

Miljøprojekt Nr. 480 1999

Airsparging og vakuumventilation fra vandrette boringer på Drejøgade 3-5 : Design og anlæg

Lisbeth Walsted og Anders G. Christensen

NIRAS

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

	Sammenfatning	7
	Summary	11
1	Indledning	15
1.1	Baggrund	15
1.2	Formålet med teknologiudviklingsprojektet	15
1.3	Rapportens opbygning og afgrænsning	15
2	Lokalitet og forureningssituation	17
2.1	Historik	17
2.2	Geologi og hydrogeologi	18
2.3	Forureningsudbredelse	19
2.4	Risikovurdering og afværgekoncept	20
3	Teknologiudviklingen i afværgeprojektet	23
3.1	Formål	23
3.2	Aktiviteter i relation til teknologiudviklingsdelen	23
4	Detailprojekteringsfasen	25
4.1	Dimensioneringsgrundlag	25
4.1.1	<i>Jordfysiske parametre</i>	25
4.1.2	<i>Jordventilationstest</i>	27
4.1.3	<i>Airsparging-test</i>	30
4.1.4	<i>Dimensionering af jordentilationssystemet</i>	33
4.1.5	<i>Dimensionering af airspargingsystem</i>	36
4.1.6	<i>Moniteringsboringer</i>	38
4.2	Vandrette boringer	41
4.2.1	<i>Boremetode</i>	41
4.2.2	<i>Filterdesign</i>	43
4.2.3	<i>Filterinstallation</i>	44
4.3	Behandlingsanlæg og SRO	45
4.4	Drifts- og monitoringsprogrammer	49
4.4.1	<i>Anlægsovervågning</i>	49
4.4.2	<i>Grundvandsmonitering</i>	49
4.4.3	<i>Poreluftmonitering</i>	50
5	Anlægsfasen	51

5.1	Moniteringsboringer	51
5.2	Vandrette boringer	52
5.3	Behandlingsanlæg og SRO	56
5.4	Bygherretilsyn	57
6	Resultater	59
6.1	Potentialeforhold	59
6.2	Jordforurening	60
6.3	Poreluftforurening	61
6.3.1	<i>Omfang og databearbejdning</i>	<i>61</i>
6.3.2	<i>Totalkulbrinter (oliekomponenter)</i>	<i>61</i>
6.3.3	<i>Chlorerede opløsningsmidler</i>	<i>63</i>
6.4	Grundvandsforurening	65
6.4.1	<i>Omfang og databearbejdning</i>	<i>65</i>
6.4.2	<i>Totalkulbrinter (oliekomponenter)</i>	<i>65</i>
6.4.3	<i>Chlorerede opløsningsmidler</i>	<i>68</i>
6.4.4	<i>Naturlig nedbrydning af oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler</i>	<i>70</i>
6.5	Respirationsrater i umættet zone	73
7	Økonomi	75
7.1	Detailprojektering	75
7.2	Anlægsfasen	75
7.3	Forventede driftsudgifter	75
8	Referencer	77

Appendix

- Appendix 1 Procedure for opskalering af in-situ jordventilationstest på vertikale til horisontale boringer
- Appendix 2 Eksempel på borejournal
- Appendix 3 On-line monitoring på behandlingsanlæg
- Appendix 4 Disposition for drifts- og vedligeholdelsesmanual - behandlingsanlæg
- Appendix 5 Poreluft. Sammenfatning af feltmålinger og laboratorieanalyser
- Appendix 6 Grundvand. Sammenfatning af feltmålinger og laboratorieanalyser
- Appendix 7 Grundvand. Sammenfatning af analyseresultater med henblik på vurdering af nedbrydningsprocesser
- Appendix 8 Beskrivelse af procedure for design af airspargingfiltre

Sammenfatning

Baggrund

Baggrunden for teknologiudviklingsprojektet er, at Miljøstyrelsen som led i uddelegering af depotmidler til amterne har iværksat udviklingsprojekter til belysning af forskellige oprensningsteknologier. Denne rapport redegør for teknologien, hvor kombineret airsparging og vakuumventilation fra vandrette borer er etableret ved "blind hole" teknik, en teknik, som til dato ikke har været afprøvet i den givne målestok og til det konkrete formål i Danmark.

Rapporten udgør 1. delrapport af en samlet afrapportering af projektet. I forlængelse af nærværende rapport udarbejdes dels statusrapporter (for driftsfasen), dels udarbejdes afslutningsvist en samlerapport, hvori der redegøres for projektets samlede driftsdata og driftsøkonomien.

Formål

Formålet med teknologiudviklingsprojektet er på et højt fagligt niveau at fastlægge dimensioneringsparametre for airsparging- og vakuumventilationsdelen, samt at fastlægge nødvendigt omfang af monitoringsprogram for projektets forskellige faser, dvs. indkøring-, drifts samt sluddokumentationsfasen. På baggrund af opnåede erfaringer udarbejdes afslutningsvist retningslinier for dimensionering, drift og afslutning for afværgeanlægget, ligesom "blind-hole" teknikens egnethed på den aktuelle projektlokalitet, Drejøgade 3-5 på Østerbro (København) vurderes.

Rapporten

Rapporten redegør for følgende forhold:

- Beskrivelse af projektlokaliteten
- Supplerende forureningsbeskrivelse ("Baseline Study") inden oprensning påbegyndes
- Fastlæggelse af dimensioneringsgrundlag
- Detailprojektering samt erfaringer fra anlægsfasen
- Økonomiske nøgletal

Projektlokaliteten

På lokaliteten har der i perioden 1900-1975 været forskellige renseri- og farveriaktiviteter med anvendelse af terpentiner samt chlorerede opløsningsmidler. Grunden er på ca. 7000 m² og de tidligere fabriksbygninger er nu nedrevet og erstattet af et plejehjem. Der er ved de indledende undersøgelser påvist et forhøjet indhold af PCE (tetrachlorethylen) i indeluft samt i poreluft umiddelbart under gulvene, og det er udfra en risikovurdering anbefalet at etablere afværgetiltag.

Baseline Study

Der er udført en detaljeret hydrogeologisk og kemisk karakterisering af lokaliteten inden oprensningen. I forbindelse hermed er der etableret 15 permanente monitoringsboringer med niveauspecifikke filtre i den umættede zone og i grundvands zonen. Der er overvejende påvist smeltevandssand til mindst 15 meter under terrænen, med enkelte indslag af moræneler terrænnært. Et frit grundvandsspejl er påvist ca. 8,5 m.u.t. I poreluften er der påvist op til ca. 15-20 g/m³ af både terpentinerkomponenter og chlorerede opløsningsmidler totalt. Ved respirations forsøg er den aerobe nedbrydningsrate for terpentinerkomponenterne i den umættede zone målt til ca. 5-10 mg/kg jord/døgn. I grundvandet er der påvist terpentinerkomponenter i koncentrationer op til ca. 18 mg/l og et totalindhold af chlorerede opløsningsmidler på op til 4 mg/l. Af de chlorerede opløsningsmidler udgøres hovedandelen af PCE

(tetrachlorethylen) og i mindre grad af TCE (trichlorethylen). De geokemiske data indikerer, at der sker en betydelig transformation af specielt de chlorerede opløsningsmidler. Således er der i enkelte filtre konstateret høje koncentrationer af TCE's nedbrydningsprodukter.

Dimensioneringsgrundlag

Ud fra de to gennemførte vakuumventilationstests, er der beregnet en horisontal luftpermeabilitet på ca. 10 Darcy i smeltevandssandet, og ved brug af numeriske modeller er det resulterende strømningsmønster omkring pumpeboringen beregnet. Opskalering fra vertikale- til horisontal borer er foretaget med udgangspunkt i de gennemførte vakuumventilationstests og er verificeret med en numerisk model. På grund af forureningsfordelingen på grunden, er det nødvendigt at sektionere hvert vandret filter i to dele. I området med primært terpentinfurening, er der dimensioneret efter ca. 5000 porevolumen (PV) udskiftninger over oprensingsperioden på 2 ca. år. Tilsvarende er der dimensioneret med 1500 PV i området med primært chlorerede opløsningsmidler.

Ved de to airsparging test, er der fastlagt et formationsmodtryk på ca. 0,15 Bar og en effektiv virkningsradius på ca. 3-5 m. Det nødvendige antal lodrette airspargingboringer er herefter beregnet, og herudfra er det ækvivalente antal vandrette borer skønnet. Som for vakuum-ventilations-filtrene er der ligeledes foretaget en sektionering af de vandrette filtre, afhængig af forureningsfordelingen. Ud fra de gennemførte test er det endvidere vurderet, at en driftscyklus på ca. 8 timer, med 4 timers injektion efterfulgt af 4 timers retablering, muligvis vil kunne øge oprensningseffekten og samtidig give en driftsøkonomisk besparelse.

Detailprojektering samt erfaringer fra anlægsfasen

Rapporten fokuserer primært på indhentede erfaringer opnået som led i installation af de horisontale filtre fra vandrette borer.

I alt 5 horisontale filtre (opbygget med special-designede sektioneringer) blev installeret ca. 6 m.u.t. (vakuumventilation (SVE)) henholdsvis ca. 12 m.u.t. (airsparging (IAS)).

Installationsprocessen blev udført i 2 trin, hvor først et 9" pilothul blev etableret, opfulgt af en indpresning af ø165 PVC-specialfiltre i det åbne pilothul.

Da der under borearbejdet blev påtruffet uforudsete stenformationer, medførte dette, at boring af hvert pilothul typisk varede 10-15 timer, mod forventet 5-7 timer. Da filterindpresning skal udføres straks efter et pilothuls etablering, for dels at minimere risiko for kollaps af det åbne pilothul, dels for at sikre, at indpresning sker i frisk friktionsnedsættende boremudder, måtte genopboring af alle 5 pilothuller udføres. For yderligere at nedsætte friktionsmodstanden under filterindpresningen blev projekterede SVE-filtre med påsvejst filtervæv forkastet til fordel for glatte, slidsede ø165 PVC-filtre uden filtervæv. En anden grund til at forkaste filtre med filterrør var, at disse under et mislykket indpresningsforsøg viste sig at blive revet itu ved passage i et opboret stenholdt pilothul. IAS-filtrene med specielle spargeinserts (filtre) pålimet i hvert udboret ø3 mm hul blev installeret som projekteret.

Navigation af pilothullet blev under borearbejdet udføres med kombineret wireline system og walk-over locator. Selv med dette specialudstyr faldt signalet ud ved boring tæt på armerede betonfundamenter og andet magnetisk ledende. Grundet borestængernes naturlige stivhed blev pilothullets

placering i forhold til projekterede niveau, dog ikke afvejet med mere end max. ± 1 m, i horisontalt plan og mindre end $\pm 0,1$ m i vertikalt plan, selvom dele af borearbejdet blev udført uden kontakt til navigations-udstyret. Dette forhold blev verificeret på baggrund af en udført tryktransducertest i installerede filtre.

I alt 384 lbm filter blev installeret i den 2½ måned lange anlægsfase. En SVE-filtersektion på ca. 30 lbm blev aldrig installeret, da stenhorisonten i det projekterede trace ikke kunne gennembøres.

Selve behandlingsanlægget blev monteret i en 30 fods container, som er opdelt i 2 separate rumafsnit for herved at adskille støjende og kraftigt varme-udviklende installationer fra hovedtavle, GC'er samt to serie-forbundne kulfiltre. Såvel SVE- som IAS-proceslinierne på behandlingsanlægget er traditionelt opbygget, og baseret på en samlet anlægs- og driftsøkonomisk betragtning blev sidekanalblæsere valgt frem for kapselblæsere. På SVE-proceslinierne er monteret en varmeveksler for at køle den ekstraherede poreluft til <40 C°. Med denne nedkøling sikres en god udnyttelse af de aktive kuls adsorptionsevne over for de aktuelle forureningskomponenter. For on-line henholdsvis manuel aflæsning/måling af relevante driftsparametre, tryk, vacuum, temperatur, flow, CO₂, CH₄, O₂, PID m.fl., er alle proceslinierne bestykket med diverse instrumentering.

Som led i den omfattende dokumentation af afværgekonceptets effektivitet udføres on-line analyse af koncentrationen af ekstraheret poreluft dels ved indløb til behandlingsanlægget, dels før, imellem og efter de to kulfiltre. Analyserne udføres på en GC'er, som er udstyret med ECD- og FID-detektorer.

Økonomi

De økonomiske nøgletal for detailprojekterings- og anlægsfasen samt estimat for projektets driftsøkonomi er afslutningsvis præsenteret.

Summary

Background

The Danish Environmental Protection Agency has allocated funds designated for use by the Counties for technology development projects for chemical waste sites. The purpose of the fund is to help finance development projects to clarify different cleanup technologies. This project is one of the projects initiated by the Copenhagen Environmental Inspectorate and jointly financed by Copenhagen City Council and the Danish Environmental Protection Agency in accordance with this fund. This report gives an account of the technology where air sparging and vacuum ventilation techniques are combined by use of horizontal bore holes established by the "blind hole" technique; a technique which to date has not been tested in a relevant size scale or with respect to the real objectives in Denmark.

This report is the first report in a series of reports, which will constitute the collective description of project. In addition to this report, a number of status reports for the operating phase will be prepared and finally a compendium will be produced giving an account of the accumulated operating data and the economics for the operation phase.

Objectives

The objective for the technology development project is to establish and define at a detailed technical level, the dimensions and operating parameters for the utilisation of air sparging and vacuum ventilation. Furthermore, to define the necessary extent of the monitoring program for the different phases of the project, such as the test adjustment phase, the operation phase and the final documentation phase. On the basis of the experience gained, guidelines for the dimensions and operating parameters for the plant and the criteria for termination of the remedial project are to be prepared. An assessment of the suitability of the blind hole technique at the actual locality; Drejøgade in Copenhagen, is to be evaluated.

Report

The report gives an account of the following aspects;

- A description of the project locality.
- A baseline study comprising a supplementary description of the extent of contamination before cleanup is started.
- Definition of the criteria for the dimensions and operating parameters for the plant.
- The detailed project description and a statement concerning experience gained during the establishment of the plant.
- The economic key figures.

Project locality

At the project locality, various dry cleaning and dyeing activities have been carried out in the period from 1900 to 1975. The contaminants present at the site are turpentine and chlorinated solvents. The site is approximately 7000 m² and the two former factory buildings are now demolished and replaced by a nursing home. In the initial investigations, elevated contents of tetrachloroethylene (perchloroethylene - PCE) were measured the indoor air and in the soil air immediately under the floors. On the basis of a risk assessment, it was concluded that remedial actions were required.

Baseline study

A detailed hydrogeological investigation and chemical characterisation of contamination at the locality was carried out before remediation. 15 permanent monitoring wells with screens at different levels were established in the unsaturated and groundwater zones. Predominately glacial melt sand is found to at least 15 m's under ground level with solitary layers of moraine clays close to the ground level. An unconfined aquifer is located at about 8,5 m's under ground level. In the soil air, 15 - 20 mg/m³ of both turpentine and chlorinated solvents have been found. Respiration tests to determine the aerobic degradation rates for the hydrocarbons in turpentine have been determined in the unsaturated zone with rates of about 5 - 10 mg/kg soil /day. In the ground water, concentrations of turpentine hydrocarbons have been determined at levels of about 18 mg/l and a total content of chlorinated solvents of up to 4 mg/l. The main component among the chlorinated solvents is PCE (tetrachloroethylene) and to a lesser extent trichloroethylene (TCE). High concentrations of TCE's degradation products are found in samples from some of the ground water well screens and the geochemical data indicate therefore that there is an appreciable transformation of especially the chlorinated solvents.

Dimensioning of the plant

Based on the results of the vacuum ventilation tests, the horizontal air permeability is calculated to be about 10 Darcy in the glacial sands, and by use of numeric models the resulting flow patterns around the abstraction wells can be calculated. The dimensions for the horizontal wells are derived by numerical models based on the data from the vacuum ventilation tests carried out for the vertical wells. Since the distribution of contamination varies in different areas at the site, it was necessary to section each well water screen in two parts. In the area dominated by the turpentine contamination, the plant is dimensioned to an exchange capacity of 5000 pore volumes (PV) over a cleanup period of about 2 years. Similarly, the area contaminated primarily with chlorinated solvents is dimensioned to an exchange capacity of 1500 pore volumes over two years.

On the basis of the two air sparging tests, the geological formation resistance pressure is estimated to be 0,5 bar and the effective radius of effect is assessed to about 3 - 5 m. The number of vertical air sparging wells necessary for treatment is calculated, and based on this figure the number of equivalent horizontal wells is estimated. To take account of the distribution of contamination, the screens in the air sparging wells are sectioned in the same manner as for the vacuum ventilation wells. On the basis of tests, it is assessed that an operating cycle of about 8 hours comprising a 4 hour injection period followed by 4 hours to reestablishment, will possibly increase cleanup efficiency and give a reduction of operating costs.

Detail project and experience during establishment

The report focuses primarily on the experiences gained during the installation of the horizontal filters.

The 5 horizontal filters were constructed by specially designed sectioning, and had to be installed about 6 m's under ground level for the vacuum ventilation- (SVE) installation; and about 12 m's under ground level for the air sparging installations (IAS).

The installation processes needed to be carried out in two steps, whereby the first step was establishment of the 9" pilot hole, followed by introduction by intrusion of the 165mm diameter PVC special screen in the open pilot hole. An unforeseen complication occurred since the sandy formation also comprised many stones and the drilling of each pilot hole typically took 10 - 15

hours to complete instead of the 5 - 7 hours as expected. As filter introduction needed to be carried out immediately after completion of the pilot holes, partly to minimise the risk of collapse of the open pilot hole, and partly to ensure that the introduction of the screens was carried out in the fresh low friction drilling mud, all wells had to be re-drilled. To further reduce the friction resistance during intrusion of the screens, the planned SVE rods with pre-welded screen materials were replaced to take advantage of the smooth slotted PVC rods without screen materials.

Another reason to replace the pre-welded screens was that these, during a failed attempt at introduction in a drilled, but stony pilot hole, were torn to pieces. IAS screens with special sparging inserts glued to each of the drilled 3 mm diameter holes were installed as planned.

Navigation of the pilot holes during the drilling operations was carried out with a combined wireline system and a walk over locator. But even with this special equipment, the signal reception was poor or lost for wells close to the reinforced concrete foundations. Due to the natural rigidity of the drill rods, the location of pilot holes did not however deviate from the planned locations by more than 1 m in the horizontal plane and less than 0,1 m in the vertical plane. These divergences were confirmed by pressure transducer tests in the installed screens.

384 meters of screens were installed in the 2.5 months long construction phase. A SVE screen section of about 30 meters was however never installed, as it was not possible to drill through the stony horizons in the projected well line.

The treatment plant was installed in a 30-foot container, which was dealt in 2 separate sections to separate the noise generating and heat producing processes from the main control panel, the gas chromatographs and the two serial-coupled active carbon filters.

Both the SVE and the IAS process lines were constructed traditionally. The side channel blowers were chosen instead of the capsule blowers due to a collective assessment of the costs for the establishment of the plant and operational costs. For the SVE process line, a heat exchanger to cool the extracted soil air to $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ was installed. Cooling of the soil air ensured a better utilisation of the activated carbon adsorption capacity for the contaminants. All process lines were constructed with appropriate instrumentation to enable on-line and manual measurements of the relevant operating parameters such as pressure, vacuum, temperature, flow, CO_2 , CH_4 , O_2 , PID etc.

As part of the extensive documentation of the effectiveness of remedial project concept, on-line analyses of the concentration of the extracted soil air, both at the inlet and outlet of the treatment plant, as well as before, between and after the two carbon filters were carried out. The analyses were carried out on gas chromatographs with both ECD and FID detectors.

Economics

The economical key figures for the detailed project planning and construction phase as well as an estimate for the operating costs for the plant are presented in the report conclusions.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Baggrunden for teknologiudviklingsprojektet er, at Miljøstyrelsen i forbindelse med uddelegering af depotmidler til amterne har iværksat en række udviklingsprojekter til belysning af forskellige oprensningsteknologier. Disse er i første omgang tre teknologier: Jordventilation, air-sparging og reaktiv permeabel væg. Herudover er der igangsat et projekt med dampinjicering i kombination med jordventilation, og inden for det næste år forventes flere projekter.

Lokaliteter, hvor udviklingsprojekterne gennemføres, er udvalgt af Miljøstyrelsen efter forudgående prioritering af amterne, DSB og Forsvaret samt private bygherrer. Ud fra en vurdering af grundenes geologi og forureningssituation er der prioriteret en række grunde til projekterne.

Dette projekt er relateret til en oprensning, hvor der er foreslået en kombineret airsparging og jordventilationsløsning. Projektet fokuserer i lige grad på airsparging og jordventilation, da der i det aktuelle projekt er en kobling af disse to teknologier.

1.2 Formålet med teknologiudviklingsprojektet

Det overordnede formål med teknologiudviklingsprojektet er for airsparging og jordventilation at:

- dokumentere metoderne under danske forhold
- fastlægge dimensionsgivende parametre
- fastlægge det nødvendige monitoringsprogram til drift og indkøring
- fastlægge det nødvendige monitoringsprogram til afslutning af en sådan oprensning
- udarbejde retningslinier for dimensionering, drift og afslutning af sådanne oprensninger, der kan anvendes af bygherrer, myndigheder og rådgivere

1.3 Rapportens opbygning og afgrænsning

Rapportopbygning

I rapportens kapitel 1-3 beskrives baggrunden for og omfanget af teknologiudviklingsdelen relateret til afværgeprojektet. Ligeledes resumeres informationer om historik, geologi, forureningsudbredelsen samt den gennemførte risikovurdering, alt baseret på de gennemførte forureningsundersøgelser.

Detailprojekteringsfasen

I rapportens kapitel 4 beskrives gennemførte aktiviteter omkring ventilations- og airspargingstest samt dimensionering af det samlede afværgekoncept med vandrette filtre. Endvidere beskrives specifikationerne for de

vandrette boringer/filtre, herunder forhold omkring selve borearbejdet. Endelig beskrives behandlingsanlægget og SRO-overvågning, samt forhold vedrørende drifts- og monitoringsprogrammer.

Anlægsfasen

Rapportens kapitel 5 beskriver de gennemførte anlægsarbejder, herunder etablering af monitoringsboringer, vandrette afværgeboringer samt behandlings- og SRO-anlæg. Dette afsnit har karakter af en erfaringsopsamling for anlægsfasen.

Resultater/Baseline Study

I rapportens kapitel 6 beskrives resultaterne af det gennemførte ”Baseline Study”, der omfatter en detaljeret beskrivelse af forureningsudbredelsen baseret på det etablerede net af nye monitoringsboringer. Endvidere er nedbrydningsprocesser i både mættet og umættet zone beskrevet, idet disse processer forventes at have betydning for oprensingsforløbet.

Afgrænsning

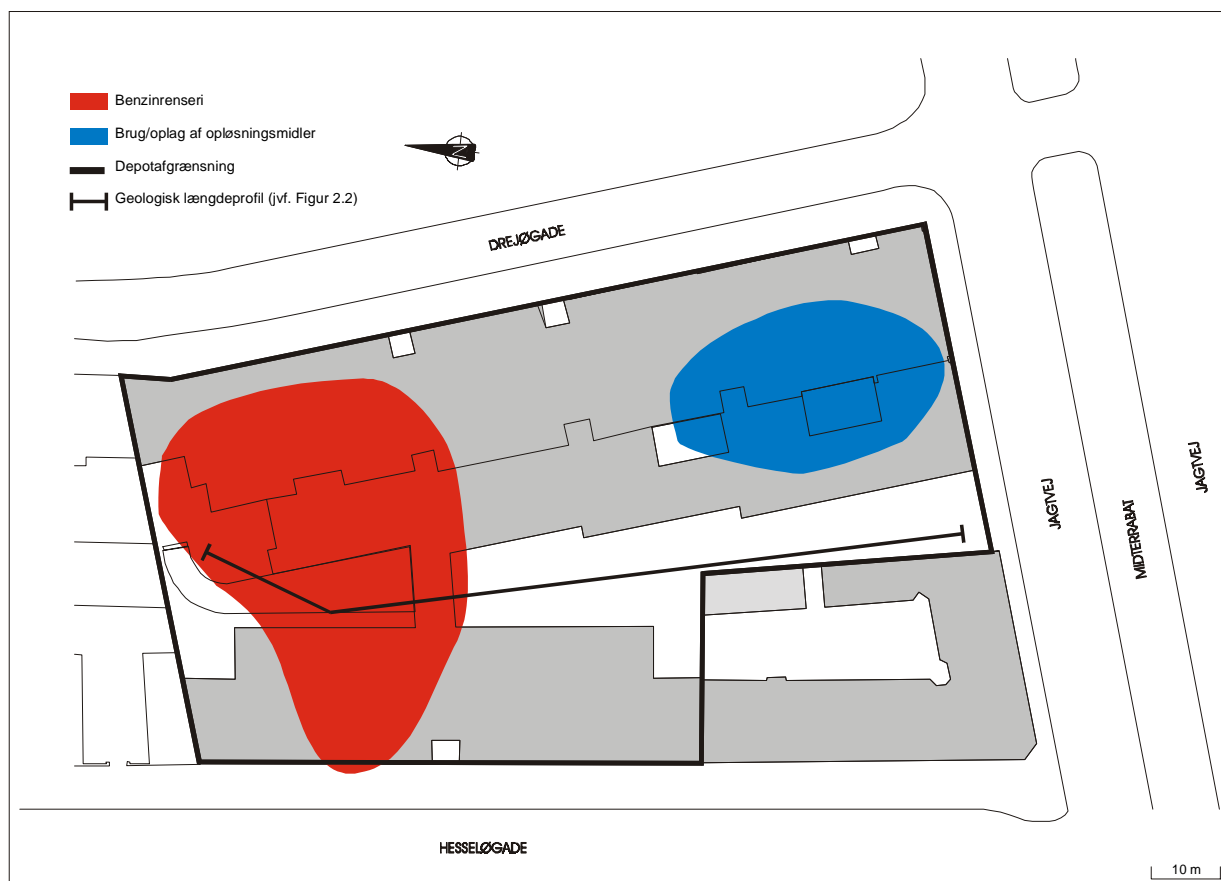
Denne rapport's formål er ikke at redegøre for hvordan jordventilations- og airspargingsystemer designes og installeres. Det er i stedet søgt at beskrive specielt designprocessen og hvilke valg, der er foretaget på den aktuelle sag.

I denne delrapport er der ikke medtaget monitoringsresultater efter anlæggets start. Disse resultater vil løbende blive afrapporteret under oprensingsforløbet som selvstændige statusrapporter for drift og monitoring.

2 Lokalitet og forureningsituation

2.1 Historik

Lokaliteten er beliggende på Østerbro i København og er registreret som affaldsdepot nr. 101-116. Der har på grunden i perioden 1900-1975 været forskellige renseri- og farveriaktiviteter. I forbindelse med disse aktiviteter har der været anvendt opløsningsmidler bestående af dels mineraloliebaserede produkter (terpentin, benzin, petroleum) og dels klorerede opløsningsmidler, primært PCE (tetrachlorethylen). En række potentielt forurenede aktiviteter kan lokaliseres til dele af grunden, jf. figur 2.1. De tidligere fabriksbygninger blev nedrevet i midten af 70'erne, og de nuværende bygninger opført af Københavns Kommune, Ældreforsorgen.

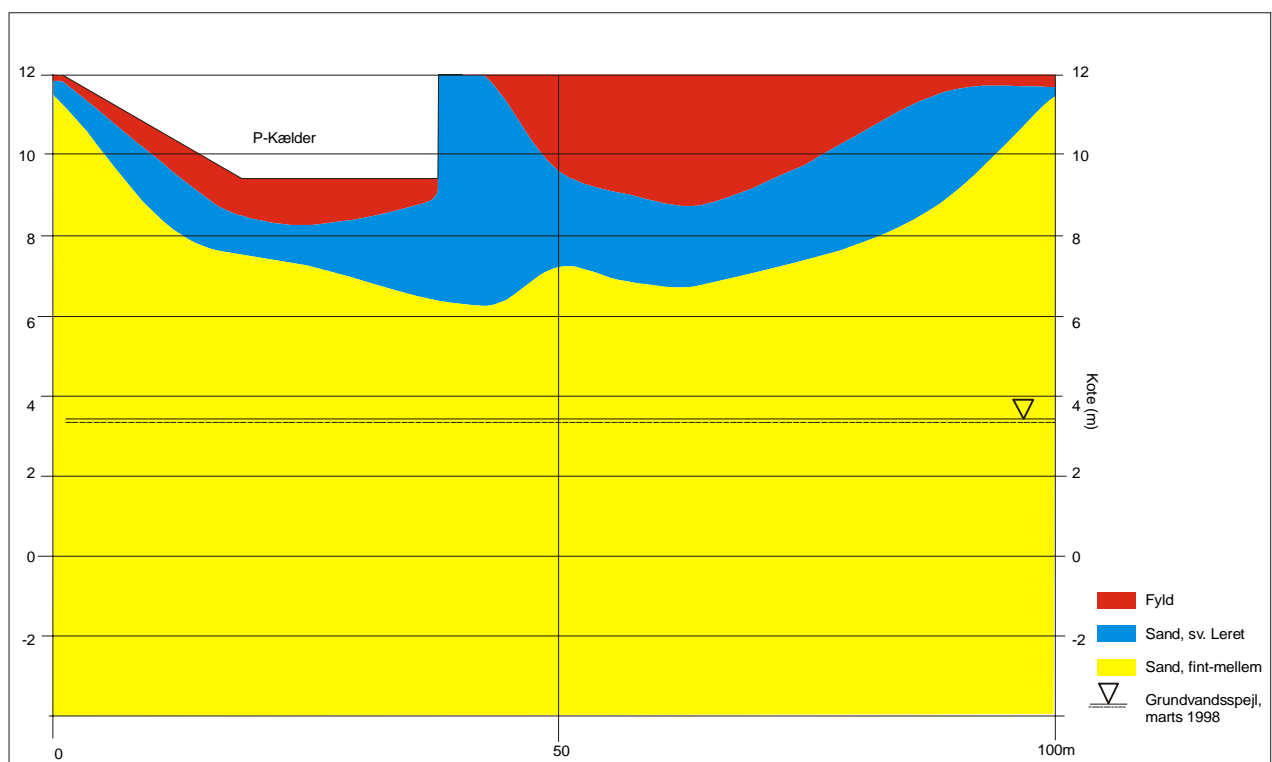


Figur 2.1 Tidligere arealanvendelse og placering af nuværende bygninger

2.2 Geologi og hydrogeologi

Grunden er bebygget med en 5-etages karré-bebyggelse, med P-kælder under den vestlige karré mod Hesseløgade og kælder under en del af Drejøgade karréen. Terrænkoter i området er beliggende omkring kote +12, med kælderniveauet ca. 3-4 m herunder.

Geologien består øverst af et fyldlag med en mægtighed op til ca. 3 m, afhængig af om der er kælder eller ej, jf. figur 2.2. Lokalt, hvor de øverste 1-2 m er intakte, kan der træffes moræneler. Under fyldlaget træffes en relativ homogen smeltevandsaflejring af sand, der fortsætter ned i den umættede zone til kote -4 eller dybere. Sandlaget er svagt leret i den øvre del af den umættede zone, og fint-mellemkornet herunder.



Figur 2.2 Geologisk længdeprofil

Det primære magasin udgøres af smeltevandsaflejringen, der formodes at stå i hydraulisk kontakt med kalken. Magasinet har frit vandspejl og grundvandsspejlet findes i kote ca. +3,5, svarende til ca. 8,5 m.u.t. Den overordnede strømningsretning forventes i øst-sydøstlig retning ud mod Øresund. Der er ikke udført hydrogeologiske detailundersøgelser i området.

2.3 Forureningsudbredelse

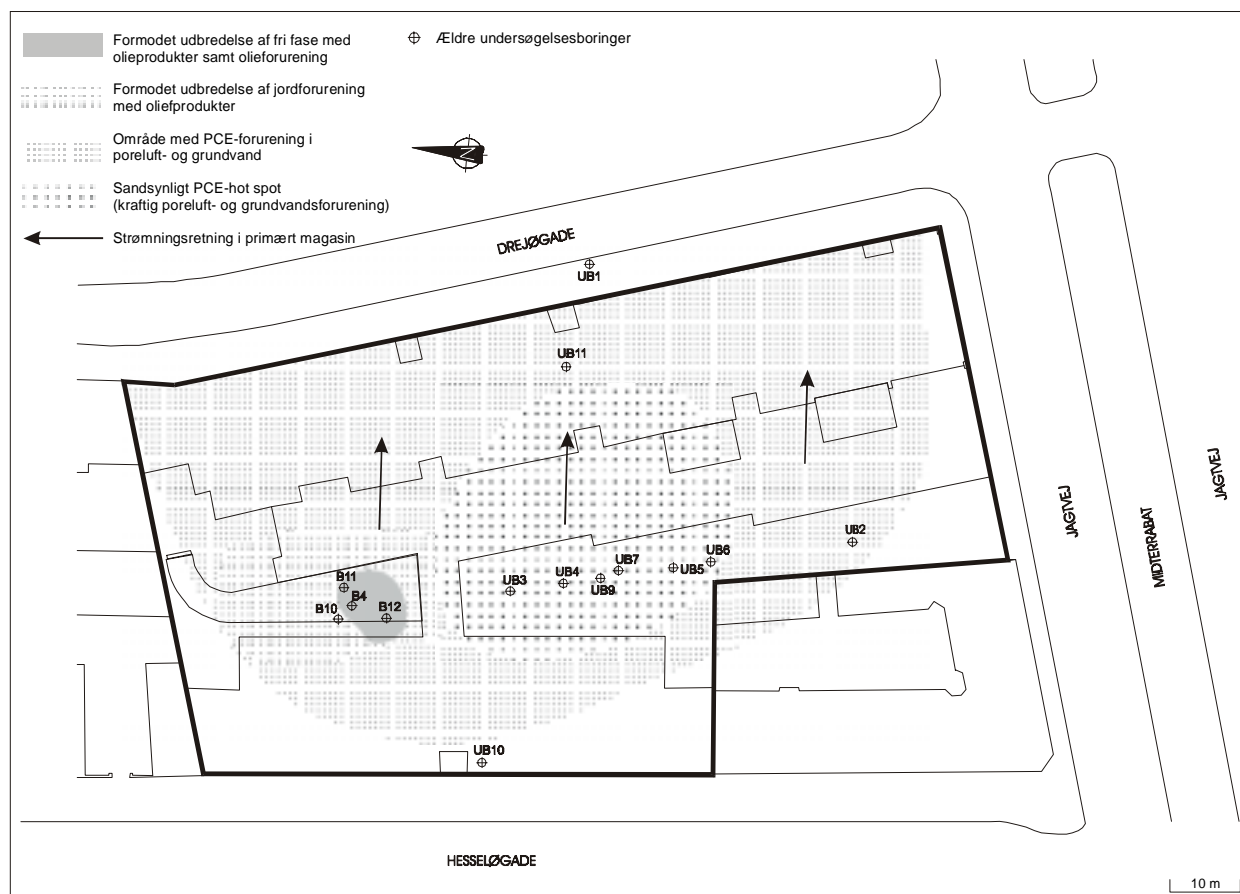
Forureningskomponenter Forureningen på grunden består af dels de chlorerede opløsningsmidler, tetrachlorethylen (PCE) og trichlorethylen (TCE), samt olieprodukter, der i sammensætning kan karakteriseres som terpentin.

Koncentrationsniveauer I tabel 2.1 er vist de maksimale koncentrationer af oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler, der er fundet i forbindelse med forureningsundersøgelserne.

Forureningstype	Fri fase	Jord mg/kg	Grundvand mg/m ³	Poreluft mg/m ³
Olie	+	30.000	150.000	19.000
Chl.opl.midler	-	0,001	180	16.500

Tabel 2.1 Maksimalt påviste koncentrationsniveauer ved forureningsundersøgelser

Forureningsudbredelse Ud fra de gennemførte forureningsundersøgelser, kan forureningen på grunden overordnet inddeles i tre delområder. Udbredelsen af delområderne er skitseret på figur 2.3.



Figur 2.3 Formodt forureningsudbredelse baseret på de indledende forureningsundersøgelser

<i>Olieforurening</i>	På den nordlige del af grunden er der konstateret en kraftig forurening med et terpeninlignende produkt. Centralt i dette område er der påvist en begrænset mængde fri fase terpenin (<20 cm) på grundvandet, se tabel 2.1 og figur 2.3.
<i>Chlorerede opløsningsmidler</i>	På den centrale del af grunden er der konstateret en kraftig forurening med chlorerede opløsningsmidler – primært PCE, der overvejende er konstateret i poreluften og i grundvandet, jf. tabel 2.1 og figur 2.3.
<i>Diffus forurening</i>	På grunden er der påvist en generel forurening med chlorerede opløsningsmidler, primært PCE, i såvel poreluft (1-20 mg/m ³) som i grundvand (1-10 mg/m ³). De generelt lave niveauer kan skyldes spredning ved diffusion og grundvandstransport fra det formodede kildeområde placeret centralt på grunden, jf. figur 2.3.

2.4 Risikovurdering og afværgekoncept

<i>Risikovurdering</i>	Ud fra de gennemførte undersøgelser kan risikovurderingen sammenfattes i følgende hovedkonklusioner.
<i>Indeklima</i>	Der er målt forhøjede PCE-niveauer (≤ 100 mg/m ³) lige under betongulvene i Drejøgade karréen, samt forhøjet PCE-niveau (≤ 65 µg/m ³) i indeluften ved indeklimamålinger. Der er således konstateret en overskridelse af den toksikologiske grænseværdi for PCE (0,25 µg/m ³) på over 100 gange. På baggrund heraf vurderes der at være en uacceptabel risiko for påvirkning af indeklimaet som følge af forureningen med chlorerede opløsningsmidler i den umættede zone, herunder den kapilære zone omkring grundvandsspejlet. Forureningen med olieprodukter vurderes ikke at medføre en uacceptabel påvirkning af indeklimaet.
<i>Grundvand</i>	Der vurderes at være en risiko for yderligere forurening af den primære grundvandsressource som følge af de konstaterede kilder i den umættede zone. Der er dog ingen vandforsyningsinteresser nedstrøms grunden.
<i>Afværgekoncept</i>	Ud fra den gennemførte helhedsvurdering af forskellige afværgekoncepter /ref. 1/, blev det anbefalet at etablere en kombination af jordventilering og airsparging.
<i>Traditionel teknik</i>	Allerede i forbindelse med gennemførelsen af forureningsundersøgelserne blev det vurderet, at det, pga. den høje bebyggelsesgrad, ville være svært/umuligt at udføre en oprensning ved traditionel opgravning eller med lodrette borer.
<i>Vandrette borer</i>	På baggrund af skitseprojekteringen /ref. 1/ blev det derfor valgt at anvende vandrette borer til en evt. in-situ løsning. Efter at have rettet henvendelse til ejeren af nabogrunden stod det klart, at det ikke ville være praktisk muligt at disponere over de ønskede arealer uden for det forurenede område.
<i>”Blind hole” teknik</i>	Derfor blev det besluttet at udføre afværgeboringerne ved en såkaldt ”blind hole” teknik og ikke som normalt ved, at der bores til en modtagergrube, hvorfra filtret så trækkes tilbage mod boreriggen.

”Blind hole” boreteknikken har ikke tidligere været anvendt i Danmark, hvilket giver en række nye perspektiver i relation til in-situ oprensninger under vanskelige adgangsforhold.

3 Teknologiuudviklingen i afværgeprojektet

3.1 Formål

Formålet med det konkrete teknologiuudviklingsprojekt er at vurdere effekten af oprensning ved airsparging kombineret med jordventilation fra vandrette borer over for en blandingsforurening. Vurderingen gennemføres med hensyn til dimensionering, økonomi og eventuelle begrænsninger. Aktiviteterne, der udgøres af en række tiltag, der ligger ud over eller i forlængelse af et traditionelt afværgetiltag, udgør samlet teknologiuudviklingsdelen i projektet. Disse aktiviteter er uddybet i følgende afsnit.

3.2 Aktiviteter i relation til teknologiuudviklingsdelen

<i>Dimensioneringsgrundlag</i>	<p>Der er gennemført laboratorieforsøg til vurdering af det påviste olieprodukts ventilerbarhed (flygtighed) samt målinger af udvalgte jordfysiske parametre. Til yderligere vurdering af de pneumatiske forhold er der udført et supplerende jordventilationsforsøg. Tilsvarende er der udført en supplerende airspargingstest.</p> <p>Der er implementeret og beskrevet en metode til overførsel af testresultater fra jordventilationstest på vertikale filtre til horisontale filtre, samt gennemført en række modelberegninger til fastlæggelse af det endelige design af de vandrette jordventilationsboringer/-filtre.</p>
<i>Monitering</i>	<p>For at opnå det ønskede dokumentationsniveau er der udviklet og implementeret monitoringsboringer, der muliggør niveauspecifik prøvetagning i 3 niveauer, i såvel den mættede som umættede zone.</p> <p>Til beskrivelse af udgangsniveauet er der gennemført et "Baseline study", der indbefatter analyse af samtlige poreluftfiltre (i alt 43) og grundvandsfiltre (i alt 39) samt 10 jordprøver. Der er gennemført respirationstest til fastlæggelse af bioaktiviteten i den umættede zone.</p> <p>Under oprensningsforløbet er der planlagt kvartalsvise målinger af forureningsniveauet i poreluft og grundvand i 45 udvalgte filtre.</p>
<i>Afværgeboringer</i>	<p>Der er beskrevet, hvordan de 5 vandrette afværgeboringer, fordelt på 3 vakuumboringer henholdsvis 2 airspargingboringer, dels designes med hensyn til filteropbygning, dels hvorledes disse installeres vha. "blind hole" teknik.</p>
<i>Behandlingsenhed</i>	<p>Der er projekteret en on-line detektion (vha. GC) af chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter i den ekstraherede luft fra jordventilationsfiltrene. Herved opnås en detaljeret beskrivelse af den tidlige udvikling i koncentrationer af forureningskomponenter. Dette målesystem er</p>

opkoblet til et SRO-system med mulighed for fjernopkald og elektronisk overførsel af måle- og driftsdata.

Afslutning

Ved afslutningen af projektet er der planlagt en samlet prøvetagning fra samtlige porelufts- og grundvandsfiltre samt udtagning af ca. 10 jordprøver. Herved kan oprensingsniveauet og et eventuelt tilbageslag vurderes.

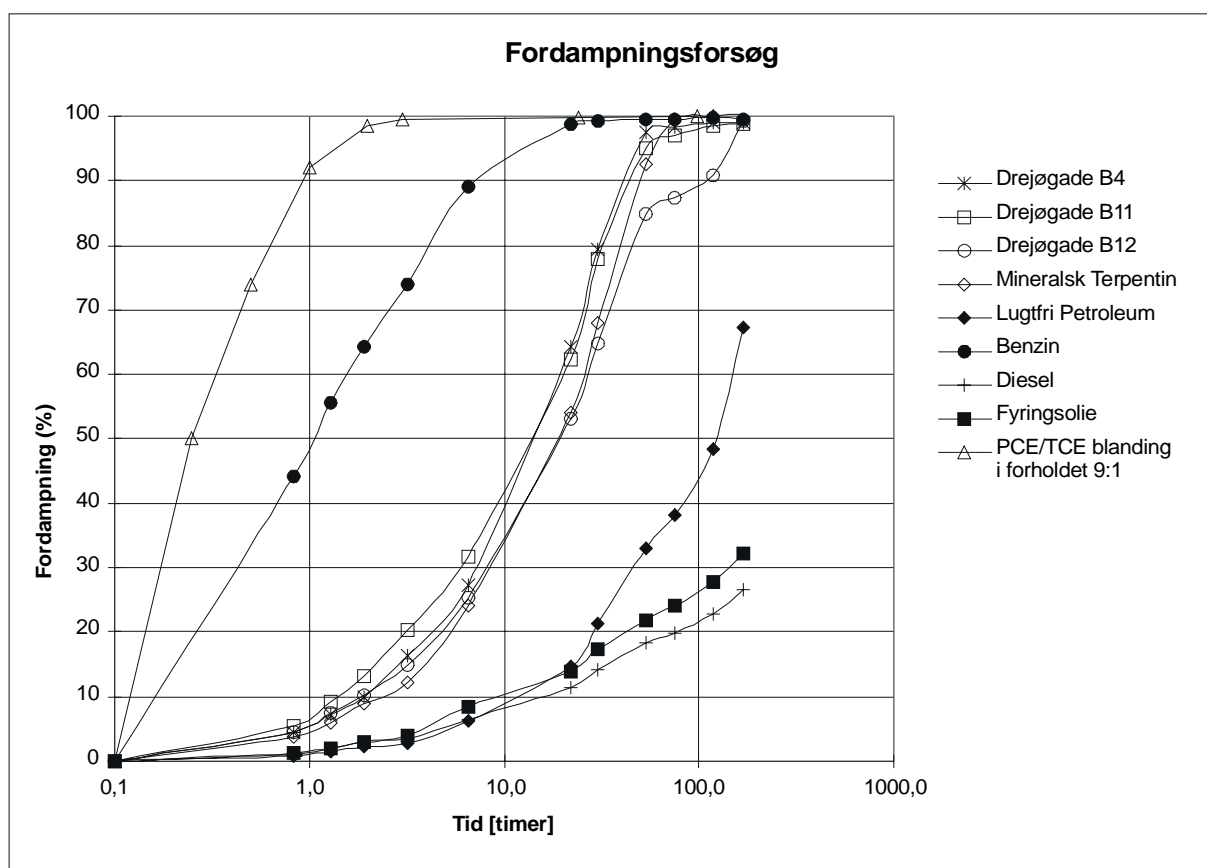
4 Detailprojekteringsfasen

4.1 Dimensioneringsgrundlag

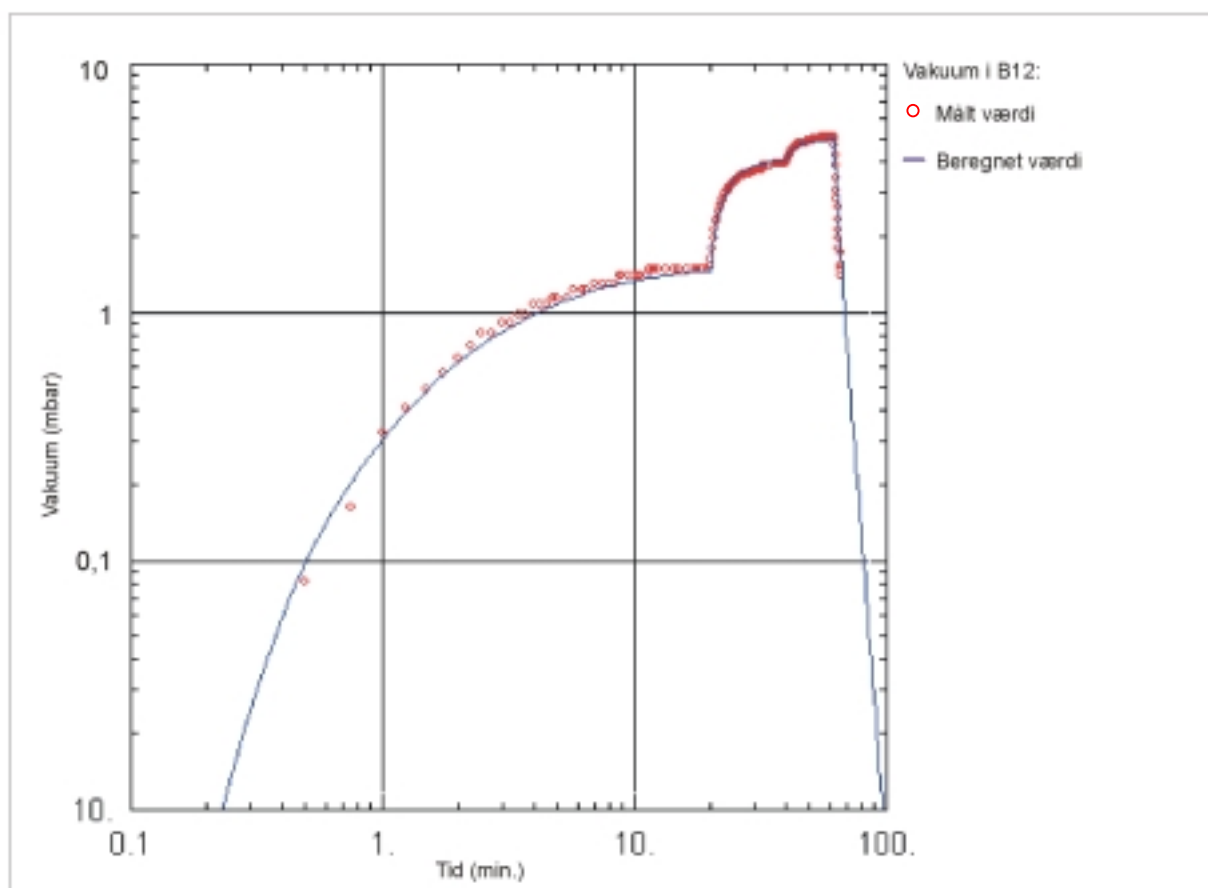
4.1.1 Jordfysiske parametre m.v.

Fri olie

Til karakterisering af olieproduktet påvist i fri fase på grundvandet (B4, B11 og B12) er der gennemført en densitetsbestemmelse samt fordampningsforsøg ved stuetemperatur. Fordampningsforsøget med olieprøverne fra de 3 boringer viser et forløb sammenligneligt med en referenceblanding af mineralsk terpentin, jf. figur 4.1. Olieproduktet er ”næsten” fuldstændigt fordampet efter 4 dage, heraf 50% efter ca. 12 timer. Flygtigheden er som forventet noget mindre end for de to referenceblandinger af benzin og PCE/TCE. Densiteten er bestemt til $0,79 \text{ g/cm}^3$.



Figur 4.1 Fordampningsforsøg for olieprodukt fra B4, B11 og B12 på Drejøgade samt referenceblandinger



Figur 4.2 Tolkning af transiente data fra B12 ved pumpeforsøg på B11. Afstanden mellem B11 og B12 ca. 6,9 m

Jordfysiske parametre

Der er på udvalgte prøver fra umættet zone foretaget direkte målinger af en række parametre af betydning for dimensionering af jordventilationssystemet. For de tre gennemgående geologiske enheder er følgende variationsintervaller målt, jf. tabel 4.1.

	$D_{60}^{1)}$ (mm)	Total Porøsitet	Vand- Indhold (% W)	Organisk Kulstof (% W)	Effektiv luftporø- sitet ²⁾ (A)
Fyld	-	-	8-10	-	-
Sand, sv. Leret	0,1-0,15	0,35	5-10	0,39	0,20-0,30
Sand, fin-mellek.	0,2-0,3	0,35	3-5	0,37-0,44	0,30-0,33

- : Ikke målt
- 1: Bestemt ved sigteanalyse
- 2: Skønnet

Tabel 4.1 Jordfysiske parametre

Vandindholdet er relativt lavt, hvilket må tilskrives en ringe nettoinfiltration, da en meget stor del af arealet er bebygget.

Hydrauliske parametre

Der er ikke udført pumpeforsøg på den mættede zone, og den hydrauliske ledningsevne er skønnet til at ligge i intervallet $0,5 - 5 \times 10^{-5}$ m/s. Dette skøn er baseret på den beregnede permeabilitet ud fra ventilationstesten, se senere.

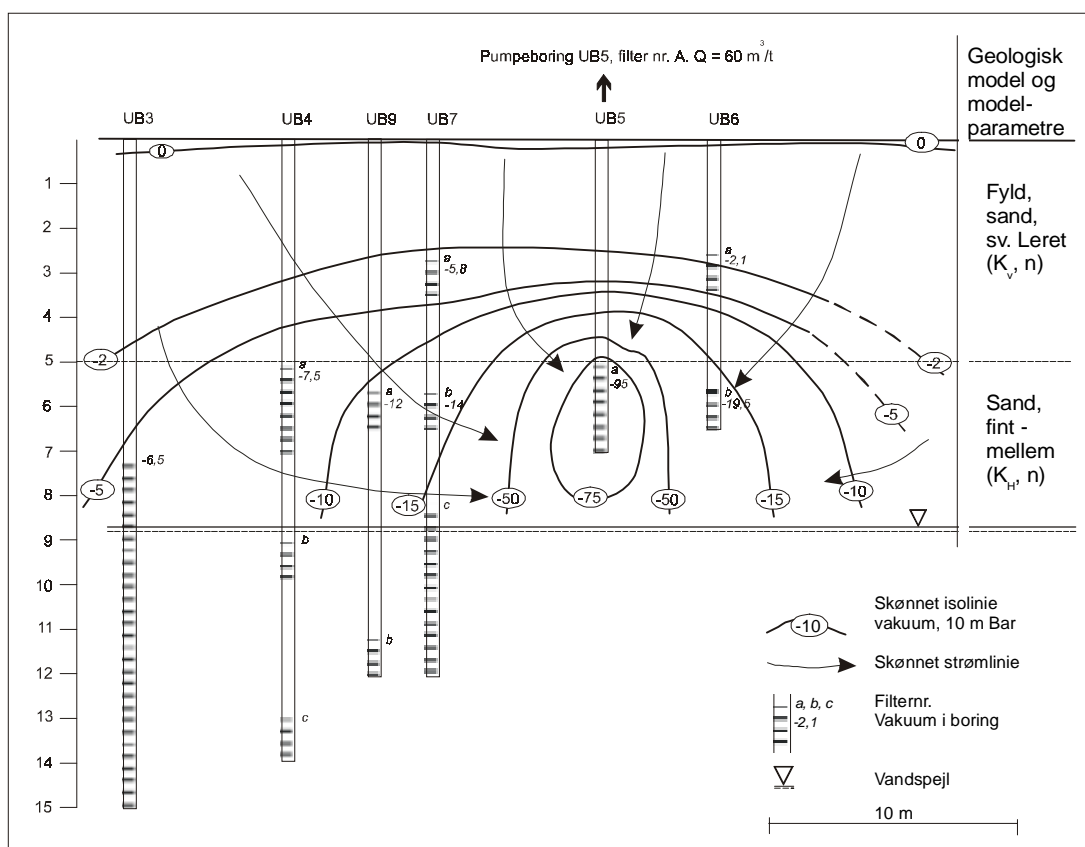
4.1.2 Jordventilationstest

Omfang

I to forskellige områder på grunden er der udført jordventilationstest. Under forsøgene er den tidlige udvikling i vakuum løgget i pumpeboringen og i et antal monitoringsboringer filtersat i forskellige dybder. Indholdet af O_2 , CO_2 , CH_4 og totalkulbrinteindholdet i afkastluften er målt kontinuert, og ved forsøgets afslutning ca. 1 time senere er der udtaget en luftprøve til analyse.

Tolkningsprincip

For at tolke de målte vakuumrespons er den umættede zone inddelt i en øvre del (0-4 m.u.t.) og en nedre del (4-8,5 m.u.t.). Denne opdeling er fastlagt ud fra de geologiske- og jordfysiske data (lerindhold og vandindhold). Den øvre del har en lavere ledningsevne for luften og virker som et "låg" over det nedre mere ledende sandlag, jf. figur 4.3.



Figur 4.3 Jordventilationsforsøg på UB5. Målte vakuum i de enkelte filtre og skønnet vakuumudbredelse, strømlinie geologisk model

Ved jordventilationsforsøgene er det permeabiliteten (K_v) i den øvre del af den umættede zone (0-4 m.u.t.) og permeabiliteten (K_H) i den nedre del af zonen (4-8,5 m.u.t.), der bestemmes. I begge zoner forudsættes isotrope forhold (ensartede forhold i alle retninger). Udover permeabiliteten er det muligt at bestemme den effektive luftporøsitet (n) i den nedre del af zonen, hvilket modsvarer magasintallet (S) for en grundvandsstrømning.

Ved en simpel omskrivning af strømningsligningen for luft, er denne bragt på en form, der er identisk med den kendte strømningsligning for vand /ref. 2/. Herefter er traditionelle værktøjer til beregning af vandstrømninger an-

vendt. Et eksempel på en tolkning af et pumpeforsøg vha. programmet AQTESOLVE er vist i figur 4.2. I forhold til typiske prøvepumpningsforsøg for vand bemærkes, at vakuummet allerede i løbet af 10-20 min. for hvert pumpetrin bliver stabilt. Udover tolkning på transiente data (tidsvarierende data) er der også tolket på de stationære data fra pumpeboringerne; dvs. efter at vakuummet er blevet næsten stabilt. Der henvises til /ref. 2/ for flere detaljer og praktisk gennemførelse af begge typer tolkninger.

Beregnet permeabilitet

Da der til hver pumpeboring er registreret vakuum i op til 5 observationsboringer samtidigt, er det muligt at beregne flere estimater for parametre ved hvert forsøg. I tabel 4.2 er vist samtlige estimater for de 3 parametre (K_H , K_V , n).

Parameter	Enhed	Transiente data			Stationære data		
		Middel	Std. Afvigelse	Antal obs.	Middel	Std. afvigelse	Antal Obs.
K_H	Darcy	9,0	3,4	8	12,1	7,2	8
K_V	Darcy	0,29	0,20	8	-	-	-
n	(-)	0,33	0,1	8	-	-	-

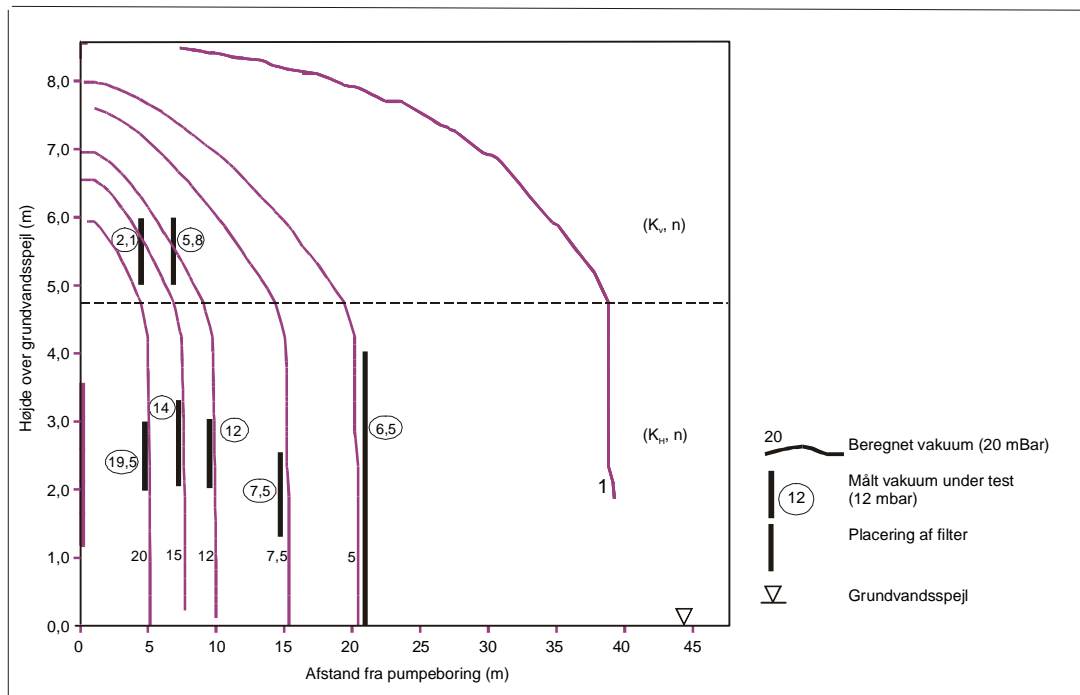
- : Kan ikke beregnes ved metoden

Tabel 4.2 Ventilationstest. Estimerede parametre

Der er god overensstemmelse mellem de to metoder mht. bestemmelse af K_H . Ofte vil estimatet af K_H være en størrelsesorden større ved brug af de stationære data i forhold til de transiente. Variationsbredden er noget større ved brug af stationære data. Den vertikale permeabilitet (K_V) er ca. 30 gange mindre end den horisontale (K_H), hvilket er forventeligt ud fra de jordfysiske parametre. Den effektive luftporøsitet (n) er i god overensstemmelse med det forventede interval (0,2 – 0,33), jf. tabel 4.1.

Strømningsmønster

Til kontrol af de estimerede værdier (K_H , K_V , n), fra forsøget på UB-5, er disse anvendt som input-parametre til programmet AIRFLOW/SVE, og det forventede stabile vakuum omkring pumpeboringen er beregnet. På figur 4.3 er vist de beregnede vakuumkonturer samt det faktisk observerede vakuum i de etablerede filtre. Der er i den nedre zone en god overensstemmelse mellem målte og beregnede vakuum, og det vurderes, at den anvendte opdeling i en øvre og nedre zone er fornuftig og brugbar i den videre dimensionering. Vakuumbredelsen er relativt stor horisontalt i det nedre lag, og det må forventes, at 1 mBar kan måles i ca. 30-40 m's afstand fra pumpeboringen. Som en konsekvens heraf er der i det øvre lag en større vertikal strømning (figur 4.4 og figur 4.3).



Figur 4.4 Jordventilationsforsøg på UB5. Sammenligning af målte- og beregnede vakuum udfra de estimerede parametre (K_H , K_v , n)

Fjernelsesrater

Ved afslutningen af jordventilationstestene (efter ca. 1 time), kunne der generelt konstateres et fald i koncentrationsniveau på ca. 50% i forhold til opstart. Dette skøn er baseret på dels løbende PID-målinger og enkelte kvantitative analyser af luft opsamlet på kulrør. De beregnede fjernelsesrater for hhv. chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter er op til ca. 30 kg/d, men der er store forskelle mellem borerne, jf. tabel 4.3.

Boring nr.	Sammensætning af oppumpet poreluft							Fjernelsesrater		Luft- ydelse (m ³ /t)
	PCE mg/m ³	TCE mg/m ³	Sum af chl.opl. midler mg/m ³	BTEX mg/m ³	Olie- komp. Total mg/m ³	O ₂ % vol.	CO ₂ % vol.	Chl. opl. midler (kg/d)	Olie- kompo- nenter (kg/d)	
UB1	5,3	<1	5,3	484	454	20,3	0,23	0,002	0,3	12
UB2	490	3	493	<1	<1	16,3	3,2	0,60	<0,001	49
UB3 ¹⁾	16.000	590	16.702	<1	3200	7,1	12,7	20,4	4,3	51
UB3	1700	69	1770	<1	2900	16,2	4,7	2,0	3,8	52
UB5	2300	24	2324	<1	<1	14,2	3,6	3,5	<0,001	63
UB10	690	16	706	<1	<1	10,3	6,8	0,78	<0,001	49
UB11	210	26	236	<1	<1	20,1	0,4	0,14	<0,001	28
B11	<1	<1	<1	<1	19.620	6,3	14,3	<0,001	28,3	60
UB12	<1	<1	<1	<1	13.770	5,6	15,9	<0,001	18,2	55

1) Efter 8 dages kontinuert pumpning

Tabel 4.3 Jordventilationstest. Fjernelsesrater for chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter

Fra boring UB3 blev der gennemført et supplerende 8 dage langt pumpeforsøg til vurdering af koncentrationsudviklingen på lidt længere sigt. Efter 8 dage er fjernelsesraten for chlorerede opløsningsmidler faldet en størrelsesorden til ca. 3,8 kg/d, mens der for indholdet af oliekomponenter kun registreres et fald på ca. 20% (3,8 kg/d). Årsagen til det markant hurtigere kon-

centrationsfald for chlorerede opløsningsmidler i forhold til oliekomponenter skyldes primært forskellen i flygtighed, men også forureningsfordelingen omkring boringen har en vis betydning, men kan ikke vurderes specifikt.

4.1.3 Airsparging-test

Omfang

Der er i to forskellige områder på grunden udført airspargingstest. Under forsøgene er den tidlige udvikling i bl.a. vandspejl og iltindhold i den mættede zone målt. Endvidere er overtrykket i den umættede zone registreret i en række filtre, der også er anvendt ved jordventilationstesten. Der er gennemført et kort og et langt forsøg (hhv. 3 og 170 timer).

Tolkningsprincipper

Da luftstrømningerne i den mættede zone ikke direkte er målt, kan resultaterne kun delvist tolkes kvantitativt. Det er derfor ændringer i specielt iltindholdet og evt. konstaterede boblelyde (luftgennembrud) i de enkelte filtre, som der lægges vægt på. Dernæst er de dynamiske ændringer i vandspejlet under forsøget også vigtig, idet beliggenheden indirekte giver informationer om luftstrømningens dynamik.

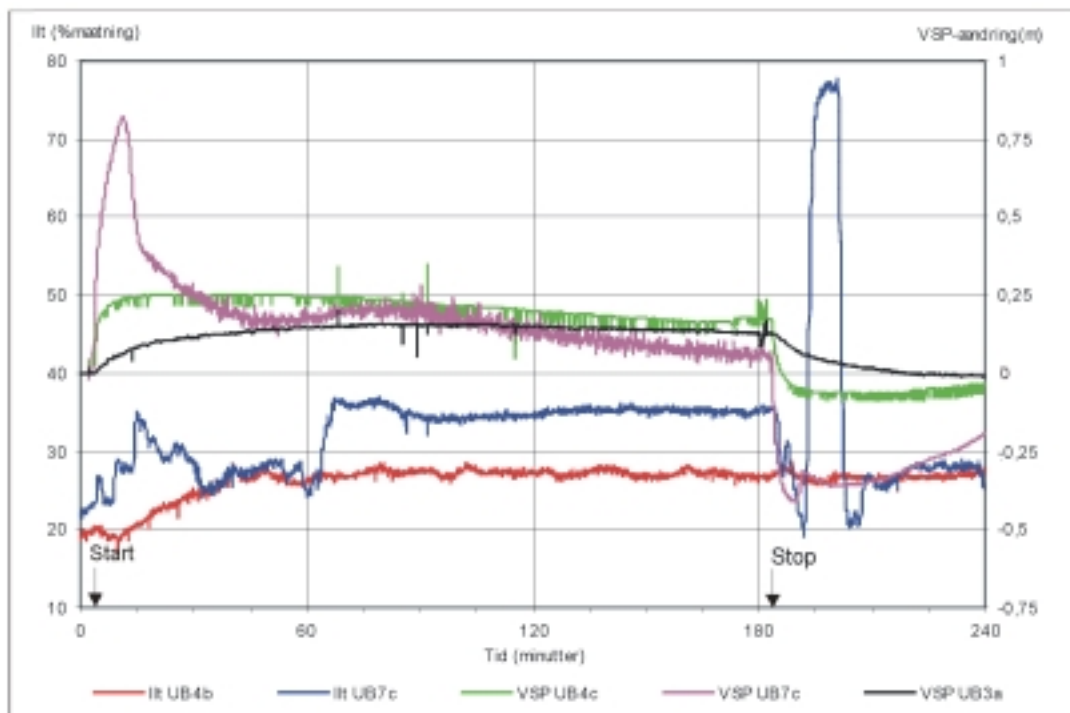
Forsøgsbetingelser

De to testede boringer i B10 henholdsvis UB9 (se figur 2.3), udviser et meget ensartet respons ved airsparging-testen, jf. tabel 4.4. Ud fra testene vurderes formationsmodtrykket kun at være ca. 0,15 bar, mens det resterende modtryk skyldes vægten af vandsøjlen over injektionspunktet. De målte injektionstryk er i god overensstemmelse med tilsvarende test udført i fint-mellemkornet sand, og vurderes at være repræsentative for lokaliteten.

	Enhed	Boring B10	Boring UB9
Filterdimension (indv.)	(m)	0,063	0,063
Filterlængde	(m)	1,0	1,0
Afstand fra grundvandsspejl til toppen af filteret	(m)	2,5	2,8
Injektionstryk	(bar)	0,4	0,4
Injektionsflow	(m ³)	10	15
Formationsmodtryk ¹⁾	(bar)	~ 0,15	~ 0,12
Injektionsperiode	(timer)	3	170

1) Skønnet som (injektionstryk – hydrostatisk tryk)

Tabel 4.4 Airspargingforsøg. Forsøgsbetingelser ved test af B10 og UB9



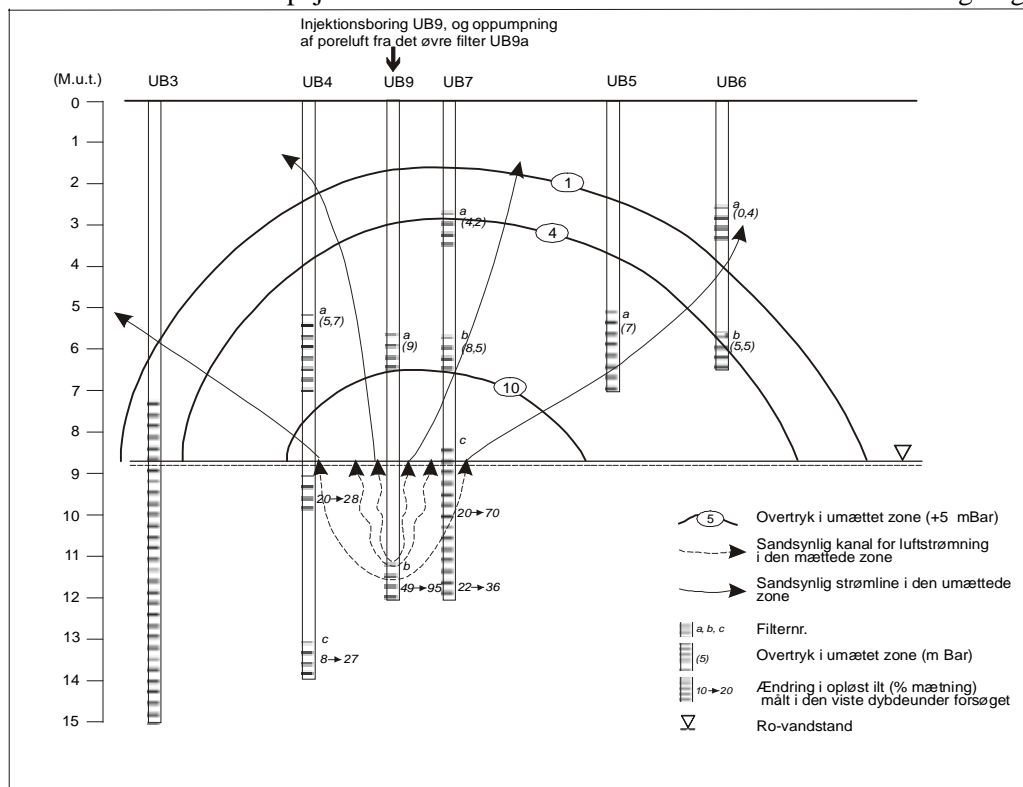
Figur 4.5 Airsparging på UB9. Tidslig udvikling for opløst ilt og vandspejl i monitoringsboringer

Transientrespons

I forbindelse med afvikling af testen i boring UB9 blev der kontinuert logget iltindhold og vandspejlsniveau i en række monitoringsfiltre, jf. figur 4.5. Placeringen af filterne i forhold til testboringen fremgår af figur 4.6. Endvidere blev iltindholdet i øvrige filtre målt manuelt hhv. før og efter stop af injektionen, jf. figur 4.6.

Vandspejl

Vandspejlsfluktuationerne under testen viser den forventede stigning i



Figur 4.6 Airsparging på UB9b. Konceptuel model for lufttransport i den mættede- og umættede zone samt målte overtryk i umættet zone og ændringer i iltindholdet i den mættede zone

grundvandsspejlet i de første 15-60 min. jf. figur 4.5. I denne periode fortrænges vand omkring boringen, og luftkanaler begynder at blive dannet. Den maksimale stigning på ca. 75 cm optræder først i den nærmeste observationsboring (UB7c), ca. 15 min. efter start. Herefter aftager vandstanden i denne boring jævnt og er næsten fuldt retableret efter 180 min.

Ved stop af testen efter 180 min. registreres i løbet af ca. 5-10 min. et brat fald i vandstanden til under det oprindelige ro-vandspejl, hvorefter det næsten retableres til det oprindelige ro-vandspejl i løbet af den efterfølgende time. Sammenfattende vurderes det, at vandstanden efter injektionsstart stabiliseres efter ca. 4 timer og at det efter stop retableres i løbet af ca. 2 timer.

Umættet zone

Da den injicerede luft under grundvandsspejlet vil søge opad mod grundvandsspejlet og via den umættede zone til atmosfæren, vil der blive opbygget et svagt overtryk i den umættede zone.

På figur 4.6 er det næsten stationære trykfelt i den umættede zone skitseret, og der kan konstateres et overtryk på ca. 1 mbar i ca. 15-20 m's afstand fra injektionsboringen. Trykfeltet og de skitserede strømmlinier indikerer, at der sker en relativt stor horisontal transport i den umættede zone, hvilket skyldes den konstaterede permeabilitetsforskel over dybden. Ved design af jordventilationssystemet er det således nødvendigt at tage højde for den trykforøgelse i den umættede zone, der skyldes airsparging, idet airsparging vil medføre en vis ændring i strømningsretning og -hastighed.

Iltindhold

Den tidlige udvikling af opløst ilt i filtrene UB4b og UB7c viser et stigende iltindhold under testen, men med et meget mere varierende forløb i UB7c, der står tættest på injektionsboringen (2,65 m). Det vurderes, at dette skyldes, at denne boring er filtersat inden for det område, hvor de aktive luftkanaler er etableret og derfor kortslutter disse kanaler.

Luftbobler

Dette stemmer overens med registreringer af luftbobler i kun denne boring af samtlige observationsboringer. Efter ca. 1 times injektion ses en tydelig stabilisering af iltindholdet i UB7c, hvilket vurderes at være et udtryk for, at kanaldannelsen i magasinet er fuldt udviklet. Iltindholdet i det dybereliggende filter UB4c stabiliseres tilsyneladende noget før end i UB7c, hvilket kan skyldes, at der allerede efter ca. 30-40 min. er et konstant iltindhold i det vand, der presses nedad i magasinet.

Efter stop af injektionen observeres et meget fluktuerende iltindhold i UB7c, hvilket skyldes, at den etablerede kanalstruktur kolliderer, idet luften under grundvandsspejlet søger opad. Dette blev konstateret ved, at UB7c fortsatte med at boble ca. 40 min. efter, at testen blev afsluttet, hvorefter iltindholdet stabiliseredes. I det dybere filter UB4c blev der ikke konstateret nogen ændring i iltindholdet efter stop af injektionen, og det vurderes derfor, at der ikke i dette niveau og afstand fra injektionsboringen har været kanaldannelser.

Kanaldannelser

Udbredelsen af de etablerede kanaldannelser og ændringerne i iltindholdet i de enkelte filtre er skitseret på figur 4.6. Det fremgår heraf, at kanaldannelserne dannes inden for en afstand af 3-4 m fra injektionsboringen, og således kun bryder igennem til filtret UB7c. Der kan registreres en relativt svag forøgelse af iltindholdet i den dybeste del af UB7c i forhold til niveauet ca. 2 m højere oppe i filteret.

Generelt gælder at den udviklede kanalstruktur vil være afhængig af den lokale geologi og derfor ikke kan forudsiges detaljeret før egentlig test er udført.

Generelt

4.1.4 Dimensionering af jordventilationssystemet

Ud fra de gennemførte test m.v. er det nødvendige antal boringer/filtre og luftydelser vurderet. Som udgangspunkt er det valgt at dimensionere et system baseret på alene vandrette boringer grundet de meget vanskelige adgangsforhold.

Fjernelsesmekanismer

Det forurenede område kan opdeles i to zoner med hhv. PCE og terpentin som de dominerende forureningskomponenter (jf. afsnit 2.3). Da disse to forureningstyper er væsentligt forskellige mht. bl.a. flygtighed, bionedbrydelighed og opløselighed, er det nødvendigt at vurdere hvert område for sig. Den dominerende fjernelsesproces ved jordventilationen vurderes at være fordampning, mens der dog for terpentinen også forventes en vis acceleret bionedbrydning som følge af tilførsel af ilt fra atmosfæren og til den umættede zone.

Terpentin

For området med terpentin-forureningen kan det nødvendige flow ikke bestemmes vha. stoftransport-modellering, idet forureningsbeskrivelsen ikke er tilstrækkelig detaljeret. Det er derfor valgt at estimere det nødvendige flow ud fra følgende kriterier:

- Ud fra amerikanske erfaringer /ref. 2/ kan det nødvendige antal udskiftninger af porevolumenet estimeres til 5000 porevolumener (PV) inden for oprensningsperioden (2 år).
- 50% af jordforureningen forventes nedbrudt biologisk som følge af ilttilførslen fra atmosfæren via lækage, som følge af ekstraktionen af poreluft i den umættede zone. Respirationsraten skønnes ud fra /ref. 3/.
- De resterende 50% strippes og fjernes med den oppumpede luft. Den gennemsnitlige koncentration skønnes ud fra de korte jordventilationstest.

PCE

For området med kraftig PCE-forurening, skal fjernelsen alene baseres på stripping, idet PCE ikke er aerobt nedbrydelig. Det nødvendige flow kan ikke bestemmes vha. stoftransport modellering, idet forureningsbeskrivelsen ikke er detaljeret nok hertil. Der er derfor valgt at estimere det nødvendige flow ud fra følgende 2 kriterier:

- Det skønnes, at der skal ventileres i alt 1500 porevolumener inden for oprensningsperioden på 2 år.
- Det antages, at den skønnede PCE-masse strippes og fjernes med den oppumpede luft. Den gennemsnitlige koncentration skønnes ud fra de korte ventilationstest.

Nødvendigt flow

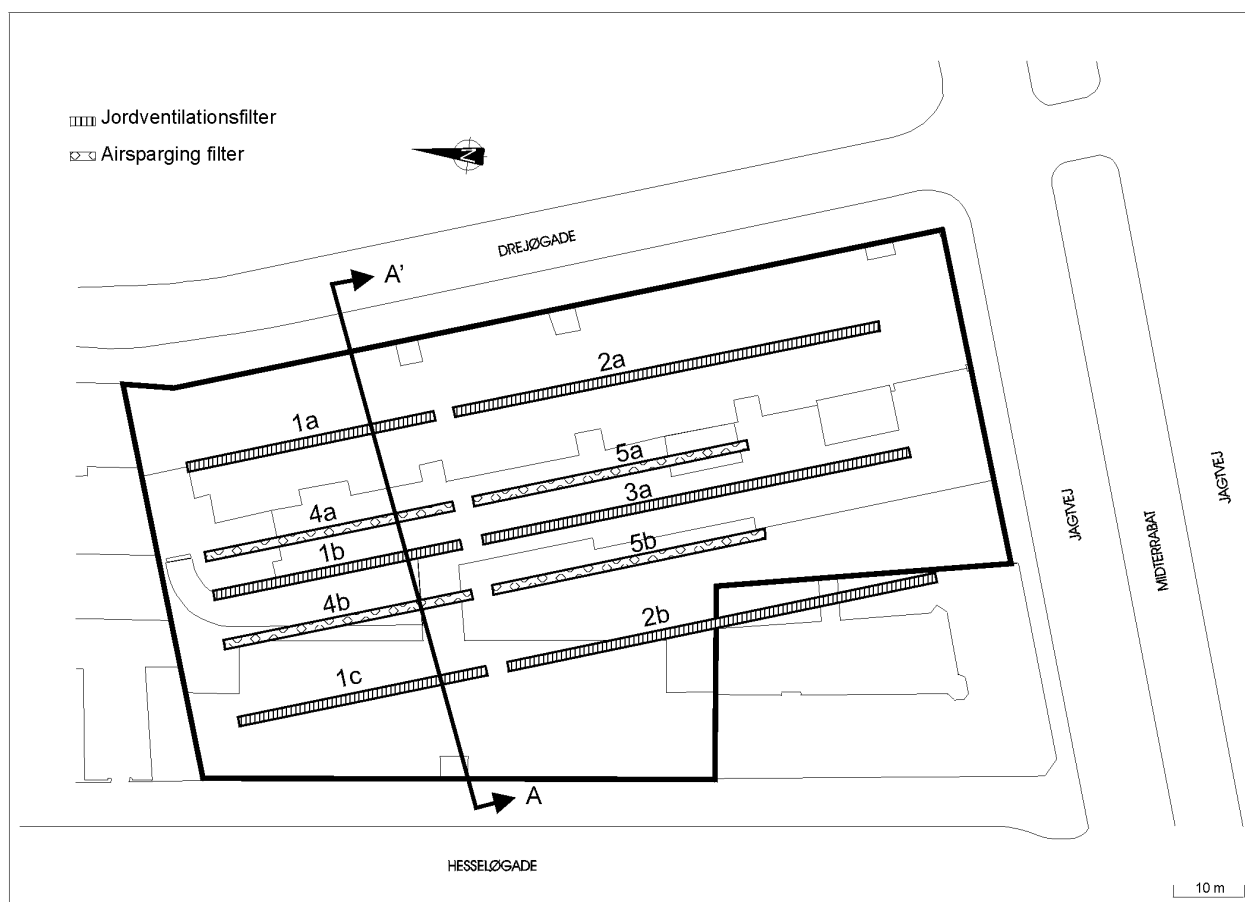
Ud fra ovenstående kriterier er der skønnet et nødvendigt luftflow på 1000 m³/t. Med et totalt grundareal på 7000 m² og en gennemsnitlig tykkelse af den umættede zone på 7 m, og en effektiv luftporøsitet på ca. 0,25, bliver der ventileret et porevolumen på ca. 15.000 m³. Dette giver over den forventede drifttid på 2 år ca. 1430 porevolumentudskiftninger.

Vandrette filtre

Antal og placering af de vandrette filtre er fastlagt ud fra designkriterierne, forureningsfordeling og en række beregninger af de forventede strømningsmønstre omkring de vandrette filtre, jf. figur 4.7. Den endelige fordeling af totalflowet på de enkelte filtre er vist i tabel 4.5.

Filter	Længde (m)	Flow (m ³ /t)
1a	35	100
1b	35	100
1c	35	100
2a	60	200
3a	60	300
2b	60	200

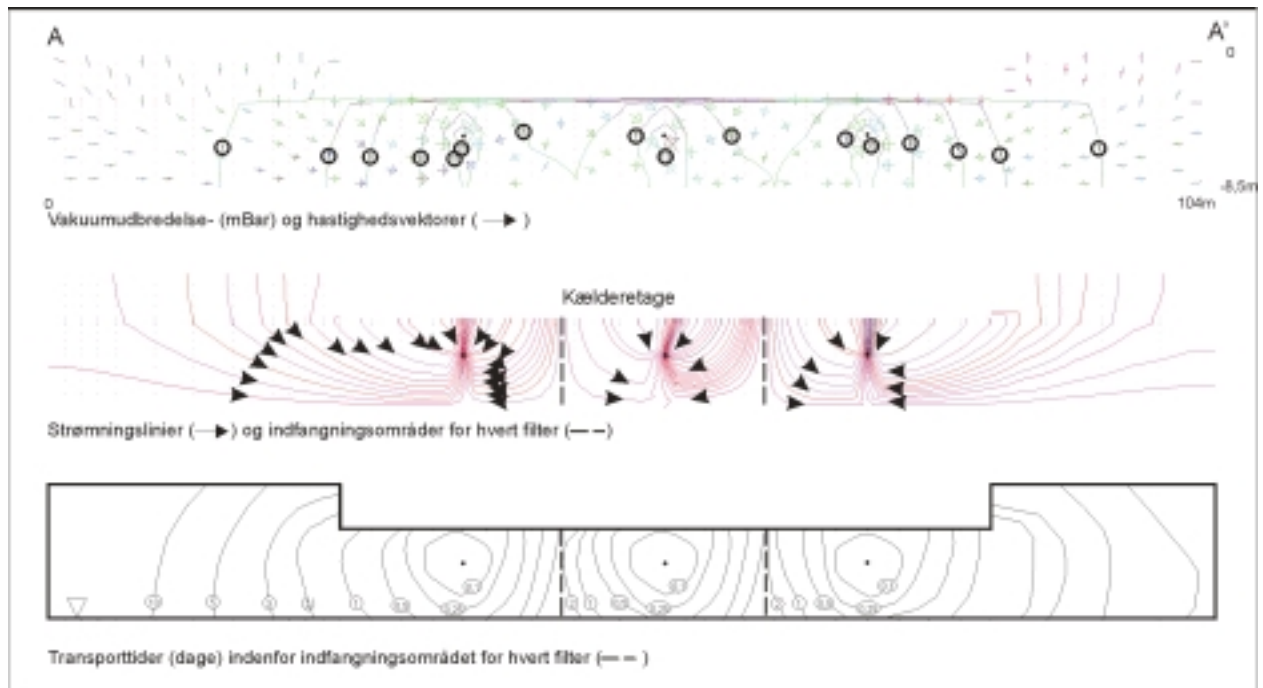
Tabel 4.5 Vandrette ventilationsfiltre. Længde og flow



Figur 4.7 Placering af de enkelte filtersektioner for hhv. jordventilation og airsparging

2D-modellering

Som eksempel på beregningerne af det forventede strømningsmønster omkring de vandrette filtre, er der på figur 4.8 vist resultater for den endelige boringskonfiguration på den nordlige del af grunden.



Figur 4.8 Beregning af strømningsmonster omkring filtrene ved snit A-A'

Vakuumbredelse

Som det fremgår af den resulterende vakuumbredelse, vil der næsten under hele ejendommen skabes et vakuum på over ca. 3 mBar. Af hastighedsvektorerne ses, at der er en relativ stor lækage fra det kapilarbrydende lag umiddelbart under gulvet. Af strømningslinierne fremgår det, at det centrale filter alene trækker luft via lækage under gulvet. De to øvrige filtre henter en del luft via lækage fra terræn i området under Hesseløgade og Drejøgade.

Stagnationsområder

Som helhed viser strømlinierne, at der foregår en luftstrømning gennem stort set hele jordvolumenet under ejendommen, og at der ikke er nogen områder af betydning, som ikke er påvirket. De konstaterede stagnationsområder vil sandsynligvis ikke være stationære, men flytte sig; idet start/stop af airsparingen vil påvirke trykfordelingen markant.

Transporttider

Den forventede effektivitet er illustreret ved at optegne kurver med en given transporttid til filtrene. Langs grundens skel mod Hesseløgade og Drejøgade ses, at transporttiden er ca. 1-2 dage. Tilsvarende transporttider findes i området midt mellem det centrale filter og de to yderste filtre.

Opskalering

Til kontrol af det nødvendige vakuum, som skal etableres i et vandret filter for at opnå et flow på 100 m³/t i et 35 m langt ø150 mm filter, er der gennemført en opskalering fra testen af den lodrette boring UB5. Metoden er nærmere beskrevet i appendix 1. Af beregningen ses, at der kan forventes at skulle påføres et vakuum på mellem 5 og 20 mBar, afhængig af anisotropien. Med 2D-modellen blev det nødvendige vakuum skønnet til 15 mBar, og der er således god overensstemmelse mellem de to metoder.

4.1.5 Dimensionering af airspargingsystem

Generelt

Ud fra de gennemførte test er det nødvendige antal filtre og luftydelsen vurderet. Som udgangspunkt er det, som i ventilationsdelen, valgt at designe vandrette filtre.

Fjernelsesmekanismer

Effekten af airsparging er afhængig af forureningstypen, idet der ved biologisk nedbrydelige stoffer kan forventes en stimulering af den aerobe nedbrydning; mens der for ikke aerobt nedbrydelige stoffer primært vil ske en fjernelse af forureningen ved stripping.

Således vil effekten i området med terpentinforureningen sandsynligvis dels være en biologisk nedbrydning af de opløste terpentinkomponenter, dels en vis stripping af de flygtigste komponenter. I området med PCE-forurening vil effekten primært være en stripping af PCE og andre chlorerede forbindelser (TCE m.fl.) Ved stripping er det kontakttiden og kontaktarealet mellem den indblæste luft og den opløste (evt. også ”pools” af fri fase) forurening, der er afgørende for strippingeffekten.

Injektionsflow

Erfaringsmæssigt skal injektionsflowet være noget større, når der primært skal strippes flygtige stoffer, fremfor når der alene skal tilføres ilt til grundvandet. For lodrette filtre vil et typisk injektionsflow være ca. 5-20 m³/t til stripping og 1-5 m³/t for at sikre iltning af grundvandet.

Designkriterier

Til design af de vandrette air-sparging filters beliggenhed, injektionsflow og tryk, findes ikke nogen direkte metoder/modeller til opskalering fra test på lodrette filtre. Derfor er der indledningsvist ud fra airsparging-testresultaterne skønnet det nødvendige antal vertikale filtre.

Vertikale filtre

Der er regnet med en effektiv virkningsradius på 3-5 m, og et flow på 1-5 m³/t i området med terpentinforureningen og 5-20 m³/t i det centrale område med PCE-forureningen. Det nødvendige antal filtre, områdernes areal og det samlede flow for hvert område er anført i tabel 4.6.

	Areal (m ²)	Antal Injektionsfiltre (-)	Flow – samlet (m ³ /t)
Nordlig del (terpentin)	500	6 – 17	6 – 85
Central del (PCE)	1000	12 – 34	60 – 680

Tabel 4.6 Airsparging. Skøn over antal lodrette filtre

Virkningsradius for vandrette boringer

Den effektive virkningsradius for vandrette filtre er meget vanskelig at forudsige ud fra airsparging test på vertikale boringer, men ud fra de gennemførte tracertest på Aalestrup-projektet /ref. 5/ (sammenlignelig kornstørrelsesfordeling) vurderes der at kunne opnås en effektiv virkningsradius på ca. 5-6 m vinkelret på filtrene. Det nødvendige antal vandrette filtre for at dække de to områder er skønnet til 2.

Sektionering

For at kunne opnå individuelle flow i de to forskellige typer forureningsområder på depotet, blev det på depotet ud fra en anlægsøkonomisk og implementeringsmæssig vurdering valgt at sektionere de 2 filtre i hver 2 sektioner af hhv. 35 og 40 m. Yderligere sektionering af de enkelte filtre blev dog indledningsvist overvejet. Alternativt blev ligeledes vurderet, om der via samme pilothul kunne indføres 3 separate filtre i mindre filterdimension, f.eks. ø50 eller ø63. Begge alternativer blev dog forkastet, idet komplekse-

ten ved at gennemføre disse ville medføre en meget høj risiko for, at en vellykket filterinstallation ikke ville kunne udføres ved blind-hole teknikken. Ligeledes ville en senere oprensning af disse filtre blive meget vanskelig, og for først beskrevne mulige alternativ næsten umulig.

I det nordlige område med terpentinfureningen vil der således skulle injiceres 6-85 m³/t fra i alt 70 m filter (2 x ca. 35 m filter); svarende til 0,08 - 1,2 m³/t/m filter. I det centrale område med PCE-fureningen vil der tilsvarende skulle injiceres 60-680 m³/t fra 80 m filter (2 x ca. 40 m filter); svarende til ca. 0,75 – 8,5 m³/t/m filter. Placeringen af airsparging-filtrene fremgår af figur 4.7.

Injektionsflow- og tryk

Erfaringerne fra Aalestrup /ref. 4/, hvor kornstørrelsesfordelingen er sammenlignelig, viser at der kan opnås ca. 3,5 m³/t/m-filter i et 20 m langt ø90 mm filter ved et injektionstryk på ca. 0,25 bar. Placeringen af filtret i Aalestrup er ca. 2-2,5 m under ro-vandspejl, og formationsmodtrykket er derfor ca. 0,05 bar, mens det hydrostatiske tryk er ca. 0,2 bar. Boringen i Aalestrup blev designet til max. 8,5 m³/t/m filter ved ca. 0,75 bar, hvilket er tæt på det målte under testkørsler (8 m³/t/m filter v. 0,65 bar). Det vurderes derfor, at der med et nogenlunde tilsvarende design af filtrene kan opnås de ønskede flow i begge områder.

Dog skal der for at kunne sektionere filtrene anvendes større rørdiameter, og hulstørrelse, afstand og antallet heraf justeres tilsvarende, jf. afsnit 4.2.2.

Injektionsdybde

For at få placeret filtret under det niveau, hvor de høje koncentrationer af PCE er påvist, og samtidig have en hvis sikkerhedsmargin over for de forventelige årstidsfluktuationer i grundvandsstanden, vurderes det, at filtrene skal placeres omkring kote 0, svarende til ca. 3,5 m under ro-vandsspejlsniveau målt i foråret 1997.

Driftscyklus

Ved de gennemførte tests registreres næsten stationære forhold mht. iltkoncentrationer og vandspejl efter ca. 4 timers injektion, og en retablering af vandspejlet ca. 2 timer efter stop. Der kan således ved en start/stop cyklus på ca. 4 timer opnås en besparelse på el-udgifterne i driftsfasen. Ifølge specielt amerikanske erfaringer opnår man ved pulserende drift en større sandsynlighed for at luftkanaler dannes i varierende retninger ved start af hver cyklus. Herved opnås en mere ensartet behandling af det forurenede jord og grundvand inden for påvirkningsområdet. Endvidere medfører start-stop drift meget kraftige og gentagne vandbevægelser i toppen af grundvandszonen og i den kapilære zone. Herved forventes en yderligere oprensningseffekt i disse zoner.

Samlet injektionsflow

Ved kun at have injektion i filtrene på skift inden for de to områder, er det valgt at dimensionere injektionssystemet i det nordlige område til 1 m³/t/m filter, svarende til 35 m³/t for et 35 m langt filter. Det forventede injektionstryk er ca. 0,35 – 0,50 bar i selve filtret, hvortil skal tillægges evt. tab i rørsystemet frem til kompressoren. For det centrale område dimensioneres injektionssystemet til 8,5 m³/t/m filter, svarende til 240 m³/t for et 40 m langt filter. Det forventede injektionstryk vil være ca. 0,75 – 0,90 bar i selve filtret, baseret på driftsdata fra Aalestrup /ref. 4/.

Filter	Flow (m ³ /t)	Længde (m)
5a	340	40

5b	340	40
4a	35	35
4b	35	35

Tabel 4.7 Airspargingfiltre. Længde og flow i hver filtersektion

Totalt vil der således blive dimensioneret for maksimalt 375 m³/t fordelt på to filtre, jf. tabel 4.7.

Niveauspecifikke prøver

4.1.6 Moniteringsboringer

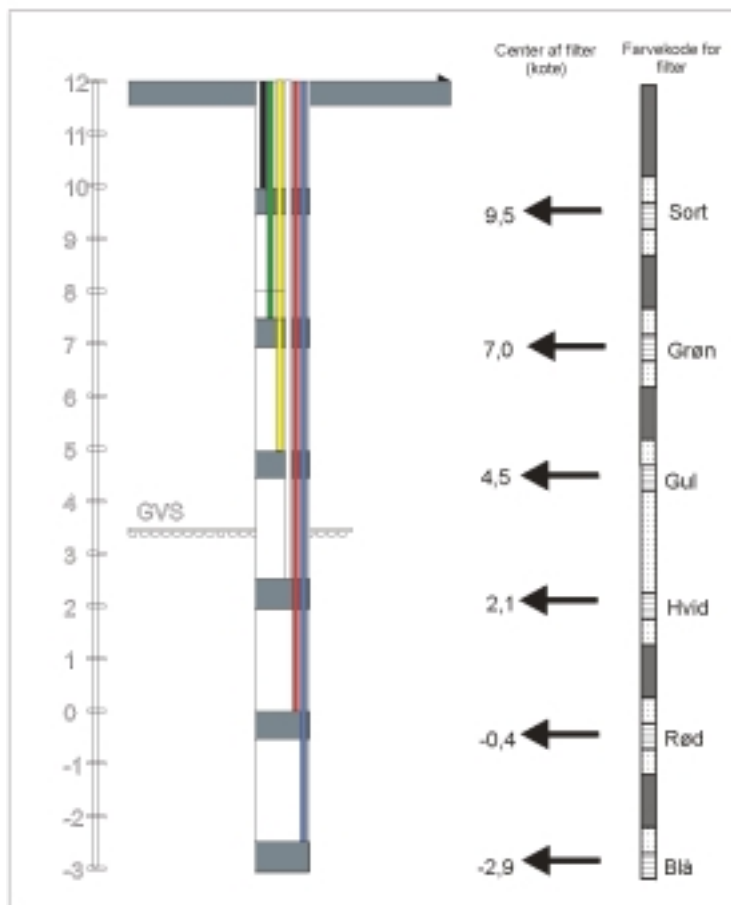
Som led i teknologiudviklingsdelens behov for en grundig dokumentation af oprensingsforløbet blev det besluttet at etablere et moniteringssystem med mulighed for udtagning af niveauspecifikke poreluft- og grundvandsprøver.

Udvikling af koncept

Der blev indhentet priser på installation af ”multi-level samplere” fra bl.a. firmaerne SOLINST i Canada og GeoProbe i Belgien, men priser og installationsteknikker vurderedes ikke at være attraktive på den aktuelle sag. I samarbejde med Jensen Filter, Ølgod, blev der udviklet et filtersystem, der opfyldte de stillede krav. Pris pr. system er ca. kr. 5.000, incl. afslutning med brønd i terræn (12”).

Filteropbygning

Filtersystemet består af 3 poreluftfiltre, 3 grundvandsfiltre og et pejlerør, jf. figur 4.9A.



A Principiel opbygning

Figur 4.9A Moniteringsboringer. Principiel opbygning

Systemet leveredes i ruller klar til at blive monteret i ét stykke ved hjælp af en 7" hulsnegl. Systemets enkelte filtre er til terræn forbundet med slanger i forskellige farver, således at hvert filterniveau på tværs af grunden har samme farve, jf. figur 4.9B.



Figur 4.9B *Moniteringsboringer.
Billede af færdigt system inden installation*

Materiale

Poreluftfiltrene er udført i 4 mm PE-slange og har en slidset længde på 50 cm. Hvert enkelt grundvandsfilter består af et Montejus-pumpesystem med nederst et 50 cm langt filterkammer af slidset $\varnothing 63$ mm PE, og herover et 50 cm langt pumpekammer i samme gods og materiale. Filtersektioner er udvendigt beklædt med en nylonsok. Til at drive pumpen anvendes kvælstof, der nedpumpes i en $\varnothing 4$ mm PE-slange, mens grundvandet fra systemet presses til terræn i 8 mm PE-slanger.

Som ”rygrad” i systemet blev der anvendt en stiv $\varnothing 32$ mm PEL-slange, der blev slidset på de nederste 2 m, og ført fra toppen af øverste pumpekammer og til terræn. Herved kunne alle prøveslanger m.v. fastgøres omkring PEL-slangen. I PEL-slangen kan der pejles grundvandstand og eventuel fri olie samt indblæses atmosfærisk luft til in-situ respirations-forsøgene.

Til montering mellem Montejus-pumpesystemerne blev der udviklet et specielt paprør ($\varnothing 50$ mm x 75 cm) fyldt med bentonitpiller. Ved få timers ophold i grundvandet går papret i opløsning, hvorved bentonitten bliver våd og ekspanderer. Herved sikres en afproping mellem de 3 pumpesystemer i den mættede zone. På grund af det lille dødvolumen i pumpesystemet (2l), er det kun nødvendigt at renpumpe ca. 10 l før prøvetagning, og herved reduceres risikoen for krydskontaminering yderligere.

Ilt-transducere

For at kunne gennemføre respirationstest i den umættede zone blev der indkøbt 5 stk. ilt-transducere (VadoScan. Datawrite Corp., Ca.) med tilhørende dataloggere og kabler. Selve transduceren er $\varnothing 2$ cm x 10 cm og blev indbygget i de færdige filterkonstruktioner før montage heraf i de enkelte boringer. I boringsafslutningerne er selve dataloggeren (10 x 10 x 10 cm) monteret.

Afslutninger

For at kunne styre de mange slanger (op til 10 pr. boring) blev der udviklet en flange med færdigborede huller. Flangen blev monteret i bunden af en standard 12" boringsafslutning. Samtlige slanger blev monteret med lynkoblinger for nem prøvetagning og sikring mod indtrængning af luft/vand til filtrene.

4.2 Vandrette boringer

Nærværende afsnit beskriver hovedtrækkene i det anlægsarbejde, som blev udbudt i licitation på baggrund af det fastlagte designgrundlag for teknologiuudviklingsprojektet.

Under selve anlægsarbejdets udførelse blev der udført forskellige korrektioner til foreskrevne udbudsgrundlag. Disse er beskrevet i senere afsnit 5.2 "Vandrette boringer".

Baggrund

4.2.1 Boremethode

Installation af vandrette filtre ved "blind-hole" boreteknik, krævede specialviden og erfaring, som først er ved at blive opbygget i Danmark. Ekstern konsulent fra det amerikanske rådgivende ingeniørfirma Veizades and Associates, Inc., San Francisco, blev derfor tilknyttet i detailprojekteringsfasen samt ved anlægsarbejdets opstart.

Blind-hole

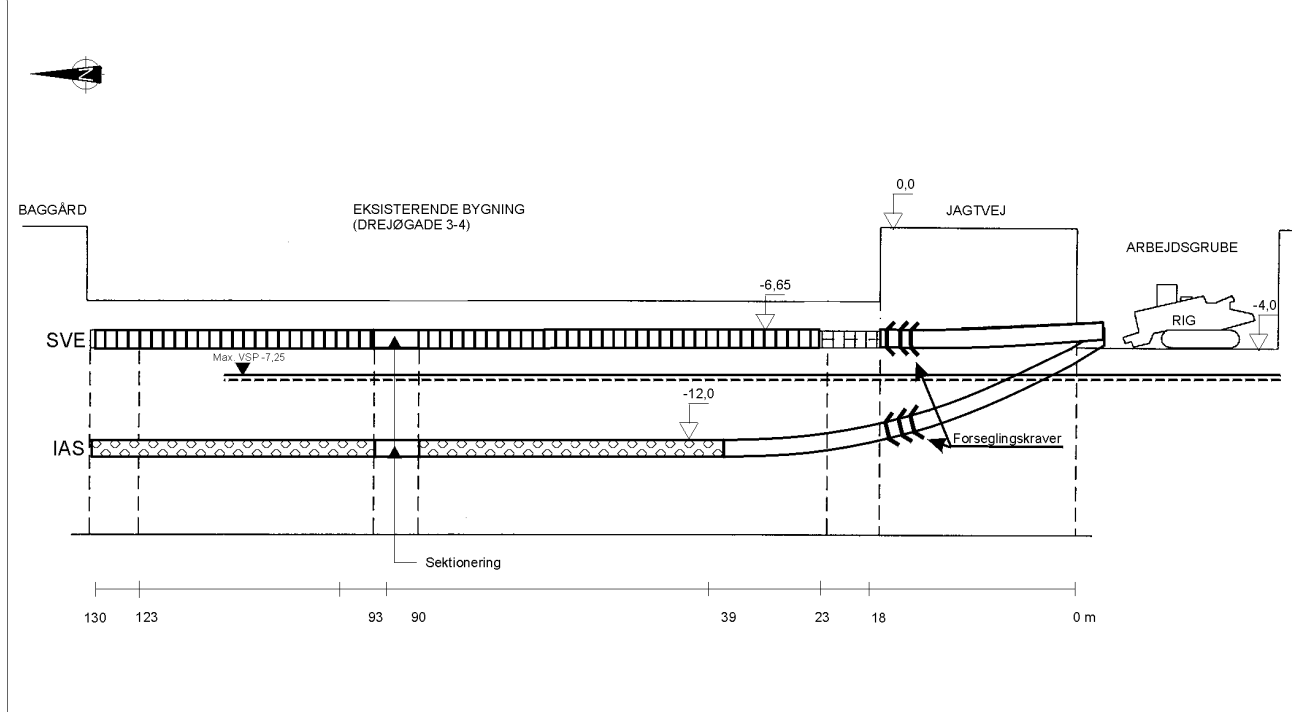
Ved blind-hole teknik etableres kun afsendergrube og intet exit-hul. Filterinstallationen udføres derfor ved at skubbe filtret ind i et forboret pilothul fremfor, som ved traditionel retningsstyret underboringsteknik, at installere filtre ved at trække disse efter en reamer.

Borerig

En borerig, som minimum fa. Vermeer, type D50X100 Navigator, blev i udbudsgrundlaget anbefalet for at sikre en nødvendig trykstyrke, min. 13.000 Nm, henholdsvis en nødvendig trækstyrke, min. 160.000 Nm. Disse tryk- og trækstyrker blev i samråd med den amerikanske konsulent vurderet nødvendig for at kunne løse den aktuelle specialopgave. Desuden blev det præciseret, at boreriggen skulle udstyres med nødvendige specialværktøjer, samt 2 sæt borestænger a 150 m i ø 50 mm henholdsvis ø 60 mm.

Arbejdsgrube

Boreriggen skulle anstilles i 4 m dybe arbejdsgruber, for at sikre, at tilstrækkelig længde airspargingboringer kunne etableres 12 m.u.t. Dette udgangsniveau for boreriggen var betinget af, at der maksimalt kunne bores med en krumningsradius på 91 m, grundet borestængernes naturlige stivhed, jf. figur 4.10.



Figur 4.10 Placering af SVE og IAS-boringer. Snit
(Alle koter er anført i relative koter i m) ikke målfast

Arbejdsmiljø

Før borearbejdets opstart skulle entreprenøren udarbejde plan for sikkerhed og sundhed, hvori forskrifter for ophold i arbejdsgrube, håndtering af forurenede boremudder m.v. var specificeret.

Pilothul

Pilothul skulle etableres ved fremboring med 9" borehoved ("spade"), som påmonteres første borestang. Borehovedet er forsynet med dyser for kontinuerlig fremføring af boremudder og -vand. Bag borehovedet monteres sonde samt wirekabel for navigation/styring af pilothullet under borearbejdet. Efter komplet fremboring retrækkes borehovedet og borestænger og et åbent pilothul er etableret.

Boremudder

Et biologisk nedbrydeligt boremudder, type Xanthan Gum (vandbaseret polymer) i blandingsforhold 1:70 med vand, blev foreskrevet. Dette mudder blev valg pga. dets hurtige nedbrydningsevne (ca. 12 timer), dets evne til at stabilisere pilothullets vægge, selv ved boring under grundvandsspejlet i sandet formation. Endeligt er smøreevnen god, hvorved friktionsmodstand mellem pilothuls vægge og monterede filter/blindrør reduceres væsentligt. Disse egenskaber er tidligere dokumenteret ved gennemførelse under lignende forhold /ref. 4/. For at sikre tilstrækkelig kontinuerlig boremudderproduktion skulle min. 12 m³ specialkar udstyret med mixerarrangement samt div. fødepumper anstilles. Returledt boremudder, produceret ved boring af pilothul samt under selve filterinstallationsprocessen, skulle opsamles til tæt grube og mellemdeponeres i overdækkede containere, før slutdeponering hos godkendt(-e) modtage(-re). Grundet det høje sandindhold var direkte afledning til kloak ikke mulig.

Navigation af pilothul

Lokalisering og styring af pilothullet blev foreskrevet udført med et magnetisk søgesystem, Fa. Sharwell, omfattende wireline-system med tilhørende walkover-system. Et sådant wireline søgesystem blev vurderet nødvendigt for sikring af præcist signal i de aktuelle dybder under et armeret bygningsfundament. Magnetiske forstyrrelser samt dårlige afgangforhold langs traceerne gjorde, at navigation alene vha. trådløse signaler til et traditionelt walk-over system blev forkastet.

I vertikal plan var krav til max. afvigelse fra projekterede kote +/- 0,5 m, mens krav i horisontalt plan maksimalt måtte afviges +/- 0,05 m fra fastlagte tracé. Større afvigelser på koter i horisontalt plan for jordventilationsfiltre (SVE-filtrene) kunne medføre, at uacceptable "lunker" kunne opstå, og hermed medføre risiko for dannelse af lokale områder langs filtrene, hvor vand og partikler kunne ansamles og medføre uensartede ekstraktionsbetingelser samt eventuel tilklogning.

4.2.2 Filterdesign

Airsparging filtre

Filterrør i ø165 PVC, PN10, ($D_i=146$ mm) blev foreskrevet. Som en meget vigtig del af designet af airsparging-filtrene (IAS-filtrene), blev antal, størrelse og afstand mellem hullerne i filtrets længde beregnet, således at ensartet flow langs filteret blev opnået. Metoden er nærmere beskrevet i Appendix 8. Der blev foreskrevet ø3 mm huller udboret med 9 cm's afstand på sektionerne med det høje flow (340 m³/t) og 28 cm's afstand på sektionerne med lavt flow (35 m³/t). Hullerne blev foreskrevet udboret spiralformet (60° interval) omkring filteret for at sikre en jævn strømning vinkelret ud fra filtrene. Samtidig blev der foreskrevet montage af specielle amerikanske "sparge-inserts" (filtre) i hvert udboret spargehul, for herved at undgå transport af fine sandkorn ind i disse filtre.

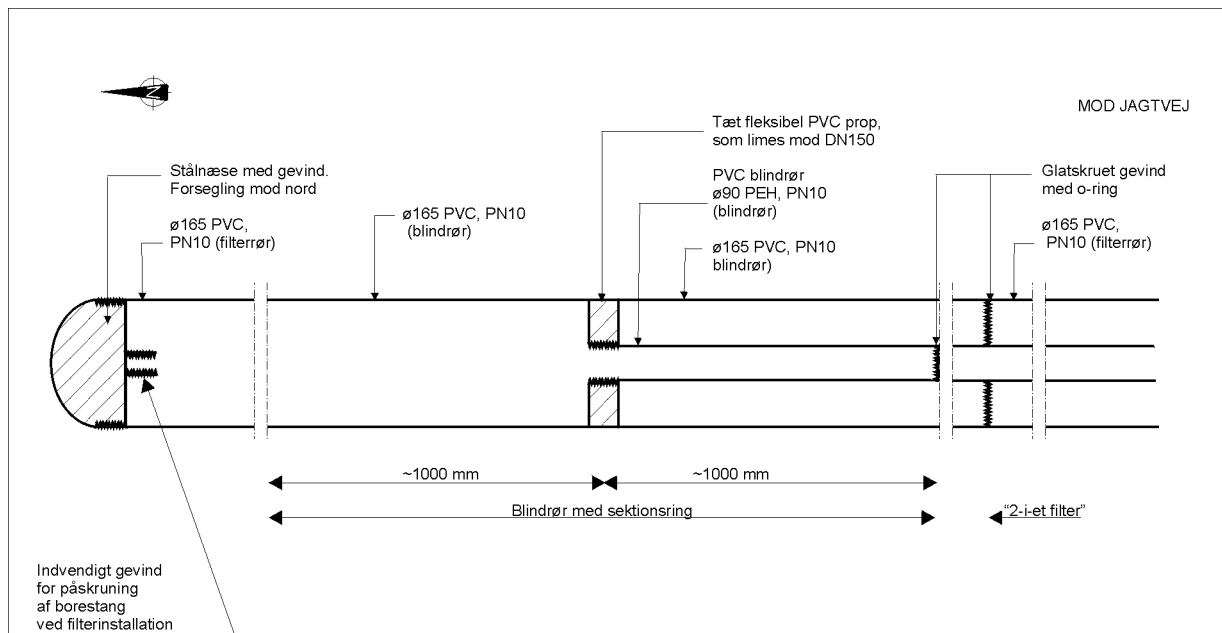
Jordventilationsfiltre

SVE-filtre blev foreskrevet udført i ø165 PEH, PN10, med påsvejst engelsk Hydroquest filtervæv med maskevidde på 0,025 mm. Dette valg blev truffet for at eliminere risiko for indtrængning af sand og silt-fraktioner. Ligeledes har tidligere erfaringer /ref. 4/ vist, at dette filter er meget velegnet til installation i de forekomne jordbundsforhold (morænesand). Med den valgte filterdimension vurderes det valgte filter at give en ensartet indstrømning langs hele filterlængden.

"2-i-et-filter"

Hvert IAS- og SVE-filter skulle udføres med "2-i-et filter" opbygning (sektionering, for at sikre mulighed for uafhængig regulering af flow til/fra filterafsnittet monteret nord henholdsvis syd for sektioneringen, jf. figur 4.11.

Alle filtre skulle pr. 3 lbm samles med glatskruet gevind og O-ring for tæt, fleksibel og glat samling.



Figur 4.11 Principopbygning "2-i-et filter" med angivelse af forsegling mod nord (=blinde ende)

Blindrør

Som rørføring fra filterafslutning og frem til terræn ved behandlingsanlægget blev anvendt $\varnothing 165$ PVC, PN10, blindrør, henholdsvis $\varnothing 90$ PEH, PN10, blindrør. Blindrørene blev gevindsamlet som tidligere foreskrevet for filterne.

Indpresning af filter

4.2.3 Filterinstallation

For at minimere risiko for kollaps af pilothullet blev filterinstallationen foreskrevet udført straks pilothulsoptionen var afsluttet. Filterindpresningen skulle udføres ved på først installeret rørsektion, en blindrørssektion på 3 m, at påskruer en specialfremstillet stålnæse (udformet med afrundet hoved), hvorpå der indvendigt var påsvejest gevind for påskruing af boreriggens første borestang. Under indpresningen skulle boreriggen trykkes direkte på rørgodset – og kun ved påtræfning af store sten o.lign. skulle pres via borestænger og direkte på stålnæsen udføres. Efter komplet filterinstallation skulle yderste borestang drejes af stålnæsen og alle borestænger returtrækkes. Stålnæsen udgør således filterafslutning/afpropning mod nord, dvs. afslutning i blind-enden.

Boringudviling

Brydning af filterkage omkring installeret filtre skulle udføres ved at injicere en 5000 ppm hypoklorid-opløsning ved højt tryk, vha. slamsuger. Kloropløsningen skulle herefter stå i filteret i 12-24 timer før renpumpning blev udført. Returledt skyllevand kunne afledes til kloak.

Forsegling

I blind-enden udgjorde stålnæsen filterforseglingen. Forsegling mod syd, dvs. mod behandlingsanlægget, skulle udføres ved montage af 3 stk. plastkraver på første blindrørssektion monteret umiddelbart i forlængelse af filteret. Forseglingsmediet, bestående af Portland cement iblandet 5% bentonit, skulle via $\varnothing 25$ mm PVC fødeslanger indpumpes fra gruben og frem til det åbne areal beliggende ovenfor plastkraverne for herved at udgøre forsegling mellem opboret pilothul og installeret blindrør over en min. 1 m strækning.

Borejournaler

Under borearbejdet skulle diverse borejournaler udfyldes af entreprenøren i forbindelse med etablering af pilothul, samt ved filterinstallations- henholdsvis boringsudviklings-procedurens afvikling, jf. appendix 2.

Pumpetest

For dokumentation af tilfredsstillende udført filterinstallation samt for verifikation af motorbestykning til behandlingsanlægget skulle korttids-pumpetest af samtlige boringer udføres ved rådgiveren. Pumpetestens varighed var foreskrevet til ca. 2 timer (flow 100-200 Nm³/h) og forventedes at kunne udføres umiddelbart efter at forseglinger mod syd (mod behandlingsanlæg) var hærdet op, dvs. ca. 1-2 døgn efter forseglingens udførelse.

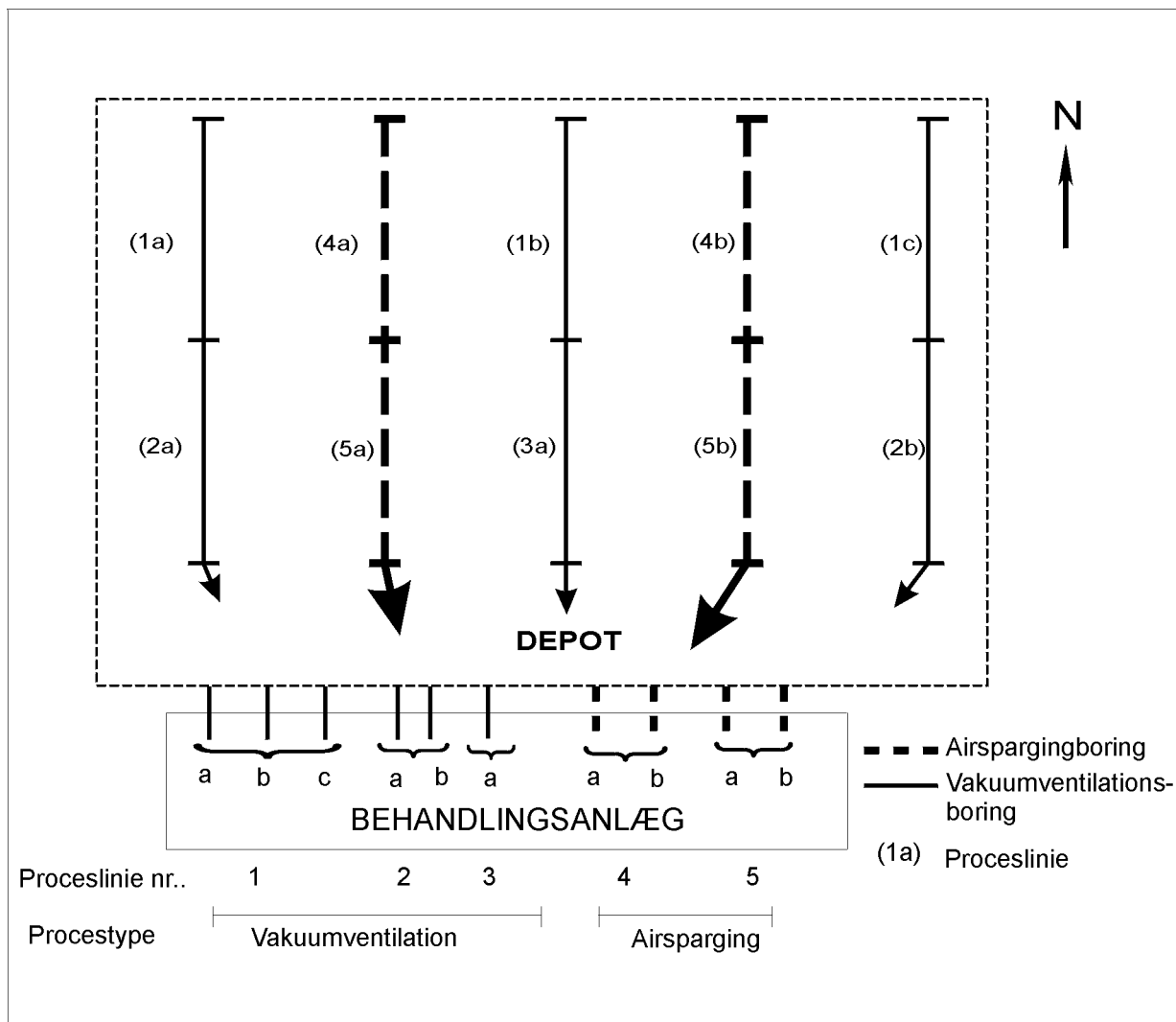
4.3 Behandlingsanlæg og SRO

Koncept

Princippet for det valgte afværgekoncept er, at der via IAS-filtre indblæses iltholdigt atmosfærisk luft til den forurenede jord under grundvandsspejlet. Efter indblæsningen stiger luften op gennem den mættede zone, som herved beluftes. Stripning kombineret med forcering af den naturlige biologiske nedbrydning for terpentin vil herved pågå, og ved hjælp af vacuumventilationen ekstraheres den forurenede poreluft fra den umættede zone. Rensning af den ekstraherede luft sker på aktivt kul. Det samlede designgrundlag for IAS- og SVE-filtre fremgår af tabel 4.8, mens tilkobling af IAS- og SVE-filtre ved behandlingsanlæg er illustreret på figur 4.12.

Proceslinie nr.	Max. flow (Nm ³ /h)	Vakuüm i boring mBar (driftssituation)	Overtryk i boring mBar (driftssituation)	Overtryk i boring mBar (opstartstryk)
1 (SVE)	300	100	-	-
2 (SVE)	300	100	-	-
3 (SVE)	400	100	-	-
4 (IAS)	100	-	400	1500
5 (IAS)	340	-	400	1500

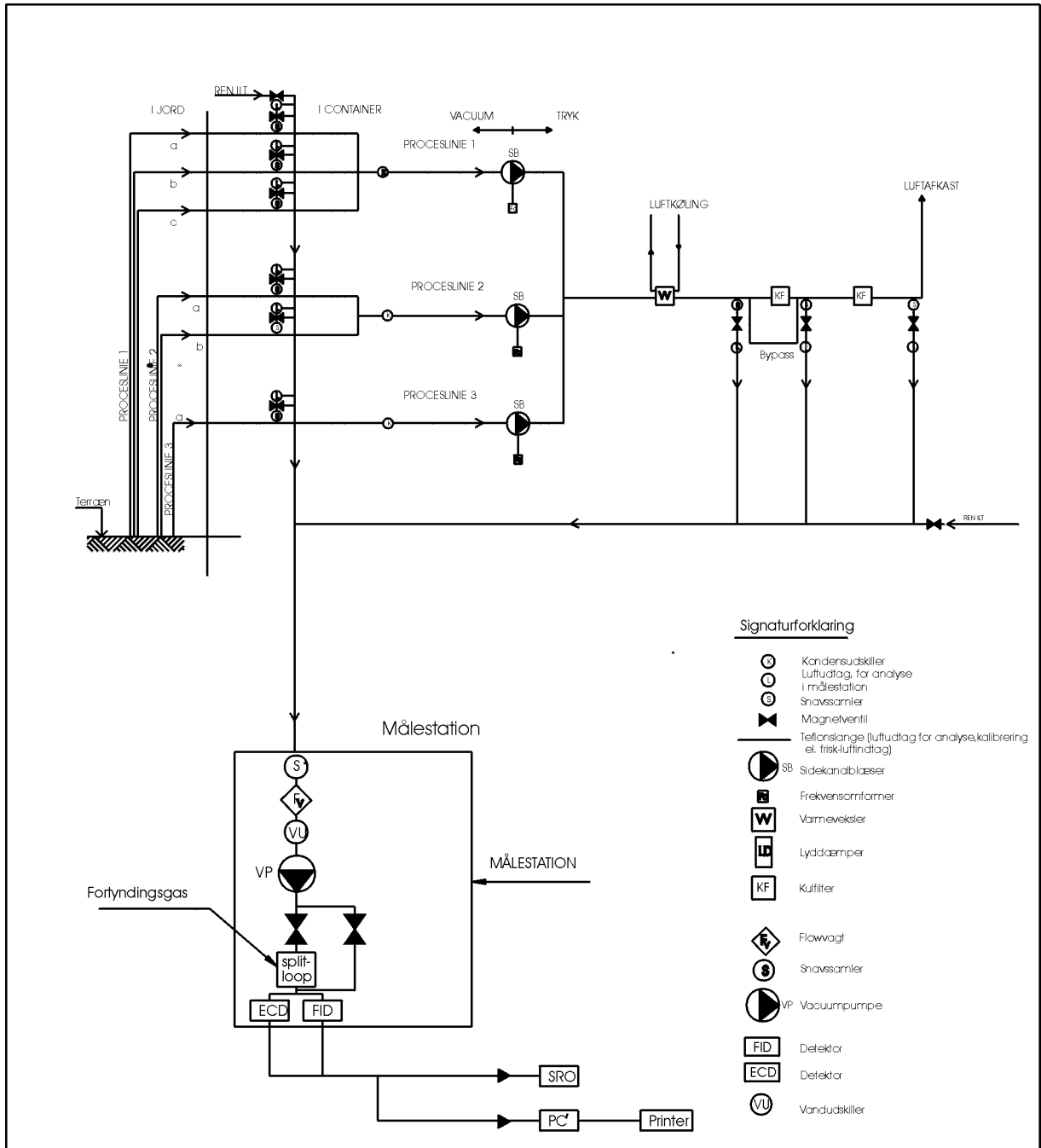
Tabel 4.8 Designgrundlag for horisontale IAS- og SVE-filtre



Figur 4.12 Boringsplacering og -tilslutning ved behandlingsanlæg. Princip

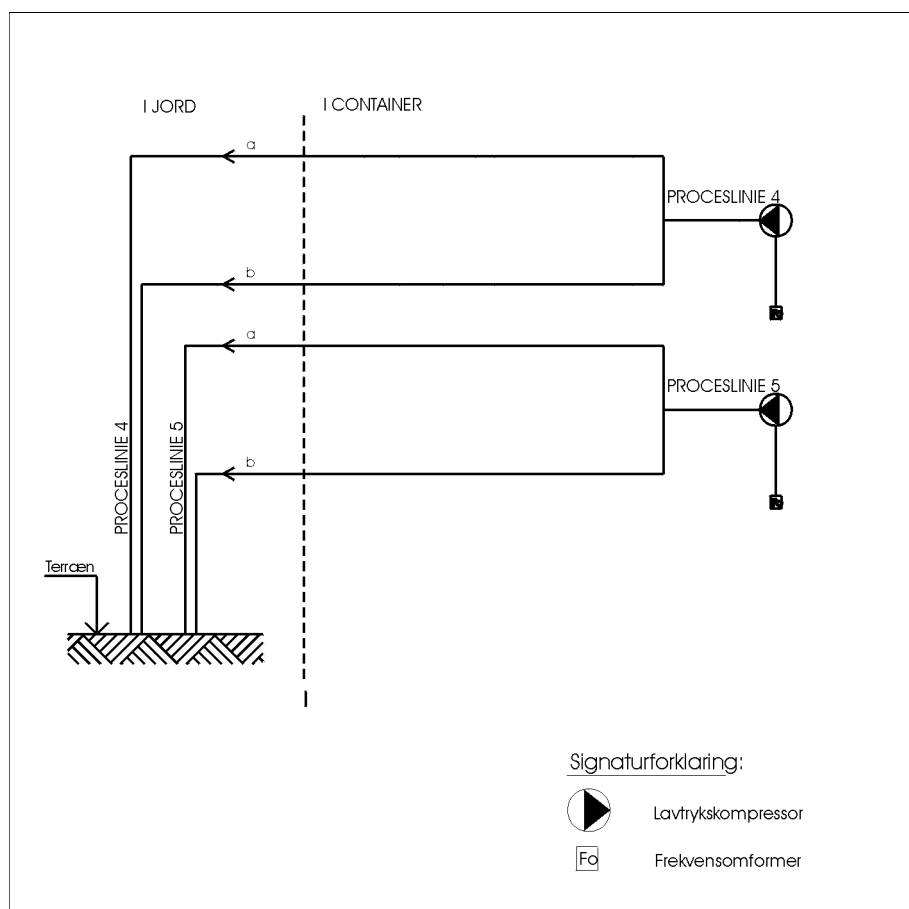
Proceslinier

Proceslinierne for vacuumekstraktion, regnet i strømningensretningen, skulle overordnet opbygges med forfilter, kondensudskiller, sidekanalblæser, varmeveksling og med afsluttende oprensning af ekstraheret luft i 2 serieforbundne aktive kulfiltere. Airsparging-proceslinier er foreskrevet opbygget med lavtrykskompressorer. Principskitser for de 2 proceslinietyper er vist i figur 4.13 og 4.14.



Figur 4.13 Proceslinier for vakuumentilation

Motorvalget blev truffet på baggrund af en gennemført anlægs- og driftsøkonomisk vurdering af sidekanalblæsere contra oliesmurte kapselblæsere. Med en forventet driftsperiode på 2 år ville anlægsinvesteringen forbundet med installation af kapselblæsere medføre en samlet merudgift på ca. 100.000 kr. i forhold til sidekanalblæsere, hvilket ikke vurderedes at kunne opvejes af driftsbesparelsen. Den reelle elbesparelse ved den forventede driftscyklus vurderes således til 40-50.000 kr./år, såfremt kapselblæsere installeres fremfor sidekanalblæsere. Men idet kapselblæsere kræver væsentligt hyppigere servicetilsyn for tjek af oliestand m.v., en merudgift, som skønnes at ville beløbe sig til 20-30.000 kr. årligt, i forhold til servicering af sidekanalblæsere. Baseret på ovenstående blev sidekanalblæsere, som fa. Siemens, type Elmo, valgt. Foreskrevne motorer skulle have en reservekapacitet på 20%.



Figur 4.14 Proceslinier for airsparging /Ref. 1/

Aktivt kul

Oprensning på aktivt kul, fa. Chemviron, type WS45, blev valgt, idet tilbageholdelseevnen for chlorerede forbindelser, her overvejende PCE, erfaringsmæssigt er høj, typisk 20-25%, afhængig af luftens temperatur, luftfugtighed og koncentrationsniveauet i mediet. 2 kulfiltre (a 300 kg kul, fa. Chemviron) opstilles i serie, og forsynes med omkoblingsmulighed, for herved at kunne opbruge kapaciteten i kullene bedst muligt.

GC'er

For tilfredsstillende dokumentation/overvågning af oprensningen blev on-line prøvetagning fra de i alt 3 SVE-proceslinier til permanent installeret GC'er foreskrevet. GC'eren skal udstyres med komb. FID- og ECD-detektor, og analyseresultater skulle down-loades til PC'er, opstillet på anlægget.

SRO SRO-anlæg skal sikre Styring, Regulering og Overvågning af anlægget med overførsel af kontinuerligt loggede driftsdata samt opståede alarmer til driftsansvarlige hovedstation. Nærmere beskrivelse heraf findes i appendix 3.

Opbygning af anlæg Behandlingsanlægget etableres i en 30 fods rumopdelt specialcontainer, hvor manifold, motorbestykning, kondensudskillere og varmeveksler monteres i et rumafsnit, mens målestation, hovedtavle og kulfiltre monteres i et andet. Denne opdeling er valgt for at adskille støjende og kraftigt varmeudviklende komponenter fra varme- og støvfølsomme komponenter. Anlægget er lyddæmpet i forhold til gældende støjkrav.

Drift-og vedligeholdelsesmanual - Behandlingsanlæg Disposition herfor er vedlagt i appendix 4.

4.4 Drifts- og monitoringsprogrammer

Drift-og monitoring - Behandlingsanlæg **4.4.1 Anlægsovervågning** For at sikre et nødvendigt datagrundlag for vurdering af de afprøvede teknikker, skal den driftsansvarlige en gang om ugen fremsende driftsrapport i elektronisk form. Det overordnede dataomfang fremgår af appendix 3. Supplerende manuel monitoring af driftsdata, (kuldioxid, ilt, PID, manuel prøveudtag til kulfilter m.v.) vil ligeledes pågå 1-4 gange pr. måned, afhængig af aktuelle driftscyklus.

Feltprocedure **4.4.2 Grundvandsmonitoring** Samtlige vandprøver udtages ved at drive Montejus-pumperne med komprimeret kvælstof af laboratoriekvalitet. Der renpumpes ca. 10 l, svarende til ca. 5 tømninger af pumpekammeret. Under renpumpning måles feltparametre (ilt, temperatur, pH) i en gennemstrømningsbeholder. Borin- gens pejlerør kontrolleres før prøvetagning for eventuel fri olie. Prøveflasker transporteres på udtagningsdagen i køletasker til laboratoriet for analyse.

Analyseprogram Der er sammensat et analyseprogram bestående af 5 enkeltgrupper (A-E) som vist i tabel 4.9. Samtlige analyser udføres som akkrediterede analyser. Parametrene er valgt ud fra erfaringerne fra de indledende analyser. Grupperne A og E er medtaget for at kunne vurdere ændringer i den generelle vandkemi, som har betydning for den naturlige nedbrydning af både oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler.

A		B	C	D	E
Makroioner m.v.		Oliekomponenter	Chl. opløsningsmidler	Nedbrydn. produkt af chl.opl.midler	Spec. parameter
Ilt	Agg.kuldioxid	Benzen (B)	Tetrachlorethylen (PCE)	Vinylchlorid (VC)	Ethen
Nitrat	Methan	Toluen (T)	Trichlorethylen (TCE)	Cis-1,2-dichlorethylen (Cis-1,2-DCE)	Ethan
Mangan	Bicarbonat	Ethylbenzen (E)	Tetrachlormethan (PCM)	Trans-1,2-dichlor- ethylen (trans-1,2-DCE)	Brint
Jern	PH	Xylener (X)	Trichlorethan(1,1,1 TCA)	1,1-dichlorethylen	
Sulfat	NVOC	Totalindhold (THC)	Trichlormethan (TCM)	(1,1 DCE)	

Tabel 4.9 Grundvand. Parametre i monitoringsprogrammets enkeltgrupper (A-E)

Analysefrekvens Der er planlagt kvartalsvise prøvetagningsrunder for parametrene i grupperne B og C, mens gruppe D kun gennemføres for de filtre, hvor der tidligere er påvist nedbrydningsprodukter. Ved hver runde prøvetages halv-

delen af filtrene, således at hvert filter prøvetages 2 gange årligt. Samlet bliver der udtaget 6 prøver pr. filter over den forventede driftsperiode på 2 år. Analysegrupperne A og E vil blive udført for et mindre antal prøver.

4.4.3 Poreluftmonitoring

Feltprocedure

Poreluftprøver udtages efter renpumpning i ca. 10 min. ved en ydelse på 1 l/min., dvs. 10 l prøveudtag. Under renpumpningen måles feltparametre (ilt, kuldioxid og methan), samt totalindhold af flygtige kulbrinter (PID, 10,2 eV). Der opsamles umiddelbart efter renpumpningen 10 l luft på SKC mellem kulrør (anasorb csc, Cat. no. 226-09). Kulrørene opbevares på køl indtil fremsendelse til laboratorium.

Analyseprogram

Som for grundvandet er der sammensat et analyseprogram, jf. tabel 4.10. Parametrene er fastlagt ud fra de tidligere undersøgelser. Analyser foretages ved desorbition med dimethylformamid og efterfølgende detektion ved gaschromatografi (GC/FID). Der er som led i projektet gennemført et forsøg med samtidig analyse af samtlige parametre i tabel 4.11. Det blev påvist, at alle stofferne kunne detekteres og kvantificeres på denne måde, herunder vinylchlorid. Der er derfor analyseret for de viste stoffer i alle udtagne poreluftprøver. Detektionsgrænser for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter er ca. 0,5 mg/m³ og ca. 0,05 mg/m³ for BTX'er. Analyserne udføres som akkrediteret analyse.

Chl. Opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter		Oliekomponenter	
Tetrachlorethylen	(PCE)	Benzen	(B)
Trichlorethylen	(TCE)	Toluen	(T)
Trichlormethan	(TCM)	Xylener	(X)
		Totalindhold	(THC)
Vinylchlorid	(VC)		
cis-1,2-dichlorethylen	(Cis-1,2-DCE)		
trans-1,2-dichlorethylen	(trans-1,2-DCE)		
1,1-dichlorethylen	(1,1-DCE)		

Tabel 4.10 Poreluft. Parametre i monitoringsprogrammet

Analysefrekvens

Der er planlagt samme analysefrekvens som for vandprøver, dvs. hvert filter prøvetages halvårligt. Samlet vil der blive analyseret 6 prøver fra hvert filter over den forventede driftsperiode på 2 år.

5 Anlægsfasen

5.1 Monitoringsboringer

Boremethode

Til montering af de præfabrikerede filtre blev anvendt en 7" hulsnegl (ø160 mm indvendig). Ved boring i kældre og lignende blev der anvendt en mini-borerig af typen GeoDrill. Hvor forholdene tillod det, blev der anvendt en UniMog. Der blev boret til max. ca. 15 m, og specielt den lille borerig havde til tider svært ved at forcere stenede horisonter. Endvidere var der til tider problemer med at bundproppen af træ blev presset ud under borearbejdet, hvorved filterinstallation blev forhindret.

Filterinstallation

Efter at have nået ønsket boreddybde, blev der fyldt vand i hulsneglen til lige over grundvandstanden i magasinet, og bundproppen blev slået ud med et jernrør. Herefter blev det færdige filtersystem langsomt sænket ned i hulsneglen, hvorefter alle slanger blev skåret af ved terræn og hulsneglen langsomt roteret op.

Gruskastning

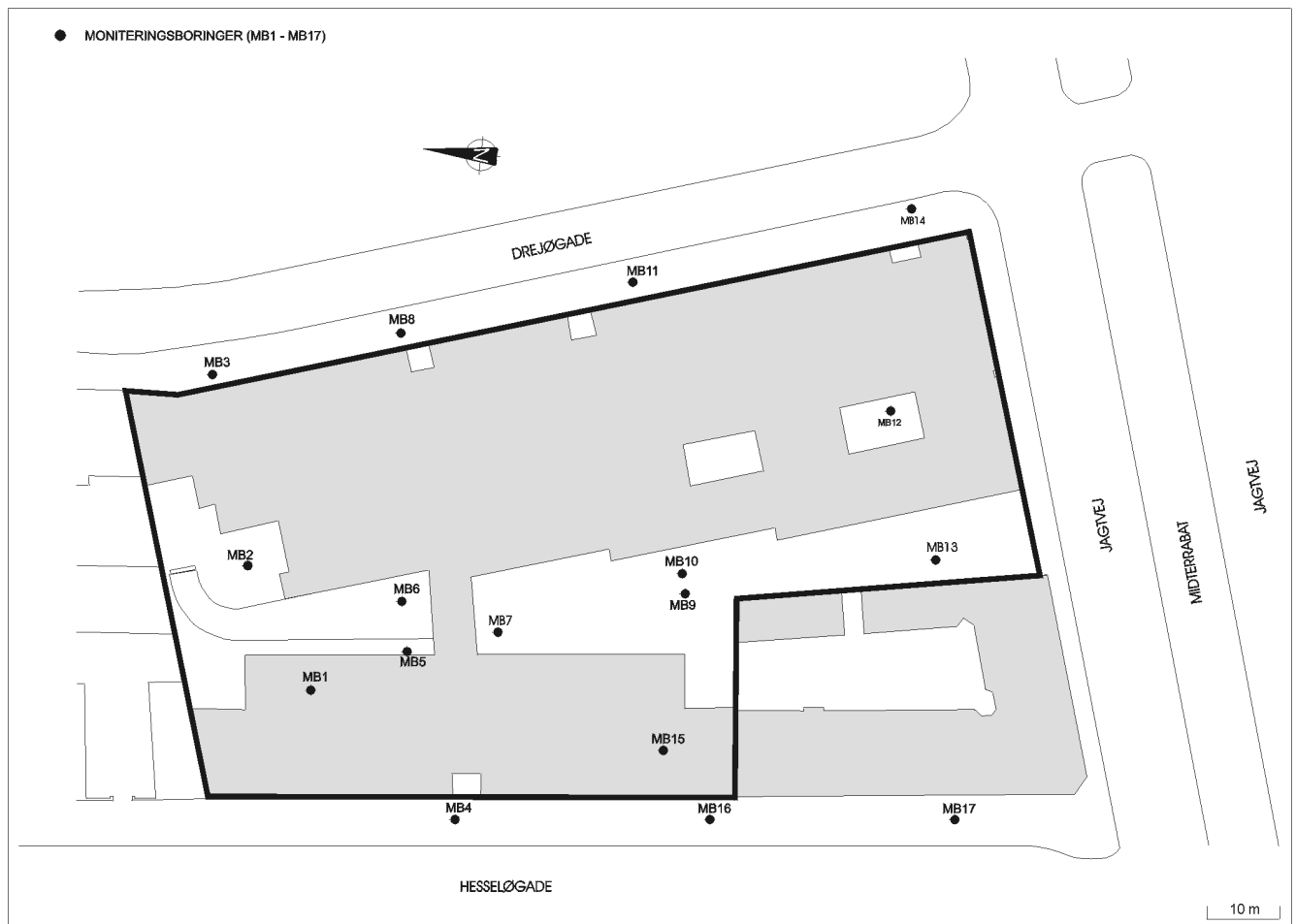
Det gennemborede sandlag i den umættede zone faldt ikke sammen omkring filterne, og det var derfor muligt at gruskaste med quartssand fra ca. 75 cm over og under de 0,50 m lange filtre i den umættede zone. Mellem gruskastningen i de to øverste filtre blev der placeret 0,5 m bentonitpiller. Omkring Montejus-pumpesystemerne i den mættede zone danner formationen en naturlig gruskastning.

Filterniveauer

Da samtlige monitoringsboringer var planlagt til at have hvert enkelt specifikt filterniveau i samme kote, blev samtlige koter til borestederne omtrentligt skønnet inden opstart af borearbejdet. De projekterede koter for center af filterne og de faktisk opnåede fremgår af tabel 5.1. De realiserede koter er her gennemsnitskoterne for samtlige monitoringsboringer (MB1-MB17). Det vurderes, at der er en afvigelse på max. ± 25 cm i dybden til de enkelte filtre. Placeringen af monitoringsboringerne fremgår af figur 5.1.

Filterkode	Projekteret (kote m)	Realiseret (kote m)	Bemærkninger
Sort	9,75	9,50	Umættet zone
Grøn	7,25	7,00	
Gul	4,75	4,50	
Hvid	2,35	2,10	Mættet zone
Rød	-0,15	-0,40	
Blå	-2,65	-2,90	
SVE-filtre	5	~ 4-5	Niveau for hhv. airsparging (IAS) og ventilation (SVE)
IAS-filtre	0	~ 0	
Grundvand	-	3,30	Gns. grundvandstand april 98

Tabel 5.1 Monitoringsboringer. Filterniveauer i forhold til vandrette afværgeboringer



Figur 5.1 Placering af installerede monitoringsboringer (MB1 - MB17)

Jordprøver

På grund af den valgte hulsneglsteknik er det generelt vanskeligt at udtage niveauspecifikke jordprøver under arbejdet. Der er dog til karakterisering af forureningen udtaget i alt 12 jordprøver til analyse for chlorerede opløsningsmidler og olieprodukter med forboring med almindelig snegl.

Afslutning

De specielt fremstillede flanger sikrede en nem opføring af de mange slanger til selve brønden. Overkant af $\varnothing 32$ mm PEL-slange blev nivelleret og dataloggere blev indpakket i små plastikposer og placeret ved siden af slangerne i afslutningerne.

Defekte filtre

Desværre viste det sig ved første renpumpning, at i alt 6 af de installerede 45 enkeltfiltre var defekte, idet tilførslen af kvælstof ikke kunne drive grundvandet til terræn. Årsagen hertil er ukendt, men kan skyldes klemte slanger.

5.2 Vandrette boringer

I nærværende afsnit beskrives hvilke entreprenørfirmaer, der har udført entreprisen for borearbejdet henholdsvis behandlingsanlægget. Ligeledes orienteres om beboerinformation, samt væsentligst om de korrektioner til foreskrevne udbudsgrundlag (jf. tidligere afsnit 4.2), som blev udført under anlægsarbejdets udførelse.

<i>Udbud</i>	Borearbejdet blev udbudt i fagentreprise i indbudt licitation, og blev i perioden 25. september til midt december 1997 udført ved NNC/Rasmussen & Schiøtz, Anlæg. I det følgende er redegjort for de erfaringer, der er indhentet under entreprisens afvikling.
<i>Beboerinformation</i>	Beboerne blev før anlægsarbejdets opstart via nyhedsbrev informeret om arbejdets omfang og tidsplan. Fra arbejdets opstart indløb alligevel beboerklager vedrørende uacceptable støjgener - hvilket var berettiget. Støjen var primært forårsaget af anvendelse af kritisk støjende maskiner (specielt slamsuger), samt udført arbejde uden for tilladt arbejdstid. Disse uacceptable forhold blev stoppet, idet arbejdet blev tilrettelagt, således at arbejdsgange blev afsluttet rettidigt, ligesom mindre støjende maskiner blev benyttet (dvs. slamsuger og generator).
<i>Arbejdsgrube</i>	Gruben blev overdækket med pressing og udstødning fra boreriggen ført i specialslange frem til afkast i det fri. Under hele borearbejdet blev gruben aktivt ventileret og forureningsniveauet i gruben løbende overvåget ved stikprøvekontrol.
<i>Pilothul</i>	I de planlagte traceer blev der i alt boret ca. 690 lbm 9" pilothul, samt ca. 270 lbm 10" pilothul. Under borearbejdet trak boreriggen med max. 25,7 ton og trykkede med max. 15 ton. Opboring af pilothul fra 9" til 10" blev udført, hvor uforudsete stenformationer blev påtruffet, for herved at sikre bedre pladsforhold under filterinstallationsprocessen. En metode, som viste sig velegnet, men samtidigt krævede stort boremudderforbrug. Generelt blev det nødvendigt at genopbore alle pilothuller en gang, idet første fremboring over ca. 150 m typisk varede 10-15 timer, hvorfor filterinstallation, grundet myndighedens krav til arbejdstid for anlægsaktivitet, ikke kunne udføres i direkte forlængelse af pilothulls-etableringen. En genopboring af pilothullet varede typisk 3-5 timer, incl. returtrækning af borestænger.
<i>Boremudder</i>	Boremudder med viskositet på 60 og i blandingsforhold 1:130 med vand, mod projekteret 1:70, blev anvendt. I alt 2310 kg boremudder samt 350 m ³ vand er injiceret under borearbejdet – og 90% heraf returledt til gruben efter afsluttet bore- og filterinstallation. Håndtering og slutdeponering af boremudder påførte projektet en merudgift på ca. kr. 150.000,- mod budgetteret ca. kr. 100.000. Den store overskridelse skyldes, at alle pilothuller skulle opbores og så genopbores før filterinstalltion kunne udføres i den aktuelle geologi. I projektet var det oprindeligt påregnet, at genopboring af pilothuller ikke var nødvendige. På fremtidige projekter bør denne udgift kunne reduceres ved enten at afvande boremudder på pladsen eller på nærliggende renseanlægs slambed. Forceret afvanding kan i den forbindelse udføres ved tilsætning af kloropløsning. Afledning af vand kan ske til kloak, forudsat udledningstilladelse foreligger, samt at sandpartikler er udfældet. I forbindelse med større projekter bør genbrug af boremudder overvejes. Ligeledes bør opslugning af overskydende boremudder fra tæt sump i grube og til container ikke udføres med slamsuger, idet dette giver uacceptable støjgener. Lænsepumpe, eventuelt forsynet med støjafskærmning, bør overvejes, hvis arbejder udføres i et tæt bebygget område.
<i>Navigation af pilothul</i>	Navigationssystem, fa. Digitrack, med kombineret wireline system og walk-over locator blev anvendt. Selv med dette system faldt signalet ud, grundet lokalt kraftige magnetiske forstyrrelser ved boring under armeret betonfundament. På disse strækninger blev fremboring udført i blinde, men pga. borestængernes naturlige stivhed blev max. afvigelse i horisontalt plan

på +/- 1 m konstateret, mens max. afvigelser i vertikal plan blev på +/- 0,1 m. afvigelser som var acceptable, de faktiske jordbunds- og navigationsforhold taget i betragtning.

Filterinstallation

I alt er installeret 81 lbm filter pr. IAS-boring, mens der på 2 ud af de i alt 3 SVE-boringer blev installeret 96 lbm filter. Den sidste SVE-boring blev kun på 30 lbm, grundet uforudsete jordbundsforhold, jf. figur 5.2. I forbindelse med den løbende monitorering af vacuum-udbredelsen på grunden vil effekten af denne manglende filterstreng blive nøje vurderet. Det vurderes dog for nærværende, at ved enten at sætte ydelsen på SVE-filter 1b op eller alternativt at lade IAS-filter 4b køre ved lavere ydelse end fastlagt i designfasen, at acceptable indeklimateforhold samt en tilstrækkelig oprensningseffekt vil kunne opnås. Viser monitoreringen, at uacceptable indeklimateforhold skulle opstå, vil ekstra skråboringer under bygningen mod Hesseløgade blive etableret og tilsluttet separat mobilt kulfilteranlæg.

Projekterede SVE-filter, fa. Hydroquest, kunne ikke installeres, da dette blev revet itu ved installation i pilothuller, hvor der generelt blev påvist større uventede passager med stenede horisonter. Alternativt blev slidsede ø165 PVC filtre, fa. Jensen Filter, installeret. Disse filtre blev forsynet med 5 mm slidser i langsgående retning. Det effektive filterinterval var på 4%. Grundet dårlige erfaringer med forsøg på installation af Hydroquest-filtre blev det valgt ikke at montere filtervæv på SVE-filtrene. For at sikre mulighed for senere oprensning af eventuelt indsuget materiale er alle SVE-filtre derfor fremført til rensebrønde, hvorfra slamsuger kan indføre spulearrangement. Ligeledes er ekstra snavssamlere installeret på hver proceslinie inde på selve behandlingsanlægget.

Boringsudvikling

I alt 5 m³ kloropløsning blev injiceret til hver boring. En gang blev kloropløsning forsøgt injiceret før borestængerne var trukket ud. Sand trængte ind i boringen og ved returtrækning af borestænger blev ø 90 PEH blindrør, grundet øget friktion mellem borestænger og blindrør, drejet af og måtte efterfølgende genmonteres. En kritisk proces. Borestænger skal derfor altid returtrækkes før tilsætning af kloropløsning udføres.

Forsegling

Forsegling med cement-bentonit blanding mod arbejdsgruben (syd) blev udført fra forseglingsskraver og frem til bund af grube, dvs. over ca. 15 m blindrørsstrækning, mod foreskrevne min. 1 m over monterede forseglingsskraver, se tidligere fig. 4.10. Ændringen blev foretaget, idet der ved sammenholdelse af det teoretiske volumen mellem det forborede pilothul og ydervæg af det installerede blindrør med den reelt forbrugte mængde forseglingssblanding, kunne vurderes hvorvidt lækage ved skraver var opstået eller om disse sluttede tæt mod formationen.



Figur 5.2 Vandrette afværgeboringer som udført

I projektet blev alle udførte forseglinger konstateret at være tætte.

Tryktransducertest

I de færdigmonterede boringer blev der gennemført tryktransducertest, for at verificere de lægningsdybder, der var målt ved hjælp af det magnetiske søgesystem.

Tryktransduceren blev indført i IAS-boringer og trykniveauet aflæst pr. 3 lbm, regnet i filterets længderetning. Efterfølgende blev pejling af grundvandsspejl i monitoringsboringer placeret langs filtret udført, hvorefter lægningsdybden for IAS-filtrene kunne kalkuleres ved at sammenholde målte trykniveauer over de vandrette filtre med aktuelle grundvandsstand.

I SVE-filtre, som er placeret over grundvandsspejlet, blev tryktransduceren, indført i et tæt vandfyldt rør, ført til terræn og trykniveauet aflæst som beskrevet ovenfor. Kote til top af det vandfyldte rør blev indmålt og lægningsdybder for SVE-filtre kunne hermed beregnes.

Generelt var der god overensstemmelse mellem resultat fra navigationsudstyr og transducertest. Max. afvigelse på 2-5% blev konstateret.

Pumpetest på IAS-filtre

Efter ca. 1/2 times luftindblæsning ved 1,2 bar og ydelse på 5-10 m³/h kollapsede vandspejlet, og modtryk i formationen faldt til 0,3 bar. Ydelsen steg langsom til slutniveau på 50 m³/h ved 0,3 bar. Testen blev afsluttet efter 4 timer.

Pumpetest på SVE-filtre

Efter at boringsudvikling med klorudskylning m.v. var udført var formationen omkring filtrene stadig fugtig/våd og kun ubetydelige luftmængder (5-10 m³/h) kunne ekstraheres ved påsætning af op til 200 mBar vakuum.

5.3 Behandlingsanlæg og SRO

Anlægsarbejdet blev udbudt i funktionsudbud og entreprisen er udført ved ved entreprenørfirmaet A-Tek Miljø A/S. I anlægsfasen opstod der ikke væsentlige problemer.

Driftscyklus

Baseret på erfaringer fra tidligere anlæg vil IAS-filtre blive drevet ved pulserende drift, hvorved en mere ensartet beluftning samt større influensradius, med hensyn til iltning, forventes at kunne opnås. Driftsøkonomisk er denne driftsform ligeledes attraktiv. SVE-filtre drives kontinuerligt, således at der altid er undertryk i jorden. Den pulserende driftsform vil blive verificeret på baggrund af den løbende monitoring på anlægget og ude i monitoringsboringerne etableret på depotet. Som led i monitoringen på selve anlægget måles ekstraheret luftmængde fra SVE-boringerne on-line, hvorfor det vil være muligt at eftervise, om de i afsnit 4.1.4 skønnede nødvendige antal poreluftudskiftninger inden for dels det PCE- og terpentinfurede område er tilstrækkelige. IAS-filtre vil blive tilstræbt at køre om natten, hvor el-tarif er lav, idet dette er tilsluttet 3-leds-tarif forsyning.

Oprensningsniveau

Tidligere modelberegninger, hvor bidrag fra såvel konvektiv som diffusiv transport er indeholdt, har vist, at der ved en målt PCE-koncentration på ca. 0,5 mg/m³ i poreluften lige under fundamenter, vil kunne påvises PCE koncentrationer i kælderetagen, svarende til den toksikologiske grænseværdi for PCE (= 0,25 ug/m³). Et opremsningsniveau, som p.t. vurderes at

være et muligt stopkriterie for afværgetiltaget, og som skønnes at skulle afvikles over en 2-årig periode.

5.4 Bygherretilsyn

Borearbejdet blev afsluttet midt december 1997 - efter ca. 2 1/2 måneds anlægsfase, hvor fuldtidstilsyn i den indledende 3 ugers periode var påkrævet.

6 Resultater fra undersøgelsesfasen (Baseline Study)

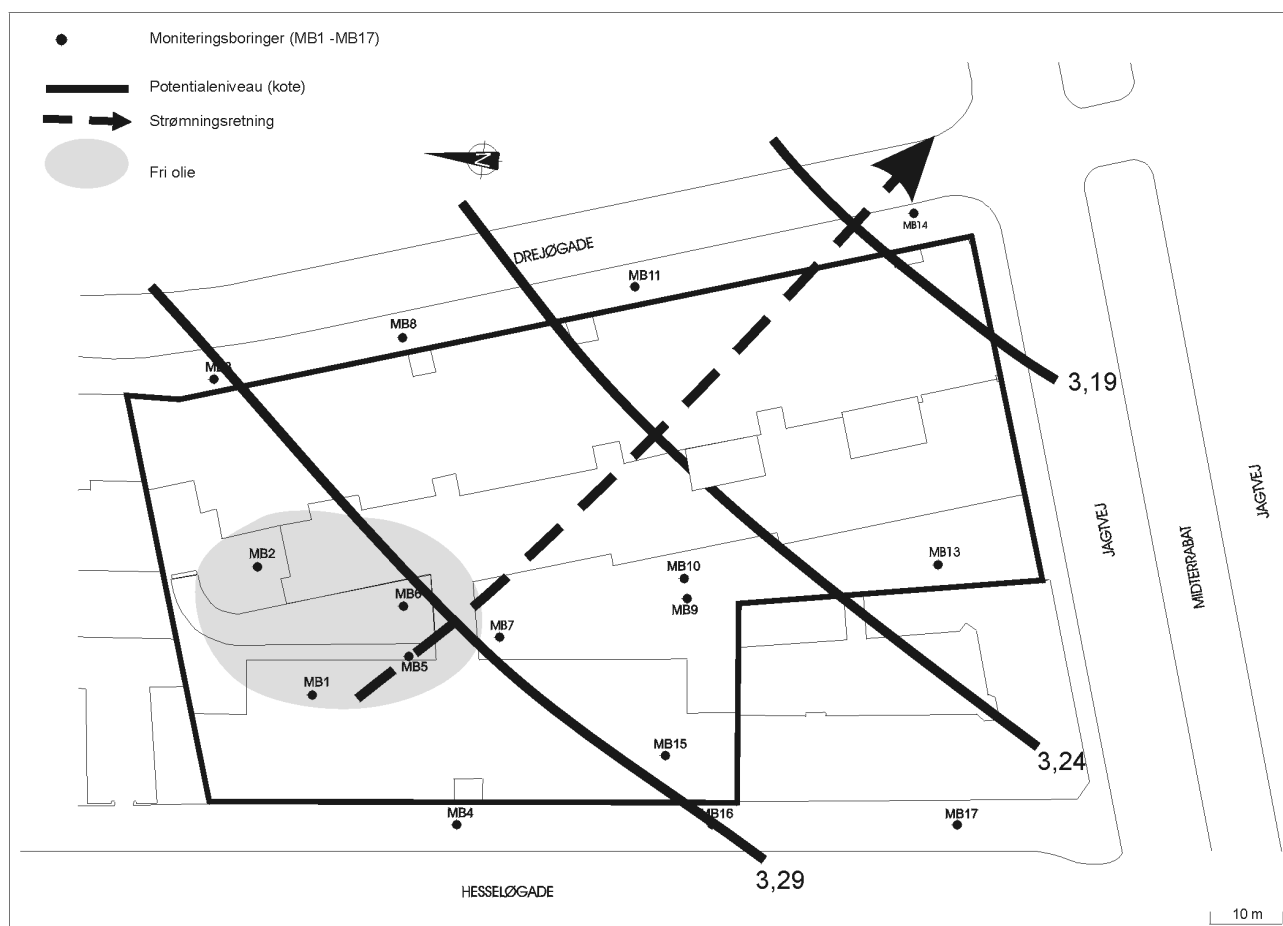
6.1 Potentialeforhold

Historiske data

I perioden 1994-97 er der observeret et svagt fald i det hydrauliske trykniveau på ca. 20 cm. Inden for oprensningsperioden (1998-2000) forventes det, at trykniveauet i værste fald kan aftage yderligere til kote ca. 2,8-3, svarende til i alt 50-70 cm.

Nuværende forhold

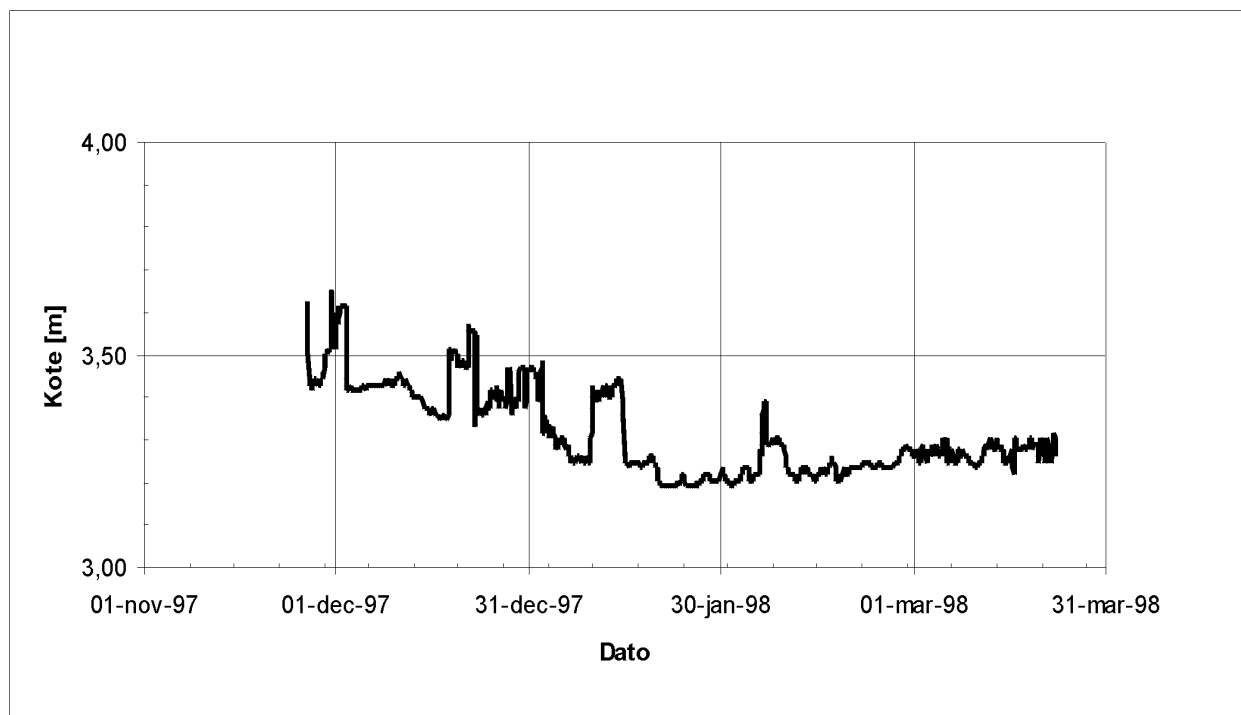
Potentialeforholdene i første kvartal af 1998 er belyst ved 4 pejlerunder i samtlige filtersatte boringer. Forholdene umiddelbart inden opstarten af anlægget er vist på figur 6.1. Strømningsretningen er syd-øst med en gradient på ca. 1,25‰. Da magasinet er det regionale primære magasin, forventes der ikke nogen større ændringer i strømningsretningen under projektførelsen.



Figur 6.1 Potentialeforhold, marts 1998

Tidslig variation

I en ældre monitoringsboring, UB3, er der fast monteret en vandspejls-transducer med datalogger. Loggeren har registreret vandspejl siden november 1997. Målingerne indtil marts 1998 er afbildet på figur 6.2. I perioden ses en vis variation i trykniveauet, men der er ikke tegn på væsentlige fluktuationer forårsaget af f.eks. nærliggende afværgeoppumpninger eller barometereffekter.



Figur 6.2 Tidslig variation i trykniveau for UB3

Strømningshastighed

Ud fra de gennemførte permeabilitetsbestemmelser ved jordventilationstesten (afsnit 4.1.2), kan den mættede hydrauliske ledningsevne, skønnes til ca. $0,5 - 5 \times 10^{-5}$ m/s. Med en gradient på ca. 1,25‰ kan grundvandshastigheden (Darcy-hastigheden) skønnes til ca. 20-200 m/år.

6.2 Jordforurening

Antal jordprøver udtaget

Ved etableringen af monitoringsboringerne (MB1-MB17) blev der udtaget i alt 12 jordprøver fra den umættede zone. At der kun er udtaget relativt få jordprøver skyldes, at boringerne er udført med hulsnegl, samt at formålet med boringerne primært var at montere filtre. Prøverne er analyseret for chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter, jf. tabel 6.1. Strategien ved prøveudvælgelse har været at få prøverne fordelt over hele grunden, og ikke kun i de tydeligt forurenede hot-spots.

Analyseresultater

Analyserne for oliekomponenter viser et niveau på op til ca. 2000-6000 mg/kg TS for indholdet af totalkulbrinter. Heraf udgør BTEX op til 5-40 mg/kg TS. Den påviste blanding har en sammensætning som terpentin. Fri fase af et terpentinlignende produkt er påvist på grundvandet i et område på den nordlige del af grunden, jf. figur 6.1.

Boring (-) Dybde (m)	MB 1 4,5	MB 1 7,5	MB 2 7,0	MB 5 4,5	MB 5 7,5	MB 6 5,5	MB 7 6,0	MB 7 8,0	MB 10 6,0	MB 12 7,5	MB 13 6,0	MB 15 7,5	Det. gr.
Oliekomponenter													
Benzen	-	-	-	-	0,46	-	-	0,19	-	-	-	-	0,05
Toluen	-	0,35	-	-	5,1	-	-	1,2	-	-	-	-	0,05
Xylener og Ethylbenzen	-	5,2	-	-	33,3	-	-	13,8	-	-	-	-	0,05
Total kulbrin- ter(THC)	-	6100	-	-	4700	-	-	2600	-	-	-	-	10
Chl. opl.midler													
Tetrachlorethylen	-	0,016	-	-	0,33	-	0,04	5,7	0,03	0,06	-	0,04	0,005
Trichlorethylen	-	-	-	-	0,30	-	-	0,10	-	-	-	-	0,005
Tetrachlormethan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005
1,1,1-trichlorethan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005
Chloroform	-	0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005

- : ikke påvist

Tabel 6.1 Jordanalyser. Prøver fra monteringsboringer (mg/kg TS) (MB1-MB17)

Der er i en enkelt prøve påvist chlorerede opløsningsmidler (tetrachlorethylen) i en koncentration op til ca. 6 mg/kg TS. I de øvrige prøver er der ikke påvist chlorerede opløsningsmidler i koncentrationer højere end ca. 0,5 mg/kg TS. Trichlorethylen er kun påvist i 2 prøver, mens chloroform er påvist som spor i en enkelt prøve.

Oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler er påvist nær grundvandspejlet (ca. 8,5 m.u.t.), hvilket er i overensstemmelse med tidligere undersøgelser.

6.3 Poreluftforurening

6.3.1 Omfang og databearbejdning

Omfang

Der er udtaget poreluftprøver fra samtlige monitoringsboringer (MB1-MB17), i alt 43 enkeltfiltre. Prøvetagningsdata, herunder feltmålinger samt analyseresultater er sammenfattet i tabelform og gengivet i appendix 5.

Bearbejdning

For at give et overblik over den store datamængde er det valgt at præsentere de væsentligste resultater og enkeltparametre som skønnede isokoncentrationskurver for hvert dybdeinterval.

6.3.2 Totalkulbrinter (oliekomponenter)

Resultatet af poreluftanalyserne for totalkulbrinter (oliekomponenter) er præsenteret på figur 6.3.

Sort filter

Dette niveau beliggende ca. 2,5 m.u.t. er kun repræsenteret i de boringer, hvor der ikke er udgravet til den eksisterende kælder. Der kan generelt konstateres et lavt indhold af totalkulbrinter (<20 mg/m³) omkring depotgrænsen. Lokalt findes to mindre områder med markant forhøjet indhold, jf. figur 6.3.

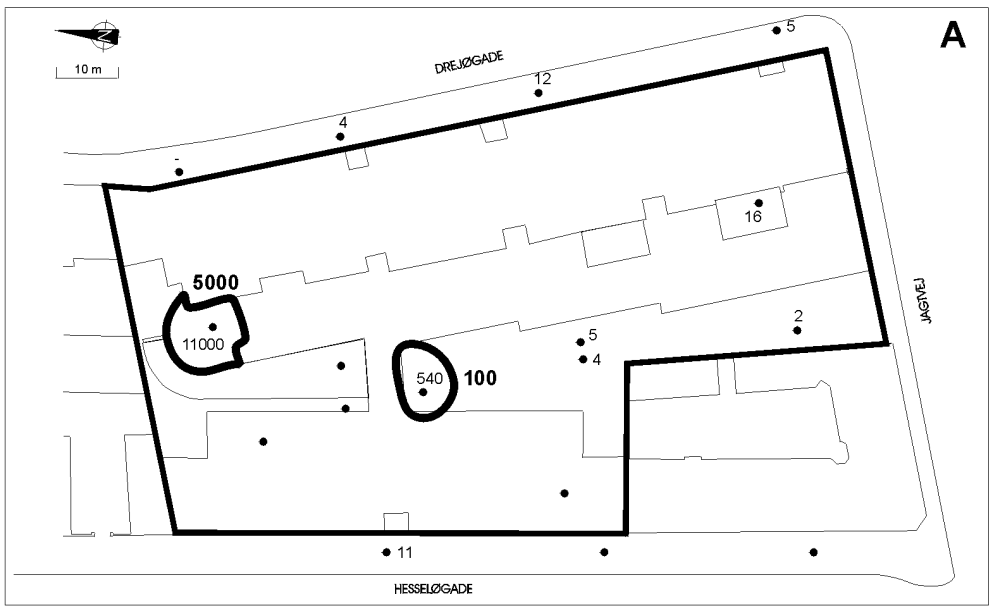


Fig. 6.3A Sort filter (kote 9,5)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Moniteringsboring
- Isokoncentrationskurve

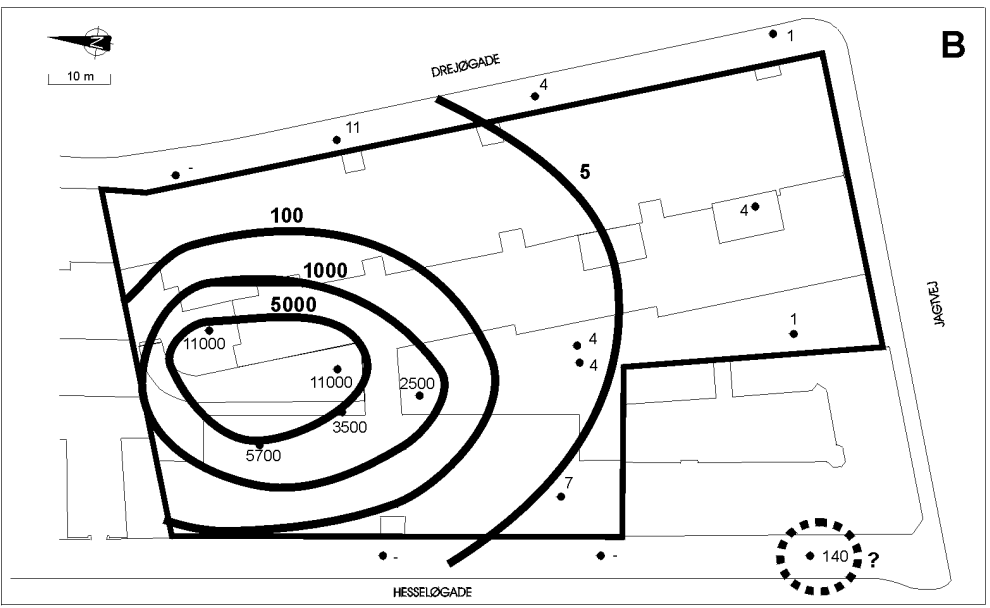


Fig. 6.3B Grønt filter (kote 7,0)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Moniteringsboring
- Isokoncentrationskurve

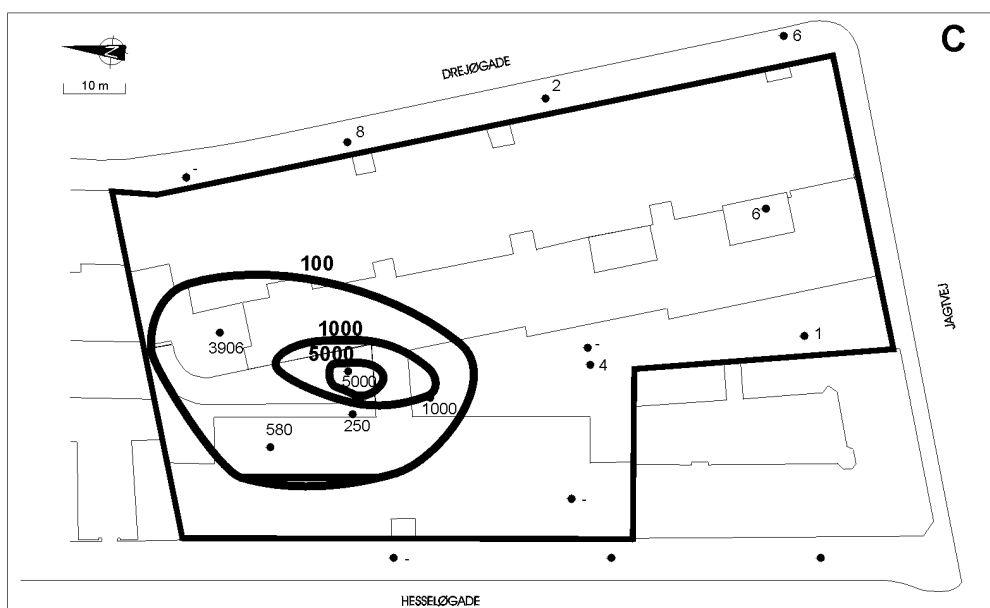


Fig.6.3C Gult filter (kote 4,5)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Moniteringsboring
- Isokoncentrationskurve

Figur 6.3 Poreluft. Indhold af totalkulbrinter (oliekomponenter) i moniteringsboringer (mg/m³)

<i>Grønt filter</i>	<p>Dette niveau er beliggende ca. 5 m.u.t. og er repræsenteret over hele grunden, idet dette er under kælderniveau. Som ved det overliggende niveau (sort filter), kan der generelt på grunden konstateres et lavt indhold af totalkulbrinter (<10 mg/m³). På den nordlige del af grunden er der et større område med koncentrationer over 100 mg/m³. Lokalt er niveauet over 5000 mg/m³.</p> <p>Uden for selve depotet kan der endvidere i Hesseløgade konstateres et uafgrænset område med et forhøjet indhold (>100 mg/m³).</p>
<i>Gult filter</i>	<p>Dette niveau er beliggende ca. 7,5 m.u.t. og svarende til ca. 1 m over grundvandsspejlet. Som for de øvrige to niveauer kan der generelt konstateres et lavt niveau (<10 mg/m³) på grunden. I et område på den nordlige del ses forhøjede niveauer (>100 mg/m³), lokalt over 5000 mg/m³.</p>
<i>Sammenfatning</i>	<p>Det generelle niveau (1-20 mg/m³) påvist over hovedparten af grunden skyldes sandsynligvis diffusion fra området på den nordlige del. Her er der tydeligt tegn på påvirkning fra den konstaterede terpentinfurening i den umættede zone samt den fri terpentin på grundvandet, jf. figur 6.1.</p>
<i>Biologisk nedbrydning</i>	<p>I området med det markant forhøjede indhold af totalkulbrinter, er der tydeligt indikation på biologisk aktivitet. Der kan således konstateres et reduceret iltindhold, forhøjet kuldioxid-indhold samt i et enkelt filter metan, jf. appendix 5. Nedbrydningsforholdene er nærmere beskrevet i afsnit 6.5.</p>
<p>6.3.3 Chlorerede opløsningsmidler</p>	
<p>Resultatet af poreluftanalyserne for tetrachlorethylen (PCE) er præsenteret på figur 6.4. I enkelte filtre er detektionsgrænsen relativt høj (100-200 mg/m³), hvilket skyldes interferensproblemer ved analysen.</p>	
<i>Sort filter</i>	<p>Der kan konstateres et lavt indhold af PCE (<10 mg/m³) omkring depotgrænsen. Lokalt i gården mellem de to karréer er der påvist et område med et markant forhøjet niveau (>500 mg/m³).</p>
<i>Grønt filter</i>	<p>I dette niveau kan der konstateres over 10 mg/m³ på størstedelen af grunden, og lokalt op til over 1000 mg/m³. På den resterende del af grunden mod nord er niveauet ca. 1-10 mg/m³.</p>
<i>Gult filter</i>	<p>Koncentrationsfordelingen viser igen et niveau over 10 mg/m³ på størstedelen af grunden, og kun på den nordligste del er niveauet under 10 mg/m³. Lokalt i gården mellem karréerne er niveauet over 4000 mg/m³.</p>
<i>Nedbrydningsprodukter</i>	<p>PCE er den dominerende forureningskomponent, og kun i enkelte filtre er der konstateret TCE på sammenligneligt niveau, hvilket vurderes at skyldes nedbrydning af PCE til TCE. Nedbrydningsprodukterne af TCE (dichlorethylen og vinylchlorid) er kun påvist i koncentrationer op til ca. 3 mg/m³, og er kun påvist i området mellem karréerne, hvor PCE-koncentrationerne er over 1000 mg/m³. Vinylchlorid ses kun i områder, hvor der er kraftigt reducerede forhold forårsaget af et højt kulbrinteindhold i den umættede zone. Netop under reducerende forhold (anaerobt) forventes nedbrydning til vinylchlorid at kunne foregå.</p>

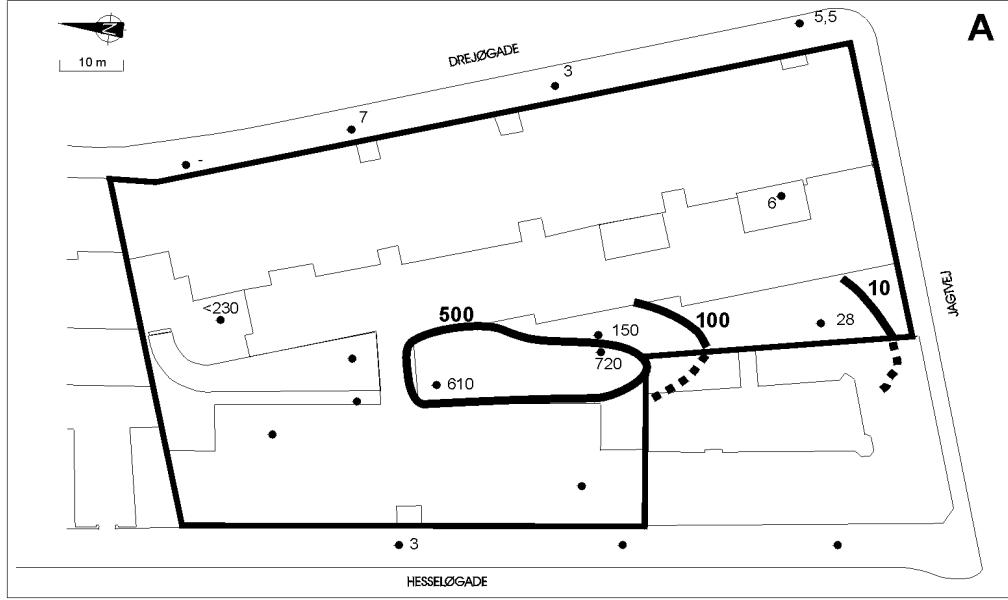


Fig. 6.4A Sort filter (kote 9,5)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Monitoringsboring
- Isokonzentrationskurve

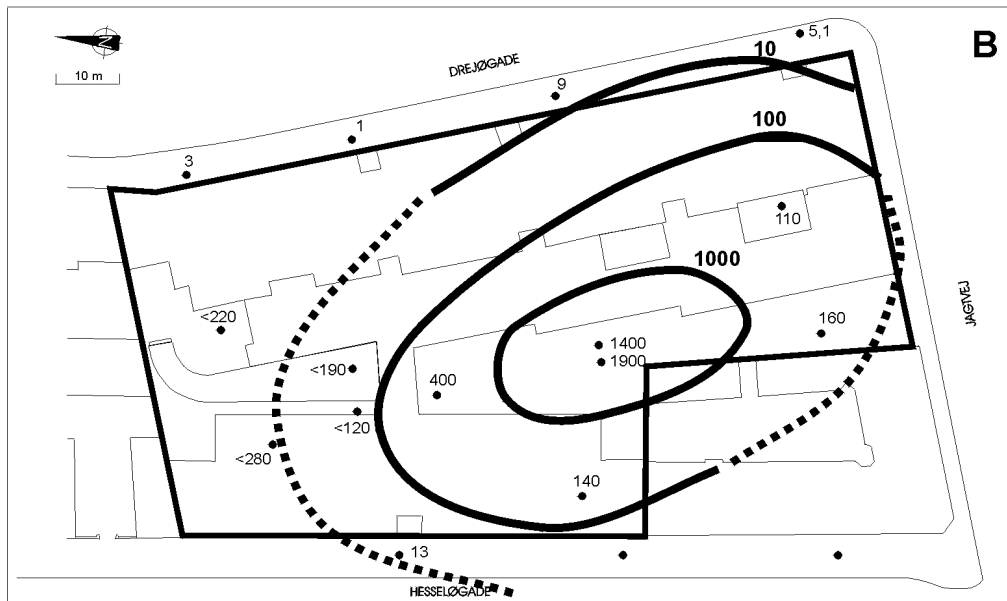


Fig. 6.4B Grønt filter (kote 7,0)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Monitoringsboring
- Isokonzentrationskurve

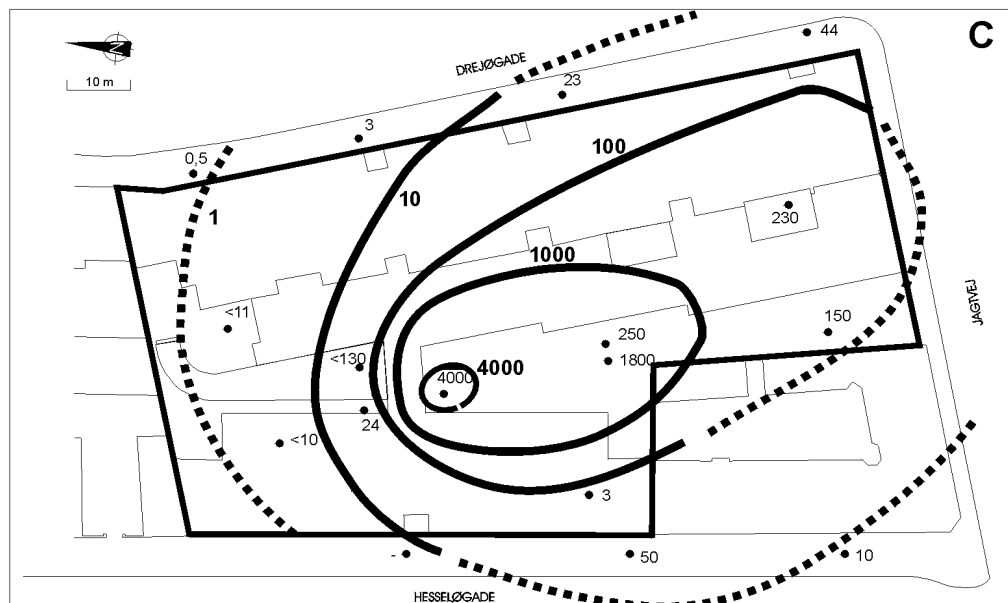


Fig. 6.4C Gult filter (kote 4,5)

- 5 Koncentration (mg/m³)
- Monitoringsboring
- Isokonzentrationskurve

Figur 6.4 Poreluft. Indhold af tetrachlorethylen (PCE) i monitoringsboringer (mg/m³)

Sammenfatning

Der kan erkendes en tydelig stigning af koncentrationen af PCE med dybden inden for området med høje koncentrationer (>100 mg/m³). Dette område er lokaliseret i området mellem karréerne, dvs. i et område, hvor der ikke er gravet ud til kælder. Den generelle påvisning af PCE i næsten samtlige filtre skyldes sandsynligvis dels lokale mindre kildeområder og generel diffusiv spredning. Der sker tilsyneladende kun en svag nedbrydning af PCE til TCE og den videre nedbrydning til dichlorethylen og vinylchlorid er relativt begrænset.

6.4 Grundvandsforurening

6.4.1 Omfang og databearbejdning

Omfang

Der er udtaget grundvandsprøver fra samtlige monitoringsboringer (MB1-MB15), i alt 39 enkeltfiltre. Prøvetagningsdata, herunder feltmålinger samt analyseresultater, er sammenfattet i tabelform og gengivet i appendix 6.

Bearbejdning

På grund af det meget omfattende datamateriale er det valgt at præsentere resultaterne som for poreluftanalysen, dvs. med isokoncentrationskurver for hvert dybdeinterval.

I afsnit 6.4.4 er de mulige nedbrydningsmekanismer for både chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter diskuteret. For eventuelt at kunne kvantificere nedbrydningsprocesserne blev der udtaget en række supplerende analyser. Analyserne har omfattet nedbrydningsprodukterne ethylen og ethan (af TCE- og TCA) samt en karakterisering af redoxmiljøet ud fra uorganiske makroioner m.v.

For de enkeltfiltre, hvor der er udført supplerende analyser, er der i appendix 7 foretaget en sammenfatning af analyseresultater.

6.4.2 Totalkulbrinter (oliekomponenter)

Resultatet af analyserne for totalkulbrinter er præsenteret på figur 6.5.

Hvidt filter

Dette niveau er beliggende ca. 1,2 m under grundvandsspejlet, svarende til kote ca. 2,1. Der kan konstateres et generelt minimumsniveau over hele grunden på ca. 10 µg/l. I et område på den nordlige del er niveauet over 5000 µg/l, med enkeltværdier op til 18.000 µg/l.

Rødt filter

Dette niveau er placeret ca. 2,5 m dybere end ovenstående (hvidt), svarende til ca. kote -0,4. I et mindre område er niveauet over 5000 µg/l, mens området med mere end 100 µg/l kun har en lidt større udbredelse. Det generelle minimumsniveau over hele grunden er 1-5 µg/l. Lokalt på den sydlige del findes et område med over 100 µg/l.

Blåt filter

Dette niveau er placeret ca. 2,5 m under ovenstående (rødt), svarende til kote -2,9. Der kan igen på den nordlige del konstateres et mindre område med over 100 µg/l. Det generelle minimumsniveau over hele grunden er fortsat 1-5 µg/l.

BTEX indhold

Indholdet af BTEX udgør ca. 10-40% af totalindholdet inden for området med et totalindhold større end 5000 µg/l. Heraf udgør benzen (B) kun en mindre del, og det maksimale benzenindhold er 97 µg/l.

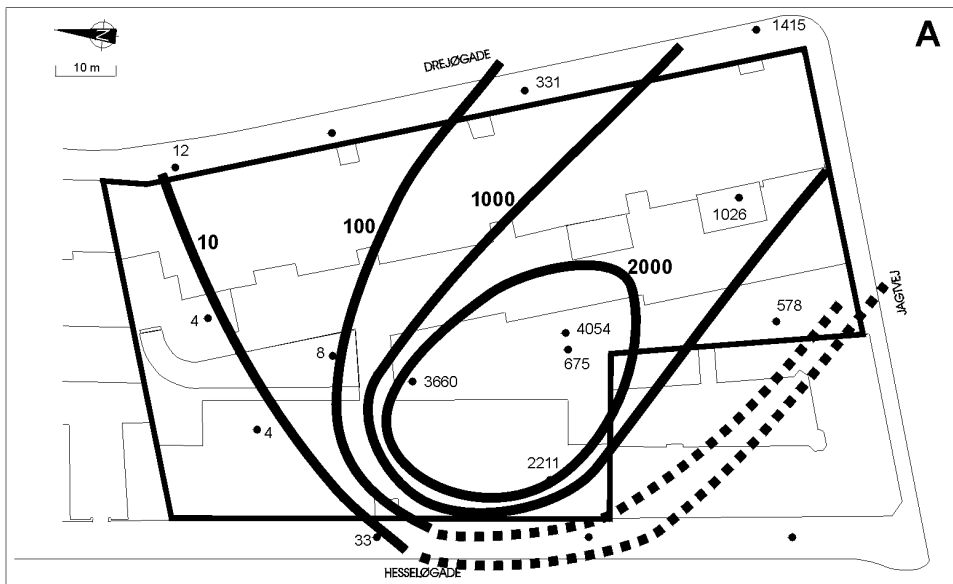


Fig. 6.6A Hvidt filter (kote 2,10)

- 5 Koncentration ($\mu\text{g/l}$)
- Monitoringsboring
- Isokoncentrationskurve

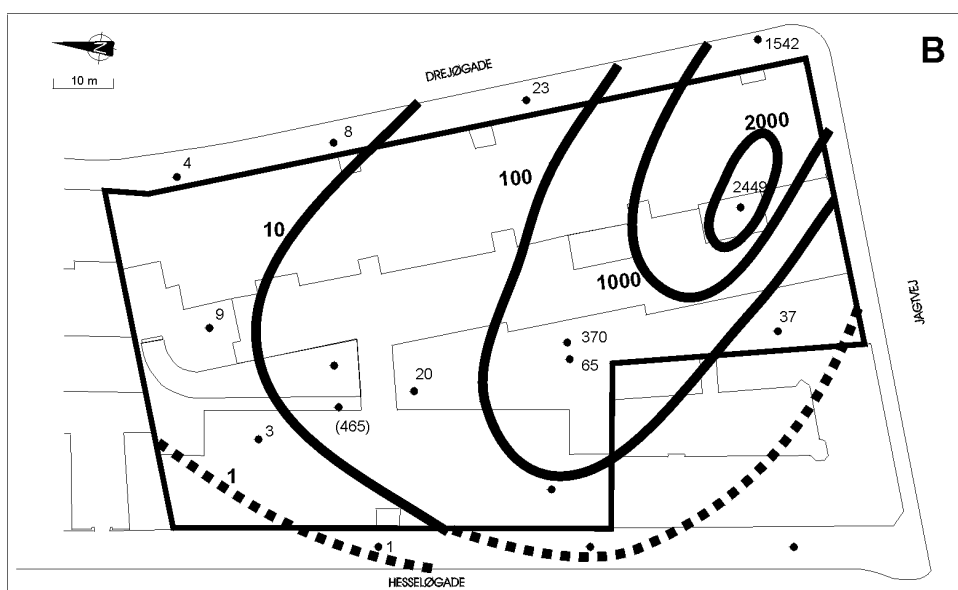


Fig. 6.6B Rødt filter (kote -0,4)

- 5 Koncentration ($\mu\text{g/l}$)
- Monitoringsboring
- Isokoncentrationskurve

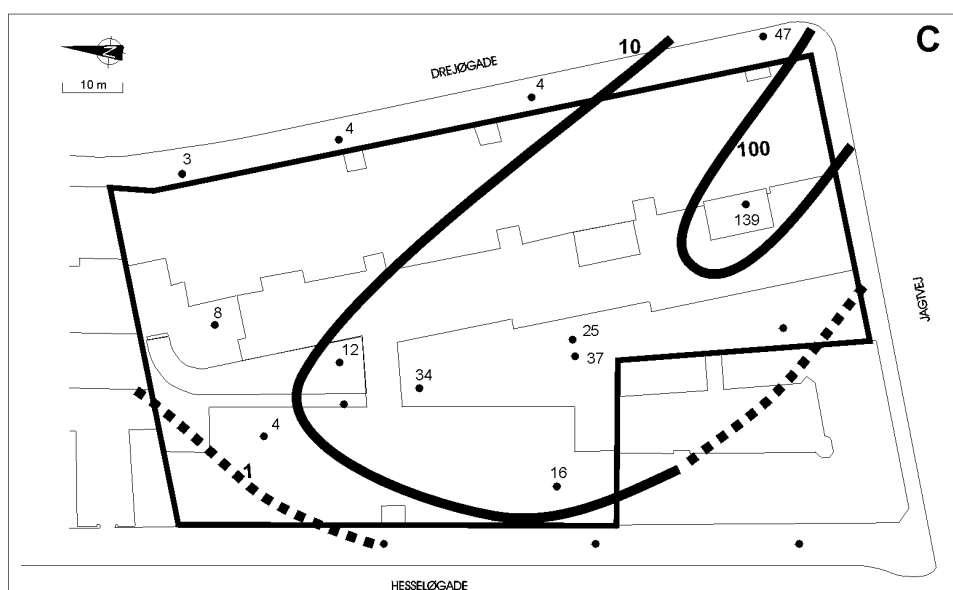


Fig. 6.6C Blåt filter (kote -2,9)

- 5 Koncentration ($\mu\text{g/l}$)
- Monitoringsboring
- Isokoncentrationskurve

Figur 6.6 Grundvand. Total indhold af chlorerede opløsningsmidler i monitoringsboringer ($\mu\text{g/l}$)

Nedstrøms dette område er specielt TEX-komponenter kraftigt aftaget i koncentration ($<0,1-1 \mu\text{g/l}$), mens benzenindholdet fortsat er relativt højt ($0,1 - 30 \mu\text{g/l}$). Der er således indikation på en større nedbrydning for TEX-komponenterne end for benzen.

Sammenfatning

Området med markant forhøjede indhold af totalkulbrinter er, som forventet, sammenfaldende med udbredelsen af fri terpentint på grundvandet, jf. figur 6.1. De maksimale koncentrationer af oliekomponenter på ca. 20 mg/l vurderes at svare til opløseligheden for terpentintproduktet. I dette område ses også et markant fald i koncentrationen fra det øverste til det nederste filter. Generelt er der påvist mindst $1-10 \mu\text{g/l}$ i samtlige filtre uanset dybde. Der vurderes at være en tydelig forureningsfane fra området med fri terpentint. Fanen er ikke afgrænset ved nedstrøms skel mod Drejøgade/Jagtvej. I fanen sker en tydelig nedbrydning af oliekomponenterne, jf. afsnit 6.4.4.

6.4.3 Chlorerede opløsningsmidler

Det totale indhold af chl. opløsningsmidler, herunder dichlorethylener og vinylchlorid er præsenteret på figur 6.6.

Hvidt filter

Der kan konstateres et generelt niveau på ca. $5-10 \mu\text{g/l}$ mod det nordlige skel. På den resterende del af grunden er niveauerne over $100 \mu\text{g/l}$, og med et område mellem karréerne på over $2000 \mu\text{g/l}$. Lokalt i de kraftigst forurenede områder er der målt ca. $4000 \mu\text{g/l}$.

Rødt filter

Også i dette niveau kan der konstateres et generelt niveau på ca. $1-10 \mu\text{g/l}$ langs det nordlige skel. Området med over $2000 \mu\text{g/l}$ er nu placeret ca. $40-50 \text{ m}$ nedstrøms i forhold til filterniveauet over (hvidt). Et relativt højt indhold af PCE i poreluften (230 mg/m^3) i dette område indikerer, at der lokalt her kan være en kilde i den umættede zone.

Blåt filter

I dette niveau er der fortsat spor af opløsningsmidler i samtlige filtre. Niveauet er nu under ca. $10 \mu\text{g/l}$ på den nordlige del af grunden og ca. $10-100 \mu\text{g/l}$ på den resterende del. Lokalt er der dog målt et højere niveau ($>100 \mu\text{g/l}$), og dette område er sammenfaldende med området i filtre over (rødt) med mere end $2000 \mu\text{g/l}$.

Nedbrydningsprodukter

Som for poreluften er PCE generelt den dominerende enkeltkomponent. TCE påvises generelt på et niveau $10-100$ gange mindre end for PCE, når der er kraftigt forurenet ($>100 \mu\text{g-PCE/l}$). Når totalindholdet er lavt ($<10 \mu\text{g/l}$), ses der ofte sammenlignelige niveauer af PCE og TCE. I al væsentlighed ligner udbredelsen af PCE således den viste for totalindholdet, men der er en række nedbrydningsprocesser, som forstyrrer dette billede.

Den videre nedbrydning af TCE til dichlorethylener og vinylchlorid er påvist i en række filtre, og lokalt er der påvist $1800 \mu\text{g/l}$ vinylchlorid og et tilsvarende indhold af cis-1,2-dichlorethylen.

Sammenfatning

Der kan påvises et generelt minimumsforureningsniveau ($1-10 \mu\text{g/l}$) i alle filtre. I områderne med de højeste koncentrationer i det øverste og mellemste filter er der en jævnt aftagende koncentration med dybden. En tydelig forureningsfane er udviklet og er ikke afgrænset ved nedstrøms skel mod Drejøgade/Jagtvej. Der er påvist nedbrydningsprodukter af TCE i én eller flere borer og i alle 3 filterniveauer.

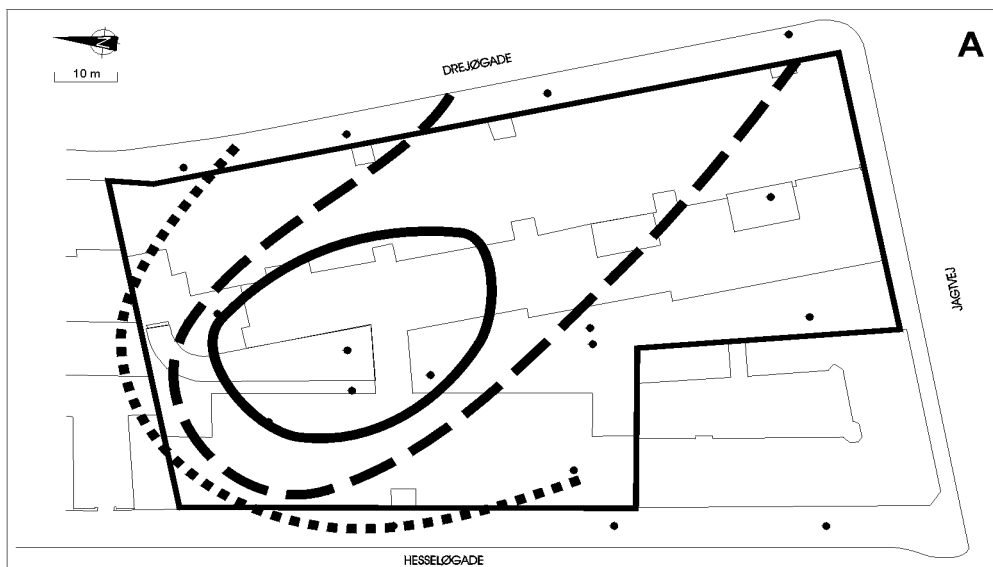


Fig. 6.7A. Redox zoning (mg/l)

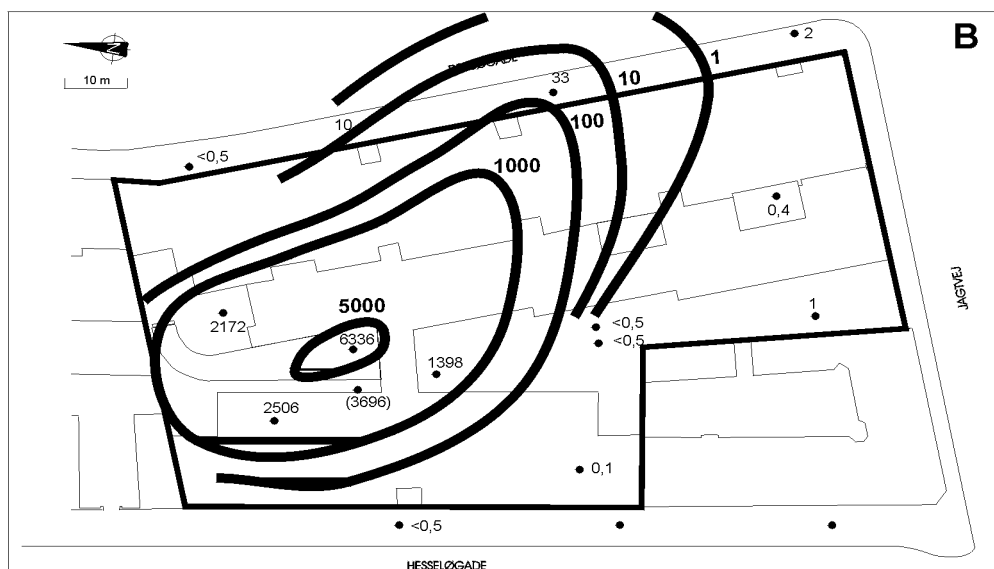
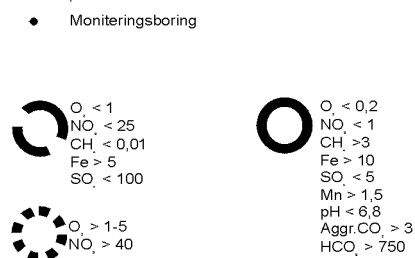


Fig. 6.7B Sum af BTEX-forbindelser (ug/l)

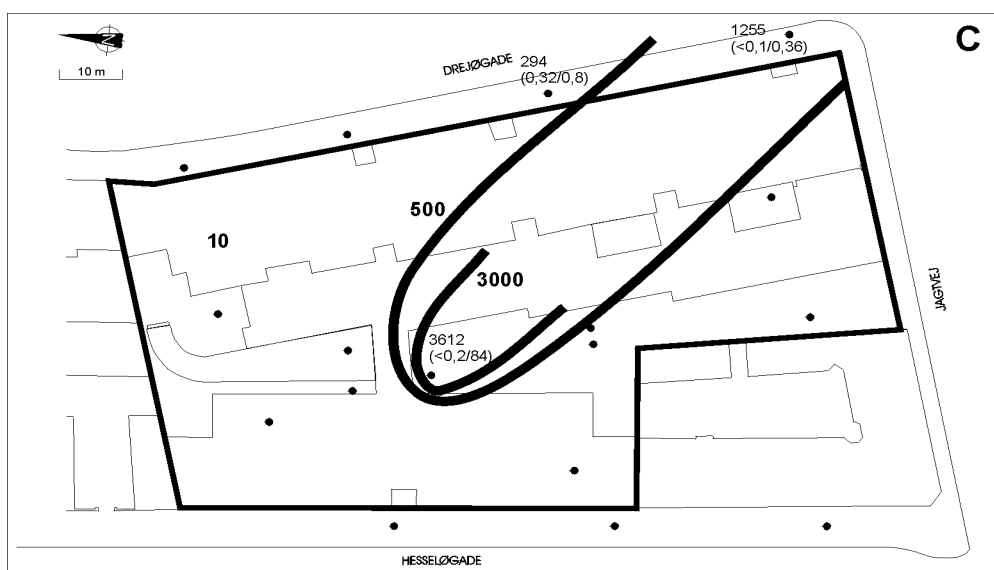
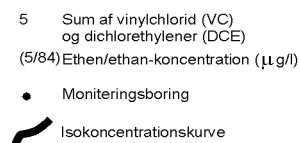


Fig. 6.7C. Indhold af VC, DCE samt ethen og ethan (ug/l)



Figur 7. Grundvand. Hvidt filterniveau (kote 2,1) i moniteringsboringer. Redoxzoner (A), sum af BTEX-forbindelser (B) og totalindhold af nedbrydningsprodukter (C)

6.4.4 Naturlig nedbrydning af oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler

<i>Redoxmiljø</i>	Den nuværende forureningssammensætning og udbredelse er kraftigt påvirket af igangværende biologiske processer. De væsentligste processer, der involverer nedbrydning/transformation af de her påviste stoffer, er stærkt afhængige af det herskende redoxmiljø.
<i>Redoxzoner</i>	En grov inddeling af det øverste filterniveau (hvid) i 3 forskellige redoxzoner er vist på figur 6.7-A. Centralt i området med fri terpentin er der stærkt reducerede forhold. Således er der sket en fuldstændig ilt-, nitrat-, jern-, mangan- og sulfatreduktion og der er opstået methanogene forhold, dvs. miljøet er strengt anaerobt. I udkanten af dette område på opstrømssiden og i en zone nedstrøms er der kun svagt reducerede forhold, idet der er et lavt iltindhold (<1 mg/l) og et kun svagt reduceret nitratindehold. Endelig findes en ydre zone, som vurderes at afspejle det generelle redoxmiljø i det uforurenede magasin. Dette kan ud fra de få målinger i denne zone karakteriseres ved et iltindhold på op til 6 mg/l og et baggrundsniveau for nitrat på ca. 40 mg/l. Miljøet kan beskrives som svagt aerobt.
<i>Nedbrydning af Oliekomponenter</i>	Nedbrydningen af oliekomponenter, herunder BTEX, er inden for de senere år blevet erkendt som en vigtig proces til fjernelse/reduktion af disse i jord og grundvand. Under nedbrydning af oliekomponenter udnytter mikroorganismerne BTEX-forbindelserne som primær kulstofkilde, samtidig med at en eller flere elektronacceptorer (O ₂ , NO ₃ , SO ₄ , Fe, Mn) reduceres. Nedbrydningen foregår hurtigst under aerobe forhold og noget langsommere under anaerobe forhold.
<i>BTEX-nedbrydning</i>	På figur 6.7-B er det totale indhold af BTEX i det øverste filterniveau(hvidt) vist. Inden for området med over 1000 µg/l (området med fri terpentin) er der udviklet en methanogen zone, jf. figur 6.7-A. Der er således i denne zone opbrugt hovedparten af den mængde elektronacceptorer, som strømmer med grundvandet fra opstrømssiden. Den fortsatte nedbrydning i denne zone er derfor primært styret af fermentative processer (strengt anaerobt). Ca. 30-40 m nedstrøms den strengt anaerobe zone er koncentrationsniveauet af BTEX faldet 10-100 gange. Dette skyldes sandsynligvis, at BTEX primært er blevet nedbrudt i den stærkt reducerede zone, og sekundært i den zone med svagt reducerede forhold, hvor der fortsat er bl.a. lidt ilt og nitrat tilstede. Yderligere et stykke nedstrøms depotet kan der forventes delvis aerobe forhold, og en yderligere nedbrydning af BTEX kan forventes.
<i>Nedbrydning af chlorerede opløsningsmidler</i>	Nedbrydning af de chlorerede opløsningsmidler kan ske på mindst 3 forskellige måder. Nedbrydningsvejene benævnes reaktiv dechlorering, primær nedbrydning og cometabolsk nedbrydning.
<i>Reduktiv dechlorering</i>	Ved reaktiv dechlorering, som for normale forureninger alene med chl. opløsningsmidler er den vigtigste proces, optræder de chlorerede forbindelser som elektronacceptorer, og ikke som kilde til kulstof ("mad" til bakterierne). Ved processen fjernes ét chloratom, der erstattes med hydrogen. Processen forløber lettest for PCE og sværest for vinylchlorid, da PCE er det mest oxiderede stof. Dette er også årsagen til at nedbrydning af nedbrydningsprodukterne kræver stadig mere reducerede forhold, og at der derfor typisk ses en ophobning af nedbrydningsprodukterne.

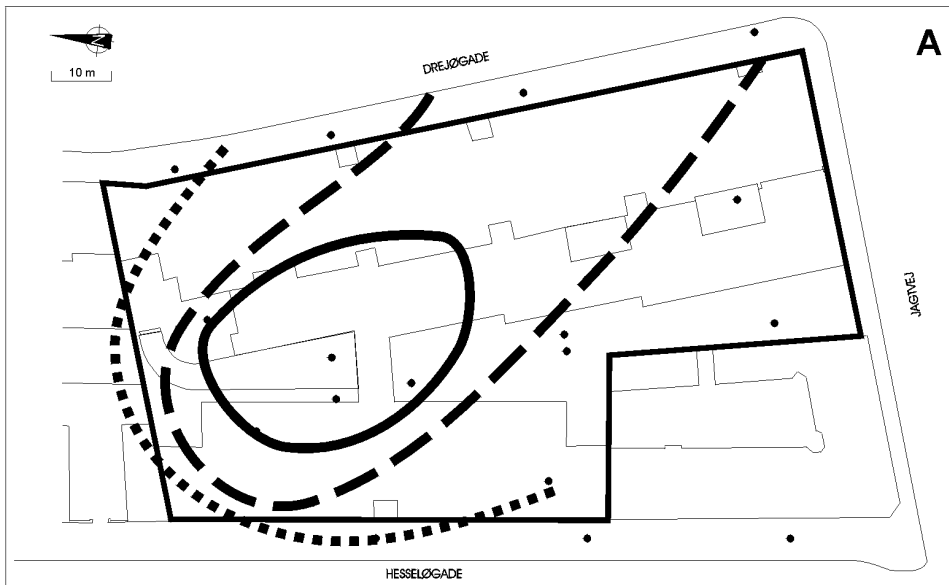


Fig. 6.7A. Redox zoning (mg/l)

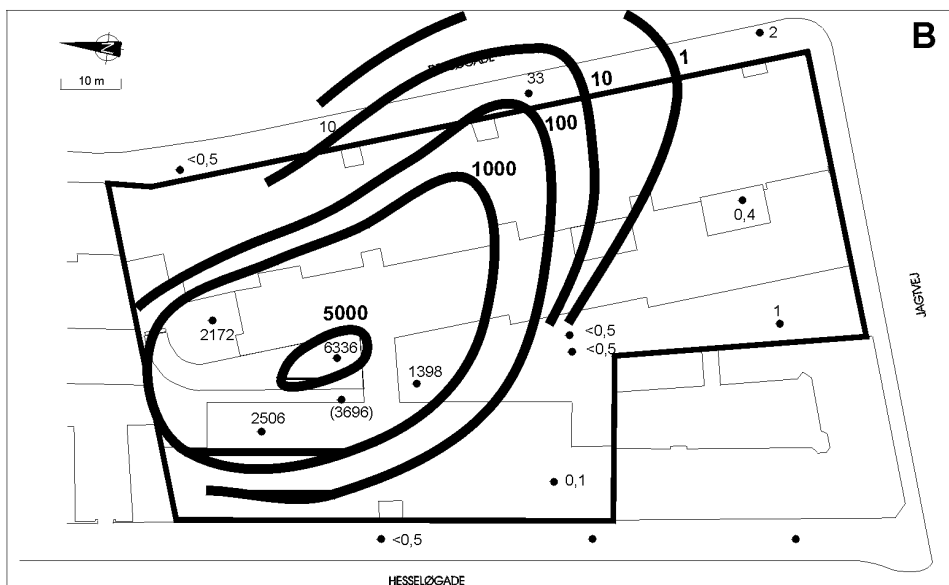
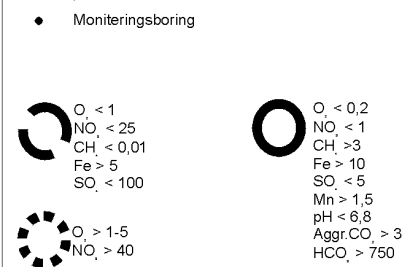


Fig. 6.7B Sum af BTEX-forbindelser (ug/l)

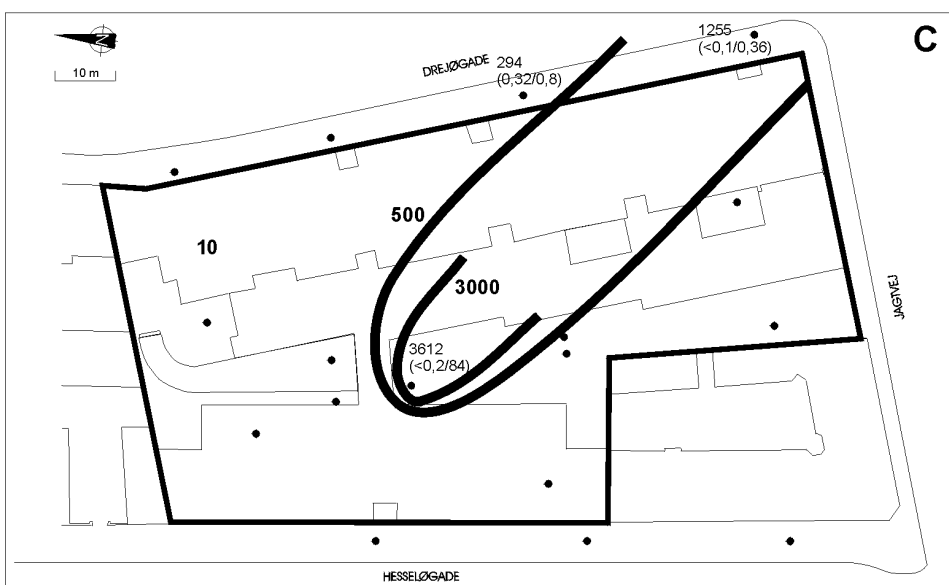
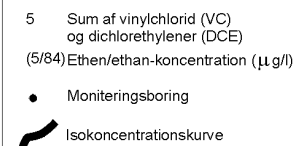


Fig. 6.7C. Indhold af VC, DCE samt ethen og ethan (ug/l)



Figur 7. Grundvand. Hvidt filterniveau (kote 2,1) i moniteringsboringer. Redoxzoner (A), sum af BTEX-forbindelser (B) og totalindhold af nedbrydningsprodukter (C)

Primær nedbrydning

Ved primær nedbrydning fungerer de chlorerede opløsningsmidler som primært substrat (kulstofkilde) for mikroorganisamerne; fuldstændig som for nedbrydning af oliekomponenter.

Det er generelt accepteret, at tetra- og trichlorethylen kun i meget begrænset omfang kan nedbrydes ad denne vej, men til gengæld kan nedbrydningsprodukterne under visse omstændigheder virke som primærsubstrat, hvor bakterierne får energi og kulstof fra nedbrydningsprodukterne. Undersøgelser har således vist, at vinylklorid og 1,2-dichlorethan kan fungere som primærsubstrat under aerobe forhold, men da stofferne dannes under reducerede forhold, vil processen kræve et skift i redoxpotentiale i grundvandsmagasinet mod mere oxiderede forhold.

Observeret nedbrydning

På figur 6.7-C er vist det totale indhold af nedbrydningsprodukterne (dichlorethylener og vinylchlorid) i det øverste filterniveau (hvid). Der er indikationer på, at der sker en cometabolsk nedbrydning i området omkring MB-7, idet totalindholdet af nedbrydningsprodukter er ca. 3600 µg/l, men indholdet af PCE og TCE'er 39 hhv. 6,2 µg/l, jf. bilag 5 og 6. Der er således en ca. 99% omdannelse (nedbrydning) af moderstoffet PCE. Dette underbygges af det konstaterede BTEX-indhold (~ 1400 µg/l) og det stærkt reducerede redoxmiljø her. Dannelsen af vinylchlorid og dichlorethylen ved MB-7 giver anledning til en fane med disse stoffer nedstrøms. De høje værdier i MB-14, placeret i skel nedstrøms, indikerer en reduktion på ca. 50% igennem fanen.

Ethan, ethylen

For yderligere at belyse nedbrydningsforholdene er der på 3 udvalgte prøver fra dette niveau (hvid) analyseret for ethylen og ethan, jf. bilag 6. Resultaterne er vist i parentes på figur 6.7-C. Ethylen er det stof, som er tilbage efter vinylchlorid (monochlorethylen) har afgivet sit eneste chloratom. Ethylen kan viderenedbrydes til ethan og dernæst kuldioxid og vand. Såfremt der skete en reel massejernelse af chlorerede forbindelser, ville der kunne påvises et forhøjet ethylen- og/eller ethanindhold. Af figur 6.7-C fremgår det, at der kun er påvist ethen (0,32 µg/l) i boring MB-11, og at niveauet er lavt i forhold til de chlorerede stoffer.

Ethan er derimod påvist i alle tre prøver, og i niveauer op til små 100 µg/l i området omkring MB-7, hvor der primært sker cometabolsk nedbrydning. At der ses ethan på dette niveau, indikerer således, at der sker en vis massejernelse af moderstof (PCE) og de chlorerede nedbrydningsprodukter heraf.

Reduktiv dechlorering

Reduktiv dechlorering af PCE og TCE vurderes at være årsag til de lavere niveauer (5-20 µg/l) påvist umiddelbart syd for forureningsfanen fra området ved MB-7. I dette område er der stort set ingen kulstofkilde i form af BTEX'er (figur 6.7-B) og svagt reducerede forhold. I forhold til indholdet af moderstofferne (PCE, TCE) er omdannelsen kun svag, idet moderstoffernes koncentration er ca. 100 gange større.

Airspargingeffekter

Forståelse af de igangværende nedbrydnings- og transformations-processer er vigtig, når effekten af airsparging skal evalueres. Det skyldes, at airsparging forventes at medføre en radikal ændring i redoxmiljøet i retning af aerobe forhold over store dele af grunden.

6.5 Respirationsrater i umættet zone

Omfang

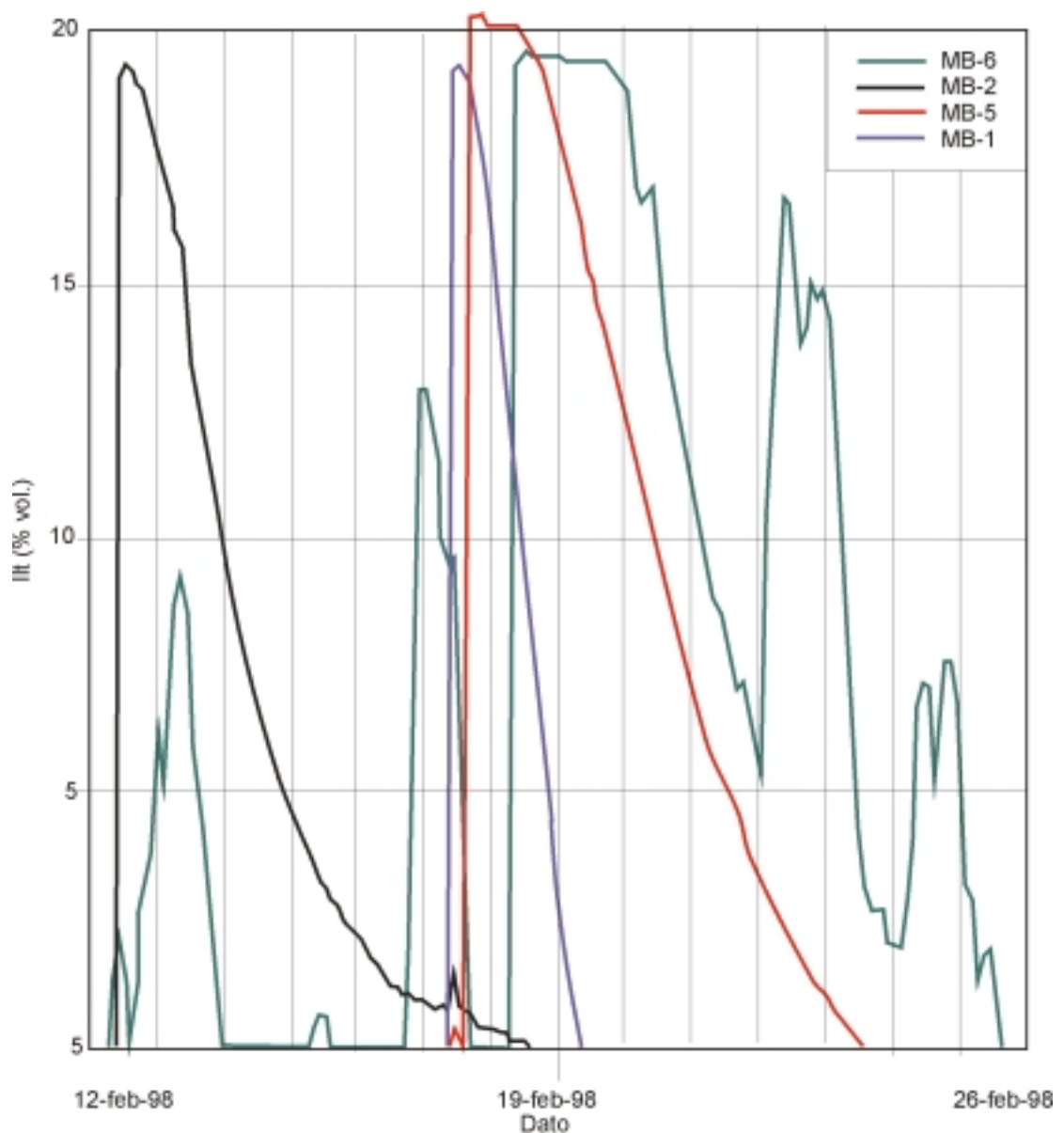
Der er gennemført in-situ respirationsforsøg på borerne MB-1, MB-2, MB-5 og MB-6 i det dybeste filterniveau (gult) i den umættede zone.

Metode

Testen er gennemført ved igennem det etablerede pejlerør (ø32 mm PEL) at indblæse atmosfærisk luft til den umættede zone. Der er injiceret i en periode på mellem 4 og 32 timer, jf. tabel 6.2. Ved tilførsel af ilt stimuleres den aerobe omsætning af oliekomponenterne i den umættede zone, og den hastighed, hvormed ilten forbruges, indikerer den biologiske nedbrydningshastighed.

Iltmålinger

Forbruget af ilt efter stop af injektionen er automatisk registreret hver 2. time af de permanent installerede ilttransducere med tilhørende dataloggere. Resultatet af iltmålingerne for de to uger, hvor der blev gennemført forsøg, er vist på figur 6.8. Før forsøgsstart i hvert filter ses fuldstændigt anaerobe forhold ($O_2 \sim 0\%$ vol.).



Figur 6.8 Iltindhold i gult filterniveau under bioaktivitetstest på de enkelte filtre

Forsøgsbetingelser

Injektionsflowet har været ens, mens injektionsperioden er varieret mellem borerne, tabel 6.2 Der er således også forskel på det indblæste volumen.

I alle forsøg vurderes der injiceret så store luftmængder, at det gasfyldte porevolumen i en afstand på mindst 1-2 m fra boringen er mættet med atmosfærisk luft. Ved næste forsøgsrunde planlægges det at injicere helium sammen med luften, for at kontrollere forudsætningerne for tolkningen.

	Enhed	MB1	MB2	MB5	MB6
Injektionsflow	(m ³ /t)	1	1	1	1
Injektionsperiode	(t)	4	5	18	32
Totalt indblæst vol.	(m ³)	4	5	18	32
Iltforbrug pr. døgn	(%O ₂ /d)	13,3	8,4	5,6	6,8
Nedbrydningsrate af oliekomponenter	(mg/kg/d)	11,5	7,2	4,8	5,9

Tabel 6.2 *Respirationstest. Forsøgsbetingelser og nedbrydningsrater*

Fortolkning

Den kvantitative databearbejdning er udført efter retningslinierne i /ref. 3/. Der er anvendt lokalitets specifikke data ($\zeta = 1,50$, $n_{\text{gas}} = 0,33$) samt data for ilt densitet ved 15°C. Nedbrydningskinetikken antages at være O'-orden, hvilket skal identificeres som et lineært aftagende ilthold med tiden. Der tolkes kun på det lineære forløb af ilt mellem 5 og 18% vol. Herved opnås de maksimale nedbrydningsrater.

Beregnete nedbrydningsrater

Resultatet af tolkningen ses i tabel 6.2. Den estimerede nedbrydningsrate varierer mellem 4,8 og 11,5 mg/kg/d, med et gennemsnit på 7,4 mg/kg/d.

De fundne nedbrydningsrater er relativt høje /ref. 3/, men indikerer meget tydeligt, at ilt er den begrænsende faktor for biologisk omsætning af olieforureningen i den umættede zone.

7 Økonomi

De økonomiske nøgletal for projektet er præsenteret i nærværende afsnit. Alle priser er anført excl. moms.

7.1 Detailprojektering

De samlede udgifter til detailprojektering, udarbejdelse af udbuds-materialer for bore- henholdsvis behandlingsanlægsentreprisen, samt bistand ved licitation, tilbudsevaluering og kontrahering har beløbet sig til kr. 255.000, excl. udgifter til diverse udlæg på sagen. Arbejdet er udført over en 5 måneders periode i 1997.

7.2 Anlægsfasen

Borearbejdet blev gennemført over en 2,5 måneders periode frem til årsskiftet 97/98, mens behandlingsanlægget blev bygget over en 2 måneders periode, regnet fra start af 1998.

Boreentreprisen blev gennemført for kr. 2.625.000 mod budgetteret kr. 2.150.000. Pris pr. lbm etableret pilothul beløb sig til ca. kr. 3.845. Budgetoverskridelsen var væsentligst forårsaget af ændret filtervalg til SVE-filterne (merpris ca. kr. 250.000), samt væsentligt merforbrug af boremudder, pga. forgæves boring af pilothul i stenet horisont (merpris ca. kr. 150.000).

Anlægsudgiften til behandlingsanlægget er budgetteret til kr. 1.900.000, hvoraf specialudstyr til on-line analyse, dvs. til GC indkøb samt opbygning af tilhørende komplet samplingssystem samt udvidet SRO-omfang alene beløber sig til ca. kr. 400.000. Budgetrammen er ikke overskredet.

7.3 Forventede driftsudgifter

Der er for projektet budgetteret med de i tabel 7.1 anførte årlige driftsudgifter.

Afhængig af hvilke driftscykler, der reelt vil sikre den mest effektive oprensning på grunden, vil udgifter til el og kul kunne afvige væsentligt fra de anførte udgiftsposter.

	Honorar	Udlæg
1. driftsår		
• Indkøring	75.000	
• Tilsyn med drift af anlæg	50.000	10.000
• Prøveudtagningsrunder, monitoringsboringer	90.000	240.000
• Fortolkning, rapportering m.v. (4 kvartalsrapporter)	90.000	20.000
• Bioaktivitetsmålinger	30.000	
• Serviceaftale med driftsansvarlige		122.600
• Kulforbrug		400.000
• El		550.000
Total, 1. år	335.000	1.342.600
2. driftsår		
• Tilsyn med drift af anlæg	50.000	10.000
• Prøveudtagningsrunder, monitoringsboringer	90.000	240.000
• Fortolkning, rapportering m.v. (4 kvartalsrapporter)	90.000	20.000
• Bioaktivitetsmålinger	30.000	
• Serviceaftale med driftsansvarlige		122.600
• Kulforbrug		200.000
• El		550.000
Total, 2. år	260.000	1.142.600

Table 7.1 Forventede årlige driftudgifter for 1. og 2. driftsår

8 Referencer

- /Ref. 1/ Københavns Kommune, Miljøkontrollen. Depot 101-116, Drejøgade 3-5, København Ø. Skitseprojekt. Afværgeforanstaltninger. Juli 1996. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S.
- /Ref. 2/ Characterization of flow parameters controlling soil vapour extraction. G.D. Beckett and D. Huntley. Groundwater. March-April 1994.
- /Ref. 3/ Bioventing Principles and Practice. EPA. September 1995.
- /Ref. 4/ Airsparging fra horisontal boring. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, Nr. 9, 1997.
- /Ref. 5/ Viborg Amt/Miljøstyrelsen. Engvej 5, Aalestrup. Affaldsdepot nr. 793-149. Dokumentationsundersøgelse og pilotforsøg. September 1996. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S.

Filnavn: TEK-rap-MST.doc
Bibliotek: G:\tekrap
Skabelon: I:\SAG\97\438.00\rap\MST.dot
Titel: Miljøprojekt
Emne:
Forfatter: Jacqueline Anne Falkenberg
Nøgleord:
Kommentarer:
Oprettelsesdato: 17-12-99 10:20
Versionsnummer: 14
Senest gemt: 20-12-99 14:18
Senest gemt af: MRo
Redigeringstid: 309 minutter
Senest udskrevet: 29-06-00 08:24
Ved seneste fulde udskrift
Sider: 75
Ord: 16.735 (ca.)
Tegn: 95.392 (ca.)