerne B17, S1, S2, S3, S4 og S9, S10 og S11 er filtersat omkring det nedre sekundære grundvandsmagasin. Der vurderes, at være en begrænset hydraulisk kontakt mellem det øvre og nedre sekundære grundvandsmagasin.

Grundvandsforureningen har spredt sig fra området med jordforurening mod vest og sydvest.

Der er i det kraftigst forurenede område konstateret totalindhold af olieprodukter på op til 150 mg/l, og MTBE-koncentrationer på op til 45 mg/l.



Figur 4.4:
Situationsplan med angivelse af grundvandsforureningens skønnede udbredelse.

4.3.3 Indeklima

Som følge af den konstaterede jord- og grundvandsforurening under bygningerne på ejendommen er der stærkt forhøjede indhold af kulbrinter i poreluften under bygningen.

Vakuumventilation

For at undgå en uacceptabel påvirkning af indeklimaet i bygningen er der inden opstarten af den elektrokemiske oprensning etableret et vakuumventilationssystem til sikring af indeklimaet i beboelsen.

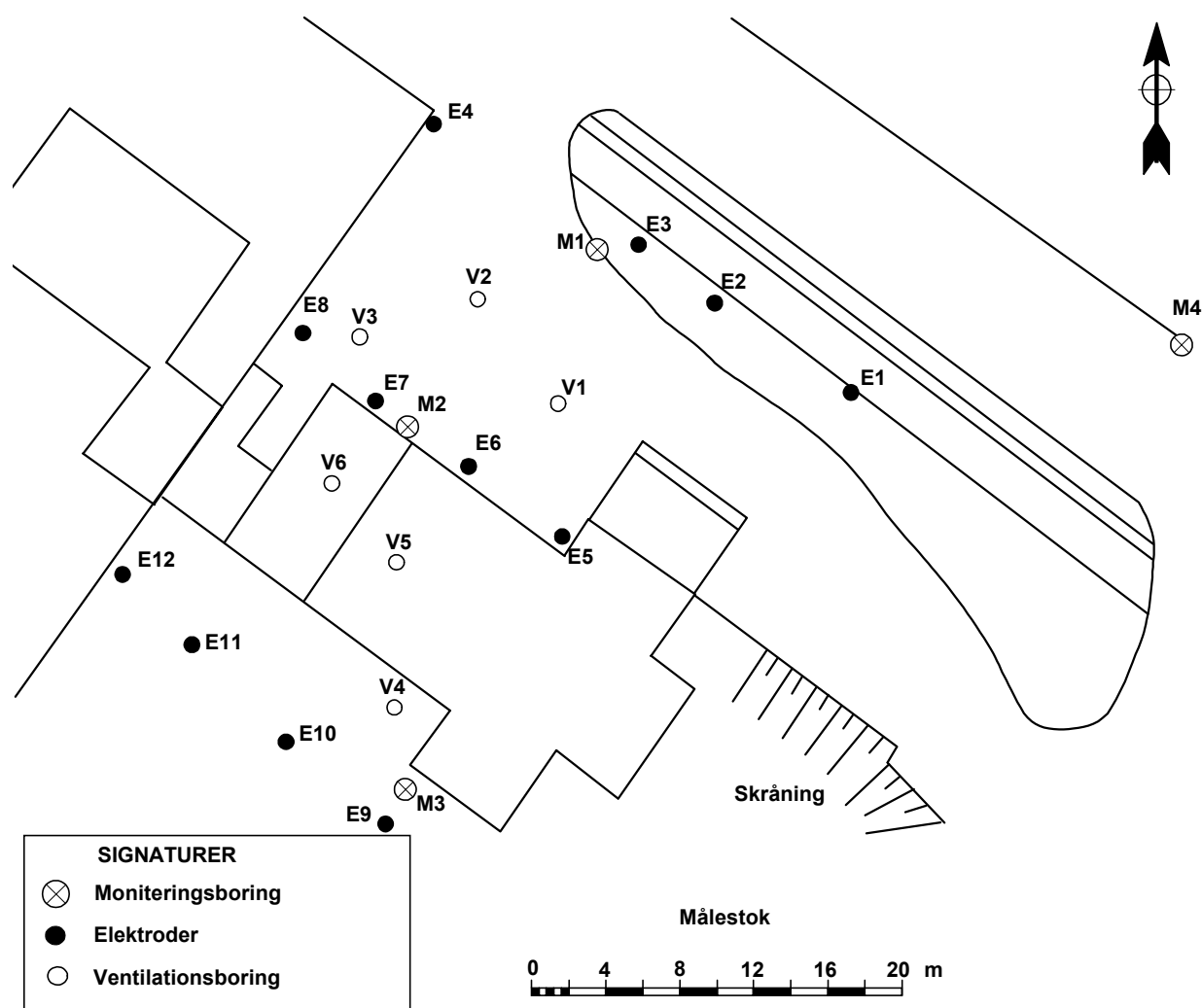
5 Elementer i teknologiprojektet

I dette kapitel beskrives det etablerede anlæg til elektrokemisk oprensning og det monitoringsprogram, der er opstillet i tilknytning til teknologiprojektet.

5.1 Opbygning af anlæg

In-situ entreprenør

Anlægget til elektrokemisk oprensning af projektlokaliteten er etableret af den tyske in-situ entreprenør Terradecon GmbH med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Opbygningen af anlægget fremgår af figur 5.1.



Figur 5.1:

Situationsplan med angivelse af elektroder, ventilations- og monitoringsboringer.

Elektroder

Der er etableret i alt 12 elektroder på ejendommen, hvoraf E5-E8 ikke har været tilkoblet under gennemførelsen af teknologiprojektet. Elektroderne er udført som nedborede jernrør, der er ført til ca. 6 m.u.t.

Strømstyrke og spænding

Under hele projektperioden har E1-E4 været anvendt som anoder mens E9-E12 har været anvendt som katoder. Der har været anvendt et fast spæn-

dingsfald på 120V mellem anoder og katoder. Strømstyrken har afhængigt af jordmodstanden været 90-95A.

Ventilationsboringer

Under oprensningen har entreprenøren sideløbende udført en relativt svag vakuumventilation i ventilationsboringerne V1-V6. Formålet med vakuumventilationen har ifølge entreprenøren været, dels at opnå en fjernelse af flygtige kulbrinter, dels at monitorere oprensningseffektiviteten via målinger af CO₂ og O₂ i afkastluften. Målinger udført af entreprenøren under oprensningen skulle være stillet til rådighed for teknologiprojektet, men er ifølge entreprenøren gået tabt p.g.a. tekniske problemer med dataopsamlingsenheden.

5.2 Monitoringsprogram

Ved fastlæggelsen af måleparametre har det været et ønske dels at monitorere udviklingen i forureningssituationen og dels foretage en screening af parametre, der på forhånd blev vurderet at kunne have betydning for metodens effektivitet eller belyse evt. risici eller sideeffekter ved metoden.

5.2.1 Drift

Oprensningsperiode

Oprensningen blev igangsat den 21. august 1998, med en planlagt varighed på 12 måneder. Oprensningen blev endeligt indstillet af Oliebranchens Miljøpulje 31. marts 2000 ca. 19 måneders efter at oprensningen blev sat i gang. I de første 3 måneders var der problemer med at opnå kontinuert drift af anlægget. Oprensningen var således kun i drift i ca. 2 af de første 3 måneder.

Teknologiprojektet blev foreløbigt indstillet efter de første 12 måneders effektiv drift. I forbindelse med at Oliebranchens Miljøpulje afsluttede oprensningen efter 19 måneder er det dog valgt at udtage supplerende jord- og vandprøver til dokumentation for opretningsniveauet.

5.2.2 Monitoringsstationer

Monitoringsstationer

Inden opstarten af den elektrokemiske oprensning er der som et led i teknologiprojektet etableret tre monitoringsstationer benævnt M1, M2 og M3 på situationsplanen i figur 5.1. M1 er placeret ved en af anoderne, M2 er placeret midt i det elektriske felt og M3 er placeret ved en katode. Hver monitoringsstation består af et Ø63 mm filterrør, der er filtersat fra 0,5 meter over grundvandsspejlet til ca. 4 meter under grundvandsspejlet. Filterrøret er anvendt til udtagning af grundvands- og poreluftprøver. Ved hver monitoringsstation er der udvalgt et areal på ca. 1 m² omkring filterrøret, hvorfra der under oprensningen er udført boringer til udtagning af jordprøver.

Endvidere blev der efter ca. 4 måneders drift etableret en supplerende monitoringsstation, M4. Denne boring er placeret opstrøms den konstaterede forurening med det formål at fastlægge en række grundvandskemiske parametre udenfor det forurenede område, således at det naturlige baggrundsniveau for disse parametre kan fastlægges.

5.2.3 Grundvand

Forureningskoncentration

For at følge opretningsforløbet og for at vurdere om der sker en spredning af forureningen som følge af oprensningen, er der udtaget en række grundvandsprøver til analyse for indhold af olieprodukter, BTEX'er og MTBE fra monitoringsstationerne samt udvalgte boringer.

Til vurdering af udviklingen i randområderne er der endvidere udtaget en række supplerende grundvandsprøver til analyse for indhold af olieprodukter for Oliebranchens Miljøpulje.

<i>Pejlinger</i>	Der er udført pejling af grundvandsspejlet, for at undersøge eventuelle ændringer i grundvandskoten som følge af oprensningen og årstidsvariationer.
<i>Grundvandskemi</i>	For at vurdere oxidationsforholdene, og for at vurdere eventuelle påvirkninger af grundvandskemi, er der udtaget grundvandsprøver til udvidet boringskontrolanalyse fra monitoringsstationerne. Desuden er der foretaget feltmålinger af ilt, pH, temperatur og ledningsevne i udvalgte borer.
<i>Kimtal</i>	Endeligt er der udtaget grundvandsprøver til kimtalsbestemmelse ved 10°C og 21°C af jord og grundvandsprøver til at give en indikation af, om der sker en væsentlig påvirkning af antallet af dyrkbare bakterier som følge af oprensningen.
<i>Prøvepumpning</i>	Ud over ovennævnte målinger er der udført en prøvepumpning fra boring B3 med henblik på at fastlægge transmissiviteten i det nedre sekundære grundvandsmagasin. Resultaterne af prøvepumpningen er vedlagt i bilag B.
<i>Forureningskoncentration</i>	<p>5.2.4 Jord</p> <p>Der er udtaget jordprøver til analyse for totalindhold af olieprodukter og indhold af BTEX'er for at følge oprensningsforløbet ved monitoringsstationerne. Boringerne er udført inden for et areal på 1 m², og jordprøverne er udtaget som blandingsprøver over 1 meter.</p> <p>Efter ca. 12 måneders drift, og i forbindelse med indstilling af oprensningen efter 18 måneders drift har Oliebranchens Miljøpulje foretaget undersøgelser af jordforureningsniveauet i andre områder på ejendommen.</p>
<i>pH</i>	Der er målt pH på alle jordprøver fra monitoringsstationerne for derved at kunne udarbejde et pH-profil ned gennem jordlagene.
<i>Tungmetaller</i>	For at undersøge om der sker en eventuel opkoncentrering af tungmetaller ved elektroderne, er der udtaget jordprøver til tungmetalanalyse fra monitoringsstationerne.
<i>Kimtal</i>	Der er endvidere udtaget jordprøver til kimtalsanalyse. Prøverne er udtaget for at få en indikation af, om der kan konstateres en betydelig påvirkning af kimtallet i jorden.
<i>Poreluftprøver</i>	<p>5.2.5 Poreluft</p> <p>Der er udtaget en række poreluftprøver fra monitoringsstationerne, for at vurdere om metoden giver anledning til forøget afdampning af forureningskomponenter.</p> <p>Inden udtagning af poreluftprøver er filter- og blindrør renpumpet, og poreluftens indhold af CO₂, O₂ og CH₄ er registreret med en IR-måler.</p> <p>5.2.6 Korrosionsrisiko</p> <p>Ud over de i monitoringsprogrammet anførte prøver, er der udført en undersøgelse af korrosionsrisikoen ved anvendelse af den elektrokemiske metode. Undersøgelsen er udført af FORCE Institutet.</p>

5.2.7 Samlet monitoringsprogram

Det gennemførte monitoringsprogram for grundvand, jord og poreluft fremgår af tabel 5.1.

Tabel 5.1

*Monitoringsprogram for teknologiprojektet. *= M4*

Aktivitet	Målepunkt	Før start	Efter 1 uge	Efter 1 mdr.	Efter 3 mdr.	Efter 6 mdr.	Efter 12 mdr.	Efter 15 mdr.	Efter 18 mdr.
Pejling af grundvand		X	X	X	X	X	X	X	X
Vandprøver (ilt-, pH-, temp- og ledningsevne måling)	M1, M2, M3, S2, S3, S10	X	X	X	X	X	X	X	X
Vandprøver (olie, BTEX)	M1, M2, M3, (M4), S2, S3, S10	X		X	X*	X	X		X
Vandprøver (MTBE)	M1, M2, M3, (M4), S2, S3, S10	X	X	X	X*	X	X		X
Vandprøver (Udvidet boringskontrol)	M1, M2, M3, (M4), S2, S3, S10	X			X*	X	X*		
Vandprøver (kintal)	M1, M2, M3	X					X		
Jordprøver (olie, BTEX, temperatur, pH)	M1, M2, M3	X		X	X	X	X		X
Jordprøver (tungmetaller)	M1, M2, M3	X			X	X	X		
Jordprøver (kintal)	M1, M2, M3	X					X		
Poreluft (olie og BTEX)	M1, M2, M3	X	X	X	X	X	X	X	

6 Resultater fra teknologiprojektet

Hovedresultaterne fra feltprojektet præsenteres i dette kapitel. Analysere-sultaterne fra det gennemførte monitoringsprogram er endvidere gengivet i bilag B, sammen med analyseresultater for prøver udtaget for Oliebranchens Miljøpulje. Placering af borer og m.v. er angivet på situationsplanerne i bilag A.

6.1 Udvikling i forureningskoncentrationen

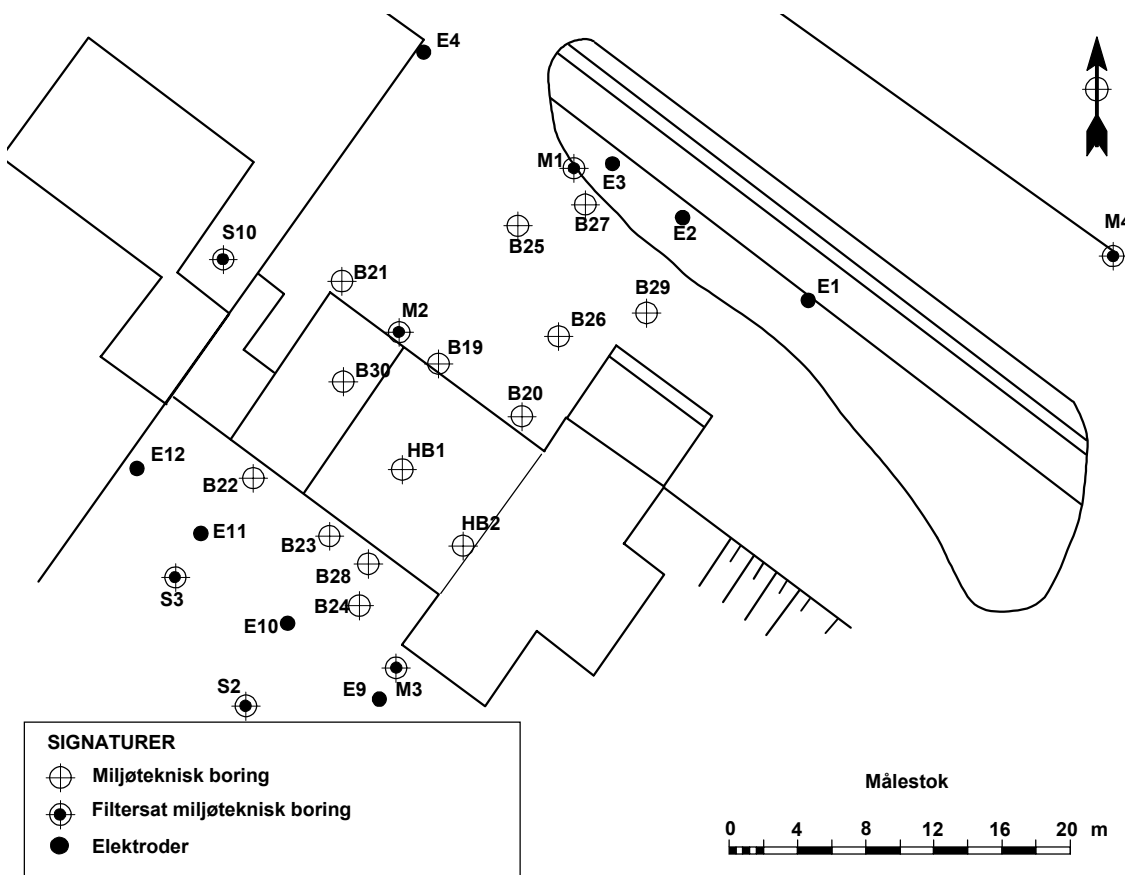
Der er foretaget monitoring af forureningskoncentrationen i jord, grundvand og poreluft i henhold til monitoringsprogrammet, der er beskrevet i afsnit 5.2.

6.1.1 Jord

Prøvetagning

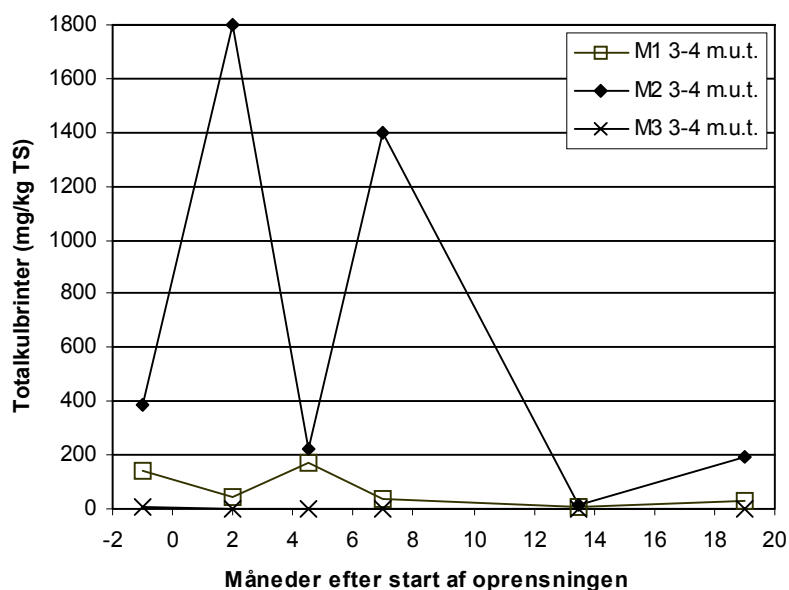
Forureningskoncentrationen i jorden er under oprensningen belyst via borer udført indenfor et område på ca. 1 m² omkring monitoringsboringerne M1-M3. Jordprøverne er udtaget som blandingsprøver for hver meter, og borerne er efterfølgende afproppet med bentonit. Placeringen af monite-ringsboringer er angivet på figur 6.1.

Ved den foreløbige indstilling af teknologiprojektet efter ca. 12 måneders effektiv drift og ved indstillingen af oprensningen efter 18 måneders effektiv drift er forureningsniveauet i bestemt via en række undersøgelsesboringer udført for Oliebranchens Miljøpulje. Borerne er benævnt B19-B30 samt HB1-HB2 på situationsplanen i figur 6.1.



Figur 6.1:
Placering af monitoringsboringer og undersøgelsesboringer.

De højeste forureningskoncentrationer i de tre moniteringsboringer er konstateret i jordprøver udtaget 3-4 m.u.t. Analyseresultaterne fremgår af figur 6.2.



Figur 6.2:

Analyseresultater for jordprøver udtaget ved moniteringsboring M1-M3.

Varierende forureningskoncentrationer

Det fremgår af figur 6.2, at de højeste koncentrationer er konstateret i prøver udtaget fra boring M2, hvor der er konstateret forureningskoncentrationer på op til 1.800 mg/kg TS. Det fremgår af analyseresultaterne, at de konstaterede indhold af olieprodukter i jorden varierer, især i boring M2. Ved sidste prøvetagningsrunde er der konstateret et indhold på 190 mg/kg TS.

Årsagen til de konstaterede meget varierende forureningskoncentrationer ved samme boring vurderes at være den inhomogene struktur af morænelersaflejringerne, samt analyse- og prøvetagningsusikkerheder. Det har endvidere været diskuteret, hvorvidt det elektriske felt har kunnet påvirke sorptionsprocesser i jordmatricen.

Da spredningen på analyseresultaterne for moniteringsboringerne er meget stor, er det ikke muligt på baggrund af disse at vurdere, hvorvidt der er sket en massefjernelse under oprensningen som følge af den elektrokemiske oprensning.

Boringer udført for Oliebranchens Miljøpulje

Ved efterfølgende kontrolrunder udført for Oliebranchens Miljøpulje efter henholdsvis ca. 12 og 18 måneders drift, er der udført en række boringer for at fastlægge forureningsniveauet på ejendommen. Analyseresultater fra de to kontrolrunder fremgår af tabel 6.1. Boringernes placering fremgår af situationsskemaet i figur 6.1.

Det fremgår af analyseresultaterne, at der i boringerne er konstateret indhold af olieprodukter på op til 3.100 mg/kg TS. Der er endvidere i alle boringer konstateret indhold af totalkulbrinter eller BTEX'er, der overskrider Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier /30/.

Vurdering af forureningsniveau

Analyseresultaterne viser således, at der efter en driftsperiode på ca. 1½ år fortsat er en betydelig benzinforurening på ejendommen. Det er ikke muligt entydigt at vurdere om forureningsniveauet, er ændret i forhold til forureningsniveauet konstateret før den elektrokemiske oprensning blev iværksat. Der er dog tilsyneladende ikke sket væsentlige ændringer i forureningsniveauet.

Tabel 6.1

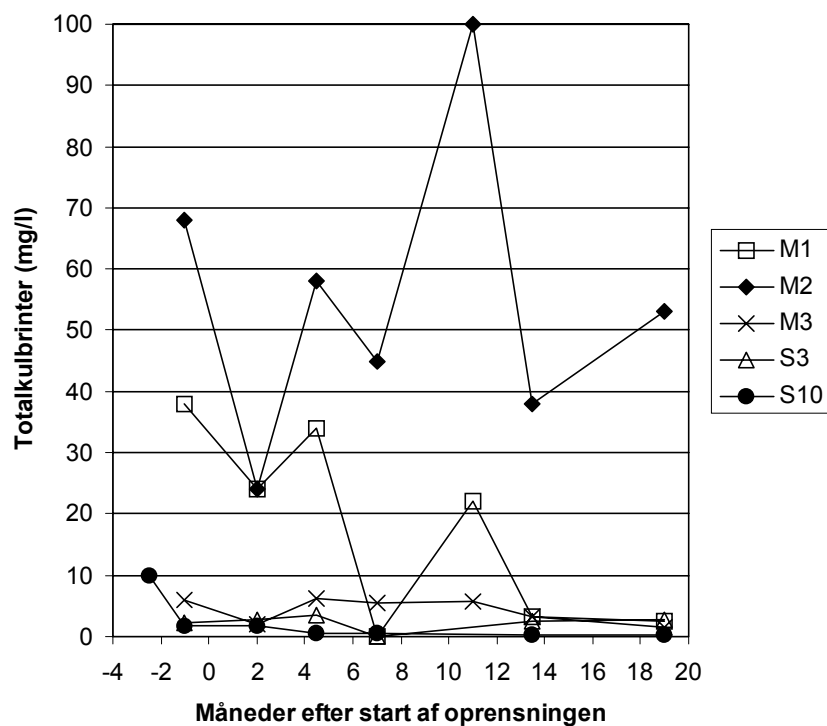
Analyseresultater for jordprøver udtaget for Oliebranchens Miljøpulje i oktober 1999 og marts 2000.

Boring/ Dato	Dybde m.u.t.	Sum af BTEX'er mg/kg TS	Totalkulbrinter mg/kg TS
Oktober 1999			
B19	4,0	360	800
B20	4,0	180	300
B21	4,5	11	13
B22	2,0	11	42
B23	2,0	1.100	3.100
B24	6,0	3,1	3,1
B25	4,5	26	26
B26	3,5	84	240
B27	3,5	16	74
Marts 2000			
HB1	1,5	540	990
HB2	1,5	230	440
B28	1,7	350	1.100
B29	2,0	7,4	32
B30	3,5	160	410
B30	6,0	8,1	15

6.1.2 Grundvand

Totalkulbrinter

Der er foretaget monitoring af grundvandskoncentrationen af totalkulbrinter, BTEX'er og MTBE. Analyseresultaterne for indhold af totalkulbrinter for borerne M1, M2, M3, S3 og S10, filtersat i det kraftigst forurenede område, fremgår af figur 6.3.

**Figur 6.3:**

Grundvandsprøver analyseret for indhold af totalkulbrinter.

Ingen markante ændringer i forureningsniveau

Det fremgår af figur 6.3, at udviklingen i forureningskoncentrationen ikke er entydig i de fem borer. Umiddelbart er der ingen markante ændringer i forureningskoncentrationen i boring M2, M3 og S3. Der er tendens til et mindre fald i borerne M1 og S10.

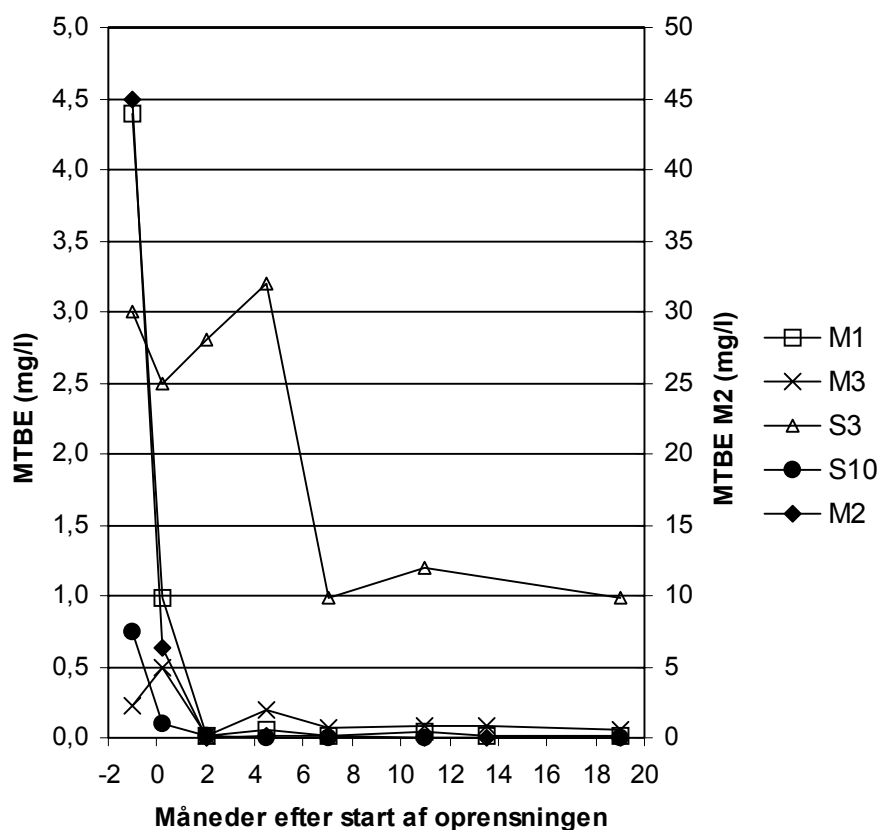
Der må forventes en vis variation i forureningsniveauet som følge af variationer i de lokale hydrogeologiske forhold, og det er derfor ikke muligt entydigt at tilskrive den elektrokemiske oprensning ovennævnte mindre fald i forureningsniveauet. I boring S10 er det væsentligste fald i forureningsniveauet således konstateret inden oprensningen blev igangsat.

Forureningsniveau i randområder

Der er udtaget en række grundvandsprøver for Oliebranchens Miljøpulje i randområdet omkring det mest forurenede område. Der er ikke i disse prøver konstateret væsentlige ændringer i koncentrationen af totalkulbrinter og BTEX'er, jf. bilag B.

MTBE

Analyseresultaterne for indholdet af MTBE i borerne M1, M2, M3, S3 og S10 fremgår af figur 6.4.



Figur 6.4:

Grundvandsprøver analyseret for indhold af MTBE. Analyseresultater for M2 afbilledet på sekundær y-akse.

Fald i MTBE-koncentrationen

Det fremgår af analyseresultaterne, at der er konstateret et fald i MTBE indholdet i alle borer. Faldet er størst i de tre borer på ejendommens forplads M1, M2 og S10, hvor indholdet af MTBE er faldet med en faktor 100-1000. Det kraftige fald blev observeret inden for de to første måneder efter opstarten af den elektrokemiske oprensning. På grund af tekniske problemer havde anlægget på dette tidspunkt kun haft en effektive driftsperiode på ca. én måned. I boring M3 og S3 på sydvestsiden af bygningen er indholdet af MTBE faldet med en faktor 2-3.

Det kraftige fald i MTBE indholdet på forpladsen følger ikke udviklingen i forureningskoncentrationen for totalkulbrinter og BTEX'er. Faldet kan ikke umiddelbart forklares, men vurderes at kunne skyldes flere årsager.

Udvaskning

Det kan således ikke afvises, at der er sket en øget udvaskning af den særdeles vandopløselige MTBE-forbindelse, via lækager i det øvre sekundære

grundvandsmagasin, som følge af nedboringen af elektroder m.v. på forpladsen. Der er dog ikke konstateret øgede MTBE-indhold nedstrøms det forurenede område, i borerne filtersat i det nedre sekundære grundvandsmagasin.

Vandtransport

Vandtransporthastigheden fra anode til katode i den mættede zone, som følge af elektroosmose, vurderes at være i størrelsesordenen 0,05-0,1 meter pr. måned. Til sammenligning er porevandshastigheden i det nedre sekundære grundvandsmagasin på baggrund af en prøvepumpning foretaget på lokaliteten vurderet til at være ca. 2-3,5 meter pr. måned. Den elektrokemiske oprensning vurderes derfor ikke at have væsentlig indflydelse på den overordnede vandtransport på ejendommen.

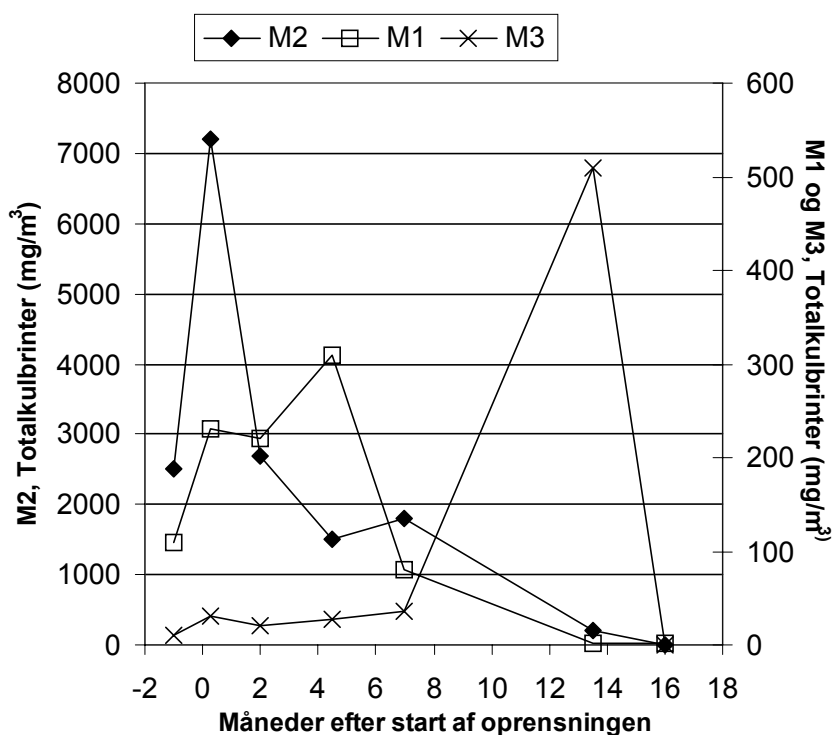
Usikker fortolkning af analyseresultaterne

Hvis faldet kan tilskrives den elektrokemiske oprensning, kan metodens effekt over for MTBE ikke forklares. MTBE er normalt meget langsomt nedbrydeligt, og det kraftige fald i M1, M2 og S10 er konstateret i løbet af en effektiv driftsperiode på kun ca. én måned. Der er dog også observeret kraftige fald i MTBE-koncentrationen i kildeområdet på andre forurenede grunde, hvor der er foretaget en monitoring af MTBE-indholdet i grundvandet.

6.1.3 Poreluft

Analyseresultater for total-kulbrinter

Der er udtaget en række poreluftprøver fra M1-M3, for at vurdere om metoden giver anledning til forøget afdampning af forureningskomponenter. Inden udtagning af poreluftprøver er filter- og blindrør renpumpet. Analyseresultaterne fremgår af figur 6.5.



Figur 6.5:

Poreluftmålinger fra monitoringsboring M1-M3. Bemærk M1 og M3 afbilledet på sekundær y-akse.

Fortolkning af analyseresultater

Det fremgår af analyserne at poreluftkoncentrationen i M1 og M2 tilsyneladende er faldet under oprensningen. Det kan ikke udelukkes, at den af entreprenøren gennemførte svage vakuumventilation kan påvirke måleresultaterne. Endvidere må der forventes en vis variation i måledataene som følge af årstidsvariationer og meteorologiske forhold, der erfaringsmæssigt kan

medføre, at det er vanskeligt entydigt at vurdere koncentrationsforløbet af poreluftmålingerne.

Temperaturstigning

Ved den næstsidste prøvetagning i M3 blev der konstateret en stigning i poreluftkoncentration i boringen. Samtidig er der konstateret en temperaturstigning i grundvandet fra ca. 13-15 °C til ca. 22°C. Temperaturstigningen kan skyldes udfældning omkring den nærliggende katode, hvilket kan medføre en øget modstand og dermed afsætning af varme i området umiddelbart omkring elektroden. Temperaturstigningen kan være årsag til den konstaterede øgede afdampning omkring boring M2 i oktober 1999.

6.2 Andre parametre

Grundvandskemi

Der er foretaget monitorering af en række grundvandskemiske parametre, da det var forventet, at metoden kunne have indvirkning på bl.a. pH og ion-sammensætningen i grundvandet, jf. kapitel 3.

pH i grundvand

Der er ikke konstateret ændringer i pH-forholdene i monitoringsboring M1, M2 og M3, filtersat ved henholdsvis en anode, midt i feltet og ved en katode. Dannelsen af H^+ ved anoden og OH^- ved katoden, som følge af elektrolyse af vand, vurderes derfor at være begrænset i forhold til grundvandsmagasinet bufferkapacitet.

Ilt-indhold

Der er ikke konstateret øgede iltindhold i grundvandet ved boring M1. En evt. anodisk oxidation af vand har således ikke kunnet konstateres at have medført væsentlige ændringer i iltkoncentrationen i grundvandet ved anoden. Årsagen kan være, at dannet ilt hurtigt reduceres i området umiddelbart ved anoden, og/eller at andre elektrodeprocesser er styrende ved anoden, herunder evt. oxidation af jernelektroden.

Ion-sammensætning

Generelt er der ikke konstateret markante ændringer i grundvandets ion-sammensætning under oprensningen. Dette vurderes at skyldes dels den forholdsvis lave feltstyrke anvendt under in-situ oprensningen, dels den naturlige grundvandsstrømning og nedsivning af regnvand, hvorved der kontinuerligt tilføres friskt grundvand til området.

Der er dog indikationer på elektromigration af sulfat- og chloridioner og elektrolytisk frigivelse og transport af jernioner. I det elektriske felt vil positivt ladede ioner bevæge sig mod katoden og negativt ladede ioner vil bevæge sig mod anoden.

Tungmetaller og pH i jord

Der er udtaget en række prøver til analyse af jordens indhold af tungmetaller i forskellig dybde i de tre monitoringsboringer under oprensningen. De konstaterede indhold af tungmetaller er alle under jordkvalitetskriterierne og på niveau med det naturlige baggrundsindhold i jord /30/.

Der er under oprensningen ikke konstateret væsentlige ændringer i jordens pH-værdi. Den gennemsnitlige pH-værdi i fyldjorden på forpladsen er målt til 7,1, mens pH-værdien i de underliggende moræneaflejringer gennemsnitligt er målt til 8,4. I dette pH-område vil ligevægtsfordelingen mellem jord og jordvæske for ovenstående di- og trivalente tungmetallforbindelser være forskudt mod jord, som følge af udfældning og sorptionsprocesser /31/. Der er da heller ingen indikation af, at oprensningen har resulteret i en transport af tungmetaller.

Biologiske parametre

Der er foretaget kimtalsmålinger af grundvandsprøver udtaget i de tre monitoringsstationer, M1, M2 og M3. Endvidere er der udtaget jordprøver til

kimtalsbestemmelse 3-4 m.u.t. i monitoringsstationerne. Prøverne er udtaget før opstarten af den elektrokemiske oprensning og ved teknologiprojektets afslutning, dvs. efter 12 måneders drift.

Analyserne er udført ved pladespredning, hvorefter antallet af dyrkbare kolonier (CFU) er bestemt. Antallet af bakterier bestemt ved pladespredning afhænger bl.a. af ændringer i miljøforhold som f.eks. redoxforhold, pH og temperatur.

Grundvand

Kimtallet i grundvandszonen er bestemt aerobt ved 10 °C til at være i størrelsesordenen $0,7\text{-}20\cdot 10^3$ pr. ml., hvilket er på niveau med bakterieantallet for grundvandsprøver fra uforurenede lokaliteter /31/. Der er ikke konstateret signifikante ændringer i kimtallet i grundvandet efter 12 måneders drift i forhold til før oprensningen blev igangsat.

Størstedelen af bakterierne (97-100 %) knytter sig til sedimentet. Denne tilknytning til partiklerne, og navnlig de små partikler, betyder at det er vanskeligt at udtage repræsentative prøver for mikrobielle populationer via grundvandsprøver. Resultaterne af kimtalsmålingerne er derfor vanskeligt at vurdere.

Jord

I jordprøverne er kimtallet bestemt fra 2 til >20.000 pr. g., hvilket er på niveau med bakterieantallet for jordprøver fra uforurenede lokaliteter /31/. Der er konstateret en stigning i kimtallet ved prøvetagningen efter 12 måneders drift ved M3, der er placeret ved en katode, hvilket kan hænge sammen med den konstaterede temperaturstigning i boringen ved denne prøvetagning. Der kan dog også være tale om prøvetagnings- og analyseusikkerheder. Ved M1 og M2 er der ikke konstateret signifikante ændringer i kimtallet ved prøvetagningen før oprensningen og efter 12 måneders drift.

Den mikrobielle populationen i jord er meget kompleks, og det vil kun være en lille del af en given population, der vil kunne indgå i nedbrydningen af olieprodukter. Det er endvidere formentlig kun en meget lille del af disse specifikke nedbrydere, der vil kunne bestemmes ved CFU-målingen. Det vurderes derfor, at det ikke på baggrund af kimtalsmålingerne entydigt kan fastlægges, om den elektrokemiske metode har indvirkning på bakteriesammensætningen og dermed eventuelt omsætningen af olieprodukter.

6.3 Sikkerhedsmæssige forhold

Spænding og overgang

Ved anvendelse af jævnstrøm til in-situ oprensninger i Danmark skal der i hvert enkelt tilfælde gives tilladelse af Elektricitetsrådet, der fastsætter de sikkerhedsmæssige forhold, herunder indretning af anlægget, den maksimale anvendte spænding, sikring af installationer m.v. Ved nærværende feltprojekt er der bl.a. stillet krav om, at begrænse jævnspændingen til maksimalt 120 V. Endvidere er alle rør og afløbsinstallationer i bygningen sammenkoblet med udligningsforbindelser i henhold til stærkstrømsbekendtgørelsen.

Sætningsrisiko

Der er ikke konstateret udtørring ved katoderne eller væsentlige ændringer i grundvandsspejlet som følge af elektroosmose ved de relativt lave feltstyrker, der er anvendt på ejendommen. Risikoen for sætningsskader som følge af oprensningen på den valgte lokalitet vurderes derfor at være begrænset.

Korrosionsrisiko

Der er foretaget en undersøgelse af risikoen for, at den elektriske jævnstrøm medfører øget korrosion af installationer i jorden, der er beliggende i det elektriske felt. Undersøgelsen er udført af FORCE Institutet, på baggrund af opmåling af potentialfelter og målinger af potentialændringer på nedgravede metalgenstande.

FORCE Institutet vurderer, at der er risiko for en kraftig forøget korrosion på især ubeskyttede metalkonstruktioner mellem de to elektroderækker. Spændingsfaldet er størst umiddelbart ved elektroderne. Mellem elektroderækkerne vurderes spændingsfaldet at være ca. 2 V/m. Korrosionsrisikoen har ikke kunnet kvantificeres, men erfaringsmæssigt kan der være tale om korrosionshastigheder på adskillige millimeter pr. år. Der kan endvidere være forøget risiko for korrosion i en afstand af mere end 30 meter fra elektroderne, afhængigt af jordmodstanden.

Der bør derfor ved anvendelse af jævnspænding i jord foretages en kortlægning af alle installationer i og omkring spændingsfeltet, samt foretages en vurdering af behovet for en eventuel korrosionsbeskyttelse ved f.eks. katodisk beskyttelse af udsatte installationer.

Sammenfatning

Sammenfattende viser analyseresultaterne, at der efter en driftsperiode på ca. 1½ år fortsat er en betydelig benzinforurening af jord og grundvand på ejendommen, og der vurderes ikke at være sket væsentlige ændringer i forureningsniveauet.

Der er konstateret et fald i MTBE indholdet i tre borer på ejendommens forplads M1, M2 og S10. Boringerne er filtersat i det øvre sekundære grundvandsmagasin, hvor indholdet af MTBE er faldet med en faktor 100-1000 inden for en effektiv driftsperiode på ca. én måned. Årsagerne til det kraftige fald i MTBE koncentrationen kan ikke fastlægges med sikkerhed.

Moniteringen af en række jord- og grundvandskemiske parametre har ikke vist væsentlige ændringer i jord og grundvandskemien under oprensningen. Velkendte elektrokinetiske fænomener, som pH-ændringer som følge af hydrolyse af vand, iontransport, elektroosmose m.v. vurderes kun at have haft mindre betydning, som følge af de lave feltstyrker der er anvendt. Desuden indvirker den kontinuerede grundvandstilførsel til området samt grundvandets naturlige sammensætning, herunder bufferkapaciteten.

Feltundersøgelser har vist, at der er en væsentlig forøget risiko for korrosion på især på ubeskyttede metalkonstruktioner, beliggende i det elektriske felt.

7 Felterfaringer med elektrokemisk oprensning

I dette kapitel sammenfattes resultaterne for andre elektrokemiske oprensninger, der er udført med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. De enkelte forsøgsprojekter, der indgår i erfaringsopsamlingen, er præsenteret i bilag C.

7.1 OM's forsøgsprojekter

In-situ entreprenører

Der indgår i alt otte forsøgsprojekter i erfaringsopsamlingen. Forsøgsprojekterne er benævnt 1-8 i bilag C. Seks af projekterne er udført af firmaet B.S. Geoteknik A/S, der introducerede metoden i Danmark. Forsøgsprojekt 2 er udført af firmaet Terradecon GmbH, der også har været entreprenør på feltprojektet beskrevet i kapitel 6. Forsøgsprojekt 8 er et forsøg udført af KK Technical, hvor et solcelleanlæg er anvendt som strømforsyning.

Rådgivere

Der har været tilknyttet forskellige rådgivere til OM's forsøgsprojekter. Rådgiverne på projekterne har været Geoteknisk Institut, Cowi, Carl Bro, NIRA og Dansk Miljørådgivning.

Oprensningsperiode

Den forventede driftsperiode blev før igangsætningen af oprensningerne af de tyske entreprenører, anslået til at være ca. 3-12 måneder. Den elektrokemiske oprensning er indstillet på alle forsøgsprojekterne efter en effektiv driftsperiode på ca. 12-18 måneder. Der er under opretningsforløbene udtaget prøver til dokumentation af forureningsniveauet på alle forsøgsprojekterne.

Økonomi

En række af de større oprensninger har været udbudt i totalentreprise. Vurderet på baggrund af de totale entreprissummer, der har dækket projektering, etableringsomkostninger, monitoring, drift og reetablering, har priserne været ca. 250-500 kr. pr. m³ behandlet jordvolumen. Eludgifterne har udgjort ca. 5-15 % af de samlede omkostninger. Det er dog ikke opnået en tilfredsstillende oprensningseffekt ved de gennemførte forsøgsprojekter.

Forureningens omfang

Der har på forsøgslokaliteterne, været tale om seks mindre forureninger på ca. 30-300 m³ forurenet jord og to større forureninger på henholdsvis ca. 3.400 og ca. 4.400 m³ forurenet jord.

Forureningen har på fem af sagerne overvejende bestået af benzin, og på 3 af sagerne har forureningen overvejende bestået af dieselolie. Det totale indhold af olieprodukter har varieret fra ca. 100-10.000 l, før igangsættelsen af de elektrokemiske oprensninger.

Geologi og hydrogeologi

De geologiske aflejringer på forsøgslokaliteterne har varieret fra overvejende morænelersaflejringer til marine- og smeltevandssandaflejringer. Lokalt på feltlokaliteterne har de geologiske forhold generelt været sammensat af flere aflejringstyper bestående af ler, silt, sand og grus.

På de fleste af forsøgslokaliteterne er der truffet grundvand inden for de øverste fem meter. Grundvandsmagasinerne ydelse har varieret afhængigt af magasinerne vertikale udstrækning og transmissiviteten af de vandførende lag.

Den elektrokemiske metode er således afprøvet under en række forskellige geologiske- og hydrogeologiske forhold.

Redoxforhold

Redoxforholdene har endvidere varieret på lokaliteterne. Redoxforholdene har især været reducerede i kraftigt forurenede områder, hvor jordforureningen har været beliggende under grundvandsspejlet. Jordtypen har endvidere en indvirkning på redoxforholdene, der generelt har været mest reducerede i lerede jordtyper.

Omvendt har der generelt været oxiderede forhold i områder beliggende uden for hotspot, områder beliggende over grundvandsspejlet, og hvor jordtypen har været sandet.

Opbygningen af anlæg

Afstanden mellem elektrodeparrene har været ca. 10-15 meter. Der er anvendt elektroder i form af nedrammede jernspuns eller nedborede jernrør.

Der foreligger ikke nøjagtige oplysninger om de anvendte spændinger og strømstyrker på alle sagerne. B.S. Geoteknik har generelt anvendt strømstyrker på ca. 60-120 V mellem de enkelte elektrodepar, der blev tilkoblet separate kanaler. Det er på et af forsøgsprojekterne observeret, at spændingsfaldet tilsyneladende var reguleret afhængigt af jordmodstanden, for at opnå en strømstyrke på ca. 6-8 ampere mellem hvert elektrodepar.

Terradecon har anvendt et fast spændingsfald på 120 eller 200V mellem anoder og katoder. Samtidig med den elektrokemiske metode har denne entreprenør foretaget en relativt svag vakuumventilation i filtersatte boringer i det forurenede område.

I forsøgsprojekt 8 er elektroderne tilkoblet et solcelleanlæg, hvor spændingen mellem elektroderne har varieret mellem 0 og 120V afhængigt af indstrålingen fra solen.

7.2 Monitoring og oprensningseffektivitet

Monitoring

På forsøgsprojekterne er der opstillet monitoringsprogrammer, hvor forureningsniveauet er bestemt flere gange under oprensningsforløbene. Formålet med de opstillede monitoringsprogrammer har primært været at få en indikation af udviklingen i oprensningsforløbet og vurdere, hvorvidt de opstillede oprensningskriterier er opnået.

Monitoringsintervaller og prøveantal har været forskellig fra sag til sag. Dette skyldes flere forhold f.eks., at forureningerne har haft forskellig udbredelse og har udgjort en mere eller mindre akut miljørisiko.

Formålet med monitoringen har således ikke været at skabe et tilstrækkeligt datagrundlag til statistisk at kunne vurdere, hvorvidt der er opnået en massefjernelse på forsøgsprojekterne.

I tabel 7.1 og 7.2 er en række nøgledata for forsøgsprojekterne angivet. For mere detaljerede oplysninger omkring de enkelte projekter henvises til bilag C.

Tabel 7.1

Nøgledata for OM's forsøgsprojekt 1-4, sammenfattet fra bilag C.

Forsøgsprojekt	1	2	3	4
Forureningstype	Dieselolie	Benzin	Gasolie	Benzin
Forureningsmængde	600-800 l	100 l	1.000-2.000 l	200 l
Forurenet jordvolumen	300-400 m ³	150 m ³	300 m ³	200 m ³
Antal elektroder	6 stk.	2x4 stk.	2 stk.	2 stk.
Geologi, primært aflejringsmiljø	Moræne	Moræne	Marint	Marint
Geologi, jordtype	Ler/sand /grus	Sand/ler	Sand/silt/ler	Finsand/silt
Hydrogeologi, GVS	2,0 m.u.t.	2,4-4,4 m.u.t.	3,0 m.u.t.	2,0 m.u.t.
Max jordkoncentration, før	3.600 mg/kg TS	1.235 mg/kg TS	34.000 mg/kg TS	1.300 mg/kg TS
Max jordkoncentration, efter	2.000 mg/kg TS	1.800 mg/kg TS	8.320 mg/kg TS	4.460 mg/kg TS
Oprensningseffekt, jord	Ingen/begrænset	Ingen/begrænset	Ingen/begrænset	Ingen
Oprensningseffekt, grundvand	Ingen	-	Ingen	-

Tabel 7.2

Nøgledata for OM's forsøgsprojekt 5-8, sammenfattet fra bilag C.

Forsøgsprojekt	5	6	7	8
Forureningstype	Benzin	Benzin	Dieselolie og benzin	Benzin
Forureningsmængde	800 l	10.000 l	6.000-10.000 l	250 l
Forurenet jordvolumen	70 m ³	3.400 m ³	4.400 m ³	30 m ³
Antal elektroder	4 stk.	10 stk.	13 stk.	6 stk.
Geologi, aflejringsform	Smeltevand	Moræne/smeltevand	Moræne/smeltevand	-
Geologi, jordtype	Ler/sand	Ler/sand	Ler /silt/sand/grus	Ler/silt
Hydrogeologi, GVS	7,5 m.u.t.	2,5-4,0 m.u.t.	3,0 m.u.t.	2,0 m.u.t.
Max jordkoncentration, før	10.920 mg/kg TS	2.670	8.100	8.000
Max jordkoncentration, efter	1.280 mg/kg TS	830	6.500	6.100
Oprensningseffekt, jord	Ingen/begrænset	Ingen/begrænset	Ingen/begrænset	Ingen/begrænset
Oprensningseffekt, grundvand	-	-	Ingen	-

Oprensningseffekt, jord

Analyseresultaterne for jordprøver, udtaget under oprensningsforløbene, har generelt ikke været entydige, og der er konstaterede store variationer i forureningsniveauet under oprensningerne. Dette gør det vanskeligt/umuligt at vurdere, hvorvidt metoden har resulteret i en fjernelse af forureningskomponenter. Metodens effekt har således ikke kunnet dokumenteres.

Oprensningerne er gennemført på både benzin og dieselolieforureninger i en række forskellige jordtyper, hvor redoxbetingelserne har været varierende. Der er ikke konstateret nogen sammenhæng mellem betingelser og oprensningseffekt.

Samlet vurderes det, at oprensningerne har haft ingen eller begrænset effekt på forureningskoncentrationerne i jord.

Spredninger, jord

Antages det, at der ikke er sket en ændring i forureningskoncentrationen under oprensningsforløbene, og at der er tale om uafhængige normalfordelte variationer i forureningskoncentrationen kan spredningen beregnes til 60-180 % af middelværdien for sammenlignelige borer, hvor der er udtaget jordprøver i ca. samme dybde inden for en radius af ca. 1 meter, jf. bilag C. Spredningen i analyseresultaterne skyldes dels den inhomogen fordeling af forureningen i jorden og prøveudtagnings- og analyseusikkerheder. Den inhomogene fordeling af forureningen vurderes at være den væsentligste årsag til den store spredning i analyseresultaterne.

På baggrund af den store spredning kan det principielt ikke udelukkes, at årsagen, til at der ikke kan dokumenteres en massefjernelse, kan skyldes kvaliteten af datamaterialet.

Oprensningseffekt, grundvand

På de af OM's forsøgsprojekter, hvor der er foretaget en monitorering af forureningskoncentrationen i grundvandet, er der ligeledes konstateret en vis variationer i forureningskoncentrationen, der gør det vanskeligt at vurdere oprensningsforløbet. Der er dog generelt ingen indikationer på, at den elektrokemiske oprensning har medført en reduktion i forureningskoncentrationen i grundvandet.

Sammenfatning

Sammenfattende må det konstateres, at der ikke, på nogen af de otte gennemførte elektrokemiske oprensninger, er opnået en tilfredsstillende oprensningseffekt i forhold til hverken jord eller grundvandsforureninger med olieprodukter. Oprensningerne er gennemført på både benzin- og dieselolieforureninger i en række forskellige jordtyper og under varierende redoxbetingelser. Der har kunnet påvises en sammenhæng mellem oprensningseffekt og oprensningsbetingelser.

Oprensningerne har således ikke levet op til de forventninger, in-situ entreprenørerne havde stillet i udsigt. På trods af at oprensningsperioderne generelt været ca. 2-5 gange længere end entreprenørerne på forhånd havde vurderet, er der ved indstillingen af oprensningerne fortsat konstateret indhold af olieprodukter over de opstillede oprensningskriterier, og det har ikke entydigt kunne dokumenteres, at oprensningerne har nedbragt forureningskoncentrationerne. Ingen af de gennemførte oprensninger har derfor medført, at Oliebranchens Miljøpulje har kunnet afslutte sagerne alene på baggrund af den elektrokemiske oprensning.

8 Konklusion

På baggrund af det gennemførte feltprojekt og erfaringsopsamlingen på OM's øvrige forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode, kan følgende konklusioner og perspektiver for metoden fremdrages:

8.1 Hovedkonklusioner

<i>Det teoretiske fundament</i>	Der eksisterer ikke p.t. et velunderbygget teoretisk fundament, der kan forklare en evt. 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.
<i>Oprensningseffekt</i>	Resultaterne fra det gennemførte feltprojekt samt de generelle erfaringer fra OM's øvrige forsøgsprojekter med den elektrokemiske metode 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.
<i>Oprensningsbetingelser</i>	Oprensningerne er gennemført på både benzin- og diesololieforureninger, i en række forskellige jordtyper og under varierende redoxbetingelser. Der har ikke kunnet påvises en sammenhæng mellem oprensningseffekt og oprensningsbetingelser.
<i>Dokumentation fra laboratorieforsøg</i>	Der bør fremlægges et betydeligt bedre dokumentationsgrundlag fra kontrollerede laboratorieforsøg inden evt. yderligere in-situ forsøg igangsættes med det nuværende koncept. Laboratorieforsøgene skal kunne dokumentere, at elektrokemisk inducerede reaktioner i jordmatricen kan medføre en fjernelse af olieprodukter og i givet fald under hvilke betingelser.
<i>Datamaterialet</i>	<p>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.</p> <p>De konstaterede varierende forureningskoncentrationer ved monitoring af forureningskoncentrationen i jord giver anledning til at overveje behovet for, at der udstikkes generelle retningslinier i forbindelse med monitoring og slutprøvetagning på in-situ projekter, specielt i inhomogene jordtyper som moræneler.</p>
<i>Korrosionsrisiko</i>	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 foretages en vurdering af behovet for korrosionsbeskyttelse af udsatte installationer.

8.2 Delkonklusioner

Grundvandskemi

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.

Temperatur

Det er observeret, at metoden kan resultere i en temperaturstigning som følge af afsætning af varmeenergi i jorden. Specielt ved katoden, kan modstanden øges under oprensningen, som følge af udfældning af metaller og mineraler eller som følge af evt. udtørring. Der er indikationer af, at ovenstående afsætning af varmeenergi i jorden kan resultere i en øget afdampning af forureningskomponenter.

Andre elektrokinetiske metoder

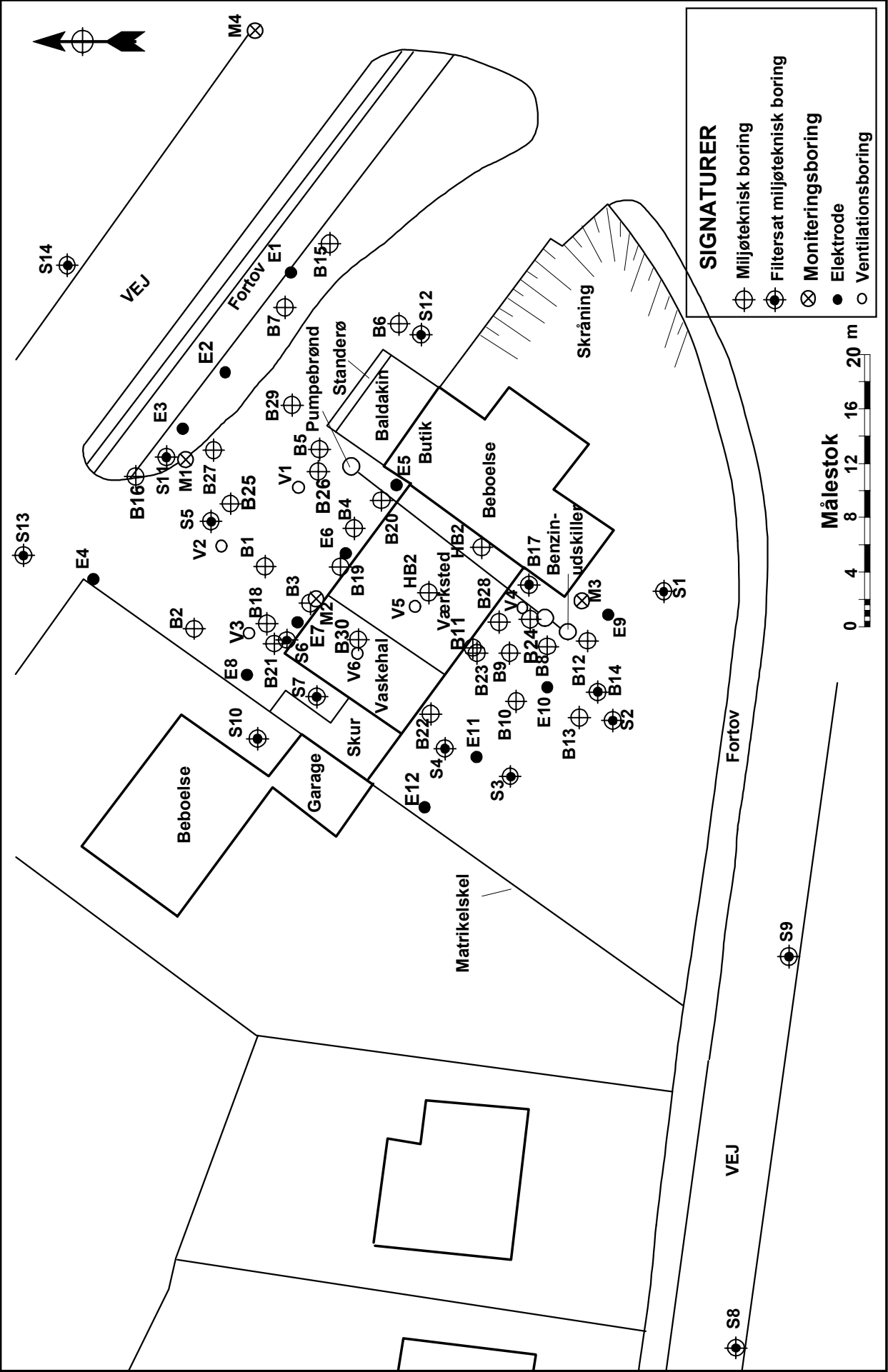
Den elektrokemiske metode, som er vurderet i dette projekt, har ikke været designet til at udnytte de elektrokinetiske transportprocesser ved påføring af en elektrisk jævnstrøm til jordmatricen. En række af de felterfaringer m.h.t. installation, monitorering og sikkerhedsaspekter, der er gjort i nærværende projekt, vil dog givetvis kunne overføres til andre in-situ metoder, hvor der anvendes en elektrisk jævnstrøm til oprensning af forurennet jord.

Det skal i den sammenhæng nævnes, at elektrokinetiske baserede metoder til oprensning af olieforurennet jord er under stadig udvikling. Den største umiddelbare fordel ved elektrokinetisk baserede metoder er, at de potentielt kan anvendes til in-situ oprensning af lavpermeable jorde. Elektrokinetisk transport er i andre sammenhænge bl.a. anvendt til udvaskning af opløste forureningskomponenter, tilsætning af næringssalte, bakterier, kemiske oxidationsmidler, overfladeaktive stoffer m.v. samt anvendt i kombination med en række andre metoder. Der ligger således fortsat et stort udviklingspotentiale i de elektrokinetiske baserede metoder.

9 Referencer

- /1/ Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N. (1993). *Principles of Elektrokinetic Remediations*, Environmental. Science and Technology, vol. 27, No 13, pp. 2638-2647.
- /2/ Shapiro, A. P., Renaud, C. P., Probststein, R. (1989). *Preliminary studies on the removal of chemical species from saturated porous media by electroosmosis*. PhysicoChemical Hydrodynamics, vol. 11, No 5/6, pp 785-802.
- /3/ Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N. (1996). *Elektrokinetic remediation. I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite*. Journal of Geotechnical Engineering. Vol 122, No. 3, pp. 173-185.
- /4/ Lageman, R. (1993). *Electroreclamation- Applications in the Netherlands*. Environmental. Science and Technology, vol. 27, No 13 pp. 2648-2650.
- /5/ Miljøstyrelsen. (1998). *Oprensning af tungmetaller forurenede jord*. Miljøprojekt nr. 407.
- /6/ Ottosen, L. M., Hansen, K. H., Laursen S., Villumsen, A. (1997). *Electrodialytic Remediation of Soil Polluted with Copper from Wood Preservation Industry*. Environmental Sci. and Technol, vol. 31, No 6, pp. 1711-1715.
- /7/ Hansen, K. H., Ottosen, L. M. (1997). *Electrodialytic Remediation of Soils Polluted with Cu, Cr, Hg, Pb and Zn*. J. Chem. Tech. Biotechnol. 1997, 70, 67-73.
- /8/ Pamukcu, S., Weeks, A., Wittle, J.K. (1997). *Electrochemical extraction and stabilization of selected inorganic species in porous media*. Journal of Hazardous Materials, vol. 55, pp 305-318.
- /9/ Trombly, J. (1994). *Electrochemical Remediation Takes to the Field*. Environmental Science and Technology, vol. 28, No 6, pp. 289A-291A.
- /10/ Will, F. G. (1995). *Removing Toxic Substances from the Soil Using Electrochemistry*. Chemistry & Industry, vol. 10, pp. 376-379.
- /11/ Acar, Y. B., Li, H. Gale, R. J. (1992). *Phenol Removal from Kaolinite by Electrokinetics*. Journal of Geotechnical Engineering. vol 118, No. 11 pp. 1837-1852.
- /12/ Shapiro, A. P., Probststein, R. F. (1993). *Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis*. Environmental Science and Technology, vol. 27, No 2, pp. 283-291.
- /13/ Pamukcu, S., Filipova, I. Wittle, J. K. (1995). *The Role of Electro-osmosis in Transporting PAH Compounds in Contaminated Soils*. The Electrochemical Society, Vol. 12, pp. 252-267.
- /14/ Bruell, C. J., Segall, B. A., Walsh, M. T. (1992). *Electroosmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and TCE from Clay*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, pp. 68-73.
- /15/ Davis-Hoover, Roulier, M. H. Bryndzai, T. Murdoch, L. C., Kemper, M., Cluxton, P. Al-Abed, S., Slack, W. W., Vesper, S. V. (1999). *Horizontal LA-SAGNA to Bioremediate TCE*. 2nd Symposium. Heavy Metals in the Environment, and Electromigration Applied to Soil Remediation, pp 160-162, Technical University of Denmark.
- /16/ Jackman, S. A., Knowles, C. J. (1999). *Electromigration and biodegradation of 2,4-D in a silt soil*. 2nd Symposium. Heavy Metals in the Environment, and Electromigration Applied to Soil Remediation, pp 60-64, Technical University of Denmark.
- /17/ Budhu, M., Rutherford, M., Sills, G., Rasmussen, W. (1997). *Transport of Nitrates Through Clay Using Elektrokinetics*. Journal of Environmental Engineering, 123, pp. 1251-1253.

- /18/ Electorowicz, M., Boeva, V. *Electrokinetic supply of nutrients in soil bioremediation*. Environmental Technology, 17, pp. 1339-1349.
- /19/ Yang, G. C. C., Long, Y. (1999). *Treatment of Phenol Contaminated Soil by In-Situ Electrokinetic Remediation and Fenton-Like Process*. 2nd Symposium. Heavy Metals in the Environment, and Electromigration Applied to Soil Remediation, pp 66-69, Technical University of Denmark.
- /20/ Watts, R. J., Udell, M. D., Rauch, P. A. (1990). *Treatment of Pentachlorophenol-contaminated Soils Using Fenton's Reagent*. Journal of Hazardous Materials, vol. 7, No. 4 pp 235-245.
- /21/ DeFlaun, M., Condee, C. W. (1997). *Electrokinetic transport of bacteria*. Journal of Hazardous Materials, vol. 55, pp 263-277.
- /22/ Jackman, S. A., Maini, G., Sharman, A. K., Knowles, C. J. (1999) *The effects of direct electric current on the viability and metabolism of acidophilic bacteria*. Enzyme and Microbial Technology, vol 24, pp 316-324.
- /23/ Ho, S. V. Sheridan, P. W., Athmer, C. J., Heitkamp, M. A., Brackin, J. M., Weber, D., Brodsky, P. H. (1995). *Integrated In Situ Soil Remediation Technology: The Lasagna Process*. Environmental Science and Technology, vol. 29, No 10, pp. 2528-2534.
- /24/ Reddy K. R., Parapudi, U. S., Devulapalli, S. N., Xu, C. Y. (1997). *Effects of soil composition on the removal of chromium by electrokinetics*. Journal of Hazardous Materials, vol. 55, pp. 135-158.
- /25/ P+P Geotechnik GmbH. (1995). *Technische Dokumentation: TD1, TD2, TD4, TD7*. Teknisk dokumentationsmateriale for Geooxidation og CUS. P+P Geotechnik, Stuttgart,.
- /26/ Rahner D., Grüzig H., Ludwig G., Neumann V., Nitsche C., Guderitz I. (1999). *Electrochemically Induced Reactions in Soils – A New Approach to the In-Situ Remediation of Contaminated Soils?* 2nd Symposium. Heavy Metals in the Environment, and Electromigration Applied to Soil Remediation, pp 72-80, Technical University of Denmark.
- /27/ Andersen M., Petersen J. O. (1998). *Elektrokemisk Jordrensning-test og udvikling af nye in-situ metoder til olieforurenet jord*. Afgangsprøje. Aalborg Universitet.
- /28/ Rahner D. (1999). Mundlig kommentar.
- /29/ Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bricka, M. & Parker, R. (1995). *Electrokinetic remediation: Basics and technology status*. Journal of Hazardous Materials, vol. 40, pp. 117-137.
- /30/ Miljøstyrelsen. (1998). *Oprydning på forurenede lokaliteter*. Vejl. nr. 6.
- /31/ Miljøstyrelsen (1996). *Kemiske stoffers opførsel i jord og grundvand*. Projekt om jord og grundvand, nr. 20.



Analyseresultater fra teknologi-projektet

Formål

I dette bilag er analyseresultater fra teknologiprojektet gengivet på tabel-form. Analyserne er udtaget i henhold til det opstillede monitoringsprogram i kapitel 5.

Desuden er medtaget analyseresultater fra forureningsundersøgelser udført for Oliebranchens Miljøpulje.

Boringsnumre angivet i dette bilag referer til situationsplanen i bilag A.

Laboratorieanalyser er udført af AnalyCen, Miljøkemi, Hedeselskabet og Levnedsmiddelkontrollen.

B.1 Monitoring af forureningsniveau

B.1.1 Jord

Boringerne er udført som 6" uførede tør rotationsboringer og er ført til 6-7 m.u.t. Boringerne er udført inden for et prøvetagningsområde på 1 m² ved hver monitoringsboring. Jordprøverne er udtaget som blandingsprøver for hver boremeter.

De udtagne jordprøver er analyseret for indhold af BTEX'er og totalindhold af kulbrinter ved GC-FID. Prøverne er ekstraheret med.

Tabel B.1

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er i monitoringsboring M1. Børingsnummer refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Dybde m.u.t.	Benzen mg/kg TS	Toluen mg/kg TS	Xylener mg/kg TS	Totalkulbrinter mg/kg TS	Beskrivelse
M1 Juli 1998	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	1,1	4,0	22	140	Benzin
	4-5	<0,1	0,12	3,8	13	Benzin
	5-6	1,0	1,2	<0,3	5,6	Benzin
Oktober 1998	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	<0,1	0,17	3,2	41	Benzin
	4-5	0,34	0,18	1,8	7,1	Benzin
	5-6	0,54	1,1	9,7	110	Benzin
Januar 1999	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	3,5	5,1	38	170	Benzin
	4-5	0,5	0,45	5,9	12	Benzin
	5-6	1,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
April 1999	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	1,6	<0,1	<0,3	35	Benzin
	4-5	<0,1	<0,1	2,6	4,7	Benzin
	5-6	0,6	1,4	0,76	3,2	Benzin
Oktober 1999	3-4	0,16	<0,1	1,2	5,8	Benzin
	4-5	<0,1	<0,1	0,78	3,0	Benzin
	5-6	0,17	0,99	1,9	4,8	Benzin
Marts 2000	3-4	<0,1	0,51	3,6	30	Benzin

Bilag B

Tabel B.2

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er i monitoringsboring M2 og M3. Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Dybde m.u.t.	Benzen mg/kg TS	Toluen mg/kg TS	Xylener mg/kg TS	Totalkulbrinter mg/kg TS	Beskrivelse
M2						
Juli 1998	3-4	9,8	20	42	390	Benzin
	4-5	1,7	9,1	8,7	42	Benzin
	5-6	0,4	3,8	4,9	23	Benzin
	6-7	1,0	7,5	2,7	8,1	Benzin
Oktober 1998	3-4	19	0,45	230	1800	Benzin
	4-5	3,7	17	16	100	Benzin
	5-6	2,0	13	19	120	Benzin
	6-7	1,1	8,8	5,4	31	Benzin
Januar 1999	3-4	4,1	46	51	220	Benzin
	4-5	4,4	19	15	69	Benzin
	5-6	3,5	3,8	27	74	Benzin
	6-7	4,8	20	18	100	Benzin
April 1999	3-4	53	260	310	1.400	Benzin
	4-5	<0,1	1,1	2,1	4,7	Benzin
	5-6	<0,1	2,2	3,7	7,7	Benzin
	6-7	0,19	3,2	0,81	4,6	Benzin
Oktober 1999	3-4	<0,1	1,7	4,4	12	Benzin
	4-5	0,32	2,4	2,4	7,1	Benzin
	5-6	0,25	2,0	2,1	5,0	Benzin
	6-7	0,37	3,8	0,63	4,9	Benzin
Marts 2000	3-4	6,2	33	47	190	Benzin
M3						
Juli 1998	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	1,5	<0,1	<0,3	11	Benzin
	4-5	0,38	<0,1	<0,3	2,7	Benzin
	5-6	<0,1	<0,1	<0,3	2,9	Benzin
Oktober 1998	2-3	0,53	<0,1	<0,3	17	Motor/smøreolie
	3-4	2,6	<0,1	<0,3	2,8	Ikke bestemt
	4-5	0,99	<0,1	<0,3	0,99	Benzen
	5-6	0,26	<0,1	<0,3	0,26	Benzen
Januar 1999	2-3	0,32	<0,1	<0,3	0,32	Benzen
	3-4	1,5	<0,1	<0,3	1,5	Benzen
	4-5	4,5	<0,1	<0,3	4,5	Benzen
	5-6	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
April 1999	2-3	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	3-4	1,6	<0,1	<0,3	1,6	Benzen
	4-5	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
	5-6	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
Oktober 1999	1-2	<0,1	0,15	0,8	3,7	Benzin
	2-3	<0,1	<0,1	0,26	0,26	Xylener
	3-4	0,22	<0,1	<0,3	0,22	Benzen
	4-5	0,6	<0,1	<0,3	0,6	Benzen
	5-6	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
Marts 2000	3-4	0,38	0,18	0,65	3,0	Benzen

Tabel B.3:

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er i jordprøver udtaget for Oliebranchens Miljøpulje inden opstarten af den elektrokemiske oprensning. Borings- og prøvenumre refererer til situationsplanen i bilag A. *Nummer refererer til figur 4.1 i hovedrapporten.

Dato/boring	Dybde m.u.t.	Benzen mg/kg TS	Toluen mg/kg TS	Xylener mg/kg TS	Totalkulbrinter mg/kg TS	Beskrivelse
December 1996						
B1	2,5	0,55	6,1	25,1	360	Benzinlignende
B2	4,5	1,1	<0,1	6,09	27	Benzinlignende
B3	4,0	9,4	110	382	2.400	Benzin
B3	7,0	11	34	3,5	78	Flygtige aromatiske kulbrinter
B3	10,0	14	0,1	<0,3	28	Primært benzen
B4	6,0	21	30	0,79	75	Flygtige aromatiske kulbrinter
B5	5,0	4,0	35	27,3	130	Flygtige aromatiske kulbrinter
B8	2,0	0,37	0,47	16,7	2.300	Benzin/diesel/højt kog. kulbr.
B10	2,0	0,11	<0,1	0,1	2.600	Højere kogende kulbrinter
B11	2,5	21	180	298	3.900	Benzin + højt kog. kulbr.
Februar 1997						
B14	5,0	1,6	<0,1	<0,3	8,7	Uidentificeret
Juni 1997						
B17	8,0	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
48043 (1*)	3,5-3,6	4,1	110	351	2.700	Benzin
48045 (2*)	3,4	4,0	<0,1	2,92	14	Benzin
48052 (3*)	1,0	<0,1	<0,1	<0,3	27	Gasolie
48159 (4*)	1,8	37	210	284	1.500	Benzin
48160 (5*)	3,5-3,6	1,2	<0,1	2,08	11	Benzin
48161 (6*)	2,5	<0,1	<0,1	<0,3	650	Dieselolie
48280 (7*)	3,5	3,3	<0,1	1,26	12	Benzin
48290 (8*)	1,8	3,9	45	244	1.900	Benzin
48291 (9*)	1,5	10	29	20,6	100	Benzin
48303 (10*)	3,5	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
48306 (11*)	1,5	7,9	36	33,6	190	Benzin
48307 (12*)	3,5-3,6	2,0	0,12	1,54	14	Benzin
48308 (13*)	3,5-3,6	6,5	<0,1	16,5	51	Benzin
48314 (14*)	3,5-3,6	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
48315 (15*)	1,0	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
48316 (16*)	3,5-3,6	0,11	<0,1	1,04	8,5	Dieselolie
48319 (17*)	3,5	4,3	54	188	1.000	Benzin
Maj 1998						
S4	3,5	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
S5	1,0	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-
S5	3,5	12	86	110	960	Benzin
S5	7,5	1,9	1,8	0,31	11	Benzin
S6	3,5	25	84	140	1.300	Benzin
S6	7,5	0,93	4,8	1,3	15	Benzin
S7	4,0	<0,1	1,7	3,8	25	Benzin
S7	6,5	0,44	3,1	1,9	14	Benzin
S10	2,5	2,5	3,5	21	530	Benzin
S10	9,0	1,6	1,7	<0,3	6,0	Benzin
S11	2,0	0,14	0,16	1,1	46	Benzin/motor-/smøreolie

Bilag B

Tabel B.4:

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er i jordprøver udtaget for Oliebranchens Miljøpulje efter afslutningen af teknologiprojektet. Børingsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Dybde m.u.t.	Benzen mg/kg TS	Toluen mg/kg TS	Xylener mg/kg TS	Totalkulbrinter mg/kg TS	Beskrivelse
Oktober 1999						
B19	4,0	7,1	110	240	800	Benzin
B20	4,0	8,8	63	110	300	Benzin
B21	4,5	0,5	5,0	5,6	13	Benzin
B22	2,0	1,8	1,3	7,6	42	Benzin
B23	2,0	23	420	650	3.100	Benzin/motor-/smøreolie
B24	6,0	2,9	0,17	<0,3	3,1	Benzin
B25	4,5	1,0	7,3	9,4	26	Benzin
B26	3,5	0,80	45	84	240	Benzin
B27	3,5	0,19	0,67	16	74	Benzin
Marts 2000						
HB1	1,5	27	260	250	990	Benzin
HB2	1,5	6,6	98	120	440	Benzin
B28	1,7	9,9	53	290	1.100	Benzin/motor-/smøreolie
B29	2,0	<0,1	<0,1	7,4	32	Benzin/motor-/smøreolie
B30	3,5	5,7	56	99	410	Benzin
B30	6,0	<0,1	2,0	6,1	15	Benzin

B.1.2 Grundvand

Højtydende borer er inden udtagning af grundvandsprøver forpumpet indtil konstant ledningsevne dog er der som minimum pumpet en vandmængde, der svarer til 10 gange vandmængden i filter og blindrør. Lavtydende borer er tørpumpet 1-4 gange inden udtagning af grundvandsprøver.

Grundvandsprøver er analyseret for totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er ved GC-FID.

Grundvandsanalyser for MTBE er til og med prøvetagningen i oktober 1998 udført som head-space analyser, hvor prøverne henstår i vandbad ved 60 °C i 1 time, hvorefter luftfasen er analyseret ved GC-FID. Prøver udtaget efter oktober 1998 er ekstraheret med dichlormethan og analyseret ved GC/MS-SIM.

Tabel B.5

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er og MTBE i udtagne grundvandsprøver i boring M1.

*= Prøve udtaget for Oliebranchens Miljøpulje. Børingsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Benzen µg/l	Toluen µg/l	Xylener µg/l	Totalkulbrinter µg/l	Beskrivelse	MTBE µg/l
M1						
Juli 1998	620	12.000	18.000	38.000	Benzin	4.400
September 1998						990
Oktober 1998	18	5.600	12.000	24.000	Benzin	<10
Januar 1999	2.000	12.000	15.000	34.000	Benzin	60
April 1999	11	15	50	120	Benzin	7,4
Juli 1999	3.100	4.700	11.000	22.000	Benzin	-
Oktober 1999	520	220	1.600	3.300	Benzin	20
Marts 2000	700	75	1.500	2.600	Benzin	20

Tabel B.6

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er og MTBE i udtagne grundvandsprøver.

*= Prøve udtaget for Oliebranchens Miljøpulje. Børingsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Benzen µg/l	Toluen µg/l	Xylener µg/l	Totalkulbrinter µg/l	Beskrivelse	MTBE µg/l
M2						
Juli 1998	14.000	37.000	12.000	68.000	Benzin	45.000
September 1998						6.300
Oktober 1998	4.200	8.900	6.400	24.000	Benzin	<10
Januar 1999	11.000	30.000	11.000	58.000	Benzin	96
April 1999	11.000	26.000	7.100	45.000	Benzin	77
Juli 1999	23.000	57.000	20.000	100.000	Benzin	-
Oktober 1999	9.400	18.000	7.700	38.000	Benzin	48
Marts 2000	11.000	29.000	10.000	53.000	Benzin	39
M3						
Juli 1998	5.900	4,0	3,2	5.900	Benzin	230
September 1998						500
Oktober 1998	1.500	2,4	130	2.000	Benzin	<10
Januar 1999	5.800	15	220	6.300	Benzin	200
April 1999	5.300	6,8	130	5.500	Benzin	76
Juli 1999	2.500	160	1.100	5.700	Benzin	-
Oktober 1999	2.300	39	500	3.200	Benzin	82
Marts 2000	2.800	3,4	0,17	1.500	Benzin	55
M4						
Januar 1999	<0,1	<0,1	1,1	1,1	Xylener	<0,1
S2						
Juli 1998	18	0,47	0,13	<20	Benzin	<10
September 1998					-	<10
Oktober 1998	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	<10
Januar 1999	<0,1	<0,1	<0,3	220	Gasolie	0,6
April 1999	0,14	<0,1	<0,3	0,14	Benzen	17
Oktober 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	0,2
Marts 2000	0,15	0,16	<0,3	i.p.	-	1,2
S3						
Maj 1998*	2.400	<0,1	<0,3	2.400	Benzin	
Juli 1998	2.200	0,59	0,89	2.200	Benzin	3.000
September 1998						2.500
Oktober 1998	2.700	1,2	0,67	2.700	Benzin	2.800
Januar 1999	2.500	4	1,4	3.400	Benzin	3.200
April 1999	72	<0,1	1,2	73	Benzin	980
Oktober 1999	2.600	0,61	2,8	2.600	Benzin	1.200
Marts 2000	2.800	3,4	0,17	2.800	Benzin	980
S10						
Juni 1998*	770	6.500	2.800	10.000	Benzin	
Juli 1998	56	830	430	1.800	Benzin	750
September 1998						100
Oktober 1998	16	370	750	1.800	Benzin	<10
Januar 1999	12	71	180	430	Benzin	<0,1
April 1999	46	240	230	590	Benzin	0,2
Oktober 1999	44	44	120	340	Benzin	<0,1
Marts 2000	16	48	130	310	Benzin	0,55

Bilag B

Tabel B.7

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er og MTBE i grundvandsprøver udtaget for OM.
Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dato/boring	Benzen µg/l	Toluen µg/l	Xylener µg/l	Totalkulbrinter µg/l	Beskrivelse	MTBE µg/l
S1						
Maj 1998	<0,1	0,51	0,28	23	Uidentificeret	
Januar 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
April 1999	2,0	0,37	0,44	2,81	BTEX	
Oktober 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
S7						
Maj 1998	4.200	30.000	16.000	58.000	Benzin	
S8						
Juni 1998	50	<0,1	<0,3	50	Benzen	
Januar 1999	4,3	<0,1	0,22	4,52	Benzen/xylener	230
April 1999	66	<0,1	<0,3	66	Benzen	
Oktober 1999	87	<0,1	<0,3	87	Benzen	80
S9						
Juni 1998	<0,1	<0,1	<0,3	60	Gasolie	
Januar 1999	0,79	<0,1	0,11	0,90	Benzen/xylener	<0,1
April 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
Oktober 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	<0,1
S11						
Juni 1998	0,28	0,91	4,4	30	Benzin/gasolie	
S12						
Juli 1998	6,8	300	500	1.100	Benzin	
Januar 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
April 1999	<0,1	0,2	0,2	0,4	Toluen/xylener	
Oktober 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
S13						
Januar 1999	<0,1	0,12	3,8	3,92	Toluen/xylener	<0,1
April 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	
Oktober 1999	<0,1	<0,1	<0,3	i.p.	-	<0,1
B17						
Maj 1998	14.000	38	27	14.000	Benzin	3.400
September 1998						2.500
Oktober 1998	2.700	1,2	0,67	2.700	Benzin	2.800
Januar 1999	2.500	4	1,4	3.400	Benzin	3.200
April 1999	72	<0,1	1,2	73	Benzin	980
Oktober 1999	2.600	0,61	2,8	2.600	Benzin	1.200
V1						
Maj 1998	46.000	82.000	16.000	150.000	Benzin	
V3						
Maj 1998	18.000	38.000	11.000	70.000	Benzin	11.000

B.1.3 Luft

Inden udtagning af poreluftprøver er filter- og blindrør renpumpet indtil konstant koncentration af CO₂, O₂ og CH₄ registreret med en IR-måler.

Luftprøverne er opsamlet på kulrør (Dräger) med batteridrevne pumper (SKC Digital) med påmonteret flowmeter. Prøverne er analyseret på gaschromatograf ved GC-FID/GC-MS.

Tabel B.8

Totalindhold af kulbrinter samt indhold af BTEX'er i poreluftprøver. Børingsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Boring/ dato	Benzen µg/m ³	Toluen µg/m ³	Ethylbenzen µg/m ³	Xylener µg/m ³	Totalkulbrinter µg/m ³
M1					
Juli 1998	1.100	4.400	1.800	9.800	110.000
September 1998	730	3.000	3.400	12.500	230.000
Oktober 1998	10	32	<26	<26	220.000
Januar 1999	152	930	85	210	310.000
April 1999	10.000	880	1.200	3.350	80.000
Oktober 1999	<1,6	67	<16	73	<1.600
Januar 2000	<1,1	<11	<11	<11	<1100
M2					
Juli 1998	52.000	29.000	60.000	215.000	2.500.000
September 1998	53.000	27.000	26.000	74.000	7.200.000
Oktober 1998	18.000	2.500	6.900	18.700	2.700.000
Januar 1999	8.300	19.000	2.000	7.200	1.500.000
April 1999	140.000	58.000	5.400	13.800	1.800.000
Oktober 1999	26.000	5.600	620	940	2.100.000
Januar 2000	<2,1	59	<21	<21	<2100
M3					
Juli 1998	240	210	590	2.480	11.000
September 1998	2.300	390	890	2.450	31.000
Oktober 1998	10.000	87	170	280	20.000
Januar 1999	154	<7,2	<7,2	<7,2	27.000
April 1999	15.000	870	1.500	3.610	36.000
Oktober 1999	82.000	21.000	13.000	26.600	510.000
Januar 2000	310	15	66	100	820

B.2 Monitering af øvrige parametre

Analyser af øvrige parametre målt på jord- og vandprøver er gengivet efterfølgende.

B.2.1 Jord

Der udført analyser af jordens pH ved monitoringsstationerne M1, M2 og M3. Analyserne er udført på en vandig opslemning af 10 gram jord i 25 ml vand.

Udvalgte jordprøver fra de tre målestationer er analyseret for indhold af udvalgte tungmetaller ved ICP.

Der er endvidere udført analyser af jordens bakterieindhold. Analyserne er udført som kimtalsbestemmelse efter DS 2252 ved hhv. 10 og 21 °C.

Tabel B.9

Resultat af pH målinger på udtagne jordprøver. Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Dybde	pH						
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
M1							
Juli 1998	7,2	6,9	6,5	8,3	8,5	8,6	
Oktober 1998	8,0	7,9	6,5	8,4	8,3	8,5	
Januar 1999	7,4	7,1	5,1	8,5	8,6	8,8	
April 1999	7,1	7,0	8,1	8,2	8,0	7,7	
Oktober 1999	6,9	6,6	6,2	7,9	7,8	8,3	
M2							
Juli 1998	6,8	6,1	6,8	7,9	8,4	8,4	8,5
Oktober 1998	8,2	7,0	6,2	8,5	8,5	8,2	8,4
Januar 1999	8,5	6,8	7,6	8,3	8,4	8,6	8,6
April 1999	7,6	6,4	6,8	7,3	8,2	8,3	7,9
Oktober 1999	7,8	8,0	6,8	8,2	8,5	8,6	8,7
M3							
Juli 1998	7,8	8,6	8,4	8,3	8,4	8,4	
Oktober 1998	7,3	8,3	8,2	8,4	8,3	8,4	8,5
Januar 1999	8,0	8,4	8,8	8,9	8,9	8,9	
April 1999	7,7	7,7	7,9	7,9	8,4	8,2	
Oktober 1999	7,4	8,6	8,7	8,8	9,0	9,0	

Tabel B.10

Resultat af tungmetalanalyser på udtagne jordprøver. Borningsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Boring/dato	Dybde m.u.t.	Bly mg/kg TS	Cadmium mg/kg TS	Chrom mg/kg TS	Kobber mg/kg TS	Nikkel mg/kg TS	Zink mg/kg TS	Jern mg/kg TS
M1								
Juli 1998	2-3	3,8	0,41	9,4	8,9	10	30	15.000 9.000
	3-4	3,1	0,43	5,3	6,7	8,2	23	
Oktober 1998	2-3	4,0	0,17	7,1	5,0	7,3	20	
	3-4	3,2	0,38	5,1	5,3	7,4	20	
Januar 1999	2-3	6,3	<0,11	12	5,3	6,2	27	
	3-4	4,2	<0,12	9,7	6,9	9,3	28	
April 1999	2-3	4,8	0,14	9,4	4,4	7,2	23	
	3-4	3,3	0,36	8,0	5,8	8,9	23	
Oktober 1999	2-3	3,7	<0,5	11	6,1	6,0	27	
M2								
Juli 1998	4-5	3,5	0,26	7,4	8,5	11	28	9.100 5.500
	5-6	3,6	0,14	7,0	7,8	6,3	17	
Oktober 1998	4-5	3,0	0,20	8,7	7,2	12	22	
	5-6	4,9	0,22	7,8	6,7	10	23	
Januar 1999	4-5	5,9	0,15	11	7,0	10	24	
	5-6	2,5	<0,10	4,8	3,1	5,0	14	
April 1999	4-5	6,5	0,15	9,8	7,2	11	24	
	5-6	3,1	0,11	6,8	5,0	8,9	19	
M3								
Juli 1998	4-5	3,4	0,20	8,0	8,8	11	23	11.000 9.800
	6-7	3,1	0,19	6,1	7,3	11	22	
Oktober 1998	4-5	3,8	0,23	9,7	8,0	14	24	
	5-6	3,2	0,19	8,3	6,9	12	23	
Januar 1999	4-5	5,7	0,17	11	8,4	14	30	
	5-6	5,0	0,20	9,4	7,9	12	33	
April 1999	4-5	4,2	0,15	9,8	7,3	13	26	
	5-6	3,9	0,13	8,9	6,3	11	24	
Oktober 1999	5-6	6,7	0,12	12	9,7	14	32	

Tabel B.11

Resultat af kintalsbestemmelse på udtagne jordprøver. Borningsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Parameter	M1 3-4m antal/g	M2 3-4m antal/g	M3 3-4m antal/g
Juli 1998			
Kimtal v. 21 °C, aerobt, 14 døgn	8.000	4.000	3.000
Kimtal v. 10 °C, aerobt, 14 døgn	2.000	2.000	4.000
Kimtal v. 21 °C, anaerobt, 14 døgn	2.000	1.000	<1000
Kimtal v. 10 °C, anaerobt, 14 døgn	<1000	<1000	<1000
Oktober 1999			
Kimtal v. 21 °C, aerobt, 10 døgn	4.700	6.800	>20.000
Kimtal v. 10 °C, aerobt, 10 døgn	3.300	4.500	>20.000

Bilag B

B.2.2 Vand

Der er udtaget prøver til udvidet boringskontrol fra målestationerne M1, M2, M3 og M4.

Der er endvidere foretaget kimtalsanalyse på udvalgte vandprøver efter DS 2252.

Desuden er der målt iltindhold, pH, ledningsevne og temperatur ved feltmålinger i udvalgte boringer.

Tabel B.12

Boringskontrol på udtagne grundvandsprøver. Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.1.

Parameter	Enhed	M1			M2		
		Juli 98	April 99	Okt. 99	Juli 98	April 99	Okt. 99
pH	pH	7,4	6,3	6,6	7,2	7,0	6,9
Konduktivitet	mS/m	221	1.060	196	127	117	138
Permanganattal, KMnO_4	mg/l	1.300	-	290	380	320	330
Inddampningsrest,, filt	mg/l	1.300	8.300	1.300	850	800	800
Calcium, filt	mg/l	250	610	280	180	58	220
Magnesium, filt	mg/l	18	13	9,3	12	7,5	11
Natrium, filt	mg/l	130	17	24	68	63	67
Kalium, filt	mg/l	4,1	1,9	1,6	3,6	1,1	1,8
Ammonium+ammoniak, filt	mg/l	0,12	2,2	0,078	1,8	1,5	0,87
Jern	mg/l	-	2.700	130	-	86	83
Jern, filt	mg/l	<0,005	-	19	<0,005	-	0,95
Mangan, filt	mg/l	0,36	13	1,5	8,2	4,0	3,8
Hydrogencarbonat, filt	mg/l	370	130	460	550	480	610
Chlorid, filt	mg/l	440	4.100	300	130	110	120
Sulfat, filt	mg/l	62	72	35	37	9,9	7,7
Nitrat, filt	mg/l	<1	2,6	4,8	4	<1	4,7
Nitrit, filt	mg/l	0,027	0,019	-	0,044	0,28	-
Phosphor, total-P	mg/l	4	0,073	2,5	4,1	3,4	2,4
Fluorid	mg/l	0,5	-	<0,03	0,18	<0,03	<0,03
Oxygen indhold	mg/l	2,1	<0,2	0,31	2,1	0,7	0,56
Carbondioxid, aggr.	mg/l	36	93	74	23	67	37
Nikkel	µg/l	1,6	50	8,9	7,7	6,7	7,9
Carbon, org., NVOC, filt	mg/l	9,1	14	6,1	26	18	17

Tabel B.13

Boringskontrol på udtagne grundvandsprøver. Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Parameter	Enhed	M3			M4	
		Juli 98	April 99	Okt. 99	Januar 99	Okt. 99
pH	pH	7,8	7,4	7,2	7,2	7,0
Konduktivitet	mS/m	75,3	64,7	67,5	269	201
Permanganattal, KMnO ₄	mg/l	880	210	1.000	120	46
Inddampningsrest,, filt	mg/l	510	470	370	1.570	1.200
Calcium, filt	mg/l	120	75	88	190	120
Magnesium, filt	mg/l	5,9	2,0	3,4	8,7	6,1
Natrium, filt	mg/l	27	18	26	340	280
Kalium, filt	mg/l	2,9	0,4	0,73	5,4	5,0
Ammonium+ammoniak, filt	mg/l	0,21	0,066	0,11	0,084	0,20
Jern	mg/l	-	56	400	38	27
Jern, filt	mg/l	0,011	-	0,16	0,014	0,03
Mangan, filt	mg/l	0,22	0,35	0,30	0,44	0,58
Hydrogencarbonat, filt	mg/l	350	340	360	360	380
Chlorid, filt	mg/l	46	36	5,9	620	370
Sulfat, filt	mg/l	43	12	16	57	47
Nitrat, filt	mg/l	<1	<1	<0,5	88	80
Nitrit, filt	mg/l	0,11	0,058	0,013	0,062	0,094
Phosphor, total-P	mg/l	3,5	1,3	6,7	1,8	1,3
Fluorid	mg/l	0,33	0,073	0,13	0,07	0,08
Oxygen indhold	mg/l	5,2	2,5	<0,2	10	4,9
Carbondioxid, aggr.	mg/l	6,5	34	24	3,0	14
Nikkel	µg/l	4,3	2,9	2,2	2,2	3,3
Carbon, org.,NVOC, filt	mg/l	13	8,5	9,3	7,7	12

Tabel B.14

Resultat af kimtalsbestemmelse på udtagne grundvandsprøver. Boringsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Parameter	M1 antal/ml	M2 antal/ml	M3 antal/ml
Juli 1998			
Kimtal v. 21 °C, aerobt, 14 døgn	6.000	37.000	8.000
Kimtal v. 10 °C, aerobt, 14 døgn	720	15.000	1.100
Kimtal v. 21 °C, anaerobt	1.500	12.000	5.700
Kimtal v. 10 °C, anaerobt	50	590	120
Oktober 1999			
Kimtal v. 21 °C, aerobt, 10 døgn	>20.000	15.000	>20.000
Kimtal v. 10 °C, aerobt, 10 døgn	14.000	9.400	>20.000

Bilag B**Tabel B.15**

Målinger af ilt, pH, ledningsevne og temperatur i udtagne grundvandsprøver. Børingsnumre refererer til situationsplanen i bilag A.

Boring	Dato	Ilt mg/l	pH -	Ledningsevne mS/m	Temperatur °C
M1	Juli 1998	0,16	6,9	221	13,0
	September 1998	0,61	7,0	93	11,9
	Oktober 1998	0,55	-	80	14,6
	Januar 1999	0,27	7,2	120	14,4
	April 1999	-	7,0	1060	-
	Oktober 1999	0,35	6,7/6,5	196	14,0
	Januar 2000	0,25	6,61	130	10,2
	Marts 2000	0,80	7,27	243	12,5
M2	Juli 1998	0,31	6,8	127	13,0
	September 1998	0,28	6,6	79	12,6
	Oktober 1998	0,43	6,4	72	13,2
	Januar 1999	0,25	7,4	93	15,1
	April 1999	-	7,2	117	-
	Oktober 1999	0,32	6,8/6,8	138	14,8
	Januar 2000	0,28	6,50	122	11,1
	Marts 2000	0,70	7,29	119	9,5
M3	Juli 1998	0,35	7,4	75,3	13,2
	September 1998	0,27	7,2	63	13,7
	Oktober 1998	1,01	6,9	49	15,0
	Januar 1999	0,25	7,4	81	15,1
	April 1999	-	7,7	64,7	-
	Oktober 1999	0,32	7,0	67,5	21,9
	Januar 2000	0,27	7,13	69,2	12,7
	Marts 2000	0,23	7,36	56,0	11,5
S2	Juli 1998	0,48	7,7	23	12,9
	September 1998	0,36	7,4	45	13,5
	Oktober 1998	0,72	7,8/7,2/7,2	42	12,2
	Januar 1999	0,18	7,8/8,0	49	10,7
	April 1999	0,16/0,13	7,1	-	10,0
	Oktober 1999	0,29	7,0/7,0	-	17,6
	Januar 2000	0,30	7,40	55,2	12,0
	Marts 2000	0,21	7,33	59,3	12,8
S3	Juli 1998	2,42	7,5	18	12,7
	September 1998	0,28	7,2	61	13,7
	Oktober 1998	0,74	7,1/7,0	51	12,3
	Januar 1999	0,59	7,4/7,5	61	10,6
	April 1999	0,17/0,15	8,5	-	10,8
	Oktober 1999	0,32	7,0/7,0	-	18,4
	Januar 2000	0,24	7,58	46,1	12,6
	Marts 2000	0,21	7,34	132	14,5
S10	Juli 1998	0,44	7,7	23	12,2
	September 1998	3,02	8,8	33	11,1
	Oktober 1998	0,80	7,5/7,6	35	11,4
	Januar 1999	1,42	7,8	36	7,9
	April 1999	2,08/1,69	7,5	-	7,5
	Oktober 1999	2,96	7,5/7,6	-	13,9
	Januar 2000	3,25	7,04	50,0	8,9
	Marts 2000	1,2	7,34	43,3	9,6

B.3 Prøvepumpning

Der er udført en prøvepumpning i boring S3. Prøvepumpningen er udført med en MP1-pumpe, hvor der er anvendt en fast pumpeydelse på 0,65 m³/h. Pejlinger i pumpeboringen og observationsboringer fremgår af tabel B.16 og B.17.

Tabel B.16

Prøvepumpning og pejlinger i pumpeboring S3.

Tid min	S3 (Sænkning) meter	S3 (Stigning) meter
0	0	0
0,15	-	0,76
1	0,67	1,06
1,5	0,78	1,17
2	0,85	1,23
3	0,92	1,28
5	1,01	1,39
8	1,36	1,46
10	1,41	1,53
15	1,51	1,61
60	1,87	1,73
75	1,99	1,79
90	2,06	-
105	2,11	-
120	2,12	-

Tabel B.17

Vandspejlssænkning i observationsboringer i forbindelse med prøvepumpning i boring S3.

Tid min	Sænkning meter						
Boring Afstand fra S3 (m)	S4 6	S2 8,5	B17 14	S1 18	S6 20	S9 24	S11 34
0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,98	-	-	-	-	-	-
5	-	0,70	-	-	-	-	-
8	-	-	0,64	0,60	-	-	-
15	-	-	-	-	0,06	-	0,06
30	0,43	-	0,39	0,38	-	-	-
45	0,37	0,35	0,35	0,35	0,09	0,24	0,07
60	1,00	1,01	0,82	0,70	0,03	0,23	0,01
120	1,02	1,02	0,86	0,77	0,04	0,36	0,08

Erfaringer fra andre elektrokemiske oprensninger i Danmark

I dette bilag gives en kort beskrivelse af de enkelte forsøgsprojekter, der indgår i erfaringsopsamlingen. Projekterne har alle været kørt som forsøgsprojekter med Oliebranchens Miljøpulje som bygherre. Alle ejendommene har således været forurenede med benzin og/eller dieselolie.

Formål

Erfaringsopsamlingen er udført for at give en vurdering af den elektrokemiske metodes generelle anvendelighed og effekt. En samlet vurdering af OM's forsøgsprojekter er givet i hovedrapportens kapitel 7.

Entreprenører

De syv af oprensningerne er udført af to forskellige in-situ entreprenører. Desuden er en af oprensningerne gennemført som et forsøgsprojekt, hvor der er anvendt et solcelleanlæg som strømforsyning.

Rådgivere

Der har været tilknyttet seks forskellige rådgivere på forsøgsprojekterne for Oliebranchens Miljøpulje.

Monitering

Formålet med monitoringsprogrammerne på de enkelte forsøgsprojekter har primært været at foretage en kontrol af om oprensningskriterierne er opnået. Monitoringsinterval, prøveantal m.m. har været forskellig fra sag til sag. Dette skyldes flere forhold, f.eks. at forureningerne har haft forskellig udbredelse og har udgjort en større eller mindre akut miljørisiko.

Datamaterialet

Datamaterialet har ikke på nogen af forsøgsprojekterne været tilstrækkeligt til at foretage en egentlig statistisk vurdering af oprensningseffekten. Årsagen er bl.a. forskelle i prøvetagningsstrategier, utilstrækkelig bestemmelse af startkoncentrationen, samt en stor spredning i analyseresultaterne også for prøver, der er udtaget indenfor relativt kort afstand.

Opbygning

I erfaringsopsamlingen er historik, geologiske forhold og forureningssituationen inden iværksættelsen af den elektrokemiske oprensning kort beskrevet. Forureningsniveauerne før, under og efter oprensningen beskrevet, og oprensningseffekten er vurderet.

C.1 Forsøgsprojekt 1

Historik

I perioden fra 1951 til 1973 har der været detailsalg af benzin og dieselolie fra ejendommen i tilknytning til en købmandsforretning. Ejendommen anvendes på nuværende tidspunkt til grillbar og beboelse.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske borer og de lokale geologiske forhold i det forurenede område beskrives således:

Øverst findes et fyldlag bestående af sand, ler og muld på ca. 0,5-2 meter. Under fyldlaget træffes vekslende lag af moræneler, -sand og -grus til ca. 11 m.u.t.

Der er truffet lommer af sekundært grundvand 3,5 til 5,0 m.u.t. Der er truffet primært grundvand i sandede kvartære aflejringer, beliggende ca. 8,5 m.u.t.

Forureningssituation

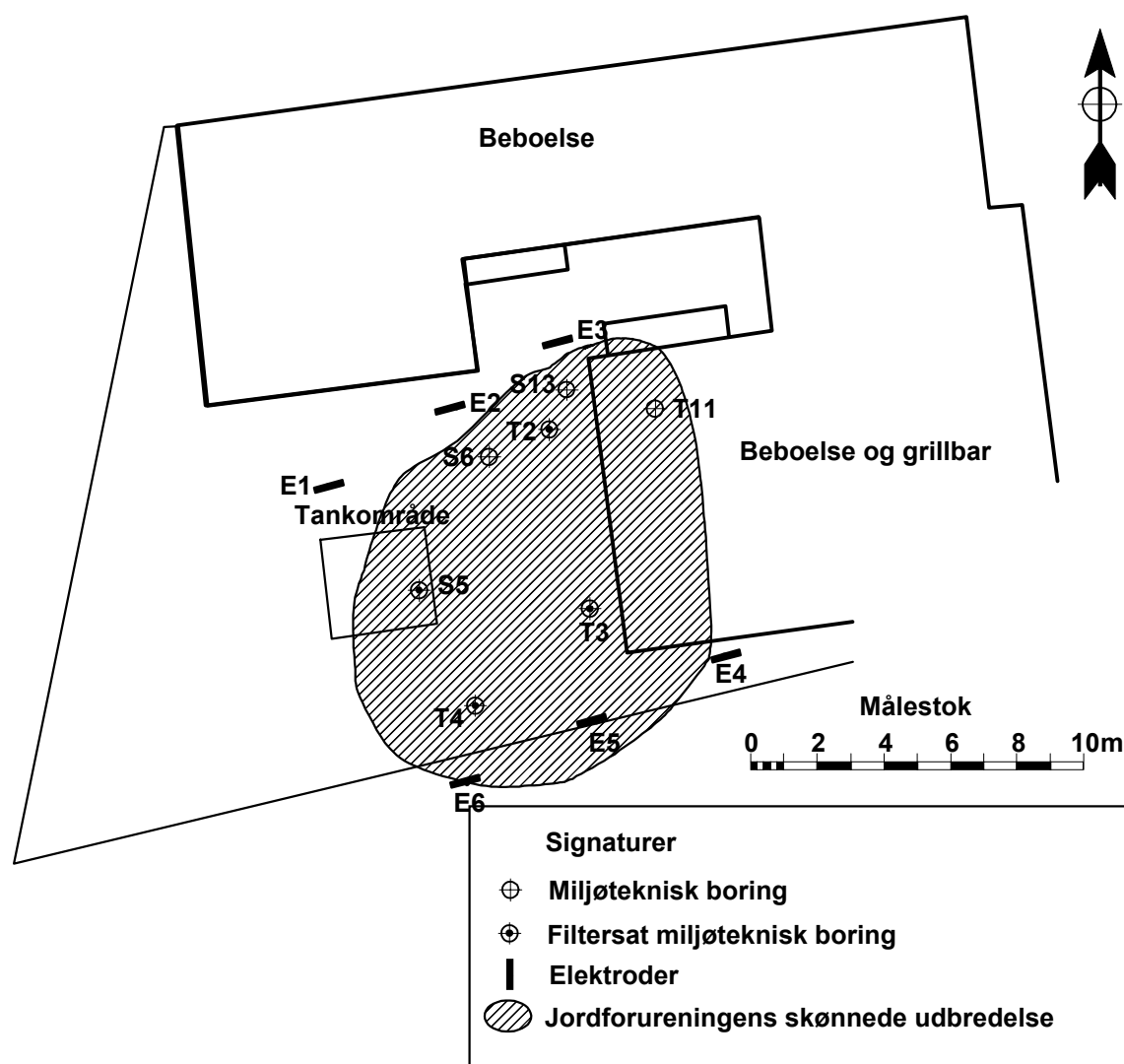
Før iværksættelsen af in-situ oprensningen med den elektrokemiske metode blev der konstateret dieselolieforurening omkring det tidligere tankanlæg. Det forurenede område på ejendommen er før opstarten af den elektrokemiske oprensning vurderes til ca. 300-400 m³. Den konstaterede jordforurening er beliggende ca. 2-5 m.u.t. Inden opstarten af den elektrokemiske oprensning er der konstateret forureningskoncentrationer af dieselolie på op til 3.600 mg/kg TS. I alt vurderes forureningen ved opstarten af den elektrokemiske oprensning at bestå af ca. 600-800 liter dieselolie.

Der er endvidere konstateret grundvandsforurening med dieselolie på op til 0,63 mg/l i det sekundære grundvand.

In-situ anlæg

Den elektrokemiske oprensning af ejendommen blev igangsat i august 1996 og indstillet første gang i juni 1997. Under oprensningen er der anvendt seks elektroder, benævnt E1-E6 på situationsplanen i figur C.1. Som elektroder blev anvendt jernspuns med en bredde på ca. 0,75 meter, nedrammet til 5,5-6,0 m.u.t. Elektroderne blev parvis koblet til en trekanals strømforsyning, hvor der blev anvendt et spændingsfald på ca. 60-120 V mellem hvert elektrodepar. Fra juni til december 1998 blev den elektrokemiske oprensning genoptaget. I denne periode anvendtes kun elektroderne E3 og E6.

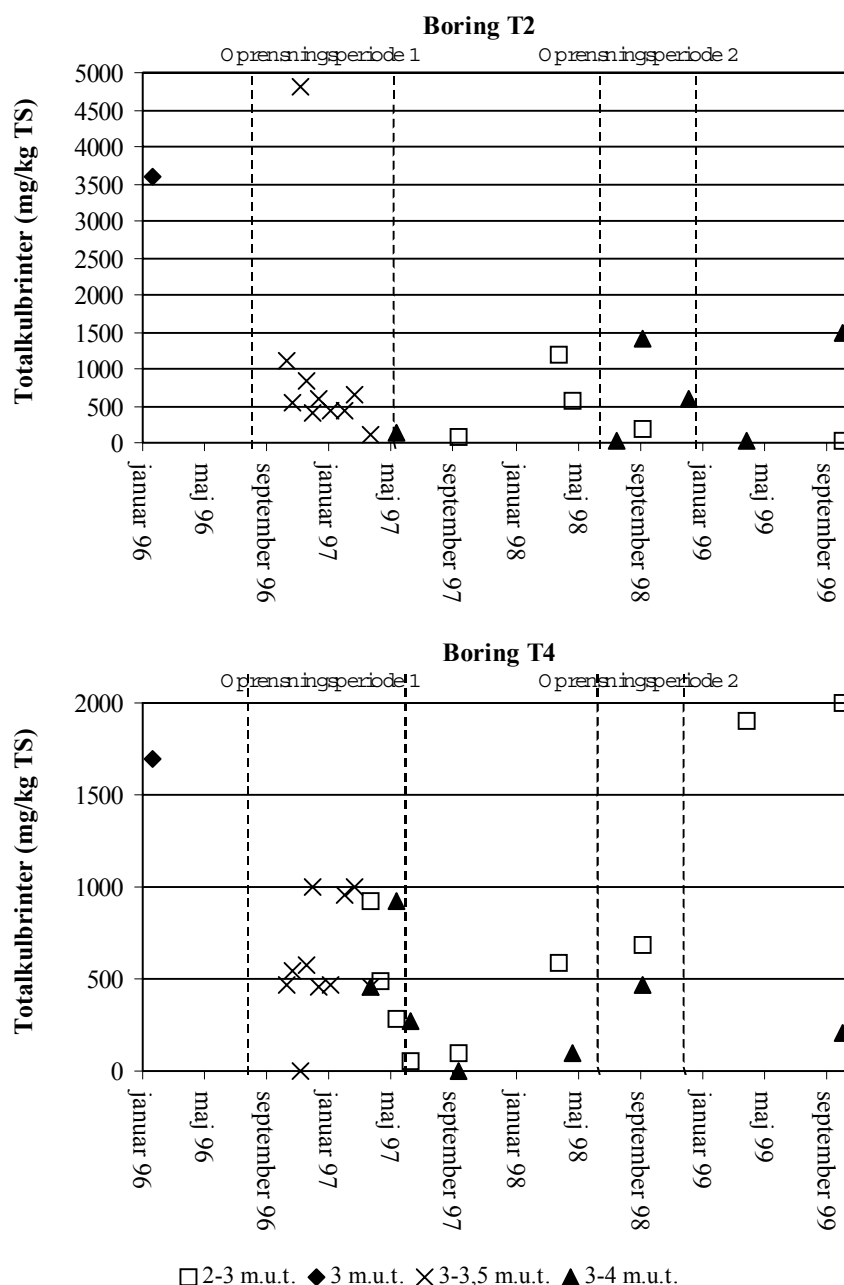
Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.1.



Figur C.1:
Situationsplan for forsøgsprojekt 1.

Monitering, jord

Udviklingen i koncentrationen af olieprodukter i jorden er løbende monitoreret i boringer udført inden for en radius af ca. 1 meter omkring to monitoringsboringer, T2 og T4. Endvidere er der løbende udtaget grundvandprøver fra filtersatte boringer på ejendommen. Analyseresultater for jordprøver udtaget omkring de to monitoringsboringer fremgår af figur C.2. Prøver udtaget før opstarten af den elektrokemiske oprensning er udtaget som punktprøver udvalgt efter højeste PID-udslag, mens prøver under oprensningen er udtaget som blandingsprøver over 0,5-1,0 meter.

**Figur C.2:**

Analyseresultater for jordprøver udtaget fra hhv. boring T2 og T4 under oprensningen. Boringsnumre refererer til situationsplanen i figur C.1. Stiplede linier markerer de to oprensningsperioder

Oprensningseffekt, jord

Det fremgår af analyseresultaterne for jordprøverne, at der generelt er konstateret et lavere forureningsniveau i blandingsprøverne udtaget under oprensningen end i punktprøverne, der er udtaget i forbindelse med forureningsundersøgelsen, der blev foretaget inden oprensningen blev igangsat.

Der er konstateret et fald i forureningskoncentrationen i prøver udtaget i slutningen af den første oprensningsperiode i maj og september 1997. Prøver udtaget i maj og september 1997 overholdt således oprensningskriterierne.

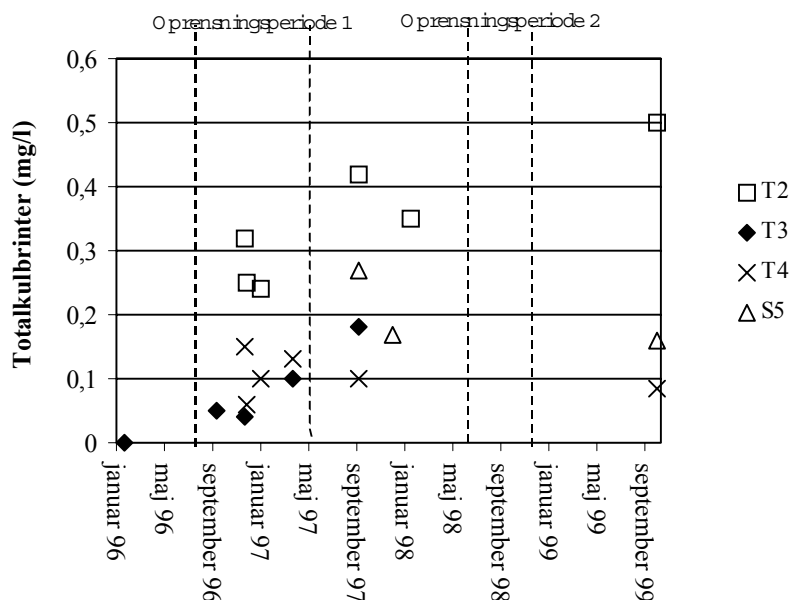
Efterfølgende monitoring, herunder prøver udtaget under oprensningsperioden fra juni til december 1998, viser indhold af totalkulbrinter på samme niveau som under den første oprensningsperiode. Der er dog konstateret meget varierende forureningskoncentrationer, hvilket vurderes at skyldes

prøvetagnings- og analyseusikkerheder samt den inhomogene struktur af den sandede moræneler.

Samlet set vurderes der ikke på baggrund af monitoringsdataene at være en dokumenteret reduktion af jordforureningen som følge af den elektrokemiske oprensning.

Monitoring, grundvand

Analyseresultaterne for grundvandsprøver, udtaget i fire borer i det forurenede område under oprensningen, fremgår af figur C.3.



Figur C.3:

Analyseresultater for grundvandsprøver udtaget under oprensningen.

Oprensningseffekt, grundvand

Som det fremgår af figur C.3, er der ikke konstateret væsentlige ændringer i indholdet af kulbrinter i grundvandet i monitoringsperioden. På baggrund af monitoringsdataene vurderes der ikke at være dokumenteret en reduktion af grundvandskoncentrationerne.

C.2 Forsøgsprojekt 2

Historik

Ejendommen er en tidligere servicestation, hvorfra der har været salg af benzin og dieselolie. Ejendommen anvendes på nuværende tidspunkt til beboelse og værksted.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i det forurenede område beskrives således:

Øverst findes et fyldlag på ca. 2-3 meter, primært bestående af sand og ler. Under fyldlaget træffes sandaflejringer med mindre indslag af moræneler til ca. 5 m.u.t. Herunder træffes moræneler.

Der er truffet sekundært grundvand på ejendommen i de sandede aflejringer. Grundvandsspejlet er truffet ca. 2,5-4,5 m.u.t.

Forureningssituation

I forbindelse med opgravning af tanke og installationer er der i 1996 konstateret benzinforurening. Forureningen kunne af anlægstekniske årsager ikke opgraves fuldstændigt. Restforureningen vurderes at udgøre ca. 150 m³, hvoraf en del er beliggende under boligen. Forureningen er beliggende ca. 3-6 m.u.t., med de højeste niveauer konstateret ca. 4-5 m.u.t. i et ca. 20 m² stort område ind mod beboelsen (område I). Endvidere er der i et randområde omkring det forurenede område konstateret indhold af kulbrinter under jordkvalitetskriterierne ca. 4,5-5 m.u.t. Før opstarten af den elektrokemiske oprensning vurderes det, at der var efterladt ca. 100 liter benzin på ejendommen.

Der er endvidere konstateret grundvandsforurening på ejendommen. I det sekundære grundvand er der, før den elektrokemiske oprensning blev igangsat, konstateret totalindhold af kulbrinter på op til 20 mg/l. Forureningskoncentrationen i grundvandet er ikke monitoreret under oprensningen.

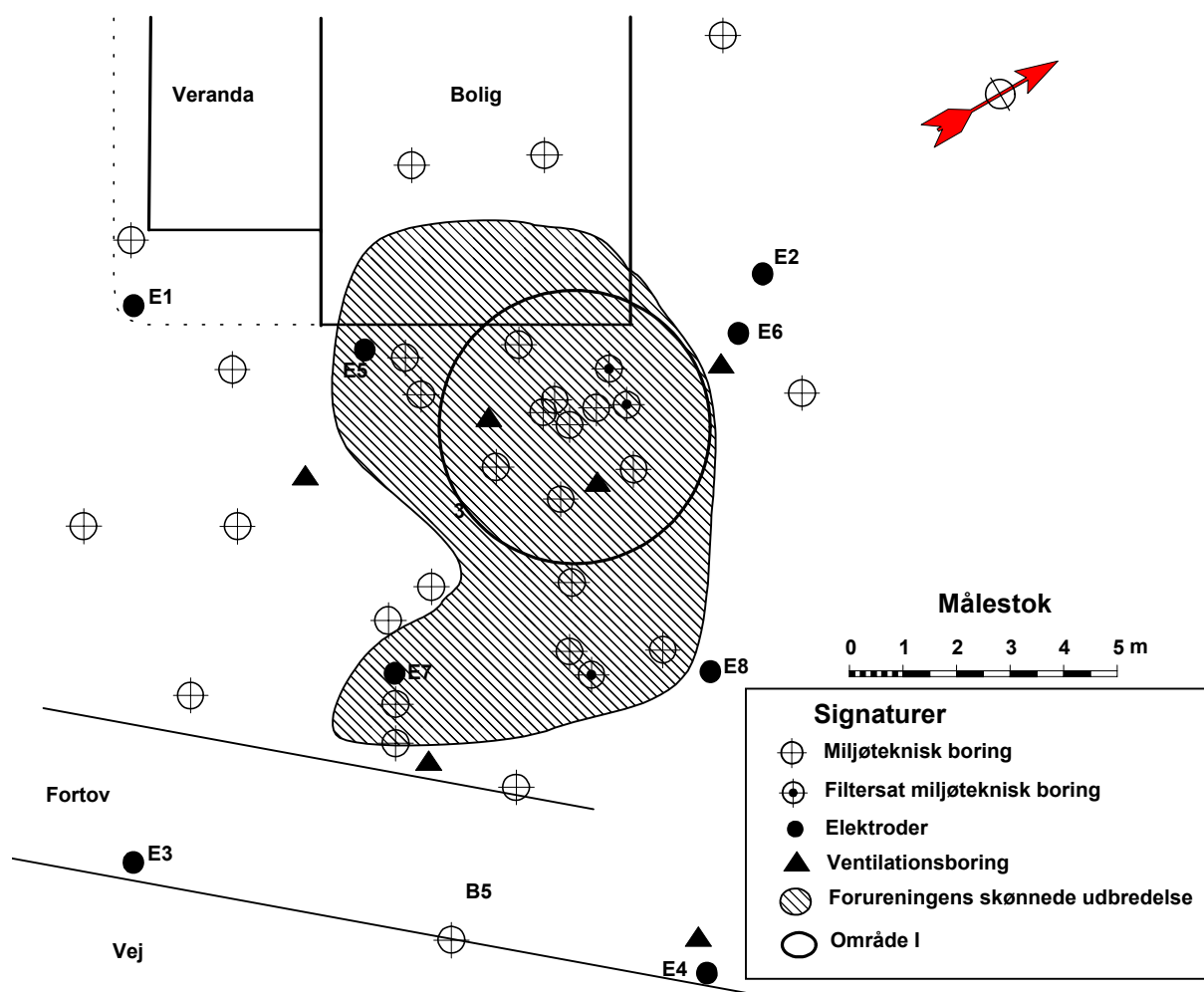
In-situ anlæg

Anlægget til elektrokemisk oprensning af ejendommen blev ved oprensningens begyndelse i august 1997 opbygget af fire ø160 mm jernrør nedboret til 7 m.u.t. (E1-E4). De fire elektroder blev placeret med en indbyrdes afstand på ca. 11-12 meter. I april 1998 blev der etableret yderligere fire elektroder, E5-E8, med en indbyrdes afstand på ca. 7,5 meter. Disse elektroder blev placeret tættere på det forurenede område, idet det blev vurderet, at oprensningens effekt ikke var tilstrækkelig i det mest forurenede område af ejendommen.

Der er anvendt en kraftigere spænding end i de øvrige forsøgsprojekter, idet der er anvendt et fast spændingsfald på 200 V mellem anoder og katoder. Entreprenøren har valgt at ændre strømretningen flere gange under oprensningen for at undgå at anoderne korroderede væk, og for at undgå en væsentlig pH-påvirkning af jordmatricen ved elektroderne. Der er konstateret en opvarmning af grundvandet til mellem 20 og 30°C, i en afstand af ca. 1 meter fra elektroderne, som følge af den påførte effekt, der er afsat i jorden.

Samtidig med den elektrokemiske oprensning har entreprenøren foretaget en svag vakuumventilation i en række borerer filtersat 2-6 m.u.t.

Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.4.

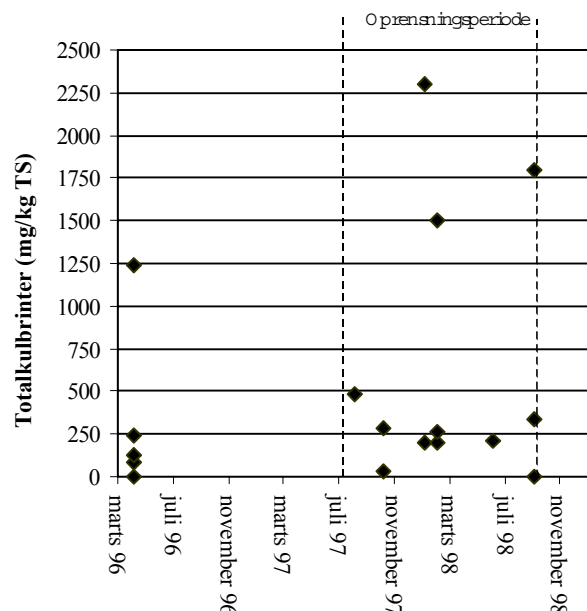


Figur C.4:
Situationsplan for forsøgsprojekt 2.

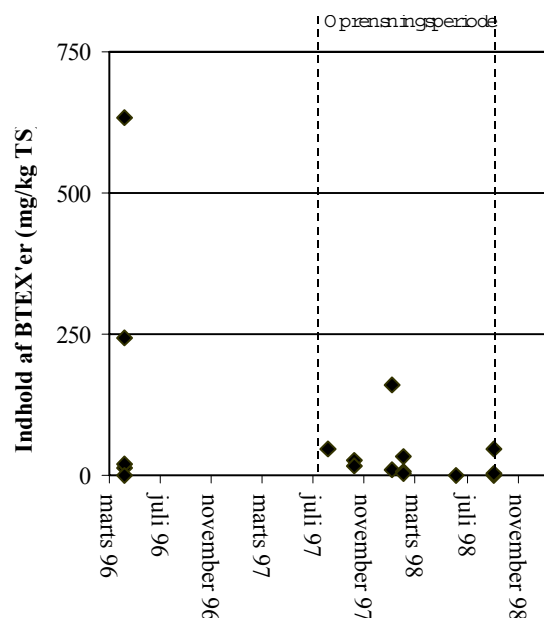
Monitering

Inden opstarten af den elektrokemiske oprensning er forureningsniveauet fastlagt ved en forureningsundersøgelse. Efterfølgende er der foretaget 6 kontrolundersøgelser, hvor der i det forurenede område og randområdet er foretaget ca. 3-4 boringer pr. gang.

Prøverne er udtaget med relativ stor indbyrdes afstand og i forskellige dybder indenfor det forurenede område, og er derfor ikke indbyrdes sammenlignelige. I figur C.5 er angivet den højeste koncentration, konstateret i hver af boringerne i det forurenede område. Det højeste konstaterede indhold af BTEX'er i hver boring er angivet på figur C.6. Figurene giver et indtryk af de konstaterede forureningsniveauer ved hver prøvetagningsrunde.



Figur C.5: Analyseresultater for totalkulbrinter i jordprøver.



Figur C.6: Indholdet af BTEX'er i jordprøver.

Oprensningseffekt, jord

Af figur C.5 fremgår det, at der ved sidste prøvetagning er konstateret forureningskoncentrationer på op til 1.800 mg/kg TS, bestående af en blanding af benzin og gasolie. Som følge af varierende forureningskoncentrationer konstateret i prøver udtaget med kort indbyrdes afstand er det vanskeligt at vurdere, om der er sket en massefjernelse af forureningen på ejendommen. Samlet vurderes det, at der kun er sket en begrænset eller ingen reduktion i indholdet af totalkulbrinter i det forurenede område.

Det fremgår af figur C.6, at der er tendens til at indholdet af BTEX'er i jordprøverne er faldet under oprensningen. Det kan skyldes den konstaterede opvarmning til 20-30 °C i området omkring elektroderne, kombineret med den etablerede vakuumventilation. Vakuumventilationen vil således bevirke, at en del af de flygtigste komponenter i benzinfractionen, herunder BTEX'er kan være afdampet eller biologisk nedbrudt under oprensningen.

C.3 Forsøgsprojekt 3

Historik

I perioden fra 1920'erne til 1995 har der været drevet købmandsforretning med detailsalg af benzin- og dieselolie fra ejendommen. Ejendommen anvendes på nuværende tidspunkt til butik og bolig.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i området, der er forsøgt oprenset med den elektrokemiske metode, beskrives således:

Øverst findes et fyldlag på ca. 0,5-1,0 meter, primært bestående af sand og muld. Under fyldlaget træffes marine fin- og mellemkornede sandaflejringer til minimum 5 m.u.t. Flere steder er der i sandaflejringerne konstateret indhold af silt og ler.

Der er truffet sekundært grundvand på ejendommen ca. 3 m.u.t. Strømningsretningen i det sekundære grundvandsmagasin vurderes at være vest til sydvestlig.

Forureningssituation

Forureningen, der er forsøgt oprenset via den elektrokemiske metode, er konstateret ved et tidligere tankanlæg til benzin. Forurening består primært af gasolie, der er konstateret fra ca. 2,5 m.u.t. til mindst 5 m.u.t.

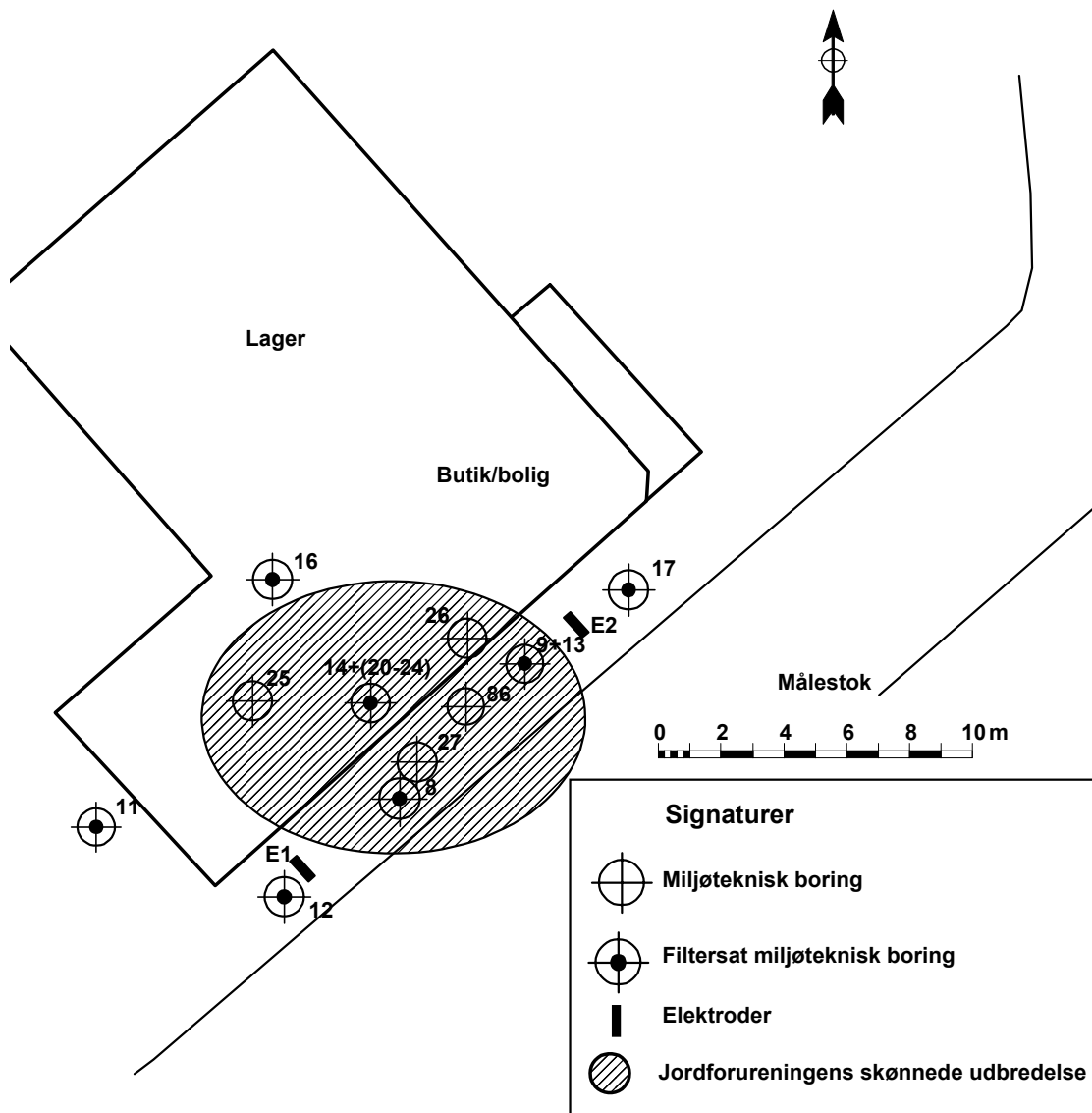
Inden opstarten er der konstateret koncentrationer af gasolie på op til ca. 34.000 mg/kg TS. I alt vurderes der at være ca. 300 m³ forurenet jord. Antages gennemsnitskoncentrationen at være 2.000-4.000 mg/kg TS svarer dette til en samlet mængde olieprodukt på ca. 1.000-2.000 liter. Forureningen er delvist beliggende under bygninger og offentlig vej.

Der er konstateret grundvandskoncentrationer i det sekundære grundvand på op til 0,9 mg/l.

In-situ anlæg

Det etablerede anlæg til elektrokemisk oprensning af ejendommen blev opbygget af 2 stk. spunsplader på ca. 0,8 meters bredde, nedrammet til ca. 7 m.u.t. Elektroderne blev tilkoblet en strømforsyning. Der har ifølge entreprenøren generelt været anvendt en elektrisk spænding på ca. 60-120 V. In-situ oprensningen blev igangsat i juni 1997. Den samlede driftsperiode for anlægget udgjorde ca. 1½ år.

Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.7.



Figur C.7:
Situationsplan for forsøgsprojekt 3.

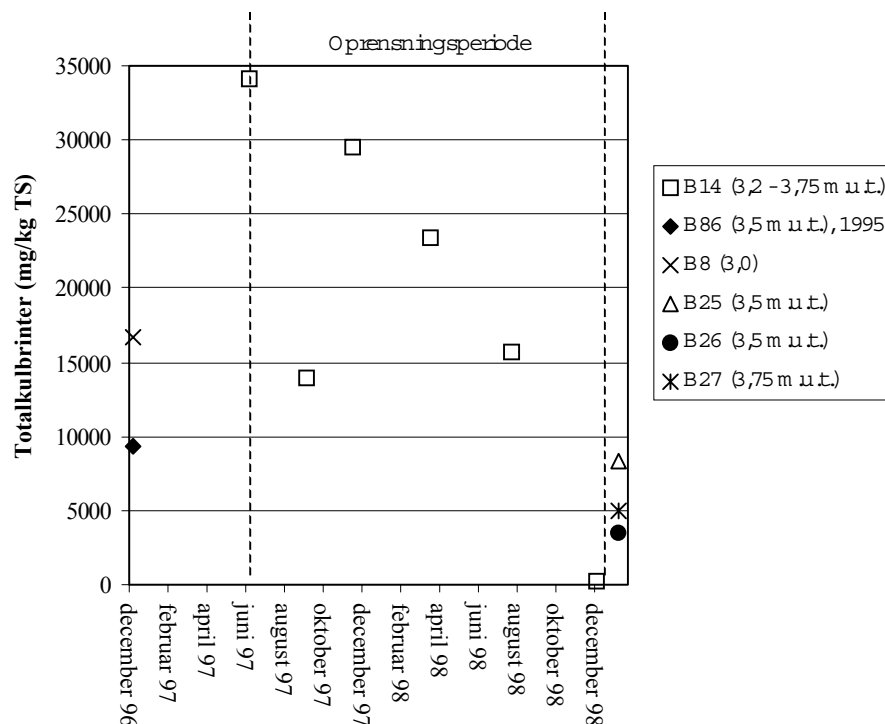
Monitering

Udviklingen i koncentrationen af olieprodukter i jorden er løbende monitoreret under oprensningen i boringer udført indenfor en radius af 1 meter fra boring 14. Prøverne er udtaget 3,2-3,5 m.u.t. Endvidere er der udtaget en række jordprøver fra området ved oprensningens opstart og afslutning.

Fra boring 14 er der endvidere løbende udtaget grundvandsprøver under oprensningen. Vandspejlet har varieret fra 2,2 m.u.t. til 3,5 m.u.t. under oprensningen.

Jord

Analyseresultaterne for jordprøver udtaget i det forurenede område er angivet på figur C.8.



Figur C.8:

Analyseresultater for jordprøver udtaget under oprensningen. Børingsnumre refererer til figur C.7.

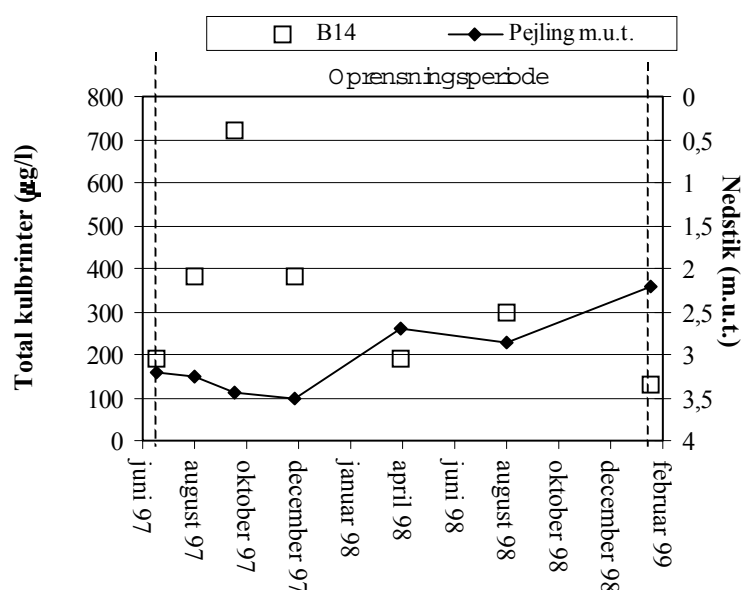
Oprensningseffekt, jord

Det fremgår af analyseresultaterne i figur C.8, at der under oprensningen er konstateret forureningskoncentrationer i monitoringsboring 14 på 12.000-30.000 mg/kg TS. Ved sidste prøvetagning i monitoringsboringen, er der tilsyneladende sket et væsentligt fald i jordkoncentrationen.

Den efterfølgende kontrolprøvetagning viste dog jordkoncentrationer på op til 8.320 mg/kg TS. Det må derfor betragtes som usikkert, hvorvidt oprensningen har medført en reduktion i forureningsniveauet.

Monitering, grundvand

Analyseresultaterne for grundvandsprøver udtaget fra den filtersatte boring 14 er vist på figur C.9.



Figur C.9:

Analyseresultater for grundvandsprøver udtaget i boring 14 under oprensningen.

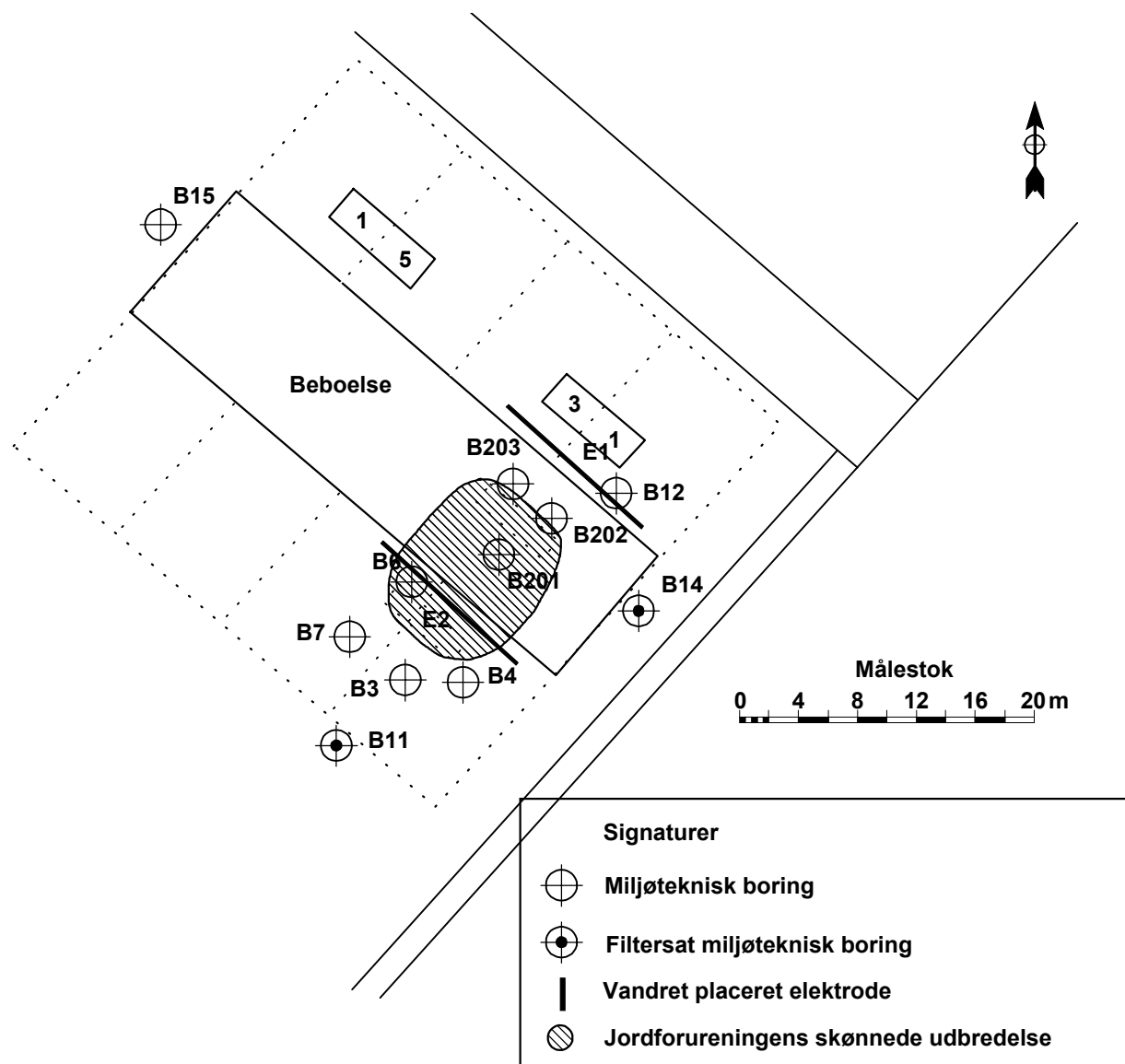
Bilag C

Oprensningseffekt, grundvand

Det fremgår af figur C.9, at forureningskoncentrationen i grundvandet har varieret under oprensningen. Der har samtidigt været betydelige ændringer i grundvandsspejlets beliggenhed under oprensningen, hvilket kan have indvirket på grundvandskoncentrationen. Det er derfor vanskeligt entydigt at vurdere om den elektrokemiske oprensning har haft indflydelse på forureningskoncentrationen i grundvandet. Umiddelbart er der dog ingen entydig dokumentation på en oprensningseffekt. Det tilsyneladende mindre fald ved sidste prøvetagning vurderes således at kunne skyldes vandspejlsvariationer samt prøvetagnings- og analyseusikkerheder.

C.4 Forsøgsprojekt 4

<i>Historik</i>	Der har tidligere været detailsalg af benzin og dieselolie fra ejendommen, som på nuværende tidspunkt anvendes til beboelse.
<i>Geologi og hydrogeologi</i>	<p>På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i området beskrives således:</p> <p>Øverst findes et fyldlag på ca. 0,5 meter, primært bestående af sand og muld. Herunder træffes marine finsands- og siltaflejringer til minimum 5 m.u.t. I enkelte borerer er der truffet sandede lerflejringer umiddelbart under fyldlaget. Der er truffet sekundært grundvand på ejendommen ca. 2 m.u.t.</p>
<i>Forureningssituation</i>	<p>Inden oprensningen blev igangsat er der konstateret totalindhold af kulbrinter på op til 1.300 mg/kg TS. Den kraftigste forureningen er beliggende omkring grundvandsspejlet 2,0-2,5 m.u.t. Forureningen vurderes på baggrund af de udførte kemiske analyser at bestå af en blanding af benzin og gasolie. Jordforureningen vurderes at udgøre ca. 200 m³. I alt vurderes forureningen ved opstarten af den elektrokemiske oprensning at bestå af ca. 200 liter benzin og gasolie.</p> <p>I boring B14, der er beliggende ca. 5 meter øst for kildeområdet, er der konstateret grundvandskoncentrationer af totalkulbrinter på op til 0,15 mg/l.</p>
<i>In-situ anlæg</i>	<p>Det etablerede anlæg bestod af to jernelektroder på ca. 12 meters længde, der blev nedgravet 1,5 m.u.t. på hver side af bygningen. Afstanden mellem elektroderne var ca. 13 meter. Elektroderne blev tilkoblet en strømforsyning, og der blev anvendt et spændingsfald på ca. 60-120 V. Oprensningen blev igangsat i november 1997 og indstillet primo 1999.</p> <p>Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.10.</p>



Figur C.10:
Situationsplan for forsøgsprojekt 4.

Monitering

Udviklingen i koncentrationen af olieprodukter i jorden er monitoreret under oprensningen ved hjælp af borer udført ved boring B201. Prøverne er udtaget umiddelbart omkring grundvandsspejlet, svarende til ca. 2,0 m.u.t., samt 0,5 meter under grundvandsspejlet, svarende til 2,5 m.u.t. Analyseresultaterne fremgår af figur C.11.

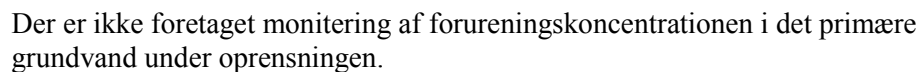
Figur C.11:
Analyseresultater for jordprøver udtaget ved boring B201 under oprensningen.

Oprensningseffekt, jord

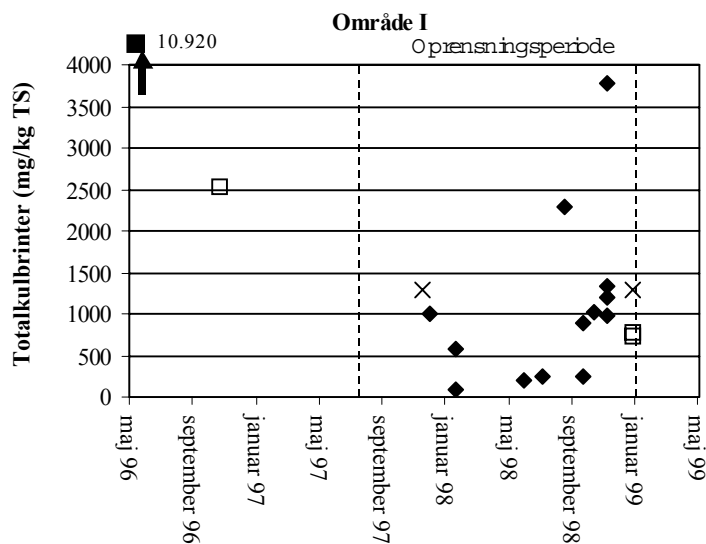
Som det fremgår af figur C.11, er der ikke konstateret en reduktion i indholdet af totalkulbrinter i den periode, hvor den elektrokemiske oprensning har været i drift. I december 1998 er der således konstateret forureningskoncentrationer på mellem 1.500 og 4.460 mg/kg TS i monitoringsboringen. Der er således ikke konstateret nogen effekt af oprensningen, og det blev valgt at indstille oprensningen primo 1999.

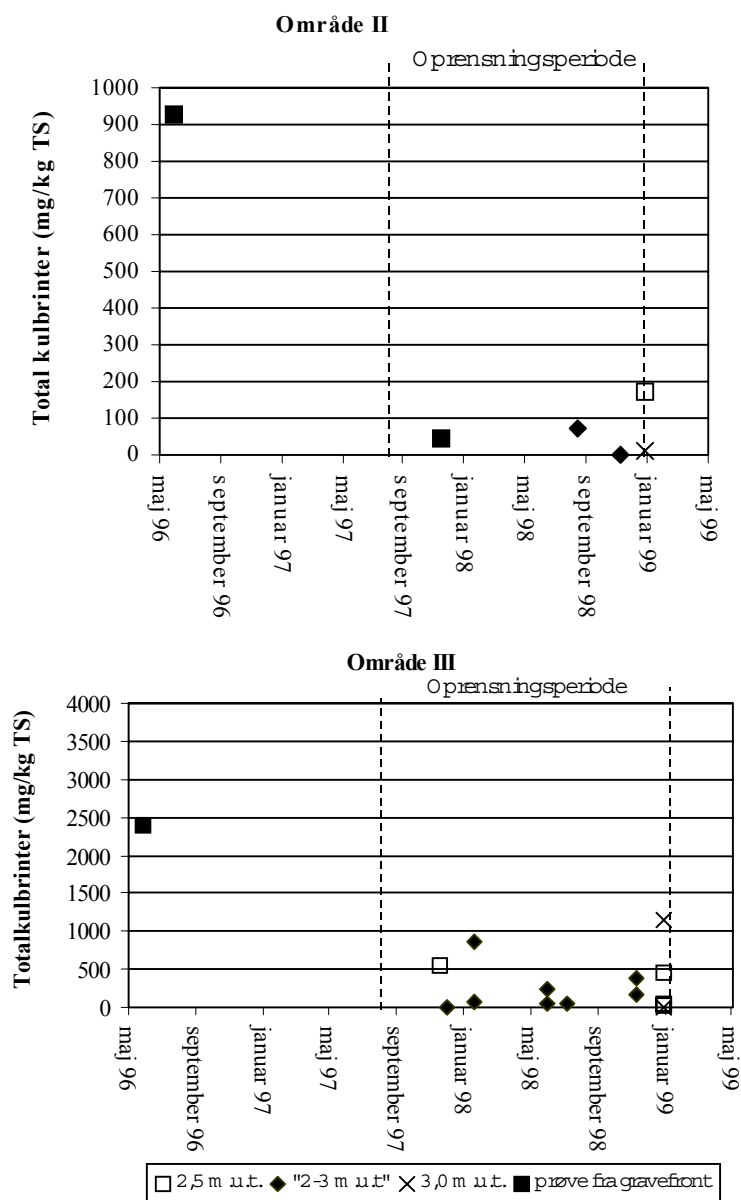
C.5 Forsøgsprojekt 5

<i>Historik</i>	<p>I perioden fra ca. 1950 til 1994 har der været detailsalg af benzin og dieselolie fra ejendommen i tilknytning til et autoværksted og smedie. Ejendommen anvendes på nuværende tidspunkt til værksted og bolig.</p>
<i>Geologi og hydrogeologi</i>	<p>På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i området beskrives således:</p> <p>Øverst findes et fyldlag på ca. 0,5-1,0 meter, primært bestående af sten, sand og muld. Under fyldlaget træffes vekslende lag af ler og sand til ca. 2,5-3,0 m.u.t. Herunder træffes smeltevandssand. Smeltevandssandet er underlejret af glimmerler fra ca. 12 m.u.t.</p> <p>Det primære grundvandsmagasin knytter sig til smeltevandssandet. Grundvandsspejlet er frit og beliggende ca. 7,5 m.u.t. Den overordnede strømningsretning i magasinet er sydvestlig.</p>
<i>Forureningssituation</i>	<p>Før igangsættelsen af den elektrokemiske oprensning er tanke med relation til detailsalget opgravet og bortskaffet. Af funderingsmæssige hensyn er der forbindelse med gravearbejdet efterladt restforurening med benzin i de tre gravefronter i ejendommens indkørsel. Der er efterladt ca. 70 m³ benzinformet jord beliggende ca. 2-4 m.u.t.</p> <p>På baggrund af prøver udtaget i forbindelse med gravearbejdet, vurderes der før opstarten af den elektrokemiske oprensning at være efterladt en samlet benzinmængde på ca. 800 liter.</p>
<i>In-situ anlæg</i>	<p>Anlægget til elektrokemisk oprensning af ejendommen er opbygget af fire spunsjern, nedrammet til ca. 5-6 m.u.t., der er koblet til en strømforsyning. Der er ifølge entreprenøren anvendt et spændingsfald på ca. 60-120 V. In-situ oprensningen blev opstartet i august 1997 og blev indstillet efter ca. 1½ års drift.</p> <p>Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.12.</p>



Udviklingen i jordforureningsniveauet er undersøgt ved en række prøvetagningsrunder udført i områderne benævnt I, II og III på situationsplanen i figur C.12. Hvert område udgør ca. 8-12 m². Der er primært udtaget prøver 2-3 m.u.t. Analyseresultater fra de tre områder er gengivet på figur C.13.



**Figur C.13:**

Analyseresultater for område I, II og III. Alle prøver udtaget i 1998 er udtaget med rammesondeboringer som blandingsprøver 2-3 m.u.t. De øvrige prøver er udtaget som punktprøvet med borerig 2,5 eller 3,0 m.u.t.

Oprensningseffekt, jord

Af figur C.13 fremgår det, at prøverne udtaget under in-situ oprensningen generelt har vist et lavere koncentrationsniveau end prøver udtaget i forbindelse med gravearbejdet i 1996. Årsagen til den faldende koncentration kan være at prøverne udtaget i forbindelse med gravearbejdet er udtaget i kraftigt forurenede områder i gravefronten, og dermed ikke er repræsentative for forureningsniveauet i område I, II og III.

Der synes ikke at være tendens til faldende kulbrinteindhold i jorden under oprensningen.

Det vurderes derfor, at det ikke er dokumenteret at den elektrokemiske oprensning har nedbragt koncentrationsniveauet.

C.6 Forsøgsprojekt 6

Historik

Der har været drevet servicestation fra ejendommen i perioden fra 1969 til 1995 med tilhørende detailsalg af benzin og dieselolie.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i området beskrives således:

Øverst findes et fyldlag på ca. 3 meter, bestående af sand, muld, ler og sten. Under fyldlaget træffes primært moræneler med enkelte indslag af smeltevandssand 2,0 til 3,5 m.u.t.

Der er truffet sekundært grundvand på ejendommen ca. 2,5-4,0 m.u.t. Det primære grundvandsmagasin er spændt og beliggende i kalkaflejringerne ca. 14 m.u.t. Magasinet er spændt med et trykniveau ca. 3-4 m.u.t.

Forureningssituation

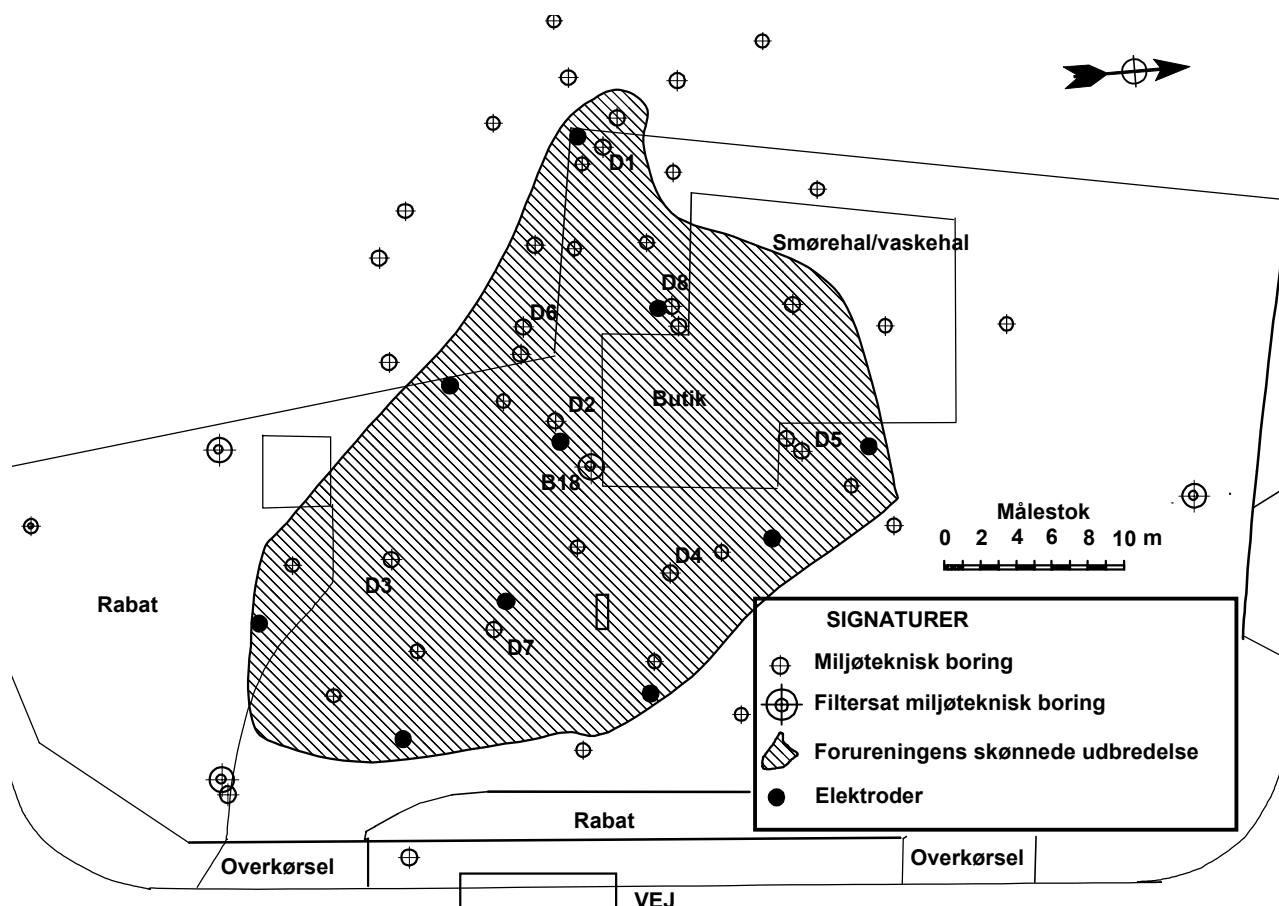
Der er konstateret en omfattende jord- og grundvandsforurening på ejendommen, primært bestående af benzin. I alt vurderes der at være ca. 3.400 m³ forurenet jord i området. Forureningen er beliggende fra ca. 1,0 m.u.t., og forureningen har i det kraftigst forurenede område en vertikal udbredelse ned til ca. 7-11 m.u.t. Forureningen er delvist beliggende under bygninger, og en del af forureningen har endvidere bredt sig til nabomatrikler. I alt er der før opstarten af den elektrokemiske oprensning vurderet at være ca. 10.000 liter benzin i området.

Der er før opstarten af den elektrokemiske oprensning konstateret grundvandsforurening i det sekundære grundvand på 8,2 mg/l. Endvidere er der konstateret mindre indhold af kulbrinter og MTBE i det primære magasin.

In-situ anlæg

Anlægget til elektrokemisk oprensning af ejendommen er opbygget af 10 spunsjern med en indbyrdes afstand på 7-15 meter, nedrammet til ca. 12 m.u.t. Elektroderne blev tilkoblet en strømforsyning med seks kanaler. In-situ oprensningen blev opstartet i december 1997 og blev indstillet efter ca. 1½ års drift.

Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.12.



Figur C.14:
Situationsplan for forsøgsprojekt 6.

Monitering

Før opstarten af den elektrokemiske oprensning er der konstateret benzin-koncentrationer på op til 2.670 mg/kg TS i det forurenede område.

Under oprensningen er der foretaget syv prøvetagningsrunder, hvor udviklingen i jordforureningen er bestemt ved otte monitoringsboringer, benævnt D1 til D8 på situationsplanen i figur C.14.

Grundvandskoncentrationen i boring B18, filtersat i det sekundære grundvand er monitoreret under oprensningen. Der er konstateret betydelig variation i grundvandskoncentrationen af totalkulbrinter, BTEX'er og MTBE i boringen, der kun har en meget begrænset vandtilstrømning.

Der er i lighed med de øvrige forsøgsprojekter, som indgår i erfaringsopsamlingen konstateret en betydelig variation for sammenlignelige jordprøver udtaget ved samme boring og i samme dybde til forskellige tidspunkter. Der har derfor ikke kunnet konstateres en entydig tendens i koncentrationsudviklingen under oprensningen.

I tabel C.1 er, for hver prøvetagningsrunde, angivet antallet af boringer i det forurenede område, prøveantallet og prøvetagningsmetoden. I tabellen er endvidere angivet den gennemsnitlige og maksimale forureningskoncentration af kulbrinter, for hver prøvetagningsrunde. Jordprøverne er enten udtaget som blandingsprøver eller punktprøver i forskellige dybder.

Tabel C.1*Analyseresultater af totalkulbrinter for forsøgsprojekt 6.***= Prøver udtaget som blandingsprøver.*

Prøvetagnings- tidspunkt	Antal boringer	Antal prøver	Middel kulbrinte konc. mg/kg TS	Max. konc. mg/kg TS
Før opstart	11	21	351	2.670
Marts 1998	8	15	137	750
April 1998*	3	6	386	750
Juni 1998*	5	15	747	2.700
August 1998*	8	26	798	7.500
December 1998	5	20	283	2.000
Januar 1999	5	14	125	600
Juni 1999	8	19	227	830

Oprensningseffekt, jord

På grund af forskelle i prøvetagningsmetoden, antallet af boringer og prøveudvælgelsen er de enkelte datasæt for prøvetagningsrunderne ikke umiddelbart sammenlignelige. Gennemsnitskoncentrationen giver dog et indtryk af forureningsniveauet, konstateret ved hver enkelt prøvetagningsrunde.

Samlet vurderes det, at der har ikke kunnet dokumenteres en effekt af den elektrokemiske oprensning. Efter ca. 1½ års drift er der fortsat konstateret indhold af benzin væsentligt over jordkvalitetskriterierne. Da der således ikke umiddelbart var udsigt til at kunne afslutte den elektrokemiske oprensning blev det valgt at indstille den.

C.7 Forsøgsprojekt 7

Historik

Der er konstateret en sammenhængende jordforurening på to ejendomme. Den ene ejendom har tidligere været anvendt som servicestation og nabo-ejendommen har været anvendt som oliedepot frem til 1983. Det tidligere oliedepot ligger i dag ubenyttet hen, og nabo-ejendommen anvendes i dag til værksted og beboelse.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske boreriger kan de lokale geologiske forhold i området beskrives således:

Øverst findes et fyldlag bestående af sand, muld og sten, med en mægtighed på ca. 0,5-4,5 meter. Under fyldlaget træffes vekslende lag af moræneler samt smeltevandssand og -grus.

Der er truffet sekundært grundvand ca. 3,0 m.u.t. På baggrund af pejlinger vurderes der at være et lokalt maksimum i grundvandspotentialet på ejendommen. Strømningsretningen vurderes dels at være nordvestlig og dels sydøstlig.

Forureningssituationen

Der er konstateret en omfattende jord og grundvandsforurening på ejendommen. Forureningen består overvejende af en diesel/fyringsolie. På den tidligere servicestation er der endvidere konstateret benzinforurening. Forureningen er beliggende a. 0,5-5,0 m.u.t. I alt er der før opstarten af den elektrokemiske oprensning vurderet at være ca. 4.400 m³ forurenede jord i området, bestående af 5-8.000 liter dieselolie og 1.000-2.000 liter benzin.

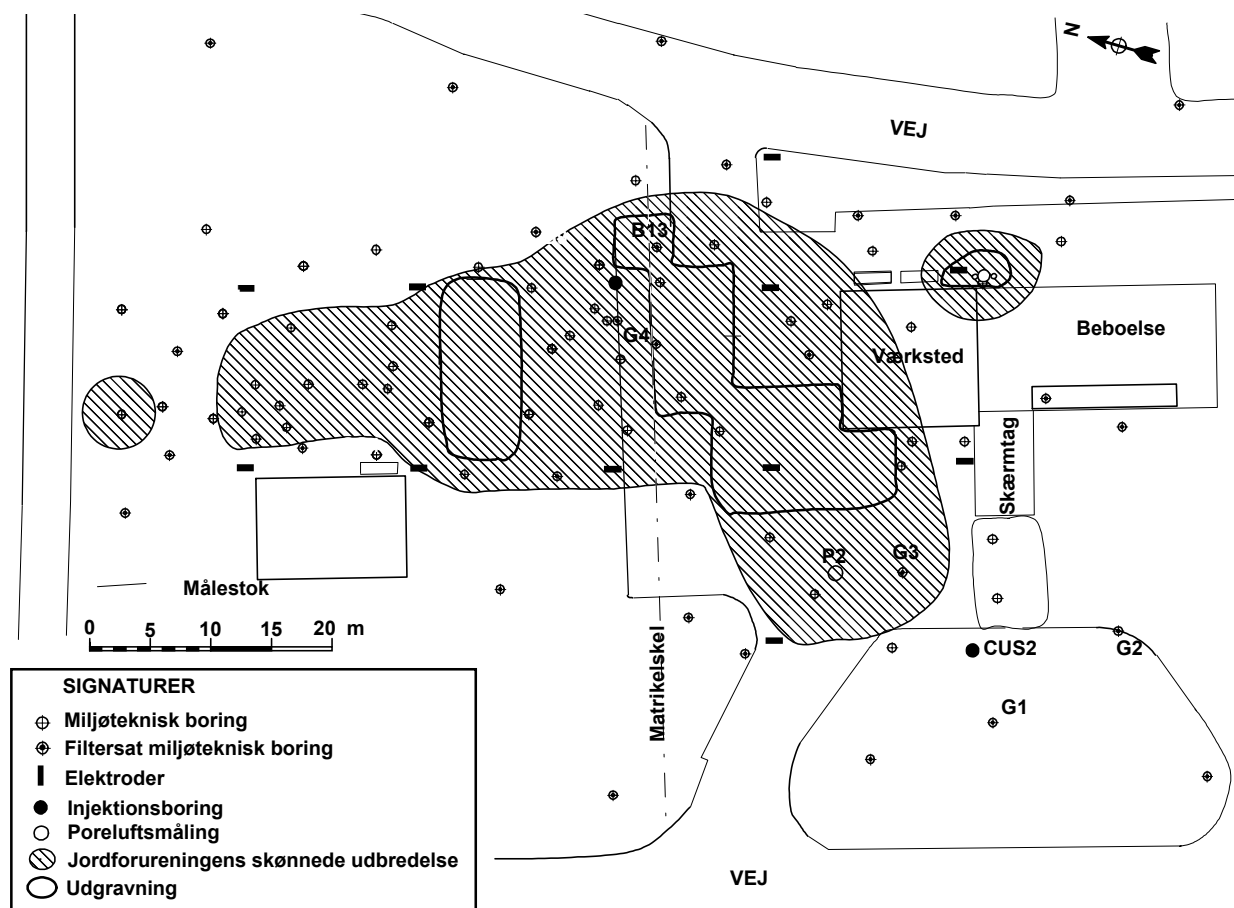
In-situ anlæg

Anlægget til elektrokemisk oprensning af ejendommen blev opbygget af 13 elektroder, bestående af spunsjern nedrammet til ca. 6 m.u.t. Elektroderne blev etableret med en indbyrdes afstand på ca. 12-15 meter. I forbindelse med to af elektroderne etablerede entreprenøren endvidere to brønde til injektion af CO₂ under grundvandsspejlet. Elektroderne blev parvis tilkoblet en strømforsyning. Der blev under oprensningen anvendt en spænding på ca. 60-120 V mellem hvert elektrodepar. Det er på et tidspunkt observeret, at spændingsniveauet tilsyneladende var afpasset efter jordmodstanden således at en strømydelse på ca. 6-8 ampere blev opnået. Oprensningen blev igangsat i december 1997.

Andre afværgetiltag

Før opstarten af den elektrokemiske oprensning blev tanke, rørføringer og én olieudskiller med relation til detailsalget opgravet og bortskaffet. I forbindelse med gravearbejdet blev der endvidere opgravet og bortskaffet ca. 1.200 tons kraftigt forurenede jord.

Jordforureningens skønnede udbredelse og elektrodernes placering fremgår af figur C.12.

**Figur C.15**

Situationsplan for forsøgsprojekt.

Monitering, jord

Før opstarten af den elektrokemiske oprensning er der konstateret gasolie-koncentrationer på op til 8.100 mg/kg TS i det forurenede område.

Under oprensningen er der udført fire prøvetagningsrunder til beskrivelse af oprensningen, efter hhv. 2, 3, 8 og 11 måneders drift af anlægget. Ved de to første prøvetagningsrunder er der udført 4-5 boringer og ved de to sidste prøvetagningsrunder er der udført 10-12 boringer i det forurenede område. Ved de tre sidste prøvetagningsrunder er prøverne udtaget som blandingsprøver over 0,5-1,0 meter. De øvrige prøver er udtaget som punktprøver.

Da prøvetagningsprogrammet ikke er opstillet med henblik på statistisk at kunne påvise en evt. massefjernelse, og da der er konstateret betydelige variationer i sammenlignelige prøver udtaget ved samme boring, i samme dybde, har der ikke kunnet konstateres en entydigt tendens i koncentrationsudviklingen.

I tabel C.2 er angivet antallet af boringer udført i det forurenede område, samt den højeste konstaterede forureningskoncentration og gennemsnitskoncentrationen ved hver prøvetagningsrunde. Jordprøverne blev udvalgt på baggrund af højeste PID-udslag (én pr. boring).

Tabel C.2.

Analyseresultater for forsøgsprojekt 7. *= Prøver udtaget som blandingsprøver.

Prøvetagnings-tidspunkt	Antal boringer/prøver	Middelkoncentration mg/kg TS	Max. koncentration mg/kg TS
Før opstart	20/20	2.291	8.100
Februar 1998	5/5	1.674	6.800
Marts 1998*	4/4	333	530
August 1998*	12/12	1.086	2.500
November 1998*	10/10	1.891	6.500

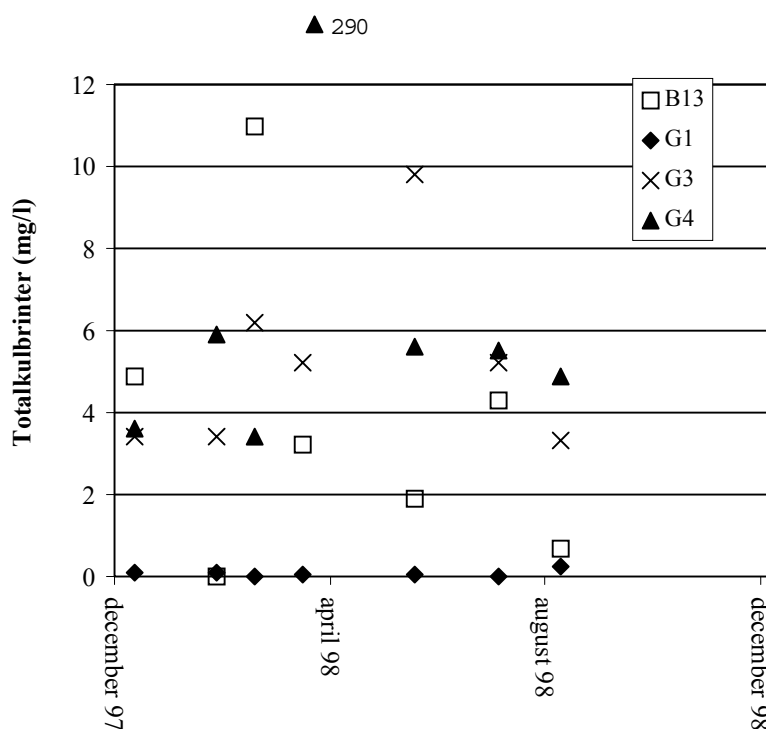
Oprensningseffekt, jord

På grund af forskelle i prøvetagningsdybder, antallet af boringer og prøvetagningsmetoden er de enkelte datasæt for prøvetagningsrunderne ikke umiddelbart sammenlignelige. Gennemsnitskoncentrationer og den højeste konstaterede koncentration giver derfor kun et billede af forureningsniveauet, ved hver enkelt prøvetagningsrunde.

Ved sidste prøvetagningsrunde er der konstateret et forureningsniveau væsentligt over de fastsatte oprensningskriterier og på niveau med forureningsniveauet før opstarten af den elektrokemiske oprensning.

Monitering, grundvand

Analyseresultaterne for grundvandsprøver udtaget i fire boringer i det forurenede område under oprensningen fremgår af figur C.16.

**Figur C.16:**

Analyseresultater fra boring G1, G3, G4 og B13.

Oprensningseffekt, grundvand

Som det fremgår af figur C.16 er der i de to kraftigt forurenede boringer G3 og G4 samt i boring G1 ikke er konstateret et fald i grundvandskoncentrationen under oprensningen. I boring B13 er der ved sidste prøvetagningsrunde konstateret et lavere indhold af kulbrinter end før opstarten af den elektrokemiske oprensning. Der er konstateret betydelig variation i forureningskoncentrationen under oprensningen, hvilket bl.a. kan skyldes injektionen af CO₂ samt variationer i grundvandsstanden.

Det vurderes på baggrund af ovenstående, at der ikke har kunnet dokumenteres en reduktion af grundvandskoncentrationerne.

Der er foretaget en række poreluftmålinger på ejendommen, primært under beboelsen og i P2. Der er konstateret betydelige variationer i indholdet af kulbrinter i poreluften under oprensningen. I poreluftstationen P2 er der konstateret koncentrationer af totalkulbrinter fra 0-220.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der har ikke kunnet konstateres en entydig udvikling i poreluftmålingerne.

Grundvandskemi

Der er foretaget en række grundvandskemiske analyser på lokaliteten. Der er således udtaget grundvandsprøver til boringskontrolanalyse under oprensningen i boring G3 og G4, og der er foretaget feltmålinger af ilt og pH i boring G1, G3, G4 og B13.

Der er konstateret reducerede forhold i alle boringer placeret i det forurenede område. Der er ikke konstateret signifikante ændringer i den grundvandskemiske sammensætning, herunder ilt- og pH-forholdene under oprensningen. Den relativt svage jævnspænding, anvendt under oprensningen, vurderes derfor ikke at have påvirket de grundvandskemiske forhold væsentligt.

Kimtal

Der er foretaget kimtalsmålinger af jordprøver før og under oprensningen. Prøverne er udtaget 3,5 m.u.t. i boring P1 og P2. Bakterieantallet er bestemt aerobt til $1\text{-}32\cdot 10^5$ cfu/g, mens bakterieantallet anaerobt er bestemt til $1\text{-}63\cdot 10^3$ cfu/g. Der har ikke kunnet konstateres en entydig udvikling i kimtalsmålingerne.

Korrosionsrisiko

Der er udført en vurdering af risikoen for korrosion på nedgravede installationer som følge af den elektriske jævnspænding. Vurderingen er udført af FORCE-instituttet på baggrund af målinger af potentialefelter i jorden, potentialeændringer på nedgravede genstande, samt en simuleret korrosionsmåling på en vandstikledning, placeret midt i det elektriske felt.

På lokaliteten blev korrosionsrisikoen vurderet til at være reduceret meget væsentligt i en afstand af ca. 30 meter fra elektroderne. Spændingsfaldet varierede fra 58 til 120 V mellem sammenhørende elektroder under udførelsen af potentialemålingerne. Inden for 30 meter vurderes det, at risikoen for tæring er væsentlig, især for ubeskyttede eller dårligt korrosionsbeskyttede installationer, og at der må påregnes en betydelig levetidsforkortelse for installationer af ovennævnte type.

C.8 Forsøgsprojekt 8

Historik

I perioden fra før 1939 til 1990 har der været drevet købmandsforretning med detailsalg af benzin og dieselolie fra ejendommen. Ejendommen anvendes i dag til beboelse.

Geologi og hydrogeologi

På baggrund af de udførte miljøtekniske borerer kan de lokale geologiske forhold i området beskrives således:

Øverst findes et fyldlag på ca. 1,5-2 meter, primært bestående af sand med indhold af grus, silt og ler. Under fyldlaget træffes stærkt siltede sandaflejringer med indslag af ler til minimum 4 m.u.t.

Der er truffet sekundært grundvand på ejendommen ca. 2 m.u.t. Strømningsstrømningen vurderes som sydøstlig.

Forureningssituation

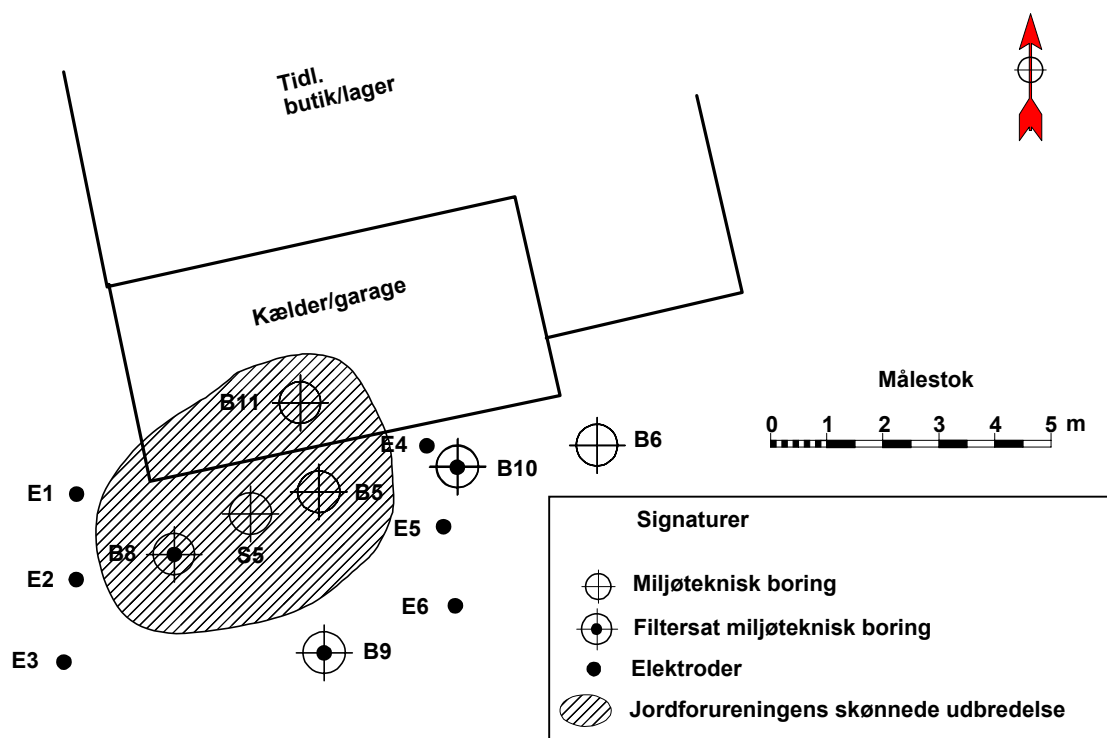
Forureningen, der er forsøgt oprenset via den elektrokemiske metode, er konstateret ved et tidligere tankanlæg til benzin. Forureningen er beliggende ca. 1,5-3,0 m.u.t. I alt vurderes forureningen at udgøre ca. 30 m³. Forureningen er delvist beliggende under et garageanlæg.

Der blev inden starten af den elektrokemiske oprensning påvist benzinkoncentrationer på op til ca. 8.000 mg/kg TS. Forureningen bestod primært af benzin, men der blev også konstateret mindre indhold af gasolie og tjærekomponenter. Antages gennemsnitskoncentrationen at være 4.000 mg/kg TS vurderes der at være ca. 250 liter benzin i området.

In-situ anlæg

Det etablerede anlæg til elektrokemisk oprensning af ejendommen blev opbygget af 6 nedrammede jernrør, tilkoblet en strømforsyning. Strømforsyningen blev drevet af et solcelleanlæg, bestående af syv seriekoblede solcellepaneler. Den elektriske spænding fra solcelleanlægget kendes ikke, men har kunnet variere mellem 0 og 119V, afhængigt af solindstrålingen. Den samlede driftsperiode for anlægget udgjorde ca. 21 måneder, med opstart i juli 1997.

Placeringen af elektroder i forhold til det forurenede område fremgår af figur C.17. Elektroderne E1-E3 har været anvendt som anoder, mens E4-E6 har været anvendt som katoder.

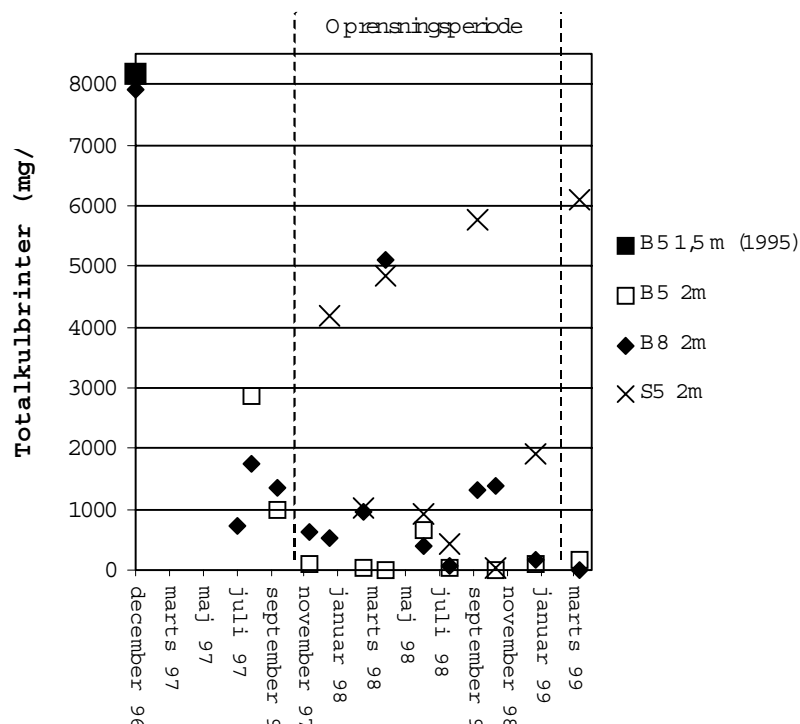


Figur C.17:
Situationsplan for forsøgsprojekt 8.

Monitering

Før oprensningen blev igangsat er der konstateret grundvandsforurening i boring B10 på 1,33 mg/l. Grundvandsforureningen er ikke monitoreret under oprensningen.

Udviklingen i koncentrationen af olieprodukter i jorden lige omkring det sekundære grundvandsspejl, 2,0 m.u.t., er løbende monitoreret under oprensningen ved boring B5, B8 og S5. Analyseresultaterne fremgår af figur C.18.



Figur C.18:

Analyseresultater fra boring B5, B8 og S5.

Oprensningseffekt, jord

Det fremgår af analyseresultaterne, at der i de tre målestationer er konstateret betydelige variationer i forureningskoncentrationen i de enkelte målestationer, hvilket gør det vanskeligt at vurdere oprensningens effekt. Årsagen til de varierende analyseresultater vurderes primært at være jordens inhomogene struktur.

Det fremgår af figur C.18, at der ved forsøgsprojektets afslutning fortsat er konstateret benzinkoncentrationer på op til 6.100 mg/kg TS i boring S5. Indholdet af BTEX'er er endvidere på samme niveau som før oprensningen blev igangsat. Samlet set vurderes der ikke at være dokumenteret en effekt af den elektrokemiske oprensning.