

Miljøprojekt Nr. 749 2003
Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening.

Dampoprensning under en bygning

Betina Haugaard Heron og Tom Heron
NIRAS Rådgivende Ingeniører og Planlæggere A/S

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

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

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

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
2 PRÆSENTATION AF LOKALITETEN	13
2.1 HISTORIK	13
2.2 GENNEMFØRTE UNDERSØGELSER	14
2.3 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI	14
2.4 FORURENINGSSITUATION	15
2.5 RISIKOVURDERING	16
2.5.1 Arealanvendelse	16
2.5.2 Grundvandsinteresser og recipienter	17
2.6 MÅLSÆTNING MED OPRENSNING	18
3 AFVÆRGETEKNIK, -ANLÆG OG -STRATEGI	19
3.1 DAMPSTRIPNING, KORT BESKRIVELSE AF TEKNIKKEN	19
3.2 DIMENSIONERING OG KORT BESKRIVELSE AF AFVÆRGEANLÆGGET	21
3.3 BESKRIVELSE AF DRIFTSSTRATEGIEN	23
4 MONITERING FINANSIERET AF NORDJYLLANDS AMT	25
5 AKTIVITETER UNDER MILJØSTYRELSENS TEKNOLOGIUDVIKLINGSPROGRAM	27
5.1 UDVIDET TEMPERATURMONITERING	27
5.2 MONITERING AF VERTIKAL TRYKFORDELING	28
5.3 FASTLÆGGELSE AF JORDPARAMETRE	29
5.4 VURDERING AF OMFANGET AF VÅDOXIDATION	29
5.5 UDVIDET DOKUMENTATION AF VERTIKAL MOBILISERING AF FRI FASE FORURENING	30
5.6 MONITERING AF FORURENINGSNIVEAU I AFKAST UNDER CYKLISK DRIFT	31
5.7 MONITERING AF RELATIV FUGTIGHED I AFKASTLUFT	31
6 DRIFTSFORLØB	33
6.1 DRIFTSFORLØB, HERUNDER DRIFTSTOP	33
6.2 INJEKTIONS- OG EKSTRAKTIONS-RATER	35
6.3 FORURENINGSFJERNELSE I FORBINDELSE MED OPRENSNINGEN	37
6.4 ØVRIGE DRIFTS-PROBLEMER – UD OVER DE TEKNISKE/MEKANISKE	38
7 RESULTATER OG VURDERINGER, AKTIVITETER UNDER TEKNOLOGIPROGRAMMET	41
7.1 UDVIDET TEMPERATURMONITERING	41
7.2 MONITERING AF VERTIKAL TRYKFORDELING	46

7.3	FASTLÆGGELSE AF JORDPARAMETRE	46
7.4	VURDERING AF OMFANGET AF VÅDOXIDATION	48
7.5	UDVIDET DOKUMENTATION AF VERTIKAL MOBILISERING AF FRI FASE FORURENING	49
7.6	DETALJERET MONITERING UNDER CYKLISK DRIFT	52
7.7	MONITERING AF RELATIV FUGTIGHED I AFKASTLUFT	57
8	OPRENSNINGSFORLØB OG GENERELLE ERFARINGER	59
8.1	ERFARINGER FRA PROJEKTET	59
9	LITTERATURLISTE	61
	BILAG 1: TEMPERATURMONITERING	63
	BILAG 2: VÅDOXIDATION	87
	BILAG 3: MODELLERING AF DAMPOPRENSNING	89

Forord

Denne rapport beskriver en dampoprensning, som er gennemført på en tidligere renserigrund i Aalborg. Dampoprensningen er gennemført for Nordjyllands Amt af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S og Ove Arkil A/S.

Dampoprensning er i Danmark en forholdsvis ny afværgeteknik, og på nuværende tidspunkt er der således en række mekanismer, der endnu ikke er fyldestgørende belyst. Midler fra Miljøstyrelsens Teknologiprogram for Jord og Grundvand i forbindelse med nærværende oprensning har imidlertid muliggjort en mere detaljeret monitoring end oprindeligt planlagt, og dermed også en bedre dokumentation og forståelse af processerne ved dampoprensninger.

Jacob Gudbjerg fra Danmarks Tekniske Universitet (Miljø & Ressourcer) har været ansat af Miljøstyrelsen som faglig sekretær på projektet. Jacob Gudbjerg har deltaget i en løbende dialog gennem oprensningsperioden og er derudover forfatter til kapitel 7.3 og bilag 3 i nærværende rapport.

Den øvrige del af rapporten er udarbejdet af Tom Heron og Betina Haugaard Heron, NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S.

Sammenfatning og konklusioner

Dampoprensning af jord- og grundvandsforurening er vundet frem de seneste år, specielt i USA. Herhjemme er der inden for de sidste fem år igangsat og gennemført fem dampoprensninger. På fire af disse lokaliteter har Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for Jord og Grundvand finansieret særlige aktiviteter til udvikling og dokumentation af teknikken, og der tegner sig et billede af en lovende teknik med en effektiv og hurtig kildefjernelse i såvel den umættede som den mættede zone. Der tegner sig dog også et billede af en teknik, som stiller ganske særlige krav til design og dimensionering af anlægskomponenter samt til drift og monitorering.

I nærværende rapport beskrives en dampoprensning af en tidligere renserigrund, som er gennemført i efteråret 2000 for Nordjyllands Amt af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S og Ove Arkil A/S.

Renseriets har frem til 1990 haft en driftsperiode på 54 år, og renseridriften har forårsaget en markant jord- og grundvandsforurening med terpentiner og perchlorethylen. Jordlagsforholdene på lokaliteten består af sandet fyldt til ca. 1,5 m.u.t. undelejret af sand til ca. 3,5 m.u.t. Herunder er der truffet fed yoldialer med en forventet mægtighed på minimum 5 meter. Der er påvist et terrænnært grundvandsmagasin med frit vandspejl ca. 1,7 m.u.t.

Den påviste forurening er beliggende i såvel den umættede som den mættede zone ned til ca. 3,5 m.u.t. Den overvejende del af forureningen er beliggende under bygninger.

Dampoprensningen er foretaget ved hjælp af 11 injektionsboringer. Otte af de 11 injektionsboringer er placeret i periferien af forureningen, mens der centralt i oprensningsområdet er etableret tre injektionsboringer med henblik på at sikre en tilstrækkelig opvarmning i centrum af forureningen sidst i driftsperioden. Centralt i oprensningsområdet er der ekstraeret grundvand og poreluft/damp fra to boringer.

Dampoprensningen er gennemført over en periode på ca. 4 måneder – 3 måneder med kontinuert drift og 1 måned med cyklisk drift. Ved afslutning af oprensningen er der fjernet ca. 1.000 kg forurening – overvejende terpentiner – hvilket vurderes at udgøre størstedelen af forureningen på lokaliteten.

Under oprensningen er dampfronternes aktuelle udbredelse løbende monitoreret ved hjælp temperaturmålinger i og omkring oprensningsområdet. Ligeledes er der monitoreret på forureningsfjernelse, og en række drift- og anlægstekniske data er registreret. Herudover er der som led i oprensningen gennemført følgende aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram:

- Udvidet temperaturmonitoring
- Monitorering af vertikal trykfordeling
- Fastlæggelse af jordparametre
- Vurdering af omfanget af vådoxidation
- Udvidet dokumentation af eventuel vertikal mobilisering af fri fase
- Monitorering af relativ fugtighed i afkastluft
- Udvidet monitorering under cyklisk drift.

I det følgende er der sammenfattet en række væsentlige konklusioner/erfaringer fra dampoprensningen, herunder den monitorering, der er gennemført under Teknologiuudviklingsprogrammet.

Dampstripping er en aggressiv teknik, som kræver intensiv monitorering, hyppige tilsyn og hurtige beslutningsgange mellem bygherre, rådgiver og entreprenør. Endvidere kan der ved driftstop af ekstraktionsanlægget ske en utilsigtet temperaturudbredelse bort fra oprensningsområdet.

Ved dampinjektion terrænnært under bygninger kan der forekomme revnedannelser i gulve/vægge, og såfremt der inden for oprensningsområdet ligger kloakker, kan der forventeligt ske en opvarmning af disse med efterfølgende risiko for lugtgener i området.

Den udvidede temperaturmonitoring såvel horisontalt som vertikalt, viste sig at være yderst værdifuld i den løbende vurdering af anlæggets funktion og som grundlag for ændringer i driftsstrategien. Ved lignende oprensninger anbefales det, at der etableres et tilsvarende detaljeret monitoringsprogram til sikring af tilstrækkelig kontrol med og justering af driften.

Ud fra erfaringer fra nærværende projekt vurderes der ikke umiddelbart at være kommercielt tilgængelige sensorer, som med sikkerhed vil kunne anvendes til trykmålinger i og omkring dampzoner eller til fugtighedsmålinger i den ekstraherede gasfase.

Ud fra den udførte monitorering af CO₂ er der tegn på, at der ved dampinjektionen på den aktuelle lokalitet er pågået en vis vådoxidation af forureningen. Størrelsesordenen for den forureningsfjernelse, som er sket ved vådoxidation, kan ud fra overslagsberegninger være på niveau med den forureningsfjernelse, der er opnået ved ekstraktion af vand- og gasfase samt som fri fase.

På den aktuelle sag er der ikke truffet tegn på vertikal spredning af forurening ned i det underliggende lerlag. På andre lokaliteter med mere opsprækkede eller sandede lerlag kan det dog ikke udelukkes, at en sådan spredning kan forekomme.

Monitoreringen af forureningsfjernelsen under den cykliske drift blev foretaget manuelt med en PID-måler to gange dagligt samt ved regelmæssige laboratorieanalyser. De manuelle PID-målinger i afkastluften var altafgørende for styringen af den cykliske drift af anlægget og udgjorde det eneste pålidelige grundlag for beslutninger om de enkelte fasers varighed.

Summary and conclusions

Removal of soil- and groundwater contamination using steam-enhanced remediation has gained ground through the latest years, especially in the USA. Here in Denmark, five steam-enhanced remediations have been started up and/or concluded through the latest 5 years. Under the Programme for Technology Development, the Danish Environmental Protection Agency has financed special activities for development and documentation of this technique on four of these sites. A picture emerges of a promising technique with an efficient and fast source removal in the unsaturated zone as well as in the saturated zone. But a picture is also emerging of a technique with special requirements to design, operations and monitoring.

In this report, a steam-enhanced remediation of a former dry cleaner site is described. NIRAS Consulting Engineers and Planners A/S and Ove Arkil A/S carried out the remediation in autumn 2000 for the County of Northern Jutland.

The dry cleaning facility has been in operation for 54 years until 1990 and has caused a significant soil and groundwater contamination with turpentine (stoddard solvent) and PCE. The strata on the locality consist of sandy filling down to approx. 1.5 meters below ground surface, hereafter sand down to approx. 3.5 meters under the ground surface. Hereunder Yoldia clay with an expected thickness of minimum 5 meters. An unconfined groundwater aquifer with water table surface approx. 1.7 meters under the ground surface has been located.

The contamination is found both in the unsaturated zone and in the saturated zone down to approx. 3.5 meters under the ground surface. The largest part of the contamination is situated under buildings.

The steam-enhanced remediation is carried out by means of 11 injection wells. 8 of 11 injection wells are placed in the periphery of the contamination, whereas three injection wells are placed centrally in the source zone in order to ensure a sufficient heating in the middle of the contamination at the end of the operation period. Groundwater and soil vapour/steam were extracted from two wells in the centre of the source zone.

The steam-enhanced remediation has been carried out over a period of approx. 4 months – 3 months of continuous operation and 1 month of cyclic operation. At the conclusion of the remediation approx. 1000 kg of contamination – mostly turpentine – were removed, which is evaluated to be the major part of the contamination on the site.

The actual distribution of the steam fronts has continuously been monitored during the remediation by means of temperature measurements in and around the remediation area. Also removal of contamination has been monitored and a series of technical operation data have been registered. Furthermore, the following activities, financed by the Danish Environmental Protection Agency (the Technology Development Programme), have been carried out as part of the remediation:

- Extended temperature monitoring
- Monitoring of vertical pressure distribution
- Determination of soil parameters
- Evaluation of the extent of hydrous pyrolysis oxidation (HPO)
- Extended documentation of possible vertical mobilisation of free phase
- Monitoring of relative humidity in the extracted vapour phase
- Extended monitoring during cyclic operation.

In the following, a series of important conclusions and experiences from the steam-enhanced remediation, among these the monitoring carried out under the Technology Development Programme, are summarised:

Steam stripping is an aggressive technique that requires intensive monitoring and supervision, and a fast decision-making from site owner, consultant and contractor. Furthermore unintentional stops of operation of the extraction system can cause an unintended heating outside the remediation area.

When the steam stripping is performed close to the surface and below buildings there is a high risk of formation of cracks in walls and ceilings. Furthermore the sewer system can be heated, which can cause obnoxious smells in the area around the site.

The extended horizontal and vertical temperature monitoring, turned out to be extremely valuable for the continuous evaluation of the functionality of the system and as basis for changes in the operation strategy. At similar remediations, a corresponding detailed monitoring programme is recommended established to ensure sufficient control and adjustment of the operation.

On the basis of the experiences in this project, it has been evaluated that sensors to be used for pressure measurements in and around steam zones as well as sensors for humidity measurements under conditions as in the extracted vapour phase are not commercially accessible.

The monitoring of the CO₂ gives indications that a certain HPO of the contamination has taken place during the steam injection on the site. The amount of the contamination removed by HPO might be of the same magnitude as the contamination removal by means of extraction of water and gas phase and as free phase liquid.

In this project there are found no signs of significant vertical spreading of contamination into the lower clay layer. However, on other sites with fractured or sandy clay it can not be precluded that such a spreading can occur.

The monitoring of the contamination removal during the cyclic operation was carried out manually with a PI-detector twice a day and with regular laboratory analyses. The manual measurements in the extracted vapour phase were of vital importance to the cyclic operation of the system and formed the only reliable basis for decisions about the duration of each phase.

1 Indledning

Nærværende rapport tager udgangspunkt i en dampoprensning, som er foretaget på en tidligere renserigrund på Østerbro i Aalborg. Renseriets har frem til 1990 haft en driftsperiode på 54 år, og renseridriften har forårsaget en markant jord- og grundvandsforurening med terpentiner og perchlorylen (PCE).

I beboelsesejendomme nedstrøms det tidligere renseri er der konstateret forhøjede indeklimakoncentrationer af PCE og benzen som følge af afdampning fra den underliggende forurening. Formålet med oprensningen har været at sikre de nærliggende beboelsesejendomme mod uacceptable indeklima-påvirkninger.

Dampoprensningen er gennemført af NIRAS og Ove Arkil A/S for Nordjyllands Amt, og som led i oprensningen er der gennemført en række aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram.

Dampoprensning er herhjemme en forholdsvis ny afværgeteknik og omfatter en række mekanismer og mulige driftsstrategier, som endnu ikke er fyldestgørende belyst. Den aktuelle dampoprensningen var oprindeligt planlagt med det nødvendige minimum af monitoring. Midler fra Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram har imidlertid muliggjort en mere detaljeret monitoring, og dermed også en bedre dokumentation og forståelse af processerne i forbindelse med dampstripping.

De gennemførte aktiviteter under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram er følgende:

- Udvidet temperaturmonitoring
- Monitoring af vertikal trykfordeling
- Fastlæggelse af jordparametre
- Vurdering af omfanget af vådoxidation
- Udvidet dokumentation af eventuel vertikal mobilisering af fri fase
- Monitoring af relativ fugtighed i afkastluft
- Udvidet monitoring under cyklisk drift.

Lokaliteten (Østerbro, Aalborg) præsenteres i kapitel 2, herunder kildehistorie, forureningstype, forureningsudbredelse, geologiske og hydrogeologiske forhold samt en risikovurdering af forureningen.

I kapitel 3 beskrives dampstrippingsteknikken kortfattet, og ligeledes introduceres afværgeanlægget og driftsstrategien for den aktuelle lokalitet. Under oprensningen er der foretaget monitoring, som er finansieret dels af Nordjyllands Amt og dels af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram. I kapitel 4 beskrives aktiviteterne, som er foretaget for Nordjyllands Amt, og i kapitel 5 beskrives aktiviteterne under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram.

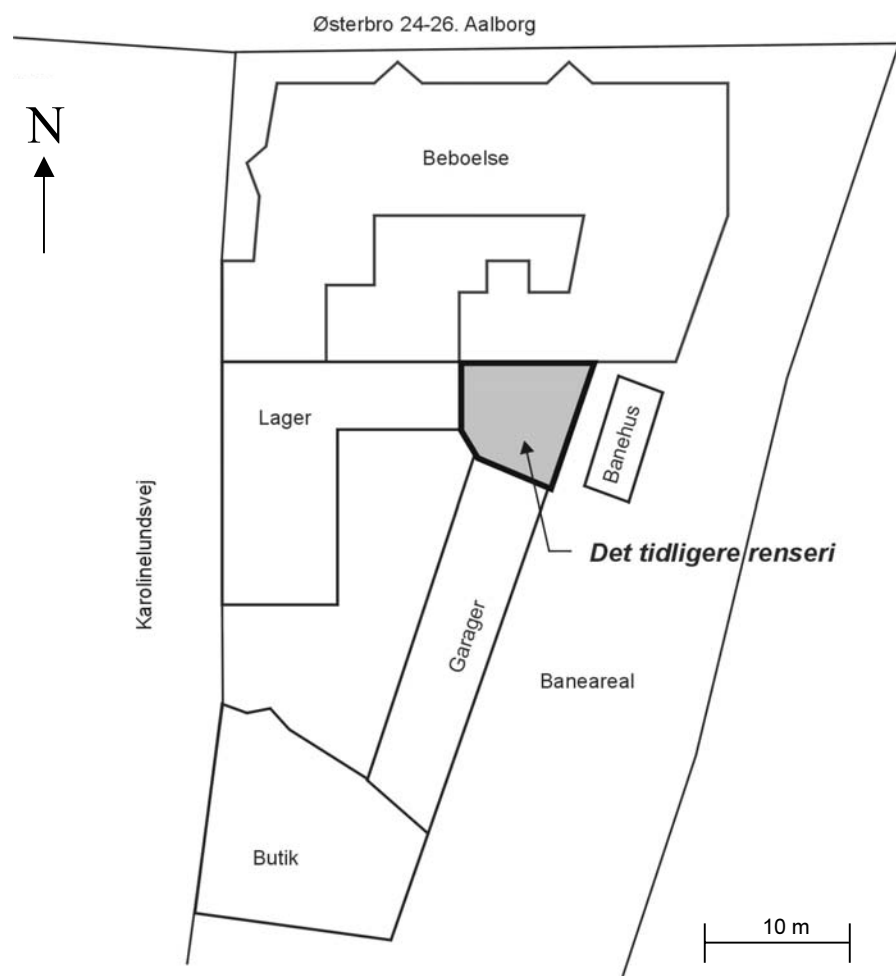
Driftsforløbet for oprensningen kommenteres i kapitel 6, og i kapitel 7 beskrives og vurderes de aktiviteter, som er foretaget under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram.

Kapitel 8 indeholder en opsamling på oprensingsforløbet på lokaliteten, herunder en række anbefalinger til brug ved fremtidige dampoprensninger.

2 Præsentation af lokaliteten

2.1 HISTORIK

Renseri har været beliggende på Østerbro i Aalborg og har været i drift fra 1936 til 1990. Til renseprocessen er der anvendt terpentiner og PCE. Umiddelbart syd for renseriet har der frem til ca. 1960 været autoværksted. I tilknytning hertil har der været en benzinudskiller samt tre olietanke til hhv. fyringsolie og dieselolie. Såvel benzinudskiller som olietankene er i dag afblændet.



Figur 2.1 Situationsplan med den nuværende arealanvendelse for området

Den nuværende arealanvendelse for lokaliteten fremgår af figur 2.1. Det tidligere renseri er i dag ubenyttet, og de omkringliggende garager anvendes til parkering og lagerlokaler for den nærliggende hårde-hvidevarebutik. Umiddelbart nord for renseriet er der beboelse (lejligheder fra stueetage til 3. etage, og kælderetagen anvendes til vaskerum/opmagasinering).

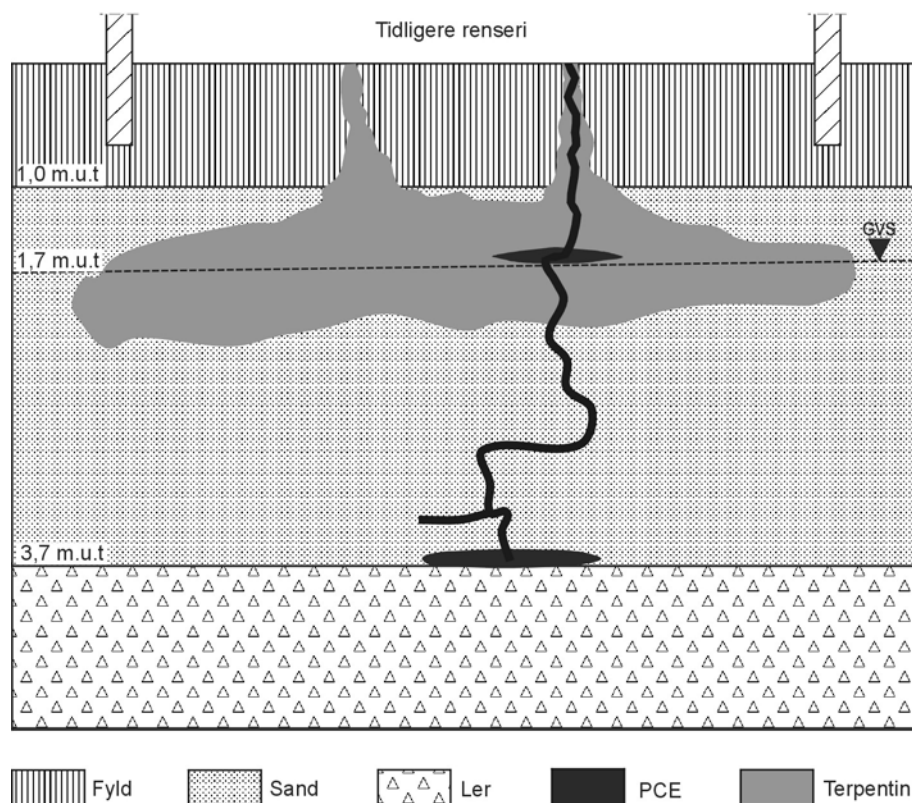
2.2 GENNEMFØRTE UNDERSØGELSER

Der er gennemført en registreringsundersøgelse på Østerbro 26 samt det tilstødende baneareal i 1995 (NNR 1995). I den forbindelse er der etableret en række boringer, hvorfra jordprøver er udvalgt til analyse.

I 1998/1999 er der gennemført supplerende undersøgelser på Østerbro 24-26, Karolinelundsvej 11 samt det tilstødende baneareal (NIRAS 1999). Ved de supplerende undersøgelser er der etableret en række boringer, hvorfra der er udtaget jord- og vandprøver til analyse. Endvidere er der gennemført poreluftmålinger samt udtaget indeklimaprøver i de omkringliggende lejligheder.

2.3 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI

I forbindelse med de udførte undersøgelser på lokaliteten (NNR 1995 og NIRAS 1999) er der truffet muldet og sandet fyld med indhold af byggeaffald til 1,5 m.u.t. Herunder er der truffet fin-, mellem- og grovkornet sand med indhold af småsten til ca. 3,7 m.u.t. Sandlaget underlejres af yngre yoldialer (Aalborgler) til boringernes bund ca. 4,0-5,0 m.u.t. Lerlaget har en forventet udstrækning til ca. 10 m.u.t., men er ikke gennemboret for at undgå utilsigtet spredning af forurening til dybereliggende magasiner. I sandlaget er der truffet et øvre sekundært grundvandsmagasin med frit vandspejl ca. 1,7 m.u.t. Af figur 2.2 fremgår et forenklet geologisk snit for lokaliteten.



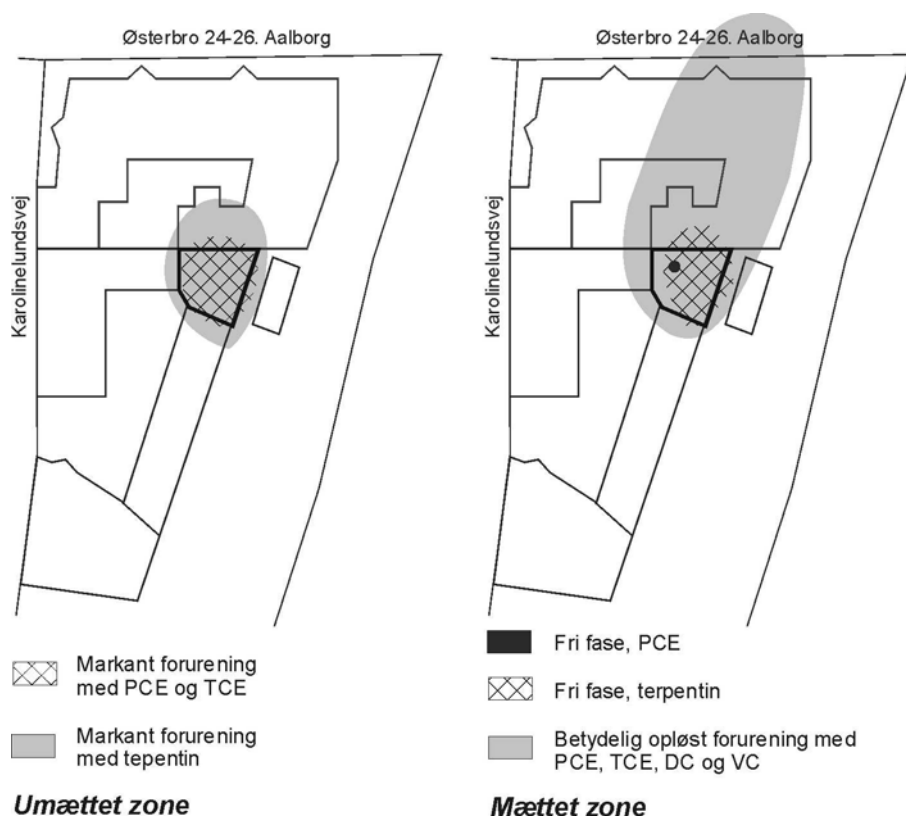
Figur 2.2 Forenklet geologisk snit for lokaliteten samt illustration af forureningsforholdene

Potentialebilledet på lokaliteten er meget fladt, og en entydig strømningsretning i det øvre sekundære grundvandsmagasin (ca. 1,7 m.u.t.) kan ikke fastlægges på baggrund af de udførte pejlerunder. Det forventes dog,

at magasinet overordnet afdrænes mod Limfjorden (mod nord), hvilket underbygges af, at den væsentligste forureningsspredning er observeret i nordlig retning. Strømningsretningen i det primære grundvandsmagasin forventes ligeledes at være nordlig i retning mod Limfjorden.

2.4 FORURENINGSSITUATION

Ved de udførte undersøgelser på lokaliteten (NNR 1995 og NIRAS 1999) er der påvist en markant forurening med chlorerede opløsningsmidler (primært PCE, TCE, DC og VC) og terpentin i såvel den umættede som den mættede zone. Af figur 2.3 fremgår et oversigtskort med angivelse af den forventede udstrækning af forureningen i hhv. den umættede samt den mættede zone.



Figur 2.3 Forventet forureningsudstrækning i umættet og mættet zone på lokaliteten

Af nedenstående tabel 2.1 fremgår de maksimale forureningskoncentrationer i hhv. jord, vand, poreluft og indeklime på lokaliteten.

	Jord [mg/kg]	Grundvand [µg/l]	Poreluft [mg/m ³]	Indeklima [µg/m ³]
PCE	921	Fri fase	163	96
VC	i.a.	4.800	i.a.	0,4
Terpentin	14.600	Fri fase	554	-
Benzen	-	-	7,3	2,5

i.a. Ikke analyseret

- Under detektionsgrænsen

Tabel 2.1: De maksimale koncentrationer i hhv. jord, vand og luft

Generelt er den væsentligste forurening påvist under renseriet. Forureningen forventes velafgrænset vertikalt af det sammenhængende lerlag i området ca. 3,7 m.u.t., idet der ikke er konstateret en forurening i lerlaget.

I det stærkest forurenede område (under det tidligere renseri) er der påvist fri fase af såvel PCE som terpentin. Fri fase PCE er kun observeret i en enkelt boring og ved efterfølgende pumpe-tests har det ikke været muligt at mobilisere yderligere fri fase PCE. Den frie fase terpentin er mere udbredt (op til 15 cm ved pejling) og er observeret under større dele af det tidligere renseri.

På dele af lokaliteten (udenfor kildeområdet med PCE og terpentin) er der desuden observeret forurening med dieselolie, tung fyringsolie, PAH-forbindelser og bly i den umættede zone. Forureningen forventes at stamme fra et autoværksted, der tidligere har ligget på lokaliteten. Denne forurening er dog ikke inddraget i de planlagte afværgeforanstaltninger, da den ikke vurderes at udgøre en risiko for arealanvendelses-, recipient- eller grundvandsinteresser i området. Oprensningen under det tidligere renseri vurderes ikke at ville påvirke de øvrige kendte forureninger på lokaliteten.

2.5 RISIKOVURDERING

På baggrund af den konstaterede forurening med chlorerede opløsningsmidler og terpentin på lokaliteten er der gennemført en risikovurdering i forhold til arealanvendelsesinteresser, grundvandsressourcen samt recipienter. Som acceptkriterier er anvendt de af Miljøstyrelsen opstillede afdampnings-, jordkvalitets- og grundvandskvalitetskriterier for de aktuelle stoffer (Miljøstyrelsen 1998a).

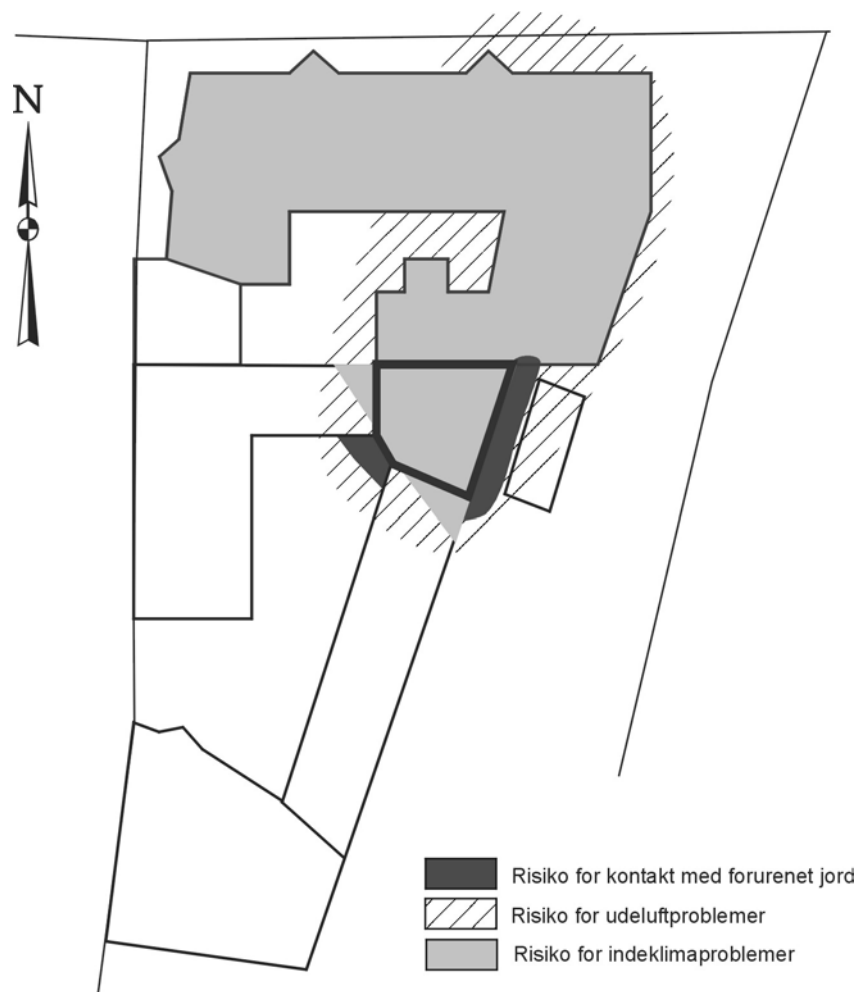
2.5.1 Arealanvendelse

I et velafgrænset område tæt omkring det tidligere renseri er der risiko for indtagelse af eller hudkontakt med jord med indhold af PCE og terpentin, som overskrider Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterier.

I et større område omkring og nedstrøms renseriet er der som følge af afdampning fra en underliggende forurening af poreluft, jord og grundvand risiko for udeluftkoncentrationer af chlorerede opløsningsmidler (PCE, TCE og VC) og olieprodukter (terpentin og benzen), som overskrider Miljøstyrelsens afdampningskriterier.

Tilsvarende er der i det tidligere renseri samt i de nedstrøms beliggende lejligheder (primært i stueetagen og på 1. sal) risiko for koncentrationer af chlorerede opløsningsmidler (PCE og VC) og benzen i indeklimaet, som overskrider Miljøstyrelsens afdampningskriterier. Det vurderes, at de forhøjede indeklimakoncentrationer skyldes såvel tilførsel fra forurenede udeluft samt afdampning fra den underliggende forurening.

Risikovurderingen i forhold til arealanvendelsen er sammenfattet i figur 2.4.



2.4 Risikovurdering i forhold til arealanvendelsen på lokaliteten

2.5.2 Grundvandsinteresser og recipienter

Lokaliteten er beliggende ca. 300 m syd for Limfjorden i et område med begrænsede drikkevandsinteresser. De nærmeste indvindingsboringerne er beliggende hhv. 900 og 1.200 meter i syd- og østlig retning.

Det øvre sekundære og forurenede grundvandsmagasin er beliggende fra ca. 1,7-3,7 m.u.t. Det primære magasin findes givetvis fra ca. 10 m.u.t. De to magasiner adskilles af yngre yoldialer. Strømningsretningen i såvel det sekundære som det primære magasin vurderes at være nordlig mod Limfjorden.

Det er vurderet, at forureningen på lokaliteten ikke udgør en akut trussel mod områdets primære grundvandsmagasin. Forureningen giver imidlertid anledning til en belastning af det øvre grundvand med forureningsniveauer væsentligt over drikkevandskriteriet, og afhængigt af forureningens udbredelsesmønster, lerlagets hydrauliske egenskaber og nedbrydningsforholdene kan der på sigt ske en påvirkning af det dybereliggende grundvandsmagasin.

Nærmeste recipient er Limfjorden beliggende ca. 300 meter i nordlig retning. Der vurderes ikke at være risiko for uacceptabel påvirkning af Limfjorden med forurening hidrørende fra det tidligere renseri på baggrund af de foreliggende resultater.

2.6 MÅLSÆTNING MED OPRENSNING

Formålet med afværgeforanstaltningerne er, at den nuværende arealanvendelse på matriklerne kan opretholdes uden risiko for indånding af gasarter såvel indendørs som udendørs samt uden risiko for hudkontakt eller indtagelse af forurenede jord. Endvidere skal en fremtidig forureningsspredning til dybereliggende grundvandsmagasiner hindres.

I samråd med Nordjyllands Amt er det således valgt, at de foreslåede afværgeforanstaltninger målrettes mod fjernelse af forureningskilden under/umiddelbart omkring det tidligere renseri.

Ved de foreslåede afværgeforanstaltninger sættes der ikke ind overfor eksisterende forureningsfaner i det øvre magasin. Idet der ikke er væsentlige vandindvindingsinteresser i området, samt at arealanvendelsen nedstrøms lokaliteten mod Limfjorden er mindre følsom, vurderes der ikke at være en uacceptabel risiko forbundet med de nuværende grundvandskoncentrationer udenfor matriklen. Ved fjernelse af forureningskilden vil der endvidere ske en betydelig reduktion i yderligere tilførsel til det sekundære grundvandsmagasin.

3 Afværgeteknik, -anlæg og -strategi

3.1 DAMPSTRIPNING, KORT BESKRIVELSE AF TEKNIKKEN

Dampstripning er en in situ afværgeteknik, som er velegnet til oprensning af forurening med flygtige og semi-flygtige forureningskomponenter (chlorerede opløsningsmidler, olieprodukter som benzin, let gasolie, petroleum, terpentiner samt kreosot) fra forholdsvist højerpermeable, sandede jordlag. Teknikken er ligeledes effektiv til oprensning af ca. 0,5 meter af mere lavpermeable jordlag, som støder op til en dampzone i højerpermeable lag. Teknikken er beregnet til oprensning af kildeområder med kraftig residual jordforurening samt forurening på fri fase.

Ved dampstripning opvarmes jordlagene af den varme, som afgives, når damp kondenserer ved kontakt med kold jord/grundvand. Ved opstart af dampinjektionen opvarmes jordlagene umiddelbart omkring borerne gradvist til damptemperatur, hvorefter der udbredes dampzoner fra injektionsboringerne.

Dampinjektionen foretages ofte fra en række borer i periferien af kildeområdet således, at der opnås en sammenhængende ring af damp omkring kildeområdet, såvel i umættet som mættet zone. Ved etableringen af en damp-ring i den mættede zone mellem injektionsboringerne er det hensigten at opnå en hydraulisk adskillelse af kildeområdet fra det omkringliggende grundvandsmagasin. Dampzonen blokerer så at sige for tilstrømmende grundvand, hvorefter kildeområdet delvist kan afvandes.

Ved opvarmningen af jordlagene og etableringen af ovennævnte damp-ring mobiliseres forureningen mod den centrale del af kilden. Forureningen mobiliseres dels ved kogning af fri fase, nedsættelse af viskositet, densitet og overfladespænding for frie faser, ved desorption af jordforurening samt ved afdampning af opløst forurening til damp/poreluft. Den mobiliserede forurening føres med dampen frem til kondensationsfronten, som markerer overgangen til områder, som endnu ikke har nået damptemperatur. I kondensationsfronten vil der ske ansamling af fri fase forurening samt kondensation af damp og gasformig forurening.

I den centrale del af kilden foretages ekstraktion af poreluft, grundvand og damp med henblik på at opnå en dampstrømning fortrinsvis ind mod kildeområdet samt for at opnå en opsamling af den mobiliserede forurening på gas- og væskeform.

En forudsætning for anvendelse af dampstripning er, at permeabiliteten for jordlagene er større end ca. 1 darcy ($1 \text{ Darcy} \sim 10^{-12} \text{ m}^2$), svarende til minimum finsand. Udbredelsen af dampzonerne, som beskrevet ovenfor, foregår ved konvektiv transport i de højerpermeable jordlag. I lavpermeable jordlag kan der i praksis ikke etableres egentlige dampzoner med konvektiv transport. Lavpermeable lag, som støder op til højerpermeable lag, kan dog opvarmes og oprenses ved varmeledning fra dampzoner i disse. Dybden ind i de lavpermeable lag, hvortil der kan oprenses, afhænger primært af, hvor længe der opretholdes damptemperatur i det tilstødende højerpermeable lag.

Dybder på 0,5 – 1 meter ind i lerlag er nævnt i flere referencer (Miljøstyrelsen 1998b).

Dampstrippingen foretages typisk med kontinuert injektion, indtil hele oprensningsområdet har nået damptemperatur. Herefter følger ofte en periode med cyklisk drift.

Formålet med den cykliske drift er at reducere niveauet af opløst forurening i kondensatzonen samt at mobilisere og fjerne forurening, som ikke oprenses under kontinuert drift af anlægget. Den cykliske drift er således primært rettet mod opløst forurening i kondensatet omkring dampzonerne samt opløst og eventuel fri fase i lavpermeable dele af oprensningsområdet.

Ved cyklisk drift foretages en pludselig trykaflastning i det opvarmede område (ved neddrøsling/standsning af dampinjektionen og eventuelt samtidig øgning af ekstraktionsvakuum).

Den forventede oprensningseffekt ved den cykliske drift antages primært at skyldes følgende fire mekanismer:

- Ved den pludselige trykaflastning i periferien af dampzonen sænkes kogepunktet i den tilstødende kondensat mættede jord. Herved opstår en spontan trykafhængig kogning af kondensat og hermed en frigivelse af opløst forurening til gasfasen.
- Ved kollaps af dampzonen opnås ventilation med ikke kondensérbar poreluft i zonen mellem den formindskede dampzone og den kondensatholdige jord. Herved kan forureningskomponenterne fjernes fra jorden ved ekstraktion af poreluften.
- Afkølingen ved terræn vil bevirke, at der over dampzonen tæt på terræn dannes en zone med kondensat. Dette kondensat består af fortættet damp samt forureningskomponenter i denne damp. Ved pludseligt kollaps af dampzonen reduceres trykket i den umættede zone under den kondensatholdige terrænnære del af den umættede zone. Dette vil medføre, at kondensatet gravitativt vil infiltrere den tidligere dampzone, hvor der fortsat er meget høje jordtemperaturer. Herved opnås en afdampning af kondensat og forurening og en mulighed for bortventilation af den dannede gasfase med poreluften.
- Såfremt der forekommer fri fase PCE i sprækker i leren under det forurenede sandlag vil trykaflastningen medføre en kraftig gradient i poretrykket fra områder med fri fase og vand mod dampzonen (Heron G. 2001). Hermed mobiliseres eventuel fri fase ud af leren.

Det skal understreges, at funktionen og betydningen af ovennævnte mekanismer ikke er tilbunds gående belyst.

På Østerbro var det forventet, at den cykliske drift primært ville medføre en øget oprensningseffekt i de vandmættede (kondensat og regnvand) jordlag omkring og specielt over dampzonen samt af eventuel fri fase i sprækker i den underliggende ler.

Ovennævnte anlægsopbygning og driftsstrategi sikrer med størst mulig sikkerhed, at der ikke opstår utilsigtet spredning af forurening ud af oprensningsområdet.

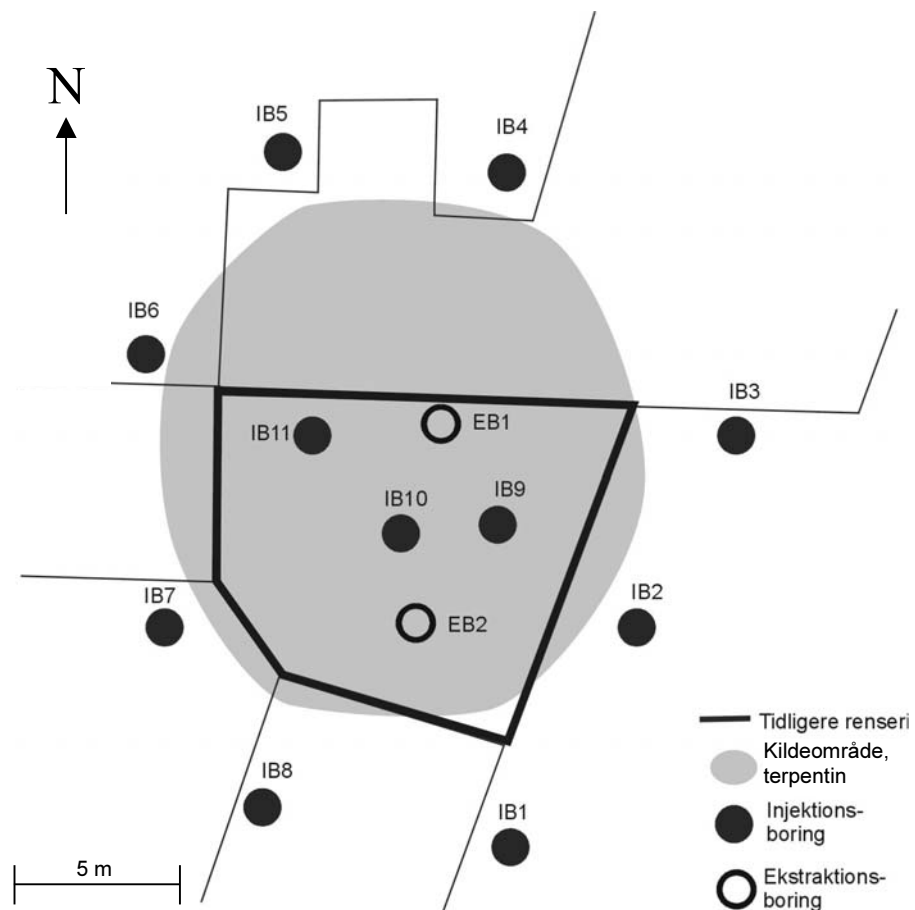
3.2 DIMENSIONERING OG KORT BESKRIVELSE AF AFVÆRGEANLÆGGET

Dampinjektionen på Østerbro er indrettet til oprensning af et forholdsvis velafgrænset kildeområde. Afværgeanlægget er dimensioneret på baggrund af erfaringer fra lignende oprensninger foretaget i USA, herunder Alameda Point, San Francisco og ud fra beregninger med et modelværktøj til simulering af dampudbredelser i porøse jordlag udviklet af NIRAS, SteamTech Inc. og University of California, Berkeley. Dette værktøj er indbygget i et excel-regneark og er baseret på Marx Langenheims udtryk for energibalancen ved dampinjektion (med varmetab), en massebalance for injiceret vand (som damp), darcys strømningsligning og tilstandsligningen.

Efter dampoprensningen er der foretaget simuleringer af forskellige scenarier for udbredelse af dampzoner mv. ved hjælp et designværktøj for dampoprensninger udviklet på DTU. Simuleringerne er gennemført af Jacob Gudbjerg, DTU og en artikel, som beskriver de opnåede resultater er vedlagt i bilag 3. I relation til det valgte design for oprensningen understøtter simuleringerne med det nye værktøj, at designet samt afværgestrategien på Østerbro er konservativt.

Dimensioneringen er foretaget ud fra ønsket om at opnå en sammenhængende ring af damp rundt om kildeområdet efter ca. 15 dage og en fuld opvarmning af kildeområdet efter ca. 30 dage. Det maksimalt tilladelige injektionstryk er bestemt som ca. 0,75 til ca. 1 gange trykket fra jordsøjlen over injektionsniveauet, svarende til ca. 0,4 – 0,6 atm. Estimeringen af den mulige dampinjektion samt oppumpningen af grundvand er baseret på in situ tests til bestemmelse af permeabiliteten i den mættede zone. Der er således udført slug tests med datalogning i en ø160 mm boring etableret nær oprensningsområdet samt tre-trins pumpe tests i tre ø63 mm undersøgelsesboringer i kildeområdet. Samtlige testboringer var filtersat over hele den mættede zone. Permeabiliteten i den mættede zone er herved estimeret til mellem 6 og 15 darcy. Estimeringen af den mulige oppumpning af poreluft/damp samt det nødvendige pumpevakuum er foretaget ved en vakuumventilationstest udført i en ø160 mm boring etableret nær oprensningsområdet. 10 stk. poreluft sonder og boringer er anvendt til manuelle målinger af vakuumudbredelse. Ved et pumpevakuum på ca. 85 mbar er der opnået en ydelse på ca. 55 m³/time. Ved denne pumpeindstilling var afstanden fra pumpeboringen til 1 mbar vakuumkurven (influenradius) ca. 3 – 4 m.

På baggrund af simuleringer med ovennævnte beregningsværktøj og de nævnte forudsætninger/inddata er det valgt at foretage oprensningen ved hjælp af 11 injektionsboringer. Otte af de 11 injektionsboringer er placeret i periferien af forureningen, mens der centralt i oprensningsområdet er etableret tre injektionsboringer med henblik på at sikre en tilstrækkelig opvarmning i centrum af forureningen sidst i driftperioden. Et oversigtskort med boringsplacering fremgår af figur 3.1.



Figur 3.1 Placeringen af injektions- og ekstraktionsboringer på lokaliteten

Injektionsboringerne er udført i 2" stålrør, og er filtersat med en halv meter filter umiddelbart over lerlaget (ca. 3,2-3,7 m.u.t.).

Den samlede dampinjektionsmængde var estimeret til maksimalt 1.200 kg damp per time (ca. 150 kg/time/boring) og har under oprensningen andraget op til 1.000 kg/time (125 kg/time/boring) ved et maksimalt injektionstryk (overtryk i forhold til atmosfæretryk) på ca. 0,5 – 0,6 atm. (ca. 0,7 atm. i enkelte boringer). I perioden med kontinuert drift har injektionsraten typisk været 600 – 800 kg/time (75 - 100 kg/time/ boring). Fra en centralt placeret generator, er dampen ved hjælp af brugte overjordiske fjernvarmerør tilledt de enkelte boringer. Ved hjælp af kugleventiler har det været muligt at foretage en individuel justering af dampflowet til de enkelte boringer. Det maksimale dampflow til en boring har været ca. 140 kg/time.

For driftsperioden var forventet en grundvandsoppumpning på ca. 1-5 m³/time, mens der var forventet en ekstraktion af poreluft på ca. 250 – 350 Nm³/time.

Centralt i kildeområdet er der ekstraheret grundvand (ca. 1 – 3 m³/time) og poreluft/damp (ca. 300 nm³/time) fra to boringer. De to ekstraktionsboringer er udført med 6" stålrør, og er filtersat fra ca. 1,0-4,0 m.u.t.

Den ekstraherede gas- og væske fase er tilledt et behandlingsanlæg, hvor der efter køling af begge medier er foretaget en udskilning af kondensat og en opsamling af fri fase forurening i en særskilt beholder. Det kølede grundvand/kondensat samt den ikke kondenserbare del af gasfasen er ledt

gennem filtre med aktivt kul inden afledning til henholdsvis kloak og atmosfære.

3.3 BESKRIVELSE AF DRIFTSSTRATEGIEN

Oprensningen på Østerbro 24, Aalborg er foretaget med en strategi som beskrevet ovenfor. På baggrund af simuleringer af den teoretiske dampudbredelse på lokaliteten blev det estimeret, at der inden for ca. 15 dages kontinuert injektion kunne etableres en sammenhængende ring af damp i periferien af kildeområdet. Det blev desuden estimeret, at kildeområdet i al væsentlighed ville have opnået damptemperatur efter ca. 30 dage. Den samlede driftstrategi omfattede således 30 dages kontinuert injektion efterfulgt af 30 dages cyklisk drift.

4 Monitering finansieret af Nordjyllands Amt

I dette kapitel beskrives den monitering, som Nordjyllands Amt har foretaget i forbindelse med dampoprensningen med henblik på at dokumentere afværgeforanstaltningernes effekt og fastlægge af driftsstrategien.

Moniteringsprogrammet er inddelt i 3 faser: Før opstart, driftsperiode for dampinjektion og efter stop af dampinjektion. Moniteringsprogrammet er skitseret i tabel 4.1.

Tidspunkt		Før start	Under drift			Efter drift		
			Timeligt/dagligt ⁷	Hver dag/hver 2. dag	Hver 2. uge	Ved stop	Efter 1 mdr.	Efter 3 mdr.
Temperatur	14 mb ³⁾	X		X ⁸⁾		X	X	X
	10 ib ⁴⁾	X		X ⁸⁾		X	X	X
	2 eb ⁵⁾	X		X ⁸⁾		X	X	X
Luft og damp. Flow og tryk.	9 ib		X					
	2 eb		X					
	Før manifold ¹⁾		X					
	Efter sammenløb ²⁾		X					
Vand. Flow	2 eb		X					
Vandforbrug	Stophane		X					
	Indløb til dampgenerator		X					
Afledt vand	Vandur på afgang		X					
Vandprøver	2 eb	X			X	X	X	
	6 mp						X	
	Udløb				X			
Luftprøver	Sonder ⁶⁾	X				X	X	
	2 eb og efter sammenløb ²⁾				X			
	Afkast				X			
Jordprøver	5 boringer						X	
Opsamlet fri fase	Fri fase tank			X ⁹⁾				

mb: monitoringsboring

ib: injektionsboring

eb: ekstraktionsboring

1) Før manifold i dampinjektionsanlæg

2) Efter sammenløb og køling i behandlingsanlæg

3) I alt 112 målepunkter

4) I alt 58 målepunkter

5) I alt 18 målepunkter i eb og 4 målepunkter på oppumpet grundvand/poreluft. Herudover to målepunkter på hhv. luft og vand før kulfiltre

6) I alt 8 stk. poreluftsonder i oprensningsområdet

7) Ved ændring af driftsstrategien foretages aflæsning pr. time; ellers dagligt

8) Måles hver 2. dag

9) Aflæses dagligt

Tabel 4.1 Moniteringsprogrammet finansieret af Nordjyllands Amt

Som det fremgår af monitoringsprogrammet, er temperaturudviklingen i formationen fulgt i 14 stk. monitoringsboringer hver forsynet med 5 stk. termofølere samt i 10 stk. injektions- og 2 stk. ekstraktionsboringer forsynet med henholdsvis 9 og 10 termofølere.

Til monitoring af forureningsniveauet i grundvandszonen er der udtaget vandprøver fra monitoringsboringer og ekstraktionsboringer. Ligeledes er der udtaget vandprøver efter behandlingsanlægget (efter kulfiltre) for eftervisning af, at udledningskriterierne til spildevandssystemet blev overholdt. Der er udtaget poreluftprøver i oprensningsområdet før og efter oprensning, og under oprensningen er der udført PID-måling samt udtaget prøver af afkastluften fra behandlingsanlægget.

Udover temperaturmålinger i monitorings-, injektions- og ekstraktionsboringer er der foretaget aflæsning af tryk i samtlige boringsafslutninger. Endvidere er der foretaget aflæsning af temperatur og flow for væskefasen samt temperatur og relativt flow for gasfasen fra ekstraktionsboringerne individuelt før behandlingsanlægget samt aflæsning af tryk, flow og temperatur på fællesstrengen for gasfasen efter behandlingsanlægget (umiddelbart før kulfiltrerne). Målingerne er som udgangspunkt foretaget hver anden dag under den kontinuerede drift og ugentligt ved den cykliske drift og umiddelbart herefter.

På dampinjektionsanlægget er det samlede vandforbrug, den samlede injicerede dampmængde samt den injicerede mængde damp i hver boring registreret hver anden dag. Den samlede vandmængde udledt til spildevandssystemet er registreret, og det er forsøgt at foretage en detaljeret opgørelse af mængden af oppumpet fri fase forurening.

Bestemmelsen af fri fase forurening ved pejling af koalescensudskilleren viste sig dog at være behæftet med meget stor usikkerhed. Dette skyldes, at der få dage efter det første gennemslag af varmt kondensat til ekstraktionsboringerne kunne observeres ansamling af en slags emulsion på vandspejlet i udskilleren. Denne emulsion havde en hvidgul farve og bestod overvejende af fri fase forurening. Der blev ikke foretaget nærmere analyser af emulsionen, som dog umulig gjorde troværdige pejlinger af koalescensudskilleren.

Parallelt med ovenstående kontrolprogram har entreprenøren dagligt registreret vandforbruget for hele behandlingsanlægget og for dampgeneratoren samt produceret dampmængde. Ugentligt er forbruget af dielselolie for dampgeneratoren registreret.

Til dokumentation af oprensningsniveauet er der efter afslutning af oprensningen samt nedkøling af området udført 8 boringer og udtaget 9 stk. jordprøver (ekskl. 18 stk. jordprøver til dokumentation af eventuel vertikal forureningsspredning). Endvidere er der udtaget 2 stk. vandprøver samt udført poreluftmålinger i 14 stk. sonder. Målepunkterne til jord- luft og vandprøvetagning er alle placeret inden for oprensningsområdet – med fokus på de tidligere værst forurenede områder.

Resultaterne af den udførte monitoring før, under og efter driften er præsenteret i (NIRAS 2002). Udvalgte resultater, herunder temperaturdata fra samtlige målepunkter er inddraget i datapræsentationen i nærværende rapport.

5 Aktiviteter under Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprogram

Inden Miljøstyrelsen blev involveret i projektet med aktiviteter under teknologipuljen var der som led i udarbejdelsen af afværgeprojektet for Amtet opstillet et monitoringsprogram. Dette program var opstillet med henblik på at tilvejebringe det nødvendige minimum af viden for projektets gennemførelse. Programmet omfattede daglige driftstilsyn samt dokumentation af dampfronternes udbredelse i jorden, oppumpede mængder af gas og væske samt af forureningsniveauet i den ekstraherede gas- og væskefase såvel før som efter rensning.

Aktiviteterne under teknologiprogrammet er tilrettelagt således at der opnås en væsentligt udbygget dokumentation af temperaturudbredelsen i jorden og en mere detaljeret beskrivelse af forureningsfjernelsen som henholdsvis gas og væske samt det tidlige forløb af forureningsfjernelsen. Desuden indeholder teknologiaktiviteterne en række andre elementer, som er beskrevet i dette kapitel. Resultaterne af aktiviteterne under Teknologiprogrammet fremgår af kapitel 7.

5.1 UDVIDET TEMPERATURMONITERING

Den påtænkte temperaturmonitoring som led i Amtets oprensning omfattede foruden målinger i injektions- og ekstraktionsboringer 14 stk. boringer med termofølere i 5–6 dybder. Samlet omfattede programmet ca. 160 målepunkter.

Med henblik på en mere detaljeret belysning af forløbet af dampudbredelsen i det forurenede sandlag samt en væsentligt mere detaljeret monitorering af temperaturudbredelsen i lerlaget, som underlejrer sandlaget, er antallet af målesteder samt målepunkter vertikalt i formationen øget, som en aktivitet under Teknologiuudviklingsprogrammet.

Der er således under Teknologiuudviklingsprogrammet etableret yderligere 14 temperaturmålesteder med temperaturmonitoring for hver halve meter fra 0,5 til 5,0 m.u.t. I den nederste del af sandlaget samt i toppen af lerlaget er målingerne intensiveret således, at der i 6 monitoringsboringer centralt i oprensningsområdet, og omtrent radiært bort fra den ene af injektionsboringerne, er etableret målepunkter for hver ca. 10 cm fra 2,0 til 5,0 m.u.t.

Med boringsplaceringen er det tilstræbt at opnå en detaljeret monitorering af temperaturudbredelsen i to radiære snit bort fra en af injektionsboringerne, IB1. Dampinjektionen i denne boring er desuden opstartet 2 dage forud for de øvrige boringer, hvorved der er opnået en samlet injektionsperiode i denne boring på ca. 7 dage, før opvarmningen fra de øvrige boringer interfererer på temperaturmålingerne ind mod den nærmeste ekstraktionsboring, EB2.

Temperaturmoniteringen er generelt foretaget manuelt hver anden dag i perioden med kontinuert drift og ugentligt ved cyklisk drift og umiddelbart herefter.

I de seks boringer med termofølere for ca. hver 10 cm fra 2,0 – 5,0 m.u.t., er temperaturerne i udvalgte dybder registreret automatisk hvert kvarter med et loggersystem. Logningen er foretaget i 16 dybder i hver boring ved hjælp af en centralt placeret multiplexer og datalogger, tilkoblet en PC. Data fra temperaturlogningen indgår i bilag 1.

Som grundlag for evaluering af opvarmningsforløbet og for justeringer af driftsstrategien er der for hver målerunde løbende optegnet iso-kurver for temperaurudbredelsen i udvalgte dybder (1,0; 1,5; 2,25; 3,0 og 3,75 m.u.t.). Iso-kurver for udvalgte dage og dybder er vedlagt i bilag 1.

5.2 MONITERING AF VERTIKAL TRYKFØRDELING

Sideløbende med projektet på Østerbro i Aalborg er der på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) – Miljø og Ressourcer - udviklet et modelværktøj til simulering af dampudbredelse i forskellige sedimentter og stratigrafier (Gudbjerg et al. 2001). Med henblik på at kalibrere/validere dette værktøj og gennemføre beregninger af mulig vertikal mobilisering af PCE som følge af en dampoprensning, er det forsøgt at foretage en monitorering af trykforholdene omkring toppen af lerlaget under kontinuert og cyklisk drift.

NIRAS er ikke bekendt med, at der på andre projekter er udført in situ trykmålinger af denne type i forbindelse med dampoprensningsprojekter. Der foreligger således ikke umiddelbart praktiske erfaringer med egnet udstyr til in situ trykmåling. Der er ikke udviklet in situ sensorer til dette formål, og sensorer på markedet, som muligvis ville kunne anvendes, er uforholdsmæssigt dyre. Det blev således valgt at etablere et meget lavteknologisk målesystem.

Trykmoniteringen er etableret i to boringer placeret umiddelbart op ad to temperaturboringer med termofølere for hver ca. 10 cm, fra 3,0 – 5,0 m.u.t. Målepunkterne for tryk udgøres af ø 8 mm stålrør forsynet med et finmasket trådned for åbningen, etableret i dybderne 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 og 5,0 m.u.t. Til sammenligning er overgangen fra sand til ler ved de to målesteder truffet ca. 3,5-3,6 m.u.t. De fem stålrør er bundtet og installeret i en arbejds-gang i 8” hulsneglsboringer. Ud for hvert målepunkt er der gruskastet med ca. 20 cm filtersand. Herover er der etableret en forsegling med ca. 30 cm meget tyktflydende ”storebæltsblanding”¹, før der igen er placeret sand udfør næste målepunkt. Nær terræn er der forseglet med ca. 1 meter storebæltsblanding.

Det udviklede måleprincip gjorde brug af en trykmåler af boble-typen. Målingerne skulle foretages manuelt ved terræn. Efter en kort rensning af målerørene med trykluft skulle der ved hjælp af en tryktank og reduktionsventiler etableres et luftflow ned i målerøret på 0,5 – 1,0 l/min. Det tryk, som var nødvendigt for at opretholde dette lave flow, ville omtrent svare til trykket i formationen ved målerørets spids. Laboratorieforsøg med dette måleprincip verificerede, at der ved det påtænkte lave flow kunne opnås en måleusikkerhed på maksimalt 1 cm vandsøjle, svarende til ca. 1 mbar.

¹ Bentonit, lavalkalisulfatbetandig cement, betokem og vand

Få dage efter etableringen af målepunkterne blev det konstateret, at otte af ti målepunkter var tilstoppede og ikke kunne renses. De funktionsduelige målepunkter var placeret i sandlaget i hver sin boring.

Da formålet med målingerne var at studere trykvariationer over dybden ved samme målepunkt til forskellige tidspunkter, blev det besluttet at udelade yderligere monitorering af trykforholdene.

5.3 FASTLÆGGELSE AF JORDPARAMETRE

Som led i det ovennævnte arbejde med udvikling af et simuleringsværktøj for dampoprensninger på ISVA, DTU er der gennemført laboratorieforsøg til fastlæggelse af de aktuelle jordlags kapillartrykskurve og permeabilitet.

Centralt i oprensningsområdet er der udtaget 8 jordprøver fra boresneglen fra 1,5 til 3,8 m.u.t. samt en intaktkerne af det underliggende lerlag og to intaktkerner af de øverste jordlag.

Forsøgene på jordprøverne er udført på DTU.

5.4 VURDERING AF OMFANGET AF VÅDOXIDATION

I forbindelse med dampoprensninger af grunde forurenede med kreosot (i USA) er der konstateret markant forhøjede koncentrationer af CO₂ i den ekstraherede gasfase. Efterfølgende laboratoriestudier på Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) har vist, at der i iltrige jordmiljøer med højt vandindhold og temperaturer omkring 100°C kan ske en kemisk oxidation af organisk stof, herunder organiske forureningskomponenter under frigivelse af CO₂. Denne oxidation kaldes Hydrous Pyrolysis Oxidation (HPO) og kan på dansk benævnes "vådoxidation". Mekanismerne bag denne vådoxidation er kun klarlagt for et begrænset antal miljøfremmede stoffer (TCE, PCE, naphthalen og kreosot-komponenter), men undersøgelser tyder på en universal kemisk nedbrydning, når stofferne blandes med ilt og opvarmes til over 90 °C. Ønskes en speciel høj iltningseffekt, kan dampen iblandes atmosfærisk luft eller ren ilt.

Som led i en igangværende oprensning af chlorerede opløsningsmidler ved dampstripping på Industrivej i Hedehusene er der i flere ekstraktionsboringer observeret markant forhøjede CO₂ værdier (op til 50 % v/v).

I tilknytning til oprensningen på Østerbro i Aalborg er det valgt at belyse betydningen af vådoxidation for forureningsfjernelsen på et overordnet niveau, uden nærmere studier af mekanismerne bag oxidationen.

Forventningen var, at afkastluften efter få ugers drift overvejende ville bestå af udeluft som på grund af vakuume ekstraktionen, blev trukket ned gennem den umættede zone i oprensningsområdet. Under opvarmningen er temperaturen i første omgang hævet nær injektionsboringerne, mens den centrale del af oprensningsområdet havde temperaturer omkring baggrundsniveauet. Ved opvarmningen til ca. 40°C, øges den bakterielle aktivitet, mens der ved temperaturer over ca. 50°C forventes en markant hæmning af den biologiske nedbrydning. I områder med temperaturer omkring 100°C kunne der ske den omtalte vådoxidation.

CO₂-koncentrationen i afkastluften før opvarmningen skulle således repræsentere baggrundsniveauet i området samt den biologiske nedbrydning af forureningen ved baggrundstemperaturen. I opvarmningsfasen ville CO₂-koncentrationen i afkastluften afspejle såvel den biologiske omsætning af forureningen som den forventede vådoxidation. Efter fuld opvarmning af oprensingsområdet var det forventet, at CO₂-indholdet overvejende repræsenterede den forventede vådoxidation af forureningskomponenterne.

I alle oprensningens faser har CO₂-indholdet i poreluften vekselvirket med grundvandsmiljøet via karbonatsystemet. Ved den udførte grundvands- og poreluftekstraktion i oprensningsperioden har der ikke indstillet sig nogen form for hydraulisk eller kemisk ligevægt. En detaljeret fastlæggelse af CO₂-tabet til karbonatsystemet vurderes således ikke mulig. CO₂-produktion fra en betydende vådoxidation vurderes dog, uanset tabet til karbonatsystemet, at ville afspejles ved forhøjede CO₂-koncentrationer i afkastluften.

Moniteringen til belysning af mulig vådoxidation i dampzonen er således udelukkende udført ved CO₂, O₂ og CH₄ målinger på afkastluften fra ekstraktionssystemet før, under og efter opvarmningen. Moniteringen er foretaget med et IR-instrument ca. 2 gange dagligt. Resultaterne af den udførte monitering er vist i bilag 2. Såfremt det skal dokumenteres nærmere, hvorfra den dannede CO₂ stammer, kan der anvendes isotopanalyser (forholdet mellem C₁₃ og C₁₄).

5.5 UDVIDET DOKUMENTATION AF VERTIKAL MOBILISERING AF FRI FASE FORURENING

En mulig ulempe ved dampstripping er risikoen for vertikal mobilisering af fri fase til større dybde end før oprensningen. Dette kan forårsages af to mekanismer: Dels kan ansamling af væsentlige sammenhængende legemer af fri fase i kondensationsfronten forårsage en lodret mobilisering heraf, og dels medfører opvarmningen en ændring i overfladespændingen mellem vand og fri fase, hvorved mobiliseringen af fri fase ind i lavpermeable jordlag – som ikke direkte berøres af dampgennemstrømning - muligvis lettes.

Dette mulige fænomen er søgt klarlagt ved modelstudier på DTU, Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) og University of California, Berkeley samt ved beregninger i forbindelse med (Miljøstyrelsen 2000). Problemstillingen er ikke endeligt belyst, men formentlig kan dampstripping i umættet zone ved meget høj residual mætning med fri fase (formentlig mere end ca. 1.000 mg/kg for PCE) medføre en vertikal mobilisering. Modellsimuleringer for TCE udført på LLNL i umættet zone med meget høj residual mætning og viste dog ikke tegn på vertikal mobilisering (Aines et al 2001).

I den mættede zone er tilbøjeligheden til vertikal mobilisering på grund af opdrift og kapillære kræfter/overfladespændinger væsentligt mindre.

I litteraturen foreligger der ikke oplysninger om, at dampstripping som oprensningsteknik på feltskala har forårsaget vertikal mobilisering af forurening.

På Østerbro er der påvist fri fase PCE i en enkelt boring, og som led i dampoprensningen kan der være risiko for forureningsspredning til lerlaget under det forurenede sandmagasin. Den gennemførte driftsstrategi med cyklisk dampinjektion har dog sigtet mod at hindre en sådan spredning.

Med henblik på at opnå en detaljeret dokumentation af en eventuel vertikal forureningsspredning som følge af dampoprensningen er der gennemført jordprøvetagning i forskellige dybder i lerlaget i oprensningsområdet. Prøvetagningen er foretaget i to felter på 0,5 m x 0,5 m i den værst forurenede del af kildeområdet. Henholdsvis før og efter oprensningen er det udtaget prøver fra tre forede boringer i hvert felt. Prøverne er udtaget som intakte kerner af minimum 0,5 meters længde i dybdeintervallet fra 3,5 – 5,0 m.u.t. De intakte kerner er inspiceret visuelt, og opskåret for hver 10 cm. I hver snitflade er der udført PID måling samt farvetest for indhold af fri fase ved hjælp af Sudan IV. Desuden er prøverne fra toppen af lerlaget samt henholdsvis 10 og 30 cm nede i leren analyseret akkrediteret for indhold af chlorerede opløsningsmidler og kulbrinter.

Udtagningen af de intakte kerner er foretaget i områder, hvor der ligeledes udføres detaljeret temperaturmonitoring omkring toppen af lerlaget. Dette muliggør sammenstilling af analyseresultaterne med de opnåede temperaturer, jf. figur 7.6 og 7.7.

5.6 MONITERING AF FORURENINGSNIVEAU I AFKAST UNDER CYKLISK DRIFT

Oprensningen på Østerbro er foretaget ved omtrent kontinuert dampinjektion i en periode på ca. 70 dage til stort set hele oprensningsområdet havde nået damptemperatur og fortsat drift ikke medførte væsentlig yderligere opvarmning. Herefter er der foretaget cyklisk drift i ca. en måned.

Formålet med den cykliske drift er at reducere niveauet af opløst forurening i kondensat samt at mobilisere og fjerne forurening, som ikke oprenses under kontinuert drift af anlægget. Den cykliske drift er således primært rettet mod opløst forurening i kondensat omkring dampzonerne samt opløst og eventuel fri fase i lavpermeable dele af oprensningsområdet.

Mekanismerne bag cyklisk drift samt formålet hermed er overordnet beskrevet i kapitel 3. I den afsluttende del af den kontinuerte drift er der påvist meget lave forureningsniveauer i det oppumpede grundvand, og på baggrund heraf var det forventet, at den væsentligste effekt af den cykliske drift på Østerbro var, at trykafkastningen i dampzonen tillod kondensat over dampzonen at infiltrere de dybereliggende opvarmede jordlag. Herved ville kondensatets indhold af forureningskomponenter bringes på gasfase og kunne fjernes ved vakuume ekstraktion. Endvidere forventedes en effekt overfor eventuel fri fase PCE i sprækker i leren under det forurenede sandlag.

Dokumentationen af forureningsfjernelsen i de forskellige faser af den cykliske drift er styrket ved intensiv monitoring finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram. Monitoringen er dels foretaget ved PID-måling på afkastluft umiddelbart før kulfiltrene og dels ved analyse af kulrørprøver udtaget samme sted.

5.7 MONITERING AF RELATIV FUGTIGHED I AFKASTLUFT

I tilknytning til arbejdet på ISVA, DTU med udvikling af et simuleringsværktøj for dampoprensninger har det været et ønske under den cykliske drift at bestemme variationen i andelen af ikke kondenserbar gas i den ekstraherede gasfase. Dette er søgt opnået ved hjælp af en sensor til registrering af relativ fugtighed i den ekstraherede gasfase. Sensoren af typen Rense HX-730-M-02

blev installeret på ekstraktionsstrengen for gasfasen før behandlingsanlægget, og data er opsamlet på en logger af typen Nomad MAHR 32000. Der findes ingen sensorer designet til målinger af denne type, og den anvendte sensor blev udvalgt ud fra oplysninger om stor robusthed. Sensorens bestandighed i det aktuelle meget aggressive miljø kunne dog ikke garanteres af leverandøren.

Ca. 2 timer efter etableringen af målesystemet blev sensoren defekt. Gentagne forsøg på rensning mv. var resultatløse, og det blev besluttet ikke at erstatte sensoren.

6 Driftsforløb

I nærværende kapitel beskrives driftsforløbet af dampoprensningen på Østerbro – herunder injektions- og ekstraktionsrater, driftstop, den opsamlede forureningsmængde samt de problemer, som oprensningen i øvrigt har medført.

6.1 DRIFTSFORLØB, HERUNDER DRIFTSTOP

Fredag den 8. september 2000 blev dampinjektionen opstartet i en enkelt boring (IB1 jf. figur 3.1). Det er ligeledes omkring IB1, at der er foretaget detaljeret temperaturmonitoring. Begrundelsen for, at der i starten kun blev injiceret damp i en enkelt boring var, at der over en så lang periode som muligt ønskedes en detaljeret monitoring af dampudbredelsen fra en enkelt boring uden interferens fra de øvrige boringer.

Mandag den 11. september 2000 blev injektionen ligeledes startet i de øvrige boringer, og der blev justeret til en samlet injektionsrate på ca. 500 kg damp pr. time. Denne injektionsrate er opretholdt frem til fredag den 15. september 2000, hvor der blev justeret til en samlet injektionsrate på ca. 900 kg damp pr. time. Ved samme injektionstryk blev der registreret en væsentligt lavere – og utilstrækkelig - injektionsrate i IB5 i forhold til de øvrige boringer. Dette kunne ikke forklares ud fra geologiske forskelle eller særlige forhold i forbindelse med etableringen af boringen, og kunne ikke afhjælpes ved simpel rensning mv. af boringen. Med henblik på inden for meget kort tid at opnå en tilfredsstillende injektion ved IB5, blev denne boring den 21. september erstattet af en ny – uden yderligere ”opklaringsarbejde”.

Til ekstraktion af poreluft/damp er der anvendt en vakuumpumpe (sidekanalblæser). Den oppumpede poreluft/damp er afkølet, hvorved der kondenseres vand og eventuelt fri fase forurening. Efter separation af faserne er poreluften ledt til et kulfilter. For optimal udnyttelse af de anvendte kulfiltre skal indløbstemperaturen til filteret ligge under 25°C. Til afkøling af luftstrømmen før tilløbet til kulfilteret, er luftstrømmen ledt til en varmeveksler. Den 23. september 2000 er det konstateret, at kobberrør i varmeveksleren var gennemtærede. Som følge heraf blev injektion og ekstraktion indstillet i 5 dage, indtil en ny varmeveksler var monteret.

Den 30. september 2000 opstod der tekniske problemer med grundvandspumperne, hvilket medførte en markant nedsat effekt af ekstraktionen. Som følge heraf var det svært at sikre en strømning af dampen ind mod centrum af forureningen, og af frygt for opvarmning af de nærliggende bygninger, blev dampinjektionen indstillet. Problemet med de to trykluftdrevne grundvandspumper var, at lejerne var tæret bort pga. varme og høje forureningsniveauer. De to pumper blev udskiftet med en enkelt eldrevet centrifugalpumpe, som blev placeret i EB2 (Grundfos specialpumpe med ekstra motorkapacitet samt køleflader). Årsagen til, at der kun blev monteret én ny pumpe var, at der gennem hele den forudgående oprensningsperiode var konstateret en meget begrænset tilstrømning af grundvand til EB1 – formentligt som følge af geologiske inhomogeniteter i

oprensningsområdet. Det blev vurderet, at grundvandsoppumpning fra EB2 var tilstrækkeligt for en vellykket oprensning, og der blev således ikke etableret en ny ekstraktionsboring til erstatning for EB1.

Den 21. oktober 2000 opstod der problemer med vakuumpumpen, idet varme og forureningsniveauer havde medført en tæring i både pumpe- og motorenheden. Injektionen blev stoppet, og de beskadigede dele blev udskiftet inden genopstart af anlægget den 25. oktober 2000.

Forud for oprensningen var der en forhåbning om, at der kunne etableres en dampring omkring oprensningsområdet, som kunne blokere for udenomliggende/tilstrømmende grundvand. På grund af et højpermeabelt grovkornet lag umiddelbart over lerlaget var dette imidlertid ikke muligt, og i dybden ca. 3,2 til 3,5 m.u.t. var der derfor en fortsat tilstrømning af grundvand til oprensningområdet under oprensningen. I et begrænset område mellem EB1 og IB6, jf. figur 3.1, var der i forbindelse med de tidligere gennemførte undersøgelser konstateret fri fase PCE umiddelbart over lerlaget. For at sikre en opvarmning til damptemperatur og dermed en fjernelse af den fri fase PCE – til trods for tilstrømningen af grundvand – blev der i starten af november 2000 etableret en supplerende boring (IB11; jf. figur 3.1) i dette område. Denne boring har tilsyneladende haft den ønskede effekt, idet der umiddelbart efter opstart af injektion i IB11 er konstateret markant stigende niveauer af PCE i hhv. ekstraheret poreluft/damp og grundvand jf. figur 6.4 og 6.5.

Alt i alt var der en forventet driftsperiode for den kontinuerte drift på 30 dage. Perioden fra opstart til overgangen til den cykliske drift har været knap 3 måneder, heraf ca. 70 dage med dampinjektion. Denne markant forlængede driftsperiode skyldes dels de beskrevne driftsstop som følge af tekniske og mekaniske problemer og dels den fortsatte tilstrømning af grundvand til oprensningsområdet, som vanskeliggjorde en fuldstændig opvarmning af kildeområdet. Udover, at de mange driftsstop medfører, at anlægget i perioder står helt eller delvist stille, sker der også en betydelig afkøling af oprensningsområdet med efterfølgende behov for genopvarmning.

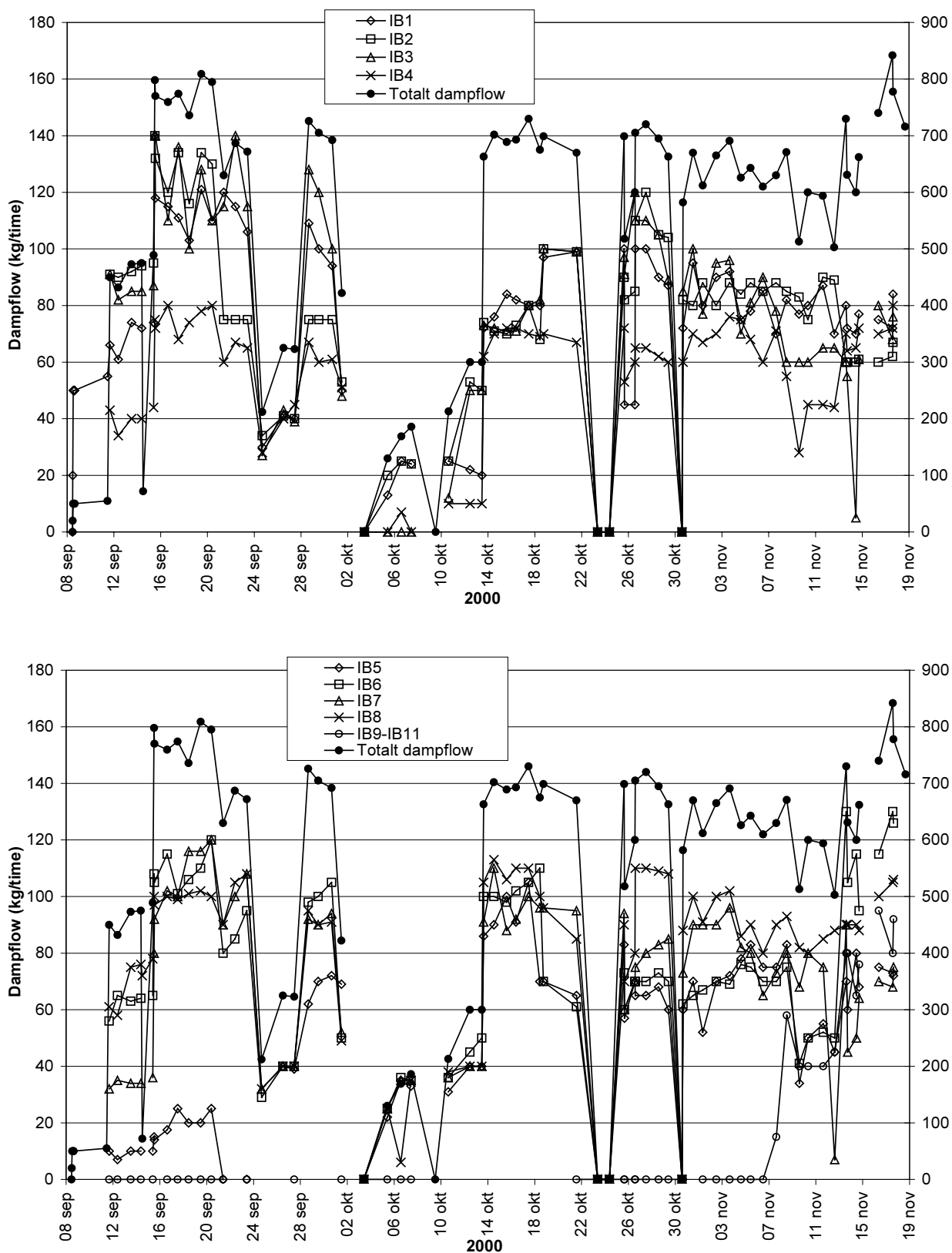
Den 5. december 2000 blev det besluttet at overgå fra kontinuert drift af anlægget til cyklisk drift, idet der på dette tidspunkt er observeret meget lave koncentrationer i såvel den ekstraherede luft/damp som vandfasen jf. figur 6.4 og 6.5.

Formålet med den cykliske drift af anlægget var at reducere niveauet af opløst forurening i kondensatet samt at mobilisere og fjerne forurening, som ikke er opløst under kontinuert drift af anlægget, herunder blandt andet opløst og eventuel fri fase i lavpermeable dele af oprensningsområdet.

I alt er der gennemført 5 cyklusser - med et betydeligt fald i forureningskoncentrationerne af terpentin og PCE gennem den cykliske driftsperiode. Den 5. januar 2001 er det valgt at stoppe dampinjektionen permanent, da det blev vurderet at være uforholdsmæssigt dyrt at fjerne den eksisterende restforurening ved fortsat drift af anlægget. For dog at sikre en fjernelse af eventuel forurening, som fra kondensatzonen infiltrerer den underliggende umættede zone, blev vakuume ekstraktionen opretholdt frem til begyndelsen af februar 2001. Tilsvarende blev oppumpningen af grundvand opretholdt frem til den ultimo januar 2001 for herved at sikre en hurtigere afkøling af oprensningsområdet.

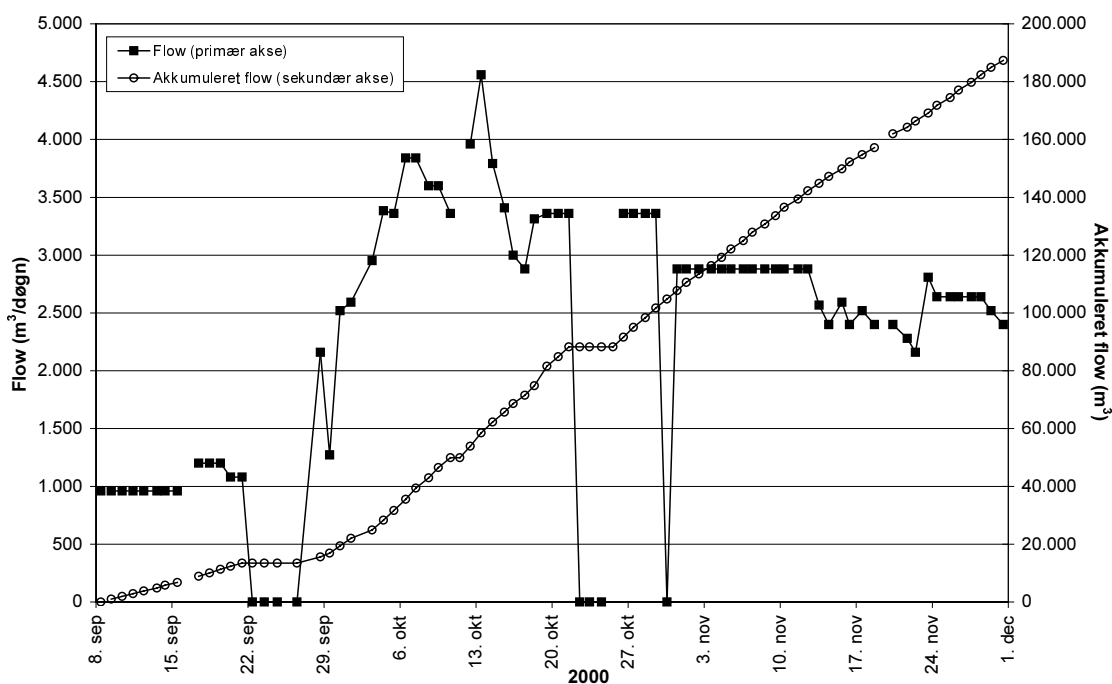
6.2 INJEKTIONS- OG EKSTRAKTIONSRATER

Der er injiceret op til 950 kg/damp per time i de i alt 11 injektionsboringer. Temperaturen af det injicerede damp har været 100-120°C. Det har været muligt at justere injektionsmængden til den enkelte boring vha. kugleventiler, og generelt har der været stor variation i injektionen i de enkelte boringer imellem. Denne forskel skyldes geologiske inhomogeniteter i oprensingsområdet, ligesom der er taget hensyn til, at injektionen ikke måtte medføre en utilsigtet opvarmning af de nærliggende bygninger.

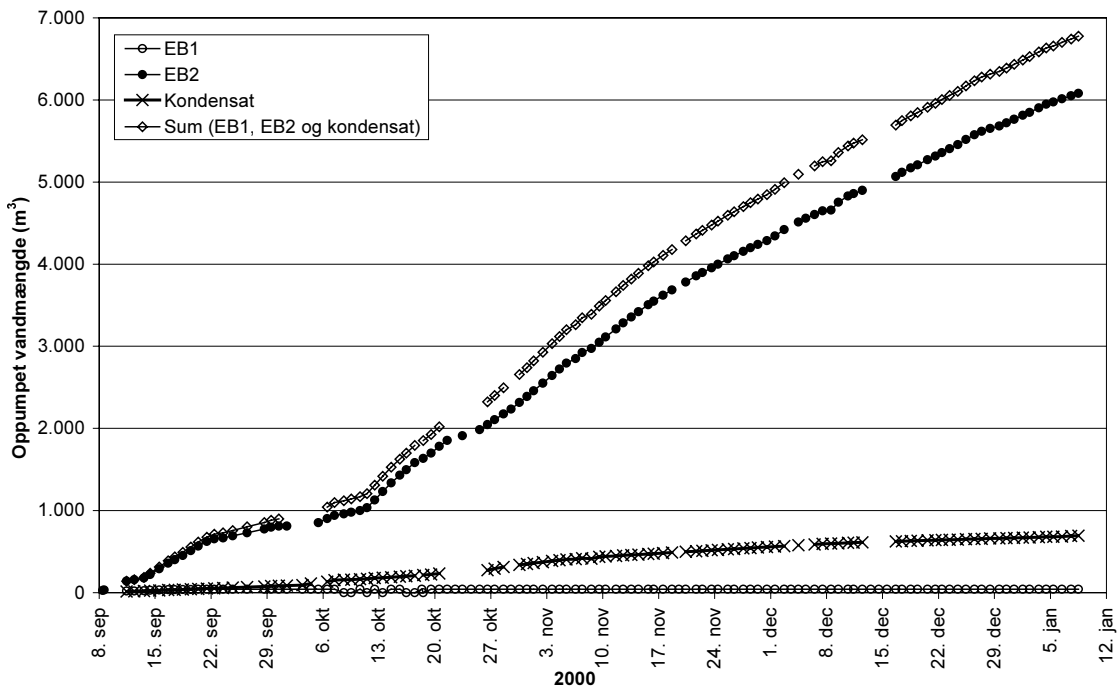


Figur 6.1 Dampinjektionsmængder per boring samt den justerede injektionsmængde

På grund af sidstnævnte har der således typisk været en større injektion i den sydligste boringer som følge af beboelsesejendommene over og nær den nordlige del af oprensingsområdet. Injektionsmængden i de enkelte boringer samt den summerede injektion gennem driftsperioden fremgår af figur 6.1.



Figur 6.2 Ekstraheret poreluft fra EB1 og EB2



Figur 6.3 Oppumpet og afledt grundvand

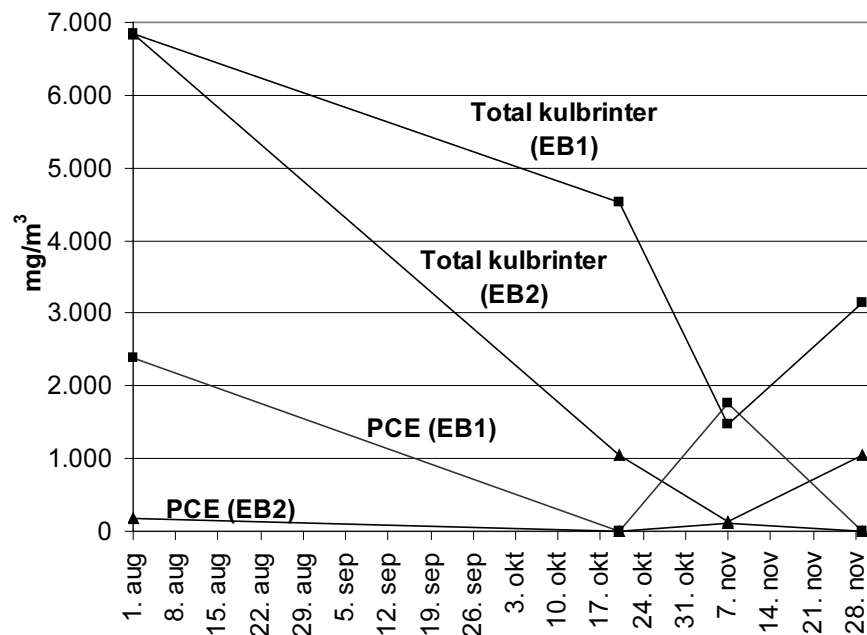
Til ekstraktion af poreluft og damp er der anvendt en vakuumpumpe med en ydelse på op til 350 m³/t. Der er ekstraheret op til ca. 190 m³/t med en typisk ekstraktionsrate på ca. 100 m³/t jf. figur 6.2. Langt den overvejende del er

ekstraheret fra EB2 – anslået 80-90%. Den oppumpede luftmængde er registreret efter kondensering og efter vakuumpumpen, og resultatet er behæftet med nogen usikkerhed, idet der til køling af vakuumpumpen tilføres atmosfærisk luft. En underentreprenør har anslået, at den ”falske luft” udgør i størrelsesordenen 10% af den aflæste værdi. Resultaterne i figur 6.2 er ikke korrigeret med hensyn til ”falsk luft”.

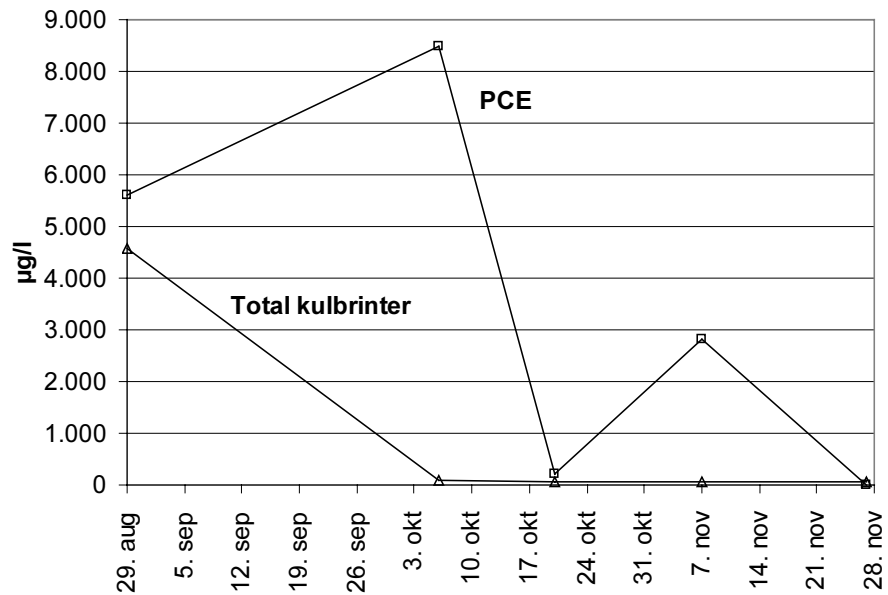
Oppumpningen af grundvand er som tidligere nævnt stort set kun foretaget fra EB2. Der er oppumpet ca. 0,8-4,5 m³/t, gennemsnitligt ca. 2 m³/t svarende til ca. 50 m³/døgn jf. figur 6.3. Udover oppumpet grundvand tilføres ligeledes kondensat fra gasstrengen til vandstrengen i behandlingsanlægget. Mængden af kondensat er ligeledes angivet på figur 6.3, ligesom den totalt afledte vandmængde til kloaksystemet (benævnt sum på figur 6.3) er påført.

6.3 FORURENINGSFJERNELSE I FORBINDELSE MED OPRENSNINGEN

Under den kontinuerte del af oprensningen er der ca. hver 14. dag udtaget luftprøver fra EB1 og EB2 og vandprøve fra EB2. De udtagne prøver er analyseret for hhv. chlorerede opløsningsmidler og olieprodukter. Resultaterne heraf fremgår af figur 6.4 og 6.5. Der ses et markant fald i koncentrationerne mod slutningen af den kontinuerte driftsperiode. En undtagelse herfra er som tidligere nævnt målingen foretaget umiddelbart efter, at den nyetablerede injektionsboring centralt i kildeområdet (IB11) er sat i drift i starten af november 2000.



Figur 6.4 Målte forureningsniveauer i ekstraheret poreluft/damp under kontinuert drift



Figur 6.5 Målte forureningsniveauer i oppumpet grundvand under kontinuert drift

Endvidere var det planlagt, at mængden af opsamlet fri fase skulle registreres ved daglige pejlinger i koalescensudskilleren. Bestemmelsen af fri fase forurening ved pejlning af koalescensudskilleren viste sig dog at være behæftet med meget stor usikkerhed på grund af ansamling af en slags emulsion på vandspejlet i udskilleren. Denne emulsion havde en hvidgul farve og bestod overvejende af fri fase forurening. Der blev ikke foretaget nærmere analyser af emulsionen, som dog umuliggjorde troværdige pejlinger af koalescensudskilleren.

6.4 ØVRIGE DRIFTSPROBLEMER – UDOVER DE TEKNISKE/MEKANISKE

Udover ovennævnte tekniske og mekaniske problemer med såvel behandlingsanlægget som boringer har der gennem oprensningsperioden været en række andre problemer, som har krævet håndtering.

Inden for oprensningsområdet på Østerbro er der en række ældre kloakledninger, som i løbet af oprensningsperioden er opvarmet. Dette har medført lugtgener i området, som først forsvandt i løbet af foråret 2001 i takt med, at jorden blev afkølet.

Oprensningen er foretaget under og meget tæt ved bygninger, hvoraf flere anvendes til beboelse. Den terrænnære oprensning har medført en terrænnær kondensationsfront. De høje temperaturer i kondensatet har øget flygtigheden af forureningskomponenterne heri, hvorved der er sket af afdampning til blandt andet de ovenliggende bygninger. Dette har medført forhøjede koncentrationer af PCE og benzen i enkelte lejligheder. Endvidere har der i en bygning tæt på oprensningsområdet været problemer med forhøjede temperaturer. Til afhjælpning af såvel forurenings- og varmeproblematikken er der i løbet af oprensningen etableret aktiv ventilation i kælderen under den udsatte bygning, og ligeledes er der gennemført en løbende monitoring af indeklimaet i de berørte lejligheder for at sikre mod en uacceptabel påvirkning af forureningskomponenter.

Dampstripping er en meget aggressiv afværgeteknik, hvilket gør, at der ved driftstop skal reageres meget hurtigt for at undgå en utilsigtet opvarmning eller spredning af forurening. I forbindelse med nedbrud af vakuumpumpen blev der ikke reageret tilstrækkeligt hurtigt, og først ca. 12 timer efter nedbrud af vakuumpumpen, blev der slukket for dampinjektionen. Dette medførte, at der på det tilstødende baneareal øst for oprensningsområdet skete en betydelig opvarmning - fra ca. 20 til 80°C i en afstand på ca. 10 meter fra den nærmeste injektionsboring. Ved frigravning efter ophør af dampoprensningen blev der imidlertid ikke konstateret skader på fjernvarmerøret.

7 Resultater og vurderinger, aktiviteter under Teknologiprogrammet

7.1 UDVIDET TEMPERATURMONITERING

Dybdespecifikke temperaturkonturer

Udvalgte data fra den udførte temperaturmonitoring er præsenteret som dybde specifikke isokurver i bilag 1. Der er optegnet isokurver for henholdsvis 87 og 50 °C, hvor 87 °C er kogepunktet for en blanding af fri fase PCE og vand. Temperaturerne er afbildet for dybderne 1,0, 1,5, 2,25, 3,0 og 3,75 m.u.t. for udvalgte dage med hovedvægt på perioden med kontinuert drift umiddelbart efter opstart af opvarmningen.

Dampinjektionen er indledt i IB1 den 8. september 2000 og startet i de øvrige borer den 11. september 2000. Placeringen af de enkelte injektionsboringer er angivet på figur 3.1. Af temperaturplottene i bilag 1 ses, hvorledes der efter ca. 9 dages dampinjektion (den 17. september 2000) i den sydlige del af oprensingsområdet, 1,5 og 2,25 m.u.t. mellem IB2, IB1, IB8, IB7 og IB6 er dannet en sammenhængende zone på mere end 87 °C. Dybderne 1,5 og 2,25 m.u.t. svarer til henholdsvis umættet zone og toppen af grundvandszonen. Dybden 3,0 m.u.t. svarer til en meter under grundvandsspejlet og er den 17. september 2000 kun opvarmet til over 87 °C lokalt omkring injektionsboringerne.

Efter ca. 15 dages dampinjektion (den 23. september 2000) var der 1,5 m.u.t. opnået en tilsyneladende sammenhængende ring af damp mellem injektionsboringerne, mens der 2,25 m.u.t. var opnået damptemperatur i hele oprensingsområdet. På samme tidspunkt var der desuden opnået temperaturer over 87 °C i en stor del af den sydlige del af kildeområdet 3,0 m.u.t.

Perioden fra den 24. til den 27. september 2000 var som beskrevet i kapitel 6 præget af driftproblemer pga. tæring af en varmeveksler/korrosion af grundvandspumperne. Anlægget har således været i ustabil drift med en betydelig reduceret injektion og ekstraktion. Dette afspejles tydeligt i temperaturfald frem til den 27. september 2000.

Den 28. september 2000 er anlægget genstartet på fuld kraft, og fra den 28. september til den 1. oktober 2000 ses en markant opvarmning af kildeområdet 1,5, 2,25 og 3,0 m.u.t. Herefter følger en periode med svingende temperaturer som følge af en ustabil drift frem til omkring den 11. oktober 2000 som følge af udskiftning af grundvandspumperne.

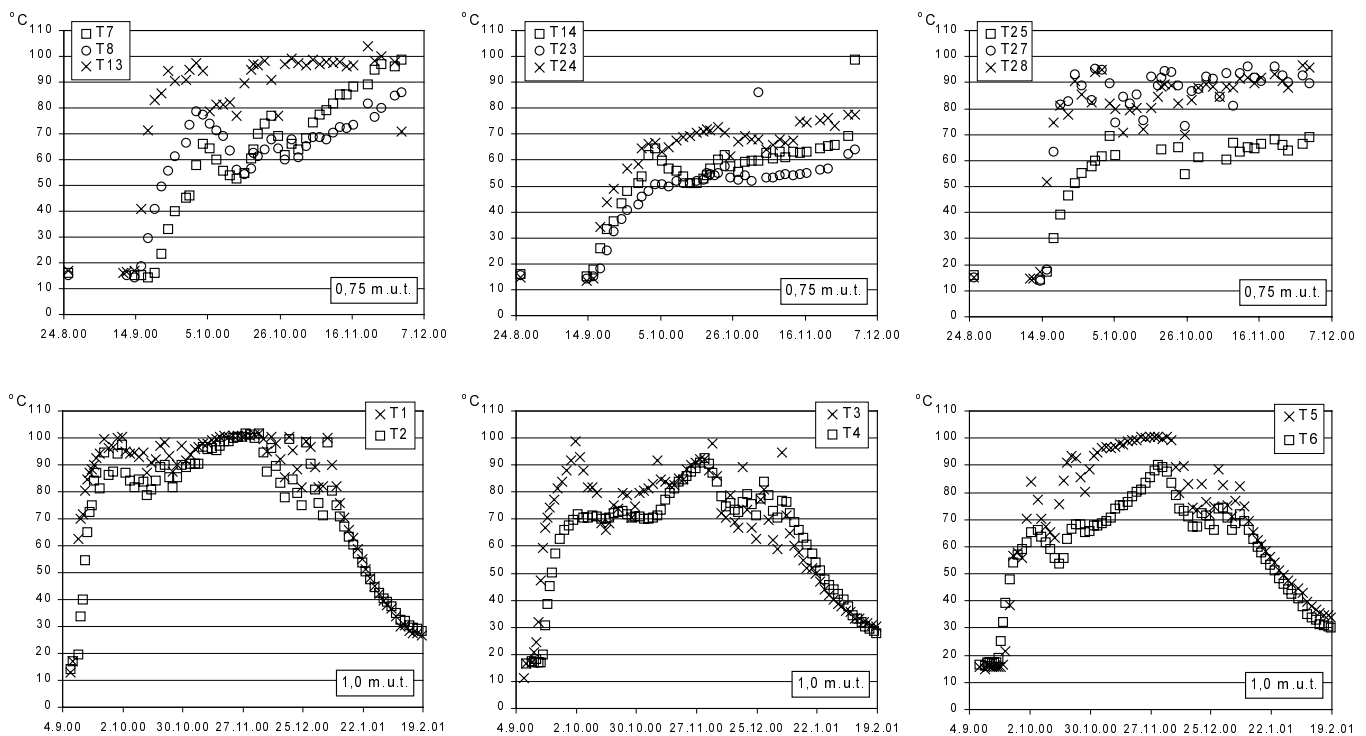
Fra den 11. oktober 2000 og frem til den 4. december 2000, hvor anlægget er overgået til cyklisk drift, har der generelt været en stabil drift og hermed opvarmning af kildeområdet. Temperaturplottene viser, at der omkring den 30. november 2000 er opnået maksimal opvarmning/dampudbredelse med damptemperaturer i stort set hele kildeområdet 1,5, 2,25 og 3,0 m.u.t. Dog er

der 3,75 m.u.t., svarende til toppen af lerlaget, fortsat kun temperaturer over 87 °C lokalt omkring injektionsboringerne.

Temperaturudviklingen er belyst forholdsvis groft i området mellem IB3, IB4, IB5 og EB1. Monitoringen viser dog generelt en tendens til en mindre effektiv opvarmning af området mellem IB3 og IB4 samt i mindre udstrækning mellem IB4, IB5 og EB1. Den mindre effekt af dampinjektionen i disse områder vurderes forårsaget dels af lokale lavpermeable geologiske forhold i jordlagene omkring IB5 og EB1 - som begge havde uventet lave ydelser - og dels af, at der formentlig har været en særlig stor indstrømning af koldt grundvand i zonen umiddelbart over leren i disse områder. Dette afspejles i den meget langsomme opvarmning af dette område 3,0 m.u.t.

Temperaturer terrænnært (0,75 - 1,0 m.u.t.)

I bilag 1 ses temperaturplots for dybden 0,75 - 1,0 m.u.t. den 25. september, den 10., 18. og 25. oktober samt den 2., 11. og 30 november 2000. For temperaturboringerne inden for oprensingsområdet er der desuden i figur 7.1 vist tidsserier for temperaturen 0,75 m.u.t. (T7, T8, T13, T14, T23, T24, T25, T27 og T28) og 1,0 m.u.t. (T1-T6). Af bilag 1 og figur 7.1. fremgår, at temperaturen 1,0 m.u.t. i størstedelen af perioden med kontinuert drift har været over 87°C i områderne omkring injektionsboringerne. I den sydlige del af oprensingsområdet er der ligeledes registreret temperaturer over 87°C imellem injektionsboringerne.



Figur 7.1 Temperaturer terrænnært i den kontinuerte driftsperiode

I perioden frem mod slutningen af den kontinuerte drift er der opnået en temperatur på mere end 87°C i størstedelen af oprensingsområdet. Kun i dele af kildeområdet, herunder omkring injektionsboringerne er der opnået damptemperaturer 0,75 – 1,0 m.u.t. I perioden med kontinuert drift er der

således opnået damptemperatur 0,75 – 1,0 m.u.t. i injektionsboringerne samt i T1, T2, T3 (kortvarigt), T7, T13, T14 (kortvarigt), T27 og T28 jf. figur 7.1.

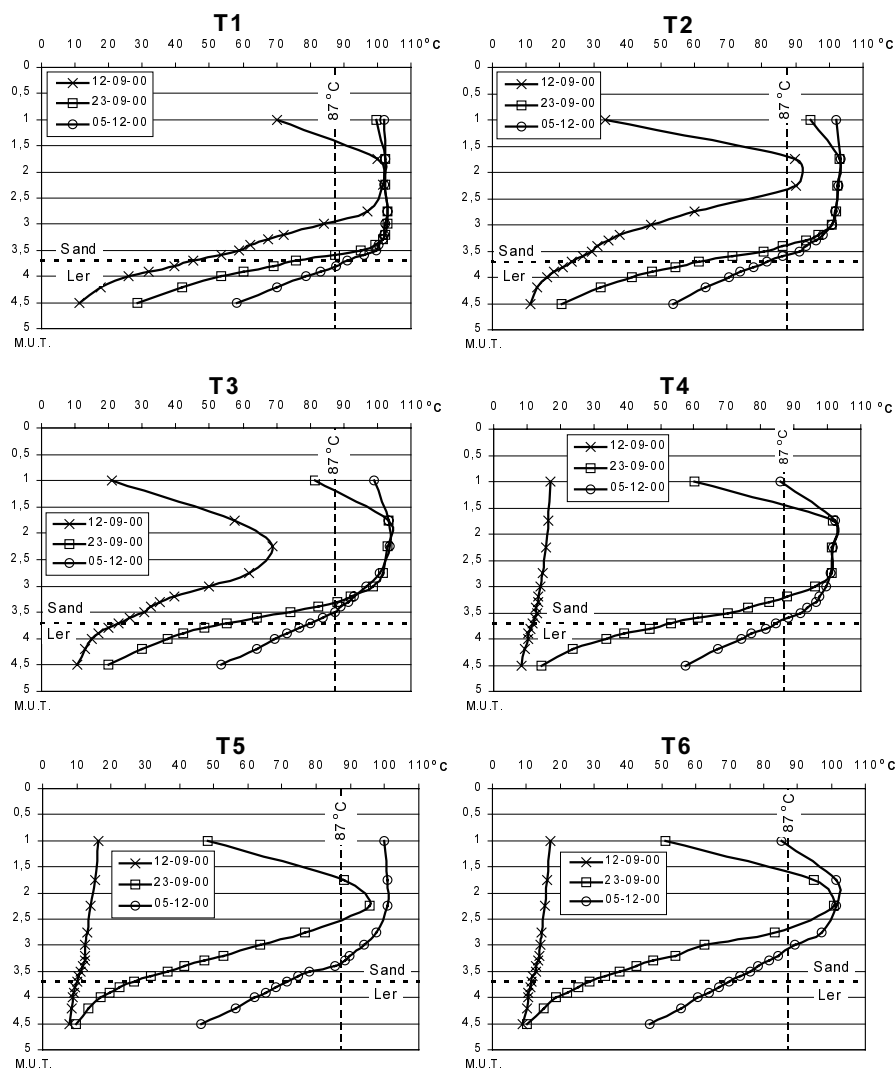
Ovennævnte temperaturforløb i de terrænnære jordlag viser sammenholdt med temperaturdataene fra 1,5 m.u.t., at der i den største del af kildeområdet har været en kondensationsfront beliggende ca. 0,5 til ca. 1,2 m.u.t. Fronten har ligget mest terrænnært umiddelbart omkring injektionsboringerne.

Temperaturdataene viser desuden, at kogepunktet for en blanding af fri fase PCE og vand (87°C) er opnået i hele den centrale del af kildeområdet i slutningen af perioden med kontinuert drift. Dette betyder, at eventuel fri fase PCE på dybder større end ca. 0,75 – 1,0 m.u.t. fra før oprensningen eller som følge af kondensation under oprensningen må forventes at være ført på gasfase ved kogning. Før oprensningen er der ikke truffet indikationer på nævneværdige områder med kraftig jordforurening med PCE terrænnært, og med det konstaterede temperaturforløb anses det ikke for sandsynligt, at der kan være efterladt væsentlig fri fase terrænnært.

Tilstedeværelsen af en kondensationsfront (opvarmet til under damptemperatur) over dampzonen betyder dog, at der i de terrænnære jordlag vil være efterladt opløste forureningskomponenter i kondensatet.

Vertikale temperatursnit

Ud fra de automatisk opsamlede temperaturdata i T1 – T6 er der i figur 7.2 optegnet vertikale temperaturprofiler for henholdsvis den 12. september 2000 (4 dage efter dampstart i IB1), den 23. september 2000 og den 5. december 2000 (dagen efter iværksættelsen af den cykliske drift).



Figur 7.2 Vertikale temperaturprofiler – T1-T6 – gennem den kontinuerte driftsperiode

T1, T2 og T3 er placeret på en linie mellem injektionsboring IB1 og ekstraktionsboring EB2. Snittene i T1- T3 illustrerer således dampzonens udseende i et snit gennem oprensingsområdet. Af kurverne for den 23. september 2000 fremgår det, hvorledes dampzonen i den indledende fase søger op mod toppen af grundvandszonen som følge af opdrift, og hvorledes zonen med damptemperaturer er smal og endnu ikke har nået T3. De forhøjede temperaturer i T3 skyldes kondenseret damp, som strømmer mod EB2 som følge af grundvandsoppumpningen. Kurverne for den 23. september 2000 viser, at der ved T1 er dampzone fra ca. 0,75 – 3,5 m.u.t., mens zonen med damptemperaturer ved T2 og T3 er lidt smallere.

Den vandmættede zone kan på figur 7.2 aflæses, som den zone over lerlaget (ca. 3,7 m.u.t.), hvor der ikke er damptemperaturer; det vil sige temperaturer lavere end ca. 95-100°C afhængigt af det aktuelle tryk. Den 5. december 2000 er denne zone således ca. 0,2 m i T1 og ca. 0,5 – 0,7 meter i T2 og T3. Dette illustrerer tydeligt, at opvarmningen i dybden vanskeliggjordes af en uventet stor indstrømning af koldt grundvand i en grovkornet horisont umiddelbart over lerlaget.

Opvarmningen af den vandmættede del af sandlaget samt den underliggende ler er primært foregået ved varmeledning fra dampzonen og kondensat-

fronten, hvor størrelsen af energitilførslen har været bestemt af varmeledningstallet for jordlagene, temperaturen i dampzonen og afkølingen som følge af indstrømning af grundvand over leren. Temperaturudviklingen i lagene under dampzonen svarer nøje til det forventede ved varmeledning.

Temperatursnittene for T4, T5 og T6 viser, at disse borer den 12. september 2000 endnu ikke var påvirkede af opvarmningen. Snittene viser desuden, at den opnåede dampzone ved T6 med en tykkelse på ca. 1,7 meter var forholdsvis tynd, og at der under dampzonen ved denne boring var ca. 1 meter mættet sand. Årsagen til den forholdsvis begrænsede dampzone ved T6 er formentlig, at jordlagene i dette område er forholdsvis finkornede, hvorfor dampen fortrinsvist har strømmet i omkringliggende mere højermeable lag. Dette er i overensstemmelse med, at den opnåede ekstraktionsrate for grundvand og poreluft i den nærliggende EB1 var væsentligt lavere end forventet.

Med henblik på vurdering af stabiliteten af eventuel fri fase PCE er det interessant at undersøge til hvilken dybde, det fælles kogepunkt for vand og PCE er nået. Til dette formål er der i figur 7.2 indlagt hjælpelinier ved 87°C. Det fremgår, at det fælles kogepunkt er opnået omtrent til toppen af lerlaget i T1 – T4, mens det i T5 og T6 er opnået til henholdsvis ca. 3,4 og 3,2 m.u.t., svarende til ca. 0,3 og 0,5 meter over lerlaget.

Umiddelbart omkring ekstraktionsboringerne har afsænkningen af grundvandsspejlet - og således formentlig også opvarmningen i dybden - været mest effektiv.

Eventuel fri fase over lerlaget forventes således at være mobiliseret ved kogning og fjernet på gasfase fra områderne ved injektions- og ekstraktionsboringerne samt i størstedelen af kildeområdet i øvrigt. I området omkring T5 og T6 har fjernelsesmekanismen for eventuel fri fase over lerlaget derimod været mobilisering ved nedsættelse af overfladespændingen mellem fri fase PCE og vand samt øget opløselighed som følge af temperaturstigningen. Disse mekanismer er mindre effektive end ovennævnte kogning, og eventuel fri fase PCE i disse områder kan således være helt eller delvist efterladt. Analyser af jordprøver fra den mættede zone efter oprensningen samt analyser af oppumpet grundvand under og efter oprensningen viser meget lave indhold af PCE og olieprodukter, og det vurderes derfor, at der ikke er efterladt nævneværdige mængder fri fase i den mættede zone.

Vurdering

Med Miljøstyrelsens engagement i sagen blev det planlagte antal monitoringsboringer for temperatur udvidet fra 14 til 28. Desuden blev der i seks borer foretaget logning af temperaturen med en opløsning over dybden på op til 0,1 m. Som udgangspunkt er samtlige temperaturer noteret og vurderet hver anden dag i perioden med kontinuert drift og hver uge ved cyklisk drift.

Den samlede monitoring vurderes at have givet et godt og veldokumenteret grundlag for den daglige drift af afværgeforanstaltningerne. Med henblik på at opnå en tilstrækkelig dokumentation på eventuelle lignende fremtidige sager vurderes det ikke muligt at reducere antallet af målesteder væsentligt. Den detaljerede vertikale temperaturmonitoring har givet meget værdifulde oplysninger om beliggenheden af dampzonen vertikalt og hermed om effekten af afdræningen af kildeområdet. Desuden har den dannet grundlag for

detaljerede vurderinger af sandsynligheden for om - og i givet fald hvor - der kan være efterladt fri fase over lerlaget.

På baggrund af erfaringerne fra projektet står det klart, at det oprindeligt planlagte monitoringsprogram, under de givne omstændigheder, ikke ville have tilvejebragt en tilstrækkelig detaljeret viden om temperaturudbredelsen i jorden under projektet. Grundlaget for at foretage vigtige justeringer af driften ville således have været spinkelt.

7.2 MONITERING AF VERTIKAL TRYKFORDELING

Den vertikale trykmonitoring skulle som beskrevet indgå i arbejdet med at udvikle en model til simulering af dampudbredelse i jord samt til modelstudier af mulig vertikal mobilisering af fri fase PCE.

Som nævnt i afsnit 5.2 er det ikke lykkedes at etablere et tilstrækkeligt antal brugbare målepunkter til, at måleprogrammet er gennemført.

Vurdering

Den udførte markedsanalyse har vist, at der ikke er kommercielt tilgængelige tryksensorer, som er udviklet til in situ monitorering under de aktuelle forurenings- og temperaturforhold i forbindelse med oprensningen. Enkelte sensorer er dog af leverandøren angivet til muligvis at kunne anvendes. Prisen for disse sensorer er oplyst til kr. 3.000,- /stk.

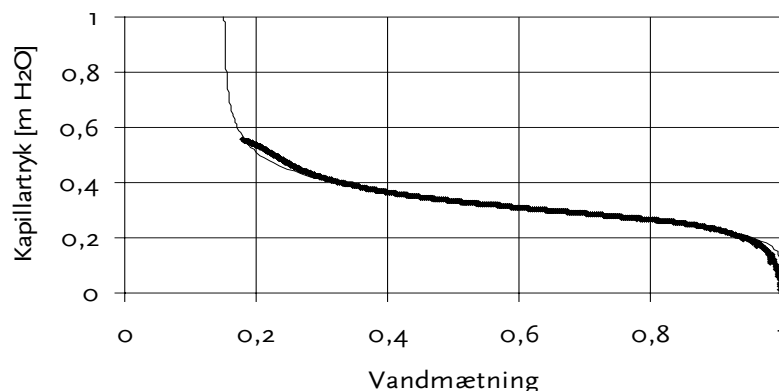
Sammenfattende vurderes detaljerede in situ trykmålinger i og omkring dampzonerne for at være vanskeligt gennemførlige, og det vurderes ikke umiddelbart realistisk at anvende de eksisterende sensorer, som der er kendskab til i Danmark.

7.3 FASTLÆGGELSE AF JORDPARAMETRE

Med henblik på modelstudier på DTU er der udført laboratorieforsøg på udvalgte jordprøver til bestemmelse af kapillartrykskurver og permeabilitet af jordlag i oprensningsområdet.

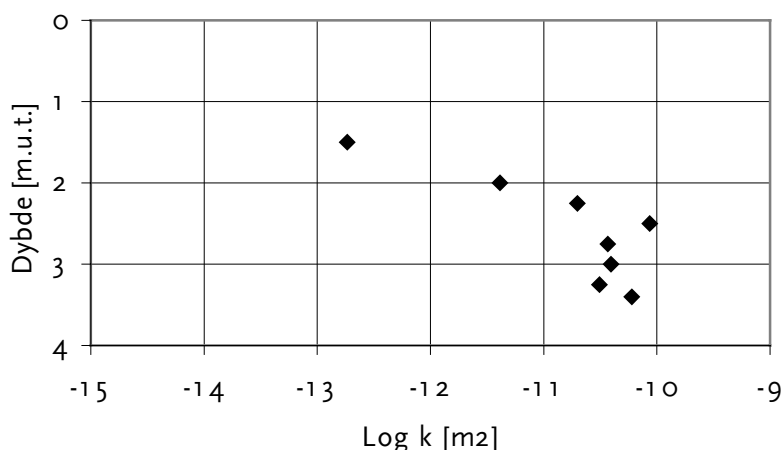
Der blev udtaget 8 dybdespecifikke jordprøver fra 1,5 til 3,8 m.u.t. samt 3 intaktkerner.

For prøven udtaget 3,25 m.u.t. er der bestemt en kapillartrykskurve, som er en central inputparameter i flerfasemodellering. Kurven er bestemt ved, at en trykcelle er pakket med prøven, som efterfølgende er blevet vandmættet. Herefter er vandet langsomt blevet pumpet ud, mens trykket er målt inde i prøven. Derved fås en række koordinatsæt mellem vandmætning og kapillartryk, hvortil der er tilpasset en van Genuchten-kurve. Den tilpassede kurve er vist på figur 7.3.



Figur 7.3. Kapillartrykskurve (Van Genuchten-tilnærmelse) for prøve udtaget 3,25 m.u.t. Den tynde kurve viser den tilpassede funktion.

Ved hjælp af ”falling head”-metoden er permeabiliteten for de 8 dybde-specifikke jordprøver bestemt. Denne metode er forholdsvis usikker, og samtidig bør permeabiliteten ideelt set bestemmes på ikke-forstyrrede prøver. Resultaterne er derfor behæftet med betydelig usikkerhed, men de giver dog en indikation af variationen i permeabiliteten ned igennem jordlagene. På figur 7.4 er de fundne permeabiliteter afbildet som funktion af dybden.



Figur 7.4. Estimerede permeabiliteter over dybden

Det ses, at permeabiliteten er væsentligt lavere i de øverste jordlag end i bunden af det forurenede sandlag. Det skal dog nævnes, at de terrænnære prøver havde en tendens til at forme aggregater, når de tørrede, hvilket kunne tyde på, at jordlagene indeholdt sprækker. Derfor kan det forventes, at permeabiliteten for gasfasen i disse øverste umættede lag vil være større, end umiddelbart forventet ud fra permeabiliteten målt under vandmættede forhold.

Med henblik på at vurdere risikoen for spredning af forurening på fri fase, som er tungere end vand, ned gennem det underliggende lerlag blev der udtaget en intaktkerne. Ved dampinjektion kan der være risiko for en sådan spredning, eftersom der kan ske en opkoncentrering af forurening ved dampfronten og ud fra at overfladespændingen mellem vand og forureningen mindskes ved stigende temperatur. For at en forurening på fri fase skal kunne

trænge ind i et vandmættet lag, skal dens tryk overstige vandets tryk med den såkaldte indtrængningsværdi (entry pressure). Indtrængningsværdien afgøres af jordtypen og overfladespændingen mellem vand og den indtrængende fase.

Forurening med PCE på fri fase, der ligger ovenpå et lavpermeabelt lerlag, vil som følge af den større densitet udøve et højere tryk på det underliggende lerlag end vandet. Størrelsen af dette tryk afhænger af tykkelsen af laget med fri fase.

Intaktkernen viste, at lerets indhold af lerminerale var stort og at leren var forholdsvis homogen. Det blev forsøgt at bestemme en luftindtrængningsværdi på den vandmættede ler ved at placere en prøve i en trykcelle og derefter øge trykket i luftfasen. Ved et overtryk på 5 m vandsøjle var indtrængningsværdien stadig ikke overstøjet, hvilket kunne konstateres ved, at der ikke blev fortrængt vand fra prøven. Det var ikke muligt at gå op til et højere tryk med det pågældende apparatur, og det kan derfor kun konkluderes, at indtrængningsværdien for luft er større end 5 m vandsøjle. Skaleres dette tryk med forholdet mellem overfladespændingerne for henholdsvis luft-vand og PCE-vand fås et indtrængningstryk for PCE på minimum 2,8 m vandsøjle. Det svarer igen til, at der skal ligge en pulje af fri fase PCE med en vertikal udstrækning på 4,5 m, hvilket ikke er realistisk. Selvom der sker en opkoncentrering og overfladespændingen sænkes, kan det derfor ikke forventes, at der vil forekomme nedadrettet transport af fri fase. Det kan heller ikke forventes, at vandmættet ler af den aktuelle type vil indeholde sprækker, som ellers kunne have medført nedadrettet transport.

7.4 VURDERING AF OMFANGET AF VÅDOXIDATION

På igangværende dampoprensninger af kreosot (Californien, USA) og af PCE (Hedehusene, Danmark) er der konstateret tegn på nedbrydning af forurening ved vådoxidation. Til en grov belysning af eventuel vådoxidation under oprensningen på Østerbro, Aalborg er der udført IR-måling for indhold af CO₂ og O₂ på afkast fra vakuumpumpen. Resultaterne af disse målinger er vist i bilag 2.

Det fremgår, at koncentrationen af CO₂ i afkastluften i de første ca. 12 dages drift (frem til den 20. september 2000) lå fra 0,2 – 0,9 % v/v. Herefter er der frem til den 28. september 2000 målt indhold af CO₂ på 1,3 – 1,8 % v/v. I den resterende del af monitoringsperioden – frem til den 20. november 2000 – har CO₂ koncentrationen ligget fra ca. 0,2 – 0,6 % v/v. Til sammenligning er CO₂ koncentrationen i udeluft (baggrunds niveauet) i måleperioden registreret til ca. 0,03 – 0,2 % v/v.

Ved en antaget gennemsnitlig ekstraktion af ikke kondenserbar gas på 150 m³/time i hele perioden med kontinuert drift kan det overslagsmæssigt beregnes, at der i alt – udover bidrag fra det målte baggrunds niveau - er ekstraheret ca. 48.000 mol CO₂, svarende til ca. 570 kg kulstof. Det skal bemærkes, at datagrundlaget for denne beregning er meget usikkert.

Det ekstraherede kulstof kan dels stamme fra vådoxidation af terpentin, PCE og organisk stof og kan dels være frigivet fra grundvandet som følge af opvarmningen, idet opløseligheden af CO₂ i vand falder med stigende temperatur.

På baggrund af en vandkemisk analyse udført på grundvand fra kildeområdet før oprensningen kan det således beregnes, at der ved opvarmning af 1 m³ grundvand fra 10 – 65 °C kan frigives ca. 130 g CO₂ og udfældes ca. 230 g kalk. Usikkerheden på beregningen er ca. 10 %, men da beregningen forudsætter ligevægt mellem CO₂-indholdet i gas og vandfasen er den reelle usikkerhed på estimatet formentlig væsentligt større. Således må det forventes, at den beregnede frigivelse af CO₂ er overestimeret.

I perioden med kontinuert drift er der oppumpet i alt ca. 5.000 m³ grundvand, jf. figur 6.3. Hvis det antages, at vandet inden oppumpningen i gennemsnit er opvarmet fra 10 til 65°C kan der fra dette vand være frigivet ca. 650 kg CO₂ svarende til ca. 180 kg kulstof. Tilsvarende kan det estimeres, at opvarmningen af de 5.000 m³ grundvand ved ligevægt ville medføre en udfældning af kalk på ca. 1.200 kg. Der er ikke observeret væsentlige problemer med kalkudfældninger i perioden med kontinuert drift, og de estimerede frigivelser af CO₂ og kalk anses således for at være absolutte maksimumsværdier. Det bør bemærkes, at beregningerne er udført på baggrund af en enkelt vandkemisk analyse, og således er behæftet med stor usikkerhed.

Andelen af kulstof i terpentin og PCE er henholdsvis ca. 86 og 14 vægt %. Hvis det som estimeret ovenfor antages, at 180 af de i alt 570 kg kulstof, som er ekstraheret, er frigivet fra det oppumpede grundvand, må de resterende 390 kg kulstof have en anden kilde. Såfremt disse 390 kg kulstof stammer fra vådoxidation af henholdsvis terpentin og PCE kan der under den kontinuerte drift være nedbrudt ca. 450 kg terpentin eller ca. 2.800 kg PCE. Såfremt der ved vådoxidation var nedbrudt en mængde PCE af denne størrelsesorden ville det medføre et kraftigt fald i pH i det oppumpede vand. Der er ikke udført pH målinger i dette vand, og der er ikke konstateret tegn på ekstraordinær korrosion. En mulig fjernelse af 2.800 kg PCE ved vådoxidation forekommer på denne baggrund at være overestimeret.

Iltmålingerne har i hele oprensningsperioden varieret mellem 19 og 21,5 % v/v. De laveste værdier er generelt registreret sammenfaldende med de højeste CO₂ niveauer.

Vurdering

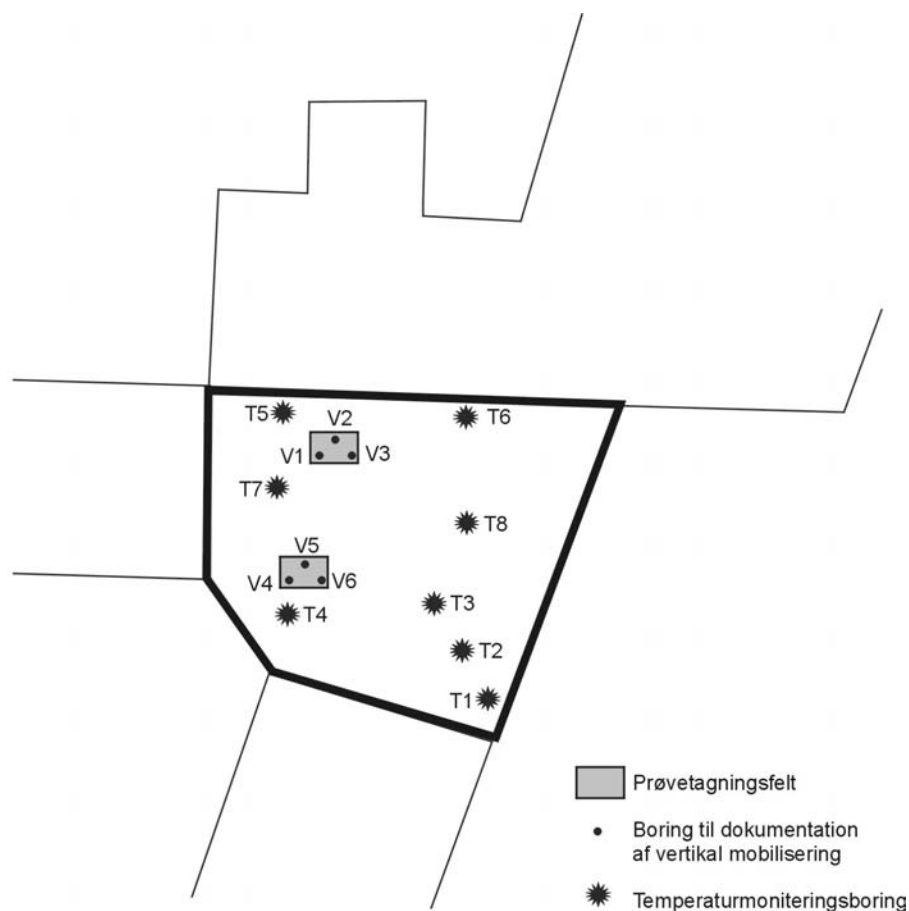
Den udførte monitorering af ekstraheret CO₂ er forholdsvis upræcis, og det ekstraherede flow af ikke kondenserbar gas er ligeledes behæftet med væsentlig usikkerhed. Overslagsberegninger viser dog, at der med gasfasen er ekstraheret væsentligt mere kulstof, end der har kunnet frigøres fra det oppumpede grundvand.

Dette ”overskud” af kulstof kan skyldes nedbrydning af naturligt organisk stof, terpentin eller PCE, og der er ikke grundlag for at estimere den mængdemæssige fordeling mellem disse. Såfremt en væsentlig andel af kulstoffet stammer fra vådoxidation af terpentin eller PCE, vil det dog betyde, at forureningsfjernelsen ved denne vådoxidation kan være i samme størrelsesorden som den konstaterede fjernelse af forurening på gasfase eller som fri fase.

7.5 UDVIDET DOKUMENTATION AF VERTIKAL MOBILISERING AF FRI FASE FORURENING

Dokumentationen af, hvorvidt der under dampoprensningen er foregået en vertikal spredning af forurening ned i den ler, som underlejrer det forurenede

sandlag, er foretaget ved udtagning og analyse af intakte jordkerner i to felter. Begge felter er placeret i den værst forurenede del af kildeområdet. Umiddelbart ved siden af de to felter er der etableret boringer (T4 og T5) med detaljeret temperaturmonitoring i sandlaget og i den underliggende ler. Placeringen af felterne samt temperaturboringerne fremgår af figur 7.5.



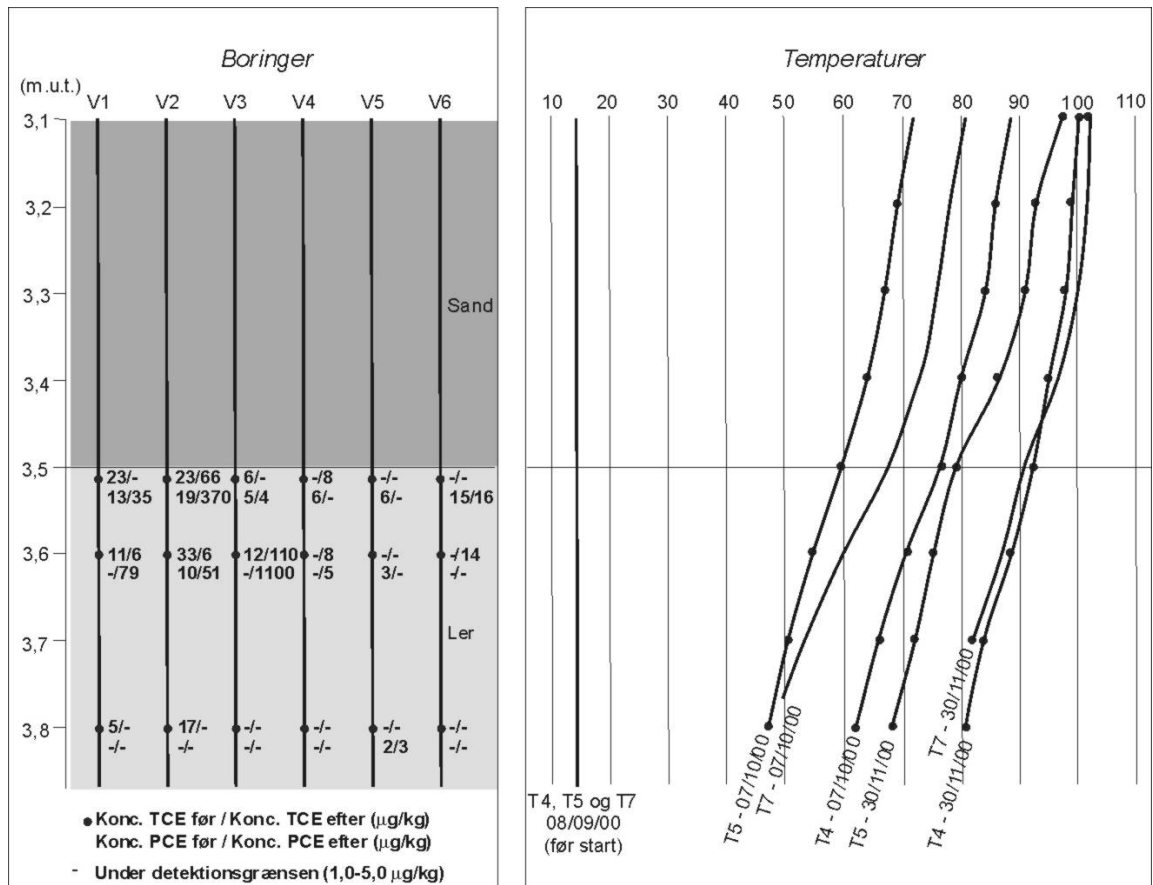
Figur 7.5 Placering af prøvetagningsfelter samt temperaturmonitoringsboringer

Analyseresultater før og efter oprensningen i overgangen fra sand til ler samt i lerlaget er vist i figur 7.6 og 7.7. I figurerne 7.6 og 7.7 er der ligeledes vist temperaturprofiler i de nærliggende monitoringsboringer henholdsvis først, midt i, og sidst i perioden med kontinuert drift.

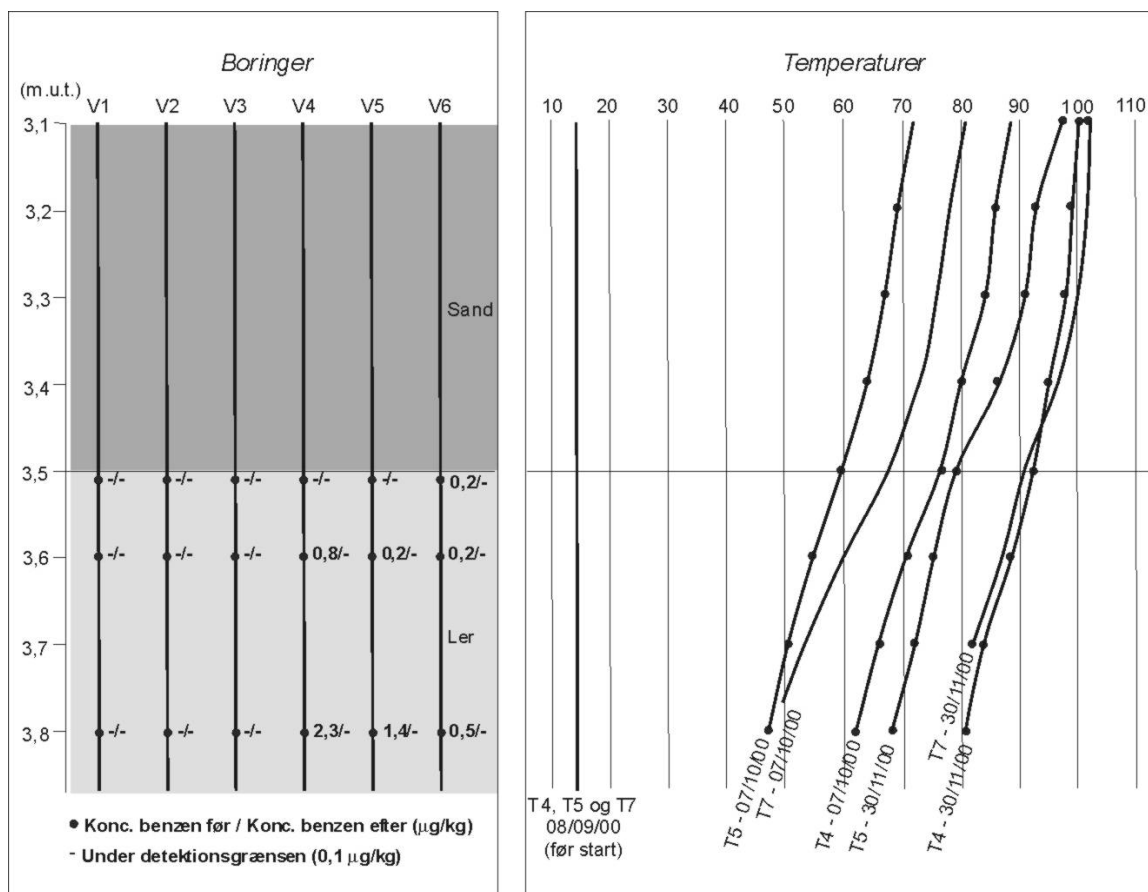
Som det fremgår af figur 7.6 og 7.7 har der generelt ikke som følge af oprensningen kunnet konstateres tegn på forureningsspredning ned i leren. Enkelte undtagelser er jordprøven fra V3 – udtaget 3,6 m.u.t. (10 cm inde i lerlaget) og jordprøven fra V2 – udtaget 3,5 m.u.t. (toppen af lerlaget). For førstnævnte prøve er der observeret en betydelig stigning i indholdet af PCE fra før til efter oprensningen (fra baggrundsniveau til 1,1 mg/kg). Denne forskel har ikke umiddelbart kunnet forklare. En lignende forskel er ikke observeret ved PID-målinger på de to jordprøver, idet der ved begge prøver (V3.36, før og V3.36, efter) er påvist udslag omkring baggrundsniveau. Ved prøven udtaget 3,5 m.u.t. i V2 er der hhv. før og efter oprensningen påvist et indhold af PCE på 0,02 og 0,37 mg/kg. Ligeledes er denne forskel ikke observeret ved PID-målinger, og en nærmere forklaring på det stigende niveau findes således ikke.

Temperaturprofilerne for de to felter viser, at temperaturen i overgangen fra sand til ler i en stor del af perioden har ligget på ca. 60-95°C, og at der over leren har været en vandmættet zone på 30-50 cm, hvor damptemperaturer ikke er opnået. Forekomsten af denne vandmættede zone også sidst i oprensningsperioden tilskrives afkøling som følge af den uventede store indstrømning af grundvand i et tyndt groft lag over leren.

Af figurerne fremgår desuden, at temperaturen i leren har været jævnt stigende gennem hele oprensningsperioden som følge af varmeledning fra den overliggende dampzone. 0,3 meter inde i leren var temperaturen efter ca. 50 dages effektiv dampinjektion 70-80°C.



Figur 7.6 Analyseresultater for V1-V6 – for TCE og PCE



Figur 7.7 Analyseresultater for V1-V6 – for benzen

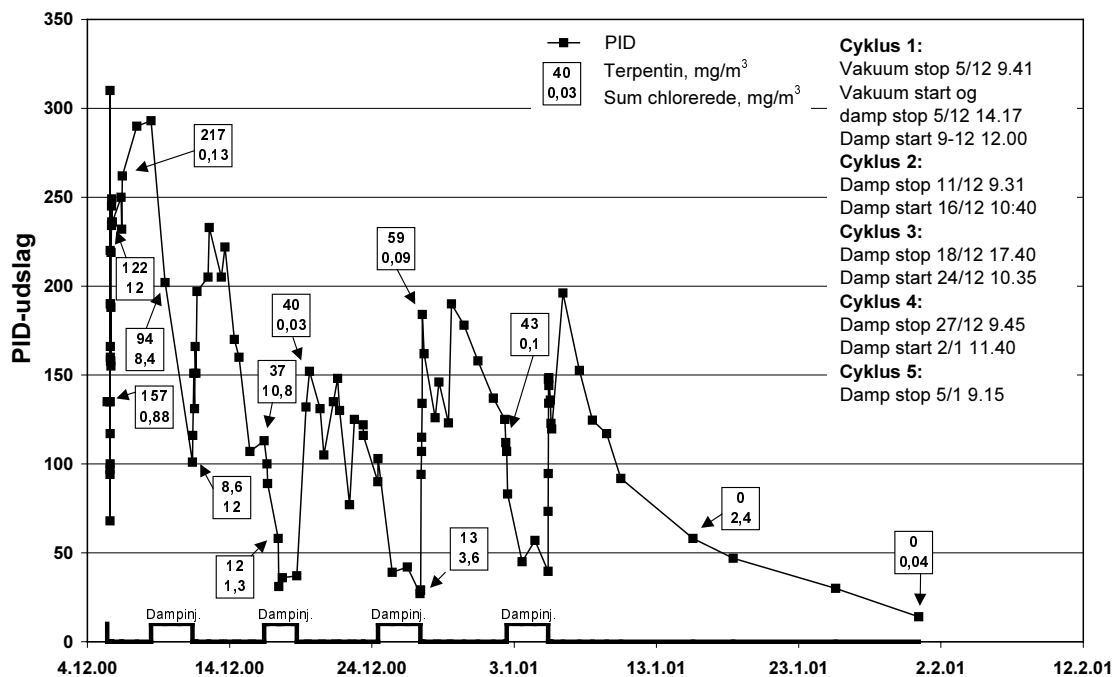
Vurdering

Ved de udførte undersøgelser er der ikke truffet tegn på en væsentlig vertikal spredning af forurening ned i leren som følge af oprensningen. Der er dog enkelte undtagelser, hvilket kan skyldes en mindre grad af vertikal mobilisering, eller at jordprøverne udtaget hhv. før og efter oprensningen ikke er udtaget i præcist det samme punkt.

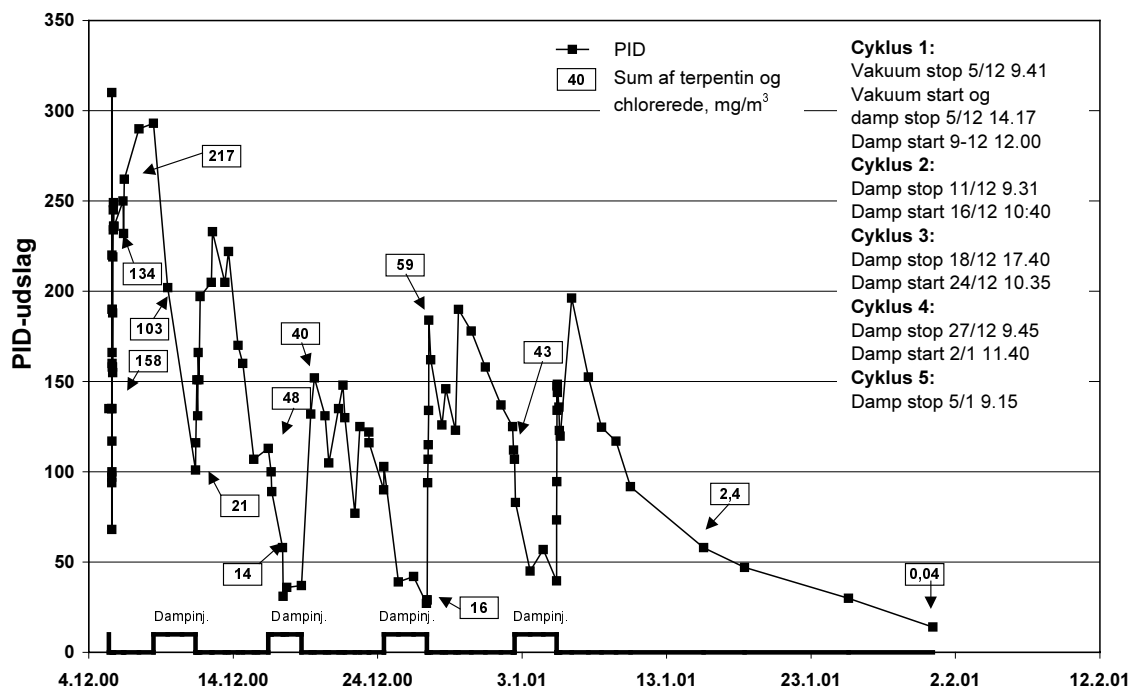
Prøver af smeltevandsleren i oprensningsområdet er beskrevet som kompakte og ”fede”, og der er ikke truffet sandslirer mv. Leren må således anses for at kunne yde forholdsvis stor modstand mod forureningsnedtrængning i forhold til mere sandede typer af moræneler.

7.6 DETALJERET MONITERING UNDER CYKLISK DRIFT

Formålet med den cykliske drift er at mobilisere og fjerne forurening, som ikke er fjernet under den kontinuerte drift. Monitoringen er foretaget ved PID-måling (Photovac 2020) på afkastluft samt ved laboratorieanalyser for chlorerede opløsningsmidler og olieprodukter. Resultaterne af den udførte monitoring fremgår af figur 7.8 og 7.9. PID-kurven er den samme i de to figurer, men de angivne analyseværdier repræsenterer henholdsvis chlorerede opløsningsmidler (PCE)/total-kulbrinter (terpentin) og summen heraf.



Figur 7.8 PID-målinger og analyseresultater – hhv. PCE og total kulbrinter – under cyklisk drift



Figur 7.9 PID-målinger og summerede analyseresultater under cyklisk drift

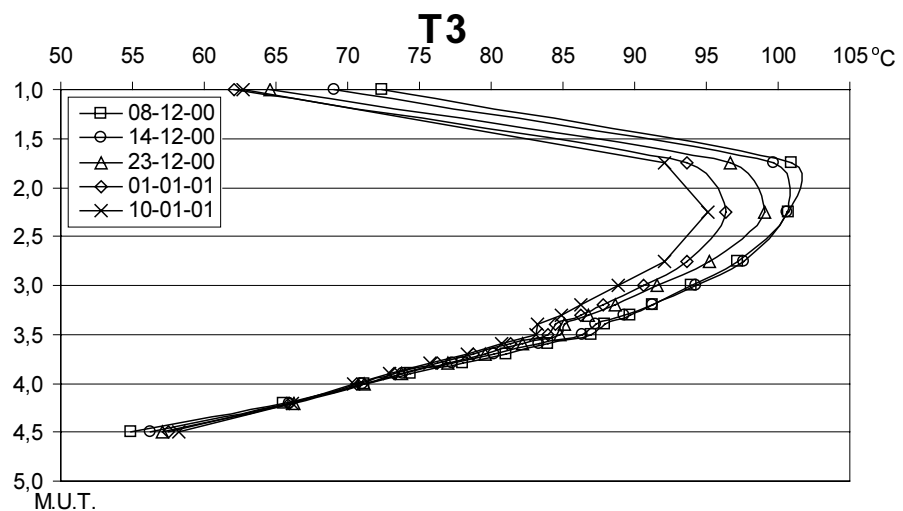
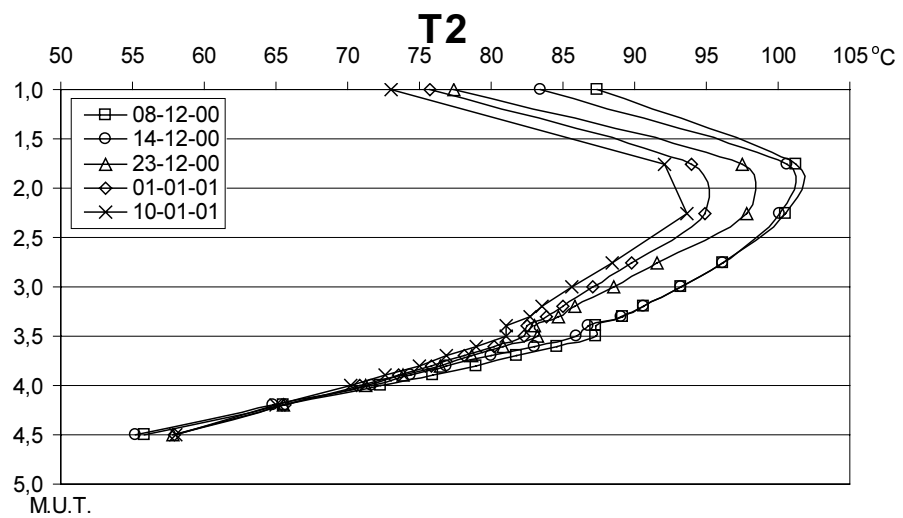
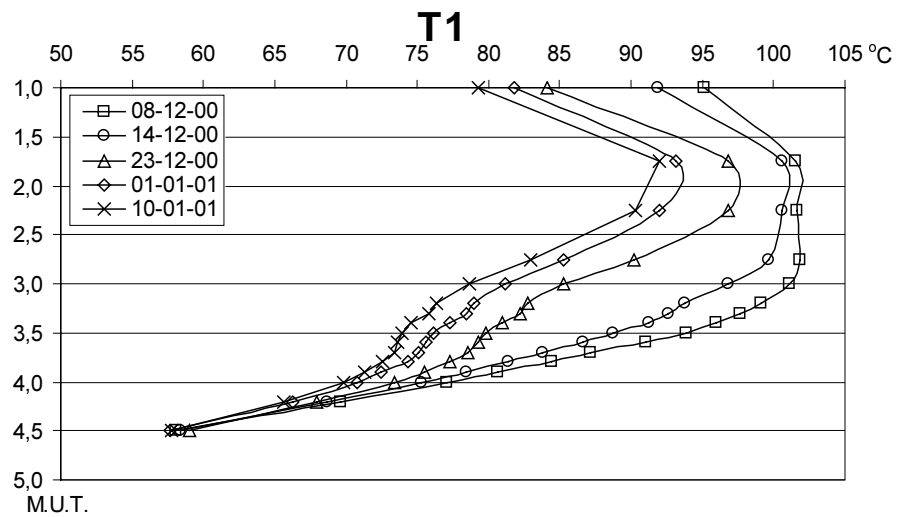
PID-målinger og analyseresultater

Af figur 7.8 og 7.9 fremgår, at der er gennemført fem cyklusser, og det fremgår tydeligt, at PID stiger kraftigt umiddelbart efter dampstop for efter ca. 1 – 2 dage at aftage markant over de efterfølgende 2 – 3 dage. Ved genstart af dampen, falder PID-niveauet yderligere. Dette forløb svarer nøje til det forventede. Således medfører trykafloadningen ved dampstop en forholdsvis

hurtig frigivelse af forureningskomponenter, som bortventileres i løbet af et par dage. Frigivelsen af forureningskomponenter fra kondensat, som infiltrerer den tidligere underliggende dampzone, vil foregå fra umiddelbart efter dampstop. En fuldstændig afdræning af kondensatet ned i den umættede zone må dog forventes at tage flere uger.

Det ses endvidere, at PID-niveauet var forholdsvis højt i flere målinger under cyklus 4 og ved en enkelt måling i cyklus 5. Dette skyldes formentligt, at området ved T1, T2 og T3 ikke opnåede en afkøling til nævneværdigt under damptemperatur under de første 3 cyklusser. Temperaturerne i T1 – T3 sidst i de fem cyklusser er vist i figur 7.10. Det ses, at temperaturerne i dette område ved cyklus 4 og 5 faldt til maksimalt ca. 90°C, hvorved effekten af den cykliske drift også forventes at være markant i dette område.

Af figur 7.8 fremgår det, at niveauet af terpentin og chlorerede opløsningsmidler varierer markant gennem perioden med cyklisk drift, samt at der ikke er en eentydig sammenhæng mellem PID og analyseresultaterne for terpentin og chlorerede opløsningsmidler individuelt. PID-målingerne repræsenterer summen af terpentin og PCE/TCE. Figur 7.9 viser, at der er en udmærket overensstemmelse mellem PID-målingerne og summen af terpentin og chlorerede opløsningsmidler i afkastluften før kulfiltrene.



Figur 7.10 Vertikale temperaturprofiler for T1, T2 og T3 under den cykliske drift

Fjernede mængder terpentin og chlorerede opløsningsmidler

Det er estimeret, at der i alt er fjernet ca. 800 kg forurening under oprensningen. Heraf udgør terpentin den overvejende del. På baggrund af resultaterne i figur 7.8 og 7.9 er forureningsfjernelsen under de udførte cyklusser estimeret. Beregningerne af hhv. gas- og vandfase er vist i tabel 7.1 og 7.2, og det fremgår, at fjernelsen falder markant med antallet af cyklusser. Ved cyklus

1 er der således fjernet ca. 2,0 kg terpentin og 0,17 kg PCE, mens der i cyklus 4 og 5 er estimeret en fjernelse af henholdsvis terpentin og chlorerede opløsningsmidler på ca. 0,3 – 0,5 og ca. 0,03 kg.

	Fra	Til	Antal timer h	Flow m ³ /h	Vurderet konc., mg/m ³		Fjernet mængde Kg	
					Chlor.	Terpentin	Chlor.	Terpentin.
1. cyklus	5/12/00 14.17	11/12/01 9.30	139	120	10	120	0,17	2,0
2. cyklus	11/12/00 9.30	18/12/00 17.40	176	120	6	60	0,13	1,3
3. cyklus	18/12/00 17.40	27/12/00 9.45	208	120	2	20	0,05	0,5
4. cyklus	27/12/00 9.45	05/01/01 9.15	216	120	1,3	20	0,03	0,5
5. cyklus ¹⁾	05/01/01 9.15	14/01/01 13.20	220	120	1	10	0,03	0,3

1) Varigheden af 5. cyklus er sat til 220 timer

Tabel 7.1 Fjernede mængder chlorerede opløsningsmidler og terpentin under cyklisk drift – gasfase

	Fra	Til	Antal timer h	Flow m ³ /h	Vurderet konc., mg/m ³		Fjernet mængde Kg	
					Chlor.	Terpentin	Chlor.	Terpentin.
1. cyklus	5/12/00 14.17	11/12/01 9.30	139	2	14 ²⁾	50 ³⁾	0,004	0,014
2. cyklus	11/12/00 9.30	18/12/00 17.40	176	2	14	50	0,005	0,018
3. cyklus	18/12/00 17.40	27/12/00 9.45	208	2	14	50	0,006	0,021
4. cyklus	27/12/00 9.45	05/01/01 9.15	216	2	14	50	0,006	0,022
5. cyklus ¹⁾	05/01/01 9.15	14/01/01 13.20	220	2	14	50	0,006	0,022

1) Varigheden af 5. cyklus er sat til 220 timer

2) Indholdet af PCE+TCE var 14 µg/l ved seneste analyse (27/11/00)

3) Indholdet af terpentin var under detektionsgrænsen (50 µg/l) ved seneste analyse (27/11/00)

Tabel 7.2 Fjernede mængder chlorerede opløsningsmidler og terpentin under cyklisk drift – vandfase

Vurdering

Den meget detaljerede monitoring med PID-måleren har været helt afgørende vigtig for de daglige vurderinger og justeringer af driftstrategien under den cykliske drift. De opnåede resultater vurderes at have givet et pålideligt og tilstrækkeligt datagrundlag for beslutninger om, hvornår de forskellige anlægsdele skulle startes og standses.

PID-målingerne er foretaget manuelt, hvilket bevirker en løbende kvalitetskontrol af samtlige målinger. Alternativt kan der anvendes systemer med automatisk registrering af PID mv., men driftsstabiliteten og pålideligheden af sådanne systemer er ofte lav.

De akkrediterede analyser anses derimod ikke for anvendelige i forbindelse med de daglige driftsjusteringer, som er nødvendige i perioder med cyklisk drift. Analyseresultaterne foreligger i bedste fald først 1 – 2 dage efter prøvetagningen, og det er ikke muligt ud fra de relativt få analyseresultater at få et klart billede af oprensingsforløbet i den cykliske periode.

7.7 MONITERING AF RELATIV FUGTIGHED I AFKASTLUFT

Med henblik på at belyse variationen i andelen af ikke kondenserbar gas i den ekstraherede gasfase under cyklisk dampinjektion er der installeret en sensor for relativ luftfugtighed på fællesstrengen for ekstraheret gasfase.

Som nævnt i afsnit 5.7 blev sensoren defekt kort efter installationen, og der er ikke opnået brugbare data.

Vurdering

På baggrund af den udførte markedsanalyse vurderes der ikke umiddelbart at være kommercielt tilgængelige sensorer, som med sikkerhed kan anvendes til fugtighedsmålinger under forhold som i ekstraktionsstrengen på Østerbro.

8 Oprensningsforløb og generelle erfaringer

8.1 ERFARINGER FRA PROJEKTET

I dette afsnit opsummeres en række af de væsentligste erfaringer fra projektet.

- Den detaljerede temperaturmonitoring såvel horisontalt som vertikalt viste sig yderst værdifuld i den løbende vurdering af anlæggets funktion og som grundlag for beslutninger om nyetablering af borer, ændringer i injektions- og ekstraktionsstrategi og til sikring mod opvarmning af nærliggende ledninger og huse. Den detaljerede monitoring over dybden i 6 borer gav desuden meget værdifuld information om uventet stor indstrømning af grundvand over leren. Ved lignende oprensninger anbefales det, at der etableres et tilsvarende detaljeret monitoringsprogram til sikring af tilstrækkelig kontrol med og justering af driften.
- Det er afgørende for oprensningseffekten ved dampstripping, at der opnås damptemperaturer i hele oprensningsområdet. Det er således tydeligt at de dele af kildeområdet, hvor der er efterladt nævneværdig restforurening er sammenfaldende med de områder, hvor det af forskellige årsager ikke har været muligt at opnå damptemperaturer. I lignende efterfølgende sager er det således afgørende, at det valgte design med størst mulig sikkerhed er tilstrækkeligt til, at damptemperaturer kan opnås i hele oprensningsområdet.
- På den aktuelle sag er der ikke truffet tegn på en væsentlig vertikal spredning af forurening ned i det underliggende lerlag. På andre lokaliteter med mere opsprækkede eller sandede lerlag kan det dog ikke udelukkes, at en sådan spredning kan forekomme.
- Detaljerede in situ trykmålinger i og omkring dampzonerne anses for at være vanskeligt gennemførlige, og det vurderes ikke umiddelbart realistisk at anvende de eksisterende sensorer, som der er kendskab til i Danmark.
- Ud fra den udførte monitoring af CO₂ er der tegn på, at der ved dampinjektionen på den aktuelle lokalitet er pågået en vis vådoxidation af forureningen. Størrelsesordenen for den forureningsfjernelse, som er sket ved vådoxidation, kan ud fra overslagsberegninger være på niveau med den forureningsfjernelse, der er opnået ved ekstraktion af vand- og gasfase samt som fri fase.
- Monitoringen af forureningsfjernelsen under den cykliske drift blev foretaget manuelt med en PID-måler to gange dagligt samt ved regelmæssige laboratorieanalyser. De manuelle PID-målinger i afkastluften var altafgørende for styringen af den cykliske drift af anlægget og udgjorde det eneste pålidelige grundlag for beslutninger om de enkelte fasers varighed.

- Ud fra erfaringerne fra nærværende projekt vurderes der ikke umiddelbart at være kommercielt tilgængelige sensorer, som med sikkerhed kan anvendes til fugtighedsmålinger under forhold som i ekstraktionsstrengen på Østerbro.
- Sikker hydraulisk kontrol med oprensningsområdet er meget vigtig. Eventuel uhindret indstrømning af grundvand kan markant forlænge driftstiden eller eventuelt hindre fuld oprensning. Anbefalingen er en bedre vertikal karakterisering af den vertikale ledningsevne i forhold til dette projekt.
- Det varme, forurenede jord og grundvandsmiljø er ekstremt aggressivt overfor anlægskomponenterne. En speciel Grundfos dykpumpe med overdimensioneret motor og køleribber måtte installeres, ligesom en varmeveksler måtte udføres i rustfrit syrefast stål.
- Korte driftsstop på ekstraktionsanlægget ved samtidig dampinjektion kan medføre en meget hurtig og utilsigtet temperaturudbredelse bort fra oprensningsområdet.
- Opvarmning af jorden og specielt kloakker i og udenfor oprensningsområdet kan medføre væsentlige lugtgener primært ved lavtrykspassager, hvorved der forekommer udstrømning af poreluft til atmosfæren.
- Dampinjektion meget terrænnært under bygninger kan medføre revnedannelser i gulve/vægge som følge af opvarmning, udtørring og/eller trykpåvirkninger.
- Dampstripping kræver intensiv monitoring, hyppige tilsyn og hurtig beslutningsgang for bygherre, rådgiver og entreprenør.
- Dampoprensningen på Østerbro har i alt kostet ca. kr. 2.500.000,- incl. detailprojektering, anlæg, drift, monitoring og tilsyn. Ovennævnte beløb er eksklusiv aktiviteter under Miljøstyrelsens Teknologiprogram. Oprensningen er den første af sin art i Danmark, hvorfor udgifterne givetvis har været højere, end hvad der kan forventes ved efterfølgende oprensninger. Endvidere har forureningens beliggenhed under bygninger vanskeliggjort og medført ekstra omkostninger til oprensningen. Det behandlede kildeområde har været ca. 1.200 m³, og mere end 99% af den tilstedeværende forurening vurderes at være fjernet ved oprensningen. Omkostningerne per m³ jord har således været ca. kr. 2.100,-, hvilket er relativt dyrt sammenlignet med andre oprensningsformer. Dette skyldes dels ovennævnte parametre, og dels at der er tale om en mindre lokalitet, hvor omkostningerne per m³ behandlet jord ofte er relativt dyrere end ved større områder, idet anlægsudgifterne ikke er tilsvarende lavere ved de mindre lokaliteter.

9 Litteraturliste

(Aines et al 2001) Safe, Effective Steam Remediation: Constraints on Removal Mechanisms and Optimum. International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition, 10-13 June 2001, Orland, Florida, USA.

(Gudbjerg et al. 2000) Modelværktøj til simulering af dampudbredelser i forskellige sedimentter og stratigrafer, DTU – ISVA.

(Heron G. 2000) Steam Stripping/Hydrous Pyrolysis Oxidation for In Situ Remediation of a TCE DNAPL Spill. . International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition, 10-13 June 2001, Orland, Florida, USA.

(Miljøstyrelsen 1998a) Vejledning fra Miljøstyrelsen: Oprydning på forurenede lokaliteter – hovedbind, nr. 6 1998.

(Miljøstyrelsen 1998b) Miljøprojekt nr. 409 1998. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Termisk assisterede oprensninger.

(Miljøstyrelsen 2000) Miljøprojekt nr. 543 2000. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved dampstripping.

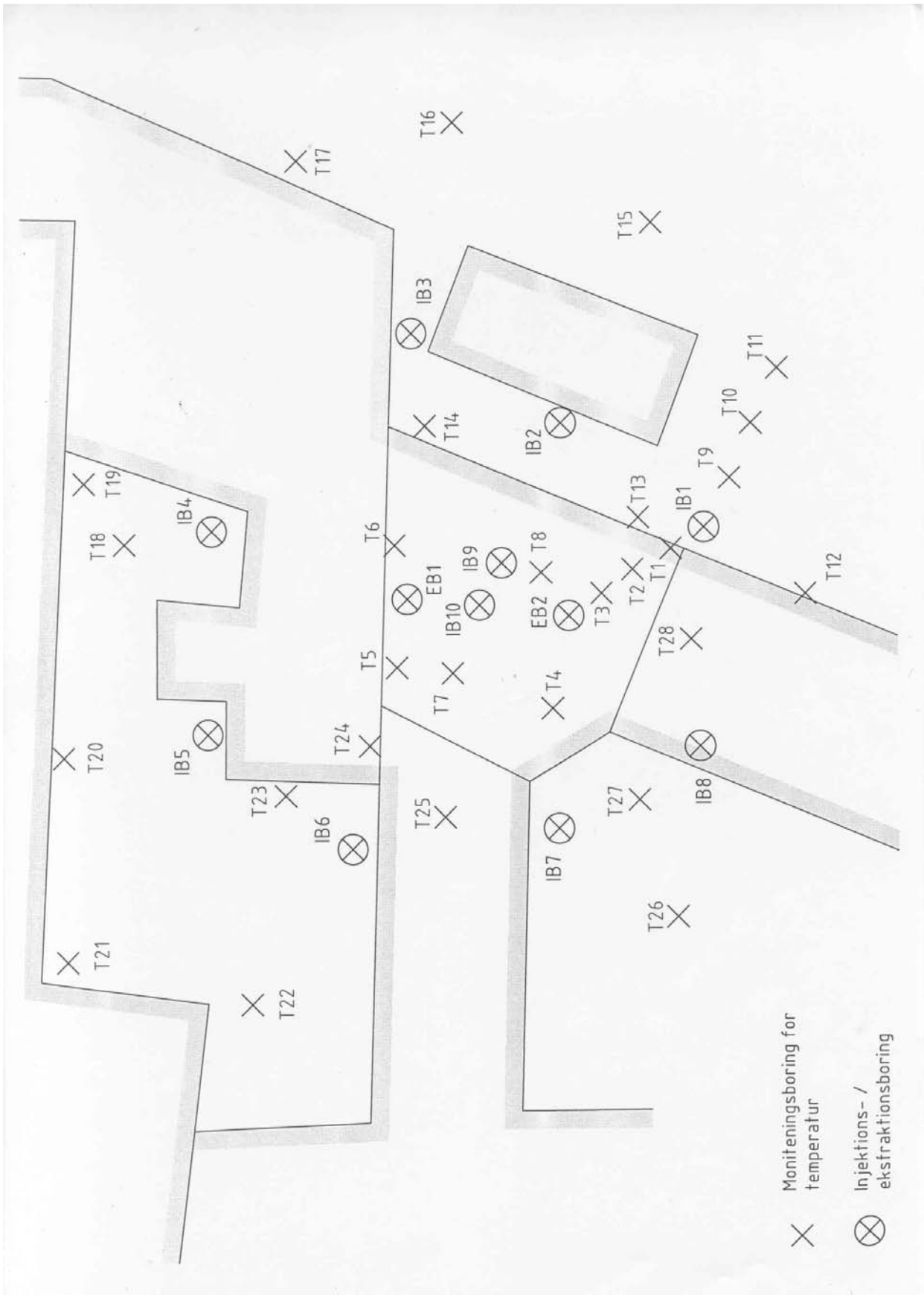
(NIRAS 1999) Nordjyllands Amt: Supplerende forureningsundersøgelse. Nedlagt renseri, Østerbro. Lokalitetsnummer: 851-944. Juni 1999. NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S.

(NNR 1995) Nordjyllands Amt: Registreringsundersøgelse. Østerbro 26, Aalborg, Aalborg Kommune. Lokalitetsnummer 851-944, nedlagt renseri. August 1995. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S.

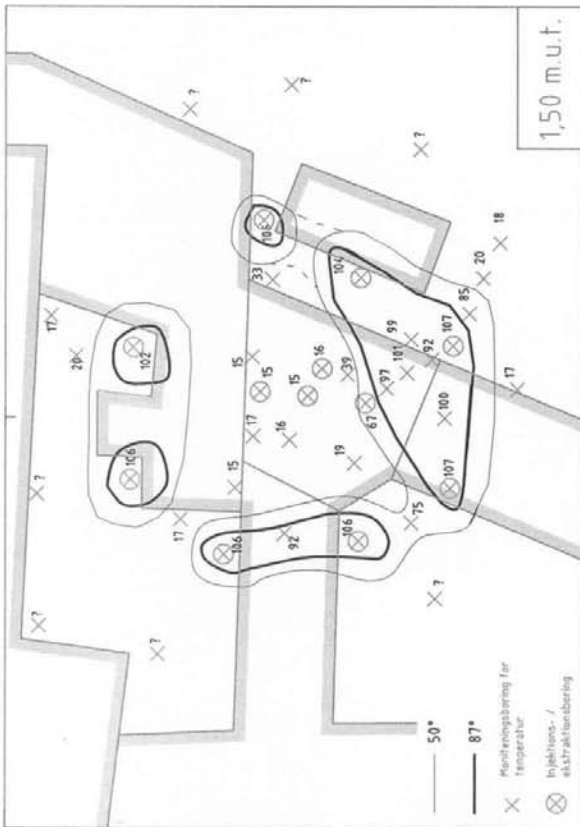
(NIRAS 2002) Nordjyllands Amt. Dokumentationsrapport. Nedlagt renseri, Østerbro. Lokalitetsnummer: 851-944. Afsluttes februar 2002. NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S.

Bilag 1: Temperaturmonitoring

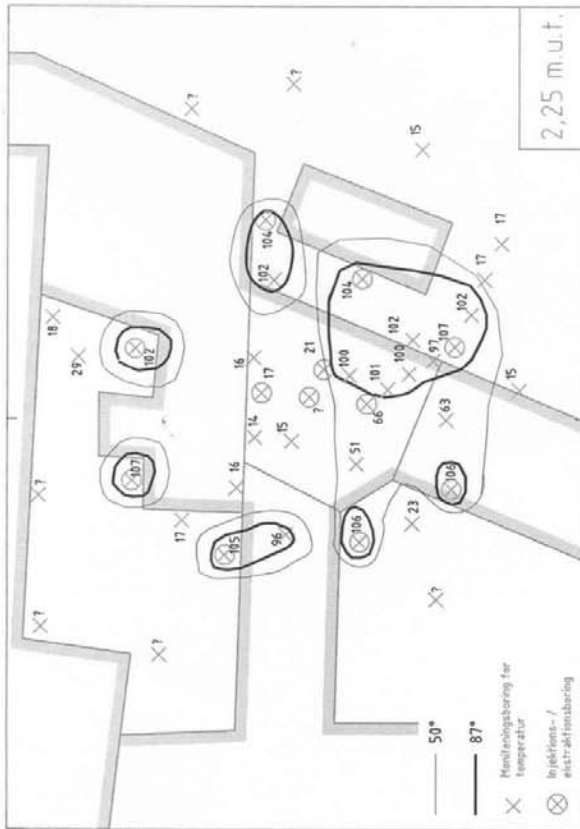
Oversigtskort for temperaturmonitoringsboringer samt temperaturkurver for udvalgte dybder gennem driftsperioden.



D. 15.9.2000



1,50 m.u.t.

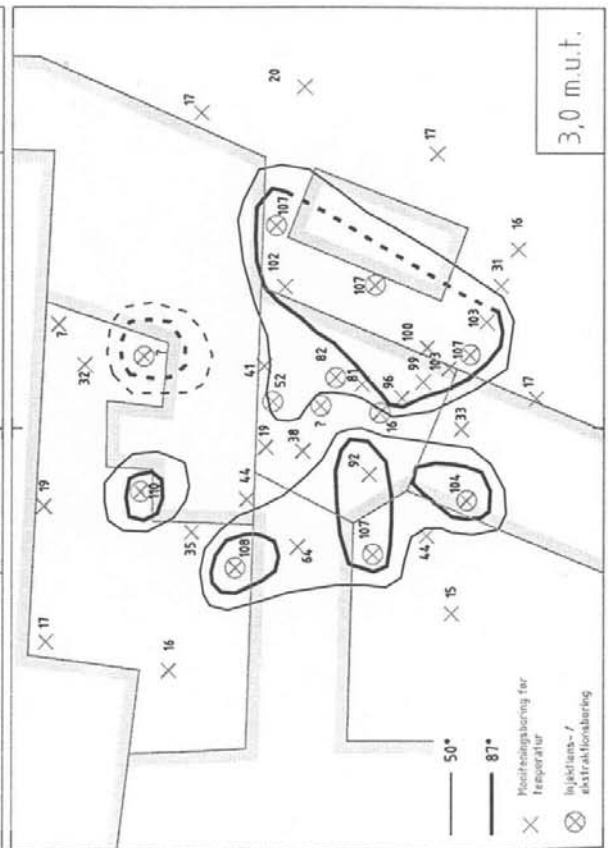
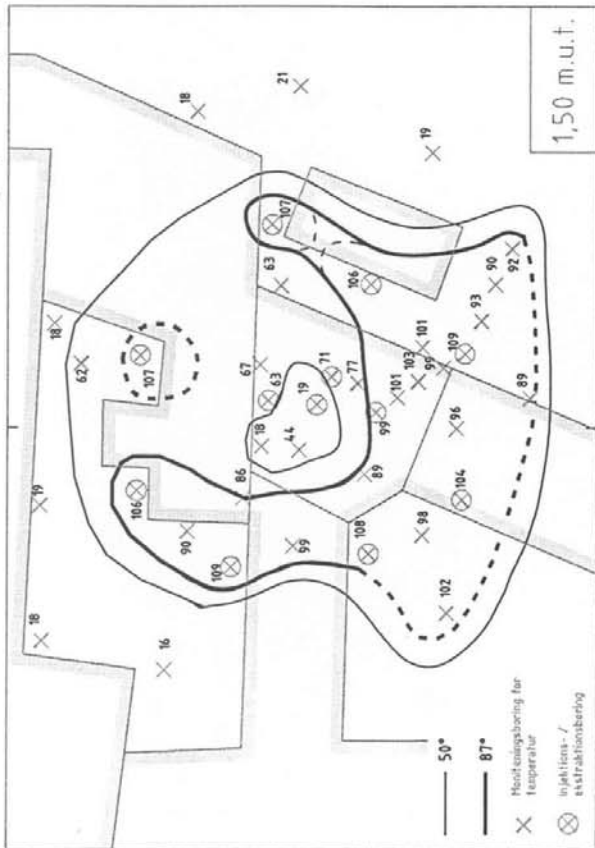


2,25 m.u.t.

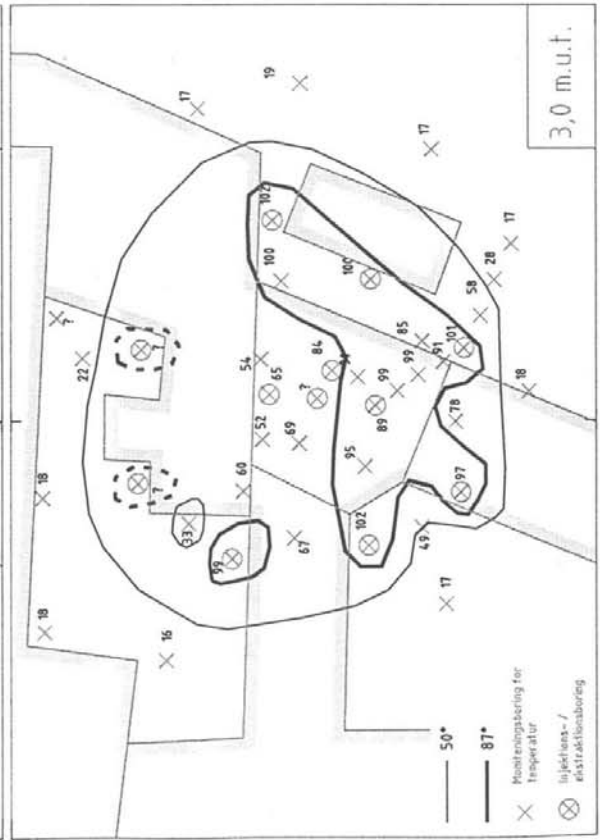


3,0 m.u.t.

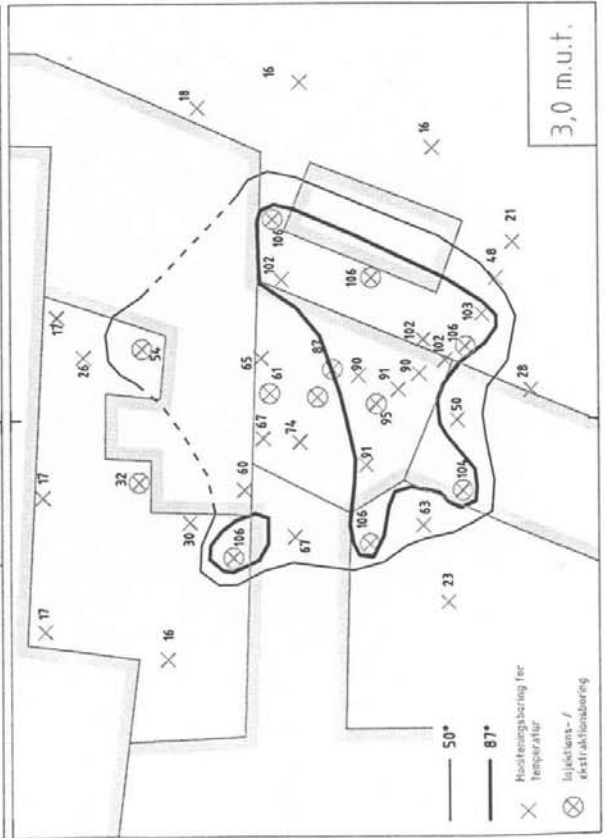
D. 19.9.2000



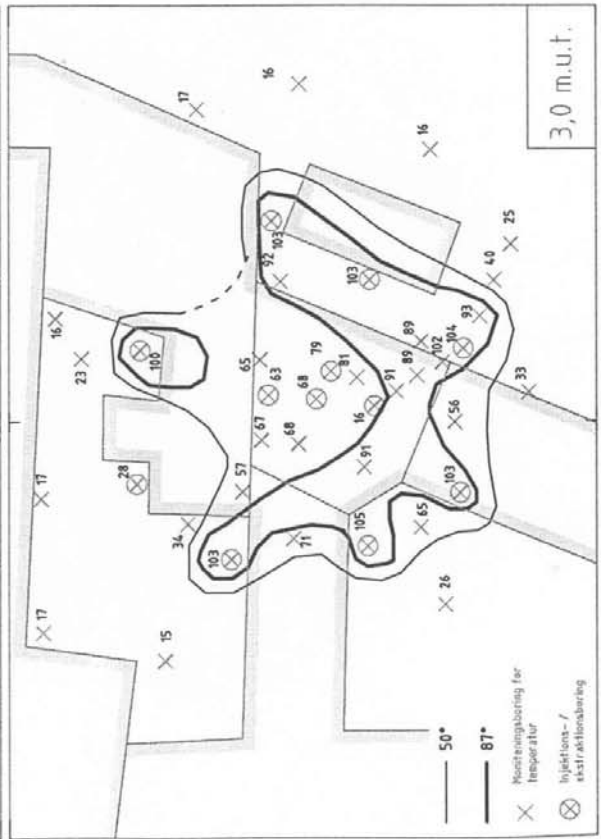
D. 21.9.2000



D. 23.9.2000



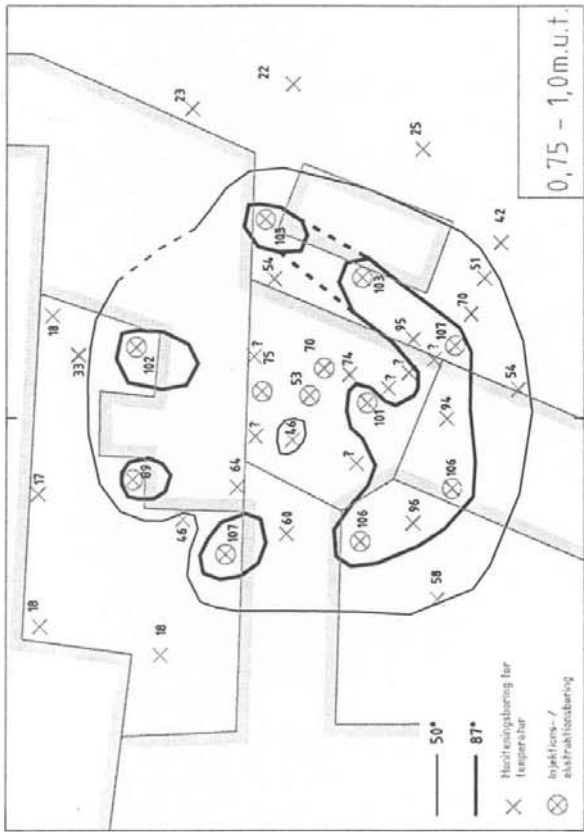
D. 25.9.2000



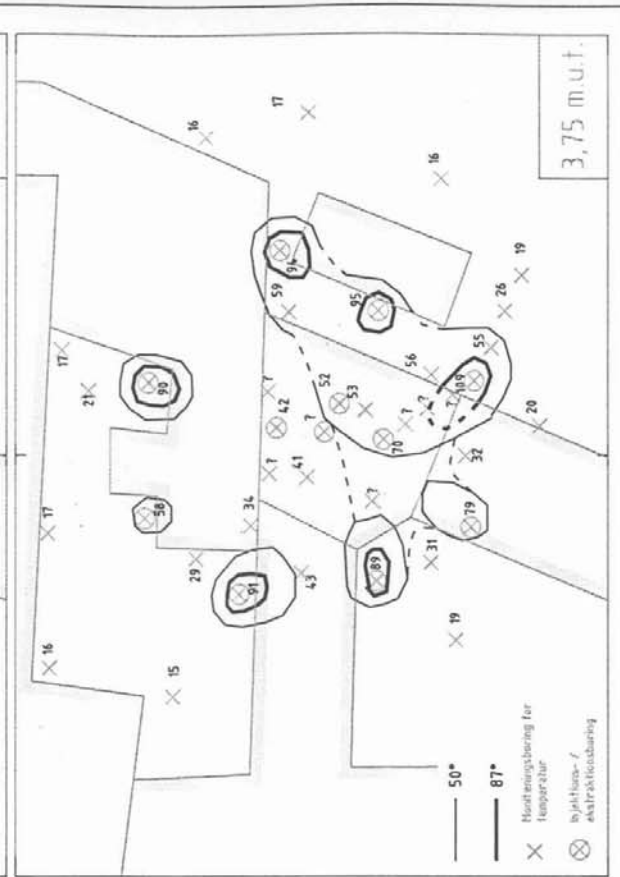
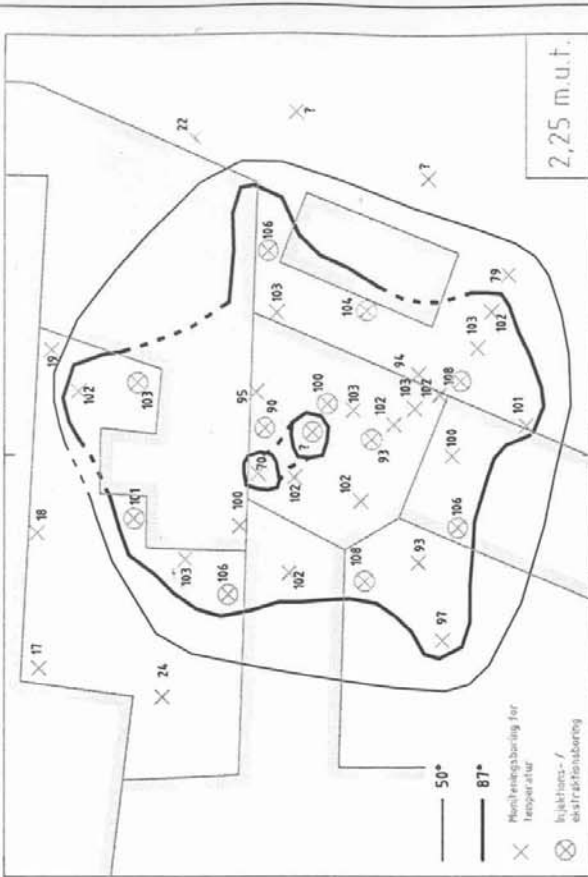
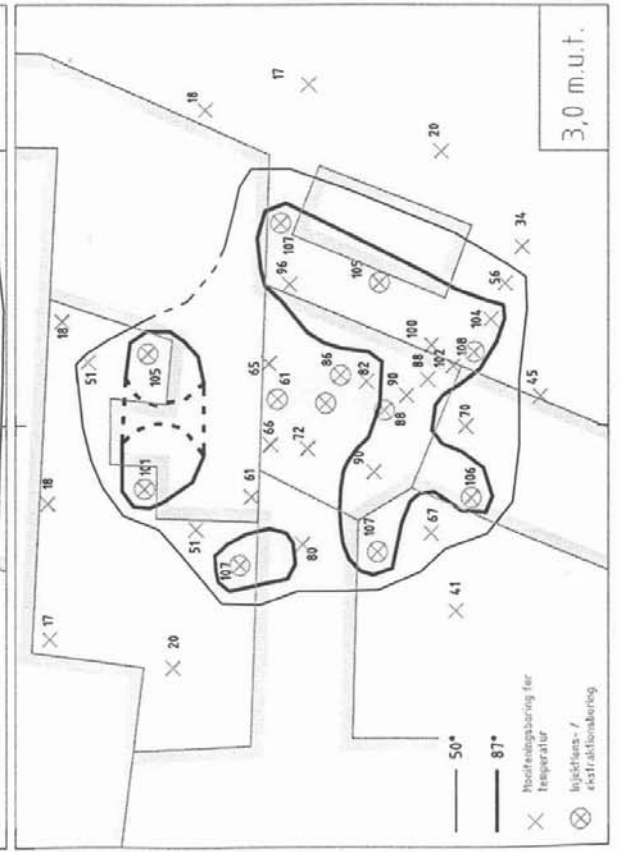
D. 27.9.2000



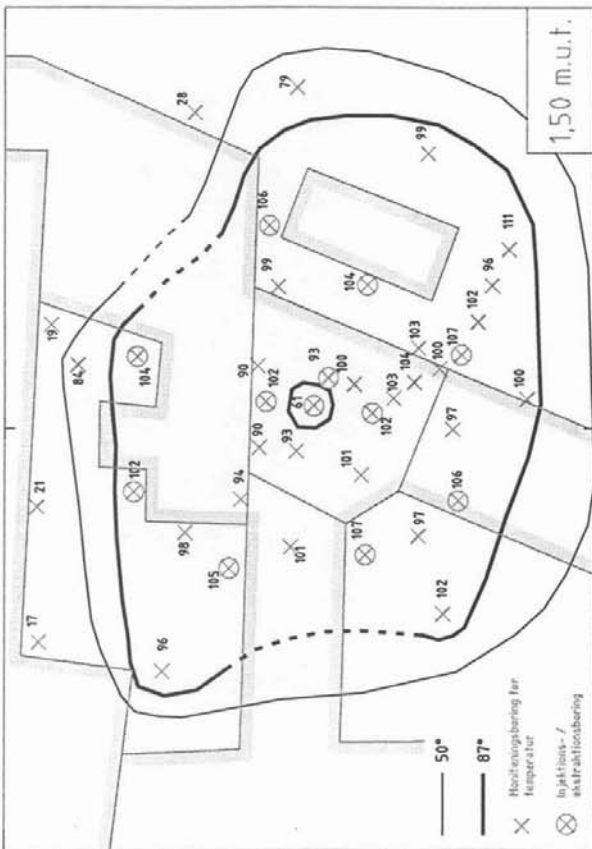
D. 29.9.2000



D. 29.9.2000



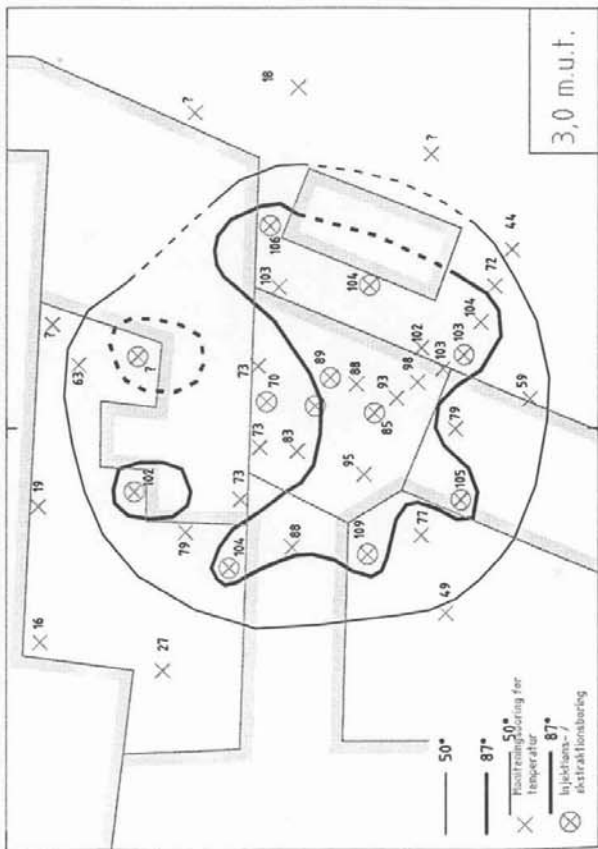
D . 0 1 . 1 0 . 2 0 0 0



1,50 m.u.t.

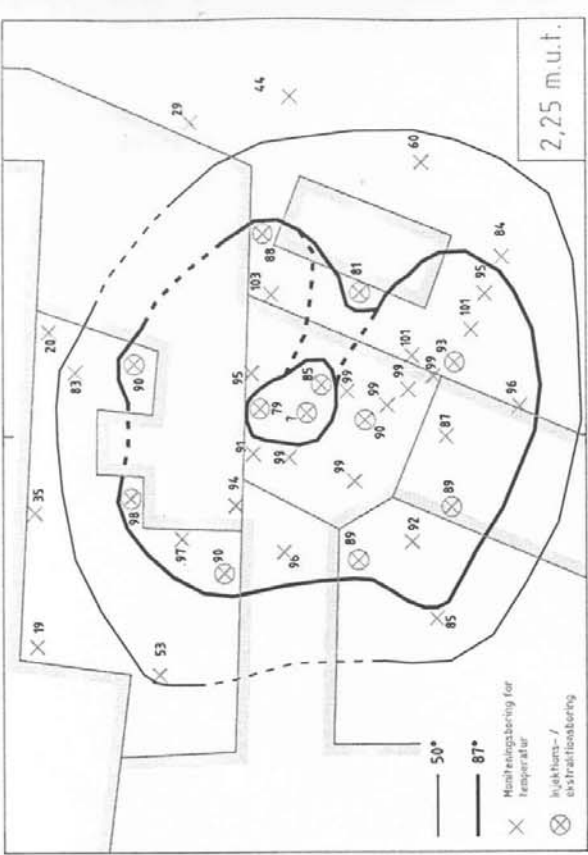
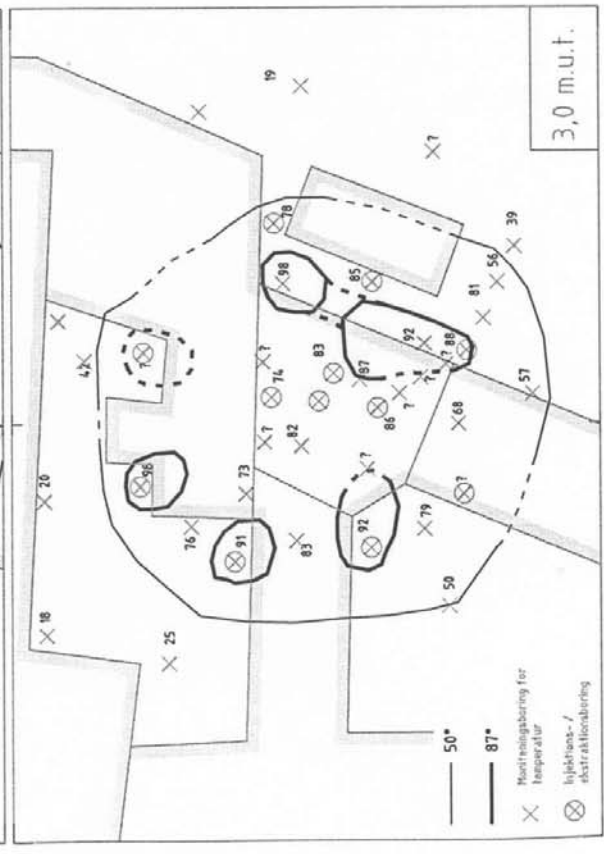
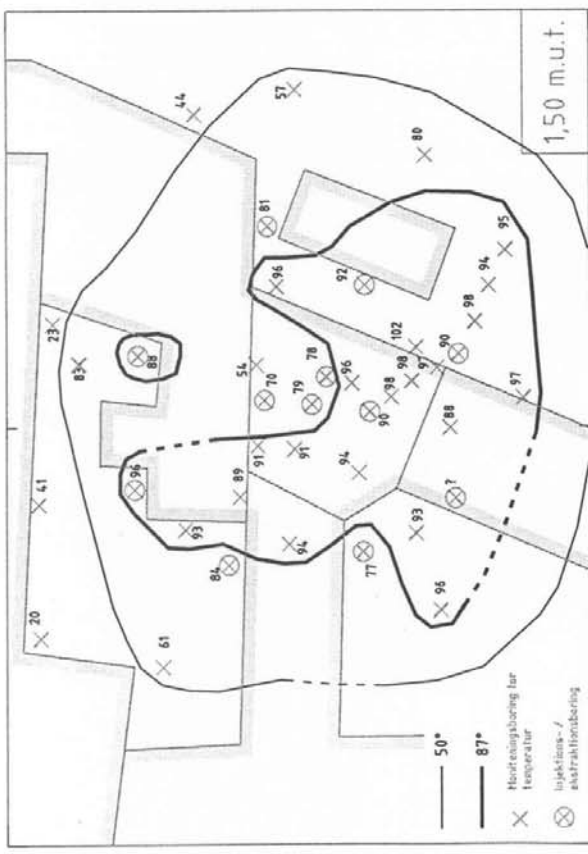


2,25 m.u.t.

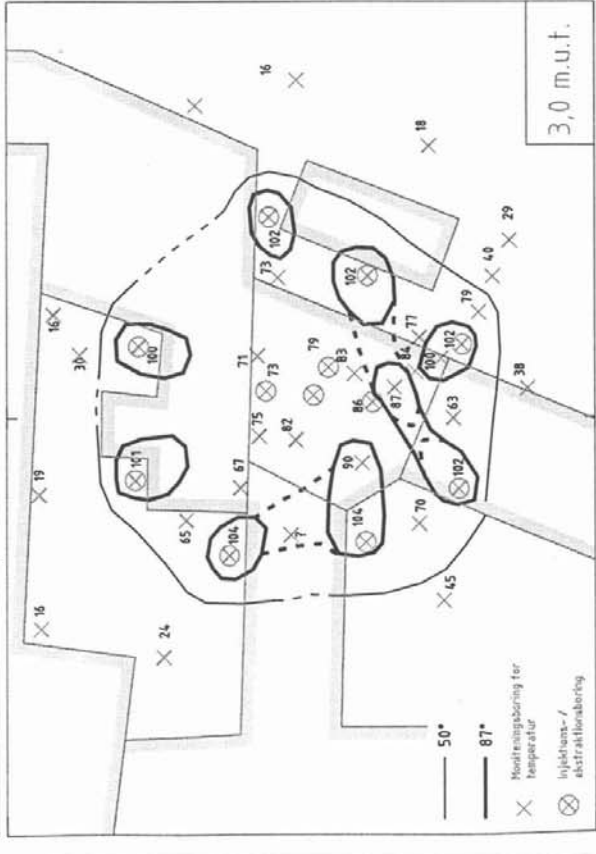
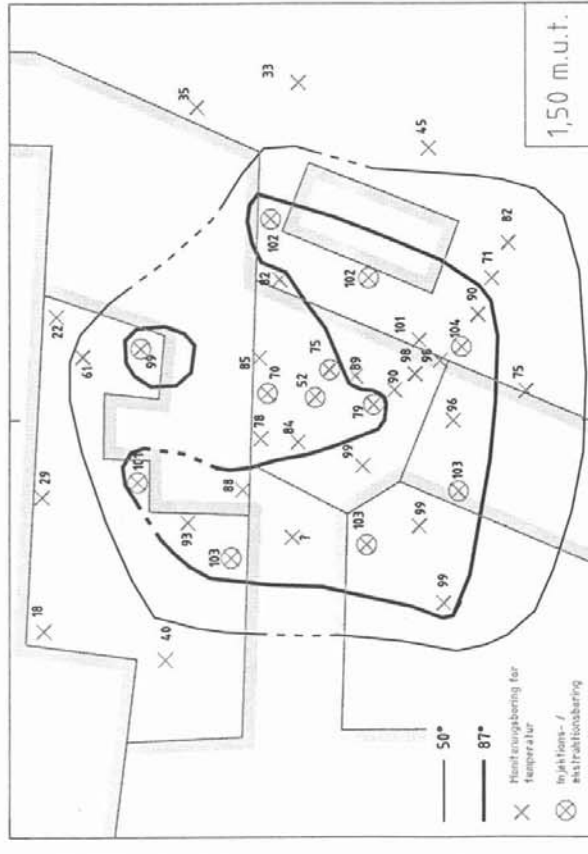


3,0 m.u.t.

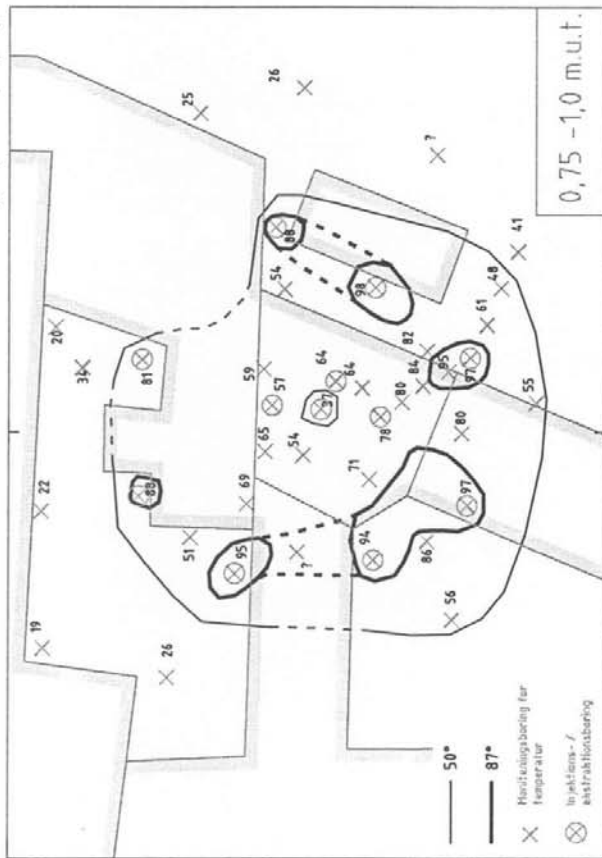
D. 03.10.2000



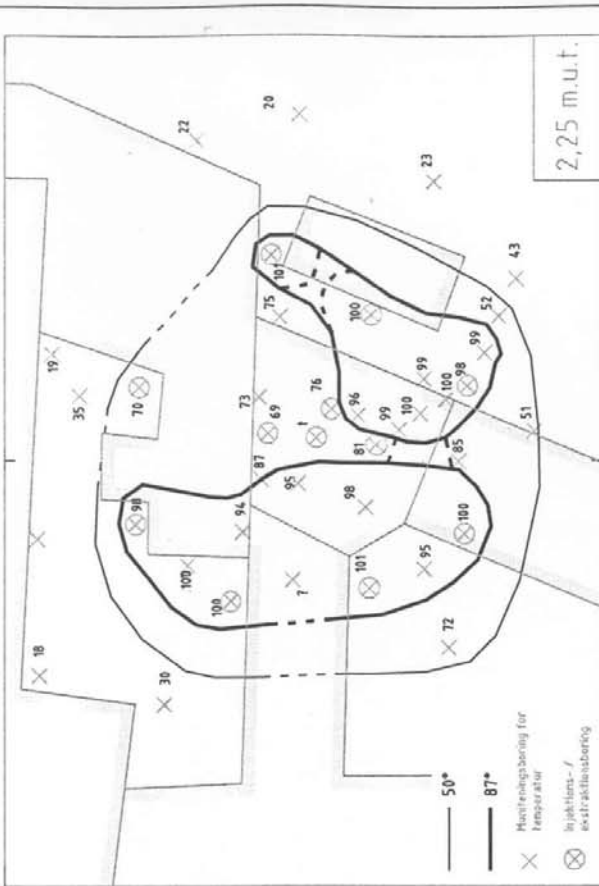
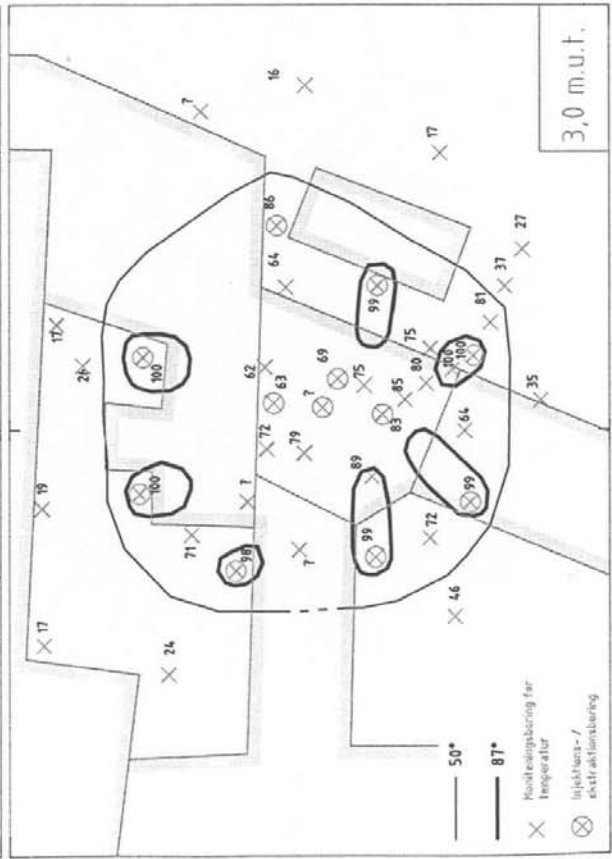
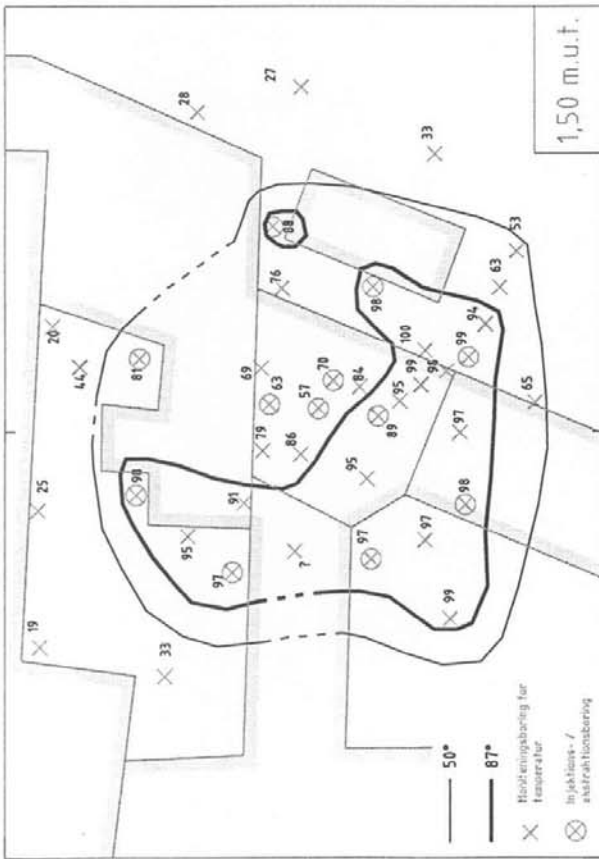
D. 07.10.2000



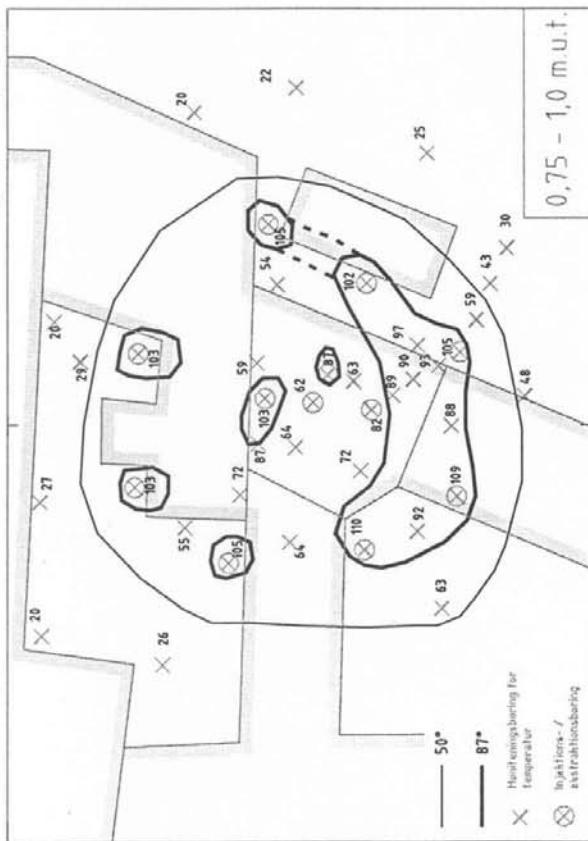
D. 11.10.2000



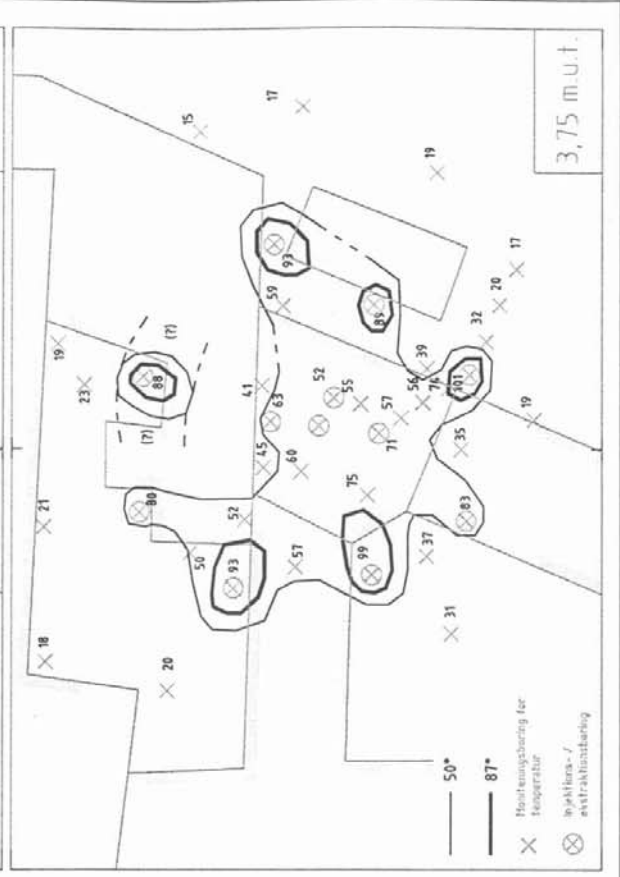
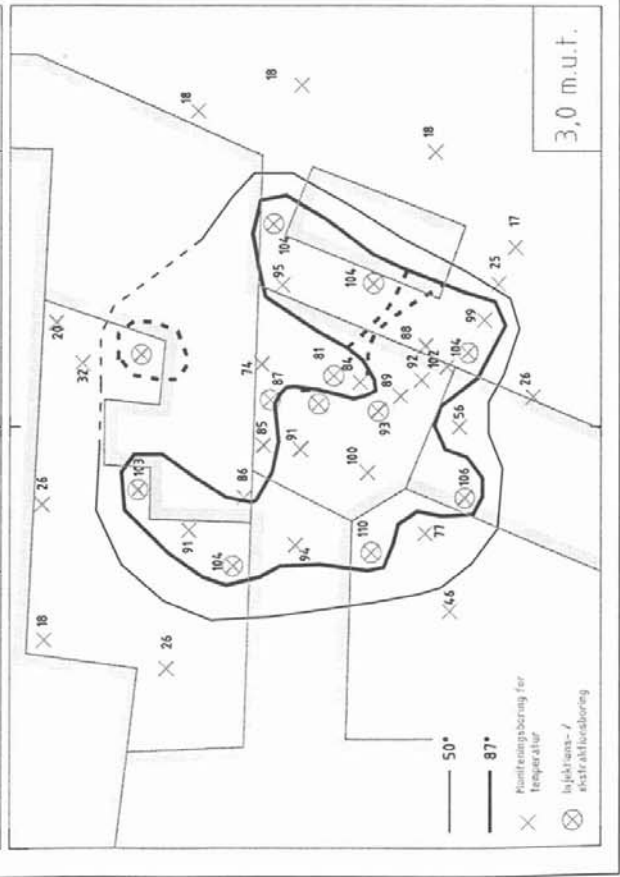
D. 11.10.2000



D. 18.10.2000



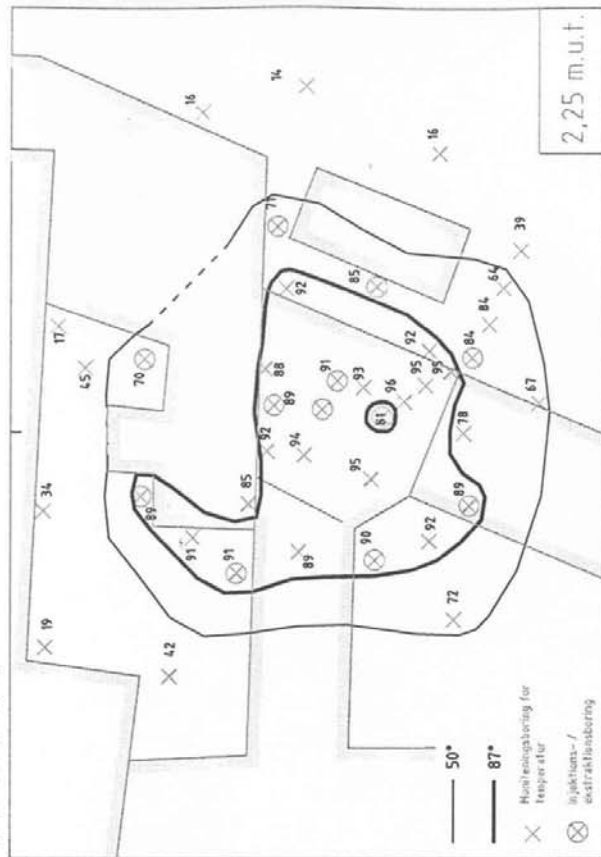
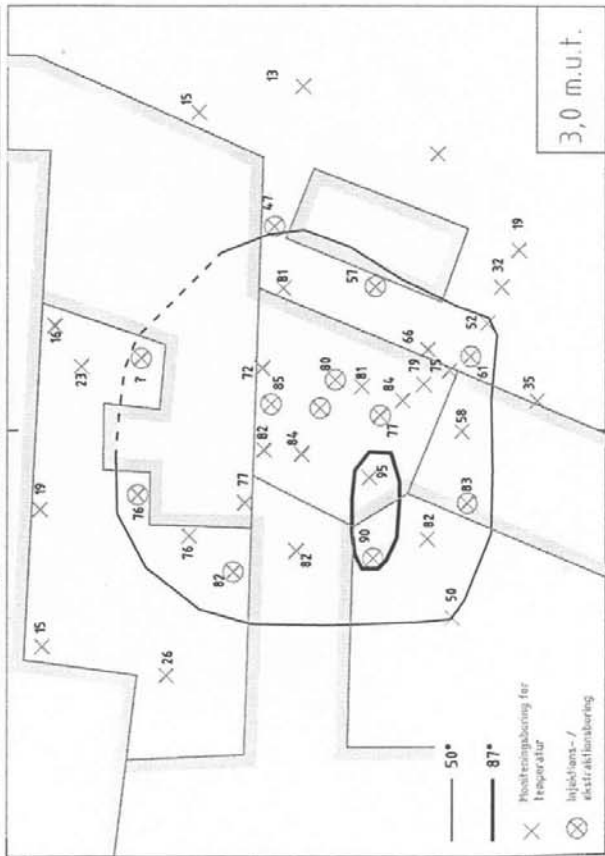
D. 18.10.2000



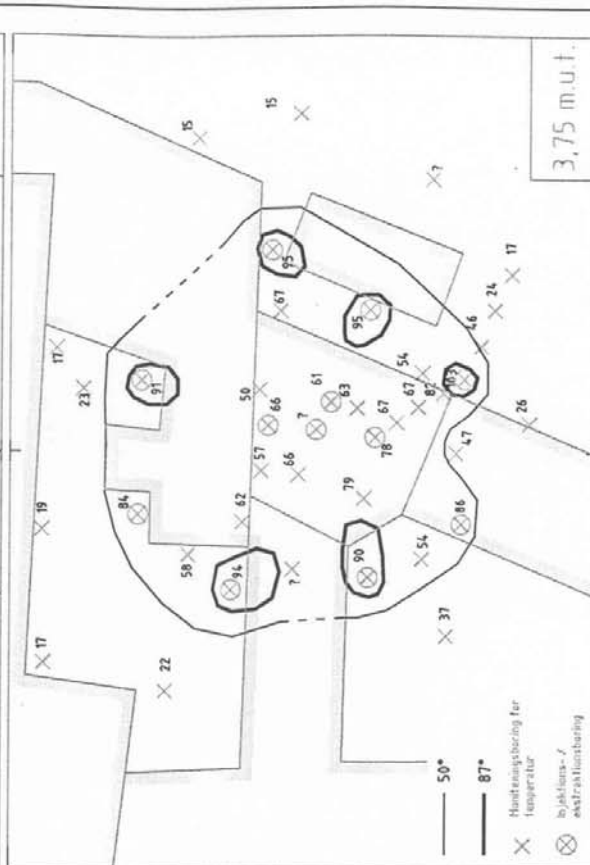
D. 25.10.2000



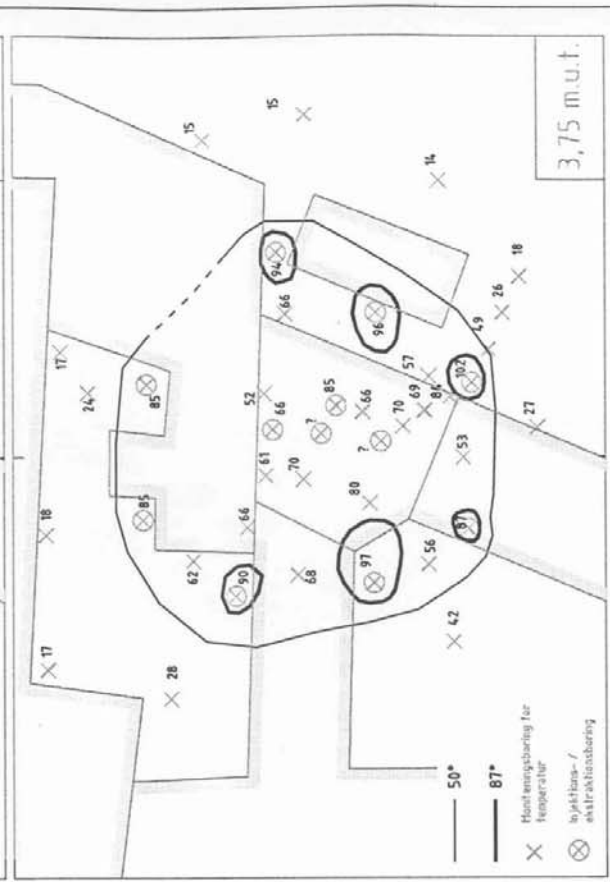
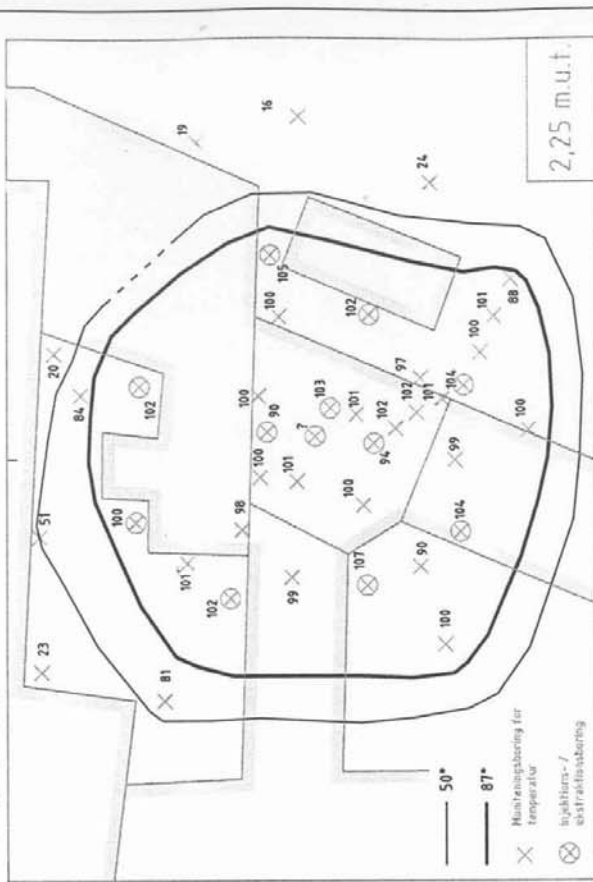
D. 25.10.2000



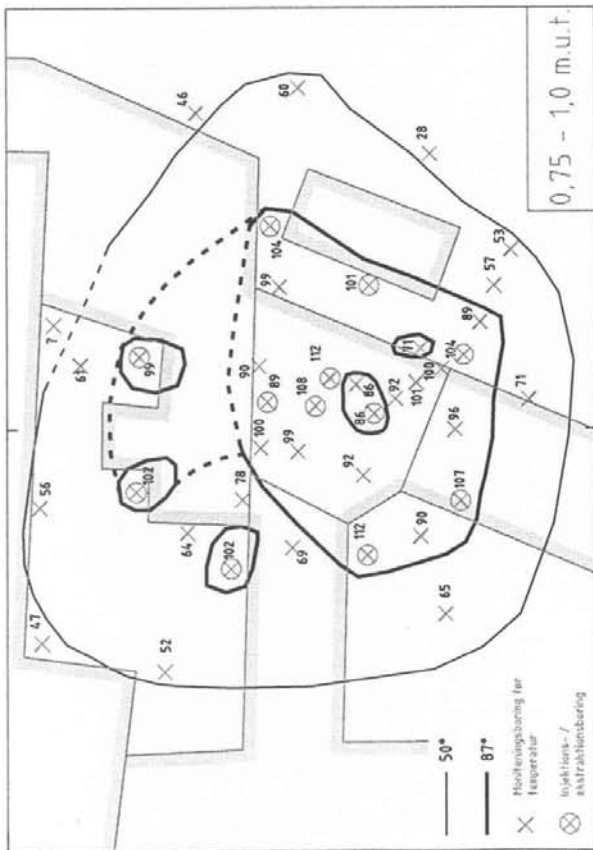
D. 02.11.2000



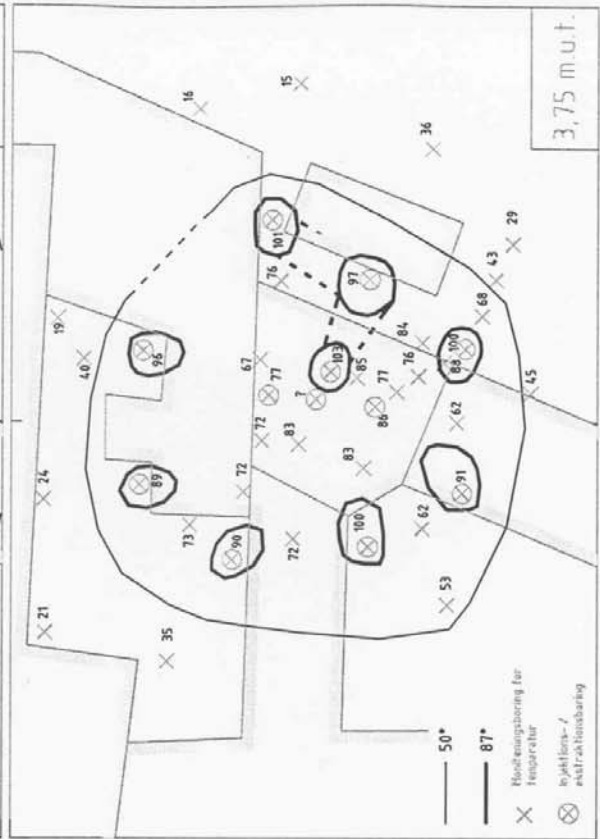
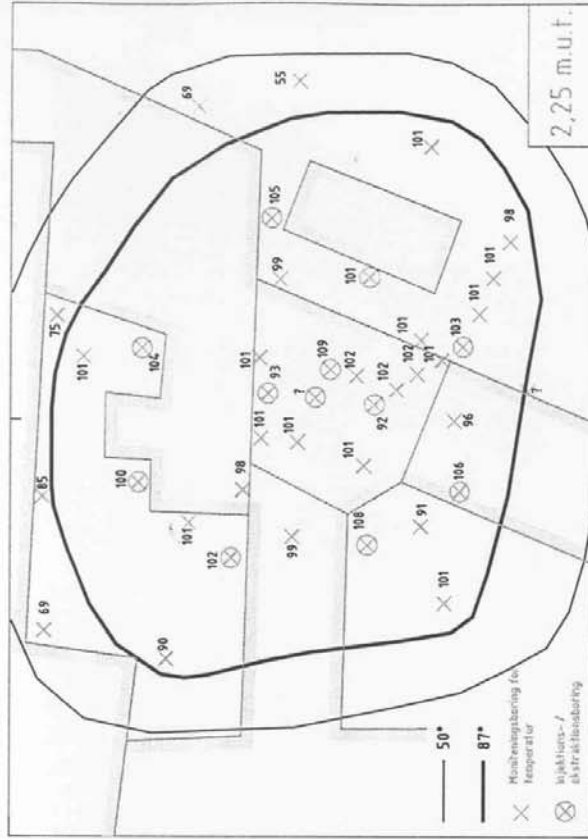
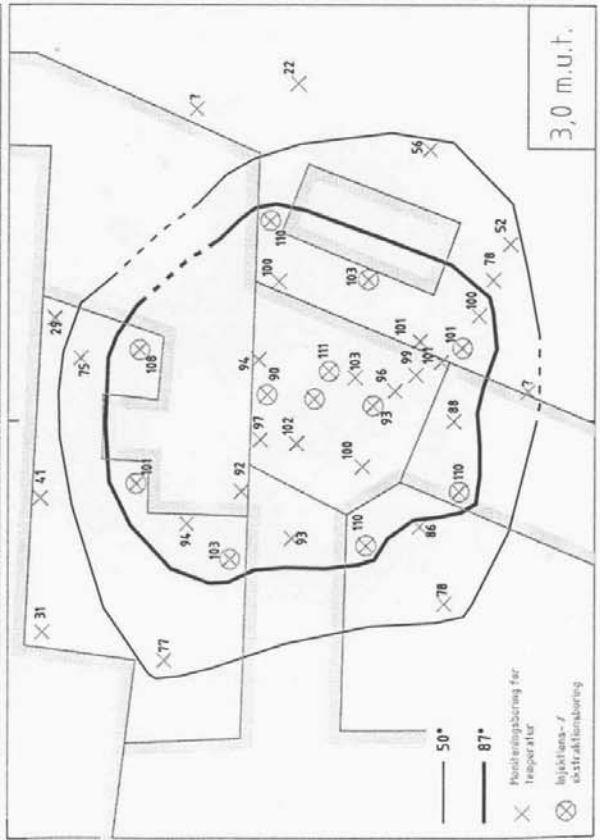
D. 10.11.2000



D. 30.11.2000



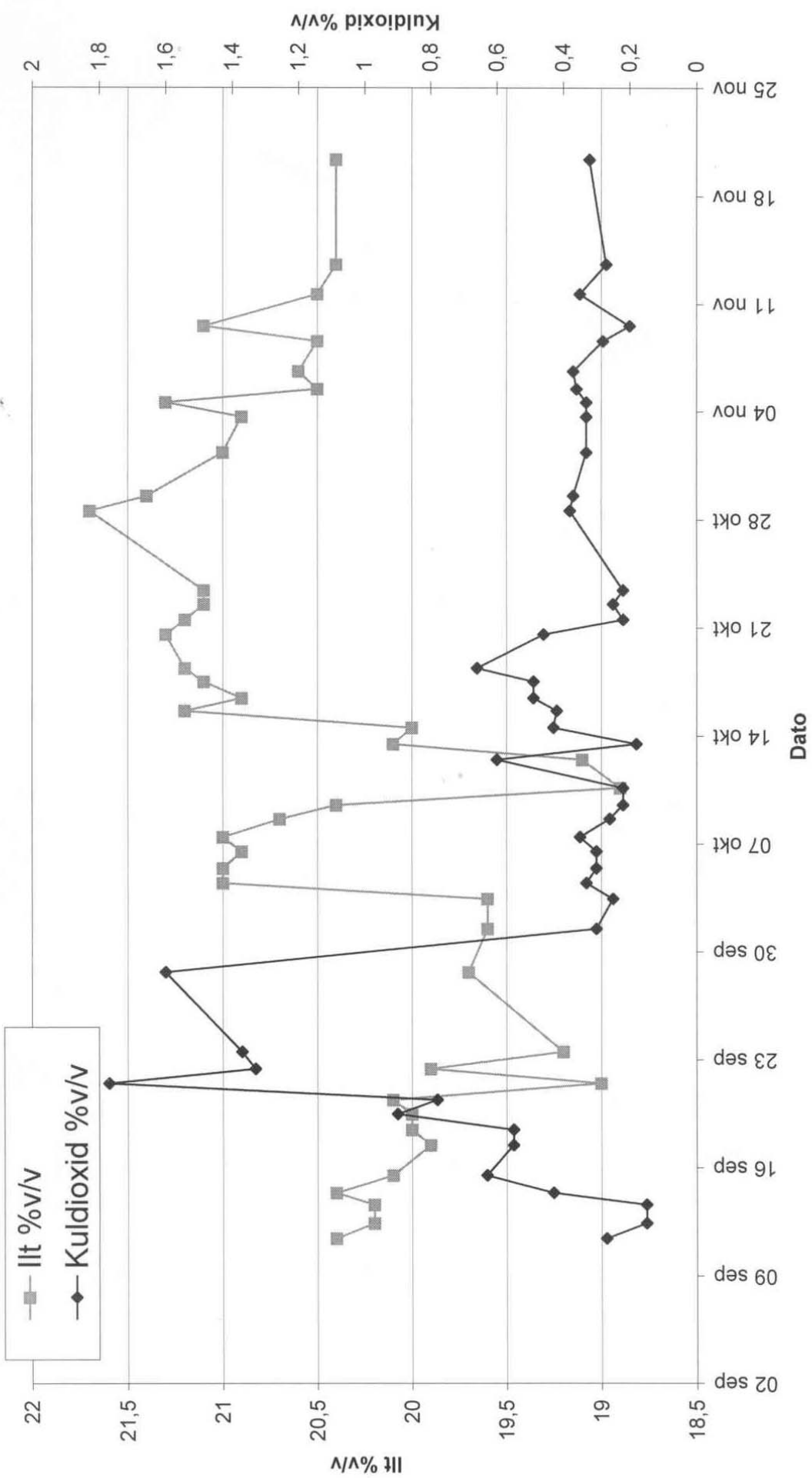
D. 30.11.2000



Bilag 2: Vådoxidation

Resultater, vådoxidation – målinger af O_2 og CO_2

Indhold af O₂ og CO₂ i afkastluft (% v/v)

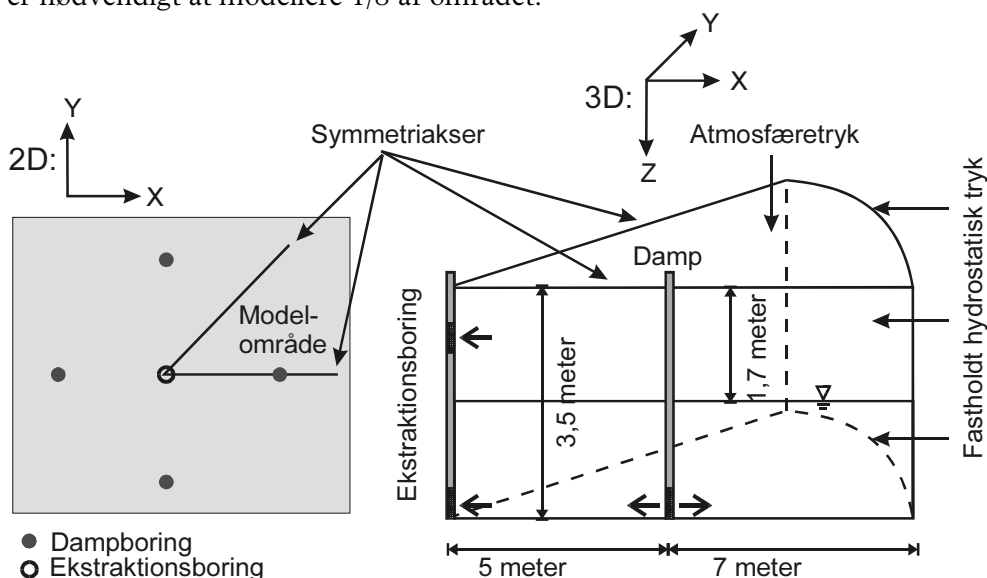


Bilag 3: Modelling af dampoprensning

af Jacob Gudbjerg, Miljø og Ressourcer, DTU

OPSTILLING AF MODEL

For nærmere at undersøge udviklingen af en dampzone ved injektion under grundvandsspejlet er der ved hjælp af programmet T2VOC opstillet en numerisk model. Modelling af dampinjektion er meget beregningskrævende, og det er ikke realistisk at simulere hele oprensningen. I stedet betragtes en mere simpel boringsopsætning, hvor symmetrien kan udnyttes til at reducere det nødvendige modelområde. Der modelleres en situation med fire injektionsboringer placeret på en cirkel omkring en central ekstraktionsboring. Opsætningen er illustreret på nedenstående figur, og det ses, at det kun er nødvendigt at modellere 1/8 af området.



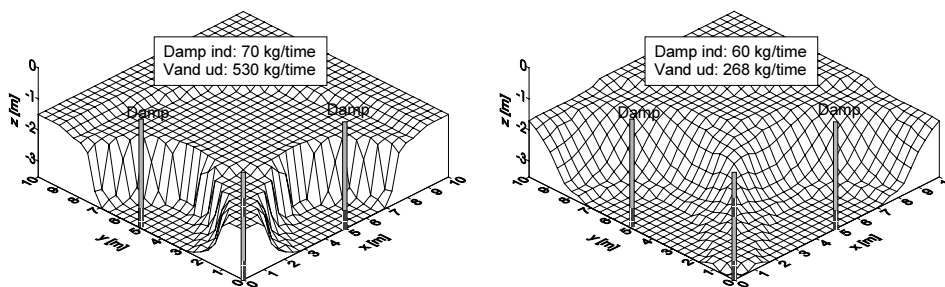
FIGUR 1 SKEMATISK ILLUSTRATION AF MODELOMRÅDE.

Resultaterne fra modellen kan ikke sammenlignes direkte med de observerede resultater, men modellen vil vise de samme tendenser. Modellen giver derfor mulighed for nærmere at analysere og forklare de observerede resultater.

Geologien i modellen udgøres af et homogent sandlag med en horisontal permeabilitet på $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ og en vertikal permeabilitet, der er 10 gange lavere. Vandspejlet træffes 1,7 m.u.t., og i den umættede zone er der initialt hydrostatisk forhold defineret ved den eksperimentelt bestemte kapillartrykskurve. Temperaturen er $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Der injiceres mættet damp med et fastholdt tryk på 130 kPa i en enkelt boring filtersat fra 2,9 til 3,5 m.u.t., der er placeret 5 m fra ekstraktionsboringen. Ekstraktionsboringen simuleres ved at angive et fastholdt tryk på 101 kPa i den nederste celle og 70 kPa i cellen 1,5 m.u.t.. Det nederste tryk svarer til atmosfæretryk, og det vil sige, at vandspejlet er 3,4 m.u.t. i boringen, og at boringen dermed pumpes tør. Der er angivet et fastholdt tryk svarende til initialbetingelsen i afstanden 12 m fra ekstraktionsboringen. De øverste celler i området har kontakt til en atmosfærecelle med fastholdt tryk, der tillader gasstrømning. Bunden af modelområdet udgøres af en no-flow grænse, hvilket svarer til det lavpermeable lerlag. Modelområdet er opløst i 17768 beregningsceller.

DAMPZONENS UDBREDELSE

Efter 72 timer med dampinjektion er der stort set opnået steady-state, hvilket vil sige, at den ekstraherede energi svarer til den injicerede. Det kan således ikke forventes, at dampzonen vil udvikles yderligere. Nedenstående figur viser vandspejlet defineret ved den dybde, hvor vandmætningen er større end 0,9. Det piezometriske vandspejl er ikke interessant i dette tilfælde, eftersom den umættede dampzone har et højere tryk end atmosfæren. Hvis man således målte dybden til vandspejlet i et piezometer tæt ved injektionsboringen, ville placeringen være bestemt af injektionstrykket og ikke sige noget om dybden til den umættede zone.

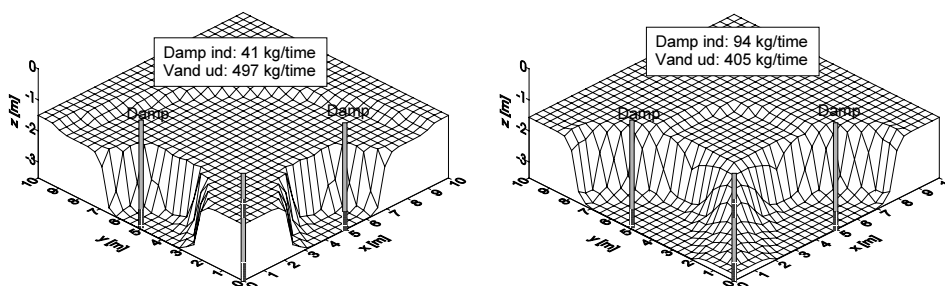


FIGUR 2 VANDSPEJL MED (VENSTRE) OG UDEN VARMETAB (HØJRE).

Figuren er symmetrisk omkring $y = x$ og viser det dobbelte af det simulerede område. De angivne ekstraktions- og injektionsrater svarer til den simulerede situation, hvilket altså er halvdelen af den afbildede.

Tæt på injektionsboringen har dampen fortrængt grundvandet, men mellem injektionsboringerne strømmer der fortsat vand ind i det forurenede område. Det er altså kun tæt ved injektionsboringen, at dampen har et højere tryk end vandet. Tryktabet i dampzonen skyldes dels, at afstanden til injektionsboringen øges og dels, at varmetabet medfører kondensation. For at adskille de to processer er der gennemført en simulering, hvor initialtemperaturen er sat til 100 °C, således at der ikke er noget varmetab. I denne situation ses en langt mere effektiv fortrængning af vand. Det bemærkes dog, at der stadig strømmer en betydelig mængde vand til ekstraktionsboringen. Injektionsraten er lavere end i standardtilfældet, og det skyldes det generelt højere tryk som følge af den manglende kondensation. Forskellen mellem de to situationer kan ses som et udtryk for grundvandets kølende effekt.

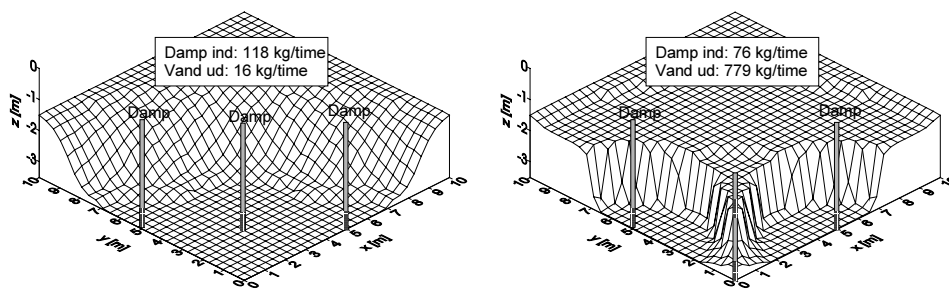
De næste to figurer viser effekten af at variere injektionstrykket.



FIGUR 3 VANDSPEJL VED 125 kPa (VENSTRE) OG 135 kPa (HØJRE) INJEKTIONSTRYK.

Som forventet giver et højere injektionstryk en øget fortrængning. Det kan derfor anbefales at benytte så højt et injektionstryk som muligt. Man bør dog være varsom med ikke, at overstige trykket svarende til jordens vægt, da der så kan dannes sprækker i jorden.

I de næste to eksempler er der installeret endnu en boring på symmetriaksen mellem de to injektionsboringer. I det første tilfælde benyttes boringen til dampinjektion (figuren til venstre), og i det andet tilfælde benyttes boringen til oppumpning af grundvand.

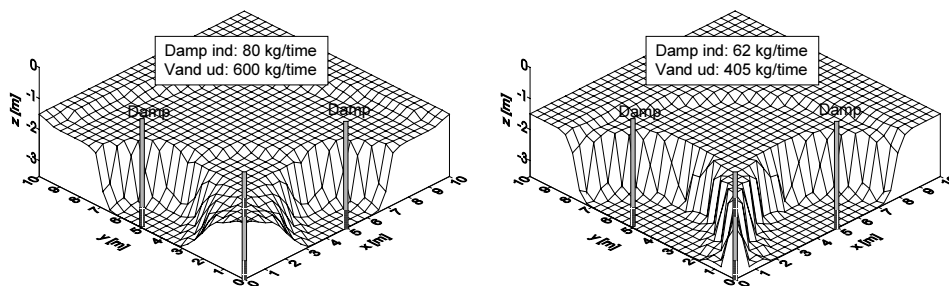


FIGUR 4 VANSPEJL VED TO INJEKTIONSBORINGER (VENSTRE) OG TO EKSTRAKTIONSBORINGER (HØJRE).

Den ekstra injektionsboring giver en meget effektiv fortrængning af vand. En del af den injicerede damp ekstraheres som gasfase, og derfor er det ikke nødvendigvis et problem, at der oppumpes langt mindre vand, end der injiceres. Dette eksempel viser, at det er muligt at opvarme hele det forurenede område, hvis afstanden mellem borerne er lille nok.

Den ekstra ekstraktionsboring giver en lidt større dampzone, men der strømmer stadig meget vand ind i det forurenede område. 44 % af det oppumpede vand kommer fra den oprindelige boring. Effekten af flere ekstraktionsboringer er meget afhængig af den aktuelle situation. I dette tilfælde er grænsen med fastholdt tryk meget tæt på, og derfor ses kun en lille effekt. Generelt kan det siges, at man altid vil opnå en større dampzone ved at etablere flere ekstraktionsboringer. Man skal dog være opmærksom på, at dampzonen bevæger sig mod ekstraktionsboringen, og derfor vil det ikke nødvendigvis være fordelagtigt at etablere borer opstrøms uden for det forurenede område.

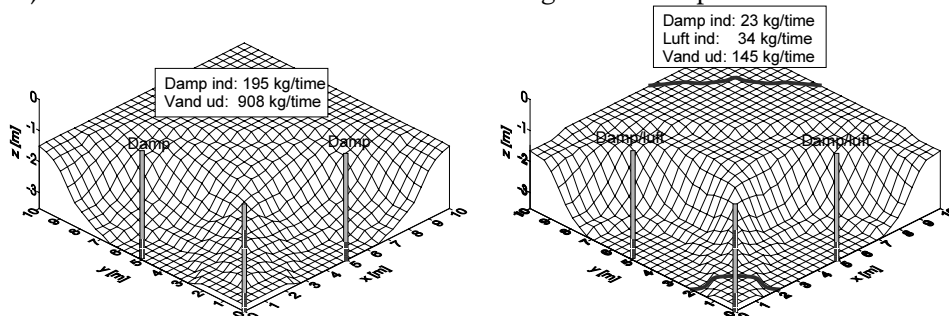
I den næste situation er forholdet mellem den vertikale og horisontale permeabilitet varieret. I standardtilfældet var forholdet 1:10, og her er vist resultater for 1:5 og 1:20.



FIGUR 5 VANDSPEJL VED PERMEABILITETSFORHOLD 1:5 (VENSTRE) OG 1:20 (HØJRE).

Ved et permeabilitetsforhold på 1:5 ses en betydeligt ringere fortrængning af vand, hvilket skyldes det øgede tryktab i vertikale retning. Til sammenligning ses en øget fortrængning, når den vertikale permeabilitet sænkes. Det kan altså konkluderes, at jo lavere permeabiliteten er i vertikal retning, jo bedre fortrængning opnås i dybden.

I den næste situation er der indlagt et lag 2,7 til 3,3 m.u.t. med en permeabilitet, der er fem gange højere. Det lokale forhold mellem vertikal og horisontal permeabilitet fastholdes.



FIGUR 6 VANDSPEJL MED HØJPERMEABELT BUNDLAG (VENSTRE) OG VED SAMTIDIG INJEKTION AF LUFT (HØJRE).

Det højpermeable lag i bunden medfører en markant øget fortrængning af vand, fordi der kan injiceres mere damp. Selvom indstrømningen af koldt grundvand også øges, er det ikke nok til at begrænse

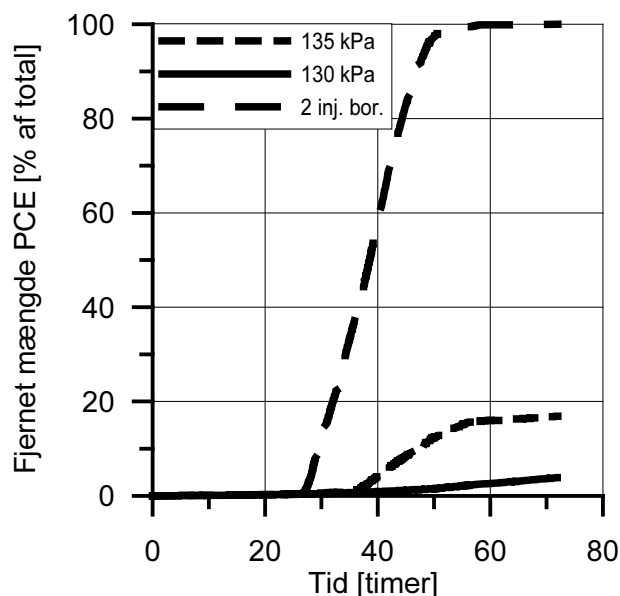
dampzonen. I en lagdelt formation vil det altså være nemmere at opnå en effektiv fortrængning forudsat, at injektionsboringen er filtersat i det højpermeable lag.

Det skal nævnes, at havde grænsebetingelsen været en fastholdt injektionsrate og ikke et fastholdt injektionstryk ville det højpermeable lag have medført en ringere fortrængning.

I den sidste situation injiceres der både damp og luft. Injektionstemperaturen er fastsat til 90 °C, hvilket ved det pågældende tryk giver et blandingsforhold på 1,5 kg luft til 1 kg damp. Injektionen af luft medfører en langt højere fortrængning af vand end injektion af ren damp. Det skyldes, at luften ikke kondenserer, og derved svarer det til situationen uden varmetab. Det skal dog siges, at injektion af luft medfører en række andre problemer. Eksempelvis vil størstedelen af den injicerede luft, og dermed forureningen, strømme ud til atmosfæren gennem jordoverfladen. På figur 6 til højre strømmer der luft ud i arealet mellem de to tykke sorte streger. Influensradius for ekstraktionsboringen er altså meget lille, og slet ikke tilstrækkelig til at kontrollere den injicerede luftmængde. Ydermere er det usikkert om modellens forudsætninger er fuldt ud opfyldt ved injektion af så store mængder luft under grundvandsspejlet, og derfor er der en vis usikkerhed på beregningsresultatet. Det kan ikke umiddelbart anbefales at injicere luft for at opnå en øget fortrængning af grundvand.

OPRENSNING AF DNAPL

Opvarmningen i dybden har meget stor betydning for oprensningens effektivitet. Det er illustreret ved at tilføje en pulje på 200 kg immobilt PCE i bunden af modelområdet mellem injektions- og ekstraktionsboringen. Det svarer til den observerede frie fase PCE på toppen af lerlaget. Den første situation, situationen med injektionstryk på 135 kPa og situationen med to injektionsboringer er simuleret med forurening. Tilstedeværelsen af PCE har kun meget lille betydning for temperaturudbredelsen. Nedenstående figur viser fjernelsen af PCE fra modelområdet for de tre forskellige situationer.



FIGUR 7 FJERNELSERATER VED TO FORSKELLIGE INJEKTIONSTRYK OG MED TO INJEKTIONSBORINGER.

Den fuldt optrukne linje viser fjernelsesraten ved den første situation, og der observeres en meget langsom fjernelse. Ved det højere injektionstryk blev der som tidligere beskrevet fortrængt mere vand, og temperaturen i det forurenede område blev derved højere. Det medfører en periode med markant højere fjernelsesrate, hvorefter raten falder til samme niveau som ved det lave tryk. Det skyldes, at noget af den forurenede jord i denne periode er opvarmet til det fælles kogepunkt for vand og PCE. I tilfældet med de to injektionsboringer blev stort set alt vandet fortrængt, og der ses en meget høj fjernelsesrate, der skyldes kogning af den frie fase PCE. Det er altså meget vigtigt, at temperaturen for det fælles kogepunkt opnås, da man ellers kun får en meget begrænset effekt af opvarmningen.

KONKLUSION

Simuleringerne har ligesom oprensningen vist, at det kan være vanskeligt at opvarme under grundvandsspejlet med dampinjektion, idet grundvandet ikke fortrænges. En meget dominerende faktor er forholdet mellem den vertikale og horisontale permeabilitet eller graden af lagdeling. Terrænnære sandmagasiner kan ikke forventes at være tilstrækkeligt lagdelte til, at man kan opnå en effektiv fortrængning af grundvand. Ved oprensninger i den type formationer bør man derfor overveje muligheden af at lave en generel grundvandssænkning ved en opstrøms oppumpning eller eventuelt etablere en fysisk barriere mod indtrængende grundvand. For denne oprensning ville det svare til at hele sandlaget havde været umættet ved dampinjektionens påbegyndelse.

Simuleringerne viser som forventet, at effektiviteten af fortrængningen stiger med injektionstrykket. Derfor bør man altid benytte så højt et injektionstryk som muligt under hensyntagen til, at trykket i jorden ikke overstiges. Det er ikke muligt at komme med nogle generelle retningslinjer for, hvor tæt borerne skal stå eller, hvor højt et injektionstryk der kræves. Den optimale injektionsstrategi vil afhænge af den aktuelle permeabilitet, lagdeling, afstand mellem borer, ekstraktion og muligheden for at sænke grundvandsspejlet. Den eneste måde at vurdere alle disse faktorer er ved at opstille en 3D-model, hvilket kræver en god beskrivelse af de hydrogeologiske egenskaber.

Simuleringerne viser yderligere vigtigheden af at opvarme hele det forurenede jordvolumen til temperaturen for det fælles kogepunkt. Hvis ikke denne temperatur opnås, fjernes forurening under grundvandsspejlet ikke væsentligt hurtigere end ved traditionel grundvandsoppumpning.

Filnavn: rapport-sterbro.doc
Bibliotek: Q:\MILJO\BEARBE~1\102-MS~1
Skabelon: O:\Sag\98\462.00\MST\term-oprens.the.dot
Titel: Indhold
Emne:
Forfatter: NIRAS Bruger
Nøgleord:
Kommentarer:
Oprettelsesdato: 08-01-03 09:29
Versionsnummer: 4
Senest gemt: 20-01-03 09:48
Senest gemt af: jan
Redigeringstid: 7 minutter
Senest udskrevet: 20-01-03 15:11
Ved seneste fulde udskrift
Sider: 91
Ord: 17.140 (ca.)
Tegn: 97.701 (ca.)