

Miljøprojekt Nr. 823 2003

Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening

Termisk assisteret vakuume ekstraktion af PCE. Hovedrapport

Torben Højbjerg Jørgensen, Jarl Dall Jepsen og Lars Nissen,
Cowi A/S

Hans Skou
Fyns Amt

Jacob Gudbjerg
Danmarks Tekniske Universitet

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

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

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

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	13
1 INDLEDNING	19
1.1 BAGGRUND FOR AFVÆRGEPROJEKTET	19
1.2 FORMÅL	20
2 BESKRIVELSE AF LOKALITETEN	21
2.1 HISTORISK BESKRIVELSE AF LOKALITETEN	21
2.2 GEOLOGISKE OG HYDROGEOLOGISKE FORHOLD	21
2.3 VANDINDVINDING OG RECIPIENTER	22
2.4 FORURENINGSBESKRIVELSE FØR OPRENSNING	22
3 AFVÆRGEFORANSTALTNINGER OG OPRENSNINGSSTRATEGI	25
3.1 STRATEGI FOR AFVÆRGEFORANSTALTNINGER	25
3.2 AFKLARING AF RISICI VED DAMPINJEKTIONEN	27
3.3 DIMENSIONERINGSGRUNDLAG	27
3.3.1 <i>In-situ test for vakuumventilering og airsparging</i>	27
3.3.2 <i>Hydrauliske vurderinger</i>	28
3.3.3 <i>Edb-model af dampudbredelse</i>	28
3.3.4 <i>Vurdering af kritisk temperatur i jorden</i>	29
3.4 MONITERINGSPROGRAM	30
3.4.1 <i>Monitering af oprensningseffekt</i>	30
3.4.2 <i>Driftsmonitering</i>	31
4 ETABLERING AF AFVÆRGEFORANSTALTNINGER	33
4.1 JORDOPGRAVNING	33
4.2 AFVÆRGEANLÆG FOR IN-SITU ANLÆG	34
4.2.1 <i>Boringer</i>	34
4.2.2 <i>Behandlingsanlæg og SRO</i>	36
4.3 MONITERINGSBORINGER	38
4.3.1 <i>Monitering af temperaturudbredelse i jord</i>	38
4.3.2 <i>Grundvandsmoniteringsboringer</i>	39
4.3.3 <i>Boringer til monitering af oprensningsniveau i den umættede zone</i>	40
4.3.4 <i>Præcisionsnivelement</i>	40
5 DRIFT AF AFVÆRGEANLÆG	41
5.1 VAKUUMVENTILATION	41
5.1.1 <i>Driftstider og flow</i>	41
5.1.2 <i>Temperatur i ekstraheret poreluft</i>	44
5.1.3 <i>Influensradius</i>	44
5.1.4 <i>Radonmålinger</i>	45
5.1.5 <i>Kontinuerte PID-målinger</i>	46
5.1.6 <i>Forureningsniveau i ekstraheret poreluft og massejernelse</i>	47
5.2 DAMPINJEKTION	50

5.2.1	<i>Drifttider og flow</i>	50
5.2.2	<i>Ekstraheret vand fra vandudskiller</i>	51
5.2.3	<i>Tilsætning af trykluft</i>	52
5.2.4	<i>Temperaturudbredelse</i>	52
5.3	GRUNDEVANDSOPPUMPNING	58
5.3.1	<i>Forureningsniveau i oppumpet grundvand</i>	58
5.4	DRIFTSPROBLEMER	59
5.4.1	<i>Horisontale vakuumekstraktionsboringer</i>	60
5.4.2	<i>Tilklokning af dampinjektionsboringen</i>	60
5.4.3	<i>Køling af ekstraheret poreluft</i>	61
5.4.4	<i>Støjproblemer</i>	61
6	EFFEKT AF AFVÆRGEFORANSTALTNINGER	62
6.1	FORURENINGSUDVIKLING OG SPREDNING I UMÆTTET ZONE	62
6.1.1	<i>Restforurening i umættet zone</i>	63
6.2	FORURENINGSUDVIKLING OG SPREDNING I MÆTTET ZONE	64
6.2.1	<i>Restforurening i mættet zone</i>	66
6.3	FORURENINGSUDVIKLING I INDEKLIMA	67
6.4	GEOTEKNISKE PÅVIRKNINGER SOM FØLGE AF OPVARMNING AF JORDEN	68
7	DISKUSSION OG ERFARINGER	72
7.1	OPRENSNINGSSTRATEGI	72
7.2	EDB-MODELLERING	72
7.3	VAKUUMEKSTRAKTIONSBORINGER	72
7.4	TEMPERATURBORINGER	73
7.5	KONTINUERTE PID-MÅLINGER	73
7.6	RADONMÅLINGER	74
7.7	STYRING AF DAMPUDBREDELSE	74
7.8	TILSÆTNING AF TRYKLUFT	75
7.9	ENERGIFORBRUG OG ENERGITAB	76
7.10	SPREDNING AF FORURENING	76
7.11	MASSEFJERNELSE	77
7.12	DRIFTPROBLEMER	77
8	MILJØVURDERINGER	80
8.1	MILJØVURDERING I HENHOLD TIL "MILJØRIGTIG OPRENSNING AF FORURENET JORD OG GRUNDEVAND"	80
8.2	OVERORDNET MILJØVURDERING	80
8.3	DETALJERET MILJØVURDERING	82
8.3.1	<i>Ressourceforbrug</i>	83
8.3.2	<i>Potentielle miljøeffekter</i>	84
8.3.3	<i>Samlet miljøvurdering</i>	85
9	ØKONOMI FOR AFVÆRGEPROJEKTET	88
	REFERENCELISTE	89
	DER FORELIGGER SELVSTÆNDIG BILAGSBIND	

Forord

Der har i Danmark inden for den seneste årrække været fokus på chlorerede opløsningsmidler og oprensning af disse. In-situ løsninger til oprensning har vist sig at være anvendelige metoder på linie med traditionelle opgravninger med off-site rensning. Imidlertid har mange in-situ oprensninger vist sig at have lange oprensningstider, ligesom restforurening har vist sig at være et problem, specielt i mere inhomogene lerede jordlag. De termiske teknikker, hvor jorden opvarmes, har vist sig at kunne løse nogle af disse problemer. Ved opvarmning til kogepunktet bliver massetransporten kontrolleret af varmeudbredelsen, i stedet for at være kontrolleret af diffusion. Herved kan mindre permeable aflejringer renses hurtigt og ned til lave niveauer sammenlignet med traditionelle in-situ metoder /13/.

Injektion af damp er en af metoderne til opvarmning af jorden. Ved tidligere dampoprensningsprojekter i Danmark er opvarmningen sket ud fra to principielt forskellige design, dels injektion fra rand af forurening, hvorved dampzonen bevæger sig mod en central ekstraktionsboring i midten af forureningen og dels injektion centralt i forureningen, hvor forureningen opsamles i ekstraktionsboringerne, som er placeret i periferien af forureningen. Erfaringen er, at der ved opvarmning i kildeområdet og ekstraktion i periferien er risiko for uønsket spredning af forureningen.

På et renseri på Vesterbro i Odense er der gennemført en in-situ oprensning med termisk oprensning ved hjælp af damp. Da den væsentligste forurening kun ligger fra 1-5 m under eksisterende boliger, ville det være dyrt og sandsynligvis ikke muligt at udføre opvarmningen, hvor dampen eksempelvis injiceres udefra og ind mod kildeområdet, uden at dette ville medføre en uacceptabel påvirkning af installationerne i jorden og gulvene i husene. Der er derfor anvendt en modificeret metode, hvor dampen er injiceret under forureningen. Strategien har været at opvarme den mest forurenede del af jorden nedefra ved hovedsagelig varmeledning og fjerne forureningen gennem vakuume ekstraktionsboringer, som primært er placeret i kildeområdet. Der har været rejst en vis bekymring, om denne opvarmningsstrategi ville medføre en uønsket forureningsspredning.

Denne rapport belyser, om den modificerede metode som er anvendt på Vesterbro i Odense, fremmer massefjernelsen i forhold til kold ventilation, samt om metoden medfører uønsket spredning af forurening. Det samlede formål fremgår i detaljer i afsnit 1.2.

Afværgeprojektet er udført af COWI A/S for Fyns Amt. Projektet er et led i Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening.

Rapporten er opdelt i en hovedrapport og en særskilt bilagsrapport.

Sammenfatning og konklusioner

Dette projekt er udført under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening i samarbejde med Fyns Amt.

En undersøgelse i 1999 påviste en kraftig forurening med tetrachlorethylen (PCE) af jord og grundvand under et renseri på Vesterbro 28 i centrum af Odense. I poreluften har forureningen bredt sig over et område på mere end 10.000 m² og påvirket indeklimaet i flere hundrede boliger. Forureningsniveauet har været så højt, at embedslægen har erklæret flere boliger for uegnede til mennesker.

Jordforureningen i den umættede zone er oprenset med vakuumeekstraktion, suppleret med en opvarmning af kildeområdet ved hjælp af dampinjektion. Grundvandsforureningen oprenses efterfølgende ved kemisk oxidation med injektion af kaliumpermanganat.

Formålet med afværgeforanstaltningerne er at sikre arealanvendelsen i de boliger, der er påvirket af forureningen fra Vesterbro 28. Hovedformålet med teknologiprojektet er at dokumentere, om opvarmningen af den umættede zone fremmer massefjernelsen i forhold til en normal "kold" vakuumentilering, om det er muligt at styre opvarmningen samt om opvarmningen medfører en u hensigtsmæssig spredning af forureningen.

Geologi og hydrogeologi

Jordlagene på lokaliteten består øverst af 1-2 m fyld, herunder ca. 8 m sand med siltindslag, der underlejres af moræneler. Grundvandsspejlet er frit og står 6-7 m u.t.

Forurening

De gennemførte undersøgelser viser en kraftig forurening med chlorerede opløsningsmidler i jord, poreluft og grundvand. I kildeområdet er der i jorden fundet fri fase med PCE-indhold op til 26.000 mg/kg TS. De højeste koncentrationer knytter sig til de mere siltede lag fra 1-5 m's dybde. I poreluften er der ligeledes fundet meget højt indhold af PCE med koncentrationer op til 66.000 mg PCE/m³. I det øvre sekundære magasin (terrænnære grundvand) er der fundet forurening med PCE-indhold op til 13.000 µg/l. Forureningen fra renseriet påvirker indeklimaet i flere hundrede lejligheder i den centrale del af Odense med PCE-indhold på op til 3-4000 µg/m³. Til sammenligning er kvalitetskriteriet på 6 µg/m³.

Afværgestrategi

Forureningen i den umættede zone oprenses ved vakuumentilering. For at få en hurtigere frigivelse af PCE fra de finkornede lag suppleres oprensningen i den umættede zone med en opvarmning af jorden ved dampinjektion. Da den væsentligste forurening kun ligger 1-5 m under eksisterende boliger, ville det være dyrt og sandsynligvis ikke muligt at udføre opvarmningen, hvor dampen eksempelvis injiceres udefra og ind mod kildeområdet, uden at dette ville medføre en uacceptabel påvirkning af installationerne i jorden og gulvene i husene. Strategien har derfor været at opvarme den mest forurenede del af jorden nedefra ved hovedsagelig varmeledning.

Til den injicerede damp er der tilsat luft for at reducere eventuel kondensation af PCE til et minimum.

I den mættede zone er der gennemført oppumpning af forurenede grundvand til fanekontrol under dampoprensningen. Til oprensning af grundvandsforureningen i kildeområdet og umiddelbart nedstrøms herfor er der efterfølgende injiceret kaliumpermanganat.

Den anvendte oprensningsstrategi med dampinjektion har givet anledning til en vis bekymring, idet der kunne være risiko for ukontrolleret spredning af forureningen både vertikalt og horisontalt og spredning af damp op i overliggende bygninger. Der har ligeledes været bekymring for, om opvarmningen ville medføre sætninger på bygninger eller ødelægge underjordiske installationer. Disse forhold blev gennemgået i projekteringsfasen, og oprensningen blev tilrettelagt for at imødegå disse problemer. Der blev bl.a. under projekteringen udført edb-modellering af dampudbredelsen til støtte for dimensioneringen af injektionsmængder og -dybde. Den kritiske temperatur blev vurderet til at være 50°C i 1,5 m's dybde, og det blev ligeledes beregnet, at dampzonen ikke må udbredes højere end 3 m u.t.

Behandlingsanlæg

Pga. de vanskelige adgangsforhold er vakuumelekstraktionen gennemført med 2 stk. 40 m lange horisontale filtersatte borer, som er beliggende ca. 4 m u. t. Boringerne er udført som styrede underboringer og filtersat bagfra (blindhole teknik) med hver 4 stk. 50 mm stålfiltre for bedre at kunne fordele luftstrømmen over den lange filterstrækning. Herudover er der etableret 2 stk. vertikale ventilationsboringer i de mest forurenede områder. Da der sker en kraftig opvarmning af jorden, er de borer, som påvirkes af dampinjektionen, udført i varmeresistent materiale (stål eller polypropylen). Til afpropning af borerne er der anvendt cementstabiliseret bentonit (storebælsblanding). Materialevalget samt anvendelse af storebælsblandingen har fungeret meget tilfredsstillende. Ingen af borerne har taget skade som følge af opvarmningen, og forseglingen med storebælsblanding har været meget effektiv og sikret, at der ikke er sket nogen dampspredning opadtil gennem borerne.

Den opsugede luft blev rensat over kulfilter. Ventilationspumpe, kompressor, køleanlæg, vandudskillere, manifoldsystem, flowmålere, manometre, frekvensomformere og andet udstyr blev indbygget i en støjdamperet 20" container. Dampen blev genereret fra et mobilt dampanlæg med oliedrevet kedel. Hele anlægget blev styret og overvåget af et SRO-anlæg.

Monitering

Da dampinjektionen sker under et boligområde, er der etableret et omfattende overvågningsprogram med henblik på at overvåge temperaturudbredelsen i jorden og eventuelle geotekniske ændringer i jorden. Der er ligeledes gennemført en omfattende monitering af forureningen i den mættede og umættede zone for at undersøge, om der sker en u hensigtsmæssig spredning af forureningskomponenter som følge af dampinjektionen. Herudover er der sket en detaljeret monitering af massefjernelsen ved måling af forureningsindholdet i det ekstraherede poreluft og grundvand.

Drift

Drift af in-situ oprensningen startede den 4. januar 2001. Den første fase af in-situ oprensningen omfattede traditionel vakuumelekstraktion fra de 10

vakuumfiltre samt grundvandsoppumpning nedstrøms kildeområdet. Der blev ekstraheret ca. 500 m³ poreluft pr. time med kontinuerlig drift. Efter ca. 4½ måneders drift af vakuumentileringen blev injektionen af damp udført fra én boring i kildeområdet gennem et 1,0 m filter, som var placeret omkring grundvandsspejlet (6-7 m's dybde). Dampanlægget har i alt kørt ca. 3½ måneder, og der er i alt injiceret 231 tons damp. Injektionsraten har typisk været 150-200 kg/h. Den injicerede damp er iblandet trykluft for at reducere kondensation af PCE i dampfronten og for at minimere tabet af PCE til den mættede zone.

Temperaturmålingerne viser, at et område på ca. 400 m² er påvirket af dampinjektionen, heraf er temperaturen i et område på ca. 300 m² opvarmet til temperaturer over 90 grader (radius på ca. 10 m fra injektionsboring). Dampfronten har primært bredt sig horisontalt ud for dampboringen. Opvarmningen har været kraftigst fra grundvandsspejlet i ca. 6,5-7 m's dybde til 4 m u.t. I hotspotområdet har dampzonen bredt sig op til 3,5 m's dybde. Opvarmningen over 3,5 m's dybde er primært sket ved varmeledning. Målingerne over temperaturudbredelsen viser, at det er lykkedes at styre temperaturen af damp/luftblandingen således, at den vertikale kondensationsfront ikke er nået højere op end ca. 3,5-4 m u.t. Ifølge modelberegninger kan det generelt konkluderes, at dampzonens udbredelse i stor grad kan kontrolleres ved hjælp af den strømning, som vakuumeekstraktionen giver anledning til. Det skal dog bemærkes, at denne konklusion kun gælder i tilfælde, hvor vakuumeekstraktionen foretages umiddelbart over injektionen.

Driftsproblemer

Projektet har ikke forløbet uden vanskeligheder. De væsentligste driftsproblemer har været at opnå tilstrækkelig køling under dampinjektionen. Det har ligeledes været vanskeligt at overholde støjkravet på 40 db om natten grundet støj fra kølekompressoren. Andre problemer har været tilklokning af dampinjektionsboring, hyppige uforklarlige stop af dampgenerator samt lille ydelse i nogle af de horisontale vakuumeekstraktionsfiltre. Selv med disse problemer har det været muligt at overholde tidsplanen for oprensningen, og den intensive oprensning af kildeområdet blev færdig 3 måneder tidligere end forventet.

Effekt af oprensning

Der i alt ekstraheret ca. 3.580.000 m³ poreluft, svarende til en udskiftning af poreluften på ca. 2.400 gange. Der er sket et eksponentielt fald i PCE-koncentrationerne fra 5.500 mg/m³ til 4-5 mg/m³ i perioden før dampinjektionen. Under dampinjektionen steg PCE-indholdet op til 120 mg/m³ i den ekstraherede poreluft. Ved stop af dampinjektionen var PCE-indholdet faldet til et niveau på ca. 10 mg/m³. Efter 16 måneders samlet drift var PCE-indholdet under 1 mg/m³, og anlægget blev stoppet og efterfølgende nedtaget i juni 2002.

Før dampinjektionen var der fjernet ca. 250 kg PCE ved vakuumeekstraktionen, og 3½ måneder senere var der fjernet ca. 280 kg, altså en øgning på ca. 30 kg. Hvis ikke der var injiceret damp, ville der i den samme periode være fjernet skønsmæssigt 5 kg PCE, dvs. at massefjernelsesgevinsten har været ca. 25 kg, svarende til en reduktion i drifttiden på mindst 2 år. Den relative andel af PCE som er fjernet under selve dampinjektionen har været mindre end forventet, idet den kun udgør omkring 10 % af den samlede massefjernelse ved vakuumeekstraktionen. Der er selvfølgelig en vis usikkerhed ved beregning af massefjernelsen, idet der kun er udtaget stikprøver af

forureningsindholdet i den ekstraherede poreluft. Afkogning af fri fase kan være sket inden for korte tidsperioder og er ikke nødvendigvis blevet registreret ved COWI's målinger. Det kan derfor ikke afvises at massefjernelsen er underestimeret. Det vides heller ikke om der er sket en vådoxidation af PCE som følge af opvarmningen, hvor PCE omdannes til kuldioxid og vand. Selv om der kun er fjernet omkring 10 % af forureningen under dampinjektionen, er erfaringen fra andre in-situ projekter at det netop de resterende 10 % af forureningen der volder problemer med tilbageslag og medfører at mange in-situ projekter ikke kan afsluttes inden for en rimelig tidshorizont.

Resultaterne viser, at forureningsindholdet i poreluften inden for influensområdet er blevet reduceret meget effektivt. Fra et indhold på op til 66.000 mg/m³ i kildeområdet er indholdet efter 1 års drift under 5 mg/m³. Resultaterne viser således, at der ikke er sket nogen u hensigtsmæssig spredning af PCE i den umættede zone som følge af dampinjektionen. Uden for ventilerings teoretiske influensradius (dvs. områder med vakuum under 1 mbar) er der ligeledes sket en effektiv reduktion af forureningsindholdet, som følge af vakuumventileringen.

Resultaterne af tilbageslagsmålinger viser at forureningsniveauet i kildeområdet ligger i intervallet 1,3 til 5,7 mg/m³, hvilket er meget lavt i forhold til forureningsniveauet før oprensningen, hvor der blev målt indhold op til 66.000 mg/m³. Kildeområdet under væskespildtanken er nu oprenset, men der er stadig en mindre forurening i området af mere diffus karakter.

Forureningsbidraget af PCE fra jordforureningen til indeklimaet på Vesterbro 30 er nu langt under kvalitetskriteriet, som er på 6 µg/m³. Det vurderes, at indeklimaproblemerne i hele området på Vesterbro nu er løst.

Forureningsniveauet i det oppumpede grundvand viser et generelt fald i forureningsniveauet. Massefjernelsen gennem det oppumpede grundvand har været meget lille, i størrelsesordenen under 1 kg.

Under oprensningen er der sket et markant fald i forureningsindholdet i selve kildeområdet omkring væskespildtanken fra et niveau på 10-15.000 µg/l til under 100 µg/l. Resultaterne af monitoringen viser, at der ikke som frygtet er sket noget tab til grundvandet i kildeområdet som følge af dampinjektionen. Det vurderes, at tilsætning af luft til dampen har medført, at den frigivne PCE-forurening i den umættede zone er blevet tilført vakuumelekstraktionsanlægget og ikke kondenseret og tilgået grundvandet.

Radonmålinger

Undersøgelsen demonstrerer, at radon kan anvendes som sporgas for jordluftindtrængning til huse på forurenede rensningsgrunde, og til vurdering af influenszonen for vakuumanlæg. Anvendelse af kontinuerede radonmålinger forekommer at være særligt egnet til undersøgelser, hvor der allerede er installeret afværgetiltag (dvs. hvor der kan laves "tænd og sluk" målinger)

Geotekniske forhold

Præcisionsnivelemålinger viser, at der er sket en generel hævnings af fundamenterne på 1-3 mm under selve opvarmningen. Efter stop af dampinjektionen skete der en hurtig sætning af fundamenterne til udgangsniveauet fra før opvarmningen. Efterfølgende er der sket en yderligere sætning på typisk 1-5 mm. Det vurderes sammenfattende at opvarmningen har medført en sætning af fundamenterne på 1-5 mm.

Miljøvurderinger

Til opvarmningen er der forbrugt ca. 20.000 l fyringsolie til injektionen af 231 tons damp. Til drift af vakuumpumpe, køleanlæg og kompressor er der forbrugt ca. 123.000 kWh, hvoraf de ca. 50.000 kWh er en følge af dampopvarmningen..

Ud fra miljøvurderingen fremgår det, at de belastende miljøeffekter hovedsageligt udgøres af miljøeffekterne drivhuseffekt, volumenaffald og farligt affald. Miljøgevinsterne udgøres af persistent- og humantoksiske effekter. Generelt vurderes det, at miljøbelastninger og -gevinster forbundet med den valgte afværgestrategi nogenlunde stemmer overens. Der vurderes dog at være en lille overvægt på belastningssiden. Set ud fra de foretagne beregninger og vurderinger overskrides det miljømæssige budget og der er således ikke nogen væsentlig gevinst ved oprensningen med den valgte afværgestrategi. Det er især dampoprensningen som giver miljøbelastninger i form af stort energiforbrug. Metoden tager ikke højde for psykologiske aspekter i forhold til berørte grundejere eller økonomiske forhold. Set i forhold til at flere hundrede mennesker har været berørt af forureningen både økonomisk og psykologisk, vurderes oprensningen at have haft en stor samfundsmæssig gevinst

Økonomi

De samlede udgifter til oprensningen har udgjort ca. 5,8 mil. kr. excl. moms, heraf har udgifter betalt af Teknologipuljen udgjort 1,3 mill. kr. En tilsvarende kommerciel oprensning i dag vurderes at kunne udføres for ca. 4 mill. kr.

Perspektivering

Senere års afprøvning af de mange nye afværgemetoder, der konstant dukker op, viser, at der ikke findes én metode, som effektivt kan løse et forureningsproblem. Vesterbroprojektet er et eksempel på, hvordan en problematisk forurening under vanskelige adgangsforhold håndteres ved at kombinere flere forskellige afværgemetoder på en gunstig måde. Det vurderes, at det netop er den rigtige kombination af forskellige metoder, som er nøglen til at løse forureningsproblemerne i jord og grundvand.

Summary and Conclusions

This project was carried out within the Danish Environmental Protection Agency technology programme for soil and groundwater contamination in cooperation with the Funen County.

An investigation in 1999 revealed a serious tetrachloroethylene (PCE) contamination of soil and groundwater under a cleaning establishment at 28 Vesterbro in central Odense. In the soil vapour, contamination has spread over an area larger than 10,000 m² and has affected the indoor climate in hundreds of flats and houses. The contamination level was so high that the health inspector declared several flats and houses unfit for humans.

The soil contamination of the unsaturated zone was cleaned by vacuum extraction, supplemented by heating of the source area by means of steam injection. The groundwater contamination was subsequently cleaned by chemical oxidation by injection of potassium permanganate.

The purpose of the preventive measures was to secure the land uses allocated in the residents affected by contamination from the premises at 28 Vesterbro. The principal purpose of the technology project was to document whether the heating of the unsaturated zone furthered the remediation compared to ordinary "cold" vacuum ventilation, whether it was possible to control the heating, and whether the heating resulted in an inappropriate spreading of the contamination.

Geology and geohydrology

The strata of the location are 1-2 m filling, underneath approx. 8 m sand with some silt and deeper down moraine clay. The groundwater level is free and 6-7 m below surface.

Contamination

The investigations carried out show a serious contamination by chlorinated solvents in soil, soil vapour and groundwater. In the source area the soil contained free PCE phase with maximum contamination of soil up to 26,000 mg/kg TS. The highest concentrations are related to the silted strata from depth 1 to 5 m. Also in the pore vapour very high contents of PCE with concentrations up to 66,000 mg PCE/m³ were found. In the upper secondary reservoir (groundwater close to surface level) a contamination of PCE contents up to 13,000 µg/l was found. Contamination with PCE contents of up to 3-4,000 µg/m³ from the cleaning establishment affects the indoor climate in hundreds of flats in the central part of Odense. For comparison the quality criterion is 6 µg/m³.

Preventive strategy

Contamination in the unsaturated zone was cleaned by means of vacuum ventilation. In order to achieve a rapid release of PCE from the small-grained strata, cleanup of the unsaturated zone was supplemented by heating of the soil by steam injection. As the contamination was only 1-2 m below the existing houses, it would be expensive - perhaps impossible - to carry out the heating by injection of the steam from the outside and towards the source area without an unacceptable impact on the installations in the soil and the floors

in the houses. Consequently the strategy was to heat the most polluted part of the soil from below, mainly by heat conduction.

Air was added to the injected steam in order to minimise possible condensation of PCE.

In the saturated zone polluted groundwater was pumped up for plume check during the steam cleanup operation. Potassium permanganate was injected subsequently for cleanup of the groundwater contamination in the source area and immediately downstream.

The cleanup strategy applied, involving steam injection, has caused some concern, as there was a risk of uncontrolled spreading of contamination both vertically and horizontally and spreading of steam to the above buildings. Another concern was whether the heating would result in subsidence of the buildings or damage to the underground installations. These conditions were studied in the design phase, and the cleanup was planned to meet these problems. During the design, modelling of the steam spreading was made to support the dimensioning of injection quantities and depths. The critical temperature was estimated to be 50°C in a 1.5 m depth. Further, it was calculated that the maximum extent of the steam zone must not exceed 3 m below surface level.

Treatment facility

Because of difficult access conditions the vacuum extraction was carried out by means of two 40 m long horizontal borings, positioned approx. 4 m below surface level. The borings were carried out as horizontal borings and from behind - the so-called blind-hole technique - each with four 50 mm steel filters to improve the distribution of the airflow over the long filter stretch. Furthermore, two vertical ventilation borings were established in the most polluted areas. As the heating of the soil is considerable, the borings affected by the steam injection were carried out in heat-resistant material (steel or polypropylene). For tightening of the borings cement-stabilised bentonite was used. The choice of material and the application of cement-stabilised bentonite functioned satisfactorily. None of the borings were damaged by the heat, and sealing by means of the Great-Belt-mixture was highly efficient, preventing spreading of steam upwards through the borings.

The extracted air was cleaned through charcoal filters. Ventilation pump, compressor, cooling plant, water separator, manifold system, flow meters, manometers, frequency converters and other equipment were built into a silenced 20" container. The steam was generated from a mobile steam plant with oil-fuelled boiler. The entire plant was equipped with a control and monitoring system.

Monitoring

As the steam injection took place under a residential area, a comprehensive monitoring programme was established in order to monitor the extension of the temperature increase and possible geotechnical changes of the soil. Furthermore, comprehensive monitoring of contamination in the saturated and the unsaturated zones was made to ascertain possible inappropriate spreading of contamination components as a consequence of the steam injections. Additionally detailed monitoring of the substance removal was made by measuring the contamination contents in the extracted soil vapour and groundwater.

Operation

The operation of the in-situ cleanup operation was initiated on 4 January 2001. The first phase of the in-situ cleanup included traditional vacuum extraction from the 10 vacuum filters and pumping up of groundwater downstream the source area. Approx. 500 m³ soil vapour was extracted per hour at continuous operation. After approx. 4½ months' operation of the vacuum ventilation the injection of steam was made from one boring in the source area through a 1.0 m filter, which was placed around the groundwater level (6-7 m depth). In total the steam plant was operating during 3½ months, and in total 231 t steam was injected. The injection rate was typically 150-200 kg/h. Compressed air was added to the injected steam in order to reduce condensation of PCE in the steam front and to minimise the loss of PCE to the saturated zone.

The temperature measurements show that an area of approx. 400 m² was affected by the steam injection; the temperature in an area of approx. 300 m² was heated to temperatures exceeding 90°C (radius of approx. 10 m from injection boring). The steam front was spread mainly horizontally off the steam boring. Heating was heaviest from the groundwater level at 6.5-7 m depth to 4 m below surface level. In the hotspot area the steam zone had spread to a depth of 3.5 m. Heating above 3.5 m depth took place primarily by heat conduction. The measurements of the extension of the temperature increase show that the temperature of the steam/air mixture was controlled in such a way that the vertical condensation front did not exceed 3.5-4 m below surface level. According to model predictions it can be generally concluded that the extension of the steam zone can be widely controlled by means of the flow caused by the vacuum extraction. It should, however, be noted that this conclusion is only valid in cases where the vacuum extraction is carried out immediately above the injection.

Operational problems

The project was not carried out without difficulties. The most significant operational problems were to achieve sufficient cooling during the steam injection. Further, noise from the cooling compressor made it difficult to prevent noise levels above 40 dB in the night. Other problems were clogging of the steam injection boring, frequent inexplicable stops of the steam generator and poor capacity of some of the horizontal vacuum extraction filters. In spite of the above problems it was possible to keep the time schedule for the cleanup, and the intensive cleanup of the source areas was completed 3 months ahead of schedule.

Effect of the cleanup

A total of approx. 3,580,000 m³ soil vapour was extracted, corresponding to an exchange of the soil vapour of approx. 2,400 times. There was an exponential decrease of the PCE concentrations from 5,500 mg/m³ to 4-5 mg/m³ during the period before the steam injection. During the steam injection the PCE contents increased to 120 mg/m³. When the steam injection ceased, the PCE contents were approx. 10 mg/m³. After 16 months' operation period, the PCE contents were below 1 mg/m³. The process was stopped, and the equipment disassembled in June 2002.

Before the steam injection approx. 250 kg PCE was removed by vacuum extraction, and 3½ months later approx. 280 kg had been removed, i.e. an increase of 30 kg. If no steam had been injected, 5 kg PCE would have been removed during the same period, i.e. the substance removal gain has been approx. 25 kg, corresponding to a reduction of the working time of at least

two years. The relative part of PCE removed during the steam injection was smaller than expected, representing only approx. 10% of the total substance removal at the vacuum extraction. The calculation of the substance removal is of course somewhat uncertain, as only random sampling has been made of the contamination in the extracted soil vapour. Boiling of free phase PCE might have taken place within short periods of time and has not necessarily been registered in connection with COWI's measurements. Consequently, it cannot be ruled out that the substance removal is underestimated. Further, it is not known whether wet oxidation of PCE has taken place as a result of the heating, during which PCE is transformed to carbon dioxide and water. Although only about 10% of the contamination was removed during the steam injection, experience from other in-situ projects shows that it is in fact the remaining 10% of the contamination that causes problems with repercussion and prevents many in-situ projects from being completed within a reasonable time frame.

The results show that the contamination contents in the soil vapour within the influence area were reduced very efficiently. After 1 year's operation the contents had been reduced from up to 66,000 mg/m³ in the source area to below 5 mg/m³. Thus, the results show that no inappropriate spreading of PCE in the unsaturated zone had taken place as a result of the steam injection. Outside the theoretical influence radius of the ventilation (i.e. areas with vacuum below 1 mbar) a significant reduction of up to factor 100 had also taken place as a consequence of the vacuum ventilation.

The results of the repercussion measurements show that the contamination levels in the source area are within the interval of 1.3 to 5.7 mg/m³, which is very low compared to the contamination level before the cleanup, when contents up to 66,000 mg/m³ were registered. The source area below the spillage container has been cleaned up, but minor contamination in the area of a more diffuse character remains.

The contamination contributed by PCE from the soil contamination to the indoor climate in 30 Vesterbro is now far below the quality criterion, which is 6 µg/m³. It is assessed that the indoor climate problems in the entire area of Vesterbro have been solved.

The contamination level in the pumped-up groundwater shows a general reduction of the contamination level. The substance removal through the pumped-up groundwater was very small, less than 1 kg.

During the cleanup operation the contamination contents in the very source area around the spillage container was reduced significantly, from a level of 10-15,000 µg/l to less than 100 µg/l. The results of the steam injection show that – contrary to expectations - there was no loss to the groundwater in the source area as a result of the steam injection. It is assessed that owing to the addition of air to the steam, the released PCE contamination in the unsaturated zone was led to the vacuum extraction plant and not condensed and led to the ground water.

Radon measurements

The investigation demonstrates that radon can be used as trace gas for soil vapour penetration into houses situated on sites polluted by cleaning establishments and for assessment of the influence zone of vacuum plants. Application of continuous radon measurements seems especially suitable for

investigations of areas, where preventive measures have already been installed (i.e. where "on and off" measurements are possible).

Geotechnical conditions

Precision levelling shows that there was a general elevation of the foundations closest to the steam injection of 1-3 mm during heating. During cooling the level was rapidly reduced to the initial level. Subsequently a subsidence of typically 1-5 mm compared to the initial level before heating has taken place.

Environmental assessments

For heating, approx. 20,000 l fuel oil was used for the injection of 230 t steam. For the operation of vacuum pump, cooling plant and compressor approx. 123,000 kWh was used, of which approx. 50,000 kWh results from steam heating.

It appears from the environmental assessment that the most serious environmental effects are the greenhouse effect, bulk waste and hazardous waste. The environmental gains are persistent and human-toxic effects. In general, it is assessed that the environmental impacts in connection with the remediation strategy correspond fairly to the benefits gained. It is, however, assessed that impacts exceed the gains slightly. On the basis of the calculations and assessments made, the environmental budget is exceeded, and, thus, there is no significant gain to be achieved by cleanup by the remediation strategy. Environmental impacts result primarily from the large energy consumption. The method does not allow for psychological aspects related to affected homeowners or financial conditions. Taking into consideration that hundreds of persons have been affected by the contamination both financially and psychologically, the cleanup is considered to present a considerable social gain.

Economy

The total expenses for the cleanup operation was approx. 5.8 million DKK excluding VAT. This amount includes expenses paid for by the Technology Fund, amounting to 1.3 million DKK. A corresponding commercial cleanup is assessed to amount to 4 million DKK today.

Putting into perspective

Recent years' testing of many new preventive measures that turn up constantly shows that there are more than one efficient method to solve a contamination problem. The Vesterbro project is one example of how a problematic contamination under difficult access conditions is handled by combining several different preventive measures in a favourable way. It is assessed that the proper combination of different methods is the key to solving the contamination problems in soil and groundwater.

1 Indledning

1.1 Baggrund for afværgeprojektet

En undersøgelse i 1999 påviste en kraftig forurening af jord og grundvand under et renseri på Vesterbro 28 i centrum af Odense. Fra renseriet er der lækket en større mængde PCE til jord og grundvand ved spild og utætte installationer. I poreluften har forureningen bredt sig over et område på mere end 10.000 m² og har påvirket indeklimaet i flere hundrede boliger. Forureningsniveauet har været så højt, at embedslægen har erklæret flere boliger for uegnede til mennesker.

Jordforureningen i den umættede zone er oprenset med vakuumeekstraktion, suppleret med en opvarmning af kildeområdet ved hjælp af dampinjektion. Grundvandsforureningen er efterfølgende oprenset ved kemisk oxidation med injektion af kaliumpermanganat. Oprensningen er gennemført af Fyns Amt med støtte fra Miljøstyrelsens Teknologipulje. COWI har forestået undersøgelser, projektering og den miljømæssige drift af in-situ oprensningen. NCC Danmark A/S har forestået entreprenørarbejdet og den mekaniske drift af in-situ oprensningen. Placering af oprensningsområdet fremgår af figur 1.1.



Grundmateriale © copyright Kort & Matrikelstyrelsen. Reproduceret i henhold til tilladelse G11-98.

Figur 1.1 Oversigtskort. Målestok ca. 1:12.000

1.2 Formål

Formålet med afværgeforanstaltningerne er at sikre arealanvendelsen i de boliger, der er påvirket af forureningen fra Vesterbro 28.

Formålet med Teknologiprojektet er at dokumentere, om opvarmningen af den umættede zone med damp fremmer massefjernelsen i forhold til normal "kold" vakuumentilation. Herudover er formålet at:

- Undersøge forureningsspredningen i mættet og umættet zone. Med det gennemførte afværgekoncept, er der en risiko for spredning af kraftigt forurenede kondensat af damp samt eventuel fri fase forurening. Til belysning af om der er sket en sådan spredning er der udført en omfattende monitorering af forureningsudbredelsen i poreluften og i den øverste del af grundvandet.
- Undersøge temperaturudbredelsen horisontalt og vertikalt som følge af dampinjektionen. Teknologipuljen har givet støtte til en edb modellering af dampudbredelse samt til en detaljeret temperaturmonitorering. Dette har givet en sikker drift af anlægget og muliggjort sammenligninger af temperaturudbredelsen med på forhånd beregnede temperaturudviklinger.
- Dokumentere oprensningseffekten, herunder detaljeret monitorering af forureningsniveauet i ekstraheret poreluft før, under og efter damp-/luftinjektionen.
- Undersøge geotekniske forhold. Opvarmningen kan medføre ændringer af jordlagenes geotekniske egenskaber med betydning for bygningernes stabilitet. En detaljeret dokumentation af de geotekniske forhold foretages under teknologiprojektet ved en grundig fotoregistrering og præcisionsnivelementer i udvalgte punkter.
- Tilvejebringe et skøn over omkostningerne ved metoden.
- Tilvejebringe et skøn over miljøbelastningen ved metoden.

2 Beskrivelse af lokaliteten

2.1 Historisk beskrivelse af lokaliteten

Vesterbro 28 er beliggende på matr. nr. 785 g og 787, Odense Bygrunde. Vesterbro 28 har fungeret som vaskeri fra 1929-1944, som vaskeri og renseri fra 1944 til 1950 og som renseri fra 1950 til i dag. Vesterbro 28 er registreret som forurennet lokalitet nr. 461-129 som følge af forurening fra renseridriften.



Foto af Vesterbro med Rekord rens

Vesterbro 30 er et byhus, som anvendes til beboelse. Som følge af jordforureningen fra Vesterbro 28 er ejendommen registreret som forurennet lokalitet. Indretning af renseriet og Vesterbro 30 fremgår af figur 2.1.

2.2 Geologiske og hydrogeologiske forhold

Terrænkoten på Vesterbro 28 er ca. +12 m. Uden for grunden falder terrænet let mod syd. Jordlagene på lokaliteten består øverst af 1-2 m fyld, herunder ca. 8 m sand med siltindslag, der underlejres af moræneler. Sandlaget udgør et udbredt sekundært magasin i den centrale del af Odense. Grundvandsspejlet ved Vesterbro 28 står 6-7 m u.t. (frit grundvandsspejl). Strømningsretningen er syd-sydøstlig, og afvanding sker til Odense Å. Den hydrauliske ledningsevne for sandmagasinet er i størrelsesordenen $1-5 \times 10^{-5}$ m/s, og gradienten på grundvandsspejlet er ca. 1,5%. Geologisk tværsnit gennem kildeområdet fremgår af figur 2.2. Udvalgte boreprofiler fremgår af bilag 6.



Figur 2.1 Situationsplan

2.3 Vandindvinding og recipienter

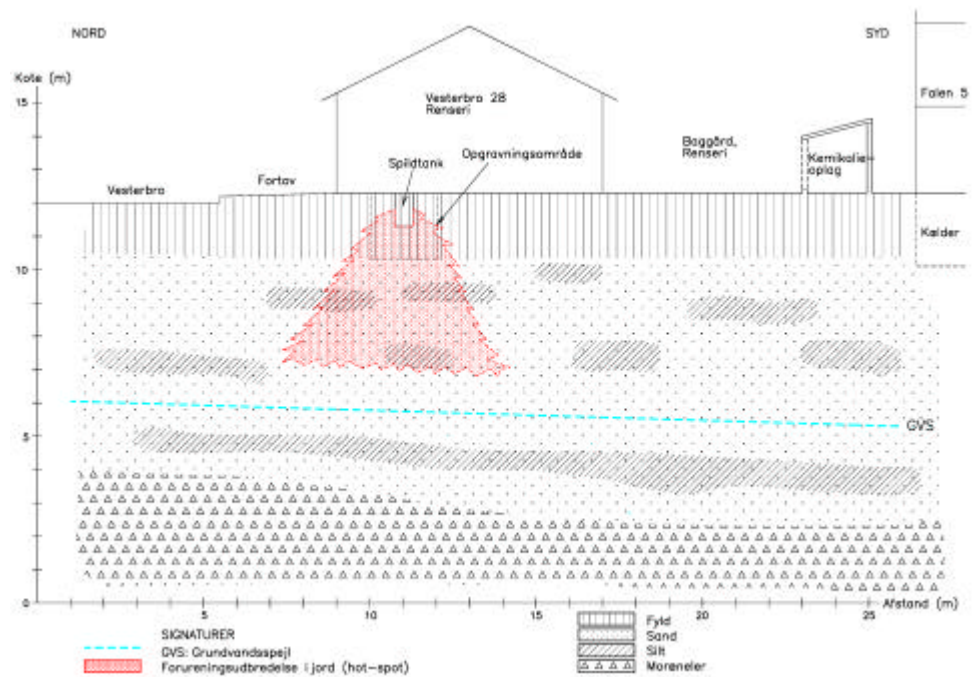
Området ved Vesterbro er i Fyns Amts regionplan udpeget som et område med almindelige drikkevandsinteresser. Nærmeste kildeplads er Eksercermarken, som ligger ca. 1100 m sydvest for Vesterbro. Hovedværket, der ligger ca. 100 m sydvest for lokaliteten, foretager p.t. ikke indvinding til drikkevandsformål pga. forurening med chlorerede opløsningsmidler. Vesterbro 28 ligger inden for indvindingsoplandet til Hovedværket, men uden for indvindingsoplandet til Eksercermarken.

Den nærmeste recipient er Odense Å, som løber ca. 250 m sydøst for det undersøgte område.

2.4 Forureningsbeskrivelse før oprensning

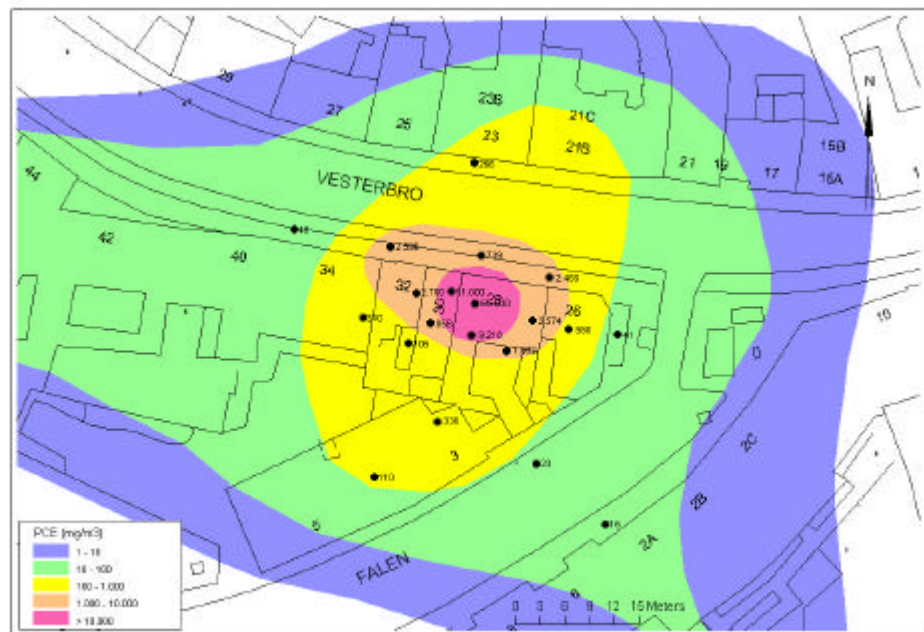
De gennemførte undersøgelser viser en kraftig forurening med chlorerede opløsningsmidler i jord, poreluft og grundvand /1, 2, 3/. Hovedkilden til den konstaterede forurening er udsivning af rensevæske på Vesterbro 28 fra en opsamlingskammer for spildte rensevæsker (væskespildtank). Tanken er placeret i selve renseriet. Herudover er der i baggården sket udsivning fra kloakker og overfladiske spild af rensevæsker.

I kildeområdet, under væskespildtanken, er der i jorden fundet PCE-indhold op til 26.000 mg/kg TS. De højeste koncentrationer knytter sig til de mere siltede lag fra 1-5 m's dybde, i et område på 25-50 m² omkring væskespildtanken. Der er fundet fri fase ned til 4-5 m's dybde.



Figur 2.2 Geologisk tværsnit med angivelse af hotspotområde.

I poreluften er der ligeledes fundet meget høje indhold af PCE. Højeste indhold er fundet ved væskespildtanken med koncentrationer op til 66.000 mg PCE/m³. Udbredelse af poreluftforureningen fremgår af figur 2.3.



Figur 2.3 Forureningsudbredelse med PCE i poreluft

I det sekundære magasin fra 6-10 m's dybde er der fundet PCE-indhold op til 13.000 µg/l. Det højeste forureningsindhold er fundet i toppen af magasinet. Et forureningsindhold på 13.000 µg PCE/l svarer til ca. 10 % af opløseligheden for PCE, hvilket indikerer at der kan være fri fase i den mættede zone. Der er dog ikke ved undersøgelserne fundet fri fase i de

udtagne jord- og grundvandsprøver. Forureningen i grundvandet er ikke afgrænset, men udbredt i et større område syd for Vesterbro 28.

Grundvandsmagasinet er iltet med højt indhold af nitrat og ilt. Der sker derfor ingen betydende nedbrydning af PCE i grundvandet. Der er således hverken i jord, poreluft eller grundvand fundet nævneværdigt indhold af nedbrydningsprodukter. PCE-indholdet udgør således typisk over 99 % af forureningskomponenterne.



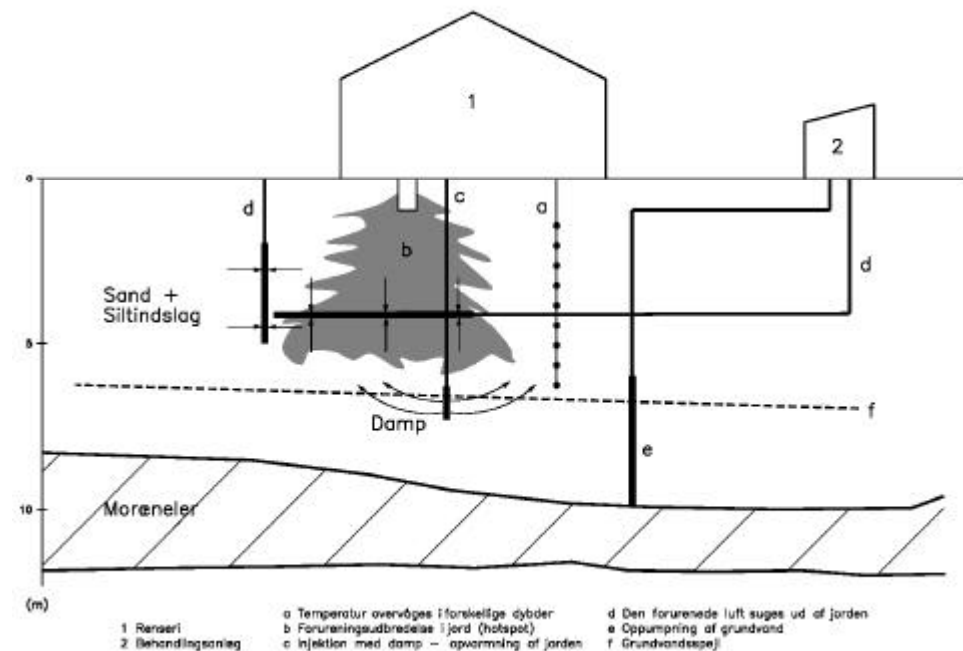
Figur 2.4 PCE-indhold i indeklima

Forureningen fra rensriet påvirker indeklimaet i flere hundrede lejligheder i den centrale del af Odense med PCE-indhold i boliger på op til 3-4.000 µg/m³. Til sammenligning er kvalitetskriteriet på 6 µg/m³. Forklaringen på den store udbredelse af poreluftforureningen er en kombination af en udbredt sammenhængende umættet zone med relativt stor permeabilitet (fint-groft sand) og at hele området er befæstet. De ejendomme, hvor indeklimaet er påvirket af forureningen, er vist på figur 2.4.

3 Afværgeforanstaltninger og oprensingsstrategi

3.1 Strategi for afværgeforanstaltninger

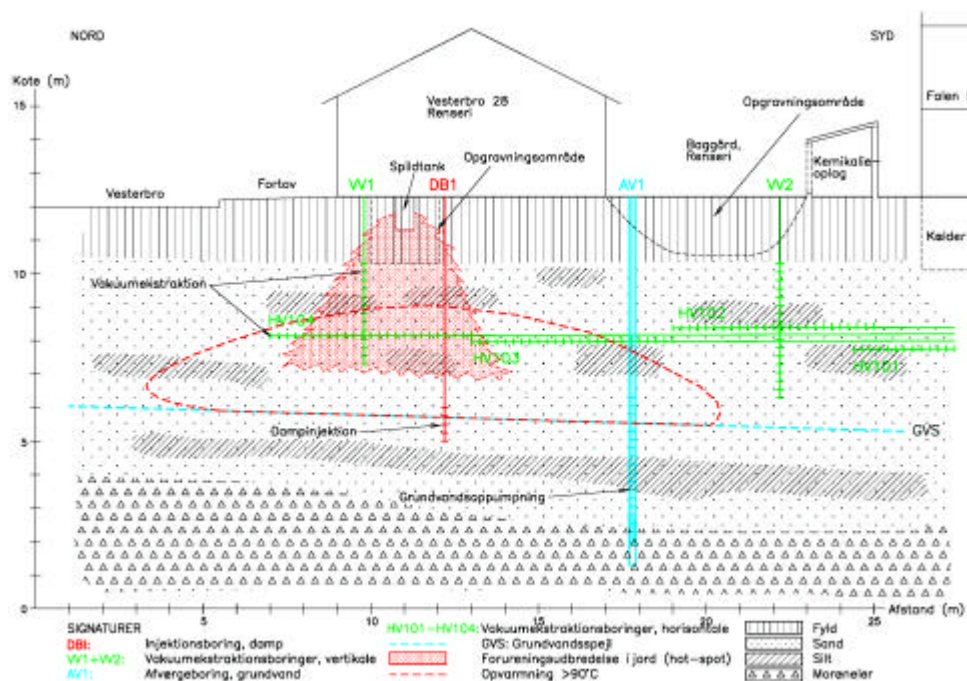
Forureningen i den umættede zone oprenses ved vakuumventilering. En af svaghederne ved den "kolde ventilation" er, at frigivelsen af PCE fra de finkornede lag er begrænset ved diffusion, hvilket forlænger oprensningstiden og ofte giver kraftige tilbageslag i poreluften. En opvarmning af jorden øger damptrykket af PCE og effektiviserer vakuumelekstraktionen væsentligt. På baggrund heraf er den kolde ventilation suppleret med en opvarmning af jorden ved dampinjektion. Da den væsentligste forurening kun ligger 1-5 m under eksisterende boliger, ville det være dyrt og sandsynligvis ikke muligt at udføre opvarmningen, hvor dampen eksempelvis injiceres udefra og ind mod kildeområdet, uden at dette ville medføre en uacceptabel påvirkning af installationerne i jorden og gulvene i husene. Strategien har derfor været at opvarme den mest forurenede del af jorden nedefra ved hovedsagelig varmeledning. Derved mobiliseres forureningen hurtigere på dampform og kan opsamles i ventilationsanlægget. For at mindske risiko for kondensation af PCE (og dermed tab til grundvandet) er der tilsat luft til den injicerede damp i forholdet ca. 50 % w/w (luft/damp). Figur 3.1 viser et tværsnit af den overordnede afværgestrategi. Figur 3.2 viser et mere detaljeret tværsnit af afværgestrategien på Vesterbro 28. Placering af in-situ anlæg og monitoringsboringer fremgår af figur 4.1.



Figur 3.1 Overordnet princip af afværgestrategi

I den mættede zone er der gennemført oppumpning af forurenede grundvand til fanekontrol under dampoprensningen. Bl.a. grundet en lav permeabilitet

har afværgepumpningen haft en begrænset oprensningseffekt. Til oprensning af grundvandsforureningen i kildeområdet og umiddelbart nedstrøms herfor, er der efterfølgende injiceret kaliumpermanganat. Formålet hermed har været at sikre, at der ikke sker nogen væsentlig afdampning fra grundvandet til indeklimaet.



Figur 3.2 Detaljeret placering af in-situ borer på Vesterbro 28

Ud over ovennævnte er der sket en begrænset opgravning af kildeområdet omkring væskespildtanken samt i baggården til rensriet, hvor der er sket spild ved håndtering af rensesvæske samt udsivning fra kloaker. Formålet har været at fjerne terrænnære kildeområder i fyldlaget, da det er usikkert og vanskeligt at fjerne disse ved vakuumentilering.

Sammenfattende er der etableret følgende afværgeforanstaltninger:

Umættet zone

- Bortgravning af væskespildtank på Vesterbro 28, herunder forurenede jord omkring tanken (ned til 2 m's dybde). Yderligere afgravning var ikke mulig grundet geotekniske forhold.
- Bortgravning af forurenede fyldjord i baggård til Vesterbro 28 til 1-1,5 m's dybde.
- Etablering af vakuumentileringens anlæg med 2 horisontale borer (HV1 og HV2, hver med 4 filtre) og 2 vertikale borer (VV1, VV2) således, at der kan suges luft fra den umættede zone.
- Etablering af anlæg til dampinjektion med etablering af 1 dampboring (DB1) ved væskespildtank.
- Etablering af ventilationsdræn under gulv i Vesterbro 30, således at der kan sikres et tilstrækkeligt luftskifte lige under gulvene.

Mættet zone

- Til fanekontrol er der etableret anlæg til afværgepumpning med oppumpning af grundvand fra 3 borer (AV1, AV2, AV3). Boringerne er placeret i baggården til Vesterbro 28, nedstrøms hotspot ved den tidligere væskespildtank.
- Oprensning af PCE-forureningen ved kemisk oxidation med kaliumpermanganat.

Resultaterne for oprensningen med kaliumpermanganat i grundvandszonen er ikke omfattet af nærværende rapport, men afrapporteres særskilt.

3.2 Afklaring af risici ved dampinjektionen

Den anvendte oprensningsstrategi har givet anledning til en vis bekymring. Den største bekymring var risikoen for en ukontrolleret spredning af forureningen, både vertikalt og horisontalt. Der er således risiko for, at forureningen vil blive skubbet udad i den umættede zone, og at den vil kondensere i kondensationsfronten. Herfra kunne forureningen i høj koncentration sive ned til grundvandet. Der er også en vis risiko for, at fri fase forurening spredes opad mod vakuumventileringen, hvor den udgør et større problem i forhold til indeklimaet.

Andre forhold, som gav anledning til bekymring var:

- Om der kunne trænge damp op i overliggende bygninger
- Risikoen for at ødelægge underjordiske installationer
- Risiko for sætninger.

Disse problemområder blev gennemgået forud for oprensningen, og oprensningen blev tilrettelagt for at imødegå disse problemer. Der blev bl.a. under projekteringen udført edb-modellering af dampudbredelsen til støtte for dimensioneringen af injektionsmængder og -dybde samt til at vurdere ventilationsbehovet og tilsætning af trykluft.

3.3 Dimensioneringsgrundlag

Til dimensionering af afværgeanlæg blev der udført en række test, som beskrives i det følgende.

3.3.1 In-situ test for vakuumventilering og airsparging

I 1999 blev der udført in-situ test for vakuumventilering og airsparging /4/.

Ventilationstesten i den umættede zone viste, at forholdene var gunstige for vakuumelekstraktion med en influensradius på ca. 15 m ved et vakuum i pumpeboringen på ca. 50 mbar. Testen blev udført i gården ved Vesterbro nr. 28, mindre end 10 m fra væskespildtanken, og i den ekstraherede luft blev der målt 7500 mg/m³ af PCE.

Den udførte spargetest viste også gunstige forhold med en virkningsradius på ca. 3 m og et nødvendigt tryk på minimum 1 bar.

3.3.2 Hydrauliske vurderinger

Grundvandsmagasinet hydrauliske ledningsevne er beregnet ud fra tilbagepejlinger, som blev udført i forbindelse med forureningsundersøgelsen i 1999 /2/. Herudover blev der i 2001 udført en egentlig prøvepumpning i baggården til Vesterbro 28 og i Falen ved boring F7.

Tilbagepejlingerne i området omkring renseriet viste T-værdier i størrelsesorden $1-6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ med en hydraulisk ledningsevne i intervallet $2-16 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Prøvepumpninger i maj/juni 2001 i baggården til Vesterbro 28 viste en transmissivitet i størrelsesorden $5-10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ med en hydraulisk ledningsevne på $2-3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Det fremgår af pumpeforsøgene, at transmissiviteten var noget større i 1999 end under afværgepumpningen i 2001. Det skyldes at der er sket et fald i grundvandsspejlet i denne periode, hvor et velydende sandlag på ca. $\frac{1}{2} \text{ m}$ er overgået fra mættet til umættet zone. Prøvepumpningerne viser således, at det sekundære magasin er lagdelt. I den umættede zone er den horisontale permeabilitet ca. en faktor 10 gange større end den vertikale permeabilitet og denne forskel i permeabilitet vurderes også at være dækkende for den mættede zone.

3.3.3 Edb-model af dampudbredelse

I detailprojekteringsfasen blev der udført en række T2VOC-modelleringer til vurdering af strategi for dampinjektionen. Modelberegninger blev udført af Jacob Gudbjerg fra Danmarks Tekniske Universitet og er nærmere beskrevet i bilag 18. Modellen blev primært anvendt til at belyse følgende forhold:

- Placering af injektionsfilter
- Vurdering af dampinjektionsmængder
- Vurdering af dampudbredelse, både horisontalt og vertikalt
- Vurdering af lavpermeable lags betydning for den vertikale dampudbredelse
- Effekt af tilsætning af trykluft sammen med damp
- Effekt af vakuumventilation på dampzonens udbredelse.

Beregningerne viste, at varmetabet gennem vakuumelekstraktionen var lille, så ventilationsboringerne kunne placeres tæt på dampboringen. Beregningerne viste ligeledes, at den planlagte injektionsmængde på 200 kg/h ikke ville give problemer med hensyn til jordens bæreevne.

Ud fra modelberegningerne blev det anbefalet, at injektionsfilteret placeres under grundvandsspejlet og så dybt som muligt. Det blev ligeledes anbefalet at tilføre så meget luft som muligt sammen med dampen for at minimere uønsket tab/spredning af forurening.

Følgende dimensioneringsgrundlag blev fastsat på baggrund af edb-beregningerne:

- Dampen injiceres lige under grundvandsspejlet gennem et 1 m filter, dvs. fra ca. 6,5 - 7,5 m's dybde. Det var ikke hensigtsmæssigt at placere filteret dybere pga. et underliggende siltlag.
- Injektion af op til 200 kg damp/h
- Injektion af damp ca. 12 timer i døgnet
- Tilførsel af op til 50 % luft i forhold til damp (w/w) for at minimere tab af PCE til grundvandet.

3.3.4 Vurdering af kritisk temperatur i jorden

Den kritiske temperatur i jorden er bestemt ud fra tålegrænsen af de underjordiske installationer og overliggende bygninger/kældre i det opvarmede område.

Ud fra jordbundsforholdene (sand, silt og moræneler) vurderede COWIs geoteknikere, at dampinjektionen ikke ville medføre betydelige sætninger. Det overliggende fyldlag ned til ca. 1,5 m's dybde måtte dog ikke påvirkes med damp, idet der her var risiko for omdannelse af organisk stof.

Den nærmeste kælder lå mindst 10 m fra injektionsområdet. Med en forventet dampudbredelse på 7-8 m var der derfor kun lille risiko for, at der skulle ske dampspredning hertil.

Det blev sammenfattende vurderet, at det var de underjordiske installationer, som var mest kritisk over for dampinjektionen. Der blev derfor i detailprojekteringsfasen /7/ indhentet oplysninger om alle relevante ledninger i det varmepåvirkede område. De indhentede ledningsoplysninger blev indtegnet på kort (se bilag 1.2), og dybde og afstand til injektionsboring blev registreret. Ud fra drøftelse med ledningsejerne, blev der opstillet tålegrænser for de enkelte ledningstyper. De kritiske installationer var her vandforsyning og fjernvarme, jf. tabel 3.1. Den kritiske temperatur blev herudfra vurderet til at være 50 °C i 1,5 m's dybde.

Tabel 3.1 Vurdering af kritisk temperatur for underjordiske installationer.

Ledningstype	Dybde (m u.t)	Afstand til injektionsboring (m)	Ledningsmateriale	Kritisk temperatur (°C)
El	0,8	3	Lavspændingsinstallation: PVC	70
Lysleder	2	5	Ren plast	100
Telefon	0,5	3	Plastic + vaseline/papir	100
Fjernvarme	1,15	4	Præisolerede fjernvarmerør	50
Hovedkloak	3,5	9	Glaserede rør samt betonrør	100
Kloak, Vesterbro 30	ca. 1	4	PVC	ca. 60
Vandforsyning	1	4	Gråt støbejern + polyethylen	45

3.4 Monitoringsprogram

3.4.1 Monitering af oprensningseffekt

Da dampinjektionen skete under et boligområde, blev der etableret et omfattende overvågningsprogram for vakuum, temperatur, geotekniske ændringer i jorden samt forureningsudbredelse i både den mættede zone og umættede zone.

Hovedformålet med Fyns Amts monitoringsprogram var at få et løbende kendskab til oprensningseffekten, således, at den ønskede afskærmning af indeklimapåvirkningen kunne opnås. For teknologiprogrammet har hovedformålet været at undersøge, om der skete en u hensigtsmæssig spredning af forureningskomponenter som følge af dampinjektionen.

Temperaturudbredelsen blev overvåget i 15 boringer med i alt 140 temperatursonder fra 1,5 til 6.5 m's dybde. Forureningsniveauet og vakuumudbredelse i den umættede zone blev målt fra 20 poreluftboringer, med filter fra 2,5-3,0 m u.t. Til overvågning af forureningsniveauet i grundvandet, pejling samt måling af temperaturudbredelse i grundvandet blev der etableret 9 boringer. Herudover blev der etableret 20 målepunkter til vurdering af eventuelle sætninger som følge af opvarmning af jorden.

Monitoringsparametre og målesteder fremgår af tabel 3.2. For en mere detaljeret beskrivelse af monitoringsprogrammet henvises til /9/. Monitoringshyppigheden varierer fra flere gange ugentligt til 1 gang pr. kvartal, og fremgår oversigtsmæssigt af bilag 5.3.

Tabel 3.2 Monitoringsprogram for oprensningseffekt

Målepunkt	Boringsnr.	Antal	Monitering	Analyse
Temperaturboringer	TB1-TB15	15 (140 målepunkter)	Temperatur	
Poreluftprøver	TB1-TB15 og PB1-PB5	20	Forureningsindhold i poreluft og vakuumudbredelse	Chlorerede opløsningsmidler
Grundvandsanalyser	F1, F101, F102, F103, F4, B1, OBS1, F7, F8	9	Forureningsindhold i grundvand, pejling, temperatur i grundvand	Chlorerede opløsningsmidler
Indeklima-målinger	Vesterbro 28, Vesterbro 30, udendørs reference	8	Forureningsindhold i inde- og udeluft	PCE
Præcisions-nivellement	Bolt 1-Bolt 20	20	Eventuelle sætninger pga. dampinjektion	

På Vesterbro 30 er der udført en mere detaljeret monitering af oprensningseffekten end på de øvrige ejendomme. Udover monitering af temperaturudbredelse og forureningsindhold i den umættede zone, er der også målt forureningsindhold lige under gulv samt i indeklima. Herudover er der udført kontinuerte radonmålinger mm. med henblik på at skelne om påvirkning af indeklimaet med PCE skyldes jordforureningen, eller påvirkning fra driften af rensriet /12/.

Til vurdering af oprensningseffekten i den umættede zone er der udført tilbageslagsmålinger i 2 omgange. Ved de seneste tilbageslagsmålinger i august 2002 var ventilationsanlægget slukket i 3 måneder.

3.4.2 Driftsmonitoring

Registrering af data fra in-situ anlægget blev foretaget dels on-line via SRO-anlæg, dels ved manuelle aflæsninger i forbindelse med COWIs tilsynsbesøg. COWI har typisk udført 1 ugentligt tilsyn under den kolde ventilation og 2 ugentlige tilsyn under dampinjektionen. Ved COWIs tilsynsbesøg er der registreret flow, temperatur, energiforbrug og vakuum. Herudover er der løbende udtaget prøver af ekstraheret poreluft før/efter kulfilter til PID-målinger og analyse for PCE samt udført manuelle temperaturmålinger i de 15 temperaturboringer. Data registreret ved COWIs tilsyn/monitoring fremgår af bilag 5. Alle laboratorieanalyser er udført som akkrediterede analyser hos Miljø Kemi (nu Eurofins Danmark A/S). Monitoringsprogrammet fremgår oversigtsmæssigt af bilag 5.3. For en mere detaljeret beskrivelse af monitoringsprogrammet henvises til /9/.

4 Etablering af afværgeforanstaltninger

Etableringen af afværgeforanstaltningerne er gennemført i perioden fra august til december 2000.

4.1 Jordopgravning

Ved væskespildtanken er der gravet i et område på 2x2 m² ned til 2 m's dybde, og i baggården er der i et område på ca. 35 m² afgravet forurenede jord i dybder fra 0,5 til 1,5 m u.t. /8/.

Ved væskespildtanken er der fjernet 9 tons jord. Forureningsindholdet i den opgravede jord var meget højt med indhold af fri fase PCE. Det skønnes, at der blev fjernet mellem 30-40 kg PCE i den opgravede jord under spildtanken. I de intakte aflejringer af sand i bunden af udgravningen blev der efterladt restforurening med fri fase PCE.

I baggården blev der fjernet 56 tons jord. Forureningsindholdet i den opgravede jord var forholdsvis lavt, typisk omkring 5-15 mg PCE/kg TS. Ved opgravningen er der fjernet i størrelsesordenen 10-20 kg PCE. Alene i en opgravet sandfangsbrønd blev der fjernet ca. 8 kg fri fase PCE. I baggården er der efterladt restforurening med PCE i rand og bund med PCE-indhold op til 15 mg/kg TS.

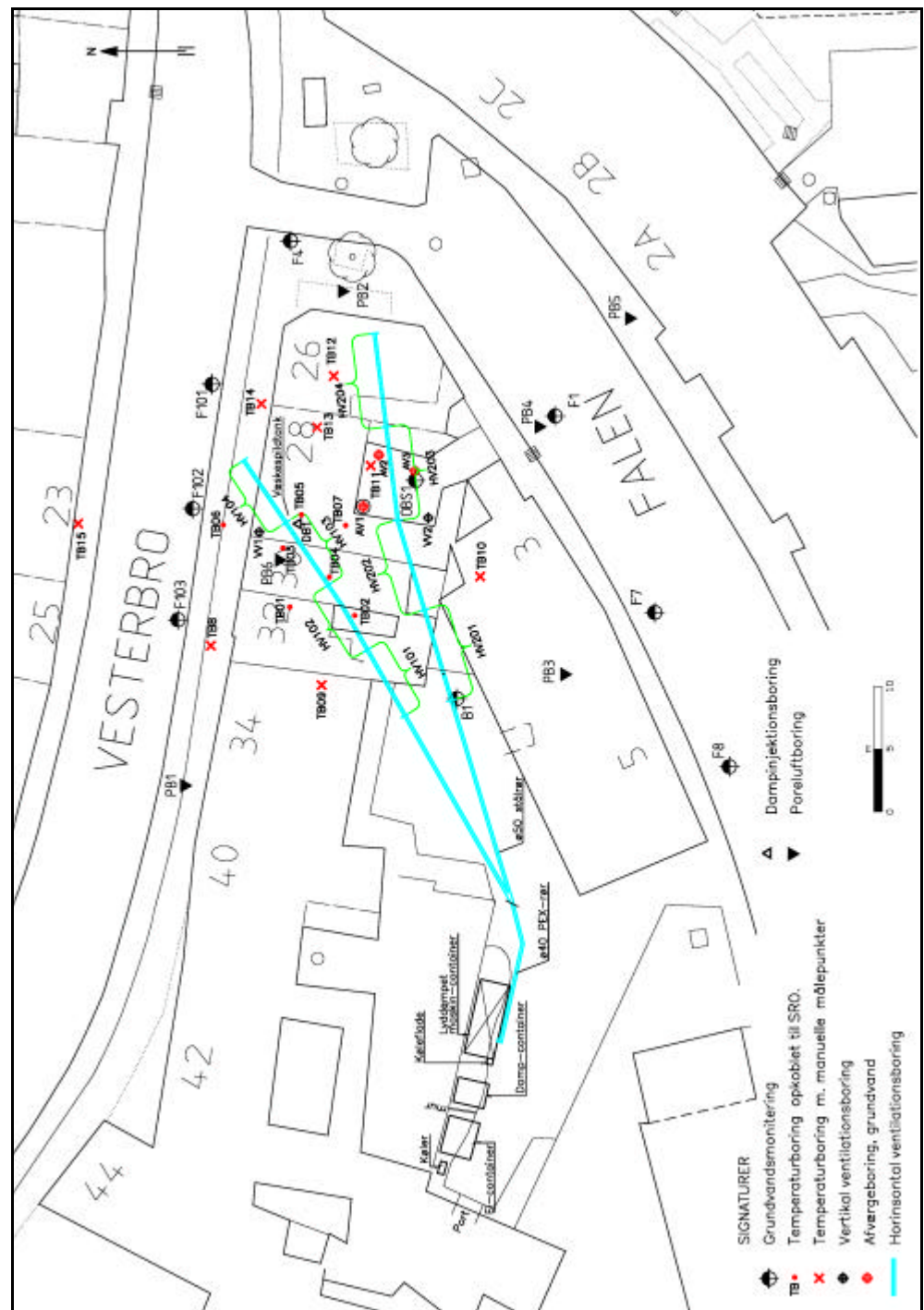
Oprensingsområde ved væskespildtanken og i baggården samt forureningsindhold i rand- og bundprøver fremgår af bilag 4.



Jordoprensning i baggård

4.2 Afværgeanlæg for in-situ anlæg

Placering af afværgeanlæg og monitoringsboringer fremgår af figur 4.1. Herudover er afværgeanlægget og monitoringsboringerne også indtegnet på ortho-foto, jf. figur 4.2.



Figur 4.1 Oversigtskort med in-situ anlæg og monitoringsboringer

4.2.1 Boringer

De boringer som påvirkes af dampinjektionen er udført i varmeresistent materiale (stål eller polypropylen). Til afpropning af boringerne er der anvendt cementstabiliseret bentonit (storebæltsblanding) med blandingsforhold 15 l vand, 40 kg cement, 10 kg bentonit, 200 g Betocem IN.

I bl.a. temperaturboringer, hvor borediameten kun var 4", blev der anvendt en lidt tyndere blanding, således at storebæltsblandingen kunne hældes ned i borehullet. Principopbygning af de enkelte boringstyper fremgår af bilag 3.

Borearbejdet er gennemgående udført under vanskelige adgangsforhold, idet mange boringer er udført indendørs eller i fortove, jf. figur 4.2. Borearbejdet er derfor i de fleste tilfælde udført med minirig- eller håndboringer.

Horisontale ventilationsboringer

Med henblik på at ventilere den umættede zone er der etableret 2 stk. 40-50 m lange horisontale filtersatte boringer, som er boret ca. 4 m u. t (HV01 og HV02). Boringerne er udført som styrede underboringer, der er skudt fra gården ved Vesterbro 34/Falen 3 og under kildeområdet. Boringerne er udført som "blindhole-boringer", dvs. at der ikke er etableret modtagegrube. Filtersætning er derfor sket bagfra.

Boringerne er filtersat med hver 4 stk. 50 mm stålfiltre (indvendig diameter) for bedre at kunne fordele luftstrømmen over det lange indsugningsområde. Der er anvendt stålfiltre for at lette filtersætningen og af hensyn til den planlagte opvarmning af jorden med damp.



Foto af horisontal boring

Boringen er udført fra terræn, og pilotboringen er startet ca. 20 m før filterstrækning. Borehovedet var forsynet med en sender, der via en søger på overfladen gav oplysninger om borehovedets placering vertikalt og horisontalt og dermed mulighed for styring af borehovedet. De øverste 15 m af boringerne er afproppet med storebæltsblanding. For at sikre at der ikke løb storebæltsblanding ind i filterstrækningen, er der etableret en gummipacker ca. 3 m før filterrør.



Figur 4.2 Orto-foto med in-situ anlæg og monitoringsboringer

Vertikale ventilationsboringer

For at optimere ventilationen under væskespildtanken er der ved spildtanken etableret en vertikal boring (VV1), som er filtersat med stålør i intervallet 2-5 m u.t. Herudover er der etableret en vertikal boring (VV2) i baggården tæt på kemikalieoplag. Denne boring er udført i ø63 mm varmebestandig polypropylen og filtersat fra 2-6 m's dybde.

Dampinjektionsboring

Injektion af damp skete fra en boring (DB1) med et 1,0 m filter lige omkring grundvandsspejlet (fra 5,9-6,9 m's dybde). Injektionsboringen blev udført med 50 mm filterkonstruktion i stål. Pga. et underliggende siltlag blev filteret placeret ca. ½ m højere end anbefalet ud fra edb-modelleringerne i bilag 18.

Boringer til grundvandsoppumpning

Til sikring af fanekontrol i den mættede zone er der etableret 3 stk. boringer nedstrøms væskespildtanken (AV1-AV3). Boringerne er filtersat fra ca. 6-10 m u.t. i hele magasinets vandmættede udbredelse. I boringerne er der installeret Grundfos pumper af SQE-typen. Det var i første omgang kun regnet med etablering af 1 boring (AV1), men boringen gav meget lidt vand og der blev ikke opnået en tilfredsstillende sænkning af grundvandet. Der blev derfor i maj/juni 2001 etableret yderligere 2 boringer (AV2 og AV3). Herudover er der sket en mindre oppumpning fra en eksisterende undersøgelsesboring (OBS1), som er placeret ca. ½ m fra AV3.

4.2.2 Behandlingsanlæg og SRO

Behandlingsanlægget består overordnet af vakuumanlæg, trykluft- og dampanlæg, grundvandsafværgeanlæg og et SRO-anlæg til styring og opsamling af data. Ventilationspumpe, kompressor, vandudskillere, manifoldsystem, flowmålere, manometre, frekvensomformere og andet udstyr blev indbygget i en lydisolert 20 fods container. På grund af den planlagte dampoprensning er der etableret anlæg til køling af den opsugede luft. Der er

alene etableret køling før vakuumpumpen. Kølefladerne blev installeret uden for containeren medens kølekompresoren blev flyttet ind i container pga. for stor støjbelastning. PI-diagram for de enkelte delanlæg fremgår af bilag 2.

Hele anlægget blev styret og overvåget af et SRO-anlæg med mere end 50 overvågningspunkter, som løbende blev digitalt opsamlet i en computer, som var opkoblet med modem. Ved hjælp af programmet PC-Anywhere var det muligt at styre anlægget, overvåge driften samt tappe data.

Luften fra ventilationsanlægget blev suget fra borerne (vertikale/horisontale), hvor flow og vakuum fra hver boring blev aflæst og evt. reguleret. Desuden var der etableret målestuds med mulighed for udtagning af luftprøver fra hver boring.

Luften blev ledt gennem en vandudskiller med automatisk lænsning efter behov og alarm med standsning af anlæg ved for høj vandstand. Luften blev rensat gennem et kulfilter. Ud over måling af tryk og temperatur flere steder, var der mulighed for udtagning af poreluftprøver eller PID-måling til check af gennembrud på kulfilteret.



Foto af maskincontainer med manifold, vakuumpumpe, vandudskiller m.m.



Foto af el-, damp- og maskincontainer.

Dampanlægget bestod af en dampgenerator med oliedrevet kedel, som kunne levere op til 200 kg damp/h. I maskincontaineren blev der etableret et trykluftanlæg, som forsynede dampledningen med oliefri trykluft. Trykluftdata var: 23,8 m³/h luft ved 3 bar, svarende til ca. 75 kg luft/h.

Injektionen blev styret på injektionstrykket, som blev reguleret over en reduktionsventil ved selve dampboringen. Injektionen blev gennemført med et overtryk, som varierede mellem 0,5-0,8 bar.

Det oppumpede grundvand og kondensvandet fra vandudskillere blev rensat i et kulfilter og udledt til kloak.

Som supplement til monitoreringen på vakuumanlægget blev der installeret en automatisk PID-måler, som blev koblet til SRO-anlægget. Formålet med PID-måleren var at overvåge om der sker bortkogning af fri fase PCE, som ikke i fuldt omfang opdages ved de manuelle målinger. PID-måleren blev styret automatisk ved hjælp af magnetventiler. Der blev foretaget en opvarmning af luften før instrumentet. PID-måleren måler forureningsindholdet i luft før kulfilter, efter kulfilter, i container og i udeluft 1 gang i timen. Som referencemåling blev der målt på en kalibreringsgas (100 ppm standard). Måleområde blev indledningsvist indstillet til 0-1000 ppm.

4.3 Monitoringsboringer

Til monitorering af forureningsindholdet i den mættede/umættede zone, temperaturudbredelsen og sætninger er der etableret en række monitoringsboringer/-punkter.

Principtegninger og beskrivelse af boringernes indretning fremgår af bilag 3.

4.3.1 Monitorering af temperaturudbredelse i jord

Til overvågning af temperaturudbredelse blev der etableret 15 temperaturboringer (TB1-TB15) med i alt 140 temperatursonder. I boringerne blev varmeudviklingen overvåget med temperaturfølere, hvoraf 7 af boringerne er opkoblet til SRO-anlægget. I disse boringer blev temperaturudviklingen overvåget on-line. Principskitse af temperaturboringerne er vist på figur 4.3.

Boringer blev ført til lige under grundvandsspejlet, dvs. til 6,5 m's dybde.

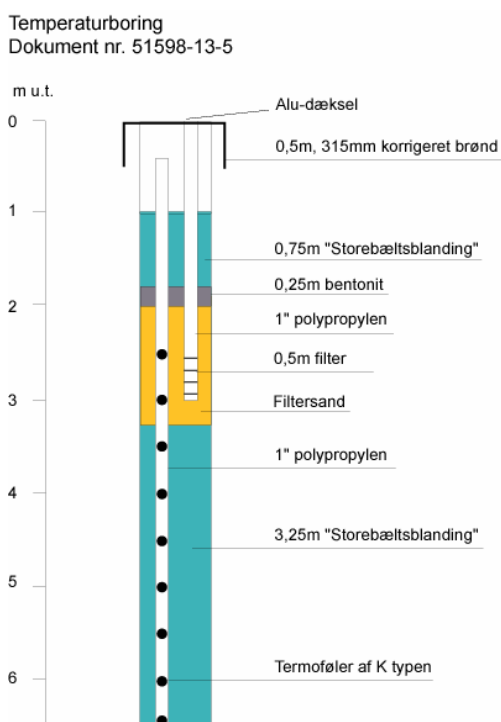
Temperaturboringerne blev indrettet ved at nedsætte et ø25 mm hult PP-rør hvor temperaturfølere er fastspændt med strips for hver halve meter. Temperaturboringerne blev ligeledes indrettet med et filter fra 2,5-3,0 m's dybde til udtagning af poreluftprøver og måling af vakuumbredelse. Boringerne blev forsejlet med "storebæltsblanding" således, at der ikke kunne ske nogen opadrettet dampspredning. Temperaturfølerne i 1,5 m's dybde og fra dybdeintervallet 3,5-6,5 m blev således indkapslet i storebæltsblandingen.



Foto af temperaturboring

I de 7 boringer, der er opkoblet til SRO-anlæg, sker opkobling til SRO for hver hele m (hver anden føler). SRO opkoblede boringer er placeret med en rimelig geografisk fordeling omkring dampinjektionsfilter (inden for 3-5 m's afstand samt på kritiske steder (Vesterbro 30 og 32 samt i fortov ved ledninger).

For de temperaturfølere, som ikke blev opkoblet til SRO-anlæg, skete temperaturmålingerne manuelt.



Figur 4.3 Principskitse af Temperaturboringer

4.3.2 Grundvandsmoniteringsboringer

Til overvågning af om der skete spredning af forurenede kondensat til grundvandet i forbindelse med dampopvarmningen, blev der etableret 9 boringer til udtagning af vandprøver nær oprensingsområdet. Oplysning om boringer fremgår af tabel 4.1.

Tabel 4.1 Oplysning om grundvandsmoniteringsboringer

Boring	Filtersætning (m u.t.)	Grundvandsspejl den 15. dec. 2000 (m u.mp.)	Grundvandsspejl den 15. dec. 2000 (m o.DNN)
F101	5,8-7,8	6,24	5,82
F102	5,8-7,8	6,03	5,87
F103	5,2-7,2	5,99	5,89
F1	6,0-10,0	6,58	5,50
F4	6,0-10,0	6,61	5,81
B1	6,5-8,5	6,16	5,56
OBS1	1,5-10,0	6,83	5,61
F7	5,0-11,0	6,34	5,47
F8	4,75-13,75	6,04	5,47

4.3.3 Boringer til monitoring af oprensingsniveau i den umættede zone

For at undersøge om der skete spredning af forurenede kondensat i den umættede zone, blev der etableret boringer til udtagning af poreluftprøver.

Der blev etableret 20 boringer, hvoraf de 15 boringer er udført som kombinerede temperatur- og poreluftboringer. Boringerne blev filtersat fra 2,5-3 m u.t. i intakte aflejringer.

4.3.4 Præcisionsnivellement

For at undersøge om der skete sætninger som følge af dampinjektionen, blev der etableret 20 stk. nivelleringsmålepunkter i nederste murskifte på Vesterbro 28, 30 og 32, dels mod Vesterbro og dels i baggårde tilhørende disse. Punkterne blev indnivelleret i forhold til flere faste fikspunkter på Vesterbro. Målepunkternes placering fremgår af bilag 16.

5 Drift af afværgeanlæg

Drift af in-situ anlægget blev igangsat den 4. januar 2001, efter at entreprenøren havde indkørt anlægget medio december 2000. Den mekaniske drift af in-situ anlægget er udført af entreprenøren (NNC Danmark A/S), medens den miljømæssige overvågning og monitorering er udført af COWI. Oprensningen er overordnet sket i 6 faser jf. tabel 5.1.

Tabel 5.1 Oprensningens faser.

Fase	Periode	Vakuumentilering	Grundvandsafværge	Dampinjektion
1. Kold vakuumentilering og grundvandsoppumpning	4. januar 2001 til ultimo maj 2001 (5 mdr.)	x	x	
2. Dampinjektion	Ultimo maj til 6. september 2001 (3½ mdr.)	x	x	x
3. Vakuumentilering og grundvandsoppumpning	6. sept. 2001 til ultimo april 2002 (8 mdr.)	x	x	
4. Test for reduceret ydelse af vakuumeekstraktion	Ultimo april 2002	x	x	
5. Tilbageslagsmålinger i umættet zone	Årsskiftet 2001/2002 (3 uger) og maj til august 2002 (3 mdr.)			
6. Begrænset vakuumentilering	August 2002- ? (1-5 år)	x		

Den første fase af in-situ oprensningen omfattede traditionel kold vakuumeekstraktion fra de 10 vakuumfiltre samt grundvandsoppumpning nedstrøms kildeområdet. Efter ca. 4½ måneders drift af vakuumentileringen blev injektionen af damp påbegyndt. Dampinjektionen er gennemført over ca. 3½ måneder. Herefter er der igen sket traditionel vakuumeekstraktion indtil 1. maj 2002. Vakuumeekstraktionen blev stoppet omkring den 1. maj 2002 og efter en periode på 3 måneder blev der udført tilbageslagsmålinger i den umættede zone. Hen over sommeren 2002 blev der etableret et nyt mindre ventilationsanlæg. Anlægget blev opstartet medio august 2002, og der gennemføres en begrænset ventilation i den umættede zone på ca. 60 m³/h.

Grundvandsoppumpningen ophørte omkring 1. maj 2002, lige efter injektion af kaliumpermanganat.

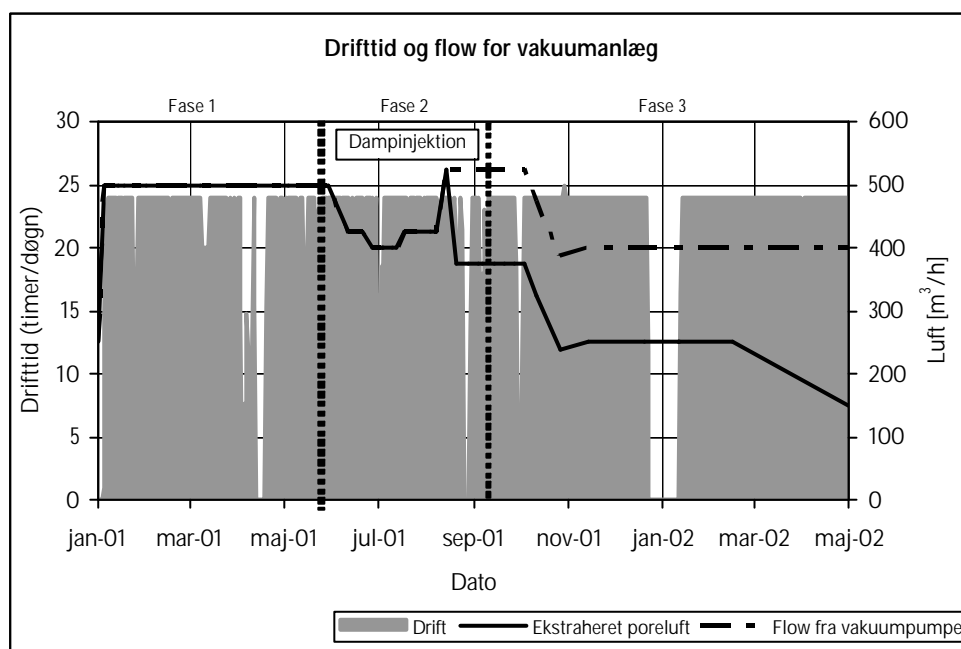
5.1 Vakuumentilation

5.1.1 Driftstider og flow

Samlet har vakuumentilationsanlægget kørt 10.237 timer i perioden fra 4. januar til 1. maj 2002. Der har været enkelte planlagte stop af

vakuumeks tractionen ved radonmålingerne i april 2001 samt ved tilbageslagsmålinger ved årsskiftet 2001/2002. Ser man bort fra disse driftsstop har anlægget stort set kørt uden afbrydelser i hele driftsperioden, bortset fra et nedbrud på 3 dage i august 2001 hvor vakuumpumpen skulle repareres. Drifttid og flow for vakuumentileringen er vist på figur 5.1 og tabel 5.2. I figuren skelnes mellem flow af ekstraheret poreluft og samlet flow for vakuumpumpen. Det skyldes at den ekstraherede poreluft i fase 2 og 3 er iblandet falsk luft.

I fase 1 blev der ekstraheret ca. 500 m³ poreluft i timen med kontinuerlig drift. Det var oprindeligt planlagt at oppumpe ca. 700 m³ luft i timen, men da flere af de horisontale boringer ikke gav den forventede ydelse, blev anlægget drevet med et lavere flow. På trods af den lavere ydelse var influensradius for vakuumentileringen tilfredsstillende. Under dampinjektionen steg modtrykket i formationen, og det var vanskeligt at opretholde et flow på 500 m³/h uden for stort modtryk i vakuumpumpen. Da køleanlægget var dimensioneret til et minimumsflow på 500 m³/h, blev det nødvendigt at indsuget falsk luft for at opretholde dette flow (fra ca. 23. august 2001). Den falske luft blev taget fra streng HV201 og HV203, ca. 150 m³/h. Der blev derfor ikke suget jordluft fra disse 2 boringer.



Figur 5.1 Driftstid og flow for vakuumentilering. Flow angiver både falsk luft og ekstraheret poreluft.

Efter stop af dampinjektionen er flowet neddroset til 380-390 m³/h med indtag af varierende mængde af falsk luft (fra ca. 150 m³/h stigende til 250 m³/h i slutningen af fase 3).

Pr. 1. maj 2002 er der i alt ekstraheret ca. 3.580.000 m³ poreluft. Antages et ventileret areal på 1000 m², en umættet zone på 6 m og en effektiv luftporøsitet på 0,25, kan det overslagsmæssigt beregnes, at der er sket en udskiftning af poreluften på ca. 2.400 gange.

Tabel 5.3 og bilag 9 viser flow i de enkelte vakuumentileringer. Det fremgår at de 2 vertikale ventilationsboringer (VV1 og VV2) har været de mest stabile og ydende. De 2 horisontale filtre i hotspotområdet (HV103 og HV104) har

ligeledes været meget stabile og velydende. Det har medført, at der altid har været en meget effektiv vakuumeekstraktion i kildeområdet - også under dampinjektionen.

Tabel 5.2 Oppumpede Luftmængder ved vakuumentilering. Flow angivet i m³/h.

Fase	Samlet flow	Heraf falsk luft	Ekstraheret poreluft
1	500	0	500
2	400-525	0-150	250-425
3	380-525	150-250	150-375
4	400	320	80
5	0	0	0
6	50-80	0	50-80

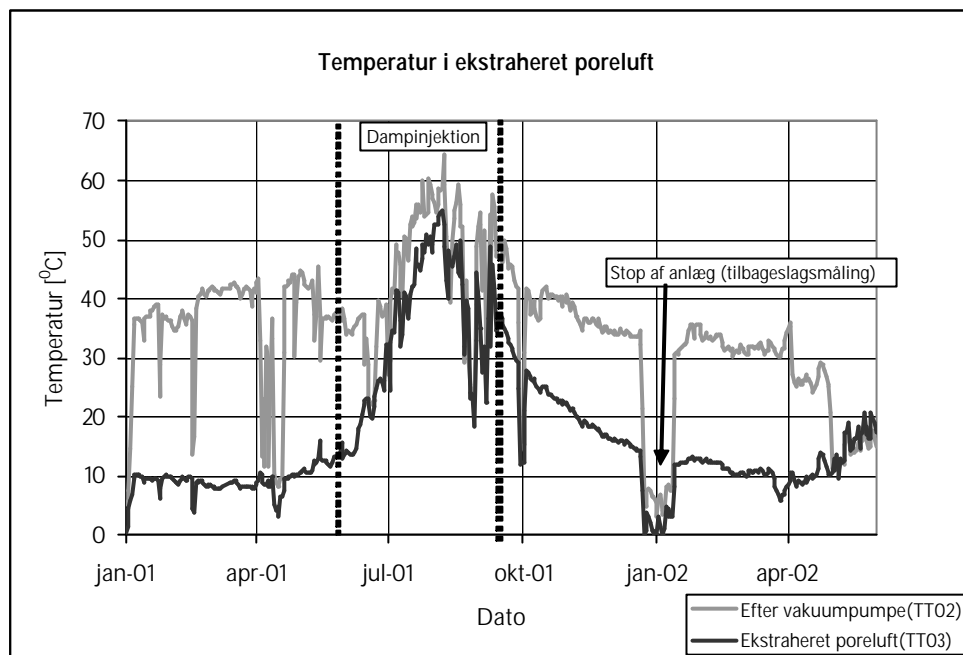
Derimod har streng HV2 generelt været ustabil og dårligt ydende - bortset fra filter HV202, der har ydet omkring 40-50 m³/h. En af grundene til den lave ydelse var manglende skylning og efterfølgende renpumpning af borerne. En anden forklaring på den ringe ydelse kunne være lunger i blænderet, idet boringen ved en fejl ikke blev udført med konstant fald bagud mod filteret. Herved kunne infiltrerende regnvand, udsivning fra utætte kloaker og kondensvand fra vakuumeekstraktionen/dampinjektionen opstives i lunger i boringen. Den høje og stabile ydelse fra VV2 har dog bevirket, at der hele tiden har været en effektiv ventilation i baggården til renseriet.

Tabel 5.3 Oppumpede Luftmængder i de enkelte vakuumstreng

Vakuumstreng	Ydelse (m ³ /h)			Bemærkning
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
VV1	85	20-75	45-65	Meget stabil
VV2	110	65-100	20-100	Meget stabil
HV101	50	25-60	20-50	Mindre ustabil
HV102	15	0-50	0-20	Ustabil og ringe ydelse
HV103	70	0-70	35-55	Meget stabil
HV104	65	0-75	45-75	Meget stabil
HV201	0	10-95	0-40	Ring ydelse, vand
HV202	55	35-55	20-40	Mindre ustabil, god ydelse
HV203	10	10-70	0-35	Ring ydelse, vand
HV204	35	15-40	10-35	Ustabil, men moderat ydelse
Samlet flow	500	ca. 375-525	150-375	

5.1.2 Temperatur i ekstraheret poreluft

Temperaturen i den ekstraherede poreluft fremgår af figur 5.3. Der ses en kraftig temperaturstigning pga. dampinjektionen, som slår igennem omkring 1. august, dvs. efter 2 måneders dampinjektion. Temperaturen når her op på ca. 55 grader. I bilag 9 er temperaturen i den ekstraherede poreluft vist fra de enkelte vakuumstrengene. Det ses, at temperaturen af den ekstraherede poreluft har været oppe på 60-75 grader i hotspotområdet (VV1, HV103 og HV104). Det vurderes at der er begyndende dampgennembrud i starten af juli 2001.



Figur 5.3 Temperatur, før og efter afkast

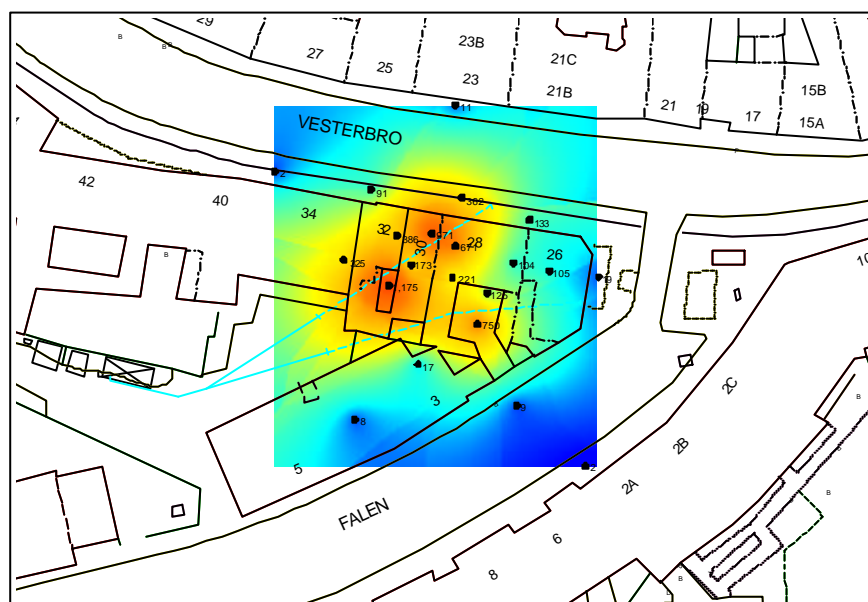
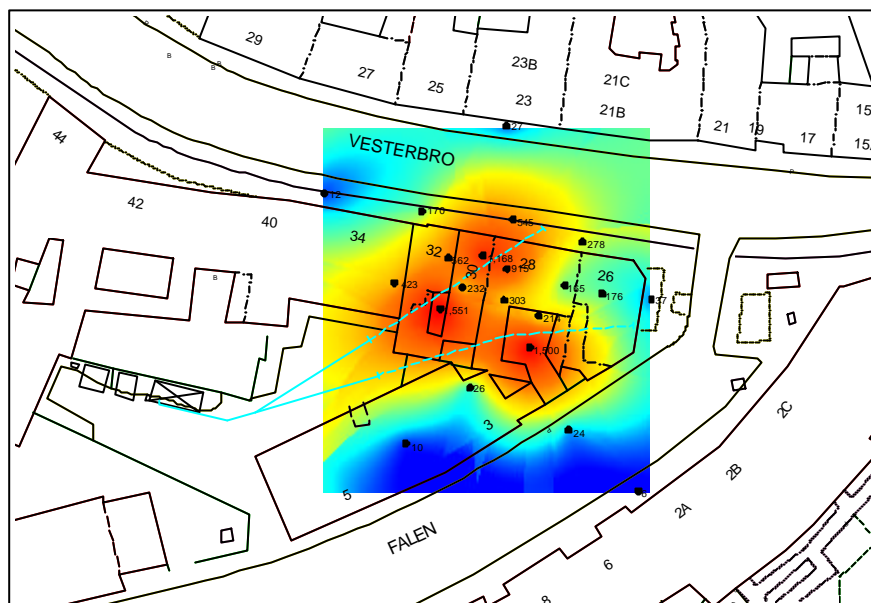
5.1.3 Influensradius

Vakuumbredelsen fra ventileringen er målt ved sammenhørende trykmålinger i de 20 poreluftfiltre. Resultaterne af vakuummålinger under den kolde ventilation og under dampinjektionen er vist på figur 5.4. Alle resultater fremgår af bilag 15. Influensområdet er defineret som det område, hvor der er et vakuum på mindst 100 pascal (1 mb).

Det fremgår, at influensområdet dækker kildeområdet ved adresserne Vesterbro 26, 28, 30, 32 og en del af nr. 34. Dette svarer til et areal på mindst 1000 m² og et jordvolumen i den umættede zone på ca. 6000 m³. Under dampinjektionen i fase 2 er vakuum lidt mindre, men influensområdet er stort set det samme som under fase 1. Det største vakuum findes omkring vakuumfiltrene ved væskespildtanken. Vakuum i OBS1 er skønnet ud fra måling i januar 2001 og i august 2002.

Da der er sket en markant reduktion af forureningsindholdet uden for det optegnede influensområde, vurderes det reelle influensområde dog at være noget større. Dette er i overensstemmelse med radonmålingerne, der viser et influensområde i størrelsesorden 1500-2000 m² jf. afsnit 5.1.4 /12/.

Vakuummålingerne viser, at der under hele dampinjektionen har været pneumatisk kontrol med forureningen i den umættede zone.



Figur 5.4 Influenradius. Øverst Vakuummålinger den 30. marts 2002 under den kolde ventilation og nederst under dampinjektion den 21. juni 2001. 0-20 = blå, 20-100 = tyrkis, 100-300 = gul, 300-600 = orange, >600 = rød. Enhed er pascal.

5.1.4 Radonmålinger

I forbindelse med oprensningen er der gennemført en undersøgelse af radonindtrængning på Vesterbro 30/12/. Formålet med radonundersøgelsen har været at undersøge, om det er muligt at skelne, om påvirkning af indeklimaet i Vesterbro 30, skyldes jordforureningen eller påvirkning fra driften af rensriet.

Ved undersøgelsen er der udført kontinuerte målinger af: Undertryk i umættet zone, tryk under gulv, barometertryk, temperatur og radonindhold i indeklima på Vesterbro 30. Der er ligeledes lavet målinger af radonindholdet i den umættede zone. Målingerne er udført før injektion af damp. Resultaterne er

afrapporteret i /12/. I bilag 10 er der vist udvalgte resultater fra undersøgelsen (sammenhørende målinger med trykforhold og radonindhold).

Undersøgelsen viser, at radonkoncentrationen i ejendommen er meget lav (omkring 10 Bq/m^3), når vakuumanlægget er tændt. Koncentrationen svarer til det forventede bidrag fra byggematerialer og udeluft, og undersøgelsen viser således, at der ikke trænger væsentlige mængder radon (og PCE) ind i huset fra jorden, når vakuumanlægget kører. Denne konklusion støttes desuden af følgende observationer:

- Trykmålingerne viser, at vakuumanlægget giver anledning til, at der er et lille overtryk i huset i sammenligning med trykket i det kapillærbrydende lag under terrændækket. Trykdifferencen bevirker, at der går en vis luftstrøm i retning fra ejendommen mod det kapillærbrydende lag.
- Når vakuumanlægget slukkes, stiger radonindholdet i huset. Stigningen formodes at ske pga. øget indtrængningen fra jorden, hvilket underbygges af, at radonkoncentrationen stiger når der er undertryk i ejendommen, og at den falder, når der er overtryk. Tilsvarende gælder, at der er en tendens til, at radonindholdet stiger, når det atmosfæriske tryk stiger. Disse forhold tyder på, at der sker en advektiv indtrængning af radon fra jorden under huset, når vakuumanlægget er slukket.

Ved måling af radonkoncentrationen i den opsugede luft kan det vurderes, at vakuumanlægget ventilerer omkring 10.000 m^3 jord, svarende til en influensradius på ca. $1500\text{-}2000 \text{ m}^2$. Til sammenligning er det område, hvor vakuum overstiger 1 mbar, på 1000 m^2 . Radonmålingerne viser derfor, at et trykfald på 1 mbar er en meget konservativ betragtning, når influensområdet skal vurderes.

5.1.5 Kontinuerte PID-målinger

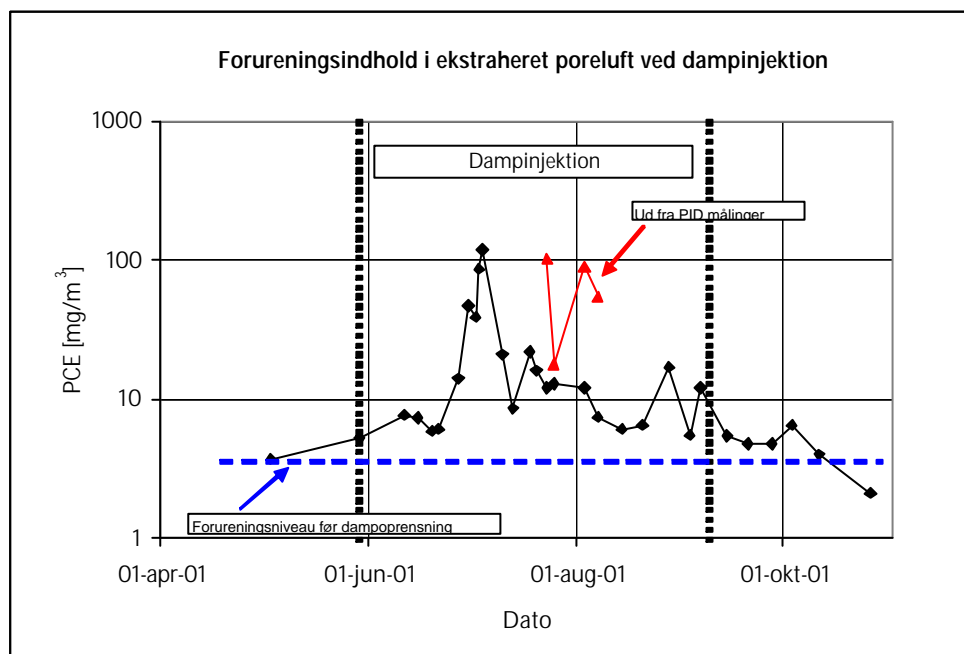
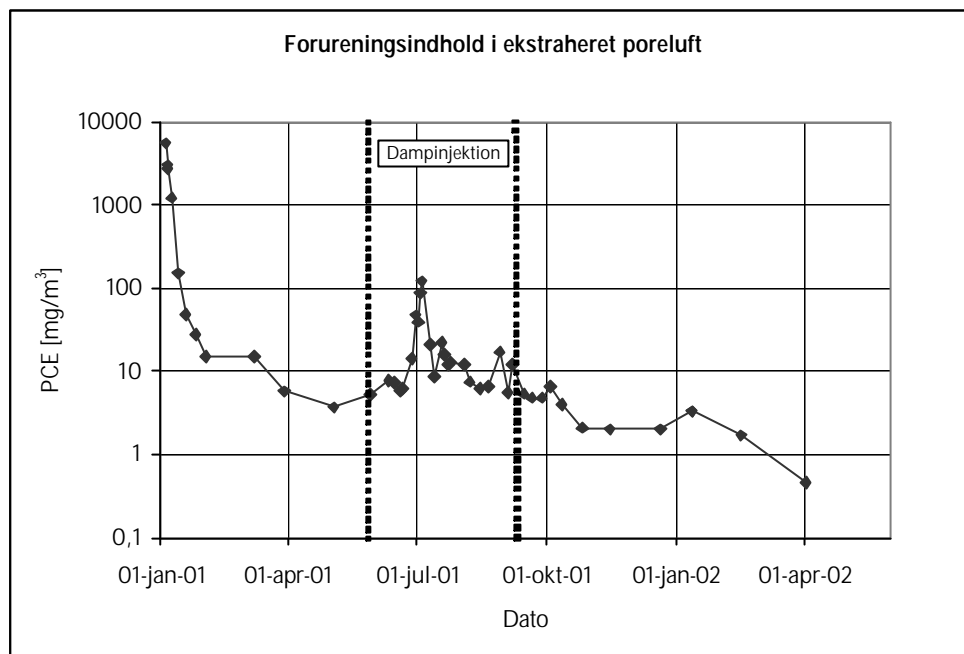
I de første 2 måneder af den kolde ventilation har PID-måleren fungeret tilfredsstillende, jf. graf i bilag 12.1 der viser sammenhæng mellem COWT's manuelle PID målinger og de kontinuerte målinger der registreres via SRO-anlægget. Derimod har PID måleren efter medio marts 2001 ikke givet pålidelige data, hvilket sandsynligvis hænger sammen med at dataopsamlingen blev ændret fra 1 til 4 kanaler på SRO- anlægget.

Det har dog ikke været muligt, at lokalisere en entydig fejlkilde ved PID måleren, men det kan skyldes flere forhold, eksempelvis overførsel af signal til SRO-anlæg, software til SRO anlæg, slange forbindelser til PID måleren, aflejring af smuds på UV-lampe, følsomhed over for vanddamp eller for lav prøvetemperatur ved detektoren. Efter ændringen af dataopsamlingen har entreprenøren testet signaloverførslen samt gennemført målinger på kalibreringsgas, som viser, at signalerne overføres fra PID-måler til SRO, og at måleværdierne svarer til det forventede. Kalibreringsmålingerne er gennemført umiddelbart efter rengøring af PID-lampen. Fortsatte målinger viste, at signalet fra kalibreringsgasmålingerne faldt hurtigt af over de første dage, således at signalet efter en uge er mindre end 10% af signalet efter rengøring.

Som følge af problemerne med de kontinuerte PID-målinger, blev hyppigheden af de manuelle PID-målinger før og efter kulfilteret øget.

5.1.6 Forureningsniveau i ekstraheret poreluft og massejernelse

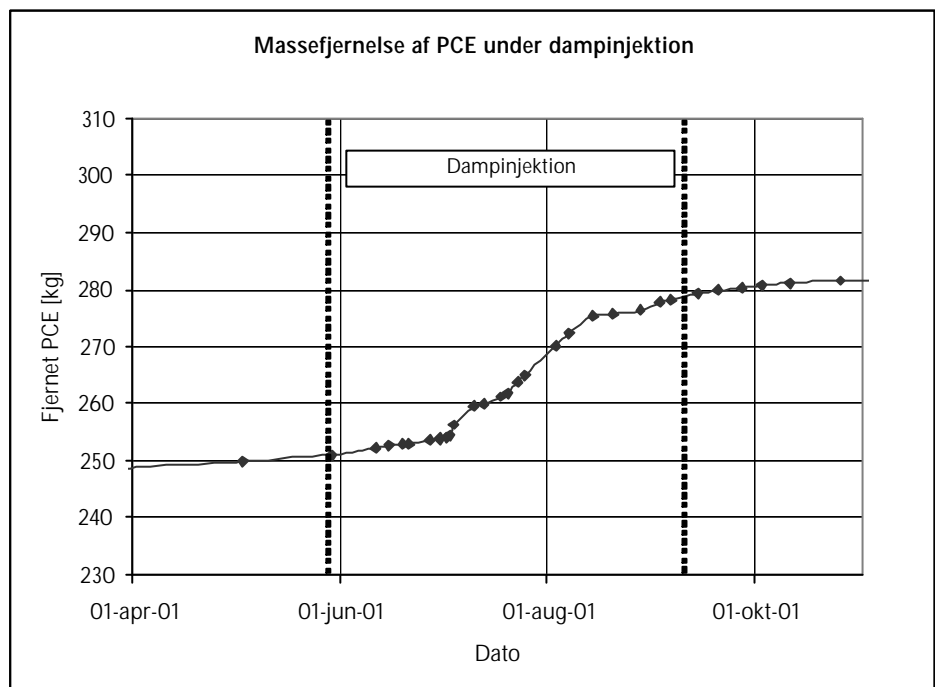
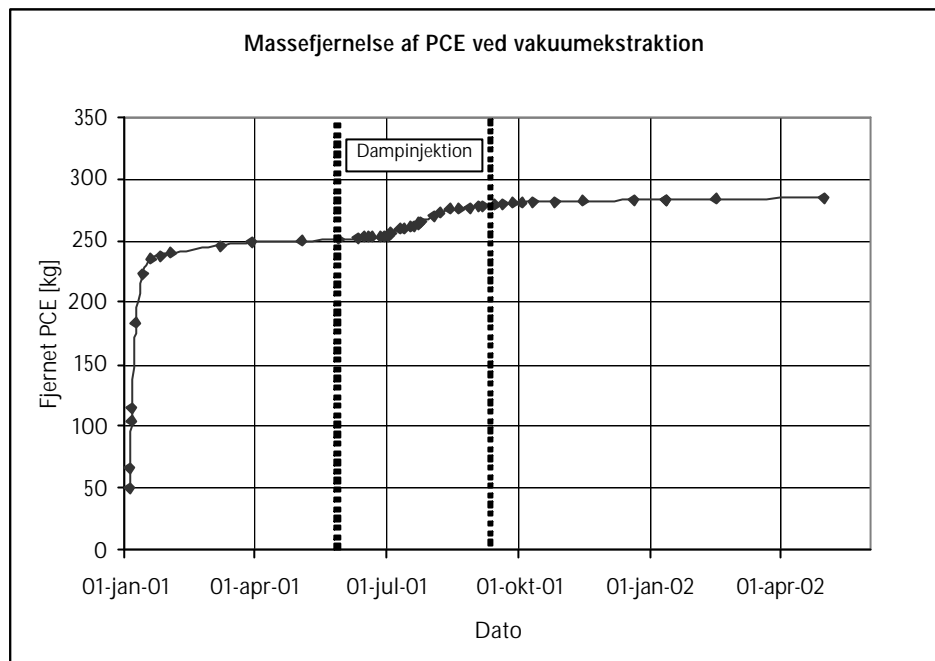
Forureningsniveauet i den oppumpede luft angivet ved kulrørsanalyse fremgår af figur 5.5. Resultater af PID-målinger fremgår af bilag 12.1. PID målingerne blev foretaget ved at opsamle ca. 1 l luft i Rilsanpose. Prøven blev tempereret til ca. 20 grader før PID-målingen blev foretaget. Evt. vanddamp kondenserede herved et før målingen. Kulrørsprøver blev udført ved opsamling på kulrør med et flow på 1 l/min.



Figur 5.5 Forureningsniveau i ekstraheret poreluft under hele driftperioden samt en detaljeret kurve under dampinjektionen. Alle målinger er kulrørsanalyser bortset fra 4 målinger fra 23. juli til 7. august (angivet på nederste kurve).

Sammenhæng mellem manuelle PID-målinger og kulrørsanalyser har generelt været god bortset fra perioden fra 23. juli til 8. august. I denne periode skete der sandsynligvis kondensation af PCE i prøvetagningslangen ved udtagning af kulrørsanalyser, idet afkasttemperaturen og vandindholdet i poreluften i denne periode var meget høj. Sammenhæng mellem COWI's manuelle PID-målinger og kulrørsanalyser fremgår af graf i bilag 12.1.

På figur 5.5 viser den øverste graf forureningsniveauet over hele driftsperioden, og den nederste graf viser en detaljeret kurve i tidsrummet omkring dampinjektionen. Der ses et kraftigt eksponentielt fald i PCE-koncentrationerne fra 5.500 mg/m^3 til $4-5 \text{ mg/m}^3$ i perioden før dampinjektionen. Under dampinjektionen er PCE-indholdet steget til op til 120 mg/m^3 med typiske koncentrationer fra $10-20 \text{ mg/m}^3$. Ved stop af dampinjektionen var PCE-indholdet omkring $5-10 \text{ mg/m}^3$. Ved stop af vakuumelekstraktionen i maj 2002 var PCE-indholdet under 1 mg/m^3 .



Figur 5.6 Massefjernelse ved vakuumentilering

På figur 5.6 er vist en massefjernelseskurve, dels for hele oprensingsperioden og dels en detaljeret kurve for tidsrummet omkring dampinjektionen. Massefjernelsen er beregnet ved at gange det samlede flow med koncentrationsniveauet i den ekstraherede luft. I perioden 23. juli til 8. august, er der anvendt PID-målinger til beregning af massefjernelsen, idet det vurderes at kulrørspøverne i denne periode ikke er repræsentative pga. kondenseret vand i prøvetagningsslangen. I den øvrige periode er der udelukkende anvendt kulrørsanalyser til vurdering af forureningsniveauet i den ekstraherede luft. Før dampinjektionen var der fjernet ca. 250 kg PCE, og 3½ måneder senere var der fjernet ca. 280 kg, altså en øgning på ca. 30 kg.

Massefjernelsen før dampinjektionen var ca. 1,5 kg om måneden. Hvis ikke der var injiceret damp, ville der i den samme periode (3½ måned) være fjernet maksimalt 5 kg PCE, dvs. at massefjernelsesgevinsten har været mindst 25 kg, svarende til en reduktion i driftstiden på flere år. Før stop af vakuumelekstraktionen den 1. maj 2002 var massefjernelsen nede på omkring 2 kg/år.

5.2 Dampinjektion

5.2.1 Drifttider og flow

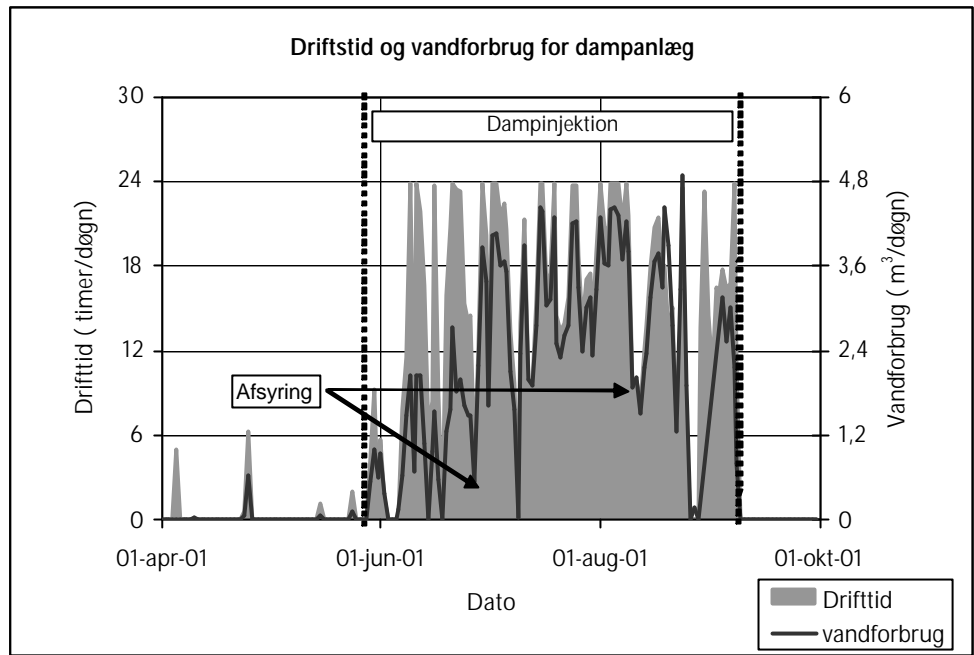
Dampanlægget har i alt kørt 1516 timer over ca. 3½ måneder, og der er i alt injiceret 231 tons damp. Injektionsraten har typisk været 150-200 kg/h, men i perioder med højt modtryk i dampboringen har injektionen været nede på 75-100 kg/time. Den gennemsnitlige injektionsmængde har været ca. 150 kg/h. Dampen er typisk injiceret med ca. 0,5-0,8 bars overtryk og med en injektionstemperatur på 105-110 grader. I perioder hvor dampboringen har været tilstoppet, har injektionstrykket været oppe på 1,4 bar og temperaturen oppe på 117 grader celcius.

Injektionen af damp er reguleret efter trykket ude i boringen dels for at sikre at trykket i boringen ikke overstiger jordens bæreevne og dels for at luft og damp skal blandes i et bestemt forhold.

For at overholde disse krav var anlægget projekteret til, at trykket holdes på en fast værdi efter både dampgeneratoren og kompressoren. Imidlertid viste det sig, at det er meget vanskeligt at få systemet til at fungere når der styres to tryk mod hinanden (tryk fra både kompressor og dampgenerator). Derfor blev anlægget ombygget til fast tryk fra kompressoren og temperaturstyring af dampen. Herved blev blandingsforholdet imellem luft og damp ikke længere helt entydigt og trykforholdene varierede efter modtrykket i formationen. Men den valgte løsning viste sig at være velegnet på den konkrete sag.

Dampanlægget var oprindeligt planlagt til at køre i tidsrummet fra kl. 6.00 - 18.00 mandag - fredag. Men da støjgenerne fra dampanlægget var mindre end forventede, og det samtidigt var vanskeligt at opnå en tilstrækkelig opvarmning, blev der fra primo juni 2001 kørt dampinjektionen 24 timer/døgnet inkl. lørdag-søndag. Selv om der i perioden har været hyppige driftstop, har den gennemsnitlige driftstid fra medio juni til 6. september 2001 ligget på godt 16 timer/døgn. Driftstiderne for dampanlægget fremgår af figur 5.7. Drifttid for kompressor fremgår af bilag 8.

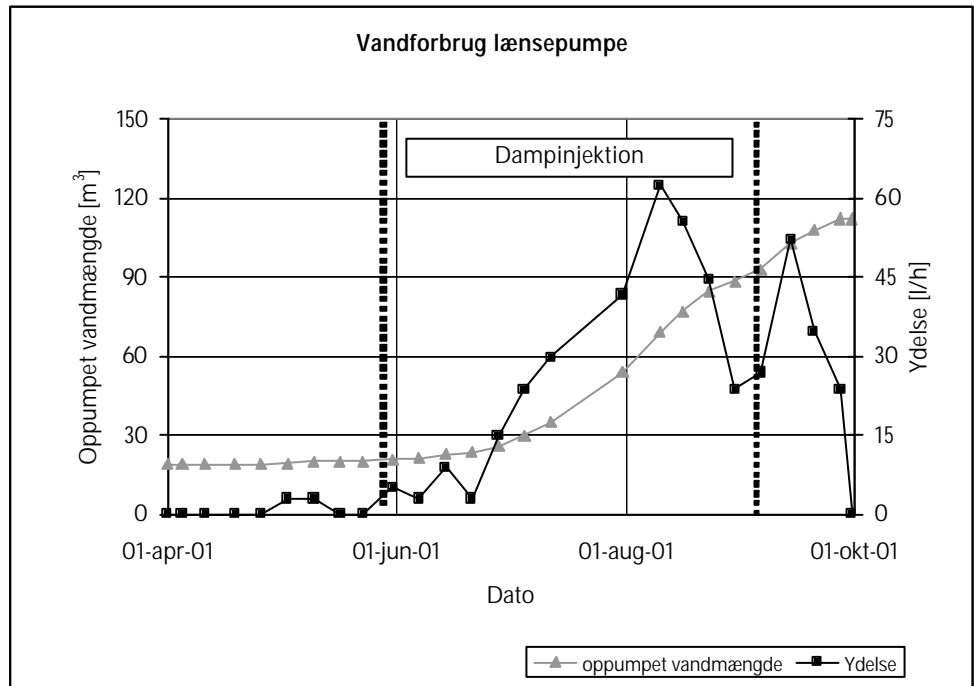
På grund af problemer med tilklokning af dampinjektionsboringen, er der gennemført afsyring af boringen i slutningen af juni og begyndelsen af august 2001. Det ses af figur 5.7 at forholdet mellem tilført dampmængde (vandforbrug) og drifttiden stiger markant efter afsyringerne. Efter driftstop ultimo august ses tilsvarende at boringen igen er tilkloknet.



Figur 5.7 Driftstid og flow for dampinjektion.

5.2.2 Ekstraheret vand fra vandudskillere

Figur 5.8 viser den vandmængde som er udskilt gennem vandudskilleren. Det udskilte vand svarer til den vandmængde der afgives (kondenseres) fra den opsugete luft gennem vakuume ekstraktionen. Det ses at vandmængderne stiger kraftigt under dampinjektionen. I august måned udskilles op til 60 l vand/h. På samme tidspunkt injiceres omkring 150 kg damp/h. Dvs. at der er fjernet op til 40 % af den injicerede dampmængde via vakuume ekstraktionen i denne periode.



Figur 5.8 Vand fra ventilationsboringer som er udskilt gennem vandudskilleren.

Der er i alt udskilt ca. 110 m³ vand gennem vakuumelekstraktionen. Heraf vurderes de 80-90 m³ at være en direkte følge af dampinjektionen. Da der i alt er injiceret 231 tons damp, svarer det til at ca. 35 % af den injicerede damp er suget op gennem vakuumelekstrationsboringerne.

5.2.3 Tilsætning af trykluft

Den injicerede damp er iblandet trykluft for at reducere kondensation af PCE i dampfronten og for at minimere tabet af PCE til den mættede zone. Der blev iblandet 20-30 m³/h ved 3 bar, svarende til ca. 75 kg luft i timen. Med en typisk dampinjektionsrate på 150-200 kg i timen svarer det til et luft-/dampforsøhold på 37-50 % w/w. En blanding på 50 % w/w har en temperatur på ca. 92 °C ved atmosfæretryk. Dette forklarer at temperaturerne i dampzonen typisk har ligget i intervallet 92-96 °C og ikke 100 °C som umiddelbart forventet. Tilsætning af trykluft til dampen har ligeledes medført en lavere injektionstemperatur end ved tilsætning af ren damp. Injektionstemperaturen har således ligget omkring 105-110 grader ved 0,5-0,8 bars overtryk.

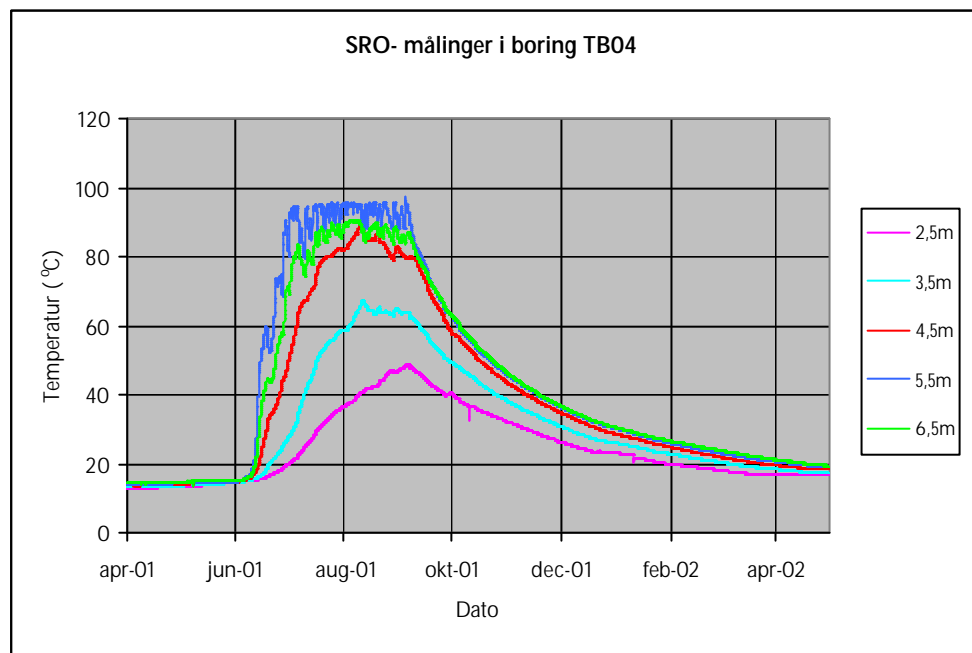
Efter afsyringen af injektionsboringen den 23. juni skete der kontinuert tilførsel af trykluft i hele døgnet frem til den 6. september 2001, kun afbrudt af enkelte tilfælde ved svigt af vakuumventileringen. Det ses af figur 5.7, at driftstop ultimo august 2002 medførte et reduceret vandforbrug til dampinjektion som følge af tilklokning af boringen.

5.2.4 Temperaturudbredelse

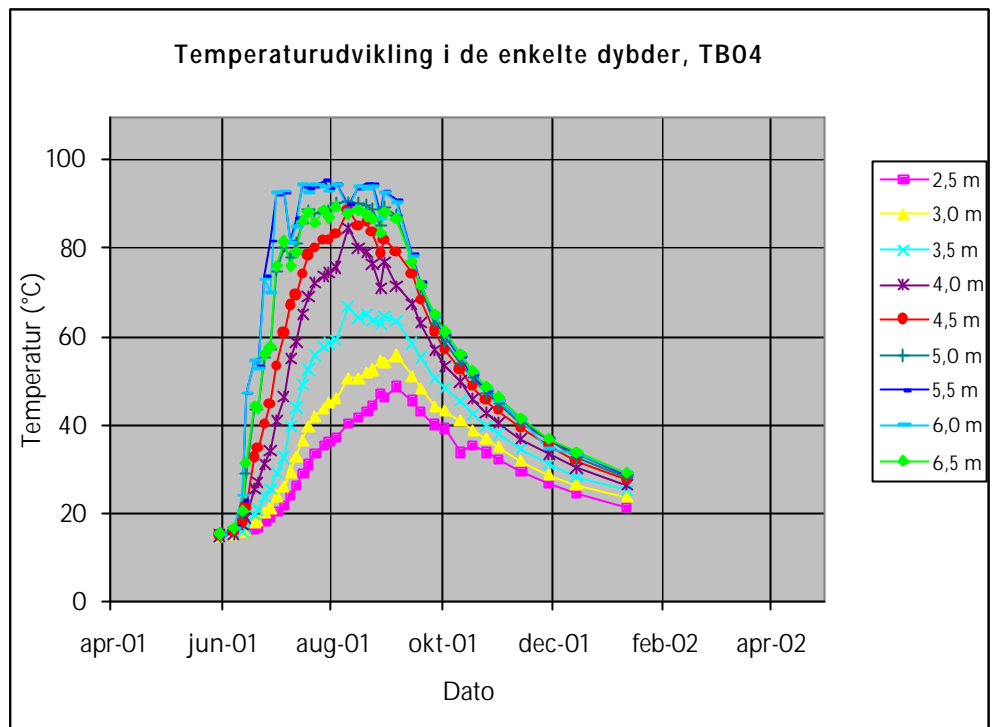
Resultaterne af temperaturmålingerne fra de i alt 140 målesonder fremgår af bilag 13.

Figur 5.9 viser et eksempel på de kontinuerte målinger via SRO-anlægget fra TB4. Der ses en kraftig temperaturstigning i 4,5 til 6,5 m's dybde med temperaturer på 90-95 grader. Stop/start af dampanlægget ses tydeligt på 5,5 m kurven. I disse dybder er der sket en egentlig udbredelse af dampfronten. Temperaturen aftager markant opadtil. I 2,5 og 3,5 m's dybde har temperaturen maksimalt været 65 og 45 grader. Opvarmningen af jorden i disse dybder er derfor alene sket ved varmeledning.

På figur 5.10 er der vist sammenhørende målinger af temperaturen ved de manuelle målinger og målinger aflæst på SRO-anlægget. Der ses også her en meget fin temperaturudbredelse, hvor der er god sammenhæng mellem de manuelle og SRO-målinger. Da der her er tale om øjebliksmålinger, er det ikke muligt at se, eksempelvis hvornår anlægget er startet/stoppet.



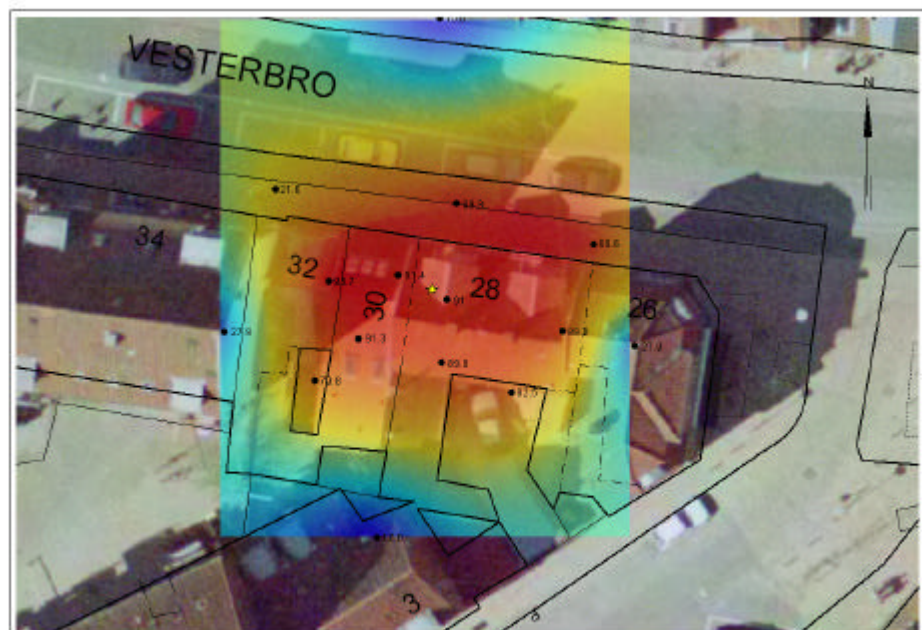
Figur 5.9. Kontinuerte SRO-temperaturmålinger fra TB4.



Figur 5.10 Manuel le og SRO-temperaturmålinger for TB4.

Horisontal og vertikal temperaturudbredelse

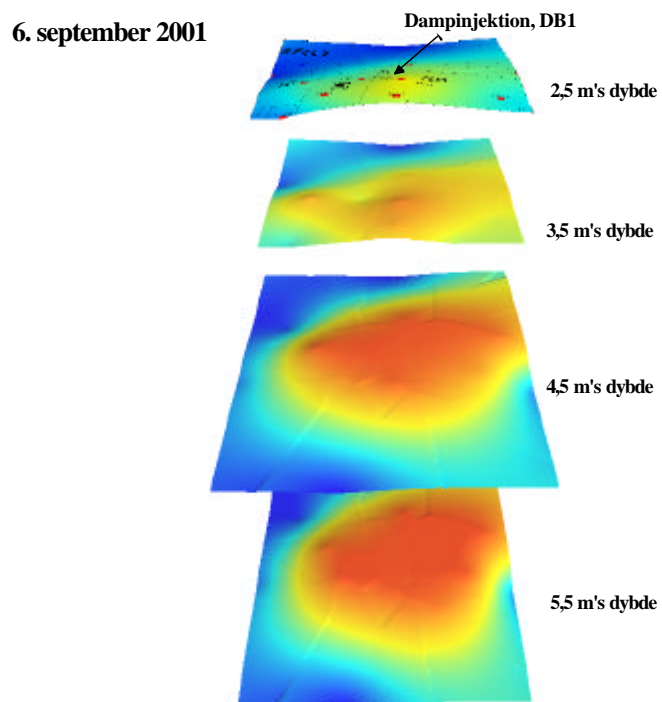
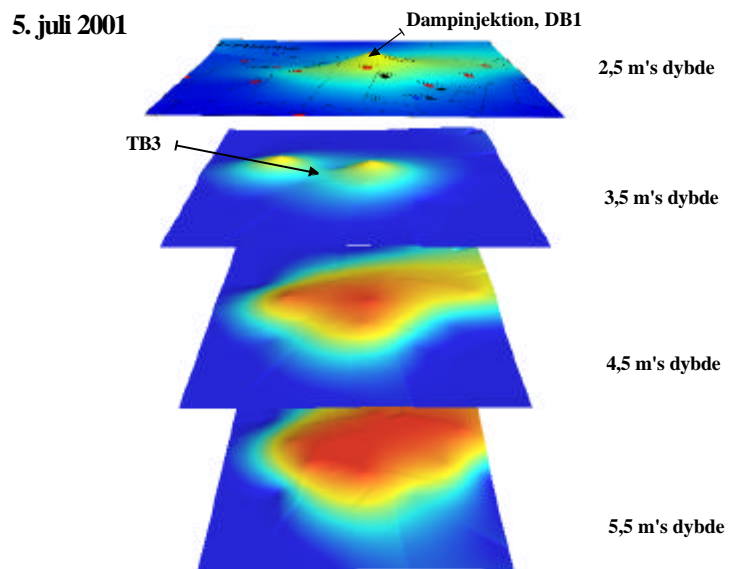
Figur 5.11 viser den horisontale varmeudbredelse i 5,5 m's dybde umiddelbart før stop af dampanlægget den 6. september 2001. Det fremgår at temperaturen under Vesterbro 28, 30 og 32 har været over 90 grader. Temperaturmålingerne viser, at et område på ca. 400 m² er påvirket af dampinjektionen, heraf er temperaturen i et område på ca. 300 m² opvarmet til temperaturer over 90 grader (radius på ca. 10 m fra injektionsboring).



Figur 5.11 Temperaturudbredelse i 5,5 m's dybde ved stop af dampinjektion den 6. september 2001. 0-20 = blå, 20-40 = tyrkis, 40-60 = gul, 60-80 = orange, 80-100 = rød. Enhed er grader celcius. Den gule stjerne markerer dampinjektionsboring.

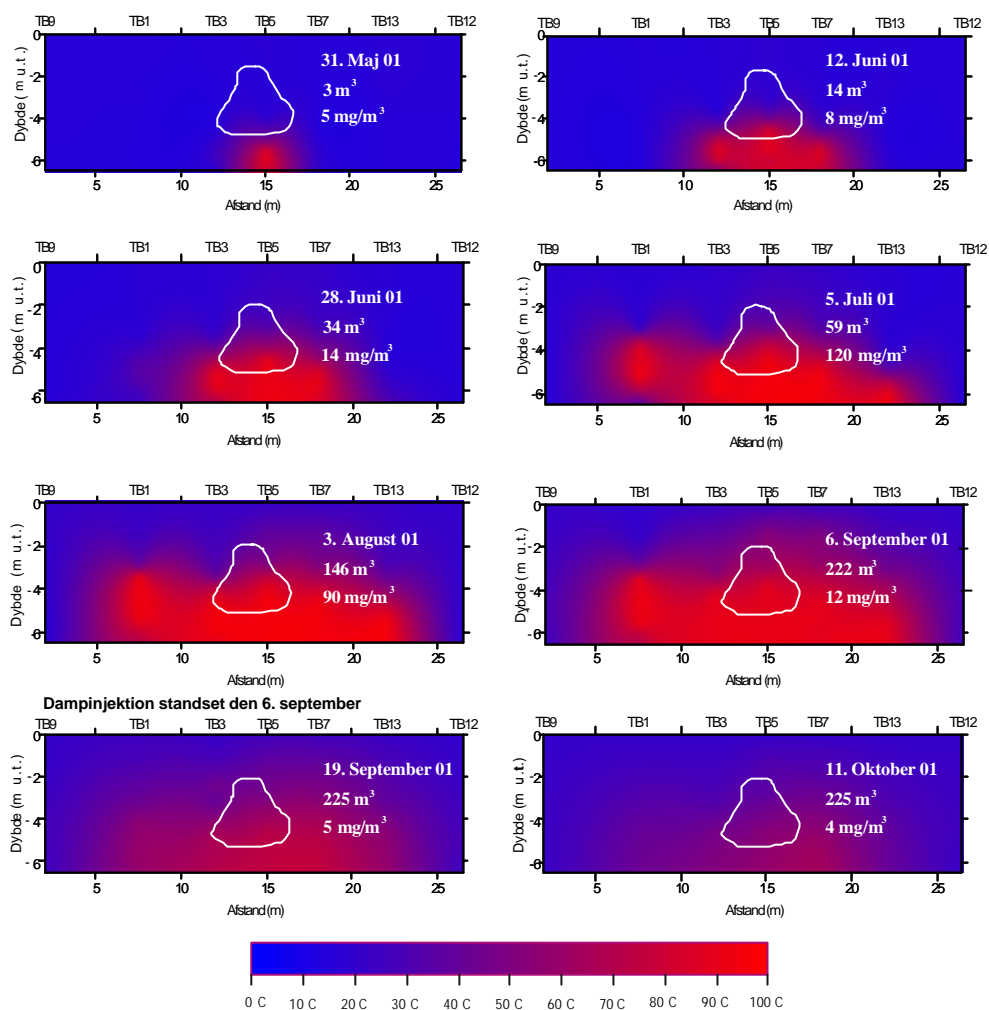
Figur 5.12 viser temperaturudbredelsen i forskellige dybder, henholdsvis den 5. juli 2001 og 6. september 2001. Det ses at opvarmningen har været kraftigst fra grundvandsspejlet i ca. 6,5 m's dybde til 4 m u.t. I hotspotområdet ved TB5 er der målt over 90 grader op til 3,5 m's dybde. Temperaturen falder opadtil og er målt maksimalt til 55 grader i 1,5 m's dybde under Vesterbro 28. I områder med ledninger er der maksimalt målt temperaturer på 30-40 grader. Temperaturudbredelsen har stort set været som forventet. Dampfronten har primært bredt sig horisontalt ud for dampboringen. Opvarmningen over 4 m's dybde er primært sket ved varmeledning. Forskelle i temperaturudbredelsen viser, at de geologiske forhold også har haft betydning for varmeudbredelsen både horisontalt og vertikalt.

Under dampinjektionen blev det konstateret, at vakuumeekstraktionen fra filtrene i nærheden af injektionsområdet (HV103, HV104 og VV1) havde større betydning for varmeudbredelsen opadtil end forventet ud fra modelberegninger i bilag 18. Først da vakuumeekstraktionen fra disse filtre blev neddroget, var det muligt at nå den maksimale opvarmningstemperatur på omkring 50 grader i 1,5 m's dybde. Ventilationens betydning for varmeudbredelse ses tydeligt af temperaturudbredelsen den 5. juli på figur 5.12. I 3,5 m's dybde er temperaturen markant lavere i TB3 end i de omgivende temperaturboringer. Det skyldes at TB3 ligger tæt på de horisontale ventilationsstrenge HV103 og HV104, der ligger i ca. 4 m's dybde.



Figur 5.12 Horizontal temperaturudbredelse den 5. juli i 2001 (øverst) og 6. september 2001 (nederst) for dybderne 2,5 m, 3,5 m, 4,5 og 5,5 m. < 20 = Blå, 20-40 = tyrkis, 40-60 = grøn, 60-80 = gul, 80-100 = Orange. Enhed er grader celcius. de røde prikker i 2,5 m's dybde angiver placering af temperaturboringer.

Figur 5.13 viser den vertikale temperaturstigning i et øst-vest snit gennem injektionsområdet på forskellige tidspunkter. På figuren er der indtegnet forventet kildeområde med fri fase, dampinjektionsmængder samt forureningsindhold i den ekstraherede poreluft.



Figur 5.13 Vertikal temperaturudbredelse i et øst-vest snit gennem kildeområdet ved forskellige datoer. Desuden angivet mængde af injiceret damp samt forureningsniveau i ekstraheret poreluft (mg PCE/m³). Forventet hotspotområde er indtegnet med hvid streg.

Før dampopvarmningen var forureningsindholdet i den ekstraherede poreluft omkring 4 mg PCE/m^3 . Ultimo juni blev dampboringen syreskyllet, og injektionsraten steg fra 50-100 kg/h til ca. 200 kg/h. Dette medførte en kraftig temperaturstigning i jorden umiddelbart herefter. Forureningsindholdet var den 28. juni øget til omkring 14 mg/m^3 og toppede omkring 5. juli med et indhold over 120 mg PCE/m^3 . Forklaringen herpå er, at en stor del af hotspotområdet blev opvarmet til over 90 grader, dvs. over kogepunktet for en blanding af PCE og vand.

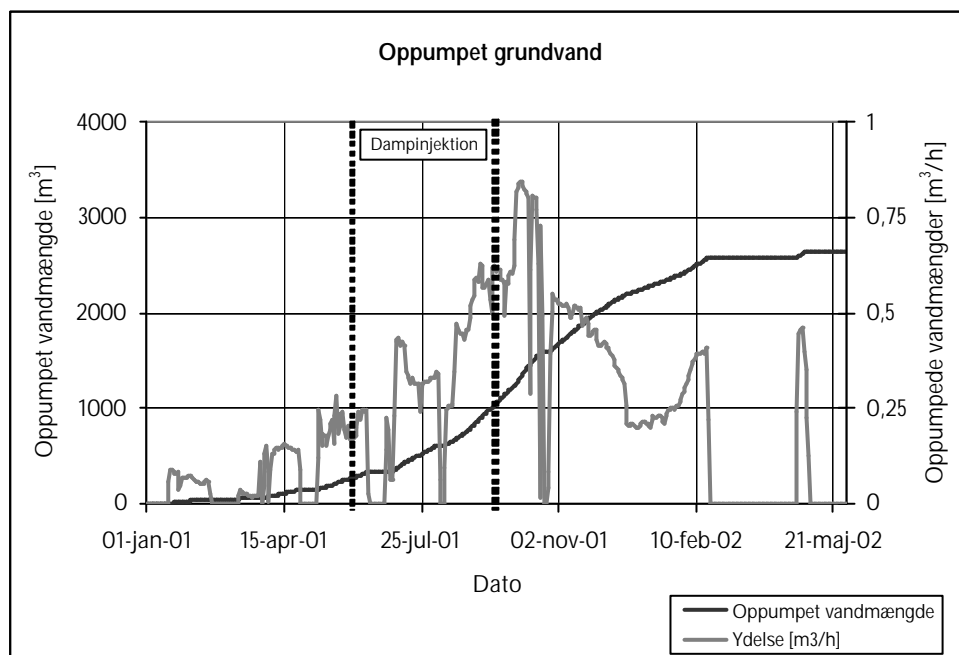
Den 6. september var den kritiske temperatur på 50 grader i 1,5 m's dybde opnået i kildeområdet, hvorfor dampinjektionen blev standset. Forureningsindholdet var stadig forhøjet med et PCE-indhold på 12 mg/m^3 . Det blev dog besluttet at standse opvarmningen, dels fordi de kritiske temperaturer i jorden var opnået og dels fordi det ud fra en økonomisk betragtning var dyrt at fortsætte injektionen i forhold til den opnåede massefjernelse.

Efter stop af dampinjektionen faldt temperaturen markant. Efter 5 måneder var temperaturen nede på 30-35 grader i de nederste temperaturfølere tæt på injektionsområdet. Efter 9 måneder var temperaturen nede under 20 grader, men dog stadig op til 5 grader højere end baggrundstemperaturen. Det blev ligeledes observeret, at temperaturen faldt langsommere under bygningerne end uden for bebyggede områder.

Målingerne over temperaturudbredelsen viser, at det lykkedes at styre temperaturen af damp/luftblandingen således, at den vertikale kondensationsfront ikke nåede højere op end ca. 3,5-4 m u.t.

5.3 Grundvandsoppumpning

For at opsamle eventuelt tab af PCE til grundvandet, er der under dampinjektionen oppumpet grundvand fra borerer nedstrøms injektionsområdet. Under dampinjektionen er der oppumpet mellem 300 og 500 l/h, svarende til en faktor 2-4 i forhold til den injicerede dampmængde. Umiddelbart efter dampinjektionen var ydelsen oppe på 600-800 l/h. Det oppumpede grundvand er hovedsageligt oppumpet fra AV1 og AV2, medens oppumpningen fra AV3 og OBS1 kun har udgjort en mindre del pga. lavere ydelse fra disse borerer. Der er i alt oppumpet 2650 m³ grundvand, jf. figur 5.14. Temperaturen af det oppumpede grundvand har været oppe på ca. 55 grader under dampinjektionen.



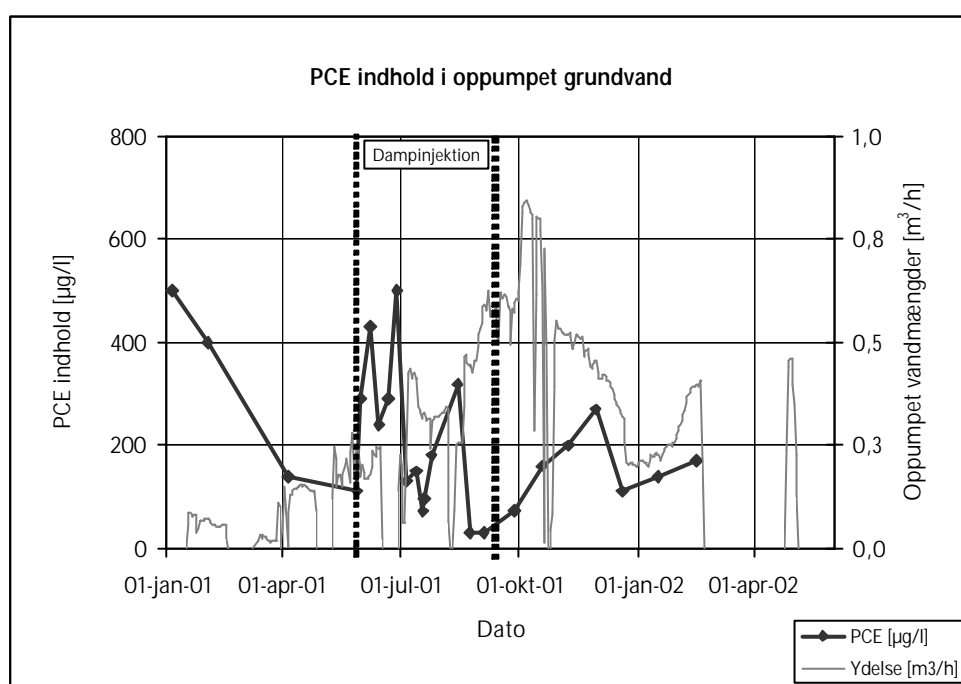
Figur 5.14 Oppumpede vandmængder og ydelse for afværgepumpning

5.3.1 Forureningsniveau i oppumpet grundvand

Forureningsniveauet i det oppumpede grundvand er vist på figur 5.15 samt i bilag 12. Der ses et generelt fald i forureningsniveauet i det oppumpede grundvand, dog med betydelige udsving, især i maj og juni måned. Det vurderes, at det generelle fald i forureningsniveauet hænger sammen med den øgede oppumpning. Ved start af dampinjektionen, ses en lille stigning i

forureningsindholdet, hvilket evt. kan forklares ved øget opløselighed og mobilisering af forureningen. Udsvingene i maj/juni tilskrives, at der i denne periode skete flere omlægninger af oppumpningen, og dermed store udsving i oppumpningen. Efter omlægningsperioden skal det bemærkes at de højeste målte koncentrationer er målt umiddelbart efter driftstop. Den forøgede oppumpning i august og september måned kan sandsynligvis forklare faldet i PCE-indholdet i denne periode. Stigningen fra begyndelsen af oktober skyldes sandsynligvis først driftstop og senere fald i oppumpningen og naturlige årstidsvariationer.

Massefjernelsen gennem det oppumpede grundvand har i perioden fra 4. januar til 1. maj 2002 udgjort mindre end 1 kg PCE ($2.650 \text{ m}^3 \times 0,2 \text{ g PCE/m}^3$). I forhold til massefjernelsen ved vakuumventileringen, er der tale om en meget lille fjernelse gennem grundvandsoppumpningen. Ud fra det målte PCE-indhold i grundvandet og massefjernelsen, er der således ingen tegn på, at der er sket væsentligt tab af PCE til grundvandet som følge af dampinjektionen.



Figur 5.15 Forureningsniveau og ydelse for oppumpet grundvand

5.4 Driftsproblemer

Projektet har ikke forløbet uden vanskeligheder. Det væsentligste driftsproblem har været at opnå tilstrækkelig køling under dampinjektionen. Det har ligeledes været vanskeligt at overholde støjkravet på 40 db om natten grundet støj fra kølekompressor, køleventilator og vakuumpumpe. Andre problemer har været tilklokning af dampinjektionsboring, hyppige uforklarlige stop af dampgenerator samt lille ydelse i nogle af de horisontale vakuumelekstraktionsfiltre. Selv med disse problemer har det været muligt at overholde tidsplanen for oprensningen således, at den intensive oprensning af kildeområdet blev færdig 3 måneder før forventet.

De mange driftstop under dampinjektionen har betydet, at der er brugt mange ressourcer til løbende opfølgning og afhjælpning af de opståede problemer.

Det er dog meget vigtigt, at de opståede problemer hurtigt bliver udbedret, idet der hurtigt sker tab af varme. Det er derfor forholdsvis dyrt at starte anlægget op, selv efter kortere driftstop.

I bilag 7 er der en gennemgang af de opståede driftsproblemer og hvilke tiltag der blev udført for at løse de opståede problemer.

5.4.1 Horisontale vakuume ekstraktionsboringer

Af de 8 horisontale ekstraktionsboringer har 5 boringer fungeret tilfredsstillende, medens 3 filtre har ydet mindre end forventet. Desuden har der været meget vand i disse filtre.

En af grundene til den lave ydelse har været manglende skylning og efterfølgende renpumpning af boringerne. Der har således stået vand i flere af filtrene. For at løse problemerne har entreprenøren løbende tømt de enkelte filtre for vand, hvilket har gjort ydelserne på boringerne mere stabile. Herudover er filtrene løbende rensede med trykluft, hvilket også har forbedret ydelsen.

En forklaring på den ringe ydelse af filter HV203 og HV204 kan være at der står vand i lunger i blænderet, idet boringen ved en fejl ikke er udført med konstant fald bagud mod filteret. Herved kan infiltrerende regnvand, udsivning fra utætte kloakker og kondensvand fra vakuume ekstraktionen/dampinjektionen opstaves i lunger i boringen.

5.4.2 Tilklokning af dampinjektionsboringen

I de første uger af dampinjektionen steg modtrykket i injektionsboringen med faldende ydelse til følge. Det blev derfor besluttet at afsyre boringen. Herved blev virkningsgraden øget markant, og ydelsen steg fra 50-100 l/h til 200 l/h.

Forklaringen på tilklokningsproblemer er stadig uvis, men det vurderes, at det sandsynligvis skyldes kalkudfældninger i grundvandet pga. af temperaturvariationerne. Calciumindholdet er højt i grundvandet, op til 170 mg/l. Når der ikke sker dampinjektion, løber der varmt grundvand ind i injektionsboringen, idet filteret hovedsageligt står i den mættede zone. Indløb af varmt vand kan yderligere forstærkes under afkøling af dampledningen. Herved kan der opstå undertryk i dampledningen og varmt grundvand suges ind i filteret.

Da der kun findes mindre indhold af jern og mangan i grundvandet, vurderes det ikke at være udfældninger af disse ioner, som har tilkloknet boringen.

For at undersøge om tilklokningsproblemet kunne skyldes kalkudfældninger i den injicerede damp, blev der udtaget vandprøve af det blødgjorte vand, som blev anvendt i dampkedlen. Vandprøven viste at calcium- og magnesiumindholdet lå under detektionsgrænsen på 0,5 mg/l. Dette viste at blødgøringsanlægget var særdeles effektivt.

For at hindre tilklokning af boringen fremover blev der konstant injiceret trykluft over hele døgnet, også selvom der ikke blev injiceret damp. Med denne fremgangsmåde lykkedes det at undgå tilklokning af boringen. Efter et nedbrud af vakuumpumpen på 5 dage i slutningen af august hvor der ikke blev injiceret trykluft, tilklokkede boringen igen, og ydelsen faldt herefter til under det halve. Dette viste, at metoden med at blæse kontinuert trykluft

gennem injektionsboringen har fungeret, men at afhjælpningen har været sårbar over for driftstop.

5.4.3 Køling af ekstraheret poreluft

Køling af den ekstraherede poreluft under dampinjektionen har gennemgående givet en del driftsforstyrrelser. Der skete bl.a. isdannelse på kølefladen, hvilket medførte nedsat køleevne og dermed for høj temperatur gennem kulfilteret for afkastluften. Problemerne blev afhjulpet med tidsstyring af kølemaskinen, med stop af køling i 2-3 minutter for hver time til afisning.

Problemerne skyldtes bl.a., at kølemaskinen ikke kunne reguleres ned, og maskinen kølede derfor maksimalt, også når behovet var lavt.

5.4.4 Støjproblemer

Støj fra vakuumpumpe, og især kølekompressor, gav anledning til overskridelse af støjkravet på 40 db om natten. Der blev iværksat forskellige initiativer, herunder etablering af isoleringskasse omkring vakuumpumpe og flydende gulv under pumpen. Herudover blev kølekompressoren flyttet til el-containeren, og der skete isolering af rør fra kølekompressor. Under dampinjektionen steg modtrykket, hvorved belastningen af vakuumpumpen øgedes, og støjniveauet steg. Det var derfor nødvendigt at reducere vakuumelekstraktionen. Samtidigt var det af hensyn til kølingen nødvendigt at indtage falsk luft, hvilket reducerede muligheden for at nedbringe støjen.

6 Effekt af afværgeforanstaltninger

6.1 Forureningsudvikling og spredning i umættet zone

Før, under og efter in-situ oprensningen er der udtaget poreluftprøver til vurdering af udviklingen i forureningsindholdet i den umættede zone, herunder at undersøge, om der sker en uhensigtsmæssig spredning af forureningen som følge af dampinjektionen. Der er udført PID målinger på alle udtagne poreluftprøver og som kontrol er der udtaget udvalgte kulrørprøver til efterfølgende analyse på laboratorie. Alle resultater fremgår af bilag 12.2. Der ses en god sammenhæng mellem PID og kulrørprøver. Forureningsindholdet før opstart af in-situ oprensningen og efter 1 års drift er vist på figur 6.1 og tabel 6.1.

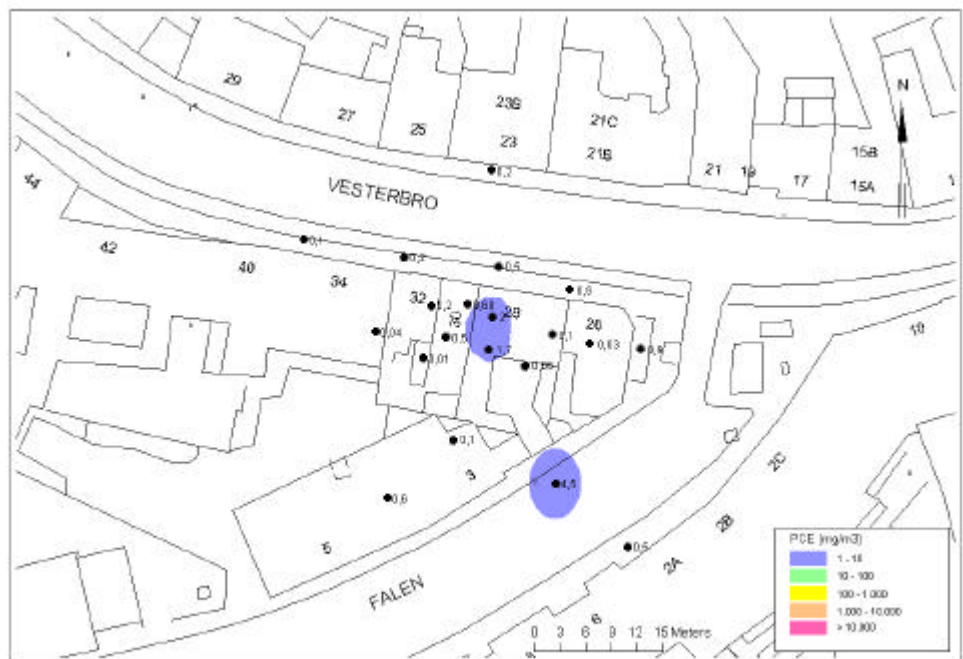
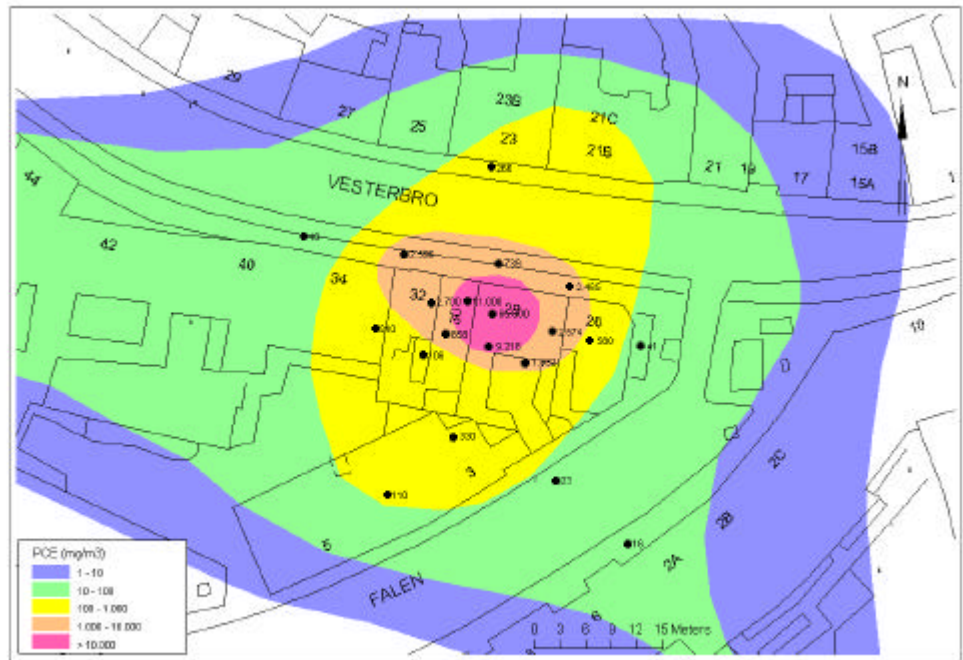
Resultaterne viser, at forureningsindholdet i poreluften inden for influensområdet er blevet reduceret meget effektivt. Fra et indhold på op til 66.000 mg/m³ i kildeområdet, er indholdet efter 1 års drift på 0,1-5 mg/m³.

Tabel 6.1 PCE-indhold i den umættede zone (mg PCE/m³) før oprensning (3 januar 2001) og efter 10-12 mdr's drift (oktober 2001 til januar 2002). resultaterne er baseret på kulrørprøver og på PID-målinger omregnet til koncentration (mærket med *).

Prøve	TB1	TB2	TB3	TB4	TB5	TB6	TB7	TB8	TB9	TB10
Før opstart	2.700	105 *	11.000	860 *	66.000	740 *	9.200 *	2.600 *	310	330
Efter 1 års drift	0,2	<0,01 *	0,68	<0,5 *	2	<0,5 *	1,8	0,2 *	0,038	0,1 *
Prøve	TB11	TB12	TB13	TB14	TB15	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5
Før opstart	1.800 *	580	2.570 *	2.500 *	270 *	48	41	110	23	16
Efter 1 års drift	0,059	0,034	0,098	0,94	0,22	0,1	0,9	0,6	4,5	0,5

Uden for influensradius (PB1-PB5 og TB15) ses ligeledes en effektiv reduktion som følge af vakuumentileringen.

Selv under og lige efter dampinjektionen har der ikke været noget tegn på, at forureningsindholdet har været stigende. Resultaterne viser således, at der ikke er sket nogen væsentlig spredning af PCE i den umættede zone som følge af dampinjektionen.



Figur 6.1 Forureningsindhold i umættet zone før oprensning (3. januar 2001) og efter 10-12 måneders drift (oktober 2001 - januar 2002).

6.1.1 Restforurening i umættet zone

Til vurdering af oprensningseffekten er der den 10. januar 2002 udført tilbageslagsmålinger i udvalgte poreluftboringer i den umættede zone efter 18 dages stop af vakuumentileringen. Herudover er der den 3. august 2002 udført tilbageslagsmålinger efter 94 dages stop af vakuumentilering. Resultaterne af tilbageslagsmålinger fremgår af tabel 6.2.

Tabel 6.2 Tilbageslagsmålinger. PCE-indhold i mg/m³.

	Tidspunkt	TB1	TB3	TB5	TB11	TB13	PB6
Placering	-	Vesterbro 32	Kilde- område	Kilde- område	Baggård, renseri	Under renseri	Under gulv, kildeområde
Før afværge	Udtaget 3. januar 2001	2.700	11.000	66.000	1.800	2.570	170 ¹⁾
Under drift	20. dec. 2001. Flow ca. 250 m ³ /h)	0,2	0,68	2	0,059	0,098	1,2
Tilbageslags- måling	10. januar 2002 (18 dages stop af ventilation)	2	5,6	1,3	5	0,12	2,4
Tilbageslags- måling	2. august 2002 (efter 94 dage stop af ventilation)	3,3	5,7	3,7	3,1	0,93	2,7

¹⁾: Fra undersøgelse i 1998 /1/

Resultaterne af tilbageslagsmålinger viser ikke den store forskel, om der foretages målinger efter 18 dage eller 3 måneder. Forureningsniveauet i kildeområdet ligger i intervallet 1,3 til 5,7 mg/m³, hvilket er meget lavt i forhold til forureningsniveauet før oprensningen, hvor der blev målt indhold på op til 66.000 mg/m³. Målinger i poreluften viser, koncentrationerne i det opvarmede kildeområde ligger på samme niveau som i baggården, hvor der kun er blevet ventileret "koldt". Da forureningen før oprensningen var langt højere i det opvarmede område, betyder det, at der er sket en mere effektiv oprensning i kildeområdet end i baggården, selv om forureningsniveauet her var langt mindre.

Restforureningens størrelse i den umættede zone vurderes at være i størrelsesorden 5 kg PCE. Dette er beregnet ud fra følgende antagelser:

- Et område på ca. 300 m² er forurenet i en dybde på 6 m (umættede zone). Dette udgør et volumen på 1800 m³ svarende til 3500 tons jord.
- Det gennemsnitlige forureningsindhold i poreluften er ca. 3-4 mg PCE/m³, hvilket svarer til en jordkoncentration på 1-2 mg/kg (fugacitetsberegning med JAGG-modellen). Med et forurenet jordvolumen på 3500 tons giver det en restforurening i jorden på 3,5-7 kg.

PCE mængden i poreluften er meget lille, i størrelsesorden 2-3 g. Det beregnes ud fra et forurenet jordvolumen på 1800 m³, en porøsitet på 0,45 og et gennemsnitligt forureningsindhold i poreluften på 3-4 mg PCE/m³.

6.2 Forureningsudvikling og spredning i mættet zone

Til vurdering af udvikling af forureningsniveauet, herunder om der er sket en uhensigtsmæssig spredning eller tab af PCE til grundvandet som følge af dampinjektionen, er der udtaget vandprøver i området omkring og nedstrøms dampinjektionsområdet. Vandprøverne er udtaget før start af afværgepumpning, efter 3 måneders drift af vakuumventilering og for hver måned under dampinjektionen. Der er ligeledes udtaget vandprøver 2 og 5 måneder efter stop af dampinjektion. Resultater af PCE-indholdet fremgår af tabel 6.3. Indholdet af øvrige komponenter af chlorerede opløsningsmidler

udgør typisk under 1% af PCE-indholdet, hvorfor disse ikke er medtaget i afrapporteringen. Alle resultater fremgår af bilag 12.3.

I opstrøms retning er der sket et fald i PCE indholdet, hvilket viser at der ikke er sket nogen spredning af forurening via poreluften eller kondensationsfronten i denne retning. I kildeområdet ses et fald i PCE indholdet i AV1 og dampboringen. Umiddelbart nedstrøms kildeområdet i boring OBS1 ses derimod en stigning i forureningsindholdet. Denne stigning vurderes hovedsageligt at skyldes ændring i pumpestrategi, idet oppumpningen fra AV3 (som står ca. 1 m fra OBS1) stoppede i starten af august måned 2001 pga. termofejl. Variationerne i forureningsindholdet i F7 og F8 vurderes at skyldes naturlige årstidsvariationer. Det stigende indhold i F1 kan ikke udelukkes at skyldes mobilisering af PCE som følge af dampinjektionen.

Sammenfattende vurderes forureningsindholdet i grundvandet gennemgående at være faldet under og efter dampinjektionen. Det vurderes at der ikke er sket noget væsentligt tab af PCE til grundvandet som følge af dampinjektionen.

Tabel 6.3 PCE-indhold i grundvandsmoniteringsboringer ($\mu\text{g/l}$)

Placering	Opstrøms				Kildeområde			Nedstrøms			
	F101	F102	F103	F4	OBS1	AV1	DB1	F1	B1	F7	F8
Dato/boring	F101	F102	F103	F4	OBS1	AV1	DB1	F1	B1	F7	F8
14. dec. 2000	13	650	45	48	4800	ia	13.000 ¹	50	410	3100	560
26. marts 2001	8,8	96	6,4	37	1500	ia	-	36	240	-	-
14. juni 2001	10	110	6,6	42	1400	ia	-	57	220	-	-
12. juli 2001	4,3	40	1,8	33	1800	110	-	56	230	-	-
28. aug. 2001	5,3	70	6,5	29	900	30	-	16	230	-	-
8. nov. 2001	12	48	7,6	25	2700	31	-	110	240	930	260
11. feb. 2002	5,8	23	5,5	41	2300	26	15 ²	210	400	1200	520

:- Ikke analyseret

1): Tidligere undersøgelse, boring F10

2): Udtaget 11. marts 2002

Figur 6.2 viser forureningsindholdet før oprensningen og efter 14 måneders drift. Der ses et markant fald i forureningsindhold i kildeområdet omkring væskespildtanken, som kan skyldes flere forhold, henholdsvis:

- Grundvandsoppumpningen
- Den kraftige reduktion af forureningsindholdet i den umættede zone
- Oprensning af den øverste del af grundvandet som følge af opvarmningen.

Erfaringsmæssigt har afværgepumpning ikke den store oprensningseffekt, hvorfor de 2 sidstnævnte forhold vurderes at have størst betydning.

Forklaringen kunne også være fortynding med kondenseret damp som følge af dampinjektion, men denne faktor vurderes kun at have medført et begrænset fald i forureningskoncentration.

Det ses ligeledes af figur 6.2 at oprensningen ikke har haft nogen nævneværdig effekt nedstrøms kildeområdet.

De gennemførte pejlinger fra monitoringsboringerne viser, at der både under og efter dampinjektionen har været hydraulisk kontrol med det område, som har været påvirket af dampopvarmningen. Pejlinger og potentialekort fremgår af bilag 14.



Figur 6.2 Forureningsudbredelse i grundvandet før oprensning (øverst) og efter 14 måneders drift (nederst).

6.2.1 Restforurening i mættet zone

Efter dampoprensningen er forureningsniveauet i grundvandet i selve kildeområdet under 100 µg/l, medens forureningsniveauet i baggården til renseriet er op til ca. 2.000 µg PCE/l. Med den efterfølgende injektion af

kaliumpermanganat i starten af maj måned 2002, vurderes den væsentligste grundvandsforurening i kildeområdet og umiddelbar nedstrøms herfor også oprenset. Oprensningen i grundvandet med kaliumpermanganat forventes afrapporteret primo 2003.

6.3 Forureningsudvikling i indeklima

Til overvågning af oprensningens effekt på indeklimaet på Vesterbro 30 er der udført indeklimatemålinger ved passiv opsamling på ATD-rør. Da der fortsat er renseri på Vesterbro 28, er der udført referencemålinger på Vesterbro nr. 28. Der er udtaget prøver før opstart af vakuumentilering efter 3 måneders drift af vakuumentilering samt efter 1 og 3 mdr. stop af dampinjektionen. Resultater fremgår af tabel 6.4.

Tabel 6.4 Indeklimamålinger ved passiv opsamling på ATD-rør. Kvalitetskriterium for indeluft i beboelse er $6 \mu\text{g PCE}/\text{m}^3$.

Adresse	Målepunkt	PCE-indhold, ($\mu\text{g PCE}/\text{m}^3$)			
		2.-4. januar 2001	23.-30. marts 2001	4.-11. okt. 2001	13.-20. dec. 2001
Periode		2.-4. januar 2001	23.-30. marts 2001	4.-11. okt. 2001	13.-20. dec. 2001
Vesterbro 28	Butik	3.100	560	1.200	1.100
Vesterbro 28	Strygerum	8.300	860	1.600	1.800
Vesterbro 28	Baglokale, rensemask.	26.000	21.000	>17.000	8.600
Vesterbro 28	Baggård, udendørs	180	22	64	22
Vesterbro 30	Stue	490	9,1	62	7,4
Vesterbro 30	Køkken	480	9,5	62	7,7
Vesterbro 30	1. sal	530	9	56	7,8
Vesterbro 30	Skunk, 1. sal	-	-	-	9,2
Vesterbro 30	Gårdhave, udendørs	35	12	17	4,7
Vesterbro 30	Nordfacade, udendørs	-	-	-	0,47

∴ Ingen måling

Det ses, at PCE-indholdet i indeklimaet på Vesterbro 30 er reduceret væsentligt, og at indholdet nu ligger på niveau med kvalitetskriteriet. Det ses ligeledes, at der er sammenhæng mellem PCE i udeluften og i indeklimaet på nr. 30. Det høje PCE-indhold i indeluften på nr. 30 i oktober 2001 vurderes således at være påvirkning fra drift af renseriet. Ejeren af renseriet har bekræftet, at udsugningen fra renseriet ikke har fungeret optimalt under målingerne i oktober 2001.

Efter igangsætningen af oprensningen vurderes bidraget fra jordforureningen til indeklimaet på Vesterbro 30, at have været meget lille og væsentligt under kvalitetskriteriet på $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - begrundet ud fra følgende:

- Radonmålingerne viste, at når ventilationsanlægget kører, er der ikke noget betydende bidrag af radon (og PCE) fra jorden som følge af

konvektion. Der er målt undertryk i TB3 på ca. 800-1100 pa. i måleperioden.

- Ved indeklimatemålingerne har vakuumentileringen kørt uafbrudt i hele måleperioden, hvorfor der har været undertryk i det kapillærtrykbrydende lag (målt til ca. 5-6 pa). Der har således ikke været konvektionsbidrag til indeklimaet fra jordforureningen.
- PCE-indholdet lige under gulv i nr. 30 har ved de 3 indeklimatemålinger efter start af vakuumentileringen ligget i intervallet 0,5-1,3 mg/m³. Ud fra beregninger med JAGG-modellen vil dette give et diffusionsbidrag til indeluften på langt under kvalitetskriteriet for PCE.

Sammenfattende vurderes, at ventilationsanlægget effektivt har nedbragt PCE-bidraget til indeklimaet fra jordforureningen til et absolut minimum på Vesterbro 30 og i alle andre berørte boliger.

6.4 Geotekniske påvirkninger som følge af opvarmning af jorden

For at undersøge om opvarmningen evt. medfører hævnning eller sænkning af fundamentene, er der løbende udført præcisionsnivellering fra 20 udvalgte målepunkter på bygninger henholdsvis før, under og efter dampinjektionen. Der er i alt udført 14 målerunder, hvoraf den første er gennemført før starten af dampinjektion.

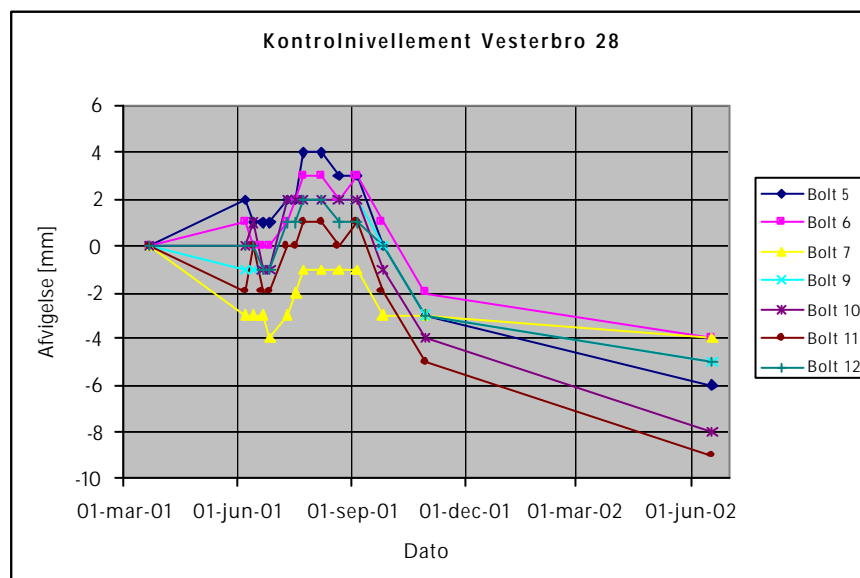
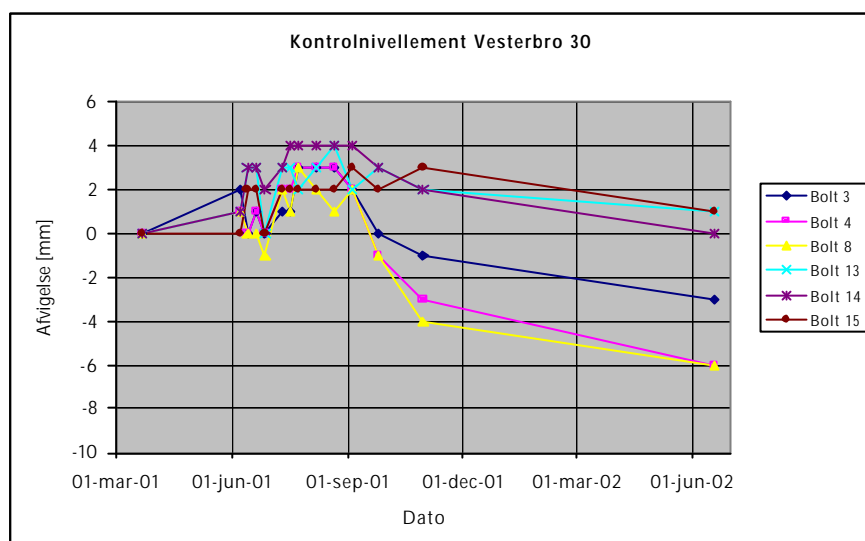
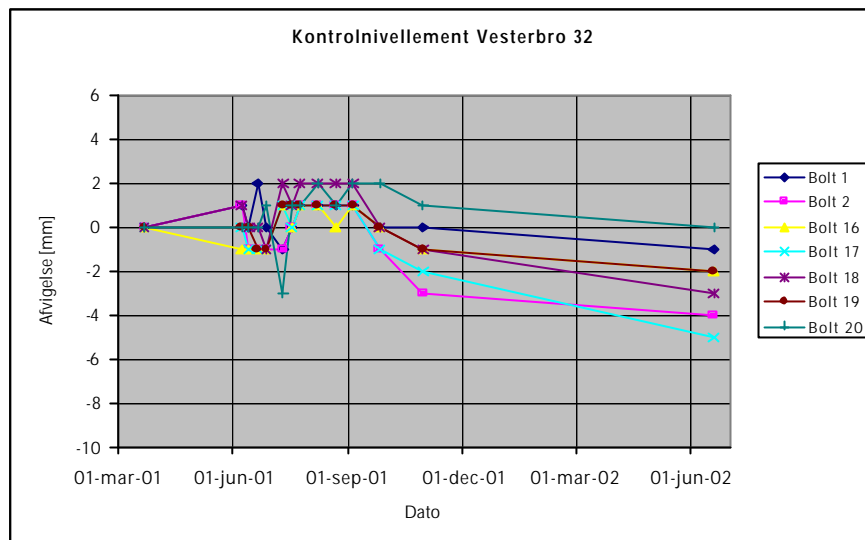
Alle måleresultater er vist i bilag 16. Afvigelsen mellem de enkelte målerunder er vist på figur 6.3. Der er taget udgangspunkt i målekoterne den 22. marts, dvs. før injektion af damp. Den relative ændring i målingerne er vist i forhold hertil. En ændring på -0,003 m viser således, at der er sket en sætning på 0,003 m (3 mm). En ændring på 0,002 m viser at der er sket en hævnning på 2 mm. Usikkerheden på målingerne udgør ca. 1 mm mellem de enkelte målerunder.

For at vurdere om sætningerne kan have sammenhæng med opvarmningen, er resultaterne afbildet som funktion af afstanden fra dampinjektionsboringen, jf. figur 6.4. Afvigelsen fra startkote for de enkelte målepunkter er her vist for 3 måledage, henholdsvis den 7. august under dampinjektionen, den 30. oktober ca. 2 måneder efter dampinjektionen og den 18. juni 2002 ca. 9½ måneder efter stop af dampinjektionen.

Resultaterne af præcisionsnivelleringen viser, at der under dampinjektionen skete en mindre hævnning af de fundamenter, som står tættest på injektionsområdet, i størrelsesordenen 1-4 mm.

Efter 2 måneders stop af dampinjektion ses en generel sætning af de målepunkter, som står tættest på dampinjektionsboringen med typiske sætninger på 1-4 mm og med den højeste sætning på 5 mm.

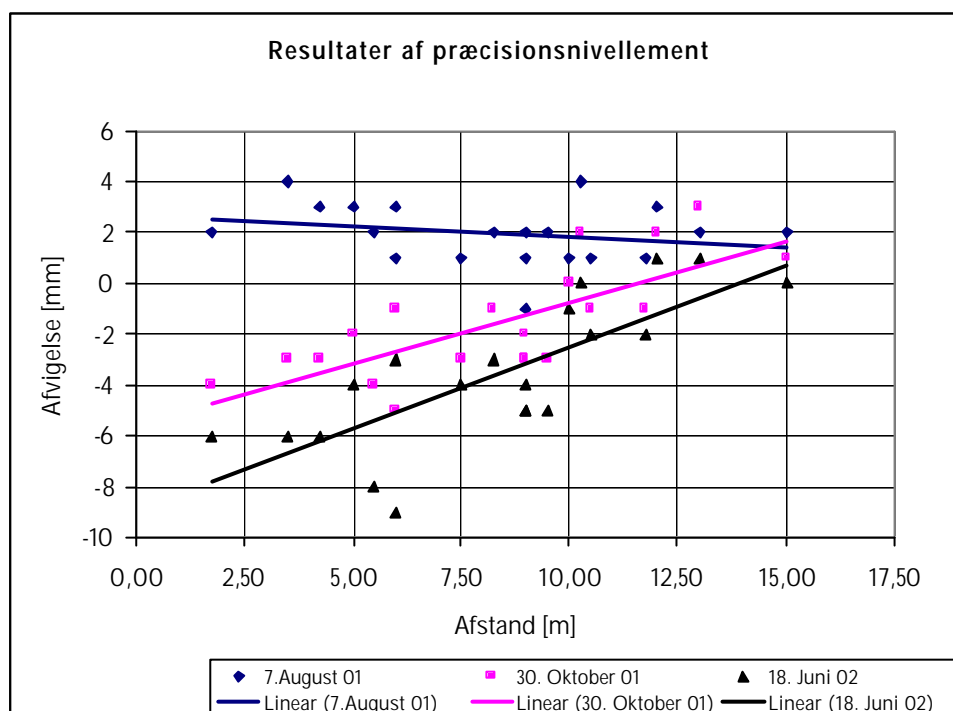
Ved den sidste målerunde i juni 2002 er der gennemgående sket en yderligere sætning af de fundamenter, som står tættest på injektionsområdet (eksempelvis pkt. 5 og 8). Sætningerne tættest på dampinjektionen er typisk på 2-4 mm og de højeste sætninger på 6 mm. Det skal dog bemærkes, at der er sket afgravning af 9 tons jord ved dampinjektionsboringen. Det kan derfor ikke afvises, at sætningerne også kan skyldes denne afgravning i kildeområdet.



Figur 6.3. Resultater af præisionsnivelement. Figuren viser relativ afvigelse i forhold til første målerunde. Dampinjektion sker i perioden ul timo maj til 6. september 2001.

I det nordvestlige hjørne i baggården til Vesterbro 28, er der ligeledes sket sætning ved punkt 10 og 11, i størrelsesordenen 8-9 mm i forhold til den forrige målerunde. Disse sætninger vurderes primært at være en følge af den gennemførte jordoprensning og sekundært dampinjektionen.

De konstaterede sætninger som følge af dampoprensning på typisk 2-6 mm vurderes ikke at medføre nogen betydende skader på bygningerne. Derimod kan det ikke afvises, at de konstaterede sætninger i baggården kan give mindre revner.



Figur 6.4 Sætninger i mm i forhold til afstand fra dampinjektionsboring under dampinjektion (7. august 01) og efter 2 og 9 måneders stop af dampinjektion samt (30. okt. 01 og 18. juni 02). Sætninger er beregnet ud fra udgangsniveau i marts 2001.

7 Diskussion og erfaringer

7.1 Oprensingsstrategi

Strategien med at varme jorden op under forureningen og efterfølgende opvarme de øverste jordlag via varmeledning, har i den konkrete sag vist sig at være vellykket. Det er lykkedes at styre dampzonens vertikale udbredelse, således at der ikke er sket en u hensigtsmæssig opvarmning af overliggende bygninger. Der er ligeledes ikke sket en spredning af forureningen, hverken i den mættede eller umættede zone, og der er sket en tilfredsstillende kildefjernelse. Den forudgående kolde ventilation har vist sig at være formålstjenlig. Da dampinjektionen startede, var det meste af forureningen fjernet, hvilket minimerer risikoen for spredning af forureningen. Det vurderes, at opvarmningen af kildeområdet har reduceret driftstiden med mere end 2 år og bidraget til en oprensingsgrad af de lavpermeable siltlag, som ikke er mulig med traditionel "kold ventilation". Efter stop af vakuumventileringen i 3 måneder viser målingerne, at tilbageslaget i det opvarmede kildeområde er meget lille.

Målinger i poreluften viser, koncentrationerne i det opvarmede kildeområde ligger på samme niveau som i baggården, hvor der kun er blevet ventileret "koldt". Da forureningen før oprensningen var langt højere i det opvarmede område, betyder det, at der er sket en mere effektiv oprensning i kildeområdet end i baggården, selv om forureningsniveauet her var langt mindre.

7.2 Edb-model lering

Gennemgående kan det siges, at dampoprensningen i det store hele forløb uden de store problemer, og at opvarmningen gik som forventet. Edb-modelleringen har været et meget nyttigt planlægningsredskab. Det har været muligt at modellere de forhold, som på forhånd vakte bekymring og herefter tilpasse oprensningen, så der blev taget hånd om eventuelle problemer. Specielt med hensyn til den vertikale dampspredning har modellen været meget nyttig, idet der på forhånd var stor bekymring for den vertikal forurenings- og dampspredning. Også til vurdering af injektionsmængder og -dybde samt til placering af temperaturovervågningspunkter har edb-modellen været til stor nytte.

Da forholdet mellem horisontal og vertikal permeabilitet spiller en stor rolle for varmeudbredelsen anbefales det, at denne bestemmes i fremtidige projekter, idet det giver et langt sikrere beregningsgrundlag.

7.3 Vakuume ekstraktionsboringer

Vakuume ekstraktionen er sket fra både horisontale og vertikale boringer. De vertikale boringer har kørt uden problemer og har været velydende både før, under og efter dampinjektionen. Derimod har der været flere problemer med de horisontale ekstraktionsboringer, hvor især 3 af filtrene har været dårlige. De største problemer har været ringe ydelse og vand i filtrene. De 2 vigtigste

horisontale filtre, som er placeret tæt på kildeområdet, har dog fungeret upåklageligt både før, under og efter dampinjektionen. Det kan derfor anbefales primært at etablere lodrette boringer eller at forsøge at udføre de horisontale boringer som forede boringer. Herved er det muligt at gruskaste, etablere pakninger og tilsætning af boremudder undgås. Det er ligeledes meget vigtigt, at boringerne etableres med fald, således der ikke sker opstuvning af vand i boringen. Det må derfor konkluderes, at horisontale boringer godt kan anvendes (også som blindhole boringer) til en dampoprensning, men at der må påregnes flere driftsproblemer end ved brug af traditionelle lodrette boringer.

Endvidere er det vigtigt at tage højde for at der ofte vil være en lavere virkningsgrad af en horisontal boring fordi den vertikale permeabilitet ofte vil være væsentligt lavere end den horisontale. En horisontal boring, vil på grund af lagdelingen ikke suge så meget over og under filteret, men suge på en relativt større horisontal flade.

7.4 Temperaturboringer

Både de manuelle og kontinuerte temperaturmålinger, der opsamles via SRO har fungeret meget tilfredsstillende. Kun én målesonde er blevet defekt under driftsperioden (TB11-2,5 m). Specielt SRO-målingerne har været til stor hjælp under dampinjektionen, idet det har været muligt on-line at følge temperaturudviklingen i jorden. Afhjælpning af problemer med uhensigtsmæssig opvarmning eller ændring af driftstrategi har derfor kunnet ske løbende.

7.5 Kontinuerte PID-målinger

Det må konkluderes at PID-måleren ikke har fungeret tilfredsstillende udover de første 2 måneders drift. Det har ikke været muligt, at lokalisere en entydig fejlkilde ved PID-måleren, men det kan skyldes flere forhold, eksempelvis overførsel af signal til SRO-anlæg, software til SRO-anlæg, slange forbindelser til PID-måleren, aflejring af smuds på UV-lampe, følsomhed over for vanddamp eller for lav prøvetemperatur ved detektoren.

Leverandøren har efterfølgende testet PID-måleren på sit laboratorium i sommeren 2002 dels for at efterprøve om apparatet måler korrekt og dels for at teste apparatets følsomhed over for vanddamp. Ud fra forsøgene konkluderede leverandøren at apparatet målte korrekt og at det ikke var specielt følsomt over for vanddamp.

Det er derfor nærliggende at konkludere at et af hovedproblemerne med den kontinuerte PID-måler har været for mange aktører, henholdsvis leverandør, elektriker, SRO-programmør samt entreprenørens driftspersonale. De mange aktører har givet uklarhed om ansvarsforhold, og det har været meget vanskeligt og krævet mange ressourcer at få udbedret de opståede fejl. I fremtidige projekter, anbefales det, at PID-måleren leveres, opsættes og drives af et firma som har erfaring med at drive måleudstyr. PID-måleren bør derfor være en særskilt bygherreleverance.

7.6 Radonmålinger

Radonmålingerne har vist at det er muligt at skelne, om påvirkning af indeklimaet i Vesterbro 30, skyldes jordforureningen eller påvirkning fra driften af rensriet.

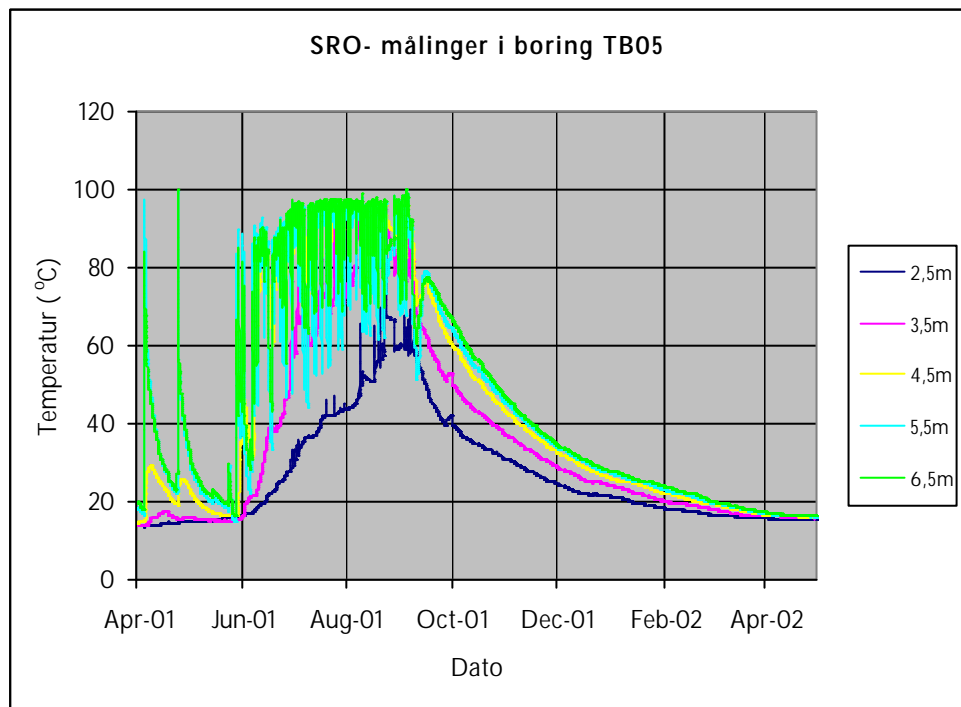
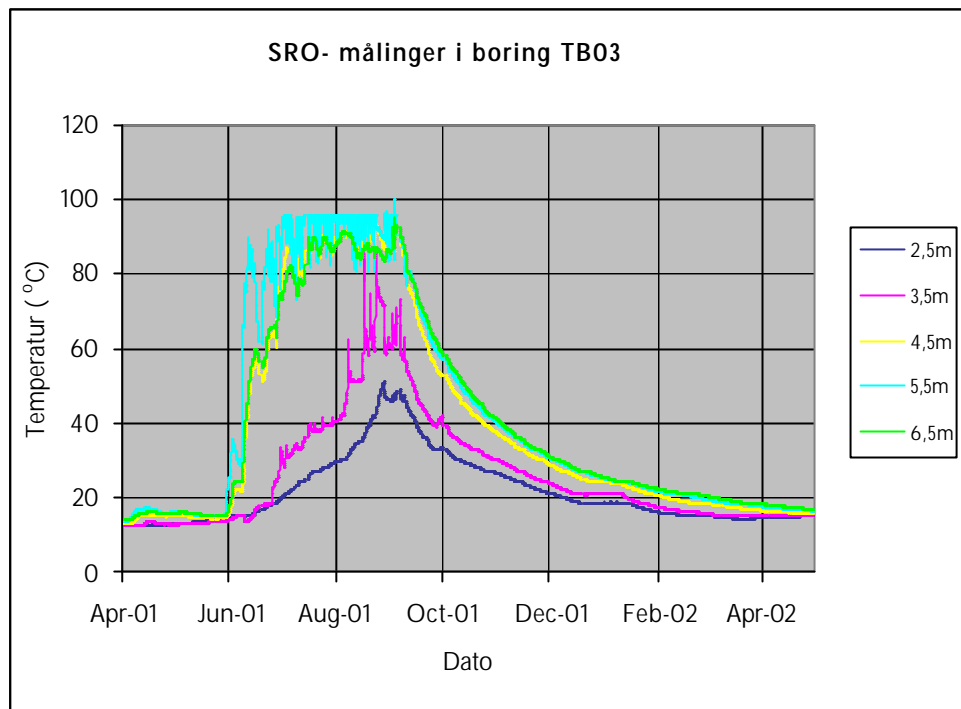
Ved måling af radonindholdet i den opsugede luft vurderes det, at vakuumanlægget har ventileret omkring 10.000 m³ luft (influensområde). Til sammenligning blev influensområdet ud fra traditionelle vakuummålinger i den umættede zone skønnet til at være ca. 6000 m³ jord. Det vurderes at influensområdet ud fra radonmålinger giver et bedre estimat over influensområdet end traditionelle vakuummålinger.

Undersøgelsen demonstrerer, at radon kan anvendes som sporgas for jordluftindtrængning til huse på forurenede rensrigrunde, og til vurdering af influenszonen for vakuumanlæg. Anvendelse af kontinuerte målinger forekommer at være særligt egnede til undersøgelser, hvor der allerede er installeret afværgetiltag (dvs. hvor der kan laves "tænd og sluk" målinger).

7.7 Styring af dampudbredelse

Den anvendte oprensingsstrategi har givet anledning til en vis bekymring for, om det var muligt at styre opvarmningen opadtil i forhold til jordinstallationer og boliger. Resultaterne af oprensningen har vist at dette ikke blev til et problem. Efter opvarmningen kan det konstateres, at dampzonen nåede en radius på ca. 10 m, og at den maksimale vertikale udbredelse var ca. 3 m u.t. i injektionsområdet. Temperaturmålingerne viste, at dampzonen primært er spredt horisontalt hen over grundvandsspejlet og ca. 3 m herover. Det viste sig, at ventileringen fra de overliggende ekstraktionsboringer havde en styrende effekt på den vertikale varmeudbredelse. Ventileringen fra de horisontale boringer bevirkede, at dampzonen ikke nåede væsentligt over ventilationsniveauet. Dette forhold er illustreret på figur 7.1, der viser temperaturudbredelsen i TB3 og TB5. TB3 står ca. 1 m fra den horisontale ventilationsstreng og TB5 står ca. 3 m herfra.

I TB3 er det vanskeligt at få en temperaturstigning i og over 3,5 m's dybde, som følge af ventileringen fra HV1, der ligger i 4 m's dybde. Først da ydelsen på den horisontale ventilationsstreng HV103 blev neddroset omkring 1. august, var det muligt at få temperaturen til at stige til det ønskede niveau i 3,5 m's dybde. I boring TB5 ses en langt hurtigere temperaturforøgelse opadtil, men denne boring ligger også længere væk fra HV1. Disse observationer var umiddelbart overraskende, idet de forudgående edb-modelleringer viste, at vakuumelekstraktionen kun havde mindre betydning for den vertikale temperaturudbredelse. Men da op til 40 % af dampen suges ud fra ventilationsboringerne under opvarmningsperioden (jf. afsnit 5.5.2), er det dog ikke så overraskende at ventilationen har en betydning.



Figur 7.1 Kontinuerlt temperaturudvikling i TB3 og TB5 (SRO-målinger).

7.8 Tilsætning af trykluft

Der blev under dampinjektionen injiceret 20-30 m³ luft i timen ved et tryk på ca. 3 bar, hvilket svarer til ca. 75 kg luft i timen. Med en typisk dampinjektionsrate på 150-200 kg i timen, svarer det til et luft-/dampforhold på 37-50% w/w. Dette forhold var lidt højere end planlagt, men for at minimere tabet af PCE til grundvandet blev det forsøgt at tilsætte så meget luft som muligt. En blanding på 50 % w/w har en temperatur på ca. 92 °C ved atmosfæretryk. Dette forklarer at temperaturerne i dampzonen typisk har ligget i intervallet 92-96 °C og ikke 100 °C som umiddelbart forventet.

Da det viste sig, at det var muligt at opvarme jorden selv med dette høje indhold af luft, blev det besluttet at fortsætte hermed og det vurderes, at tilsætning af trykluft har medført, at der stort set ikke er tabt nogen forurening til grundvandet.

Under hele dampoprensningen har der været undertryk i forhold til atmosfæren og der har således ikke været problemer med udstrømning af luft til overliggende bygninger.

7.9 Energiforbrug og energitab

Ved COWI's indledende vurdering af nødvendigt dampbehov blev det vurderet at der skulle bruges ca. 50 m³ damp for at opvarme ca. 700 m³ jord til ca. 60 grader i gennemsnit. Ved beregningen blev der antaget en varmekapaciteten på 0,6 Kwh/m³ °C, en starttemperatur på ca. 5 °C, et varmetab på ca. 50% og at 1 kg damp indholder ca. 0,7 Kwh.

Det reelle område som blev opvarmet til gennemsnitligt 60 grader er i størrelsesorden 1500-2000 m³ og der er brugt 231 tons damp. Dvs. at det opvarmede område er næsten 3 gange så stort som forventet og dampforbruget 4-5 gange så stort. Den horisontale udbredelse af varmen har således været større og den vertikale temperaturudbredelse mindre end forventet. Forklaringen herpå vurderes at være en kombination af, at den vertikale permeabilitet er langt mindre end den horisontale permeabilitet og at den kraftige vakuumelekstraktion har nedsat varmeudbredelsen opadtil. I overensstemmelse hermed har efterfølgende edb-beregninger i bilag 18 vist, at den vertikale permeabilitet på Vesterbro er ca. 10 gange mindre end den horisontale permeabilitet.

Det fremgår således at forholdet mellem den horisontale og vertikale permeabilitet spiller en stor rolle for den horisontale varmeudbredelse. Det er derfor ikke sikkert at der i en anden sag kan opvarmes et tilsvarende område fra én boring med ventilation fra overliggende ventilationsboringer.

Det vurderes at opvarmningen opadtil i kildeområdet kunne være sket hurtigere med en mindre vakuumelekstraktion i kildeområdet. Herved kunne dampmængden og injektionsperioden være reduceret væsentligt.

7.10 Spredning af forurening

En af bekymringerne ved projektet var, om der skete en utilsigtet kondensering af PCE, som kunne mobiliseres til grundvandet eller spredes i den umættede zone. Monitoringen af forureningen i den mættede og umættede zone viser, at der ikke er sket nogen væsentlig spredning af forureningen som følge af dampinjektionen. Det er især positivt, at det ikke ser ud til at der er sket noget tab af PCE til grundvandet. Eksempelvis viser en grundvandsvandprøve fra dampboringen, som er udtaget 6 måneder efter stop af dampinjektionen, kun et PCE-indhold på 15 µg/l. Til sammenligning var forureningsindholdet i grundvandet før oprensningen på 10-15.000 µg PCE/l i kildeområdet. Det vurderes, at tilsætning af luft til dampen har medført, at den frigivne PCE-forurening i den umættede zone er blevet tilført vakuumelekstraktionsanlægget og ikke kondenseret og tilgæet grundvandet.

7.11 Massefjernelse

Der er samlet fjernet omkring 330-340 kg PCE ved de gennemførte oprensningstiltag pr. 1. maj 2002, jf. nedenstående tabel 7.1. Før dampinjektionen var der fjernet ca. 250 kg PCE, og 3½ måneder senere var der fjernet ca. 280 kg, altså en øgning på ca. 30 kg. Hvis ikke der var injiceret damp, ville der i den samme periode maksimalt være fjernet ca. 5 kg PCE, dvs. at massefjernelsesgevinsten har været ca. 25 kg, svarende til en reduktion i driftstiden på mindst 2 år. Før stop af vakuumelekstraktionen den 1. maj 2002 var massefjernelsen nede på omkring 2 kg/år.

Den relative andel af PCE som er fjernet under selve dampinjektionen har været mindre end forventet, idet den kun udgør omkring 10 % af den samlede massefjernelse ved vakuumelekstraktionen. Der er selvfølgelig en vis usikkerhed ved beregning af massefjernelsen, idet der kun er udtaget stikprøver af forureningsindholdet i den ekstraherede poreluft. Afkogning af fri fase kan være sket inden for korte tidsperioder og er ikke nødvendigvis blevet registreret ved COWI's målinger. Det kan derfor ikke afvises at massefjernelsen er underestimeret. Det vides heller ikke om der er sket en vådoxidation af PCE som følge af opvarmningen, hvor PCE nedbrydes til kuldioxid og vand. Selv om der kun er fjernet omkring 10 % af forureningen under dampinjektionen, er erfaringen fra andre in-situ projekter at det netop de resterende 10 % af forureningen der volder problemer med tilbageslag og medfører at mange in-situprojekter ikke kan afsluttes inden for en rimelig tidshorisont.

Tabel 7.1 Opgørelse over massefjernelse

Aktivitet	Mængde PCE oprenset (kg)
Bortgravning af væskespildtank, Vesterbro 28	30-40
Bortgravning i baggård, Vesterbro 28	15-20
Vakuumentilering pr. 1. maj 2002	ca. 282
Grundvandsoppumpning pr. 1. maj 2002	1
Samlet	329-343

7.12 Driftproblemer

De væsentligste erfaringer fra oprensningen på Vesterbro har været:

- Det er vigtigt at der er en hurtig beslutningskompetence mellem bygherre/rådgiver og entreprenøren, således opståede fejl kan rettes i tide. Selv kortvarige stop af dampinjektionen giver store opstartsomkostninger.
- Under dampoprensningen steg modtrykket i formationen, hvorfor det blev vanskeligere at oppumpe den ønskede mængde uden at vakuumpumpen skulle arbejde for meget. Det kan derfor anbefales at overdimensionere ekstraktionsanlægget både med hensyn til pumpekapacitet men også med antal ekstraktionsfiltre, således at det ønskede flow kan opretholdes under dampinjektionen. Køleanlægget bør også overdimensioneres (større køleflader end på Vesterbro) og gøres fleksibelt således at kølingen kan reguleres efter varierende flow. Det anbefales at kølefladerne udlægges for en maksimal overfladetemperatur på 2°C.
- Udluftning af dampgeneratoren bør kunne foretages automatisk, hvilket kan spare betydelige omkostninger til tilsyn.

- Erfaringen fra projektet viser, at det er vanskeligt at overholde støjkravene i boligområder. Det er derfor vigtigt, at der i udbudsmaterialet er en klar beskrivelse af støjdæmpende foranstaltninger. Det er desuden vigtigt med et afklaringsmøde tidligt i etableringsfasen, så eventuelle problemer afhjælpes, inden anlægget tages i brug.

8 Miljøvurderinger

8.1 Miljøvurdering i henhold til "Miljørigtig oprensning af forurenede jord og grundvand"

Beslutningen om valg af afværgestrategi er truffet på baggrund af overvejelser om dels teknisk/praktisk gennemførlighed, dels ved vurdering af ønsket oprensningsniveau og dels ud fra økonomiske overvejelser.

Et supplement til beslutningsprocessen kunne være anvendelsen af en mere systematiseret metode til at sammenholde de miljømæssige gevinster, som oprensningen forventes at medføre, med de miljømæssige belastninger, som afværgeforanstaltningerne indebærer. En sådan metode foreligger i form af projektet "Miljørigtig oprensning af forurenede jord og grundvand" udarbejdet februar 2000 som en del af EU LIFE Projekt for Banestyrelsen og DSB. /14/

Idet metoden "Miljørigtig oprensning af forurenede jord og grundvand" ikke har været anvendt ved valg af afværgestrategi i dette projekt, er det naturligvis interessant at undersøge, om den valgte oprensningsmetode ud fra et miljømæssigt synspunkt samlet set har været en gevinst.

8.2 Overordnet miljøvurdering

Indledningsvis er der foretaget en overordnet miljøvurdering, idet det skønmæssigt er forsøgt at give et overblik over miljøbelastninger og miljøgevinster fra den konkrete sag med oprensning af forurening med chlorerede opløsningsmidler på Vesterbro 28-30, Odense. Idet afværgeforanstaltningerne på nuværende tidspunkt er gennemført, er der kun vurderet på den konkrete valgte afværgestrategi, som omfatter vakuumventilering af den umættede zone suppleret med dampinjektion til opvarmning af lavpermeable områder for mere effektiv fjernelse af forurening (PCE). Afværgestrategien omfatter desuden oppumpning af forurenede grundvand for at sikre fanekontrol i forbindelse med dampopvarmningen.

Miljøvurderingerne omfatter ikke boringer udført i forbindelse med forureningsundersøgelse af lokaliteten. Ligeledes omfatter vurderingen ikke afgravning af forurenede jord og oprensning af forurening i mættet zone i form af kemisk oxidation ved injektion af kaliumpermanganat.

For nærmere beskrivelse af lokaliteten samt forureningsmæssige forhold henvises til afsnit 2 i denne rapport. Beskrivelse af afværgestrategi fremgår af afsnit 3.

En overordnet miljøvurdering af miljøbelastninger i forbindelse med vakuumventilering og dampinjektion fremgår af tabel 8.1.

Tabel 8.1 Miljøbelastninger i forbindelse med vakuumentilering og dampinjektion

Afværgemetode	Påvirkning	Potentiel effekt
Vakuumentilering og dampinjektion		
Etablering	Forbrug	Ressource
2 vertikale (7 m) og 2 horisontale ventilationsboringer (40-50 m.) Vertikal dampinjektionsboring (7 m.) 3 boringer til oppumpning af grundvand Monitoringsboringer grundvand, poreluft og temperatur Container m. vakuumpumpe, kompressor, dampanlæg og SRO-overvågning Entreprenørarbejde og transport	Diesel: Dampinjektion 20.200 l (drift) Etableringstransport ~2.000 l (etablering, drift og demontering) Elektricitet: Vakuumanlæg 123 MWh (drift) Kul 1.000 kg (filtre, drift) Beton + støbejern (brønde) Stål (filtre og dampledning) PVC (ledninger) PE (filterrør og trykledninger)	Stor effekt: Råolie (drift) Stenkul (drift) Nikkel (etablering) Lille effekt: Naturgas (etablering, drift) Kobber (etablering) Jern (etablering) Grus-kvalitet (etablering) Vand (drift)
Drift	Udledninger	Miljø
Drift af vakuumanlæg 1½ år Drift af dampanlæg 4-5 måneder Tilsyn/kørsel	Forbrændingsgasser fra arbejder, transport (CO ₂ , CO, NO _x) Forbrænding fra elproduktion (CO ₂ , CO, NO _x , SO ₄) Permanent støj fra vakuumanlæg	Stor effekt: Drivhuseffekt (drift) Volumenaffald (etablering, drift) Farligt affald (etablering, drift) Forsuring (drift) Lille effekt: Fotokemisk ozondannelse (drift) Næringssaltsbelastning (drift) Radioaktivt affald (etablering) Slagger og aske (drift)
Demontering	Eksponering	Mennesker
In-situ installation efterlades		Lille effekt: Støjgener (etablering og drift)

Miljøvurderingen er opdelt i projektets 3 faser: Etablering, drift og demontering. Som det fremgår af tabel 8.1 udgør driftfasen en væsentlig del af ressourceforbruget.

Tabel 8.2 Miljøgevinster i forbindelse med vakuumentilering og dampinjektion

Afværgemetode	Påvirkning	Potentiel effekt
Vakuumentilering og dampinjektion		
		Luft og jord
In situ anlæg der ekstraherer PCE fra umættet zone. Opvarmning af umættet zone med damp.	PCE-forurening i umættet zone under bebyggelse fjernes. Ca. 280 kg PCE er oprenset. Qua jordforurening fjernes, mindskes den fremtidige risiko for udvaskning af PCE til grundvandet	Fjernelse af humantoksisk effekt.

Tabel 8.2 oplister overordnet, hvilke påvirkninger og potentielle effekter afværgeprojektet bevirker. Miljøgevinsten udgøres for en stor del af at bygninger, som før var ubeboelige, gøres beboelige ved fjernelse af den humantoksiske effekt fra luft. Den valgte afværgestrategi, der behandles i miljøvurderingen omfatter ikke afgravning af forurenede jord og oprensning af forurening i mættet zone ved kemisk oxidation.

8.3 Detaljeret miljøvurdering

Som supplement til den overordnede miljøvurdering udarbejdes en detaljeret miljøvurdering. Den detaljerede miljøvurdering fokuserer på kvantitative data og udføres ved hjælp af et excelbaseret beregningsværktøj. Beregningsværktøjet er opbygget således, at data for ressourceforbrug (energi, transport og materialer) i de 3 faser etablering, drift og demontering indtastes. Ud fra de indtastede data beregnes et samlet ressourceforbrug for afværgeprojektet i personækvivalenter. Det samlede forbrug udtrykkes dels som normaliseret (i forhold til det årlige forbrug pr. person) og dels som vægtet (i forhold til forsyningshorisont). Ligeledes beregnes de potentielle miljøeffekter, der udtrykkes i forhold til den årlige effekt pr. person og i forhold til de politiske målsætninger (år 2000).

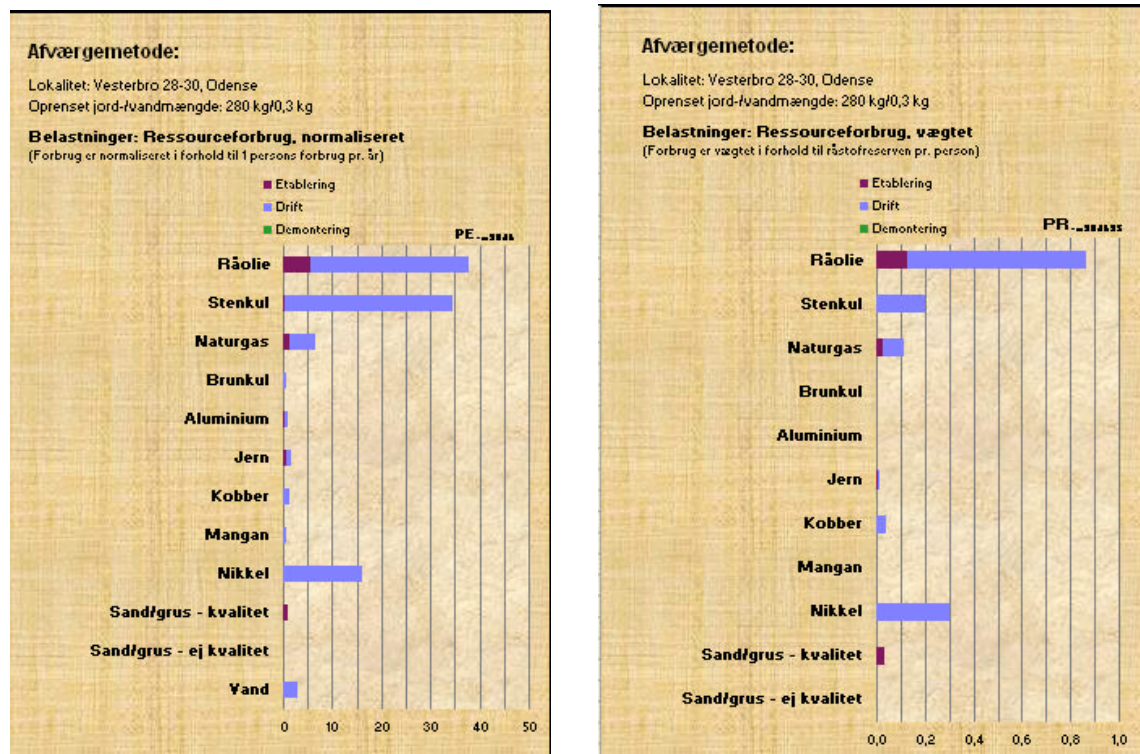
Afslutningsvis indtastes data for den forventede fjernede produktmængde som den tilsvarende miljøgevinst. Data for den miljømæssige gevinst vægtes, og en samlet miljøgevinst beregnes. Denne udtrykkes ligeledes normaliseret og vægtet.

I den detaljerede miljøvurdering udført for dette projekt er der foretaget estimeringer og antagelser i forbindelse med kvantificering af data. Det vurderes dog at der, qua at afværge allerede er gennemført, foreligger et fornuftigt datagrundlag for beregningen. Pålideligheden af inddata vurderes at være på 1, og usikkerheden er således opgjort til ca. 5%. De foretagne antagelser fremgår af bilag 17.1.

Miljøeffekterne, der bestemmes ud fra beregningsværktøjet, beregnes på baggrund af omregning fra forbrug af de enkelte materialekomponenter ved hjælp af effektfaktorer fra UMIP-modellen.

8.3.1 Ressourceforbrug

Af nedenstående figur 8.1 fremgår de beregnede miljøbelastninger. Diagrammet til venstre illustrerer det normaliserede ressourceforbrug, mens diagrammet til højre illustrerer det vægtede ressourceforbrug.



Figur 8.1 Miljøbelastninger opgjort som ressourceforbrug i forbindelse med vakuumventilering og dampinjektion

Som det fremgår af de normaliserede data på figur 8.1 tegner forbruget af fossile brændsler sig for langt hovedparten af de miljøbelastninger, der er forbundet med den valgte afværgestrategi. Forbruget af fossile brændsler svarer samlet til ca. 79 personers gennemsnitlige årlige forbrug af brændsler.

Grunden til at det beregnede ressourceforbrug for oprensningen er så stort, er naturligvis mængden af energi der anvendes i drift af anlæg til ventilering og dampopvarmning. Mens dampopvarmningen tegner sig for ca. 90% af råolieforbruget, kan forbruget af stenkul og naturgas hovedsageligt henføres til anvendelse af elektricitet til drift af vakuumanlægget. Det samlede forbrug af elektricitet i driftsfasen er 123 MWh, mens det samlede forbrug af fyringsolie i driftsfasen er 20,2 m³. Merforbrug af el som følge af dampoprensning udgør ca 50 MWh. Forbruget af fyringsolie henføres direkte til dampoprensningen.

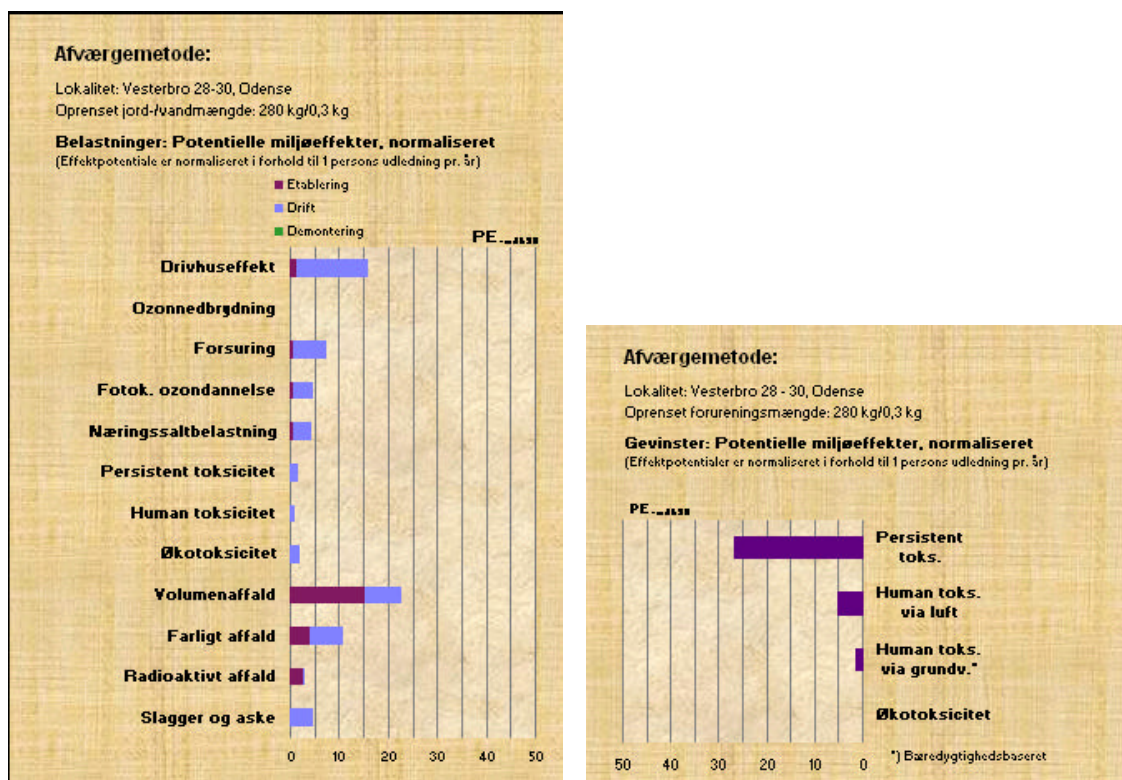
Det normaliserede ressourceforbrug af nikkel er også markant og svarer til 16 personers årlige forbrug af nikkel. Dette skyldes anvendelsen af materialer af rustfrit stål i fremstillingen af maskindele. Grunden til at forbruget ligger i driftsfasen er at data for forbrug af maskindele og pumper er indtastet i driftsperioden. For det øvrige forbrug af metaller gør ovennævnte sig ligeledes gældende, idet forbruget henføres til fremstillingen af maskindele.

Forbruget af vand henføres til genereringen af damp til opvarmning af jorden.

Det ses på diagrammet for det vægtede ressourceforbrug, at tendensen fra de normaliserede data her er den samme. Råolieforbruget udgør en større miljømæssig belastning end stenkul, idet forsyningshorisonten for råolie er mindre end for stenkul.

8.3.2 Potentielle miljøeffekter

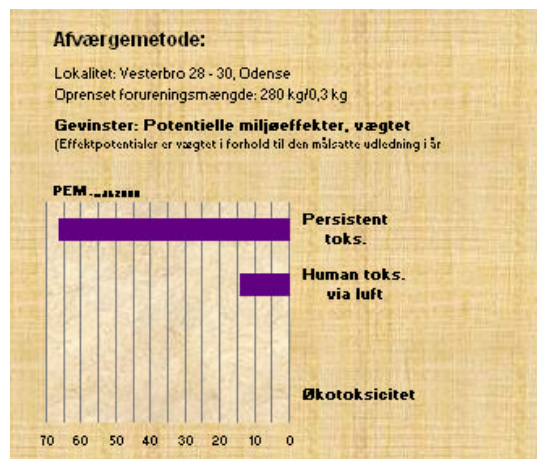
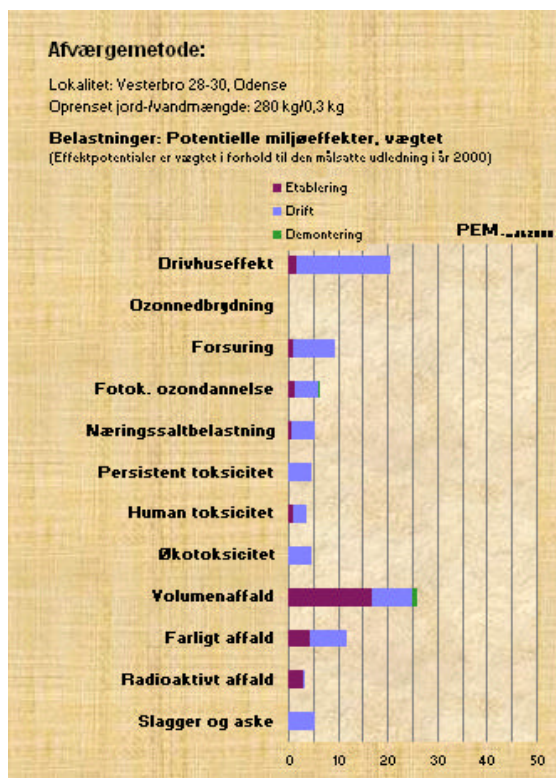
Figur 8.2 illustrerer miljøbelastninger sammenholdt med miljøgevinster i form af normaliserede potentielle miljøeffekter.



Figur 8.2 Miljøbelastninger opgjort som potentielle miljøeffekter i forbindelse med vakuumventilering og dampinjektion

Det fremgår af ovenstående diagram, at de største potentielle miljøeffekter primært er drivhuseffekt, volumenaffald og farligt affald. Den normaliserede potentielle drivhuseffekt kan henføres til forbruget af energi i form af elektricitet og fyringsolie i driftsfasen. Volumen- og farligt affald er en direkte konsekvens af, at der er anvendt mange materialer (etablering af borer, ledningsføring m.m.) i etableringsfasen, hvoraf blot en lille del er genanvendelige. Den potentielle miljøeffekt af affald er ligeledes betydelig i driftsfasen, hvor effekten tillægges, at der i de tidlige processer i udvinding af materialer og brændsler genereres såvel volumen- som farligt affald.

Resultatet af beregningen på de miljømæssige gevinster fremgår ligeledes af figur 8.2. Det ses, at den normaliserede potentielle effekt af oprensningen på baggrund af fjernet produktmængde, hovedsageligt udgøres af reduktion i persistent toksicitet og human toksicitet via luft.



Figur 8.3 Miljøbelastninger og miljøgevinster opgjort som vægtede miljøeffekter i forbindelse med vakuumentilering og dampinjektion

Som det fremgår af figur 8.3 er de vægtede potentielle miljøeffekter generelt større end de normaliserede. Dette skyldes, at der for de miljøeffekter, som i dette afværgeprojekt har en væsentlig effekt, politisk er fastsat målsætninger om reduktion.

Den opnåede miljømæssige gevinst for persistent toksicitet svarer til hvad 67 personer påvirker omgivelserne med pr. år. Den miljømæssige gevinst for human toksicitet via luft svarer til 14 personers årlige miljøpåvirkning. Miljøbelastningerne for persistent og humantoksisk effekt er jf. figur 8.3 henholdsvis 4 og 3 PE, og netto reduktionen for de to miljøeffekter er henholdsvis 63 og 11 PE. Dette svarer til gevinster i størrelsesordenen 4 - 16 gange i forhold til belastninger.

Idet metoden regner grundvand som en fornyelig ressource er denne ikke medtaget i vægningen. Data er ikke kendte for PCE's økotoksicitet, og metoden angiver ikke effektpotentialet for økotoksicitet.

Sammenholdes de samlede vægtede potentielle miljøeffekter med de samlede vægtede miljøgevinster ses, at den opnåede miljøgevinst svarer til ca. 90% af de samlede miljøbelastninger.

8.3.3 Samlet miljøvurdering

Jævnfør den detaljerede miljøvurdering medfører den valgte afværgestrategi stor belastning i form af forbrug af fossile brændsler (elektricitet og fyringsolie) og forbrug af nikkel. Det vurderes som væsentligt at miljøbelastningen i form af ressourceforbrug er forholdsvis høj, og det fremgår også af det vægtede ressourceforbrug, at de anvendte brændsler og materialer har forholdsvis kort forsyningshorisont.

Ud fra den detaljerede miljøvurdering fremgår det, at de belastende miljøeffekter hovedsageligt udgøres af miljøeffekterne drivhuseffekt, volumenaffald og farligt affald. Miljøgevinsterne udgøres af persistent- og humantoksiske effekter. Det skal dog bemærkes, at idet data ikke er kendt for økotoksiske effekter af PCE, kan dette medføre en mindre samlet miljøeffekt af oprensningen end angivet. De økotoksikologiske effekter af PCE indgår således ikke i vurderingen og dette gør vurderingen mere konservativ.

Oprensningsprojektet kan give gener i form af støjpåvirkning af beboere i området i etablerings- og driftsfasen. Støjpåvirkningen vurderes dog at være lav, idet der er truffet afhjælpende foranstaltninger i form af støjdæmpning af containerne til anlægget. Der vurderes ikke at være væsentlige sundhedsmæssige effekter forbundet med oprensningen, idet eksponeringen af personer har været minimal.

Generelt vurderes det, at miljøbelastninger og -gevinster forbundet med den valgte afværgestrategi nogenlunde stemmer overens. Der vurderes dog at være en lille overvægt på belastningssiden. Set ud fra de foretagne beregninger og vurderinger overskrides det miljømæssige budget og der er således ikke nogen væsentlig miljøgevinst ved oprensningen med den valgte afværgestrategi. Oprensningen giver muligvis anledning til en mindre miljøpåvirkning set i forhold til en nulløsning. Det skal dog tilføjes, at metoden, der anvendes til miljøvurdering, er en noget forenklet metode, der baserer beregninger på tabelværdier. Tabelværdierne ændres med tiden, og ses der for eksempel på energiforbruget, kunne billedet være ændret, hvis den anvendte energi i stedet havde været vedvarende energi.

Metoden tager ikke højde for psykologiske aspekter i forhold til berørte grundejere eller økonomiske forhold. Set i forhold til at flere hundrede mennesker har været berørt af forureningen både forureningsmæssigt, økonomisk og psykologisk, vurderes oprensningen at have haft en stor samfundsmæssig gevinst. Alene det faktum at beboerne i området før oprensningen har været stavnsbunde pga. forureningen, har haft en stor negativ økonomisk og psykologisk betydning. Dette aspekt er ikke medregnet i beregningen.

I beregningen er forudsat oprensning med damp. Havde oprensningen skulle udføres ved vakuumventilering alene ville anlægget skulle køre ca. 3,5 år længere end med injektionen af damp. Energiforbruget i form af el ville således blive væsentligt forøget. Det vurderes at en oprensning alene ved ventilering ville forbruge ca. 170 MWh strøm.

9 Økonomi for afværgeprojektet

Dette afsnit omhandler de økonomiske aspekter ved etablering af afværgeforanstaltningerne.

Fyns amts Andel af oprensningen udgør ca. 4,5 mill. kr. excl. moms for henholdsvis projektering, etablering og drift af afværgeforanstaltninger indtil 1. juni 2002. Heri er ikke indregnet omkostninger til forundersøgelse af hotspotområdet under projekteringen. Fyns Amts udgifter er vist i tabel 9.1.

Teknologipuljens tilskud udgør 1,3 mill. kr. excl. moms.

Tabel 9.1 Fyns Amts udgifter til projektering, etablering og 1½ års drift. Alle beløb er i kr. excl. moms.

Post	Projektering	Etablering	Drift og monitering	Samlet
Rådgiverhonorar	380.000	230.000	450.000	1.060.000
Rådgiverudlæg	30.000	25.000	50.000	105.000
Entrepenørudgifter	-	2.075.000	795.000 ¹⁾	2.870.000
Jordbehandling	-	15.000	135.000	150.000
Analyser	-	-	15.000	15.000
Elforbrug	-	-	90.000	90.000
Olieforbrug	-	-	90.000	90.000
Kulforbrug	-	-	45.000	45.000
Vandafledning	-	-	40.000	40.000
Diverse	-	10.000	40.000	50.000
Sum	410.000	2.355.000	1.750.000	4.515.000

¹⁾ Inklusiv leje af dampanlæg

Tabel 9.2 Udgifter afholdt af Miljøstyrelsens Teknologipulje. Alle beløb er i kr. excl. moms.

Post	Projektering	Etablering	Drift og monitering	Samlet
Rådgiverhonorar	107.000	108.000	471.000 ¹⁾	686.000
Rådgiverudlæg	50.00	80.00	60.000	73.000
Entrepenørudgifter	0	389.000	82.000	471.000
Analyser	0	0	80.000	80.000
Sum	112.000	505.000	693.000	1.310.000

¹⁾ : Omfatter bl.a. omfattende manuelle temperaturmålinger, prøvetagning, driftsrapporter, slutrapportering, projektledelse, møder

Referenceliste

1. Indeklimaundersøgelse på Vesterbro 30, Odense. Lotte Bæk & Rambøll. September 1998.
2. Forureningsundersøgelse efter værditabsloven/affaldsdepotloven. Vesterbro 26, 28, 30, 32, 34, Falen 3, Odense. Fyns Amt og COWI. Juni 1999.
3. Supplerende undersøgelse ved væskespildtank, Vesterbro 28, Odense. Fyns Amt og COWI, feb. 2000.
4. In-situ test, Vesterbro 28-30. COWI, juli 1999.
5. Skitseprojekt. COWI og Fyns Amt, juli 1999.
6. Notat udarbejdet af COWI for Fyns Amt. Vesterbro 28-30. Forslag til Teknologipuljen. 13. jan. 2000.
7. Detailprojekt. Afværgeforanstaltninger på Vesterbro 28-30. Fyns Amt og COWI. Juli 2000.
8. Dokumentation af etablering af afværgeforanstaltninger og indkøring/drift af afværgeanlæg. Fyns Amt. Forurennet lokalitet nr. 461-129, Vesterbro 28-30, Odense. COWI og Fyns Amt, maj 2001.
9. Indkøring, drift og monitorering af afværgeanlæg, Vesterbro 28-30, Odense. COWI og Fyns Amt, maj 2001.
10. Vesterbro 28-30, Odense. Forurennet lokalitet nr. 461-129. Driftsrapport nr. 1 for in-situoprensning. COWI, Fyns amt og Miljøstyrelsen, juni 2000.
11. Vesterbro 28-30, Odense. Forurennet lokalitet nr. 461-129. Driftsrapport nr. 2 for in-situoprensning. COWI, Fyns Amt og Miljøstyrelsen, dec. 2001.
12. Radon som sporgas for jordluftindtrængning til hus ved forurennet renserrgrund. Risø ved Claus E. Andersen. Roskilde, juli 2001.
13. Miljøprojekt nr. 543, 2000. Teknologiprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Oprensning af chlorerede opløsningsmidler ved dampstripping. Bruel og Kjær grunden. Thomas Hauerberg Larsen - Hedeselskabet Miljø og energi A/S og Miljøstyrelsen.
14. Miljørigtig oprensning af forurennet jord og grundvand. EU LIFE projekt. Banestyrelsen og DSB, februar 2000.