

Miljøprojekt Nr. 877 2004
Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening.

Dampoprensning af klorerede opløsningsmidler på tidligere industrigrund i Hedehusene

Thomas H. Larsen, Rune Schlag, Kresten L. Andersen
og Marianne Madsen
Hedeselskabet

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	15
1 INDLEDNING	23
1.1 BAGGRUND OG SUCCESKRITERIER FOR OPRENSNING	23
1.2 HISTORIK	24
1.3 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI	26
1.3.1 <i>Geologi</i>	26
1.3.2 <i>Hydrogeologi</i>	27
1.4 FORURENINGSSITUATION	29
1.4.1 <i>Viden forud for dimensionering</i>	29
1.4.2 <i>Viden indsamlet i forbindelse med anlægsetablering</i>	30
1.5 FORMÅL MED TEKNOLOGIUDVIKLINGSPROJEKTET	36
2 DIMENSIONERING AF ANLÆG	38
2.1 TESTNING AF PERMEABILITET	39
2.2 DAMPINJEKTION OG LUFTEKSTRAKTION	42
2.3 VANDOPPUMPNING FRA SEKUNDÆRT MAGASIN	43
2.4 VANDOPPUMPNING FRA PRIMÆRT MAGASIN	44
2.5 LUFT OG VANDBEHANDLING	44
2.5.1 <i>Luftmængde og oppumpning</i>	45
2.5.2 <i>Dampinjektion</i>	46
2.5.3 <i>Luftkøling og rensning</i>	46
2.5.4 <i>Vandbehandling</i>	46
2.6 MONITERING	47
2.6.1 <i>Temperaturmålinger</i>	47
2.6.2 <i>Trykmålinger</i>	48
2.6.3 <i>Flowmålinger</i>	48
2.6.4 <i>Analyser i luft</i>	49
2.6.5 <i>Koncentration i vandprøver</i>	50
2.6.6 <i>Koncentration i jord</i>	50
2.6.7 <i>Diverse målinger</i>	50
2.7 OMLÆGNING AF DIVERSE LEDNINGER	50
2.8 VIGTIGE AFVIGELSER MELLEM DIMENSIONERET ANLÆG OG OPSTILLET ANLÆG	51
3 DRIFT OG DRIFTSERFARINGER	53
3.1 DRIFTSSTRATEGI	53
3.1.1 <i>Område III</i>	53
3.1.2 <i>Område I+II</i>	55
3.2 ERFARINGER MED BORINGER TIL DAMPINJEKTION OG RØRFØRINGER UDENFOR BEHANDLINGSANLÆGGET	56
3.2.1 <i>Vakuum/injektionsboringer, beskrivelse af de etablerede boringer</i>	56
3.3 ERFARINGER MED BEHANDLINGSANLÆGGET INKL. OMBYGNINGER	61
3.3.1 <i>Overordnet anlægsdesign</i>	61
3.3.2 <i>Damp- og luftinjektion</i>	64

3.3.3	Luftkøling	67
3.3.4	Luftrensning	68
3.3.5	Vandkøling	68
3.3.6	Vandrensning	69
3.4	ERFARINGER MED MONITERING	69
3.4.1	Temperatur	69
3.4.2	Tryk	72
3.4.3	Flow	73
3.4.4	Koncentration i luft	74
3.4.5	Koncentration i vandprøver	77
3.4.6	Koncentration i jord	77
3.4.7	Diverse målinger	77
3.5	ERFARINGER MED PÅVIRKNING AF BYGNINGER	78
3.5.1	Ledninger/installationer i jorden	78
3.5.2	Opvarmning af bygninger	80
3.5.3	Indtrængen af damp i fundamenter, gulve og afløb	82
3.5.4	Sætninger	83
3.5.5	Øvrige påvirkninger	84
4	OPRENSNINGSRESULTATER	85
4.1	ENERGIFORBRUG OG VARMEUDBREDELSE	85
4.1.1	Område III	85
4.1.2	Område I+II	91
4.2	ENERGIBALANCE OG TAB TIL OMGIVELSERNE	93
4.3	FORURENINGSMASSE OPSUGET OG BEHANDLET PÅ ANLÆGGET ON SITE	97
4.3.1	Område III	97
4.3.2	Område I+II	100
4.4	HPO - FORBRÆNDING AF ORGANISK STOF I JORDEN	101
4.5	RESTKONCENTRATIONER I SEKUNDÆRT GRUNDVAND	104
4.6	DIREKTE PÅVIRKNING AF PRIMÆRT GRUNDVAND	104
4.7	RESTKONCENTRATIONER I PORELUFT	106
4.8	RESTKONCENTRATIONER I JORD	108
4.9	SAMLET VURDERING AF RESTFORURENING I FORHOLD TIL VARMEUDBREDELSE	111
4.10	MASSEBALANCE	113
5	ØKONOMI	114
6	KONKLUSIONER	117
7	REFERENCER	123

Bilag A: Bilag med kronologi

Bilag B: Bilag med 18 temperaturkort fra område 3

Bilag C: Bilag med 3 temperaturkort fra område 1+2

Bilag D: Profiler fra 3 Geoprobasonderinger i hot-spot af område I

Bilag E: Kort over oprindelig boringsplacering

Forord

Oprensning med damp er en forholdsvis ny metode i forureningsmæssig sammenhæng selvom en lignende anvendelse har været anvendt til forøgning af udbyttet ved olieindvinding igennem en længere årrække. I Danmark er der udført to oprensninger med denne metode, én der tidligere er afrapporteret i /1, 2/ som samtidig var afsluttet forud for igangsætningen af projektet der rapporteres i denne rapport, samt et projekt der blev afviklet i samme periode som dette projekt /3/.

Oprensningen der beskrives i denne rapport er udført i perioden 1998-2002 med stop undervejs på tre tidligere renserigrunde samt en række andre grunde hvor der tidligere har været anvendt bl.a. klorerede opløsningsmidler i Høje-Taastrup kommune. Københavns amt har været bygherre på projektet, hvor Miljøstyrelsen har delfinansieret en række aktiviteter over Teknologiprogrammet. Hedeselskabet Miljø og Energi as har været bygherrerådgiver på projektet, der har været udført med Ove Arkil AS som hovedentreprenør.

Gennemførselen af oprensningen har været forbundet med mange vanskeligheder af både teknisk og organisatorisk karakter. At projektet blev gennemført i sit hele og dermed i sidste ende, at denne rapport kunne produceres skyldes en lang række personers evne og vilje til at frembringe resultater i fællesskab. Forfatterne vil derfor rette en speciel tak til:

Inger Asp Fuglsang, Miljøstyrelsen
Jørn Boysen, Vand-Schmidt as
Tom Heron, NIRAS
Gorm Heron, Steamtech Inc.
Carsten Bagge Jensen, Københavns Amt
Kim Jensen, Ove Arkil AS
Carsten Pedersen, Københavns Amt
Kent Udell, UC Berkley

Herudover vil vi rette en generel tak til alle de mennesker der undervejs har været involveret i projektet, og gjort det til den succes som vi selv ser det som, efter at alle genvordigheder er overstået.

Thomas H. Larsen, Rune Schlag, Kresten L. Andersen, Marianne Madsen
Roskilde, November 2002.

Sammenfatning og konklusioner

Der blev i perioden juli 1999 til april 2002 udført en oprensning af dele af Teglstenen og Industrivej i Hedehusene ved hjælp af en kombination af dampinjektion og vakuumekstraktion. I perioden frem til december 2002 blev der udført retablering af området, således at oprensningen nu er endelig afsluttet.

Området på Teglstenen og Industrivej blev fra start af delt op i tre mindre delområder med hver sit forurenings hot-spot. Områderne benævntes I, II og III. De udgjorde hhv. ca. 2.000 m², 1.200 m² og 5.000 m². For at optimere udnyttelsen af behandlingsanlæg og dampkedel blev det fra starten af besluttet, at oprensningen med fordel kunne brækkes op i to tempi. Det blev besluttet at starte med oprensningen af område III efterfulgt af oprensningen af område I+II.

Oprensningen kan tidsmæssigt opdeles i en række blokke, der er opridset i punkterne herunder:

- Efteråret 1998, dimensionering og licitation. Der blev afholdt 2 licitationer, dels den 1. og dels en 2. efter en omprojektering der blev udført med henblik på at finde besparelser i forhold til 1. licitation.
- Forår - sommer 1999, anlæg og boringer etableres.
- 1. juli 1999 igangsættes driften i område III.
- 15. november 1999 stoppes driften pga. af driftsproblemer
- I perioden november 1999 til juni 2000 føres forhandlinger om ansvarsfordeling om de opståede problemer (herunder vurderes syn og skøn) og tekniske løsninger på de opståede problemer.
- Sommeren 2000 ombygges anlægget og boringer renoveres.
- 4. september 2000 genstartes oprensningen af område III. I den følgende driftsperiode udføres en række mindre ombygninger i anlægget parallelt med driften.
- 1. oktober 2001 afsluttes oprensningen af område III.
- Frem til 1. december 2001 flyttes dele af anlægget til område I+II. Der foretages en ombygning af målesystemet, der måler dampmængden som injiceres i de enkelte boringer.
- 1. december 2001 startes oprensningen af område I+II
- 1. marts 2002 er område I+II gennemvarmt og cyklisk drift startes.
- 6. marts 2002 stoppes dampinjektionen i område I, pga. hurtig indstrømning af koldt smeltevand fra regnvandsledning.
- 21. marts 2002 stoppes vakuumventilationen i område I+II og oprensningen er afsluttet.
- I forår og sommeren 2002 udtages prøver til dokumentation af restforurening, i hhv. område III og I+II.
- Sommeren - efteråret 2002 udføres retablering af bygninger, kloakker, overfladebelægninger mv.
- Oktober 2002 afleveres området klargjort
- December 2002 afleveres slutrapport.

Oprensningen har været en succes, idet der er opnået store oprensningseffektiviteter, hhv. 97 % eller mere i umættet zone og 93 % i den mættede zone (sekundært magasin). Den efterladte restforurening har i størstedelen af området kunne overholde de succeskriterier, der var opstillet på forhånd.

De to helt overordnede succeskriterier var at reducere mængden af klorerede opløsningsmidler i de glacielle aflejringer på arealet til et niveau der gjorde, at der ikke ville være overskridelser af henholdsvis grundvandskvalitetskriteriet på 1 µg PCE/l i det primære magasin efter initialfortynding i magasinet, eller indeklimatekstrakt på 0,25 µg PCE/m³ i bygninger på arealerne, der anvendes til beboelse.

Med de værdier for de indgående parametre der var kendt forud for oprensningen, blev det skønnet, at dette svarede til hhv. 10 µg PCE/l i det sekundære vand og 25 µg PCE/m³ poreluft udtaget umiddelbart under bygningsgulv. Kriterierne skulle overholdes for 90 % af de indsamlede data efter en statistisk behandling af data.

Siden udarbejdelse af succeskriterierne i 1998 er dels risikovurderingsværktøjet JAGG blevet færdiggjort af Miljøstyrelsen, dels er det maksimale indeklimatekstrakt for PCE blevet øget efter en revurdering af toksikologien til 6 µg/m³. Der har derfor været grund til at revurdere succeskriterierne for oprensningen i forbindelse med afslutningen af projektet.

I forbindelse med afviklingen af oprensningen har der været lavet en række prøvepumpninger af borer før til det primære magasin. Pumpningerne viste, at vandføringen i magasinet er knyttet til sprækker, samt at transmissiviteten i magasinet er meget høj, svarende til en hydraulisk ledningsevne på $1 \cdot 10^{-2}$ m/s eller højere.

Ved anvendelse af standardparametrene for kalk i JAGG, den målte hydrauliske ledningsevne og gradient kan det vises, at der ved anvendelse af Trin 2A i JAGG modellen kan accepteres et indhold på ca. 40 µg PCE/l i det sekundære magasin, uden at grundvandskriteriet overskrides (efter initialfortynding 100 m nedstrøms). Dette acceptkriterium er således ca. 4 gange større end oprindeligt vurderet.

En beregning for afdampning til huse med JAGGs standardparametre (1 m sand) for prøver udtaget 1 m. viser, at acceptkriteriet først overskrides ved koncentrationer på ca. 4 mg PCE/m³ poreluft eller ca. 1 mg PCE/m³ umiddelbart under gulv. Dette kriterium er således ca. 40 gange højere end oprindeligt vurderet.

De indsamlede koncentrationsdata for vandet er behandlet ud fra en vurdering af, at de er logaritmisk normalfordelte. Databehandlingen viste, at koncentrationen i det sekundære vand overholdt 40 µg/l kriteriet for 90 % af data i fordelingen og 10 µg/l kriteriet for 66 % af fordelingen.

De indsamlede koncentrationsdata for poreluften har haft et tilstrækkeligt omfang til, at der har været anvendt Kriegering som statistisk behandlingsmetode. Data er blevet korrigeret i forhold til temperaturen ved prøvetagningstidspunktet til normal jordtemperatur, idet damptrykket af PCE omtrentlig halveres når jorden afkøles fra de ca. 30-40 °C som prøverne er udtaget ved ned til 10 °C som forventes at være normal jordtemperatur 1 m.

Databehandlingen viste at 96 % af data overholdt 4 mg/m³ kriteriet i 1 meters dybde, men kun 16 % overholdt 25 µg/m³ kriteriet.

I forhold til det overordnede succeskriterium, hvor 90 % eller mere af arealet ikke skulle afstedkomme forurening over Miljøstyrelsens acceptkriterier for hhv. indeklime og primært grundvand er målet derfor nået.

Udover opfyldelsen af de primære succeskriterier var der et sekundært kriterium, idet vi håbede, at metoden ville være effektiv ca. 1 m ned i den underliggende moræner. Det må konkluderes, at en oprensningen ned i leren generelt ikke har været tilstrækkelig, og kun på mindre arealer er lykkedes. Dette skyldes primært, at tilstrømmende vand har forhindret en effektiv opvarmning af den øvre del af leren, og derved forhindret fjernelsen af PCE.

Der er i løbet af oprensningen gjort en lang række erfaringer af teknisk karakter, omkring komponentvalg til behandlingsanlæg, materialevalg til borerer etc. De vigtigste konklusioner på dette område er vist på listet herunder:

- Filtersætning og boringsudbygninger skal udføres meget omhyggeligt mht. filterkastningen, da materialeflugt ind i borerne giver store problemer, både i boringen, rørføring og behandlingsanlæg. Boringsafslutninger bør udføres så man kan komme ned i filterrøret, i forbindelse med eventuelle bundsugninger og udsyringer.
- Bentonit (både opslæmmet og pellets) er uegnet som afpropningsmateriale over filterstrækningerne for dampinjektionsboringer og vakuumelekstraktionsboringer, da det sprækker, kolliderer og på den måde gør boringen uanvendelig. Brug i stedet en cementstabiliseret bentonitblanding, eksempelvis Storebælsblanding (se opskrift afsnit 3.2.1)
- Væskeringspumper kan fås i den nødvendige kapacitet og kan levere tilstrækkeligt vakuum og flow til at indgå i et stort dampstrippingssystem.
- Det er essentielt at have vandudskilning og køling før luften fra ekstraktionsboringerne ledes til væskeringspumpen. Hvis ikke vandudskilning sker før pumpen, er der stor risiko for at pumpen kalker til. For høje temperaturer i luften ved indgangen til pumpen reducerer kapaciteten.
- Hvis der anvendes blødgjort vand til recirkulation over væskeringspumper kan der opstå biologiske belægninger i rør, pumper mv. der forøger strømforbruget for roterende dele væsentligt. Problemet kan løses ved med jævne mellemrum at anvende et biocid i recirkulationskredsen.
- Køling af luft der indeholder olietåger giver potentielt problemer med reduktion af køleevnen. Oliefilm på køleribberne i køleren reducerer energioverførslen dramatisk. Under oprensningen opstod dette problem i forbindelse med dampfrontens passage gennem en tung fyringsolie forurening. Forsøg med forskellige rensningsmidler på kølefladerne havde kun meget begrænset effekt. Det er ikke konkluderet hvilke tiltag udover udskiftning af selve kølefladen, der kan afhjælpe sådanne problemer.
- Der er relativt lille kapacitet for aktivt kul anvendt til luftrensning ved dampstripping i kombination med vakuumventilation. Årsagen er, at luften har en høj relativ luftfugtighed, selv efter genopvarmning,

hvilket nedsætter kullenes kapacitet overfor opløsningsmidler. Vi konstaterede gennembrud ved 1/3-1/4 af den forventede kapacitet ud fra leverandørens isotermer.

- Varm vanddamp med opløsningsmidler er meget reaktivt overfor de fleste former for fugemasse. Vær opmærksom på dette ved valg af dette i forbindelse med tætningsopgaver/pakninger.
- Den nominelle ydelse på en kedel er kun retningsgivende for hvad den kan levere under praktiske forhold. I dette projekt leverede den indkøbte kedel ca. 60 % af den nominelle ydelse kontinuert (målt som dampmængde der blev injiceret). Det anbefales af denne grund at vælge en kedel der har en nominal ydelse der er mindst det dobbelte af hvad der forventes kontinuert leveret.

Monitering af dampudbredelsen og oprensningens fremdrift skete ved en kombination af måling af temperaturer i jorden, ved hjælp af en række specielle borer med temperaturfølere placeret med en halv meters mellemrum nedefter, målinger af damp-, luft og vandflow i anlægget forskellige steder, samt måling af PCE-, TCE-, ilt-, og kuldioxidkoncentration i anlæg samt udvalgte steder i jorden. Herudover blev der i løbet af projektet udviklet en målemetode til måling af temperaturen i de aktive injektions- og ekstraktionsboringer, samt målt overflade temperaturer ved direkte visende IR-måling og ved anvendelse af IR termografi.

Der kan drages en række konklusioner fra måleprogrammet af mere overordnet karakter. De vigtigste er listet op herunder:

- De installerede temperaturboringer har været anvendelige til at vurdere udbredelsen af dampzonen i det vertikale plan. Indledningsvis var der anvendt opslæmmet bentonit, hvilket ikke virkede. Boringerne blev efterfyldt med Storebæltsblanding, hvilket udbedrede denne skade. Boringer hvor der var fabriksindkapslede Pt100 følere har haft en væsentligt bedre overlevelsesrate gennem projektet end de borer hvor der var installeret Type K følere samlet af entreprenøren. Den store fejlrate skyldes sandsynligvis at indkapslingen af målepunktet har været udført tilstrækkelig resistent til at vanddamp har kunnet trænge ind i kablet og forårsage kortslutning.
- Temperaturmåling ved hjælp af nedsænkning af Type K følere i aktive borer (i måleperioden aflukket fra systemet) viste sig at være et godt supplement til de specielle temperaturboringer. Opløsningen i dybden var dog dårligere end for de specielle borer, ligesom on-line måling ikke var mulig.
- Temperaturmåling på de enkelte rørføringer fra vakuumboringerne har ikke fungeret tilfredsstillende ved det anvendte set-up, hvor målingen er udført indeni eller udenfor manifolden, hvor rørene blev samlet inden indgangen til behandlingsanlægget. Temperaturen skal i stedet måles ude i boringen.
- Flowmålinger af hhv. damp- og luftflow på de enkelte strenge kom aldrig til at virke med det først opstillede målesystem, til trods for at der blev udført et stort arbejde for at dette skulle ske. Systemet bestod af pitotrør med differenstrykmåling på de enkelte rørstrækninger til borerne. Pga. kondensation af vanddamp i slanger, vanddråber og fine partikler virkede

differenstrykmålingen meget dårligt, og dermed også flowmålingen. Vi vil på denne baggrund fraråde at anvende et system af denne type til dampstripping.

- Flowmåling af de enkelte strenges dampmængde lykkedes ved anvendelse af en måler af rotametertypen, frem for det ovenfor skitserede system.
- Trykmålinger i jorden viste sig at være vanskelige at måle. Der konstateres generelt små afvigelser fra atmosfæretrykket når man ikke er tæt på hhv. vakuum- eller injektionsboringer. De små trykforskelle er vanskelige at registrere pga. kondenserende vand ofte forstyrrer målingen. Da temperaturstigning stort set udtrykker de samme forhold som et overtryk anbefales det i stedet at måle denne parameter.
- Koncentration af de forskellige komponenter kan måles på en række måder. For at få et ensartet billede er det nødvendigt at måle ved standardbetingelser fra gang til gang. Vi valgte at bygge et konditioneringsystem, der udskilte vand og kølede luften ned til 5 °C inden målingen. Dette system var efter indkøring og retning af fejl i stand til at konditionere prøver så reproducerbarheden på målingerne var høj. De målte koncentrationer svarer derfor stort set til en normering til Nm³.

De primære oprensningsresultater er gennemgået ovenfor men uddybes i de nedenstående punkter:

- Det samlede energiforbrug til oprensningen har været hhv. 336 kWh/m³ og 214 kWh/m³ i område III og område I+II. Det teoretiske forbrug til opvarmning af jord til kogepunktet ligger på 60-80 kWh/m³ afhængig af vandindholdet. Den primære forskel i forhold til det teoretiske forbrug skyldes tab til omgivelserne ved varmeledningsevne, og i mindre omfang den energimængde der fjernes ved oppumpning af vand og luft. Forskellen i energiforbrug mellem de to områder skyldes en optimering af driften i område I+II i forhold til område III samt muligheden for at levere et større dampflow, pga. indlejning af en ekstra kedel ved oprensningen af område I+II.
- Poreluftkoncentrationerne er blevet reduceret fra et niveau på op til 7500 mg PCE/m³ (gennemsnit ca. 100 mg PCE/m³) til et niveau på op til maksimalt 18 mg PCE /m³. Det forventes, at når jorden er endelig afkølet at koncentrationen i luften maksimalt vil være 10 mg PCE /m³ i oprensningsområdet. 96 % af arealet overholder efter oprensning og afkøling kriterierne for anvendelse til særlig følsom arealanvendelse mht. PCE afdampning. Ingen af de eksisterende boliger har efter oprensningen koncentrationer af PCE under gulvet, der efter en JAGG beregning med standardparametre giver anledning til overskridelse af det acceptable indeklimabidrag.
- Koncentrationen i vand udtaget fra det sekundære magasin havde inden oprensningen et indhold på 20-4.000 µg PCE/l (gennemsnittet ca. 800 µg PCE/l). Efter endt oprensning er koncentrationerne maksimalt 480 µg PCE/l med et aritmetisk gennemsnit på knap 30 µg PCE/l. Det bemærkes at der efter oprensningen er udtaget langt flere prøver i områder med forventet høje koncentrationer end før oprensningen. Baseret på en statistisk analyse af data overholder 90 % af arealet

koncentrationer på under 40 µg PCE/l, der efter en JAGG beregning er det højest acceptable niveau i det sekundære magasin, når det underliggende primære magasin ikke skal belastes uacceptabelt.

- Koncentrationen i jordprøver før oprensningen udtaget i de glaciale aflejringer har vist koncentrationer fra under 1 mg PCE/kg TS op til 120 mg PCE/kg TS (gennemsnit 12 mg PCE/kg TS). Efter endt oprensning er koncentrationen i de områder hvor der har været opvarmet til damptemperaturer (> 90 °C) alle lave indhold, dvs. langt under 1 mg/kg. Den fundne fjernelsesrate i de øverste 6 m af lagfølgen svarer til 98 %. I de områder hvor der ikke har været tilstrækkelig opvarmning (primært i overgangen til den underliggende moræneler) har rensningseffektiviteten været 60-70 %. I den underliggende moræneler har det kun været muligt et enkelt sted at rense op ned i denne. Generelt konkluderer vi at indstrømmende vand har forhindret en effektiv opvarmning af moræneleren nedadtil, med dårlig eller helt manglende oprensning til følge.
- Samlet er der fjernet ca. 370 kg PCE, heraf er ca. 10 kg fjernet ved oppumpning fra det primære magasin og resten via den direkte oprensning. Af de 360 kg fjernet ved den direkte oprensning er kun ca. 0,5 % fjernet via det oppumpede sekundære vand og resten med den vakuumelekstraherede luft. Vådforbrænding (HPO) er vurderet ikke at være en væsentlig fjernelsesmekanisme for PCE under de betingelser der har været under oprensningen. Derimod er der fjernet store mængder af andet kulstof, heraf en del sandsynligvis som følge af HPO af forskellige naturligt forekommende stoffer.

Der har været en række sideeffekter i forbindelse med oprensninger der har haft økonomiske konsekvenser, ligesom en del påvirkning af de daglige brugere af arealet har været uundgåelig. De vigtigste påvirkninger og konsekvenser er listet herunder:

- Forud for projektet blev det besluttet at omlægge gas og stærkstrømskabler. Undervejs i forløbet blev det også nødvendigt at omlægge brugsvand til brugerne af bygningerne i det opvarmede område. Der blev også under driften konstateret skader på et telefonkabel, der ligeledes måtte omlægges.
- Efter oprensningen er det konstateret at der kommet skader på en række af kloakledninger igennem området. Skaderne er både opstået på rør af plast og cement. Derimod er gamle glaserede rør stort upåvirket. Skaderne er efter afkøling udbedret.
- Der opstod i forbindelse med driften en række komfortproblemer, specielt i område III. Temperaturen i bygningerne steg til uacceptable niveauer. Dette blev forsøgt imødegået ved kraftig ventilation, men da det var i sommerperioden havde dette kun begrænset effekt. I to tilfælde blev beboere flyttet ud af deres lejemål i en kortere periode i forbindelse med oprensningen.
- Der opstod mindre skader på bygningerne i område III som følge af dampopslag i gulve og vægge. Dette blev repareret efter afslutningen af vakuumperioden.
- I område I blev problemer med varme og fugt løst ved at etablere en meget kraftig udsugning under gulvet i det kapillarbrydende lag. Denne løsning forhindrede effektivt problemerne.

- Der blev konstateret hævnings/sænkning af bygningerne i forbindelse med oprensningen, op til ca. 10 mm. Disse ændringer i funderingsforholdene aktiverede allerede opståede revner i bygningerne og forårsagede mindre skader som eksempelvis nedfald af vægfliser. Disse skader er efterfølgende repareret.

Den samlede økonomi i oprensningen alt inklusive har været ca. 35 mill. inkl. dokumentationen udført via Teknologiprogrammet. Den behandlede jordmængde i alt ca. 90.000 tons, svarende til at rensningsprisen pr. ton har været ca. 400 kr. Den samlede sum er overordnet fordelt som:

- 18,5 mill. til anlægsentreprenøren for bygning af anlæg, omlægning af ledninger, ombygning mv.
- 4 mill. til driftsentreprenøren, vedligehold, mindre ombygninger mm. undervejs i driften.
- 4 mill. til retablering, heraf ca. 0,5 mill. til udbedring af skader på bygninger.
- 4,5 mill. til forbrugsudgifter på gas, olie, el mv.
- 4 mill. til rådgivning i forbindelse med de indledende tests, projektering, tilsyn med anlægsetablering og tilsyn/styring af drift, analyser i driftsfasen, slutmonitoring inkl. analyser og afrapportering.

Summary and conclusions

Remediation of a PCE contaminated site was conducted at Teglstønen and Industrivej in Hedenhusene using a combination of steam injection, soil vapor extraction and groundwater extraction during July 1999 to April 2002. From April to December 2002 the site was reestablished after removal of installations from the remediation, adding new pavements etc.

The site was split in three different sub-sections, each characterized by its own hot-spot. The areas named I, II and III covered approximately 2.000 m², 1.200 m², and 5000 m², respectively. In order to optimize the use of the treatment system and the boiler, the remediation was designed to be conducted in two separate clean-up events. Remediation of area III took place first, followed by areas I+II.

The remediation can be described for different event or time blocks according to the following list:

- Fall 1998. Design and competitive tendering. Two rounds of tendering were carried out. After the first round the county (the building owner of the remediation) and the consultant scrutinized the project in order to redesign to reduce the cost, then the second round was performed.
- Spring-summer 1999. Treatment system and wells were established
- July 1st 1999. Steam injection was started in area III.
- November 15th 1999. Steam injection stopped due to different problems in the treatment system.
- November 1999 to June 2000. Negotiations between contractor, consultant and county regarding technical solutions and liability.
- Summer 2000. Treatment system repair and enlargement, renovation of wells.
- September 4th 2000. Restart of steam injection in area III. During the following year of operation period minor rearrangement and maintenance work of the treatment system was carried out.
- October 1st 2001. Operation of steam injection and extraction in area III was shut down.
- October-December 2001. Parts of the treatment train were renovated and moved to the new location for treatment of area I+II. A new and better system to measure the rate of steam injection in the individual wells was installed.
- December 1st 2001. Steam injection started in area I+II.
- March 1st 2002. Soil throughout Area I+II had warmed up and cyclic operations was initiated.
- March 6th 2002. Stop of steam injection in area I due to a major leakage in a rainwater runoff sewer. Cold melting water entered the treatment area rapidly and thereby cooled down the area and caused flooding of the wells. Treatment of area II continued.
- March 21st 2002. Shutdown of soil vapor extraction in area I+II. Remediation of the entire area completed.

- Spring and summer 2002. Samples collected from all 3 areas for documentation of the remediation efficiency.
- Summer to fall 2002. Repairs of damaged sewer lines, minor cracks in buildings, pavements etc..
- October 2002. The area was reestablished after removal of remediation installations.
- December 2002. The documentation report was prepared and submitted.

The remediation is considered successful with removal of approximately 97 % of the chlorinated solvents in the vadose zone and 93 % in the saturated zone (secondary aquifer). The solvent remaining in the treated area does not violate the site specific clean up criteria determined by a risk assessment for the land use as well as for the underlying primary aquifer.

The primary goals of the remediation was to reduce the amount of chlorinated solvents in the glacial deposits at the site to a level that did not lead to concentrations over the MCA (1 µg/l PCE) in the underlying primary aquifer. Also, the contribution of PCE from the contamination to the indoor climate in residential houses was not allowed to exceed 0,25 µg/m³.

Based on the existing knowledge of the geology, sediment permeability, infiltration, etc. for the site it was estimated that the site specific clean up criteria corresponded to values of a maximum of 10 µg PCE/l in the secondary aquifer and 25 µg PCE/m³ in the soil gas directly below the slab. Criteria should be met on a statistical basis with more than 90 % of the data obeying the criteria.

Subsequent to the determination of the site specific criteria in 1998, the Danish EPA has reevaluated the toxicology of PCE and raised the acceptance level for PCE contribution to the indoor climate from 0,25 to 6 µg/m³. This led to a reevaluation of the site specific criteria at the end of the remediation. The risk assessment model had also been improved after 1998.

During the operation of the remediation a number of pumping tests in the primary aquifer were carried out. The tests showed that water transport in the aquifer is transported preferentially in fractures etc. in the limestone and that the permeability of the aquifer is extremely high, about $1 \cdot 10^{-2}$ m/s or higher.

Using measured values of permeability and gradient obtained during operation in the underlying aquifer, a site specific clean up criteria for the secondary aquifer was estimated to approximately 40 µg PCE/l, raising the initial criteria by a factor of 4.

Using the Danish EPA model for vapor transport to indoor air in buildings and the revised acceptance criteria lead to an acceptance level of 1 mg PCE/m³ directly below slab or 4 mg/m² 1 meter below grade. Therefore, acceptance level in the soil was 40 times less strict than initially expected.

Samples collected to evaluate the remaining PCE concentration in the water from the secondary aquifer after remediation was found to follow a log normal distribution. More than 90 % of the data in the distribution were below 40 µg PCE/l and approximately 2/3 of the data were below 10 µg PCE/l.

Samples collected to evaluate the remaining PCE concentration in the soil gas were subject to a geostatistical analysis using Kriging. The data were corrected to average soil temperature (10 °C) due to elevated temperatures at the sampling time (30-40°), using the fugacity principle. Based on this, the expected concentrations was 50 % of those measured at 30-40 °C. The data shows that 96 % of the area was below the acceptance criteria 4 mg PCE/m³, and that only 16 % obeyed the initial 25 µg PCE/m³ criteria.

As a conclusion the primary goal of the remediation was achieved cleaning more than 90 % of the area to site specific values, resulting in an acceptable risk of the remaining contamination.

As a secondary goal we had initially hoped that the technology would be able to clean up the uppermost part of the clayey till deposits underlying the alluvial, which was the primary target of the remediation. The clayey till separates the alluvial and the primary aquifer in the limestone. Unfortunately, it must be concluded that the secondary goal was not achieved during the remediation, primarily due to a cooling effect caused by small amounts of water running on the top of the clayey till. However, in some spots the goal was achieved removing the PCE approximately 0,5 m down into the till.

During operation of the remediation a number of experiences considering technical issues of a steam injection were gathered, including choice of components for the treatment systems, choice of different materials etc. The most important conclusions with respect to this are listed beneath:

- The filter sand and backfilling materials for the wells should be selected very carefully with respect to grain size distribution since materials penetrating into the filter eventually will cause problems in the piping, valves and other places in the treatment system. The wellheads are to be finished in a way that facilitates easy access to the filter, to enable descaling or flushing of the well.
- Bentonite (both slurry and pellets) is inadequate as backfilling in wells used for both extraction and injection in steam stripping applications. It craks up resulting in leakage to the surface. Instead, cement stabilized bentonite should be used, e.g. Storebælt-mixture, see recipe in chapter 3.2.1.
- Liquid ring pumps of sufficient capacity are available for steam stripping applications. They can deliver the necessary flow as well as vacuum for an extended period of operation. The temperature of the pumps inlet should be as low as possible in order to maximize the pump capacity.
- Its crucial to obtain effective liquid/air separation before air is led to the liquid ring pump. If separation is ineffective, there is a high risk of lime precipitation in the pumps with following break down.
- If recirculated softened water is used in a liquid ring pump application biological fouling easily occurs. This leads to higher viscosity and greater friction in the pump thereby, causing higher power consumption. It can be avoided by occasionally adding a biocide.
- Cooling of air containing oil mist potentially leads to quickly reduced cooling efficiency due to oil film on the fins in the heat exchanger. The heat transfer coefficient drops dramatically when the film is formed. During the remediation, this problem occurred, when the steam front in the soil moved through an area with heavy fuel oil. Different attempts to clean the heat exchanger were only of limited success. No

conclusions were drawn as to which remedy was the most effective apart from changing the fins in the heat exchanger.

- Low capacity of GAC filters was observed in this application. The explanation is the high relative humidity in the air leaving the heat exchanger, even after reheating the gas 3-5 °C. Water blocks pores in the GAC filters, thereby decreasing the ability to absorb solvents. Breakthrough was observed at ¼-½ of the time expected based on information in isotherms supplied by the GAC vendor.
- Hot air and water mixtures containing chlorinated solvents are very reactive towards sealers, gaskets etc. Take this into account when selecting materials and design.
- The nominal yield of a boiler is only a relative measure for the actual production under field conditions. In the actual project we were not able to obtain more than 60 % of the nominal yield of the boiler, continually. Therefore, we recommend use of boilers with at least twice the nominal yield of that aimed for in the design for stream stripping applications.

Monitoring of the steam front in the soil and the progress of the remediation was performed by a combination of measuring soil temperatures by means of specially designed wells with thermocouples spaced with 0,5 m interval in depth and measurements of steam flow, water flow, and air flow in the treatment system as well as measurements of chlorinated solvents, oxygen, and carbon dioxide in the treatment system and in the soil. In addition, measurements were carried out in the injection and extraction wells during the operation period using a specially designed temperature measurement system. Also, temperature measurements were carried out using either a direct IR thermometer or IR thermography on the soil surface and on building floors.

Some overall conclusions on the monitoring systems were drawn during the operation period. The most important are listed beneath:

- The special designed wells for temperature measurement performed well delineating temperatures in the vertical plane. At first heavy bentonite slurry was used as backfilling around the thermocouples and guide. However, it cracked thereby leading steam to the surface. The backfilling was later changed to cement stabilized bentonite with much better results. Wells using factory sealed Pt100 sensors showed much better survival rate than wells using thermocouples (Type K) sealed by the contractor on site. We believe, that failure of the thermocouples was caused by the sealant not being resistant enough for the combination of high temperature, moisture and solvents, thereby enabling water intrusion in the cabling resulting in shortcuts.
- Temperature measurements by the means of lowering a set of thermocouples into the wells was found to be a good supplement to the dedicated temperature measuring wells although the vertical spacing was less detailed than in the dedicated wells and on-line monitoring was not possible using this method.
- Temperature measurement in the piping going into the treatment system from the individual wells did not work satisfactorily during operation. Instead measurement at the wellhead is preferred.
- Precise measurements of steam and air flow to and from individual wells did not work satisfactorily during the clean up of area III,

although a lot of attempts to correct the problems were made. The original system consisted of pitot tubes inserted in the pipes going to/from the wells connected through plastic tubing to a single and a differential pressure transmitter, respectively. Due to condensation in the plastic tubing and water droplets and small particles in the flow stream, the pressure readings were not precise. Our recommendation is not to use such a system in other steam stripping applications.

- Relatively precise measurements of the steam and airflow were obtained after the rearrangement of the plant before clean up of area I+II using a new system with rotameters.
- Reliable pressure readings in the soil were hard to obtain due to condensation etc. In general relatively small deviations from the atmospheric pressure is expected unless readings are conducted close to either an injection or extraction well. In the pressure zones, temperature is recommended instead as it shows almost the same pattern as pressure readings.
- Concentration of various components can be measured in different ways. To get a clear picture of what is going on pretreatment of the gas stream was carried out before the actual measurements. The sample stream was cooled to 5 °C and atmospheric pressure before measurements were carried out. The employed system yielded reproducible results. Therefore, the concentrations shown in the report almost correspond to unit/Normal m³.

The primary results were given in general earlier, but is went more thoroughly in the following:

- The total power consumption for the remediation has been 336 kWh/m³ and 214 kWh/m³ for area III and area I+II respectively. The theoretical power consumption for heating soil to steam temperatures is in the range of 60-80 kWh/m³, depending on the water content of the soil. The difference between actual and theoretical consumption was caused by loss to the surroundings by thermal conductance and to a lesser extent the energy removed by the extracted hot air and water from the soil. The lower consumption in the second stage of the clean up was a result of optimization of the steam injection rate (doubled in area I+II) and of the treatment system.
- Soil gas concentration were reduced from up to 7500 mg PCE/m³ to a maximum of 18 mg PCE/m³. Its expected that when the soil is cooled to background temperatures the maximum concentration will not exceed 10 mg/m³. Concentration in 96 % of the area are below the Danish acceptance level for the most sensitive land use i.e. residential areas, kindergartens etc. None of the buildings used for residential purposes had unacceptable contributions of PCE to the indoor climate after the clean up.
- Before clean up, PCE concentration in the secondary aquifer were in the range of 20-4.000 µg/l, with an average of 800 µg/l. After clean up the arithmetic average concentration was less than 30 µg/l, with a highest value of 480 µg/l. It should be noted that after the clean up, a much larger number of samples were collected in areas where high concentrations were expected compared to the number of samples taken before clean up. Based on a statistical

analysis more than 90 % of the area shows PCE concentrations less than 40 µg/l in the secondary aquifer located in the alluvial, which based on the Danish EPA risk assessment model, is the local acceptance level at the site.

- Initial PCE soil concentrations measured in the alluvial deposits showed values in the interval of 1-120 mg/kg with an average of 12 mg/kg. After clean up all areas, where the temperature had been above 90 °C, had virtually no remaining PCE. The resulting removal rate of the uppermost 6 meters of the soil was 98 %. In areas where heating was inadequate (primarily at the interface between the alluvial and the clayey till deposits) the removal rate was 60-70 %. In the underlying clayey till only very limited areas had been cleaned to any depth. In general we conclude that small amounts of water limited the heating of the underlying till.
- All in all 370 kg of PCE was removed, 10 kg from pumping in the primary aquifer and the rest from the steam stripping process. Of the 360 kg only 0,5 % originated from the pumped water phase, the rest came from the soil vapor extraction system. Hydrous pyrolysis oxidation is not considered to be of any importance for removal of PCE under the prevailing circumstances during the clean up, however, a large amount of carbon (possibly natural occurring compounds) was transformed into carbon dioxide, which was detected in the extracted air in percentage concentrations.

Some side effects of economic consequence were observed during the remediation. Also, the daily use of the area was influenced by the remediation activity during operation. The most important side effects and influences are listed below:

- In the design phase of the project it was decided to move the gas and power lines. During the operation it was found necessary move the water supply lines to the users of the buildings in the area too. Damage on a telephone line was also observed during the clean-up.
- After the operation period damage to the sewer system was observed. The damage were observed on pipes made of plastic as well as cement. Old glazed pipes didn't show any sign of damage. Damages were repaired after cooling down of the soil.
- During the operation period in area III comfort problems were observed, especially in area III. The temperature rose to unacceptable levels within the buildings. Active ventilation in the buildings was tried as a remedy, but since the operation period was in the summer it only had a limited effect. In two cases the residents in the buildings had to move out for a shorter period during the operation.
- Minor damage due to penetration of steam/condensate into the floor and walls was observed to the buildings in area III. Repairs were carried out after the clean up.
- In area I+II the problems with moist and heat were handled by heavy active ventilation below building slabs. This solution effectively prevented any problems.
- Lowering as well as rising of buildings in the range of 10 mm was observed during the remediation. These changes in the foundation conditions activated already formed cracks in the

walls and led to minor damage like fall down of tiles etc. Repairs were carried out after the clean up.

The total economy of the remediation including funding to special documentation from the Danish EPA was in the range of 35 mill. DKK (4,7 mill. Euro). The treated amount of soil is approximately 90.000 tons leading to a price of 400 DKK/ton (54 Euro). The total is distributed on the following sub elements:

- 18,5 mill. DKK to the building contractor incl. building and repair of the treatment system, re lay of piping, cables etc.
- 4 mill. DKK to the operating contractor including maintenance and minor repairs in the operation period.
- 4 mill. DKK to make good of the area after the clean up, including 0,5 mill. DKK to building repairs.
- 4,5 mill. DKK to consumables (gas, fuel oil and electricity, chemicals etc.)
- 4 mill. to the consultants, including preliminary design tests, design, supervision of the building and operating contractor, analyses cost during the operation period as well as for the end documentation, report writing etc.

1 Indledning

Klorerede opløsningsmidler er med baggrund i antal af fund i grundvandet og vandforsyninger et alvorligt problem i forhold til vores drikkevandsforsyning.

På grund af de klorerede stoffers fysisk/kemiske egenskaber er disse i stand til at sprede sig i stor dybde og stor afstand fra kilderne i mange tilfælde.

Deres relativt begrænsede nedbrydelighed er ligeledes en medvirkende årsag til at spredningen kan blive stor, idet den mest dominerende reduktionsmekanisme for koncentrationen i mange tilfælde vil være fortynding.

Pga. af disse forhold vil det ofte ved en oprensning af klorerede opløsningsmidler være nødvendigt at skulle opnå meget store reduktioner af den stofmængde der udvaskes fra en kilde. Der skal opnås en tilstrækkelig stor risikoreduktion til, at de underliggende magasiner ikke belastes i uacceptabel grad. Ligeledes gælder, at den acceptable påvirkning af indeluft ved særligt følsom arealanvendelse meget let overskrides, hvis ikke en underliggende kilde kan reduceres meget signifikant.

Der er relativt få teknikker der er i stand til at udføre meget store reduktioner af den samlede masse inden for en kort tidshorisont. Blandt disse har opvarmning af jorden i kombination med opslugning af damp/luft vist sig at have et potentiale både i udlandet /4/ og herhjemme /1, 2, 3/. Ved tilstrækkelig stor permeabilitet i jorden er den relativt mest økonomiske måde at opvarme jorden på injektion af damp (ved jordtemperaturer op til 100°C).

Denne rapport beskriver en oprensning af klorerede opløsningsmidler (og i mindre omfang en række andre komponenter) ved anvendelse af dampinjektion i kombination med vakuumelekstraktion samt oppumpning af vand. Hovedvægten ligger på de erfaringer der er gjort omkring den praktiske anvendelse af metoden, både med hensyn til teknik, monitoring og oprensningseffekt. For en gennemgang af de mere teoretiske aspekter omkring damp som opvarmningsmetode henviser vi til /1, 4/.

1.1 Baggrund og succeskriterier for oprensning

Solhøj kildeplads er en af Københavns Vands største kildepladser med en årlig indvindingsmængde på ca. 6,5 mill. m³. Københavns amt har som et led i prioriteringen af kilder i indvindingsoplandet til kildepladsen udført en række undersøgelser af potentielt forurenede grunde. Ved nogle af disse undersøgelser /5, 6/ blev det fundet, at der var betydelig forurening i et område på Industrivej og Teglstenen, affaldsdepot 169-1. Risikovurderingen viste en betydelig risiko både overfor grundvandet som ressource, men også på lidt længere sigt en risiko over for den eksisterende indvinding på Solhøj Kildeplads. Herudover blev det konkluderet, at indeklimaet i en række af bygningerne på Industrivej kunne være påvirket med PCE i niveauer over det gældende acceptkriterium.

På baggrund af undersøgelserne og risikovurderingen blev der udarbejdet et skitseprojekt /6/ for oprensningen af grunden, hvor blandt andre Hedeselskabet blev bedt om at afgive bud på detailprojektering etc. I denne fase indgav Hedeselskabet et alternativt forslag til afværgeteknik: Dampstripping /8/. Københavns Amt besluttede på baggrund af drøftelser og udarbejdelse af en detaljeret cost-effectiveness analyse at vælge dampstripping som afværgeløsning. Undersøgelser mv. dannede baggrund for et udbud /7/, der efterfølgende blev vundet af Hedeselskabet.

Der blev opstillet et sæt primære succeskriterier forud for oprensningen. De to helt overordnede succeskriterier var at reducere mængden af klorerede opløsningsmidler i de glacielle aflejringer på arealet til et niveau der gjorde, at der ikke ville være overskridelser af henholdsvis grundvandskvalitetskriteriet på 1 µg PCE/l i det primære magasin efter initialfortynding i magasinet, eller indeklimatekriteriet på 0,25 µg PCE/m³ i bygninger på arealerne, der anvendes til beboelse.

Med de værdier for de indgående parametre der var kendt forud for oprensningen, blev det skønnet, at dette svarede til hhv. 10 µg PCE/l i det sekundære vand og 25 µg PCE/m³ poreluft udtaget umiddelbart under bygningsgulv. Kriterierne skulle overholdes for 90 % af de indsamlede data efter en statistisk behandling af data.

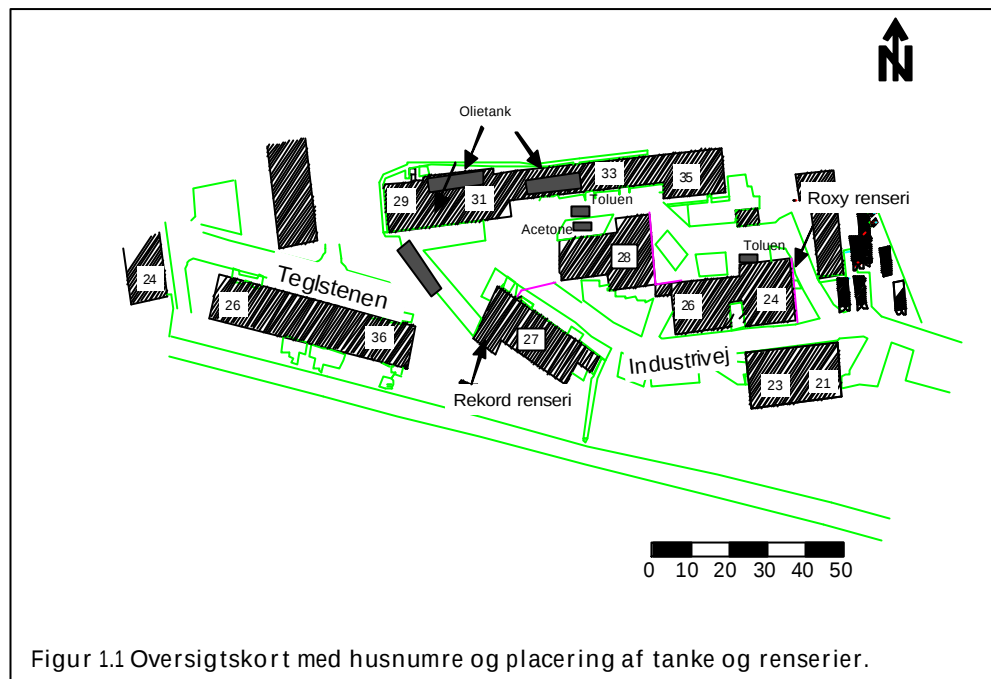
Siden udarbejdelse af succeskriterierne i 1998 er dels risikovurderingsværktøjet JAGG blevet færdiggjort af Miljøstyrelsen, dels er det maksimale indeklimatekriterium for PCE blevet øget efter en revurdering af toksikologien til 6 µg/m³. Der har derfor været grund til at revurdere succeskriterierne for oprensningen i forbindelse med afslutningen af projektet.

Revurderingen er foretaget på basis af dels standardparametre fra JAGG og dels målte parametre som det primære magasins hydrauliske ledningsevne. Efter denne revurdering er det beregnet, at det maksimalt acceptable indhold i det sekundære vand må være 40 µg PCE/l efter oprensningen, for at grundvandskvalitetskriteriet overholdes. Tilsvarende er det beregnet, at det maksimale indhold i poreluften målt 1 m. ut. maksimalt må være 4 mg PCE/m³ og maksimalt 1 mg PCE/m³ umiddelbart under gulv for at indeklimatekriteriet fra forureningen ikke overskrider afdampningskriteriet.

1.2 Historik

Nord for området der i dag udgøres af vejene Teglstenen og Industrivej har Hedehusene Teglværk ligget fra 1896 til i dag. I dag er fabrikation af spændbeton den eneste produktionsvirksomhed der er tilbage med tilknytning til Teglværket. Tidligere har der udover teglværksvirksomhed med slemmebassiner, tørreovne, tørrelader og maskinværksted været kalkværk og sandstensfabrik. Disse aktiviteter er ophørt løbende fra 1960'erne til 1980'erne.

Ud fra de historiske redegørelser /6,12/ er der ingen oplysninger om aktiviteter eller bygninger på området hvor Teglstenen i dag ligger. Der er således ingen tegn på kilder til forurening i området, bortset fra at umiddelbart nord for området har teglværkets maskinværksted været placeret med formodet brug af affedtningsmidler.



Bebyggelsen på Teglstenen er fra 1990, placering jf. figur 1.1. Bebyggelsen består af rækkehuse med hver 4 eller 6 lejligheder. Det berørte område for oprensningen er primært rækkehusblokken, der har adressen Teglstenen 26-36. Alle husene er direkte funderet, dog er der krybekælder i den blok der ligger i det berørte område (Teglstenen 26-36).

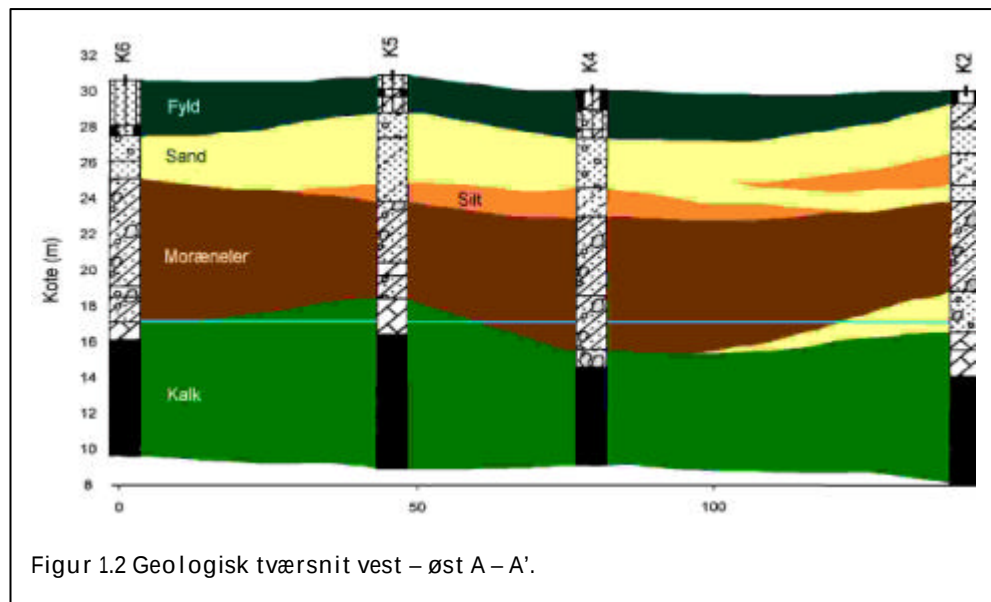
Overfladebelægningen mellem rækkehusene er SF-belægningssten. Der er en mindre prydhave til hver lejlighed.

Området "Industribyen" på Industrivej har været industrikvarter siden 1946. Området består i dag af 9 bygninger, hvor der har været drevet mange forskellige kemiske virksomheder /6/. Den nuværende nummerering er Industrivej 21 til 35, beliggenheden fremgår af figur 1.1. I Industribyen er bygningerne en- og toetagers byggeri, der er direkte funderet, dog er der kælder på Industrivej 27. Bygningerne er alle opført i mursten, størstedelen er pudsede. De anvendes i dag til forskellige lager- og hobbyformål samt kontorer og beboelse.

Af de aktiviteter der kan have været kilde til forurening på Industrivej kan nævnes renserier, diverse smedevirksomheder, produktion af Lyoma Lim, produktion af cellulid, hjortetakssalt og sakkarin, radio og grammofonfabrik samt fabrikation af køleanlæg. På området har der været opbevaringstanke til terpentin, toluen, acetone og diverse fyringsolietanke. De omtalte virksomheder og tanks placering er vist på figur 1.2.1. Det eneste sted hvor en kilde omtaler brug af chlorerede opløsningsmidler er i forbindelse med Roxyrenseriet på Industrivej 22- 24. Renseriet var i drift i en mindre årrække fra ca. 1958 til 1981.

I nr. 21 er der keramik- og kunstmaleriværksted, nr. 21 har siden omkring 1993 været beboet. Nr. 23 huser et produktionsværksted. Nr. 22, 24, 26, 27 og 28 er nu helårs beboelse, nr. 31 er beboelse samt kontor. Nr. 35 er beboelse og kontor. Nr. 33 er værksted og nr. 29 er lager.

Overfladebelægningen mellem husene er hovedsagligt asfalt og SF-sten. Omkring husene er der enkelte græsplåner og mindre bede.

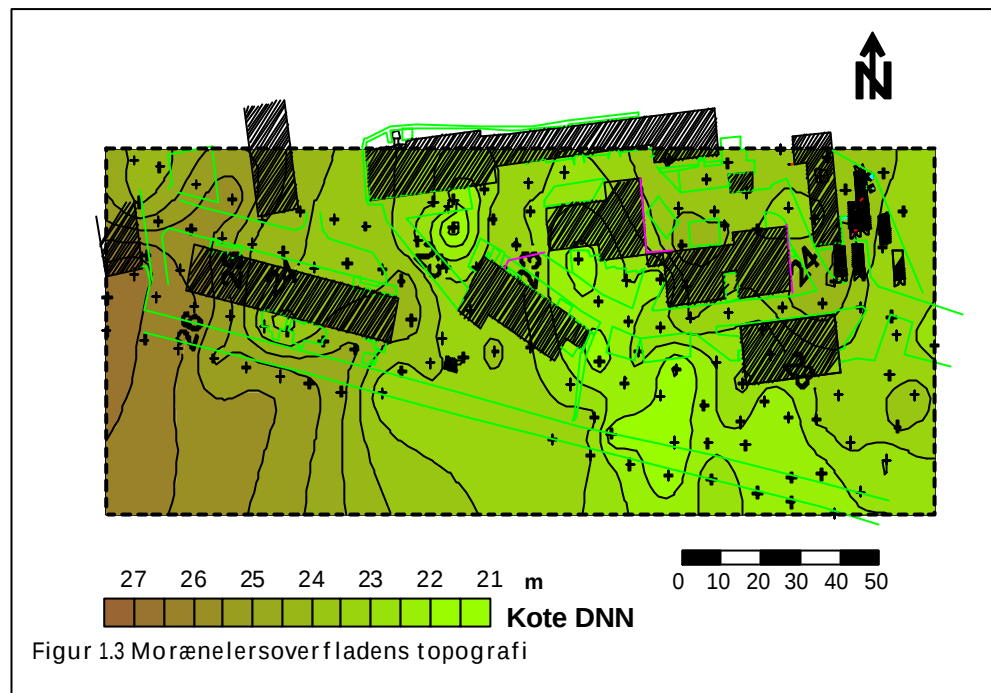


1.3 Geologi og hydrogeologi

Terrænet på grundene er relativt fladt med en faldende gradient i østlig retning. Terrænkoten er omkring +31,5 DNN omkring Teglstenen og omkring +30,0 DNN på Industrivej.

1.3.1 Geologi

Boringer på lokaliteten viser, at de øverste 14 til 15 meter er bestående af glaciale aflejringer. I figur 1.2 ses et tværsnit gennem lagfølgen fra vest nordvest til øst sydøst. Øverste træffes omkring 1-2 meter fyld. Fyldet er muldet, sandet og leret ofte indeholdende tegl- og kalkstykker. På Industrivej området ses i den østlige del et lerlag på ca. en meters tykkelse. Lerlaget har sandsynligvis dækket hele området men er bortgravet i forbindelse med teglværket. Under fyldlaget træffes smeltevandsaflejringer til omkring 5 til 8 m u.t. Smeltevandsaflejringerne består i toppen af sand, men bliver nedad mere siltet og leret. Generelt er smeltevandsaflejringerne mere siltede og lerede på Industrivej end på Teglstenen. De mere finkornede smeltevandsaflejringer ses fra 4,5 til 5,5 m under terræn. Under smeltevandsaflejringerne træffes glaciale aflejringer i form af moræner.



Topografien for morænelersoverfladen i undersøgelsesområdet fremgår af figur 1.3, hvor koten af morænelersoverfladen er bestemt ud fra borer. Det fremgår heraf, at der er en del højdevariation i morænelersoverfladen. Inden for undersøgelsesområdet er der som ovenfor beskrevet en variation på ca. 3 meter.

Det fremgår af figur 1.3, at denne variation ikke dækker over en generel hældning, men at der inden for undersøgelsesområdet optræder lavninger i moræneleren. Centralt i Industribyen ses en dallignende lavning der strækker sig fra nordvest til sydøst.

Under moræneleren træffes overvejende kalkaflejringer fra omkring kote +15 til +17 DNN. Undersøgelser af de øvre meter af kalken (ca. 8 til 10 m) har vist, at kalken er forholdsvis komplekst opbygget, de øverste meter er overvejende bestående af knoldekalk med hærtningszoner.

1.3.2 Hydrogeologi

1.3.2.1 Primært magasin

Hydrogeologiske undersøgelser af det primære kalkmagasin /13/ har påvist, at der er tale om artesiske magasinforhold. Det primære grundvandsmagasin træffes ca. 5 m nede i kalken i ca. kote +19.

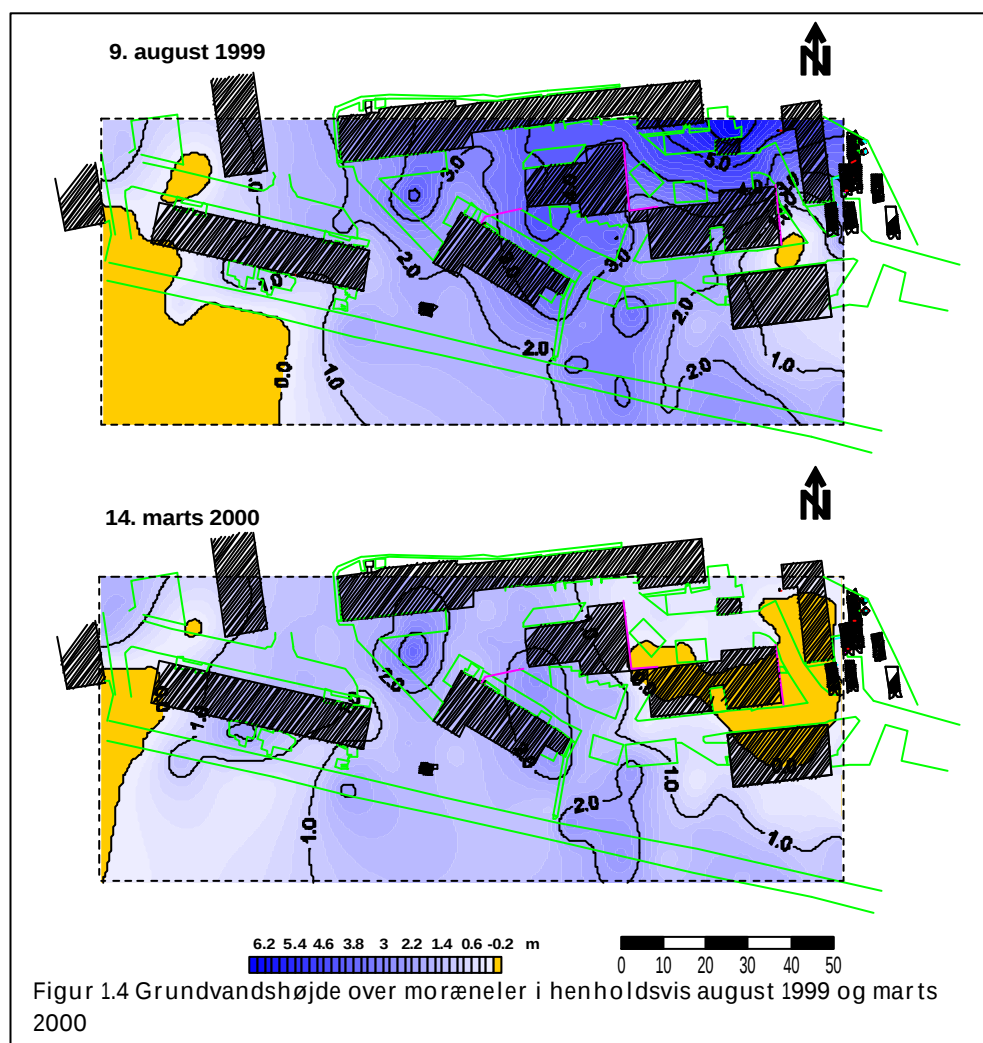
På potentialekortet over Købensregionens primære grundvandsmagasin /14/ ses grundvandstrømningen i Industrivej/Teglstenen- området at være østlig. Udfra grundvandspejlinger på området er grundvandsstrømningsretningen beregnet til overordnet at være rettet mod sydøst med en gradient i størrelsesordenen 0,6 ‰. Det skal bemærkes, at denne meget lille strømningsgradient er gældende for området under og omkring lokaliteten som helhed. På grund af den tilsyneladende store inhomogenitet i strømningsmønstret, kan der lokalt optræde større strømningsgradienter.

De artesiske magasinforhold sammenholdt med vurderinger på baggrund af de udførte prøvepumpningstest /13/, viser at grundvandstrømningerne i kalken er knyttet til specifikke zoner. Det er ligeledes vurderet, at denne opsprækkethed i kalken bevirker at strømningsmønstret i den øvre del af kalken er meget inhomogent. Prøvepumpninger på magasinet har givet transmissiviteter på mellem $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ /13/ og $6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ /6/.

1.3.2.2 Sekundært magasin

Det sekundære grundvandsmagasin beliggende i smeltevandsaflejringerne over moræneleren har et meget fluktuerende grundvandspejl. Der er observeret mellem 0,5 og 5 m vand over morænelersoverfladen.

Undersøgelsesperioden 1995–97 var nedbørsfattige år, hvor der kun blev konstateret sekundært grundvand i lavninger i morænelersoverfladen. 1999 var det mest nedbørsrige år siden nedbørsregistreringen i Danmark begyndte, hvilket resulterede i op til 5 m grundvand over morænelersoverfladen. En hydrologisk model af det sekundære grundvandsmagasin i området /15/ definerer et hydrologisk opland på $1,25 \text{ km}^2$ der naturligt afvandes til Lille Vejle Å gennem Sejlsbjerg mose. Den overvejende strømningsretning er derfor sydøst, selvom der lokalt kan forekomme andre strømningsretninger på grund af morfologien af morænelersoverfladen, der virker som bund i magasinet. I figur 1.4 ses grundvandets højde over morænelersoverfladen.



1.4 Forureningssituation

1.4.1 Viden forud for dimensionering

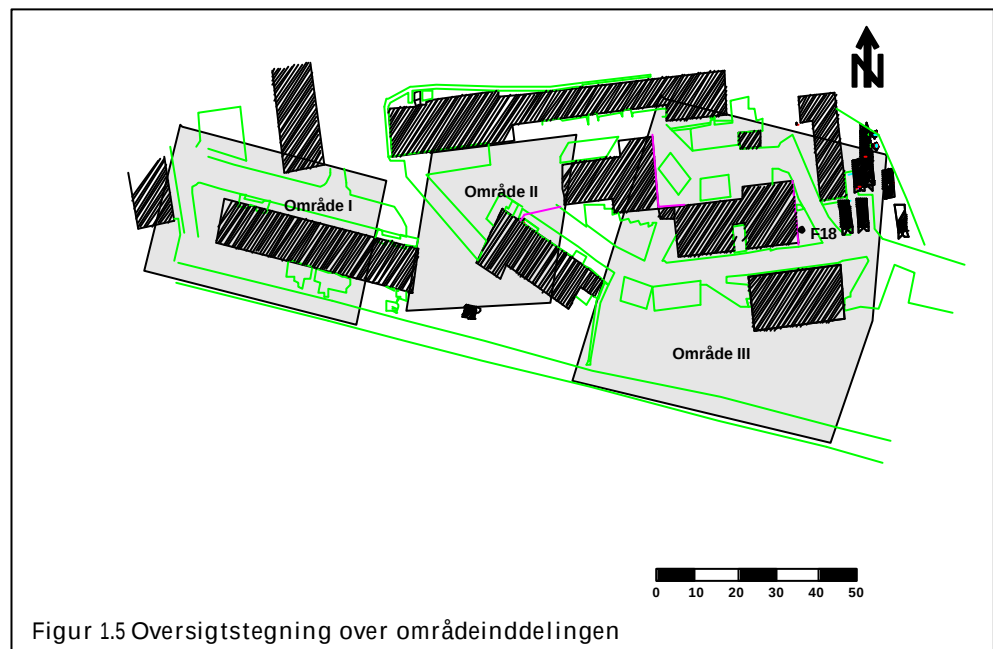
Forureningssituationen var forud for dimensioneringen belyst i forbindelse med undersøgelserne /5, 6, 7/ mfl. Risikovurderinger viste, at det underliggende primære magasin var påvirket, samt at der var en ikke uvæsentlig risiko for overskridelse af acceptniveauet for indeklimabidrag.

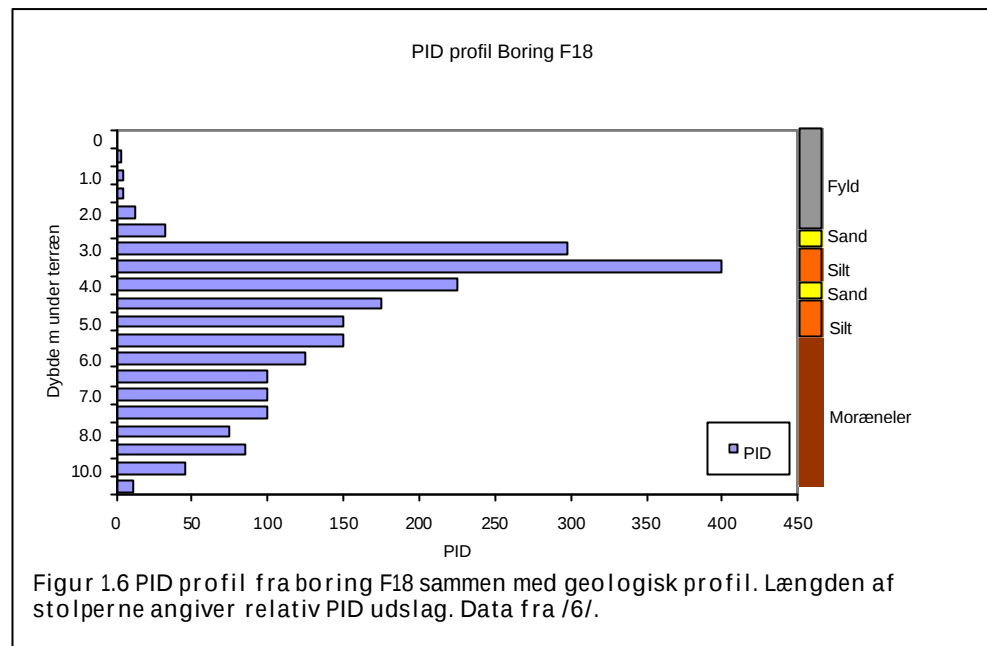
De tidlige undersøgelser var i høj grad baseret på poreluft og i mindre omfang på vand- og jordprøver. Baseret på disse undersøgelser blev forureningen på Teglstenen og Industrivej opdelt i 3 separate delforureninger placeret på området. Figur 1.5 viser den opdeling som vi i forbindelse med den indledende dimensionering valgte at dele grunden i. Disse områder vil der refereres til i den resterende del af rapporten.

Den vertikale fordeling af PCE forureningen blev indledningsvis skønnet udfra et PID profil bestemt fra boring F18 beliggende centralt i forureningen i område III. I figur 1.6 er PID fordelingen vist sammen med den geologiske lagfølge der blev observeret i boringen.

Det ses at forureningen har sit maksimum i smeltevandsaflejringerne i dybden fra 2,5 til 6 meter under terræn. Herunder aftager koncentrationen gradvis ned igennem den øverste del af moræneleren for at være reduceret til meget lave koncentrationer 10-11 m.ut.

Den horisontale fordeling blev skønnet udfra de udførte jord-, vand og luftprøver.





Område I blev estimeret til at være ca. 2.000 m², med en gennemsnitlig mægtighed af smeltevandsaflejringer på ca. 6 m, svarende til et samlet jordvolumen på ca. 12.000 m³ eller ca. 20.000 tons. Den samlede PCE mængde i dette område blev skønnet til ca. 100 kg.

Område II blev estimeret til at være ca. 1.200 m², med en mægtighed på ca. 7,5 m svarende til en samlet jordmængde på ca. 9.000 m³ eller ca. 15.000 tons. Den primære forureningskomponent i dette område blev vurderet at være TCE. I alt blev det skønnet, at der var ca. 50 kg TCE. Herudover var der konstateret olieprodukter i forbindelse med undersøgelsen. Omfanget af denne forurening var dog ikke nærmere belyst.

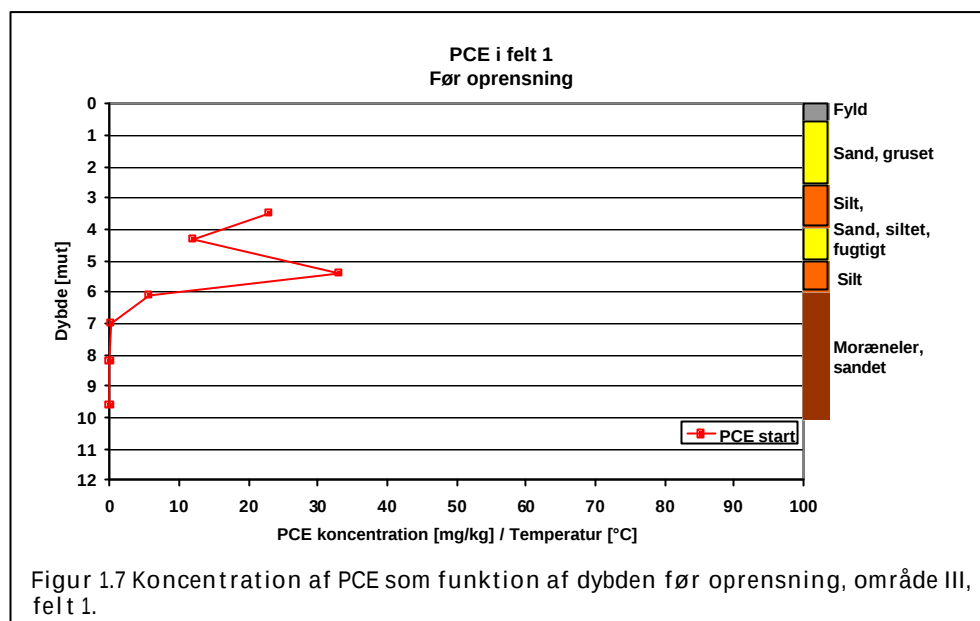
Område III blev estimeret til at være godt 5.000 m², med en mægtighed på ca. 6,5 meter af smeltevandsaflejringer. Det forurenede volumen blev skønnet til ca. 33.000 m³ svarende til ca. 55.000 tons jord. PCE indholdet blev indledningsvis anslået til at være ca. 700 kg i dette område.

På baggrund af /ref. 5, 6 7/ var det altså vurderingen inden projekteringen blev påbegyndt, de tre områder tilsammen udgjorde en jordmængde på ca. 90.000 tons, med et samlet forventet indhold af klorerede opløsningsmidler på 8-900 kg.

1.4.2 Viden indsamlet i forbindelse med anlægsetablering

I forbindelse med teknologiprogrammet (formålet beskrevet i kapitel 1.5) blev der ved etableringen af afværgeanlægget udført 4 Geoprobeforundersøgelser, ligesom der blev udtaget en lang række af luft- og vandprøver fra de filtre der blev installeret. Udfra disse data gives i dette kapitel en uddybende vurdering af udgangsmængderne af klorerede opløsningsmidler.

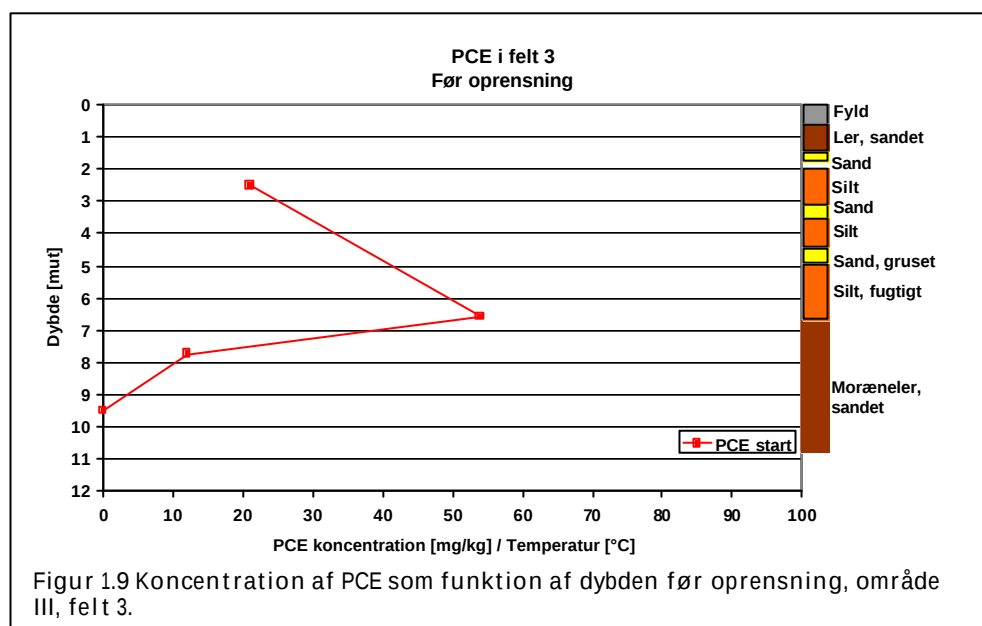
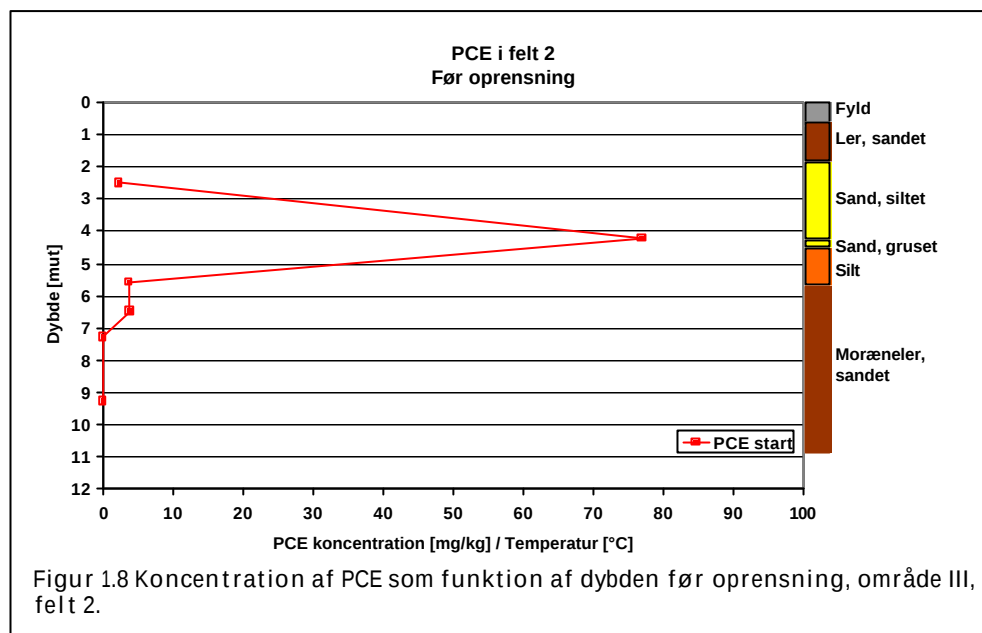
I figur 1.7, 1.8, 1.9 og 1.10 er vist jordkoncentrationen i område III i fire centrale felter som funktion af dybden. Prøverne er udtaget som kerneprøver med Geoprobe.



Det ses i figur 1.7, 1.8 og 1.9 at de højeste koncentrationer var knyttet til overgange i geologien fra højere permeable lag til lavere permeable lag, i.e. sand til silt lag. De højeste koncentrationer var således lokaliseret i de lavest permeable lag. De fundne koncentrationer indikerer, at der lokalt kunne være tale om residual fri fase af opløsningsmidler.

I forhold til observationerne fra boring F18, vist i figur 1.6 observeredes en hurtigere reduktion af PCE indholdet med dybden. Dette kan skyldes at PID metoden detekterer lave koncentrationer bedre end de udførte jordanalyser, alternativt at boring F18 er mere centralt placeret i forhold til en oprindelig kilde i forhold til de udførte Geoprobsonderinger.

De fundne koncentrationer ved Geoprobsonderingerne var, som det kan ses af figurerne 1.7-1.10, fra under 1 mg/kg TS op til knap 90 mg/kg TS. De højeste jordkoncentrationer var tidligere konstateret i F18 med en maksimal værdi på 112 mg/kg. Ved denne værdi var der med overvejende sandsynlighed tale om små dråber af residual fri fase fordelt i jordmatricen.



Alle data fra jordprøver taget før oprensningen er vist på figur 1.11. Prøverne fra de 4 felter vist i figur 1.7-1.10 er vist ved deres gennemsnit på figuren. Det ses, at der også i område I er konstateret en relativt høj koncentration i de relativt få prøver der er udtaget i dette område.

I den værst påvirkede del af område II (baseret på vand og poreluftprøver) er der ikke udtaget jordprøver til analyse.

Det ses i øvrigt, at selv uden for det direkte påvirkede område nord for bygningerne blev der fundet små indhold af opløsningsmidler, i omegnen af 1 µg/kg.

**PCE i felt 4
Før oprensning**

Dybde [m]

PCE koncentration [mg/kg] / Temperatur [°C]

—■— PCE start

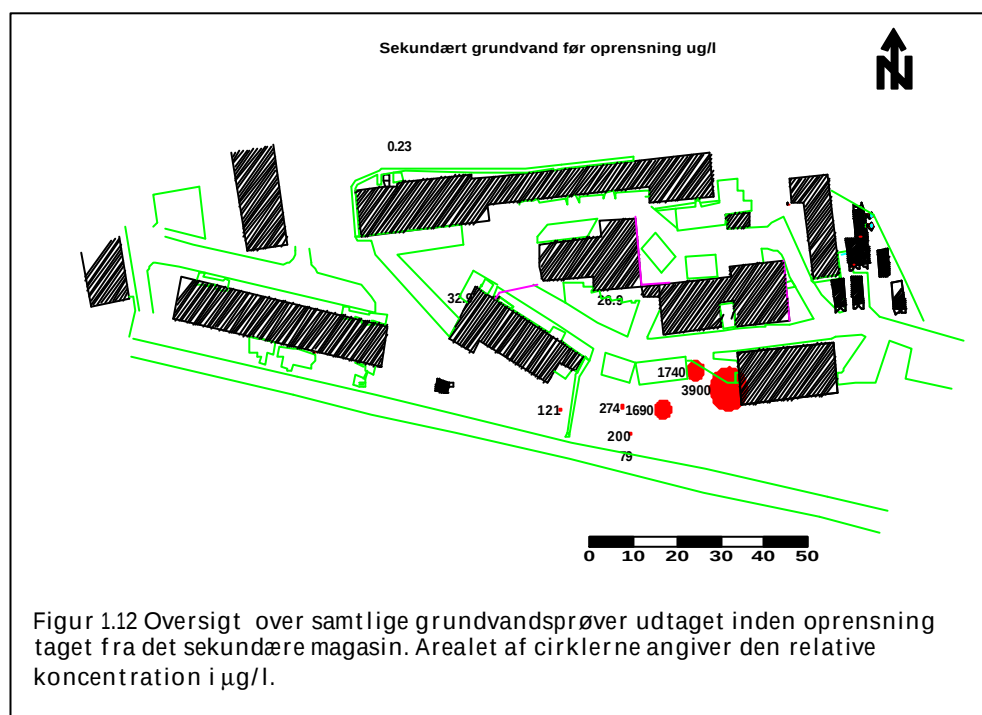
Sand, leret, grusindslag
Ler, sandet
Sand, leret, grusindslag
Silt, sandet
Moræneler, sandet

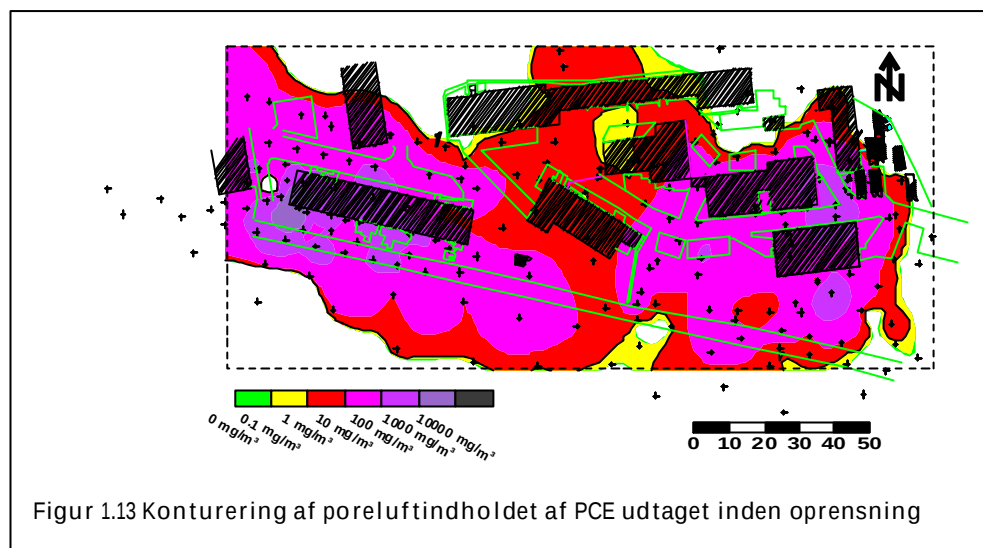
Dybde [m]	PCE koncentration [mg/kg]	Temperatur [°C]
3	10	10
4	100	10
5	100	10
6	10	10
7	10	10
8	100	10
9	10	10
10	10	10
11	10	10
12	10	10



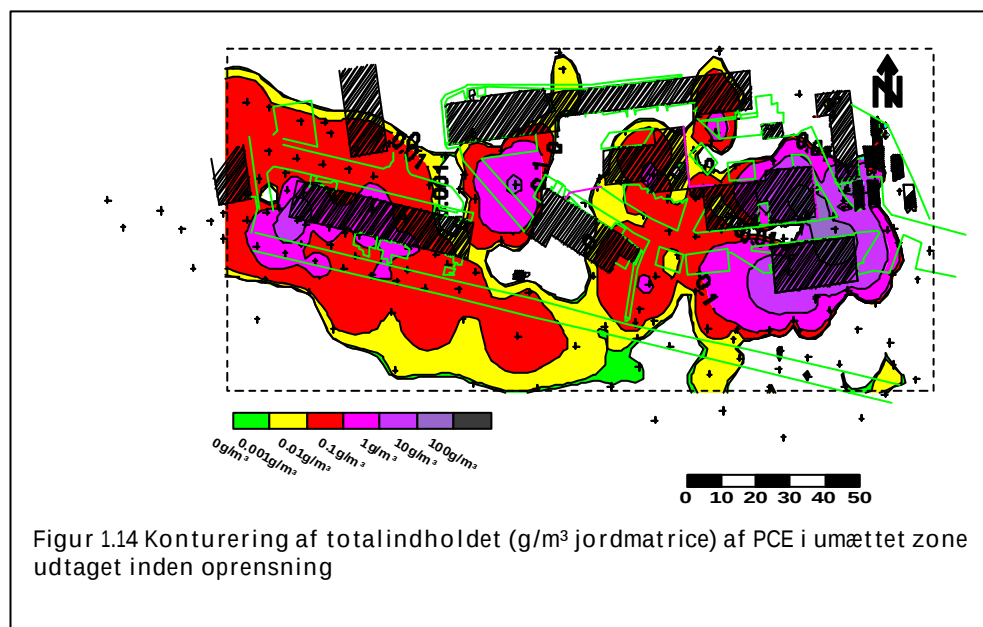
De fundne koncentrationer i vandprøverne lå i intervallet 0,2 µg/l til knap 4.000 µg/l, hvor de 0,2 µg/l blev fundet opstrøms det forurenede område og enten er en "baggrundsværdi" eller en følge af påvirkning af gasfase spredning af forureningen fra det forurenede område i opstrøms retning. De maksimale vandkoncentrationer blev fundet udenfor selve hot-spot området i område III. Det værst forurenede område var jf. figur 1.3 og figur 1.13 beliggende der, hvor der var mindst mægtighed af de glaciale aflejringer og dermed mindst chance for at træffe vand, når den generelle grundvandsstand er lav.

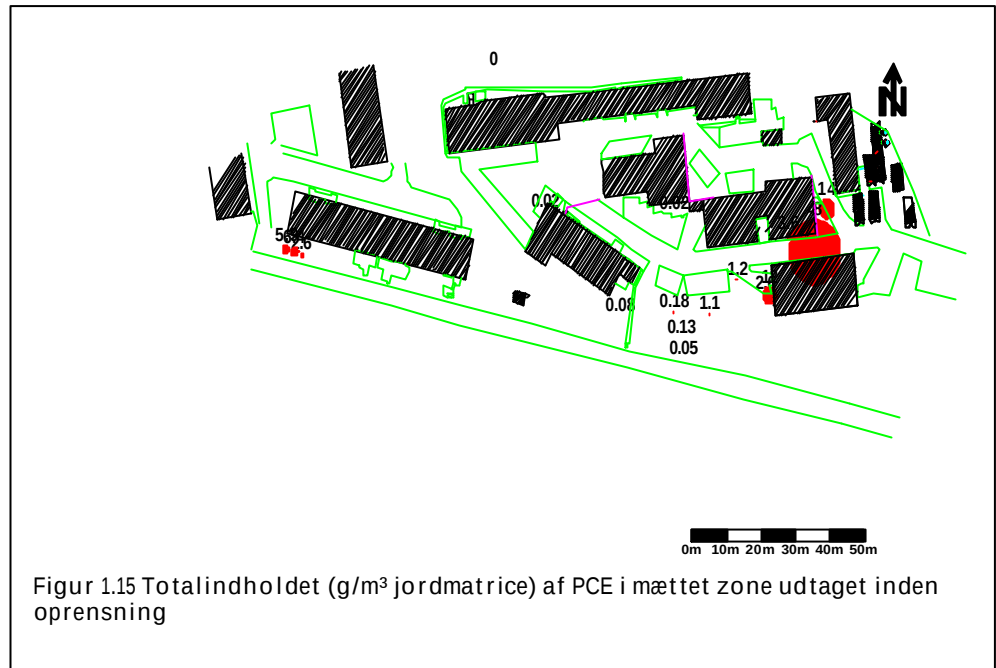
Der var og blev udtaget relativt mange poreluftanalyser i forhold til antallet af jord-og vandanalyser. Dette har muliggjort en konturering af indholdet i poreluften inden start af oprensningen, som er illustreret på figur 1.13. Bemærk at skalaen er logaritmisk. 1 mg/m³ isopleten (rød eller kraftigere) svarer omtrentligt til det maksimalt acceptable hvis indeklimabidraget jf. en JAGG beregning med standardværdier skal overholdes. Det skal bemærkes, at poreluftprøverne i område III for en lang række af prøvernes vedkommende blev udtaget efter 4-6 ugers drift af vakuumventilation alene, da vi på grund af relativt store vandmængder i det opsugede medie havde meget store metodemæssige problemer med målingerne. Startkoncentrationerne er derfor sandsynligvis undervurderet en størrelsesorden i forhold til det sande billede i dette område jf. erfaring på traditionelle vakuumventilationssager.





For at estimere den samlede mængde klorerede opløsningsmidler inden opstart af oprensningen er der ved fugacitetsbetragtninger beregnet PCE/ m^3 jordmatrice i alle de målepunkter som vi havde. Vi har anvendt JAG G modellens standardsand som jordtype og indlagt en modelforudsætning med 5 meter umættet zone og 3 meter mættet zone. Jordprøver udtaget fra mere end 5 mut er således anvendt til fastlæggelsen af mængden i den mættede zone sammen med de udtagne vandprøver. Jordprøver udtaget ned til 5 mut er sammen med poreluftprøverne anvendt til at estimere mængden i den umættede zone. I figur 1.14 og 1.15 er PCE mængden (udtrykt som g/m^3 jordmatrice) vist for hhv. den umættede og mættede zone. Ved at gange volumenerne ($\text{m}^2 \cdot \text{g}/\text{m}^3$) med hhv. 5 m og 3 m fås de respektive mængder i den umættede og mættede zone.





Det ses at antallet af punkter i den mættede zone ikke var særlig stort.

På basis af de to kort er det beregnet, at der var hhv. 37 kg og 273 kg i den umættede og mættede zone svarende til ca. 310 kg totalt i de to områder. Hertil skal så adderes den mængde der blev fjernet inden udtag af prøverne i område III. Skønsmæssigt forventes det derfor, at der på baggrund af alle de indledende prøver har været i alt ca. 400 kg opløsningsmidler. Det initiale gæt baseret på de supplerende undersøgelser var ca. 800 kg, se kapitel 1.4.1. Forskellen vurderes primært at være forårsaget af, at den arealmæssige fordeling af koncentrationen blev meget bedre beskrevet efter udtag af prøver og analyse fra borerne udført i forbindelse med anlægsetableringen.

1.5 Formål med teknologiudviklingsprojektet

Formålet med Teknologiudviklingsprojektdelen er oprindeligt beskrevet i /8/.

Formålet kan kort oprides i følgende punkter:

- Belysning af oprensningseffekten ved dampinjektion, dels i de blandede smeltevandsaflejringer og dels i den øvre del af den underliggende moræner.
- Belysning af horisontal og vertikal spredning af klorerede opløsningsmidler under oprensningen.
- Belysning af eventuelle geotekniske ændringer forårsaget af oprensningen.
- Belysning af eventuelle ændringer i grundvandskemien forårsaget af oprensningen.
- Afprøvning af system til monitorering af tryk og temperaturer under oprensningen.
- Udførelse af langtidsmonitorering af afkølingen af jorden efter oprensningen.

- Dokumentation af projektets samlede energi og ressourceforbrug.

Udover disse punkter lå der også en detaljeret kvalitetssikring af koncept og anlægsopbygningen af professor Kent Udell, University of California at Berkley.

Belysning af oprensningseffekten skulle foretages ved dels at udføre MIP sonderinger med Geoprobe, dels at udtage jordprøver ved kernemetode fra fire felter. MIP sonderingerne blev sløjft af programmet senere, efter at der indledningsvis var opnået meget utilfredsstillende resultater, se afsnit 3.4.6.

Spredningen skulle dokumenteres dels ved sonderingerne beskrevet ovenfor, dels ved prøvetagning og analyse fra 20 poreluftsonder placeret i randen og udenfor oprensningsområdet i 5 linier med 4 sonder hver.

Påvirkning af geoteknik skulle dokumenteres ved nivellementer af bygninger før, under, og efter endt oprensning.

Påvirkning af grundvandskemien skulle belyses ved udtag af vandprøver fra det sekundære magasin før, under, og efter oprensningen efterfulgt af analyse (boringskontrol).

Til monitorering af tryk og temperatur skulle der opbygges systemer til måling af disse parametre på behandlingsanlægget såvel som i jorden. I forbindelse med kvalitetssikringen af projektet blev det vurderet, at trykmålingerne var meget vanskelige at udføre korrekt, og at temperaturen samtidig var et tilstrækkeligt mål. Som følge af dette blev der udført flere punkter med temperaturmåling end oprindeligt tænkt og trykmålingerne blev tilsvarende kraftigt reduceret.

Til at måle temperaturen efter oprensningen skulle der efterlades punkter til temperaturmåling hvert halve år i op til 3 år efter oprensningen.

Alle de ovennævnte tiltag skulle udføres i område III.

2 Dimensionering af anlæg

Dimensionering af et dampstripningsanlæg tager udgangspunkt i 4 overordnede hovedpunkter, der er vist i understående liste:

- Flow af damp der kan injiceres pr. boring i injektionssystemet
- Flow af luft der kan udsuges pr. boring fra vakuumsystemet
- Flow af vand der skal oppumpes pr. boring (hydraulisk kontrol)
- Behandlingsområdets fysiske størrelse (giver sammen med de tre ovenstående det samlede flow og nødvendigt antal boringer til vand/damp/luft)

Når disse 4 hovedpunkter er belyst følger dimensioneringen af en lang række af komponenter i anlægget som en naturlig følge af størrelsen på hovedpunkterne.

Flowet af gasarter som damp og luft styres af den effektive luftpermeabilitet i jorden. Denne sætter begrænsningen for hvor meget der kan drives igennem jorden ved en given trykgradient jf. Darcys lov. Bestemmelsen af denne parameter er beskrevet i kapitel 2.1.

Når permeabiliteten er bestemt kan man beregne det flow man kan injicere dampen med i hver boring ved et givent overtryk og på denne måde vurdere hvor mange boringer der er nødvendige for at opvarme et givet område indenfor et bestemt tidsrum. Denne dimensionering er beskrevet i kapitel 2.2.

Tilsvarende kan man beregne hvor langt væk man trækker luft fra når boringen påtrykkes vakuum, og således beskrive virkningsradius. Denne dimensionering er ligeledes beskrevet i kapitel 2.1.

Flowet af vand fra en boring er i lighed med flowet af gasarter styret af jordens permeabilitet. Når man taler om strømning af vand under mættede forhold betegnes denne ved den hydrauliske ledningsevne. I det konkrete tilfælde blev den indledningsvis estimeret ud fra de udførte permeabilitets bestemmelser beskrevet i kapitel 2.1. I kapitel 2.3 er vurderingen af de samlede mængder og boringernes placering beskrevet.

I Hedehusene var der også planlagt en oppumpning af vand fra det underliggende primære magasin, idet det på forhånd lå fast at dampstrippingen ikke kunne fjerne hele massen, specielt den del der lå i den underliggende moræneler. Oppumpningens design og størrelse er beskrevet i kapitel 2.4.

Den efterfølgende behandling af vand/luft/damp og størrelsen på de forskellige behandlingsenheder er beskrevet i kapitel 2.5.

Moniteringsprogrammet som det oprindeligt blev planlagt er beskrevet i kapitel 2.6.

I forbindelse med anlægsetableringen var det på forhånd erkendt at en del installationer i jorden skulle omlægges. Dette er beskrevet i kapitel 2.7. Ved

anlægsetableringen var det ligeledes klart, at en del af de dimensionerede tiltag ikke kunne gennemføres af økonomiske årsager, ligesom entreprenøren havde en del ændringsforslag til processen, der blev accepteret af rådgiver og bygherre. De vigtigste forskelle på det designede anlæg og det først opstillede anlæg er beskrevet i kapitel 2.8.

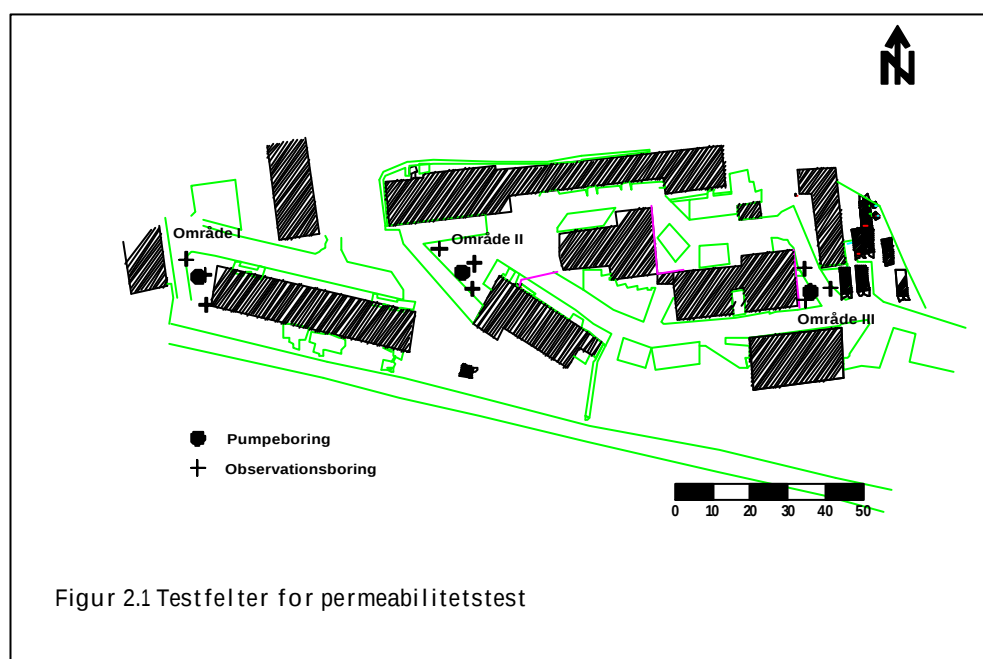
2.1 Testning af permeabilitet

Inden dimensionering blev der udført ventilationstests i tre områder for fastlæggelse af de hydrauliske forhold i smeltevandsaflejringerne over moræneleren /16/. I hver af de tre testområder (område I, II og III), blev der etableret 4 boringer - én pumpeboring og tre observationsboringer. Observationsboringer var placeret i afstandene ca. 2, 4 og 6 m fra den enkelte pumpeboring. Placeringen af opstillingerne fremgår af figur 2.1.

I hvert område blev de hydrauliske forhold fundet for den øvre og den nedre del af smeltevandsaflejringerne. Idet alle boringer er udført med dobbelt filtersætning, således, at der kunne testes i to niveauer. Det øverste sæt filter var placeret fra henholdsvis 1-2 m, 1-2 m og 2-3 m under terræn i testfelterne I, II og III. De nederste filtre var placeret i henholdsvis 3-5 m, 3-4 m og 4-6 m under terræn.

For de enkelte pumpeboringer i testområderne blev porøsiteten af den luftfyldte del i jordmatricen beregnet på baggrund af vandindholdbestemmelser.

For de enkelte pumpeboringer blev der på baggrund af tørstofanalyser af jordprøver, udtaget for hver halve boremeter, udarbejdet diagrammer der viser hvor stor en del af den totale porøsitet der udgøres af luft. Disse beregninger er baseret på antagelse af den totale porøsitet (0,35) samt på antagelse af jordens vægtfylde (1.700 kg/m^3). Det fremgår heraf, at enkelte af filterintervallerne (specielt nedre filter - område I og nedre filter - område III) ikke var aktive over hele filterstrækninger. Dette ses ved at den luftfyldte porøsitet over visse dele af filterstrækningerne ikke oversteg 0,1, hvilket anses



Figur 2.1 Testfelter for permeabilitetstest

for et minimum for at der skal være et større antal sammenhængende luftfyldte porer, der kan virke som transportvej ved en trykdreven transport.

De udarbejdede diagrammer med vandindhold og geologisk beskrivelse af pumpeboringerne fra hvert område er vist i figur 2.2. Det ses, at den luftfyldte porøsitet er knyttet til de mere høppermeable dele af sedimentet,

i modsætning til de mere lavpermeable dele (silt og ler), der er karakteriseret ved deres højere vandindhold.

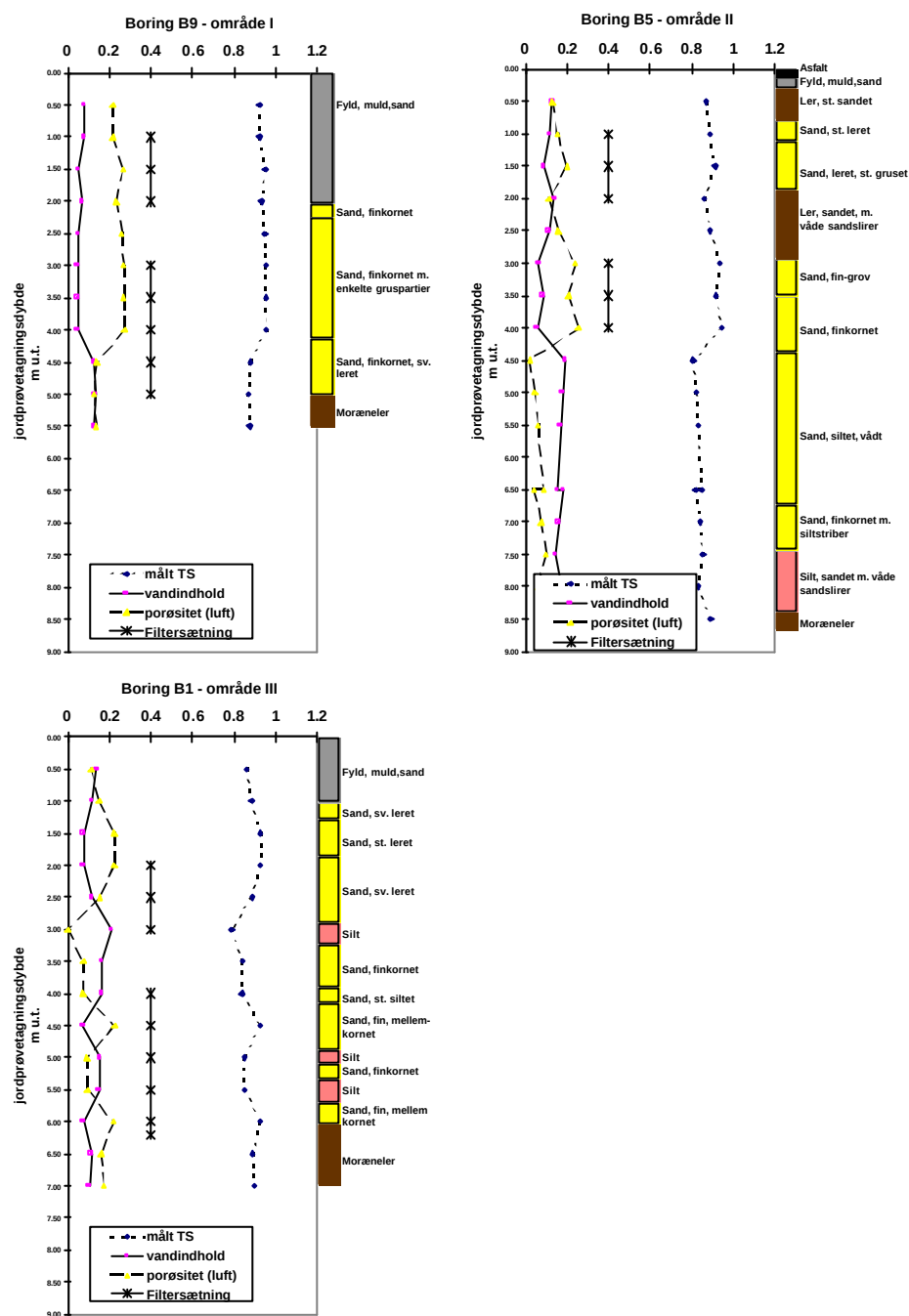
Vandrette og lodrette permeabiliteter blev bestemt ved fortolkning af transiente trykdata fra observationsboringerne. Til fortolkningen blev programmet AQT Solve anvendt, med en metode baseret på Hantusch-Jacobs ligninger. Influenradius blev defineret ved afstanden, hvor det observerede vakuum var 1 hPa (1 mbar) under de aktuelle testbetingelser.

I tabel 2.1 er opsummeret hovedresultaterne af testen.

Tabel 2.1: Hovedresultater fra ventilationstesten i de tre delområder.

Parameter	Område I	Område II	Område III
Øvre lag			
Horisontal permeabilitet, [Darcy]	50	17	3
Vertikal permeabilitet, [Darcy]	8	3	3
Specifik ydelse [$\text{m}^3/\text{hPa t m}$]	0,9	0,1	0,4
Influenradius [m]	4,5	4,0	4,0
Nedre lag			
Horisontal permeabilitet [Darcy]	75	5	1
Vertikal permeabilitet [Darcy]	0,3	5	0,1
Specifik ydelse [$\text{m}^3/\text{hPa t m}$]	0,3	0,9	0,02
Influenradius [m]	5,5	6,5	9,0

Generelt viste testene, at det var muligt at ventilere område I, II og III med et passende antal boringer. Overordnet ses det, at influenradius (boringens påvirkningsareal) var størst på de dybe filtre, som følge af den mindre lækage fra overfladen. Her kan der regnes med en influenradius i størrelsen 6,5 m. For de øvre filtre gælder en influenradius i størrelsen 4,5 m.



Figur 2.2 Geologisk profil med filtersætning af testens pumpeboringer med angivelse af tørstofindhold, vandindhold og porøsitet.

2.2 Dampinjektion og luftekstraktion

Dampinjektionens størrelse blev i udgangspunktet dimensioneret ud fra permeabiliteterne bestemt ved ventilationstesten. Ved dimensioneringen blev det vurderet, at Darcys lov med rimelighed kunne beskrive dampstrømningen med de begrænsninger der er nævnt i /1/.

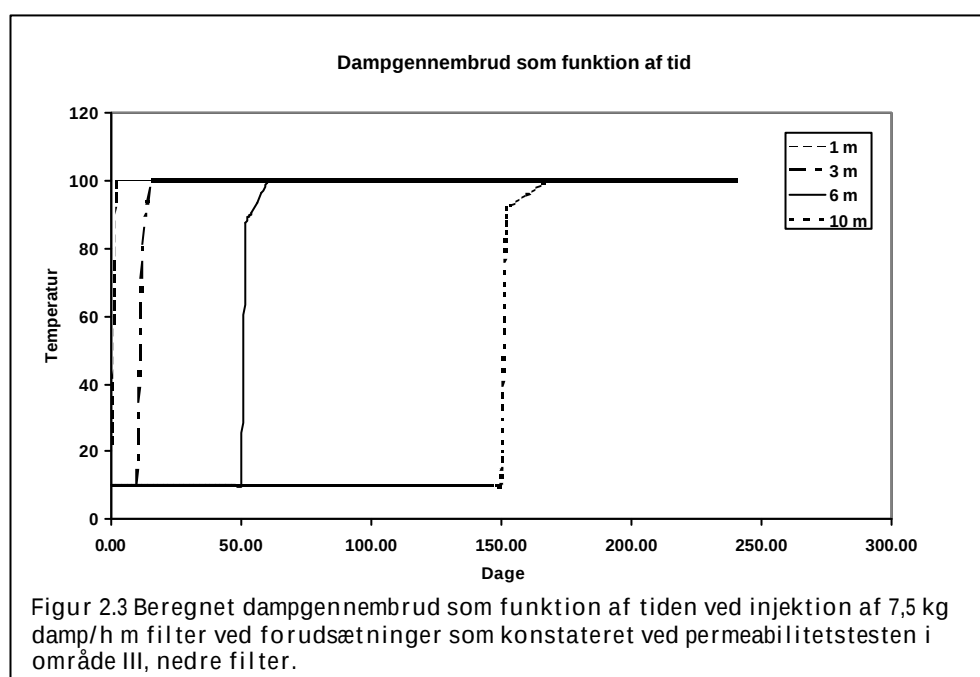
Det ses af resultaterne fra ventilationstesten i tabel 2.1, at det mindst permeable område var område III, hvor der var fundet en horisontal permeabilitet på $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ umiddelbart i overgangen til moræneleren /9/.

Ved dimensioneringen blev det antaget, at filtrene skulle placeres således, at top af filtrene var 5 m.u.t. Vægten af 5 m jord svarer til et overtryk på ca. 0,8 bar. Hvis trykket ved filtret oversteg dette, var der en risiko for jordbrud, så damp kunne slå op til overfladen. For at indlægge en vis sikkerhed besluttede vi som dimensioneringskriterium at anvende et injektionstryk på 0,5 bar overtryk for dampinjektionen.

Med den lavest målte permeabilitet som udgangspunkt gav 0,5 bar overtryk basis for en injektion af ca. 12 m³ damp/m filter h svarende til ca. 7-8 kg damp/m filter i dårligste fald. Som eksempel på beregning af fremdriften under disse forudsætninger er der på figur 2.3 vist den forventede udbredelse af dampfronten som funktion af injektionsperioden.

Det bemærkes, at dampgennembruddet vist i figur 2.3 ikke er korigeret for tab.

Tabet blev estimeret ved at anvende varmeledningsligningen til at beregne tabet over et hhv. 1 m tykt lag i toppen og et 3 m tykt lag i bunden, hvor temperaturgradienten var 90°C over de nævnte afstande. Ved denne metode blev et varmeledningstal på 2 W/mK anvendt til beregningerne. Disse beregninger angav, at det var muligt at opvarme ud til mindst 6-7 m i det mest konservative tilfælde.



Da ventilationstesten var blevet udført under forhold med relativ stor vandmætning (se figur 2.2 for detaljer) skønnede vi, at den effektive permeabilitet under driften ville være noget større end det vi observerede ved testen, pga. et større porevolumen ville være tilgængeligt. I /9/ er angivet, at vi forventede en effektiv permeabilitetsøgning på en faktor 5-10 i forhold til det målte, forårsaget dels af udtørring og dels af en mindre hævnning af filtrene. Med dette ville en maksimal afstand på 10 meters afstand mellem borerne være et dimensioneringskriterium, der kunne anvendes. Den periode der forventedes for at opnå opvarmning volumenet ud til 10 m fra boringen blev på baggrund af disse antagelser estimeret til at være ca. 60 dage med en injektion på ca. 100 kg/filter h.

Da borerne udover at skulle anvendes som injektionspunkter også skulle anvendes til ekstraktion af luft/damp blev der også udført beregninger af vakuum og flow af luft på baggrund af de udførte ventilationstest. Det blev estimeret at ved en oppumpning på ca. 50 m³/h filter ville der være et meget højt luftskifte (10-15 gange/dag), hvilket ville være tilstrækkeligt til at fjerne dampe og effektivt forhindre en spredning. Det maksimale vakuum der skulle anvendes blev beregnet til 600 mbar undertryk (400 mbar absolut).

Det blev derfor i forbindelse med udbuddet beluttet at vælge 10 m som dimensioneringsafstand mellem borerne der skulle anvendes til kombineret dampinjektion/luftekstraktion. Bilag E viser det oprindelige boringslayout som det var tænkt i udbuddet. På baggrund af det store antal af borer der skulle injiceres i, hvis hele området (hhv. I+II og III) skulle opvarmes til kogepunktet overalt på en gang, blev det besluttet kun at injicere i et mindre antal borer af gangen for at reducere kedelstørrelsen. Vi besluttede at der skulle kunne injiceres damp i ca. 20 borer af gangen med 100 kg/filter h, svarende til en samlet ydelse på ca. 2.000 kg/h. Dette blev i forbindelse med kvalitetssikringen af designet vurderet at være en passende kedelstørrelse, volumenet taget i betragtning. I alt blev der på denne baggrund placeret 147 borer med hhv. 74 og 73 borer i område I+II og III.

Borerne skulle udføres som 6" forede og uforede borer afhængig af geologien, filtersat med 2" stålfiltre i 3 meters længde. Filtrenes bund blev placeret 1 m ned i moræneleren, således at 2 m filter sad i de mere permeable aflejringer. Filtrene skulle afproppes med opslemmet bentonit fra top af filtersætningen til terræn (brønd til boringsafslutning). I udbudsmaterialet var det yderligere specificeret, at der i toppen af hver boring skulle monteres hhv. en tryk- og temperaturtransmitter, så disse parametre kunne måles on-line.

Vi vil i denne forbindelse pege på at Miljøstyrelsen efterfølgende har fået udarbejdet en model der kan lave beregninger af dampinjektion og varmeudbredelse mere præcist i én arbejdsgang, kaldet MODI /10/. Modellen og tilhørende dokumentation kan hentes på Miljøstyrelsens hjemmeside www.mst.dk.

2.3 Vandoppumpning fra sekundært magasin

I forbindelse med udarbejdelsen af projektredegørelsen /9/ blev det konstateret, at der stort set kun var sekundært vand i de dybest liggende partier af moræneleren, lokaliseret i lunger i overfladen. Der var således ikke fra starten en forventning til, at der skulle fjernes større mængder vand fra de glacielle aflejringer. I /9/ blev det vurderet at tilstrømningen var 1-2 m³/h fra

omgivelserne. Herudover var forventningen, at der skulle injiceres ca. 2 m³/h som damp, svarende til at der maksimalt skulle oppumpes 5 m³ frit vand /h.

Boringsplaceringen blev bestemt ud fra de lokale lavpunkter i moræneleren. I forbindelse med udbuddet blev morænelersoverfladen fastlagt fra den eksisterende viden fra undersøgelserne. Den aktuelle placering blev ændret i forhold til projektet på baggrund af en revurdering af morænelersoverfladen baseret på de informationer, der blev indhentet ved etablering af damp og ekstraktionsboringerne. Alt i alt blev det dimensioneret, at der skulle placeres 21 boringer til opsugning af det sekundære vand.

Boringerne skulle udføres som 8" forede boringer ned til 1,5 m under morænelersoverfladen. Boringerne skulle filtersættes med 4" stålør i 2 meter længde. Over filtersætningen skulle der anvendes opslemmet bentonit til afpropning i den umættede zone. I hver boring skulle der efterfølgende installeres en vanddrevet injektor pumpe af typen Grundfos 46B. Pumpen blev valgt på baggrund af muligheden for at kunne pumpe vand selv ved relativt høje temperaturer.

2.4 Vandoppumpning fra primært magasin

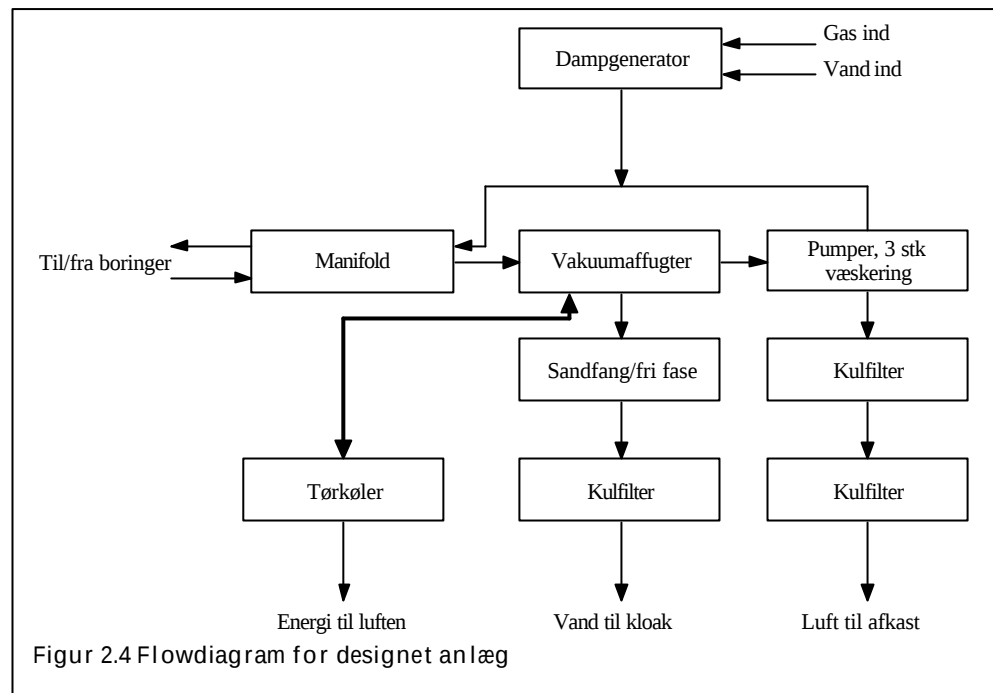
Oppumpningen af vand fra det primære magasin skulle tjene et formål i en del år, idet det ikke var forventet at dampoprensningen ville virke længere ned end 1-2 m i den underliggende moræneler. Forventningen var derfor, at der i en længere periode skulle oppumpes fra det primære magasin for at fjerne den efterladte restforurening. Der blev derfor i forbindelse med undersøgelserne forud for dimensioneringen udført en korttids pumpetest på det underliggende kalkmagasin /13/. Rambøll havde i forbindelse med de indledende undersøgelser også udført en pumpetest /6/. De to test gav noget forskellige transmissivitetsværdier, dog begge relativt høje. De fundne T værdier lå i intervallet $2-60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Forureningens bredde på tværs af strømningsretningen, blev udfra de udførte undersøgelser skønnet til at være ca. 200 m. Gradienten på magasinet blev udfra de tidligere undersøgelser skønnet til ca. 0,001. På denne baggrund blev det beregnet, at der skulle oppumpes 10-60 m³/h fra det primære magasin for at lave en afskæring af det forurenede område.

I forbindelse med udbuddet /11/ blev oppumpningen fastlagt til 60 m³/t. Der skulle pumpes fra 6 boringer, heraf 5 nye der skulle etableres i forbindelse med anlægsarbejdet. Boringerne skulle placeres med jævn afstand på tværs af oppumpningsranden jf. bilag E.

2.5 Luft og vandbehandling

Det samlede anlæg til dampproduktion og luft/vand behandling bestod af en lang række elementer. De vigtigste er beskrevet i dette kapitel. I figur 2.4 er der vist et overordnet flowdiagram for anlægget, som det blev designet i forbindelse med projektredegørelse og udbudsmateriale.

Som tidligere nævnt skulle en lang række af de udførte boringer tjene 2 formål, idet der både skulle kunne injiceres damp/luft i dem og de skulle på andre tidspunkter kunne anvendes til ekstraktionen. Dette blev organiseret i en manifold hvor der via to ventiler fra hovedrør med henholdsvis damp og vakuum kunne skiftes mellem de forskellige driftsformer.



Det ses af figur 2.4 at der i den oprindelige linieføring af det opsugede gasformige medie var en rækkefølge bestående af:

- Afkøling og udskilning af vand/fri fase (Vakuumaffugter)
- Vakuumpumper
- Kulfiltrering

Væsken skulle efter blanding med den oppumpede mængde fra de sekundære borerer ledes via en fri fase udskiller til et kulfilter.

Energien skulle via et lukket recirkuleret system fra vakuumaffugteren afsættes i luften via tørkølere.

2.5.1 Luftmængde og oppumpning

Den samlede luftmængde der forventedes at skulle pumpes op baseret på de indledende undersøgelser var maksimalt 4.000 m³/h i de perioder hvor alle ca. 80 borer i de to deloprensningsområder blev påtrykt maksimalt vakuum, svarende til et flow på ca. 50 m³/h pr. boring. Den normale drift forventedes at køre med et noget mindre flow, typisk ca. halvdelen af det maksimalt specificerede.

Baseret på de udførte ventilationstest blev det vurderet, at det maksimale vakuum der skulle kunne påtrykkes skulle være 400 mbar absolut for at kunne opnå det dimensionerede flow.

For at opnå en tilstrækkelig driftssikkerhed blev det besluttet at der skulle være 3 pumper der både skulle kunne virke som vakuumpumper og injektionspumper, afhængig af hvordan de blev tilkoblet på systemet. Ved denne konfiguration ville det være muligt selv ved driftsstop af en pumpe at kunne fortsætte opvarmningen og ekstraktionen med 1-2 pumper, og således stadig effektivt kunne fjerne de dannede dampe.

Forskellige pumpetyper blev overvejet og det blev det besluttet, at væskeringspumper var de mest velegnede til formålet, da de både kunne levere det ønskede vakuum og flow. Tørløberpumper som eksempelvis Roots blæsere (Kapselblæsere) blev vurderet problematiske til denne anvendelse, dels i forhold til at kunne levere tilstrækkeligt vakuum, dels med for høj varmeproduktion ved de ønskede ydelser.

I udbudsmaterialet blev det specificeret, at der skulle leveres en pumpecontainer med de tre pumper. Hver pumpe skulle have en ydelse på 2.000 Nm³/h ved 0,4 bar absolut (vakuumfunktion) og 3.000 Nm³/h ved 1,7 bar absolut (injektionsfunktion). Pga. af det store forventede effektforbrug blev det specificeret, at pumperne skulle drives direkte af dieselmotorer, frem for ved anvendelse af el.

2.5.2 Dampinjektion

Ved kvalitetssikringen (udført af Kent Udell, UC Berkeley) af det første design blev der peget på at den oprindeligt dimensionerede dampmængde sandsynligvis ville være for lav (oprindeligt var der foreslået 1.200 kg/h). Dette blev derfor øget til en specifikation af ydelsen på 2.000 kg/h. Det forventede arbejdsstryk blev på baggrund af ventilationstesten vurderet til at ligge omkring 2 bar absolut ved afgang fra kedelen. De 2 bar svarer til 1,5 bar ved filteret + 0,5 bar overskud til bl.a. strømningstryktab igennem rør, ventiler mv. Kedelen blev specificeret til at kunne reguleres indenfor et ydelsesområde på 200-2.000 kg/h og skulle placeres i separat containerenhed sammen med hjælpeanlæg som blødgøringsanlæg mv. Som brændsel blev det specificeret at der skulle anvendes naturgas.

2.5.3 Luftkøling og rensning

Luftkølingen blev specificeret til at skulle foregå i en vakuumaffugter, placeret umiddelbart efter samling af rørene fra de enkelte borer i manifolden. Kølingen skulle udlægges for en mængde på 4.000 Nm³ damp/luft/h ved 70-100 % relativ fugtighed og en medietemperatur på op til 100 °C. Dette svarer til ren damp ved maksimum temperatur og vandindhold. Herudover skulle der sideløbende kunne ledes 10 m³ vand/h ved en temperatur på 50 °C til køleren. Der skulle kunne køles ned til ca. 30 °C for begge medier svarende til en termisk effekt på ca. 2.300 kW på gassiden og ca. 230 kW på vandsiden, i alt ca. 2.500 kW.

Den afsatte effekt skulle fjernes til omgivelsesluften via tørkølere i et recirkuleret system.

Efter endt afkøling skulle luften ledes via vakuumpumperne igennem 2 kulfiltre i serie, således at en større effektivitet kunne opnås på kullene ved filterskift. Filtrene skulle kunne håndtere 4.000 Nm³/h og blev specificeret med 2•1.500 kg kul.

2.5.4 Vandbehandling

Den opsugede vandmængde der skulle kunne behandles i anlægget blev i projektet specificeret til 10 m³/h + vandmængden der kondenserede fra den opsugede damp/luft blanding, svarende til maksimalt 2,3 m³/h eller i alt ca. 12,5 m³/h. Væsken skulle efter at have forladt affugter og køler have en væsketemperatur på maksimalt 30 °C. Efter afkøling skulle vandet ledes til et sandfang/fri fase udskiller og herefter ledes via kulfilter til udledning til kloak.

2.6 Monitering

Under driften var der planlagt monitering af:

- Temperatur i jorden, i alle injektion/ekstraktionsboringer samt forskellige steder i anlægget.
- Tryk i injektionsboringer og forskellige steder på anlægget.
- Flow af damp/vand/luft fra de enkelte boringer samt samlet.
- Forureningskoncentrationer og andre parametre i opsuget luft og vand. Herudover skulle der måles for opløsningsmidler i poreluft, vand og jord undervejs i driften.
- Sætninger på bygninger ved nivellement af fastmonterede bolte i fundamenterne.

I det følgende er disse moniteringstiltag nærmere beskrevet.

2.6.1 Temperaturmålinger

Monitering af temperatur i jord og boringer skulle foregå ved hjælp af:

- Teknologiboringer i to typer, installeret med 24 temperaturfølere i hver, udelukkende til måling af temperatur i vertikalt profil i jorden.
- Vakuuminjektionsboringer, temperaturtransmitter på toppen af filterrøret, til måling af temperatur på den opsugede luft/damp.
- Monitoringsboringer, temperaturtransmitter installeret under bygningerne, til at følge temperaturen direkte under gulv.
- Diverse temperaturtransmitter på behandlingsanlægget.

2.6.1.1 Teknologiboringer

Der blev planlagt 6 stk. type 1 teknologiboringer og 24 stk. type 2 teknologiboringer. Boringerne skulle etableres for at få et detaljeret kendskab til varmeudbredelsen i jorden med særlig fokus på dampfrontens udbredelse. Begge type boringer skulle føres ned til 12 m under terræn og udbygges med et styr, hvor der monteredes 24 temperatursensorer af type K med 0,5 meters mellemrum. Boringen skulle derefter efterfyldes med opslemmet bentonit. Ledninger fra sensorerne i type 1 boringerne skulle føres op i en brønd og tilsluttes SRO-anlægget for online-målinger. Teknologiboringer type 2 skulle udbygges som type 1 boringerne, men kun med manuel måling af temperaturen i brønden.

2.6.1.2 Vakuuminjektionsboringer

På toppen af filteret (blindrøret) fra alle vakuum/injektionsboringer blev det planlagt at montere en temperaturtransmitter. Det var planlagt at måling af temperaturer på boringshovederne i driftsperioden skulle være den væsentligste styrende parameter for fremdriften. Formålet med temperaturmålingerne var således at følge varmetransporten og temperaturudbredelsen under injektion af damp. Dampinjektionen kunne så løbende optimeres ved at tilføre mest damp til de kolde områder og mindre til allerede opvarmede områder. Temperaturen på boringshovederne skulle afspejle temperaturen i det opsugende medie og kunne følges ved hjælp af trendkurver opsamlet via SRO-anlægget.

2.6.1.3 Monitoringsboringer

Der blev projekteret 20 monitoringsboringer med temperaturtransmittere med online registrering til måling af temperatur under bygningerne. Boringerne skulle

føres vandret ind gennem fundamentet, så tæt under gulvet som muligt. Målingerne skulle udføres for at sikre, at der kunne justeres på injektionen af damp under bygningerne for at hindre gener for bygningernes brugere. Der skulle kunne indsættes alarmniveauer i overvågningssystemet.

2.6.1.4 Behandlingsanlægget

Behandlingsanlægget var beskrevet som funktionsudbud og derfor ikke beskrevet i detaljer i udbudsmaterialet. Der var dog stillet krav om måling af temperatur på kølevand før og efter køling, temperatur i blandingsmanifold og lufttemperatur ind og ud af anlægget. For de opsamlede temperaturer i behandlingsanlægget skulle der også i SRO-anlægget kunne indsættes de nødvendige alarmer for høj temperatur.

2.6.2 Trykmålinger

Monitering af tryk i jorden og boringer skulle foregå ved hjælp af:

- Vakuuminjektionsboringer, tryktransmitter på toppen af filterrøret til måling af tryk på den opsugede og injicerede luft/damp.
- Moniteringsboringer, tryktransmitter installeret under bygningerne til at følge trykket direkte under gulv.
- Diverse tryktransmittere på behandlingsanlægget.

2.6.2.1 Vakuuminjektionsboringer.

Trykmåling på vakuum/injektionsboringerne blev projekteret primært med henblik på at sikre, at der i den enkelte boring ikke var et større injektionstryk af dampen end trykket af den overliggende jord. Dette skulle sikre mod dampgennembrud til overfladen. Der skulle monteres en tryktransmitter med måleområde fra -1 til +1½ bar på toppen af filteret (blindrøret) i hver boring. Transmitterne skulle opkobles til SRO-systemet med henblik på registrering og alarmhåndtering.

2.6.2.2 Moniteringsboringer.

Der blev projekteret 20 stk. moniteringsboringerne med tryktransmittere til registrering af tryk under bygningerne. Dette skulle sikre, at der kunne justeres på injektionen af damp under bygningerne for at hindre gener for beboerne. Boringerne skulle føres vandret ind gennem fundamentet, så tæt under gulvet som muligt. Måleområdet for transmitterne blev fastlagt til -100 til +100 mbar. Transmitterne skulle opkobles til SRO-systemet med henblik på registrering og alarmhåndtering.

2.6.2.3 Behandlingsanlægget

Behandlingsanlægget var beskrevet som funktionsudbud og derfor ikke beskrevet i detaljer. Der var dog stillet krav om måling af tryk før vakuumaffugter og i blandingsmanifold med tryktransmittere. Transmitterne skulle opkobles til SRO-systemet med henblik på registrering og alarmhåndtering.

2.6.3 Flowmålinger

Måling af flow ind og ud af behandlingsanlægget skulle foretages med henblik på vurdering af energi- og massebalancer. Herudover var det meningen at de indsamlede data skulle anvendes til prognoser af fremdrift og som styringsredskab sammen med de indsamlede temperatur-data. Målinger skulle foretages en række steder i behandlingsanlægget beskrevet herunder.

2.6.3.1 *Manifold*

I manifolden (fordelingssystemet fra hovedrør til de enkelte rør ud til hver vakuum/injektionsboring) skulle der måles et flow ved hjælp af et pitotrør på røret ud til hver enkelt vakuum/injektionsboring. Pitotrør bruges til at måle differensterkningen mellem en strømmende gas og en stillestående gas. Differensterkningen er en funktion af den hastighed gassen strømmer med og dermed ligefrem proportional med mængden.

Flowmålingerne af dampflowet i manifolden skulle primært bruges til at regulere dampmængden til hver enkelt boring således, at opvarmningen kunne foregå jævnt. Flowmålingerne af den opsugede luft skulle primært anvendes til at sikre, at der var et tilstrækkeligt luftflow omkring dampzonen, således at dampe af opløsningsmidler udsigtet ikke strømmede op i bygninger eller udeluft.

2.6.3.2 *Behandlingsanlægget*

Behandlingsanlægget var beskrevet som funktionsudbud og derfor ikke beskrevet i detaljer. Der var dog stillet krav om måling af luftflow før og efter vakuumpumperne med vortex flowmålere. Luftflowmålerne skulle kunne måle i intervallet 0-4.000 Nm³/h.

Dampgeneratoren skulle forsynes med en fødevandsflowmåler og en dampflowmåler (0-2.000 kg damp/h) til måling af den samlede dampmængde.

Der skulle installeres en vandflowmåler med pulstæller på ledningen fra behandlingsanlægget til kloakken.

I selve maskinparken skulle der registreres en række ting såsom start og stop af pumper, driftstimer på pumper mv.

Herudover skulle en lang række forbrug måles. Strøm, gas og blødgjort vand skulle registreres ved særskilte målere for afregning med driftsentreprenøren.

2.6.4 **Analyser i luft**

Til måling af koncentrationer af klorerede opløsningsmidler blev der i toppen af gruskastningen til alle vakuum/injektionsfiltre placeret en poreluftspids til udtagning af poreluftprøver. Desuden blev der placeret 20 stk. poreluftspidser i 5 tracéer langs Industrivej fra hot spot af forureningen til 20 m udenfor det forurenede og opvarmede område. Poreluftanalyser fra tracéerne skulle dokumentere eventuelt spredning af forurening ud af det opvarmede område.

I manifolden skulle der være der for hver enkelt udgang/indgang til boringerne være en prøvetagningstuds, således at måling af klorerede opløsningsmidler i de enkelte boringer kunne udføres.

I samme punkter som der blev placeret temperatur- og tryktransmittere under bygningerne (moniteringsboringer), skulle der placeres en poreluftspids til udtag af poreluftprøver under driften, således, at det kunne kontrolleres at der ikke opstod uacceptabelt høje koncentrationer under bygninger der blev anvendt til beboelse.

I behandlingsanlægget blev der placeret prøvetagningstuds til udtagning af luftprøver før behandlingsanlæg (på hovedstrengen ind i anlægget), før kulfilter og efter kulfilter.

Det blev planlagt at måle ilt, kuldioxid, PCE og TCE under driften.

2.6.5 Koncentration i vandprøver

Inden opstart, under drift og efter afslutning skulle der udtages grundvandsprøver fra borerne anvendt til vandpumpning til analyse for den generelle grundvandskemi og forureningsniveau af opløsningsmidler.

2.6.6 Koncentration i jord

Inden opstart skulle der gennemføres 36 MIP sonderinger til 9 m under terræn, hvor der skulle udtages 36 jordprøver til analyse for klorerede opløsningsmidler ved GC/ECD. Forureningsniveauet skulle dokumenteres i 4 felter af 4 m². Den planlagte MIP sondering blev dog skrinlagt allerede i forbindelse med afprøvningen af metoden inden opstarten.

Dokumentationsprogrammet skulle gentages en gang under driften og en gang efter afslutning af oprensningen.

2.6.7 Diverse målinger

2.6.7.1 Nivellement

Som led i registrering af følgevirkninger af opvarmningen blev det planlagt at udføre nivellement (± 2 mm) af udvalgte bygninger i oprensningsområdet. Nivellementet skulle eftervise eventuelle sætninger af jordlagene, som kunne påvirke bygningerne. Nivellementer skulle udføres før opstart af afværgeanlægget og 2 gange under driften og endelig efter ca. 6 måneders afkøling.

Der skulle inden opstart placeres gips i eksisterende revner i bygninger for dokumentation af sætninger.

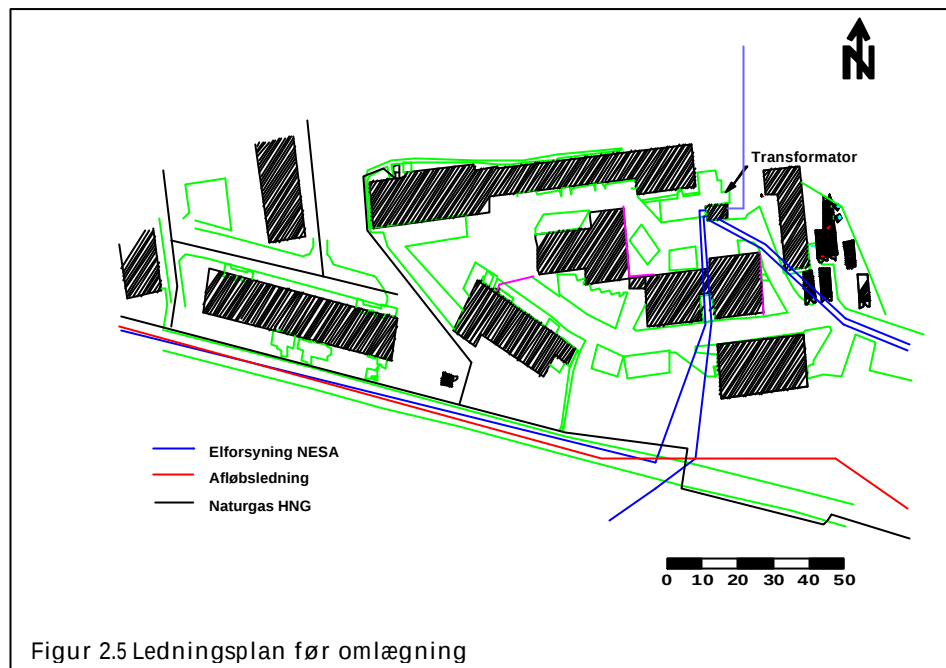
2.7 Omlægning af diverse ledninger

I projekteringsfasen blev der taget kontakt til ledningsejerne HNG, NESA og TeleDanmark der alle havde større ledninger i oprensningsområdet. HNG blev ligeledes kontaktet, da anlæggets dampgenerator efter ønske fra bygherren skulle drives ved naturgas.

Udover disse ledningsejerne havde kommunen og ejerne af de berørte matrikler forskellige former for kloakker i området, heriblandt en 1.600 mm regnvandsledning.

På figur 2.5 er vist naturgas- og elkabler samt større kloakledninger. Der løb 2 naturgasledninger gennem arealet. Derudover var der en transformatorstation inde på arealet, mellem Industrivej nr. 22 og 35, hvortil der var ført 5 store elkabler.

Det blev besluttet at omlægge ledningerne for gas og el inden anlægget skulle idriftsættes.



2.7.1.1 Gasledninger

Hovedgasledningen kunne føres uden om oprensningsområdet via allerede lagte rør syd for Industrivej.

Det var kun ældreboligerne på Teglstenen der blev opvarmet ved gas. Her blev alle ledninger og stikledninger i det forventede opvarmede område ført op i stålrør på husmure og gavle.

2.7.1.2 Elledninger

Enkelte stærkstrømskabler til transformatorstationen blev omlagt udenom oprensningsområdet efter anvisning af NESA. Andre kabler blev ved krydsninger med dampfremføringsrør hævet til 30 cm under terræn.

2.7.1.3 Spilde- og regnvandsledninger

De gennemgående hovedkloakker blev TV-inspiceret for at registrere eksisterende skader og påførte skader ved opvarmningen.

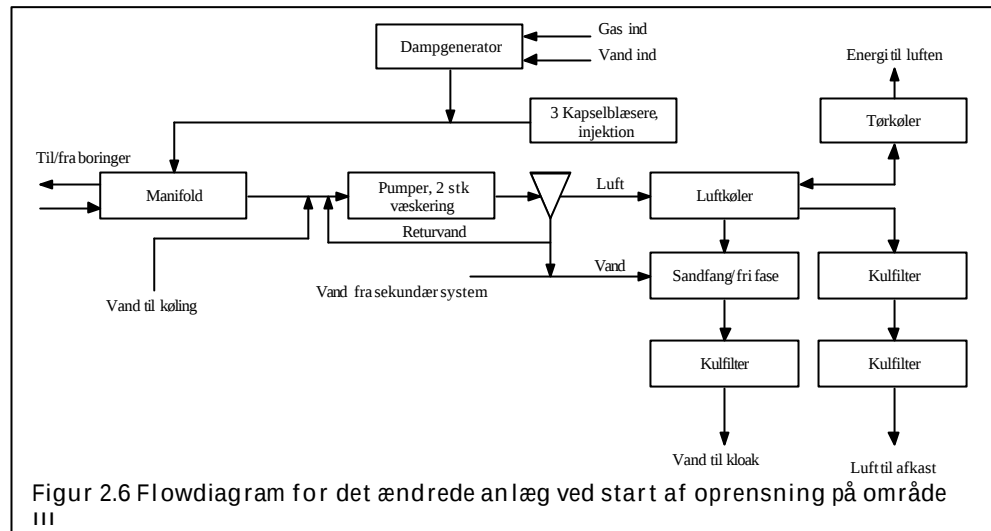
Muligheden for opvarmning af brugsvandet på både Teglstenen og Industrivej blev vurderet at kunne løses ved rindende haner.

2.8 Vigtige afvigelser mellem dimensioneret anlæg og opstillet anlæg

I forbindelse med behandling af de indkomne tilbud fra licitationen stod det klart at der på en række punkter ikke var overensstemmelse mellem den forventede pris og de indkomne tilbud. Der blev derfor igangsat et større arbejde med at finde mulige konstruktive ændringer i procesopbygningen mv. Dette arbejde ledte sammen med de forslag der lå fra entreprenøren til et andet anlægsdesign end oprindeligt tiltænkt. I figur 2.6 er vist et flowdiagram for processen som den kom til at se ud i det anlæg, der blev opstillet ved start af oprensningen på område III.

De primære forskelle kan opsummeres ved følgende punkter:

- Ingen separering af vand og gasfase før tilledning til vakuumpumperne
- Kun en begrænset afkøling af mediet inden gennemløb af vakuumpumperne
- Tilsætning af stor vandmængde til køling foran vakuumpumperne
- Separate pumper til injektion og ekstraktion. Alle pumper eldrevne frem for dieseldrevne.



Herudover var der en anden vigtig konstruktion, der blev sparet væk. I det oprindelige design var der monteret temperatur- og tryktransmittere på hver enkelt injektion/ekstraktionsboring i brønden på toppen af filteret. Udgifterne til kabling og transmittere var relativt høje. Det blev derfor besluttet at udelade tryk- og temperaturmålingerne ude i de enkelte borer og i stedet måle temperaturerne på de enkelte rørstreng fra borerne inde i manifolden, for på denne måde at få et mål for temperaturen i den oppumpede luft.

3 Drift og driftserfaringer

3.1 Driftsstrategi

Driftsstrategien for dampinjektionen blev fra starten fastlagt til at skulle foregå fra randen og ind mod centrum af forureningen, se evt. /1/ for overvejelser bag dette. På grund af størrelsen af de tre berørte områder blev det vurderet, at det ikke ville være muligt at behandle hele arealet på én gang. Der blev derfor splittet op i to deloprensninger bestående af område III og I+11.

3.1.1 Område III

I område III var arealet på godt 5.000 m². Området blev dækket med 74 kombinerede boringer til injektion af damp og ekstraktion af vand/luft/damp. Den helt overordnede plan for driften der blev lagt fra starten er skitseret i tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overordnet driftsstrategi for område III. Zone angivelserne referer til figur 3.1.

Fase	Beskrivelse
1	Vakuum på alle boringer, 2-4 uger for at fjerne vand samt "stående" PCE dampe i jorden
2	Damp + luft på yderste rand (zone 1), Vakuum på resten (zone 2-4 + center) , til gennembrud i zone 2
3	Damp på yderste rand (zone 1), Vakuum på resten (zone 2-4 + center) , til gennembrud i zone 2
4	Damp+luft på zone 2, Vakuum på zone 3, 4 og center, til gennembrud i zone 3
5	Damp på zone 2, Vakuum på zone 3, 4 og center, til gennembrud i zone 3
6	Damp+luft på zone 3, Vakuum på zone 4 og center, til gennembrud i zone 4
7	Damp på zone 3, Vakuum på zone 4 og center, til gennembrud i zone 4
8	Damp+luft på zone 4, Vakuum på center, til gennembrud i center
9	Damp på zone 4, Vakuum på center, til gennembrud i center
10	Cyklisk injektion i zone 3, 4 og center, til restniveau lavt
11	Eventuel efterpolering i områder med restforurening

Forventningen var, at det ville være muligt at dosere damp+luft/damp i den yderste rand af borer (zone 1) svarende til at der skulle dampes i ca. 20 borer. I denne periode skulle der så måles fremdrift i den nærmeste rand af borer (zone 2) ved temperaturmålinger. Samtidig blev disse anvendt til opslugning af de dannede dampe. Ved dampgennembrud (ekstraktionstemperatur $\approx$ dampstemperatur) i hele inderzonen skulle der så rykkes et zone nærmere mod centrum.

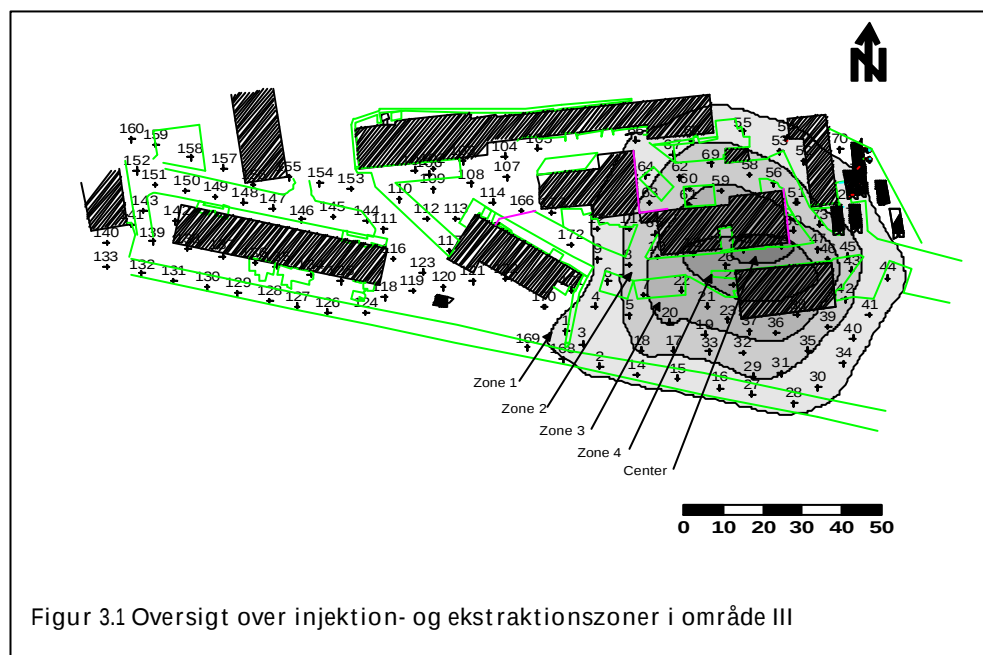
Som det kan ses af tabel 3.1 var der planlagt 2 injektionsperioder for hver zone. I første periode skulle der injiceres en damp/luft blanding for at forhindre en eventuel opkoncentrering af PCE i kondensationsfronten med potentiel mulighed for lodret mobilisering (se evt. /1/ for yderligere information), efterfulgt af ren dampinjektion hvor området skulle bringes op til 100 °C for at fjerne mest muligt af forureningen.

I praksis blev dette gjort ved at injicere i forholdet mellem luft/damp på ca. 200-400 Nm³ luft/h / 1.000-1.500 kg damp/h, svarende til et masseforhold på ca. 1:4 mellem luft og damp, efterfulgt af ren damp. Der blev ikke injiceret luft til der var fuldt gennemslag i alle borer, kun til der var begyndende gennembrud i borerne. I perioder viste det sig også, at modtrykket for injektionen blev stort. For at få den nødvendige energimængde ud i jorden blev der derfor reguleret ned på luftmængden, når dette problem opstod.

Praksis viste, at det var vanskeligt at holde temperaturen oppe i de områder hvor der ikke blev injiceret damp konstant på grund af et relativt højt tab ved varmeledning til terræn (se afsnit 4.1 for uddybende resultater).

Anlægget blev opstartet i sommeren 1999. Der blev kørt en periode på ca. 6 uger, hvor der blev vakuumventileret på samtlige borer. Herefter blev der dampet i zone 1 med vakuum på de resterende områder i ca. 13 uger under store problemer med anlægget (se følgende kapitel), hvorefter det blev besluttet at standse.

Efter en afklaring af økonomiske og tekniske forhold blev anlægget ombygget og igangsat i september 2000 efter den oprindelige strategi som vist i tabel 3.1. Efter ca. 20 ugers drift var zone 1 og til dels zone 2 opvarmet. Opvarmningstiden og omkostningerne vurderedes på dette tidspunkt at være



Figur 3.1 Oversigt over injektion- og ekstraktionszoner i område III

meget store, hvis man skulle holde sig til den oprindelige strategi. Der blev derfor foretaget en afvejelse af den forventede restforurening i forhold til omkostningerne ved at fastholde den oprindelige strategi. I samråd med Københavns amt besluttede vi derfor at gå direkte efter kilden og starte dampinjektionen i zone 3, uden at have gennemvarmet zone 2 fuldkomment. Efter 18 uger afsluttedes dampinjektionen i centeret med en række cykliske sekvenser, for at blive efterfulgt af en polering med vakuumventilation i en periode på godt 4 uger.

Anlægget blev herefter omstillet for at blive klargjort til driften i område I+II.

3.1.2 Område I+II

Efter en grundig rengøring og en ombygning af injektionsmanifolden med henblik på bedre at kunne registrere de tilledte dampmængder blev der startet op i område I+II, der totalt dækkede ca. 3.200 m². I lyset af den erfaring der var gjort om økonomien og effekterne fra område III, blev det besluttet at koncentrere dampindsatsen om hot-spots og ”nøjes” med vakuumventilering i de mest perifere områder.

Der blev indlejet yderligere en dampkedel i forhold til oprensningen af område III, således, at dampproduktionen kunne øges fra ca. 1.100 kg/h til godt 2.500 kg/h, med henblik på at opvarme jorden hurtigst muligt, og herved undgå store energitab til omgivelserne.

Fra de tidligere undersøgelser og erfaringerne fra etableringen vidste vi, at injektionsboringerne i den sydvestlige del af oprensningsområdet ikke lå så langt fra hot-spot som ønskeligt, pga. placeringen af entreprisegrænsen, der udgjordes af skellet ind mod haverne på Gl. Søvej i syd. Med denne placering af entreprisegrænsen var det ikke muligt som i område III helt at omslutte det mest forurenede område med en varm zone inden dampning af hot-spot. Der blev derfor anvendt en speciel strategi på disse boringer i område I, idet der blev kørt korte perioder med damp, efterfulgt af vakuumventilation på de samme boringer. Dette skulle forhindre en spredning af PCE ind på naboarealerne i sydlig retning. Dette blev gentaget 3-4 gange, hvorefter boringerne blev anvendt som ”rene” injektionsboringer frem til gennembruddet i næste zone ind mod centeret af forureningen i område I, beliggende under den øst-vestgående bygning (Teglstenen 26-36).

Eftersom de fleste ”børnesygdomme” var udluget efter erfaringerne fra område III, blev der i område I+II kun anvendt en periode på ca. 10 uger til gennemopvarmningen og den cykliske injektion skulle begynde. På dette tidspunkt løb vi imidlertid ind i et alvorligt problem, der sluttede oprensningen brat. En 1.600 mm regnvandsledning der går gennem område I, indeholdt på grund af stuvningsproblemer forårsaget af en defekt pumpe i en pumpestation, meget store kolde vandmængder genereret ved sneafsmeltning. Da der samtidigt var et brud på ledningen, blev der ledt meget store vandmængder gennem området, der herved blev afkølet. Omkostningerne til dels at tørlægge og des genopvarme område I blev vurderet i forhold til den forventede restmængde af PCE. Konklusionen var, at der ikke var proportionalitet mellem omkostninger og effekt. Derfor blev det besluttet at stoppe opvarmningen. Område II var på dette tidspunkt fuldstændig gennemvarmt, så det blev besluttet kun at fortsætte med vakuumventilationen i dette område. Denne pågik i ca. én uge, hvorefter det blev vurderet, at der ikke var mulighed for at fjerne væsentligt mere masse.



Figur 3.2 Dampgennembrud fra utæt boring (uden vakuum). Brønddækslet fra dampinjektionsboringen ses i baggrunden til venstre.

For begge områder gælder at jorden herefter fik lov til at hvile ca. 6 mdr. inden udtag af dokumentationsprøver af jord/vand/luft. Resultaterne fremgår af kapitel 4.

3.2 Erfaringer med boringer til dampinjektion og rørføringer udenfor behandlingsanlægget

3.2.1 Vakuum/injektionsboringer, beskrivelse af de etablerede boringer

Injektions-og vakuumboringer blev etableret som 6" boringer, hvor der blev sat 2" stålrør som filtre. Boringerne var mellem 6 og 9 m dybe med filter på de nederste 3-5 m. Filtersætningen blev ført ca. $\frac{1}{2}$ - 1 m ned i moræneleren og ellers placeret i de overliggende smeltevandsaflejringer. På den filtersatte del af stålrøret var der boret huller med 1 cm diameter i en afstand på 5 cm. Omkring den perforerede del af stålrøret blev der sat et ståltrådvæv med en lysning på 200µm i vævet. Boringerne blev udbygget med filtersand (Dansand nr. 2) omkring filtret op til ca. 10 cm over filteret. Over filtergruset blev der opfyldt med opslemmet bentonit til ca. 1 m under teræn. Midt for filtret blev der placeret en poreluftssonde monteret på et Ø 6 mm aluminiumsrør, der blev ført op i brønden og monteret med en lynkobling. Oprindeligt var det planlagt at anvende stålrør frem for aluminiumsrør til dette formål. Årsagen til at der blev anvendt aluminiums rør var, at selve poreluftsspidsen var aluminium. Leverandøren af spidserne skulle også levere rørene, og besluttede at når spidserne var af aluminium ville aluminiumsrør være det bedste materiale for ikke at få galvanisk tæring.

3.2.1.1 Erfaringer med boringsafpropning

Under det korte første driftsforløb i efteråret 1999 blev det meget hurtigt klart, at boringsafpropningen mod overfladen gav problemer. Dels blev det konstateret, at der skete en meget hurtig nedsivning af regnvand omkring vakuumboringerne og dels blev der konstateret flere dampgennembrud til overfladen fra dampinjektionsboringer, der var tilbagefyldt med opslemmet

bentonit. Fra vakuumboringerne kunne det konstateres, at der blev suget store mængder falsk luft ned langs filteret og ind i boringen. I figur 3.2 ses et dampudslip fra et utæt filter ud igennem brønden ved toppen af en boring.

I figur 3.3 ses hvordan de lecasten, der ligger omkring boringshovedet i en injektionsboring, er sunket ned på grund af indtørringen af bentonitten. Der er efterladt et større hulrum under overfladen, der udover at kunne virke som spredningsvej for dampen, også udgjorde en risiko for sammenstyrtning af den overliggende jord/asfalt.

I første driftsperiode i efteråret 1999 blev det vurderet, at de mange dampgennembrud til terræn var til fare for mennesker i området og at projektet ikke havde den nødvendige fremdrift, som anlægsopbygningen var på daværende tidspunkt. Det blev på den baggrund besluttet den 15. november 1999 at slukke for dampinjektionen. Vakuumelekstraktionen kørte videre nogle måneder efter en vurdering af, at et helt stop af anlægget i en kortere periode var mere omkostningsfuldt end at køre videre med vakuum på boringerne. Da en løsning af anlægsproblemerne så ud til at trække ud, blev også vakuumelekstraktionen og den øvrige drift lukket ned den 1. februar 2000.

Umiddelbart efter stop af driften blev GEO rekvireret til at udføre gammalog ned gennem borerøret på 11 udvalgte boringer i både område I+II og III for at konstatere, hvor betonitten lå omkring blindrørene. Undersøgelsen /19/ gav ikke noget entydigt resultat, men viste et uregelmæssigt billede af bentonitpakningernes kvalitet.

Der blev efterfølgende udført en Geoprobe undersøgelse ned langs stålroret i 8 udvalgte boringer. Undersøgelsen blev udført både på boringer der havde været i drift i område III og boringer der endnu ikke havde været i drift i område I. Konklusionen i undersøgelsen var, at der i flere boringer først i en dybde af 3- 4 m under terræn kunne genfindes bentonit og at der var huller i bentonitafpropningen. Dette var uafhængigt af om boringerne havde været i drift, dvs. enten ikke havde været brugt, havde været anvendt til vakuumdrift eller påtrykt damp.



Figur 3.3 Vakuum/injektionsboring hvor der skulle have ligget leca-sten op til toppen af nøreluftrøret

Opskrift på ”Storebæltsblanding”

- 40 l vand
- 40 kg alm. cement, ell. Lav alkali
- 10 kg Bentonitpulver, API ell. Wyoming
- 200 g Betochem JN-vert

Figur 3.4 Opskrift på ”Storebæltsblanding”

Dette var en ret overraskende konklusion. Derfor blev entreprenørens forbrug af bentonit undersøgt. Undersøgelsen viste at entreprenøren havde udført arbejdet efter forskrifterne. Der var således ingen sammenhæng mellem forede-/uforede borer, entreprenørens arbejdsbold og de konstaterede problemer med den manglende bentonit.

Vi måtte konstatere, at bentonit eller opslemmet bentonit ikke var egnet som afpropning af dampboringer og vakuumboringer, til trods for at vi var blevet anbefalet dette i forbindelse med kvalitetssikringen af projektet (Kent Udell, UC Berkeley). Den opslemmede bentonit tørrede ud og skabte huller i afpropningen.

Inden igangsætning af 2. driftsperiode i område III blev injektions-/vakuumboringerne renoveret i både område I+II og område III. Renoveringen forgik ved, at løst materiale i de øverste 2-3 m omkring blindrøret blev suget op. I stedet blev der afproppet med en blanding af cement og bentonit, en såkaldt storebæltsblanding. I figur 3.4 er opskriften vist.

Blandingen blev pumpet nede fra og op ved hjælp af et langt stålrør. Arbejdet blev udført på denne måde for at sikre mod at der opstod hulrum under tilfyldningen.

I anden driftsperiode på område III og ved oprensningen af område I+II måtte der kun i enkelte tilfælde efterfyldes med storebæltsblanding, eller der måtte drosles ned i ydelse af dampboringerne på grund af damplækage til terræn. Konklusionen er derfor at efterfølgende projekter bør anvende denne blanding eller lignende ved filtersætninger.

3.2.1.2 Opsugning og udfældning af materiale

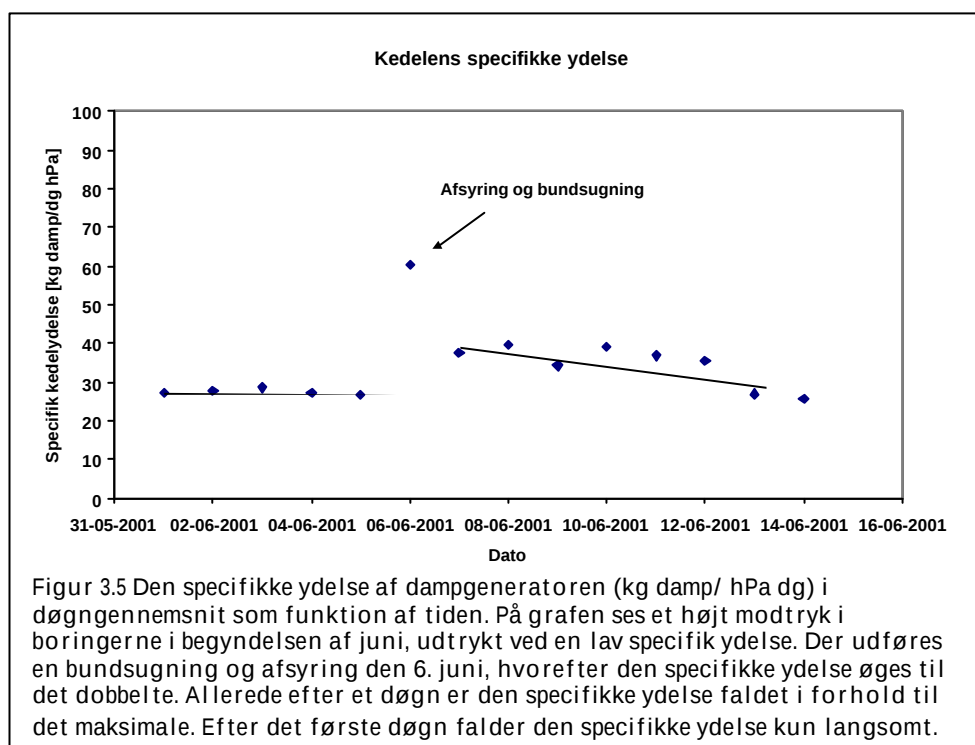
I første driftsperiode i område III kunne det konstateres, at der foruden vand blev opsuget meget fintkornet materiale fra borerne. Dette gav problemer i behandlingsanlægget, se afsnit 3.3 for yderligere beskrivelse af dette. Der var også en mistanke om, at der blev ophobet materiale ude i filterrørene de enkelte vakuumboringer. Ved den oprindelige udførsel af vakuum/injektionsboringerne kunne man ikke komme til blindrøret i brønden, idet dette lå nedgravet under overfladen. Inden igangsætning af 2. driftsperiode blev der monteret opføringsrør og aftageligt dæksel på alle injektions-/vakuumboringer, så det var muligt at inspicere borerne og foretage bundsugninger.

For at vurdere om det var fejl i filterkonstruktionen, der betingede materialetransporten blev der udført en kameraundersøgelse af 2 filtre. Det blev konstateret, at der var udfældninger af kalk og jern på filterrørenes inderside, ligesom en del af hullerne (1 cm i diameter) i filtersektionen var tilstoppede. Vævet der var placeret på ydersiden af filteret så i øvrigt ud til at være intakt. Udfældningerne skete både i vakuumboringer og i dampinjektionsboringer. At der også var udfældninger i boringer der kun havde været anvendt til dampinjektion var overraskende. Det vurderes at årsagen til dette var, at der under dampgeneratorens bundblæsninger dannedes et vakuum i rørsystemet og i boringerne pga. kollaps af dampen i rørene til vand. Når dampen kondenseres til vand reduceres rumfanget 1.700 gange svarende til, at der dannes et voldsomt vakuum. Vakuomet forårsagede ind sugning af vand og materiale i filtrene. Dampgeneratoren bundblæste mellem 5 og 7 gange i døgnet. Injektionsboringerne kom i disse perioder i praksis til at fungere som vakuumboringer. Problemet blev i område III løst ved at sætte tryk på luftinjektionspumperne i dampgeneratorens bundblæsningsperioder. I område I+II blev problemet løst ved, at der blev brugt to dampgeneratorer, der ikke bundblæste samtidig.

3.2.1.3 Boringernes ydelse.

Under 2. driftsperiode i område III kunne det konstateres, at ydelsen faldt og modtrykket steg drastisk på både vakuumboringer og injektionsboringer over få uger. Problemet var som regel størst i boringer der gik fra en dampinjektionsfase over i en vakuumventilationsfase. Afsyringer og bundsugninger af boringer hjalp i et par uger, hvorefter modtrykket steg og ydelsen faldt og det var tid til en ny afsyring/bundsugning.

På figur 3.5 ses den specifikke ydelse fra kedelen (injicerede dampmængde i forhold til overtrykket ved manifolden) før og efter en kombineret afsyring og bundsugning. Det observeres, at den specifikke ydelse i forbindelse med bundsugningen stort set bliver fordoblet, men allerede inden for det første døgn reduceres kraftigt. Efter et døgn var virkningen af afsyring/bundsugning



en forøgelse af den specifikke ydelse med ca. 40 %. Udtrykt på en anden måde betyder det, at der kunne injiceres 40 % mere energi ud i jorden ved det samme injektionstryk efter afsyringen.

På grund af de manglende tryk- og temperatursensorer på boringshovedet var det ikke umiddelbart muligt at identificere den enkelte borings modtryksopbygning ved dampinjektionen, ligesom muligheden for at vurdere om boringen var virksom også var umulig med det anvendte målesetup. Manuel måling af temperaturen på boringshovedet ved hjælp af en IR-temperaturmåler kunne dog identificere uvirksomme boringer der var ”kolde”, idet modtrykket i boringen var større end injektionstrykket. Efter montering af en Ballofixventil på borehovedet kunne det dog nemt konstateres, hvorvidt en dampinjektionsboring kom af med dampen til jorden. Hvis boringen var ude af funktion kondenserede vanddamp i boring og rørføring. Dette kunne blæses ud ved åbning af ventilen. Af sikkerhedsmæssige årsager blev dette udført ved at stå på behørig afstand og betjene ventilen med et langt rørstykke.

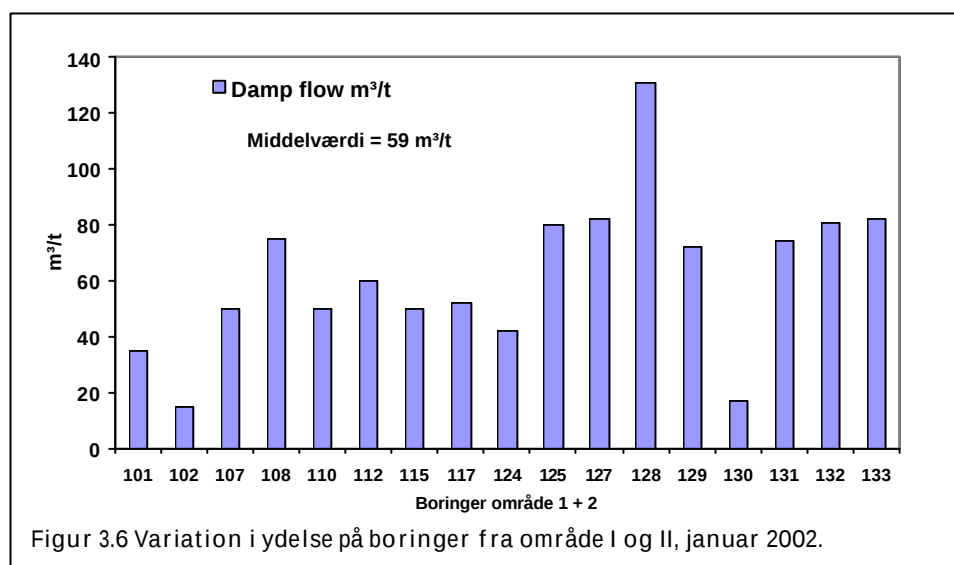
Ved oprensningen i område 1 og 2 var det muligt at måle den enkelte borings ydelse. I figur 3.6 ses boringernes ydelse på en dag i januar 2002. Alle boringerne var kørt med samme tryk. Variationen i dampydelse fra ca. 25% til 220 % af gennemsnitsydelsen på 59 m³/t skyldes permeabilitetsforskelle i jorden og ikke regulering. Som det ses er der ca. en størrelsesorden i forskel på ydelsen i de forskellige boringer.

3.2.1.4 Rørtracé for damp og vakuum

Rørtracéet for dampinjektion og vakuumventilation fra manifolden til boringerne blev udført i 2” sorte jernrør. Rørene blev lagt ned i rørgrave med op til 74 rør i graven.

Der blev i løbet af driftsperioderne for både område I+II og område III kun konstateret brud på rørene i 2 tilfælde. Begge skete i bøjninger, hvor en kombination af for lille fleksibilitet til længdeudvidelser, korrosion og indvendigt slid fra opsuget materiale svækkede rørene med brud og dampudslip til terræn til følge.

Ved opgravning af rørene i forbindelse med retableringen af området efter oprensningen var der forbausende få rør, hvor vi kunne konstatere tegn på



kritisk tæring. Der kunne dog konstateres meget materiale i rørene. Figur 3.7 viser et opgravet rør. Heri ses belægninger af jern, kalk og finkornet sediment i en sådan grad, at lysningen i røret var helt lukket.

Vi oplevede i slutfasen af oprensningen i område III en kritisk situation, da der på et tidspunkt ikke kunne komme damp gennem rørledningen ud til bestemte injektionsboringer. Der kunne ikke påvises dampudslip fra et eventuelt brud. Røret måtte således være blevet fyldt med materiale. Et efterfølgende forsøg på at rense røret ved en syregennemskyldning lykkedes ikke. Syren der blev pumpet ned i rørledningen ved manifolden nåede ikke frem til boringen (filtrerrøret). Rørføringer til andre boringer i nærheden der lå i samme trace var i øvrigt på samme måde skadet eller opfyldte. Problemet blev løst ved at trække isolerede overjordiske fremføringsrør enten direkte fra manifolden eller fra boringer hvis funktion var afsluttet i den sidste fase.

3.3 Erfaringer med behandlingsanlægget inkl. ombygninger

Det opstillede anlæg har givet en række udfordringer under driften. Som respons på disse problemer er der justeret i en række driftsparametre undervejs, ligesom der blev foretaget en række anlægsombygninger i forløbet. Anlægsombygningerne er sket i flere omgange, de primære ombygninger er sket i pausen mellem første og anden driftsperiode i område III og i omskiftningsperioden mellem oprensningen i område III og område I+III.

3.3.1 Overordnet anlægsdesign

I første driftsperiode i efteråret 1999 opstod der en række problemer med behandling af det opsugede medie.

Som anlægget var opstillet blev den opsugede luft fra ekstraktionsboringerne efter at have passeret manifolden ledt direkte til de 2 vakuumumper. Dette



Figur 3.7 Et opgravet rør efter omrensning i område III. Heri ses belægninger af jern, kalk og finkornet sediment i en sådan grad, at lysningen i røret var helt lukket

gav problemer med pumperne, da vandet og luften indeholdt partikler (se afsnit 3.2.1.3) der kunne passere boringernes filter og væv. Ligeledes blev der opsugget meget vand, især lige efter regnvejrshændelser. I forbindelse med et voldsomt regnvejr blev der registreret en tilstrømning via vakuumsystemet på 22 m³ vand i timen, hvilket var væsentligt over hvad anlægget var dimensioneret og bygget til.

Der blev udover det oppumpede vand tilsat vand fra det primære magasin umiddelbart foran vakuumpumperne til køling samt som spædevand. Vandet fra vakuumsystemet såvel som spædevandet indeholdt en stor del bicarbonat (ca. 400 HCO₃⁻ mg/l). Ved afsenkning af trykket i vakuumpumperne blev store dele af bicarbonaten strippet som CO₂, med kalkudfældninger i pumperne til følge. Kalken satte sig sammen med det finpartikulære materiale i pumperne, hvilket gav store driftsproblemer. Vakuumpumperne fik på grund af den meget store indre modstand som følge af udfældningerne et højt strømforbrug og en meget høj temperatur. Vakuumpumperne blev skiftevis afsyret, men problemet vendte hurtigt tilbage. Til sidst var det sådan, at en af vakuumpumperne ikke kunne startes igen efter den var blevet standset for en afsyring.

I pausen inden anden driftsperiode i område III blev vakuumpumperne derfor sendt til Italien for renovering efter kun 3½ måneds drift.

Konklusionen var, at en ombygning af anlægget med en vand og partikeludskiller var nødvendig. Ligeledes skulle der anvendes blødgjort vand til spædevand til væskeringspumperne. Inden anden driftsperiode i område III blev der derfor monteret en cyklon mellem manifolden og vakuumpumperne, således at de fleste partikler og vand kunne udskilles her. Til køling af luften blev der indblæst koldt vand foran cyklonen. Vandet fra cyklonen blev tappet ud via en vandudskiller og ledt til vandbehandlingsanlægget. Vakuumpumperne blev forsynet med et anlæg der sørgede for tilledning af recirkuleret blødgjort vand foran pumperne. I figur 3.8 ses cyklon, vandudskiller og ekstra vandkøler. Bemærk at der i venstre side står to normale skibscontainere ovenpå hinanden for reference af størrelsen på cyklonen.

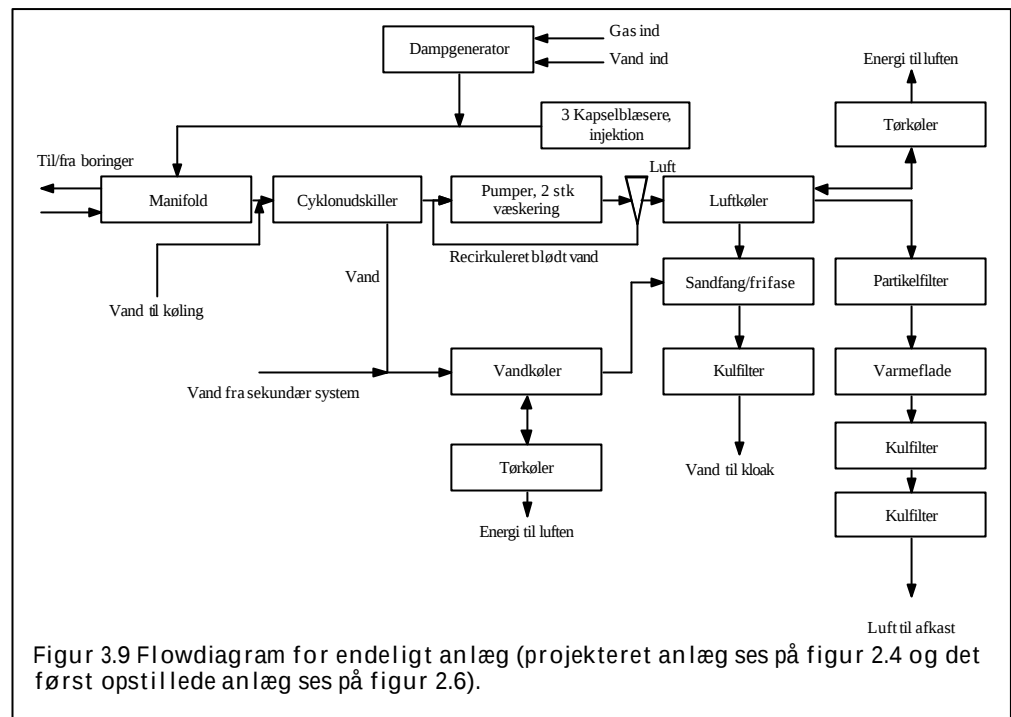
På et tidspunkt i anden oprensningsperiode i område III opstod der problemer med et stort elektrisk forbrug i vakuumpumperne. Årsagen var biologisk vækst i det blødgjorte vand der blev recirkuleret. Dette forøgede vandets viskositet, ligesom der var tyk biofilm i rør og pumper. Der blev derfor tilsat et biocid til det recirkulerede vand for at reducere problemets omfang, hvilket lykkedes i tilfredsstillende omfang.



Figur 3.8 Cyklonen står til højre med indløb i toppen, vandudskilleren ligger til højre og under halvtaget ses en ekstra vandkøler.

Tilstrømningen af vand til området var blevet meget undervurderet i forbindelse med dimensioneringen. De meteorologiske forhold forud for dimensioneringen havde været atypisk tørre, hvilket betød at den forventede vandmængde i det sekundære reservoir blev undervurderet. Problemet ved tilstrømningen var flersidigt, idet det ud over at give problemer i behandlingsanlægget når det blev suget ind via vakuumboringerne også indebar, at opvarmningen af specielt de nederste dele af lagserien i opvarmningszonen blev meget besværliggjort pga. vandets afkølede effekt.

For at mindske indløbet af de store mængder af grundvand til område III og behandlingsanlægget blev der etableret to sugespidsanlæg. Et blev placeret opstrøms oprensningsområde III på tværs af strømningsretningen og et blev placeret i dalsænkningen mellem område II og III. På grund af de stærkt



øgede mængder af vand, der blev tildelt til anlægget var det nødvendigt at udvide behandlingskapaciteten med yderligere to kulfilter. Vi konkluderer at tiltagene for nedsættelse af vandmængderne i områderne og den øgede behandlingskapacitet i anlægget i hovedtræk har virket tilfredsstillende.

Et flowdiagram af det endelige overordnede anlægsdesign som det var ved driftens afslutning ses i figur 3.9. Til sammenligning er flowdiagrammer for det projekterede anlæg og det først byggede vist i figur 2.4 og 2.6. Som det kan ses af figurerne blev anlægget væsentligt mere kompliceret igennem forløbet. En række af de andre anlægssforskelle, der kan ses på diagrammet, er beskrevet i de følgende afsnit.

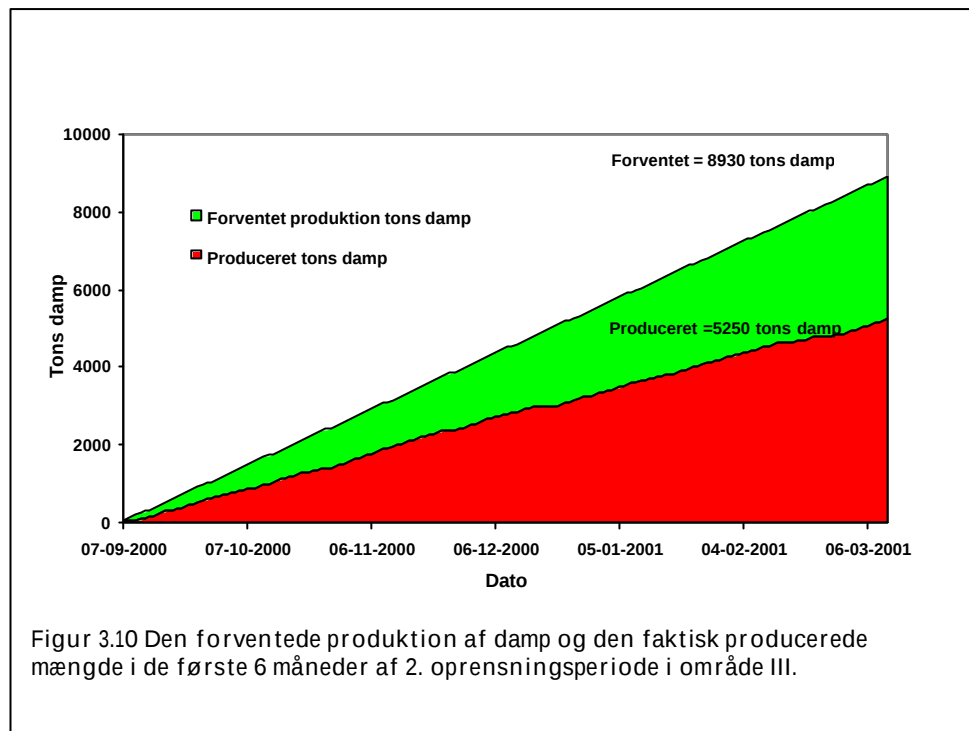
3.3.2 Damp- og luftinjektion

Driftserfaringerne med den del af anlægget der skulle sørge for injektion af damp og luft er beskrevet i dette afsnit. Hovedkomponenterne var dampgeneratoren(e), kapselblæserne til luftinjektion og manifolden til fordeling af dampen.

3.3.2.1 Dampgenerator(ere)

Den opstillede dampgeneratoren der kørte på naturgas gav fra starten problemer med utallige tørkog og andre driftsstop. Det gav driftsoperatøren vanskeligheder at køre dampgeneratoren efter en fastsat ydelse; dampmængde pr. time og ikke som der normalt køres op mod et fastsat modtryk.

For at opnå den ønske virkningsgrad ved forbrændingen af gassen i kedelen monteredes en Economiser, der er en speciel røggasvarmeveksler, der opvarmer fødevandet. Economiseren var dog ikke videre effektiv, da fødevandet løb den forkerte vej igennem, på grund af fejlagtig montage. Economiseren var desuden konstrueret af materialer, der på grund af deres forskellighed ledte til galvanisk korrosion. Allerede inden oprensning i område I+II blev den gennemtærede Economiser derfor afmonteret.



Problemerne med dampmaskinen fortsatte ind til midt i anden oprensningsperiode i område III, hvor utallige nedbrud på dampgeneratoren gjorde, at der ikke skete fremdrift i opvarmningen af jorden. Samtidig måtte vi på dette tidspunkt konstatere, at dampgeneratoren ikke kunne levere de ønskede 2.000 kg damp/h, men højst ca. 1.700 kg/h. Dampflowmåleren monteret på kedelen kom aldrig til at give et troværdigt tal for dampproduktionen. I stedet anvendtes en beregningsmodel udfra gasforbrugsmåleren og naturgassens brændværdi. Der blev på baggrund af røggastemperatur, ilt- og kuldioxid indhold i røggassen fra kedelen estimeret en kedel effektivitet på 90%.

På grund af alle disse problemer var dampproduktionen væsentligt mindre end forventet ud fra specifikationerne. Dette er illustreret i figur 3.10. I perioden vist på figuren er der således kun produceret knap 60 % af den nominelle mængde. Heri er der taget højde for manglende produktion i perioder hvor kedelen bundblæste.

Ombygningen midt i anden driftsperiode i område III omfattede udskiftning af den rørspral hvori dampen genereres i kedelen, og udbygning af et for småt dimensioneret blødgøringsanlæg. Herudover blev der antaget en ny underentreprenør, som var ekspert i dampmaskiner. Han fik trimmet kedelen og fik styringen af kedelen til at fungere væsentligt bedre end tidligere. En anden underentreprenør fik til opgave at styre blødgøringsanlægget.

Inden opstarten på driftsperioden i område I+II blev det vurderet, at opstilling af endnu en dampkedel kunne nedsætte driftstiden væsentligt. De to dampmaskiner kunne køre samtidig og herved øge den samlede ydelse. Herudover kunne de supplere hinanden ved, at de skiftevis bundblæste så det var muligt at holde damp på borerne konstant, og derved forhindre problemet med materialeflugt beskrevet i afsnit 3.2.1.3.

3.3.2.2 Kapselblæsere

Kapselblæserne blev brugt til at iblande luft til den injicerede damp i oprensningen af område III. Kapselblæserne var dimensioneret til at yde

3.000 Nm³/t ved et modtryk på 1,7 bar. Modtrykket i jorden viste sig imidlertid højere en stor del af tiden, jf. problemerne beskrevet i afsnit 3.2.1.3 og 3.1.2.4. Det var ikke et problem for dampgeneratoren der nemt kunne køre op mod de næsten 2 bar der var nødvendige for at trykke tilstrækkelige energimængder ud i jorden. Derimod kunne kapselblæserne ikke komme af med luften op mod de relativt høje modtryk der opstod godt inde i oprensningsperioden. Dette medførte, at den ene af de 3 kapselblæsere brændte sammen, og driften af de to andre derfor blev indstillet. De 2 resterende kapselblæserne blev dog senere brugt, da de blev igangsat hver gang dampgeneratoren bundblæste. Dette blev jf. afsnit 3.2.1.4 gjort for at holde trykket på borer og rørledninger, hvor der ellers ville dannes et vakuum.

3.3.2.3 *Manifold*

Manifolden blev udført som beskrevet i udbudsmaterialet med et hovedvakuumsrør for oven og et hoveddamprør forneden. Der blev monteret en tovejsventil for hver tilgang, således at den enkelte boring kunne åbnes og lukkes for henholdsvis vakuumventilation eller dampinjektion. Det oprindelige anlægsdesign var som vist i figur 3.11.

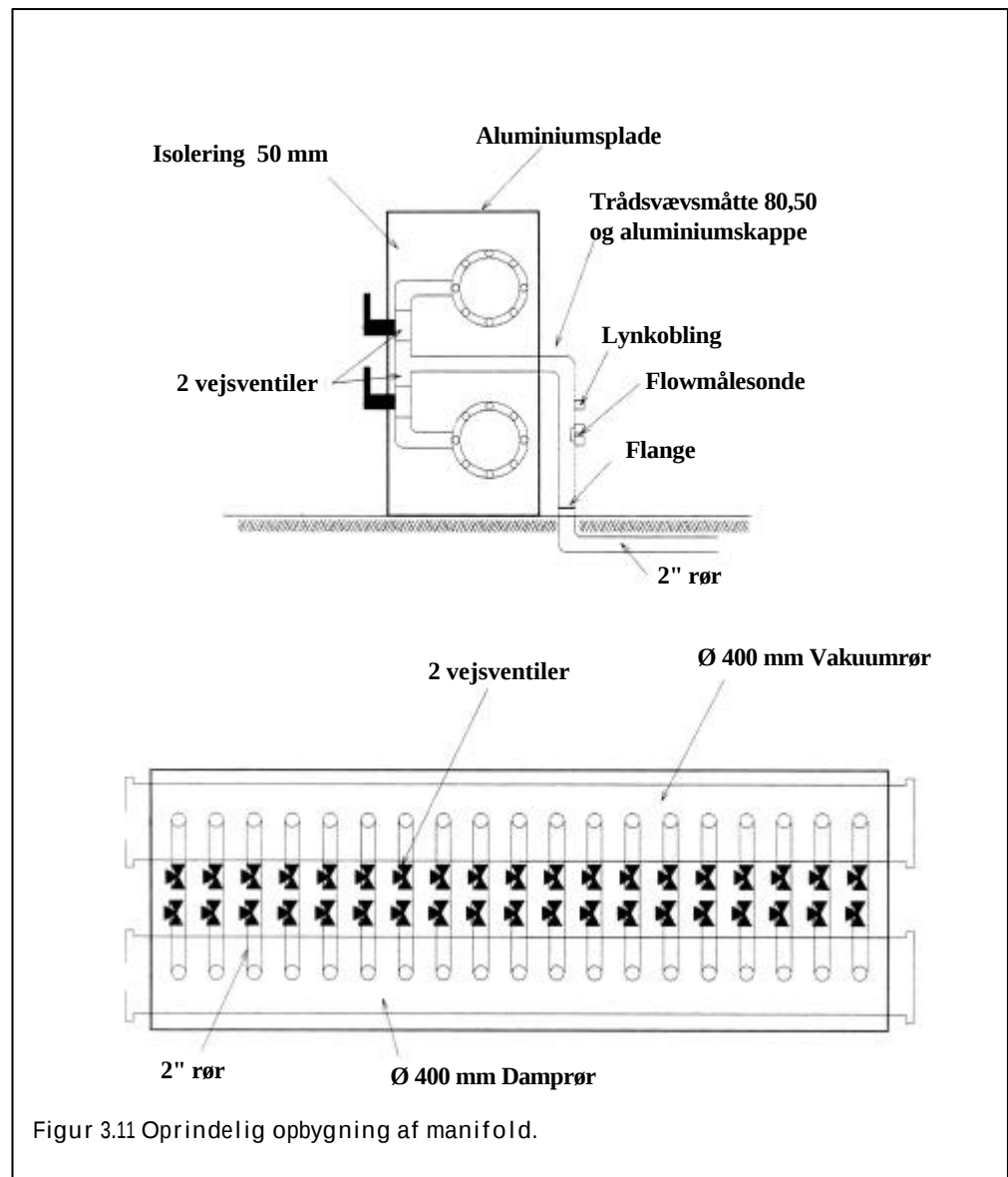
Der opstod tidligt i første oprensningsperiode i område III problemer ved betjeningen af manifoldens ventiler. I praksis virkede de fra meget løse til fuldstændigt fastlåste. En del af problemet lå i, at det på grund af isoleringen havde været nødvendigt at montere ekstra lange spindler (betjeningsstænger til ventilen) og at der ikke var monteret et stop for fuldt åben og lukket ventil. Dette gjorde at regulering af mængder til de enkelte borer var umuliggjort stort set fra starten, da ventilstillingen var meget vanskelig at kontrollere.

Herudover kunne det straks konstateres at ventilerne ikke var tætte. Der var således kortslutning mellem damp- og vakuumventiler. Det blev konstateret at ca. 10 % af dampmængden løb denne vej og derfor aldrig nåede ud i jorden.

I løbet af første driftsperiode satte flere og flere ventiler sig fast. Det viste sig, at vakuumsrørens nedadrettede tilslutninger til ventilerne virkede som snavssamlere for mange opsugede partikler. Dette var specielt udtalt for de borer der virkede til dampinjektion. På disse blev røret over vakuumventilen fyldt med hårdt sammenpresset silt, ler og kalk, hvilket umuliggjorde betjening af ventilen og også forhindrede, at borer der tidligere havde været anvendt til dampinjektion blev omkøbt til vakuumdriфт..

Utæthederne over ventilerne i manifolden mellem damp- og vakuumsrøret blev aldrig lukket og det kunne konstateres, at de valgte ventiler kun var egnede til at stå enten fuldt åbne eller lukkede.

I ombygningsfasen mellem første og anden oprensning i område III blev der byttet om på vakuums- og dampdamprøret så vakuumsrøret lå nederst. Dette forhindrede snavssamlerfunktionen i resten af oprensningsperioden. Herudover blev der boret huller, halvt ind på tværs i ventilerne kugle for trykkudligning af selve ventilen, hvilket lettede reguleringen.



Figur 3.11 Oprindelig opbygning af manifold.

Gennem hele oprensningen har det været nødvendigt at rense og udskifte dele af ventiler i manifolden løbende. Der blev således indkøbt et lille lager af de vigtigste reservedele for hurtig udskiftning.

3.3.3 Luftkøling

Luftkølingen fungerede rimeligt indtil vi var i gang med de cykliske injektioner i hot-spot af område III. Her var det nødvendigt at reducere vakuomet lidt på borerne for ikke at have for varm afgangsluft til kulfiltrene. Af mindre problemer kan nævnes utætheder ved lågerne til kølerne i starten, men dette blev løst ved anvendelse af en mere resistent fugemasse.

Under oprensningen i område I+II konstateredes et pludseligt fald i flow fra en vakuumboring i område II. Faldet skyldtes mobilisering af tunge olieprodukter fra jorden i et område, hvor der havde været nedgravede tanke til fyringsolie. Den mobiliserede olie kondenserede i og omkring vakuumboringen. Manuelle tømninger af olie fra boringen øgede igen flowet. Den opsugede olie havde dog en anden u hensigtsmæssig effekt. De mest flygtige dele af olien passerende cyklon og vakuumpumper og udfældede først

på kølefladerne i luftkøleren med voldsom nedsat køleeffekt til følge. Adskillige produkter blev afprøvet i et forsøg på at rense kølefladerne, men det var ikke muligt ved dette at opnå en tilstrækkelig køleeffekt. Løsningen blev at udskifte kølefladerne i luftkøleren, for at opnå en tilstrækkelig høj effektivitet.

Herudover oplevede vi, at en manglende kontraventil mellem køleren og vakuumpumperne (se evt. figur 3.8 for flowdiagram) gjorde, at luftkøleren blev udsat for en implosion. Denne var forårsaget af, at det relativt store system af rør og jorden der var evakueret ved stop af vakuumpumperne hev luften tilbage via luftkøler og kulfiltre. Modstanden i kulfiltrene gjorde, at luften ikke kom hurtigt nok igennem systemet, hvilket forårsagede implosionen. Reparation af kabinet og montering af springplade bag kabinettet løste problemet.

3.3.4 Luftrensning

De to serie forbundne kulfiltre med i alt 3.000 kg kul gav i første oprensningsperiode nogle problemer pga. tilstopning af et fordelerrør i bunden af første kulfilter. Tilstopningen skyldte primært at fin partikulært materiale (silt/ler/kalk) blev ført rundt med luftstrømmen fra vakuumpumperne. Fordelerrøret kunne ikke renses uden at kullene blev taget op, hvilket var en meget omstændig procedure. Efter dette blev konstateret opsatte vi et posefilter inden første kulfilter, hvis formål var at fjerne det fin partikulære materiale. Posefiltret skulle ofte skiftes for at undgå for stort modtryk, men viste sig ellers at løse problemet med materialeflugten gennem anlægget.

Kulfiltrenes effektivitet blev vurderet midt i oprensningen af område III, da der kunne konstateres gennembrud. Kullene blev i den forbindelse udskiftet. Der blev udtaget prøver af kullet, der viste at der kun sad ca. 4% PCE (w/w) på kullene. Ved de tilfældige koncentrationer var forventningen til kapaciteten noget større, idet vi forventede kapaciteter på 10-15 %. Det viste sig, at et en stor fugtighedsprocent i den luft der skal renses kan resultere i sorption eller værste fald kondensering af vand på kullene. Dette nedsætter deres effektivitet overfor de organiske opløsningsmidler markant. Derfor blev der opsat en varmeplade (reheater) efter luftkøleren for at nedsætte den relative fugtighed i luften inden indgangen til kulfiltrene (se evt. figur 3.9 for flowdiagram). Herudover blev tilgangsrør og kulfiltrene isoleret, for yderligere at reducere risikoen for kondensering i filtrene.

3.3.5 Vandkøling

I første oprensningsperiode af område III var der ikke kapacitet nok til køling af de store mængder vand, der havde en relativ høj temperatur bl.a. forårsaget af varmeoverføring i vakuumpumperne pga. modstanden (se 3.3.1 for yderligere forklaring).

Efter ombygningen inden anden driftsperiode i område III blev opsuget vand udtaget via cyklonen og vandet blev afkølet i ekstra kølere, der blev installeret i forbindelse med ombygningen.

Efter ombygningen var der ingen problemer med vandkøling, dog skulle der når modtrykket blev for højt, som led i den almindelige vedligeholdelse foretages afsyring af kølekredsene.

3.3.6 Vandrensning

I løbet af oprensningsperioden for område III blev der konstateret et stigende modtryk over kulfiltrene på grund af udfældninger af jern, kalk og fin partikulært materiale. Returskylninger sænkede trykket igen, men det må konstateres at udfældningerne nedsatte kulfiltrenes effektivitet betydeligt.

Inden opstart af anden driftsperiode i område III blev kulfiltrene udbygget med to sektioner yderligere for at kunne behandle den større vandmængde fra anlægget og det nyetablerede sugespidsanlæg.

De 1.500 kg kul til vandrensning blev skiftet en gang under oprensningen, fordi udfældninger havde gjort kullene ineffektive.

Da målinger af både ind- og udløbsvand viste, at der kun var beskedne mængder af PCE og TCE i vandet i forhold til den mængde der var i gasfasen blev fokus på rensningen primært lagt på gassiden.

3.4 Erfaringer med monitoring

Der blev i hele driftsperioden udført målinger af fysiske og kemiske parametre med det formål løbende at kunne tilpasse og justere driften, samt til vurdering af fremdriften. Endvidere blev der udført målinger af sikkerhedshensyn under bygninger, der blev anvendt til beboelse eller erhvervsformål.

De kemiske målingerne blev primært udført som feltmålinger. De fysiske blev dels målt ved manuelle feltmetoder, og dels med transmittere som var tilsluttet SRO-anlægget. Målingerne fra transmitterne blev logget som midlede værdier i SRO-anlæggets database.

Dette afsnit giver en kort beskrivelse af det udstyr, der blev anvendt til monitoring, og de erfaringer der blev opnået, både med hensyn til anvendelighed og troværdighed af de resultaterne. Desuden beskrives de forskellige målepunkter.

3.4.1 Temperatur

Formålet med temperaturmålingerne var at følge varmetransporten og temperaturudbredelsen under injektion af damp.

Måling af temperaturer var i driftsperioden den vigtigste parameter til vurdering af fremdriften i oprensningen. Optimeringen af dampinjektion blev ligeledes styret af temperaturmålingerne.

Der blev under driften målt temperatur i Teknologiboringer, i manifolden, i boringer, på boringshoveder og på terrænoverfladen eller gulve.

3.4.1.1 Måling af temperatur med Teknologiboringer

Formålet med at måle temperaturudbredelsen i teknologiboringer har været at give et detaljeret indblik i varmeudbredelsen i både vertikalt og horisontalt plan.

Selve installationen af boringerne var en udfordring, idet de anvendte styr (perforerede plastkrør) var ca. 12 m lange og i et stykke. Temperaturfølerne var fikseret til styret med strips. Der blev installeret to typer jf. afsnit 2.6.1.1.

Type 1 boringerne der blev forbundet med SRO-anlægget til automatisk logging af temperaturen blev udbygget med Pt-100 følere i stedet for de foreskrevne type K elementer. Pt100 følerne blev leveret indkapslet i en rustfri stålkappe med korrekt kabellængde fra leverandøren. Årsagen til at der blev valgt Pt100 følere var, at det var nemmere og billigere at skaffe udstyr til signalopsamlingen med denne type føler.

Det skulle vise sig, at der var en anden stor fordel i forhold til type K følerne. Type K følerne har haft en meget stor fejlrate efter installationen i jorden. Den mest sandsynlige forklaring er, at disse er samlet af entreprenøren på stedet og, at det ved denne metode ikke har været muligt at opnå en tilstrækkelig tæthed overfor vanddamp i målepunktet.

Det har derfor været vanskelig opgave at måle de manuelle type 2 boringer igennem oprensingsforløbet. Såfremt man vil anvende fast installerede type K følere i fremtidige projekter kan vi ikke pointere kraftigt nok at indkapslingen er alfa og omega.

I lighed med i produktionsboringerne havde vi også store problemer i starten med at bentonitfyldningen klappede sammen. På temperaturprofilerne fra teknologiboringerne kunne dette ses som en meget hurtig afsmitning af temperaturen fra den ene termoføler til den anden som indikation på at bentonit adskillelsen ikke var effektiv. I lighed med proceduren beskrevet for produktionsboringerne i afsnit 3.2.1.3 forsøgte vi at reparere teknologiboringerne. Dette lykkedes i en række tilfælde, hvor andre måtte opgives.

Der blev i stedet udført en række nye boringer på samme tidspunkt som anlægget blev ombygget. Desværre var vi ikke på dette tidspunkt tilstrækkelig bevidst om problemerne med type K følerne, hvilket bevirkede at de nye boringer også i et vist omfang led af samme fejl som de først installerede.

Som supplement til teknologiboringerne udviklede vi derfor alternative målemetoder i produktionsboringerne (se afsnit 3.4.1.2), en teknik som vi også havde store fordele af i område I+II, hvor der ikke var nogle teknologiboringer.

3.4.1.2 Måling af temperatur i manifold

Formålet med at måle temperatur i manifolden var at kunne følge temperaturstigningen i vakuumboringerne, og dermed bedre være i stand til at styre fremdriften på oprensningen. I det udbudsmaterialet var det beskrevet at der skulle placeres temperaturtransmittere på toppen af alle boringer (filtre), så temperaturen i det opsugede medie kunne følges direkte.

Temperaturtransmitterne blev i det opstillede anlæg flyttet til manifolden pga. omkostningerne til trækning af kabler til hver enkelt boring var for store (se kapitel 2.8). De blev placeret i tilgangsrøret fra boringerne inde i en container, fysisk placeret inde i isoleringsmaterialet bag dæklader, der forhindrede at driftspersonalet kom i fysisk kontakt med de varme rør.

Temperaturtransmitterne indgik i et samlet system, der havde til formål at måle flow, tryk og temperatur på alle boringerne. Temperaturen på hver enkelt boring blev logget ca. hvert 40. minut med en Pt100 føler.

Placeringen af transmitterne inde i containerne viste sig hurtigt at give ikke brugbare målinger, da temperaturmålingerne ikke viste den reelle temperatur

på den opsugede luft. Der var for stor energiafsmitning fra dampprørene, således at der systematisk blev målt for høje temperaturer. Inden opstart på anden driftsperiode i område III flyttede vi transmitterne udenfor manifoldscontainerne, således at påvirkningen fra dampinjektionsrørne i manifolden blev reduceret.

Flytningen af transmitterne udenfor containerne løste desværre ikke problemet. Der var stadigvæk for stor afsmitning mellem rørene i rørgraven til, at der kunne opnås meningsfyldte målinger. De isolerede ledningstraceer med både injektionsrør og vakuumrør virkede tilsyneladende som en effektiv varmeveksler. Temperaturudviklingen i vakuumboringerne kunne således ikke følges fra temperaturmålinger ved manifolden. I stedet blev der målt manuelt på toppen af boringshovedet jf. afsnit 3.4.1.4 eller med et ”juletræ”, se afsnit 3.4.1.3.

3.4.1.3 Måling af temperatur i vakuumboringer

Det var oprindeligt ikke planlagt at anvende vakuumboringerne til måling af den vertikale temperaturfordeling. Imidlertid viste det sig i løbet af driften at blive en metode som vi fik meget gavn af. For at kunne måle temperaturen i vakuumboringerne, også i vertikalt plan, blev der fremstillet et system bestående af 8 type-K temperaturfølere kabel kode KX af samme type som i teknologiboringer type 2. Denne type K-følere kan tåle -25°C til $+200^{\circ}\text{C}$. Følerne var monteret med en meters afstand så der kunne måles fra 1 m under terræn til 8 m under terræn.

For at sikre stabile målinger blev de to tråde støbt ind i plastik padding, så trådene ikke kunne få kontakt med metallet i boringen.

De 8 følere blev sluttet til en 8-kanals logger af typen Pico Technology TC-08. Loggeren blev tappet via en bærbar PC.

Målingerne blev udført efter boringen blev lukket i manifolden. Herefter blev 2” proppen på toppen af vakuumboringen afmonteret og systemet sænket ned i boringen. Proppen blev herefter lagt ovenpå boringshovedet for at reducere kontakten opadtil. Efter 15 minutters indsvingningstid kunne temperaturen måles.

Udfra målingerne var det muligt at lave temperatur profiler fra 1 meter til 8 meter under terræn, i de boringer der var påvirket af varmeudbredelsen. Disse profiler gjorde det muligt at følge fremdriften relativt nøje. Der blev udført flere målerunder, hvor alle vakuumboringer blev målt. Udfra disse målinger blev gennemsnitstemperaturen i det opvarmede område beregnet og fremdriften kunne vurderes.

3.4.1.4 Måling af temperatur på boringshoved

For at sikre at alle dampinjektions boringer modtog den forventede dampmængde blev der løbende målt temperatur på boringshovedet med et infrarødt termometer af typen ELMA 611. Hvis temperatur på injektionsboringen var under 105°C , var det et sikkert tegn på, at der ikke var flow i boringen. Hvis der ikke var flow af damp til boringen (og ventilen var åben i manifolden) blev der rekvireret en bundsugning af boringen og eventuelt en afsyring.

3.4.1.5 Måling af overfladetemperatur

Det infrarøde termometer har også været anvendt til måling af overfladetemperatur, både inde i bygninger og forsøgsvis ude i felten.

Erfaringerne har vist at overflademålinger med et infrarødt termometer i bygninger er en udmærket metode til at vurdere varmeudbredelsen. Ved målinger udendørs var det nødvendigt, at udføre målingerne inden terrænoverfladen blev påvirket af sollys, kraftig vind eller nedbør.

Der blev en mørk, næsten tør nat taget termografibilleder af den centrale del af område III i slutfasen af oprensningen i dette område. Metoden vurderes at være særdeles effektiv til lokalisering af ikke tilstrækkeligt opvarmede overfladenære områder.

3.4.1.6 Måling af temperatur på monitorings boringer

Erfaringerne med temperaturtransmitterne i monitoringsboringerne er, at der i perioder har været problemer med stabilitet i målingerne oftest på grund af fejl i de elektriske installationer (relæer, kabling, mv.). Herudover er der flere tilfælde, hvor temperaturen omkring transmitteren har ligget over arbejdstemperaturen for elektronikken, hvilket medførte ødelagte transmittere.

Overordnet har målingerne dog været tilfredsstillende og temperaturmålingerne under bygningerne gjorde det muligt, at planlægge, hvordan og hvornår det var nødvendigt at lave ventilation under/inde i bygningen.

3.4.1.7 Behandlingsanlæg

I behandlingsanlægget har der været en række transmittere til registrering af temperatur i vand- og gasfasen. Generelt har disse fungeret tilfredsstillende. En enkelt sensor placeret i den bagerste del af luftkøleren ”drillede” dog rigtig meget, idet den ikke målte temperaturen i luften, men havde afsmitning fra mediet der blev brugt til kølingen. Problemet var relateret til, at temperaturen umiddelbart skulle bruges til styringen af genopvarmningen af luften. Dette problem blev aldrig løst helt tilfredsstillende, selvom sensoren blev flytte lidt, en anden type blev afprøvet etc.

3.4.2 Tryk

3.4.2.1 Boringer

De oprindelige trykmålinger på boringshovederne blev sparet væk i forbindelse med udbudsrunden. I stedet blev der etableret et system med to små rør placeret på tværs af strømningsretningen i tilgangsrørene til boringerne inde i manifoldscontaineren. De to små rør havde et hul hver således, at både det dynamiske tryk og det stationære tryk i luft/dampen kunne måles. Dette blev kaldt pitotrørssystemet. Trykmålingerne skulle dels måle trykket/vakuumet i boringerne og dels ved hjælp af den trykforskel der er mellem det stationære tryk og det dynamiske tryk beregne flowet i rørledningen til/fra den enkelte boring.

Pitotrørssystemet var opbygget, så hvert sæt af målepunkter i rørene via slanger var koblet op på to centrale trykmålere, én til det stationære tryk og én til trykdifferencen mellem de to punkter, der kun var nogle få hPa. Slangerne fra de enkelte målepunkter var forbundet via et system af magnetventiler, således at det kun var nødvendigt med to sæt af trykmålere.

I løbet af oprensningen af område III lykkedes det aldrig, at få systemet til at virke. Efter første oprensningsperiode var mange pitotrør kalket eller slammet til og måtte afsyres under meget vanskelige og trange forhold inde i manifolden. I vakuumperioder satte der sig vand og små partikler i rør, slanger og magnetventiler. Der blev monteret en kompressor til at blæse rør og

slanger rene bagfra, magnetventilerne blev rensset, differenstrykmåler og slanger udskiftet. Vi forsøgte også at måle differenstryk med manuelle målinger med flere købte og selvkonstruerede U-rørs manometre med kondenspotter mv. Systemet kom aldrig til at måle trykket korrekt og der blev aldrig, trods ihærdigt arbejde gennem næsten 2 år fra de involverede, fundet en løsning der kunne få det etablerede anlæg til at fungere efter hensigten. Selv i de rør hvor der kun løb damp kunne målesystemet ikke levere pålidelige data.

Konsekvensen blev taget ved ombygning af manifolden inden oprensningen i område I+II. Hver af de to manifolder blev udbygget med rør og ventiler samt en trykmåler og en flowmåler af rotameter typen, således at luft/dampstrømmen fra hver eller til hver boring kunne ledes omkring tryk og flowmeter for måling. Målingerne skulle udføres manuelt ved åbning og lukning af 3 ventiler for hver enkelt rør, og var således ikke koblet op mod SRO-anlægget. Systemet fungerede tilfredsstillende og der kunne justeres for injektion/ekstraktion i hver enkelt boring.

3.4.2.2 Monitoringsboringer

De monterede tryktransmittere i monitoringsboringerne under bygningerne var ikke tilstrækkeligt fintfølende til, at de kunne give pålidelige resultater i en række tilfælde. Vi observerede en del problemer med nulpunktsdrift, der blev forsøgt afhjulpet undervejs, ved at recalibrere følerne. Kondenseret vand i rørene til følerne udgjorde også i en række tilfælde et problem for målingen. Dette var mest udtalt når kondensationsfronten var tæt på målerne. Vi kunne derfor ikke som først antaget i projektet anvende trykmålingerne i særlig stort omfang til at styre dampmængden og vakuumet under bygningerne. I stedet blev temperaturmålingerne anvendt til dette.

3.4.2.3 Behandlingsanlæg

Trykmålingerne i behandlingsanlægget fungerede efter hensigten og kunne for eksempel vise stigende modtryk i køleflader, kulfiltre og pumper således, at afsyring, rensning, diverse filterudskiftninger mv. kunne udføres som et led i det almindelige vedligehold frem for at der skete egentlige nedbrud forårsaget af for højt/for lavt tryk..

3.4.3 Flow

3.4.3.1 Manifold

Jf. afsnit 3.4.2.1 der beskriver trykmålingerne i manifolden, blev det aldrig muligt at måle flow på den enkelte boring i oprensningen af område III. Flowet blev i stedet kalkuleret udfra det samlede damp/luftflow og det specifikke modtryk i de enkelte boringer fundet i forbindelse med korttidspumpninger af hvert enkelt filter. I område I+II fungerede flowmålingerne efter udbygning af manifolderne med flowmålere af rotametertypen.

Ved afslutningen af oprensningen i område III var det afgørende at få målt flow på de sidste 3 centrale vakuumboringer, for at få en indblik i hvor den sidste indsats skulle ydes for at fjerne restforureningen. Dette blev gjort ved at koble de sidste boringer direkte til vakuumpumpen, udenom manifolden. Til måling af flowet blev der indsat rotametre på rørstrengene.

3.4.3.2 Behandlingsanlægget

På behandlingsanlægget var der opsat en dampflowmåler til måling af den samlede producerede dampmængde, en luftflowmåler for samlet måling af

den samlede opsugede luftmængde og flere vandure til måling af vandstrømme internt i behandlingsanlægget, mhp. at fastlægge energimængde, kølevandsforbrug etc.

Kalibrering af luftflowmåleren var meget vanskelig, idet den oppumpede luft indeholdt frit vand, og var af varierende temperatur og tryk mv. Måleren blev flyttet ad flere omgange for til sidst at blive placeret mellem posefilter og det første kulfilter. Her var luften nogenlunde ensformig mht. vandindhold, tryk mv. hvilket gjorde at målingerne blev mere pålidelige. Selv efter monteringen på dette sted var det dog nødvendigt med jævne mellemrum (2-3 uger) at demontere måleren for en rengøring for de bittesmå partikler der blev revet igennem posefilteret, idet disse påvirkede målingen ved systematisk at give for lave værdier.

Dampflowmåleren til den samlede ydelse kom aldrig til at fungere tilfredsstillende. Det lykkedes aldrig at få fuld overensstemmelse mellem målerens værdier og de teoretisk beregnet producerede dampmængder ud fra gasforbrug, sammensætning af temperatur og røggassammensætning, og den tilførte fødevandsmængde. Resultatet blev at vi anvendte den kalibrerede gasafregningsmåler (og den leverede oliemængde) sammen med kedelens effektivitet til at beregne den producerede dampmængde.

De monterede vandure fungerede generelt efter hensigten, selvom flere måtte udskiftes undervejs på grund af tilstopning med partikler. Dette har sammen med omkoblinger af ledninger undervejs i forløbet mhp. afsyring, vedligehold og udskiftninger af forskellige komponenter gjort at der er nogen usikkerhed på den samlede vandbalance over anlægget.

3.4.4 Koncentration i luft

Til at måle koncentrationerne af klorerede opløsningsmidler i den opsugende luft blev der anvendt en mobil felt gaschromatograf af typen Photovac Voyager med EC og PI-detektor. For at kunne opnå troværdige og ensartede målinger blev alle luftprøver konditioneret til samme temperatur og udtaget ved atmosfærisk tryk. Ved hjælp af et prøvetagningssystem, bestående af en væskeudskiller til udskilning af frit vand, dobbeltvirkende membranpumpe og et kølesystem, hvor luften blev nedkølet til 5°C blev alle luftprøver udtaget. Nedkølingen skulle sikre, at alle luftprøver blev analyseret ved samme temperaturforhold og uden, at der var risiko for kondensering af vand i gaschromatografen.

Udover koncentrationerne af PCE og TCE blev der målt PID, koncentrationen af ilt og kuldioxid. Disse prøver blev i lighed udtaget efter konditioneringen.

Det var oprindeligt planlagt, at en stor del af målingerne skulle udføres med en traditionel PID-måler. Vi udarbejdede en responskurve for PID-måleren, sammenholdt med målinger udført med den mobile gaschromatograf. Det viste sig, at ved målinger, hvor koncentrationen af PCE og TCE var under 2-300 mg/m³ var der ikke en lineær sammenhæng mellem PID-måleren og den mobile gaschromatograf. Det blev derfor besluttet at reducere måleprogrammet i antal af prøver, men til gengæld måle disse ved GC for at opnå en tilstrækkelig præcision.

Vi oplevede ved måling af koncentrationerne i de forskellige punkter (poreluftboringer, monitoringsboringer, ekstraktionsboringer, anlægget), at

der var flere størrelsesordener forskel i koncentrationerne i løbet af én dags målearbejde. Det gav problemer med afsmitning (carry over) mellem analyserne, hvis en prøve med meget høje værdier blev målt umiddelbart før en med lave værdier. Dette stillede en del krav til logistikken omkring rækkefølgen af analyser, idet det var nødvendigt at afvikle prøver med lave koncentrationer før prøver med høje koncentrationer, hvilket dog hurtigt blev indarbejdet som en del af prøvetagningsrutinen.

Før prøvetagning af luftprøver på den mobile gaschromatograf blev der forpumpet til stabile værdier af henholdsvis PID, ilt og kuldioxid, via luftkonditioneringsystemet.

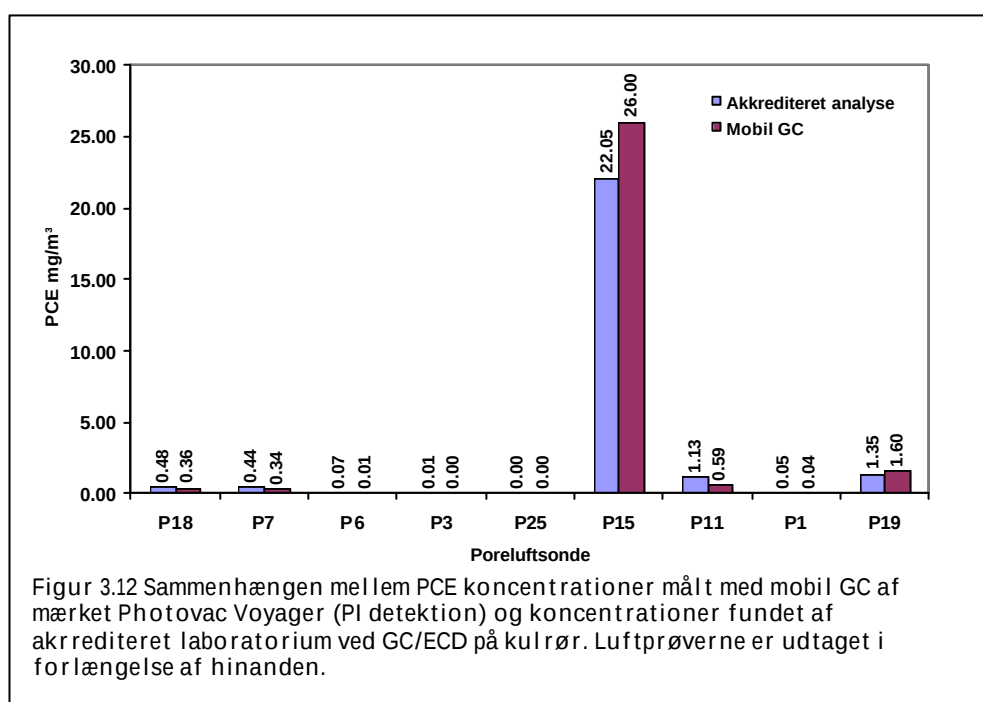
Før alle målerunder blev alt måleudstyr kalibreret. Den mobile gaschromatograf blev kalibreret med en standardgas med et PCE- og TCE indhold på henholdsvis 33,9 mg/m³ og 26,6 mg/m³. Der er blevet udført test på linearitet af PID-detektoren. Testen viste, at der ikke kan forventes linearitet ved koncentrationer over 400-500 mg/m³. Over dette niveau vil resultatet generelt være underestimeret.

For koncentrationer under 400-500 mg er der fin overbestemmelse mellem målinger på den mobile gaschromatograf og målinger udført med kulrør og akkrediteret analyse. Se figur 3.12 for en sammenligning.

Der skulle måles i en lang række punkter. De specifikke erfaringer med dette er beskrevet i de følgende afsnit.

3.4.4.1 Vakuumboringer

Ved opstarten af oprensningen i område III var det planlagt at udtage luftprøver fra alle vakuumboringer fra de studse, der var monteret i manifolden. Resultaterne skulle være et mål på udgangssituationen (baseline study). Det viste sig imidlertid, at der var store problemer med at få udtaget prøverne. Store vandmængder i den opsugede strøm og tilstopning af lynkoblingerne i manifolden på grund af opsuget materiale gjorde det svært at få de ønskede luftprøver. Først efter nogle uger var vandmængden reduceret, samtidig med at vi havde fået sat et system sammen der kunne konditionere



prøverne inden måling. Egentlige baggrundsdata fra område III er derfor kun til stede i meget begrænset omfang.

Reproducerbarheden af data var efter indførslen af konditioneringsystemet god. Der blev i nogle tilfælde udført flere målerunder af det samme målepunkt umiddelbart efter hinanden med en god overensstemmelse.

3.4.4.2 *Anlægget*

På behandlingsanlægget blev der målt inden selve behandlingsanlægget på hovedstrømmen ind, efter kølingen men inden kulfilter og efter rensning på de aktive kulfiltre.

De koncentrationer, der blev målt før behandlingsanlægget var i gennemsnit ca. 15 % lavere end de målinger, der blev udtaget efter behandlingsanlægget, til trods for at prøvetagningssystemet skulle sikre ens tryk- og temperaturforhold. Det vurderes, at forskellen skyldes, at vakuumet på vakuumbesugningen inden vakuumpumperne har været for højt til at prøvetagningssystemet har kunne sikre en stabil luftstrøm ved prøvetagningen. Selve prøvetagningssystemet var testet tæt til 200 hPa absolut. I store dele af driften var vakuum på hovedrøret før anlægget 400-450 hPa og dermed tæt på det prøvetagningssystemet var testet til.

3.4.4.3 *Poreluftboringer*

Som led i Teknologiprogrammet var det muligt at udtage luftprøver i de poreluft traceer, der var placeret væk fra kildeområdet i område III.

Der var planlagt en række målerunder i disse poreluftspidses. Selve målepunktet var en poreluftspids (en opslidset aluminiumsspids) placeret 3 m under terræn. På poreluftspidsen var der monteret et Ø 6mm aluminiumsrør som var ført op til 10 cm under terræn og placeret i et Ø100 mm betonrør. Aluminiumsrøret var afsluttet med en lynkobling.

Det viste sig hurtigt, at disse målepunkter ikke var udført hensigtsmæssigt. På grund af tilstopning af selve poreluftspidsen med finkornet materiale måtte flere af målerunderne reduceres. I forsøg på at rense spidserne blev det forsøgt at blæse dem rene ved at anvende en trykluftkompressor sat direkte på lynkoblingen. Det lykkedes i flere tilfælde at få reduceret modtrykket i spidsen så meget at prøven kunne udtages efter et par dages ventetid for at bringe jord og luft tilbage i ligevægt.

Endvidere viste det sig, at lynkoblingene ikke var tætte på grund af snar i selve koblingen. Dette kom eksempelvis i perioder med meget nedbør eller ved udledning af vand fra selve behandlingsanlægget (rent kedelvand blev i perioder lukket ud på overfladen pga. af problemer med blødgøringsanlægget).

Det sidste og mest alvorlige problem der viste sig var, at aluminiumsrørene blev korroderet, og dermed ikke kunne anvendes til prøvetagningen. Dette skyldes sandsynligvis de Leca-nødder der var anvendt som afslutning i betonrøret for at forhindre vand opstuvning i brøndene. I flere tilfælde var rørene så tærede at de knækkede.

Generelt må det konstateres, at opbygningen af poreluftboringerne ikke har været hensigtsmæssig, til trods for at det anvendte set-up er relativt almindeligt anerkendt. Forskellen er bare, at poreluftprøvetagning normalt

kun sker over en kort tidsperiode, hvor dette forløb har strakt sig over en 2-3 årig periode fra installationen, hvilket har påvist materialernes og metodens svaghed.

3.4.4.4 Moniteringsboringer

I alle moniteringsboringerne var der monteret en poreluftspids svarende til de poreluftspidser, der var monteret i poreluftboringerne. Der var også her problemer med at spidserne stoppede til. I stedet blev der monteret en lynkobling på det ½" rør hvor tryktransmitteren var monteret. Der var efterfølgende ikke problemer med at måle i moniteringsboringerne. Målingerne blev udført på ugebasis i starten og op til 3-5 gange pr. uge i de perioder hvor der var damp under bygningerne.

3.4.5 Koncentration i vandprøver

Der blev efter endt oprensning udtaget vandprøver fra injektions/vakuumboringerne og boringer anvendt til vand oppumpning i område I, for at få et øjebliksbillede i forbindelse med vandindstrømningen til området. Det viste sig problematisk at udtage vandprøver ved temperaturer på ca. 50 °C, idet normale pumper ikke er egnede til de høje temperaturer. Ved afkøling og udskiftning af sikringer mellem prøvetagningerne lykkedes det dog at udtage prøver med en MP1 pumpe.

I forbindelse med den endelige prøvetagning efter afkølingen blev der udtaget dobbeltprøver af 3 boringer for at udføre en sammenlignende analyse af værdier fundet via head-space analyse på den transportable GC og værdier fra et akkrediteret laboratorium. Der blev udført dobbeltbestemmelse på den mobile GC, hvor der var en meget lille afvigelse, mens der var betydelig større afvigelse til de akkrediterede analyser. Der er umiddelbart ingen forklaring på afvigelsen mellem de akkrediterede analyser og feltbestemmelserne, idet Felt GC-en jf. figur 3.11 var i stand til at levere pålidelige resultater.

3.4.6 Koncentration i jord

Der er før og efter oprensningen udtaget jordprøver fra kerner udtaget med Geoprobe. Jordprøverne blev analyseret for klorerede opløsningsmidler og har givet gode resultater med hensyn til viden om forureningsfordelingen i jordsøjlen.

Indledningsvis blev det forsøgt at anvende Geoprobe MIP til at lokalisere forureningen i område III. Dette viste sig allerede efter de første to dages forsøg, at være en nyttesløs vej, idet følsomheden overfor PCE var for lav, i forhold til koncentrationerne på stedet.

3.4.7 Diverse målinger

3.4.7.1 Nivellement.

Der blev udover de kemiske og fysiske målinger anført ovenfor også udført en række nivellementer til vurdering af sætninger som følge af ændringer i bygningernes højde.

Som målepunkter på bygningerne blev der etableret en række bolte der efterfølgende kunne nivelleres i forhold til et fixpunkt. I hovedtræk fungerede disse tilfredsstillende, dog blev en del af boltene på de mest udsatte steder bøjet eller knækket som følge af kontakt med personer, varer mv. Det skal derfor nøje overvejes hvor sådanne bolte skal placeres.

Vi havde vi to fixpunkter som udgangspunkt for nivelleringen, dels et vejsøm og dels et punkt på en betonplade omkring en af borerne til det primære magasin. Denne betonplade blev på et tidspunkt påkørt, hvilket gjorde dette fixpunkt uanvendeligt i den senere del af forløbet. Generelt må det konstateres, at det har været vanskeligt at udføre nivellementerne helt præcist pga. af disse forhold.

3.5 Erfaringer med påvirkning af bygninger

3.5.1 Ledninger/installationer i jorden

På grund af det store område og de mange forskellige erhvervsaktiviteter var der et stort antal ledninger i jorden. De vigtigste var:

- Hovedgasledning
- Gasstikledninger
- Hovedstrømforsyningskabel til transformator i område III
- Elstikledninger til beboere og virksomheder
- Telefonkabler
- Vandforsyningsledninger
- Spildevandsledninger af forskellig type
- Ø1600 mm regnvandsledning fra en stor del af Hedehusene

3.5.1.1 Gasledninger

Hovedgasledningen blev lagt om i etableringsfasen og stikledninger blev flyttet op på murværk. Ved retablering blev alle ledninger lagt i jorden i nye materialer på forlangende af HNG.

3.5.1.2 Elledninger

Hovedforsyningskablet til transformatorstationen blev omlagt udenom det opvarmede område. Mindre forsyningsledninger forblev i jorden og der har ikke været meldt om fejl eller skader på grund af opvarmningen.

3.5.1.3 Telefonkabler

Telefonkabler ligger normalt ikke så dybt som f.eks. elkabler. Telefonkablerne forblev i jorden og kun i et enkelt tilfælde i forbindelse med meget intens opvarmning af et mindre område skete der skade på et gammelt telefonkabel i jorden. Kablet blev midlertidigt hængt op over jorden, og er i forbindelse med retableringen ført i jord igen.

3.5.1.4 Vandforsyningsledninger

Vandforsyningsledninger blev ikke lagt om i etableringsfasen for område III, hvilket gav nogle problemer da varmen nåede frem til ledningerne. I første omgang blev der hurtigt reguleret ned for dampinjektion i berørte områder. Der etableredes taphaner og vandmåler i hver bygning med konstant rindende vand, for at sænke temperaturen. Temperaturen i brugsvandet kunne dog ikke holdes under 12 °C. Vandforsyningen blev derfor omlagt til nye ledninger ophængt på bygningerne. De nye ledninger i område III, blev fra starten kun isoleret imod sommervarme, da der på dette tidspunkt ikke var frost. I område I+II blev de alternative vandforsyningsledninger hængt op på mure med eltracing og isolering mod frost inden driftsperiodens start. Under driften i område III skete flere brud på de eksisterende vandforsyningsledninger af jern. Det eksisterende vandledningsnet var i en meget dårlig stand og stod for

udskiftning. Der skete således også ledningsbrud i områder, der ikke var under opvarmning. I forbindelse med retableringen er stort set hele forsyningsdelen i område II og III blevet udskiftet.

I område I var forsyningen relativt ny og bestående af PE rør. Efter oprensning og afkøling blev de eksisterende PE ledninger i jorden trykprøvet. Det kunne konstateres at samlingerne (mufferne) til stikledningerne ind til husene var utætte, hvilket betød at stort set alle stikledninger også måtte udskiftes i forbindelse med retableringen af område I.

Efter driften er de brugbare brugsvandsrør der har været opvarmet og afblændet, trykprøvet og gennemskyllet med klorin og rent vand efter flere måneders afkøling. Der er inden ibrugtagning udtaget vandprøver for indhold af kolibakterier og kim i vandet. Analyseresultaterne er gennemgået og godkendt af Høje-Tåstrup kommune.

3.5.1.5 Spildevandskloakker

I etableringsfasen blev alle større kloak tracéer videofotograferet, da det på forhånd var vurderet, at der var en risiko for at de kunne tage skade af opvarmningen.

Under driften konstateredes kun få problemer med opvarmede kloakker, såsom udtørrede vandlåse og dampende dæksler. Konstant rindende vand løste vandlåsproblemerne.

Gamle, sløjfede, ikke kendte kloakstikledninger gav uventet dampspredning og opvarmning af enkelte huse, ligesom dette også gav anledning til kraftige lugtgener i et enkelt hus i en kort periode.

Efter oprensningen blev kloakledningerne videofotograferet igen. Det kunne konstateres at kloakledninger i glaserede rør tilsyneladende ikke er påvirket, men at enkelte betonrør var revnet. Kloakledninger i pvc så umiddelbart upåvirkede ud, men er ved opgravning konstateret at være krympet en smule. Selv om pakningen omkring mange af rørene var intakt var samlingerne blevet løse og utætte. Flere rør strækninger er derfor blevet udskiftet.

3.5.1.6 Ø1600 mm regnvandsledning

Ø 1600 mm regnvandsledningen der bortleder, regnvand fra hele den sydlige del af Hedehusene til Sejlbjerg Mose er udført i beton og går igennem område I. Ifølge leverandører af denne type ledninger kan betonen sagtens tåle opvarmning til 100 °C. Pakningerne kan for langt de flestes vedkommende også tåle denne temperatur.

Under oprensningen af område I kunne en kraftig opvarmning af ledningen konstateres og enkelte steder kogte vand i regnvandskloakken. Dette vurderedes dog ikke at have nogen betydning for selve rørledningens kvalitet. Generne under driften var, bortset fra dampen der steg op fra dækslerne, at der til tider strømmede store mængder regnvand gennem ledningen, hvilket afkølede jorden omkring rørledningen. I hvilket omfang der er sket afkøling, og hvor meget energi der er brugt på opvarmning af gennemstrømmende regnvand i ledningen er ikke kvantificeret.

I den afsluttende fase af oprensningen i område I i begyndelsen af marts 2002, skete en pludselig ophobning af vand i rørledningen. Ophobningen skyldtes, at pumperne i pumpestationen, der skal sørge for afledning af vandet fra

Sejlbjerg mose til Ll. Vejle å var ude af funktion med kraftig vandstigning i Sejlbjerg mose til følge. Da vandstanden steg i Sejlbjerg mose kunne regnvandsledningen ikke komme af med vandet og koldt smeltevand blev stuvet op i ledningen, der ved Teglstenen var $\frac{3}{4}$ fyldt med vand. Opstuvningen er tilsyneladende sket hurtigt. Betonledningen har tilsyneladende ikke kunne tåle den store temperatur gradient, eller er mekanisk svigtet som følge af vandindholdet. Ledningen flækkede langs hele bunden over en strækning på 50 m svarende til opvarmningsområdet. Efter bruddet på rørledningen strømmede koldt vand ud i jorden i opvarmningsområdet og dampinjektionen i område I måtte afbrydes. Revnen i regnvandsledningen blev siden renoveret ved epoxylimning.

3.5.2 Opvarmning af bygninger

I flere bygninger blev der ved oprensningen i område III meget høje temperaturer umiddelbart over opvarmningszonen. Nedenfor er beskrevet en række af de specifikke problemer det gav, samt de løsninger eller udbedringer der blev udført.

Opvarmningen gav helt generelt komfortproblemer i både erhvervslokaler og boliger.

I en krybekælder der ikke figurerede på noget af det modtagne tegningsmateriale, og derfor først blev opdaget under oprensningen, blev der målt temperaturer på op mod 80 °C. Opmagasinerede emner med lave smeltepunkter som plastik tog skade. I værelset umiddelbart ovenpå kælderen (nedgang via lem i gulvet) blev tapetet påvirket på samme måde som når tapet afdampes. Da dampindtrængningen blev stoppet satte tapetet sig pænt på plads igen.

Opvarmningen af et malerværksted gav udtørring og hærkning af diverse malingsprodukter og udtørring af malede møbler.

Opvarmning af et smedeværksted gav temmelig omfattende komfortproblemer. Der blev registreret ca. 40 °C som overfladetemperatur.

Udover disse komfortproblemer var der en anden utilsigtet effekt der optog brugerne af lokalerne en del. Varmemålerne på radiatorerne i de berørte bygninger, blev i lighed med det resterende rum opvarmet, hvilket betød at brugerne af disse lokaler var bekymret for om deres varmeregning blev ekstra stor, selvom de i vinterperioden ikke havde fået ekstra opvarmning.

3.5.2.1 Afprøvede løsninger overfor opvarmningen

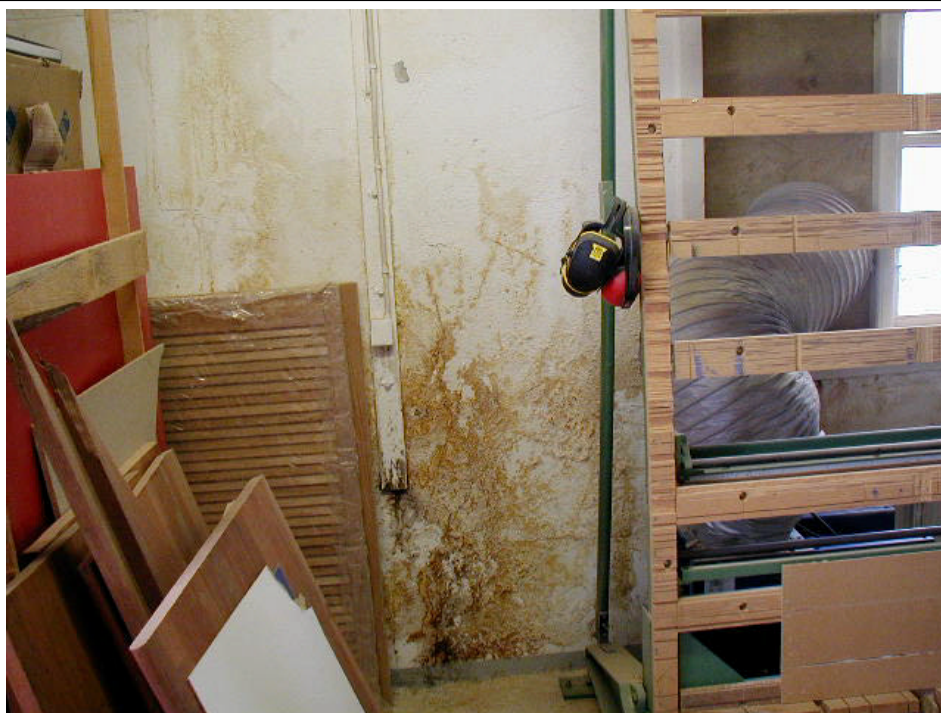
I område III var det nødvendigt at fortsætte opvarmningen af jorden under bygninger, selvom dette gav ovennævnte gener for beboere og brugere.

Det blev forsøgt at afkøle rummene ved dels at åbne vinduer og dels at installere en række store ventilatorer (kapacitet pr. ventilator 2.000 – 4.000 m³ luft/t). Det var imidlertid ikke umiddelbart en succes, bl.a. fordi en stor del af opvarmningen af arealet med bygninger foregik i juli-august måned med dagtemperaturer op til 30 °C i udeluften.

I kælderen der blev beskrevet i forrige afsnit blev fundamentet gennemboret og ventilationsrør ført ind i kælderen. Det ene af rørene blev herefter tilkoblet en af de store ventilatorer, hvilket reducerede temperaturen til et acceptabelt niveau.

En anden fremgangsmåde der blev forsøgt i både område III og område I var gennemboringen af fundamentet for ventilation af det kapillarbrydende lag under gulvene. I område III var dette ikke en anvendelig option, da de ældre huse ikke havde et tilstrækkelig tykt (og permeabelt) kapillarbrydende lag. Derimod var der på Teglstenen i område I gode muligheder for at anvende denne metode. Der blev her etableret et ventilationsanlæg med to filtre under hver af de 7 boliger, der ville blive berørt af opvarmningen. Filtrenes luftindtag blev så vidt mulig ført centralt ind under gulvene i det kapillarbrydende lag. Alle filtrene blev forbundet til en ventilationscontainer med 3 vakuumventilatorer. Der var i alt kapacitet til et luftflow på ca. 12.000 m³/t ved et modtryk på 50 mb. Den etablerede ventilation under gulvene i område I fungerede stort set tilfredsstillende. Kun en enkelt injektionsboring måtte drosles og til sidst lukkes på grund af varme i en lejlighed. Andre beboere klagede over, at der var blevet koldt på gulvet i deres lejlighed eller bare den manglende varme i gulvet de havde set frem til. Opvarmningen af område 1 og 2 foregik fra december til marts.

Herudover var det nødvendigt at flytte beboere eller aktiviteter i en kortere periode, idet hot-spot af område III lå under to bygninger der var i brug. En malermester måtte flytte delvist ud og have maling opmagasineret i container pga. malingsprodukterne udtørrede. Smeden, der lejede en del af den værst påvirkede bygning, måtte holde 14 dages ferie på et kritisk tidspunkt. To beboere måtte fraflytte deres lejligheder og blev genhuset i campingvogne og sommerhuse i en periode af ca. en måned.



Figur 3.13 Fugt optrængning i væg som følge af vanddamp/kondensat i

3.5.3 Indtrængen af damp i fundamenter, gulve og afløb

Ikke blot opvarmningen af bygningerne, men også indtrængning af damp i bygningerne gav problemer. Disse kan kort opremses som:

- Vanddamp der trængte op gennem gulve og ødelagde belægninger og betongulve.
- Vanddamp der trak op som fugt i vægge med afskalning og misfarvning til følge, se eksempel i figur 3.13.



Figur 3.14 Fugt og misfarvning i fodpaneler

- Afskalning af maling og tapet på grund af fugtig luft der er trængt ind gennem gulve og afløb se figur 3.14 for eksempel.
- Meget høj luftfugtighed i flere uger efter at opvarmningen var ophørt. Dette resulterede i meget duggede vinduer.

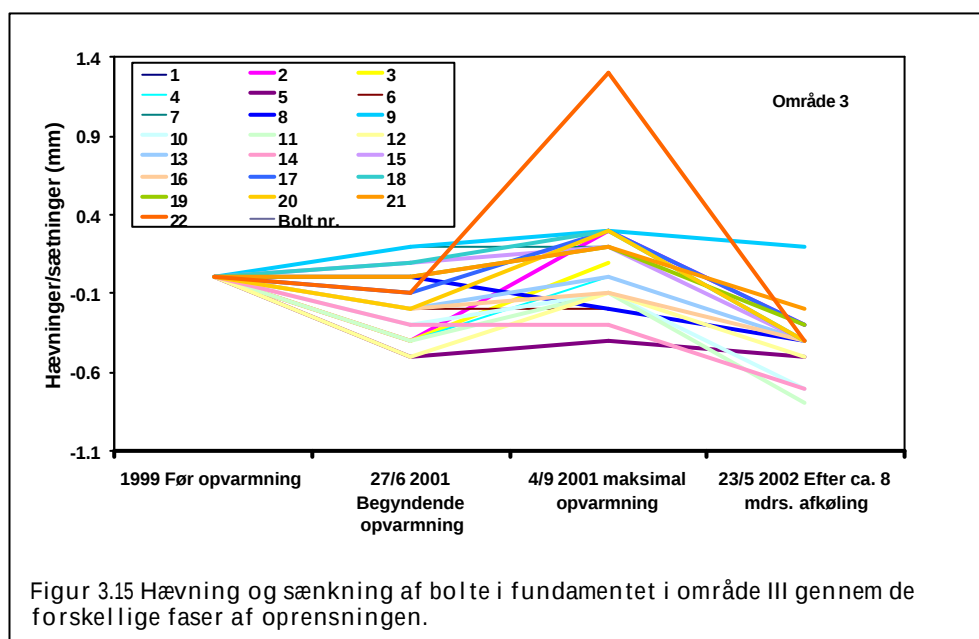
Alle disse skader blev observeret i område III, Industrivej. Der blev ikke konstateret problemer af denne type i Teglstenen sandsynligvis primært pga. den meget effektive udluftning under gulvene, men sekundært også fordi nyere huse er bygget med en fugtspærre mellem fundament og væg, hvilket manglede på bygninger på Industrivej.

Efter endt oprensning og afkøling er der sket renovering af de påvirkede bygninger med tapetsering, renovering af gulvbelægninger og maling.

3.5.4 Sætninger

Der blev i både område III og område I monteret nivellementsbolte i fundamenterne. Disse blev nivelleret inden opstart af oprensningen, efter vakuumventilation men inden opvarmning, ved maksimal opvarmning og efter 3 - 6 måneders afkøling. Resultatet af nivellementerne for bygningerne i område III er vist i figur 3.15 som funktion af tid og drifttilstand. Det ses, at der er sket sætninger og hævnings på op til 12 mm. Der observeres en tendens til, at fundamenterne sætte sig en smule under vakuumventilationen, hvor jorden tørrede lidt ud. Under fuld opvarmning hævede fundamenterne sig til mere end udgangsniveauet, sandsynligvis pga. jordens termiske udvidelse. Slutresultatet efter 8 måneders afkøling er en generel sætning på 2-6 mm. Hvordan sætningen forekom er ikke afklaret, men det er sandsynligt at pakningen af grus omkring fundament etc. kan have ændret sig, ligesom fjernelsen af organisk kulstof i jorden (se afsnit 4.4) kan have haft en indflydelse på jordens geotekniske egenskaber.

Sætningerne har resulteret i aktivering af eksisterende revner i bygningerne. De påvirkede bygninger er efterfølgende renoveret ved pudsning, maling og opsætning af nye fliser.





Figur 3.16 Damp strømmer op fra jorden via hækens rodsystem

3.5.5 Øvrige påvirkninger

Under driften kunne det ses at først træer, buske og siden hen også græs blev voldsomt påvirket af varmen, ofte med døden til følge. Rodsystemet fra hække og større buske virkede som kanaler for opstigende damp og en hel dampfront kunne ses langs en hæk i randen af oprensningen, se figur 3.16. Efter endt oprensning blev der genplantet ved en jordtemperatur på maksimalt 25 °C i 1 m under terræn, dog med hyppige vandinger af planterne i starten. I forbindelse med oprensningsprojektet har DMU /17/ lavet en undersøgelse af opvarmningen indvirkning på mikrofloraen. For resultater fra denne henvises til rapporten /17/.

Under dampoprensningens slutfase, hvor temperaturen var højest omkring kildeområdet var der en kraftig og markant lugtudvikling af kogt organisk materiale fra muldlaget.

Omkring brønde til injektionsboringer kunne der observeres så varme overflader, at asfalten blev blød og klæbrig og uegnet til have ting stående på.

4 Oprensningsresultater

I det følgende kapitel gennemgås resultaterne af oprensningen mht. energiforbrug, fjernet forureningsmængde og restforurening.

Der er forskel i datamængden på område III og område I+II, men vi har alligevel generelt valgt at samle resultaterne, idet vi anser oprensningen for et samlet driftsforløb.

4.1 Energiforbrug og varmeudbredelse

4.1.1 Område III

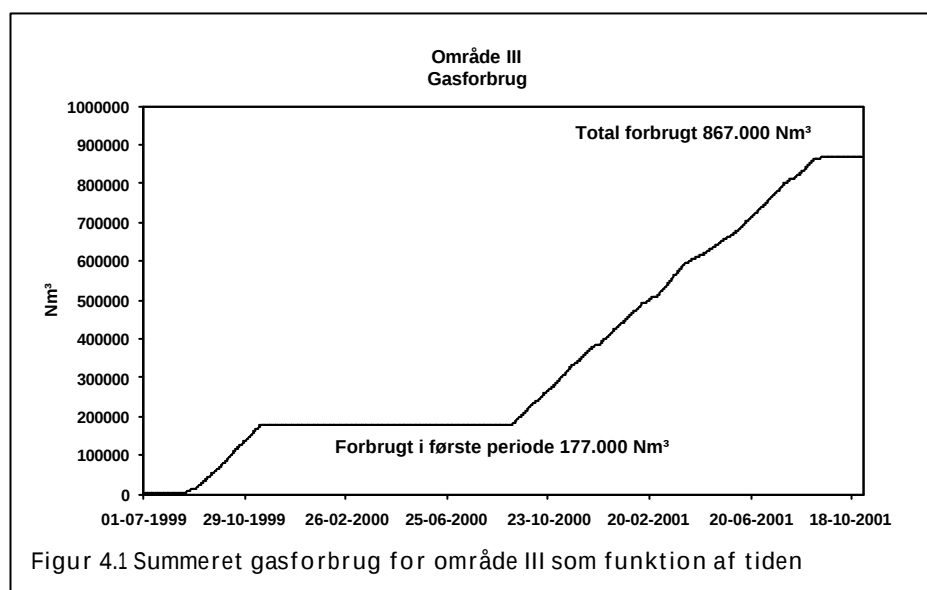
4.1.1.1 Gasforbrug

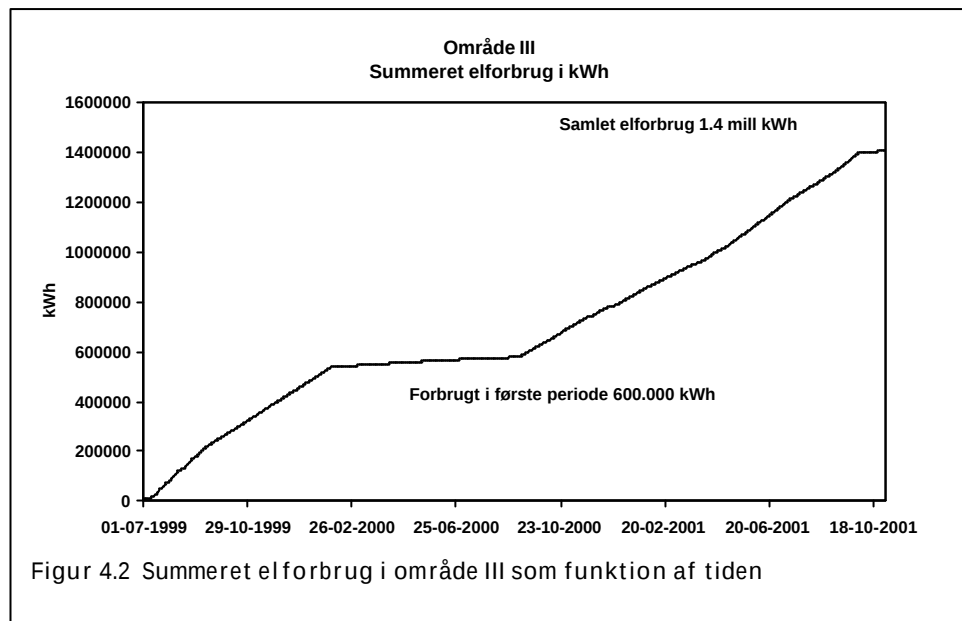
Dampen til opvarmning af jorden blev jf. kapitel 2 produceret ved anvendelse af naturgas. På figur 4.1 ses summeret gasforbrug som funktion af tiden under opvarmningen af område III.

Oprensningen af område III blev igangsat den 16-8-1999 jf. Bilag A og der blev injiceret damp frem til den 15-11-1999. I denne periode blev der injiceret i de yderste boringer i område III. Injektion bestod samlet af knap 2.500 tons damp i denne periode. Driften var meget uregelmæssig pga. problemer med at håndtere de opsugede vand og luftmængder.

Herefter stod anlægget stille i en periode, hvor der dels blev udført ombygninger og dels afklaret en række punkter vedrørende økonomien, se kapitel 2 og 3. Injektionen blev genopstartet den 4-9-2000 og afsluttet 1-9-2001.

Vi har i massebalancer og dampforbrug medregnet den første injektion (august til november 1999), men det er sandsynligvis kun en meget begrænset del af den energi, der blev injiceret i denne periode, der har været tilbage ved genopstarten af injektionen september 2000.

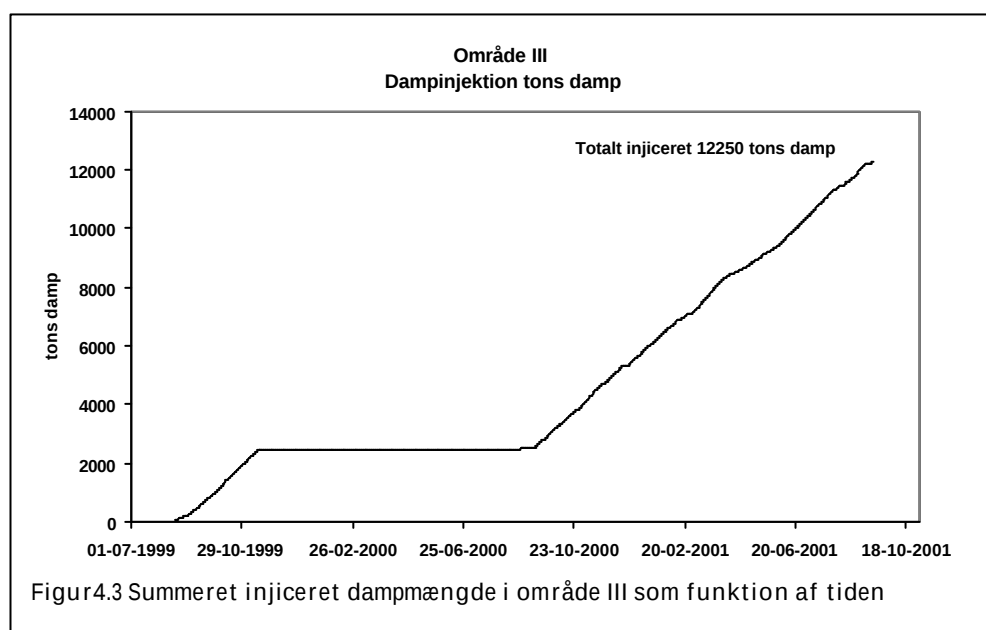


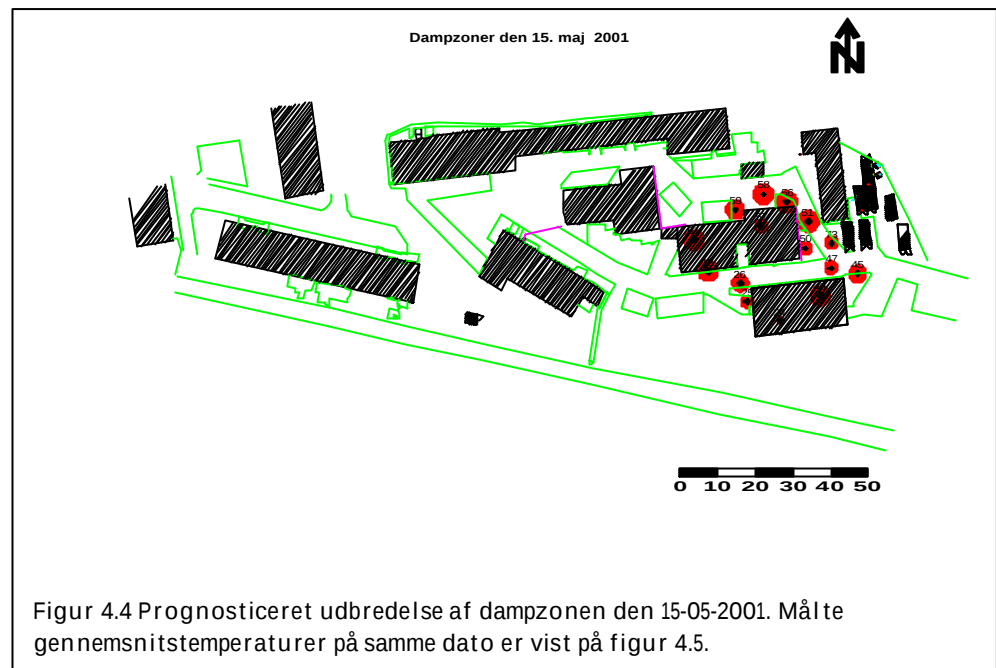


Det ses af figur 4.1 at det samlede gasforbrug for opvarmningen af område 3 har været ca. 870.000 Nm³ svarende til et ca. forbrug på 100 Nm³/h. Ved et gennemsnitlig energiindhold på 40 MJ/Nm³ svarer det til en samlet indfyret energimængde på 34.800 GJ eller knap 10 mill. kWh.

4.1.1.2 El-forbrug

Under driften har der været anvendt el til pumper mv. Elforbruget for område III er vist på figur 4.2. Det ses af figur 4.2, at det samlede forbrug i oprensningsperioden har været ca. 1,4 mill. kWh hvoraf de første 600.000 kWh blev brugt i den første periode. Årsagen til det noget højere elforbrug i starten er bl.a., at der i denne periode blev oppumpet væsentligt større luft- og vandmængder forårsaget af utætte boringskonstruktioner etc. Den anvendte energi svarer til effektforbrug på op til ca. 200 kW i den første periode faldende til ca. 100 kW efter renovering af borer og anlæg. Samlet udgør elforbruget ca. 12 % af det samlede energiforbrug ved oprensningen i område III.

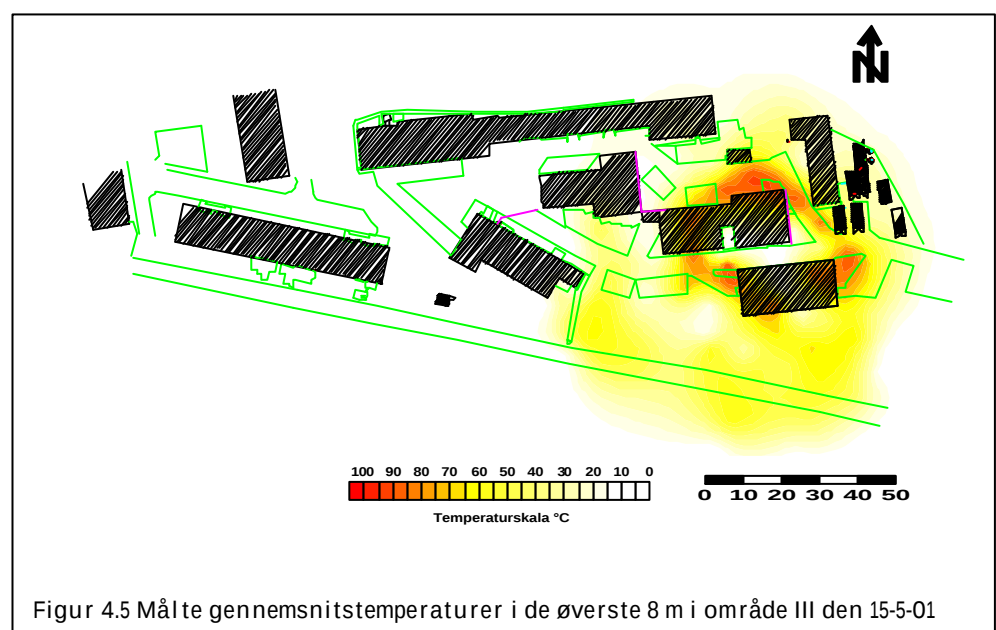


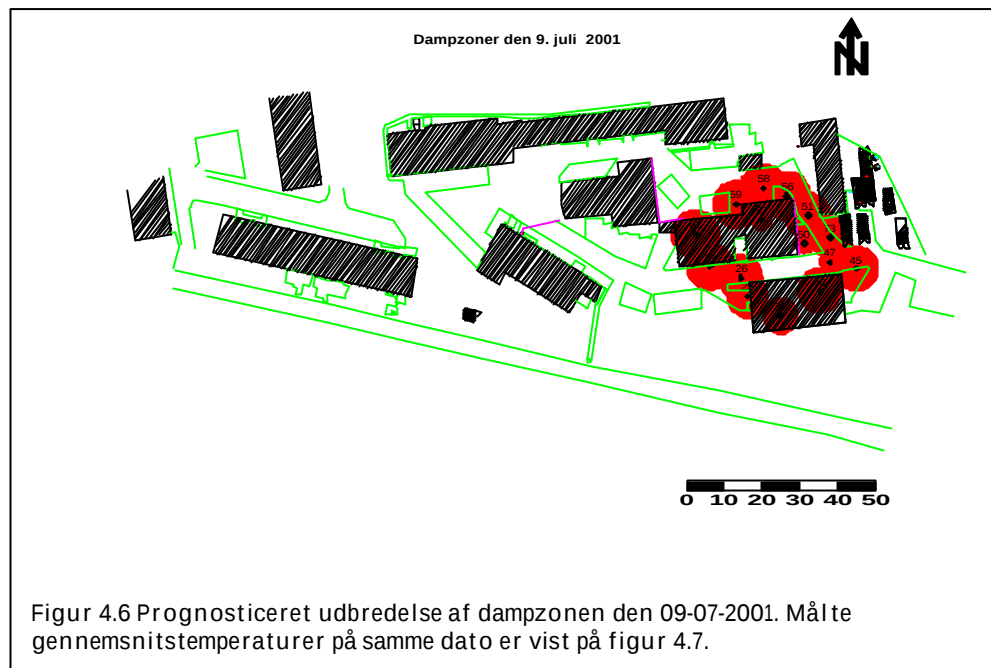


4.1.1.3 Dampinjektion og varmeudbredelse

Den producerede dampmængde følger samme forløb som gasforbruget vist i figur 4.1. Den installerede dampflowmåler kom aldrig til at virke i en tilstrækkelig grad til at pålidelige målinger kunne opnås. Der er derfor på baggrund af målinger af gasforbrug, temperatur og sammensætning af røggas samt vandmængder anvendt til bundskylning udregnet en dampproduktionsrate pr. indfyret gasmængde. I figur 4.3 er den injicerede dampmængde vist. Der er i alt injiceret 12.250 tons damp. Den samlede injektion svarer til en gennemsnitlig injektion i driftsperioden på 1.060 kg/h.

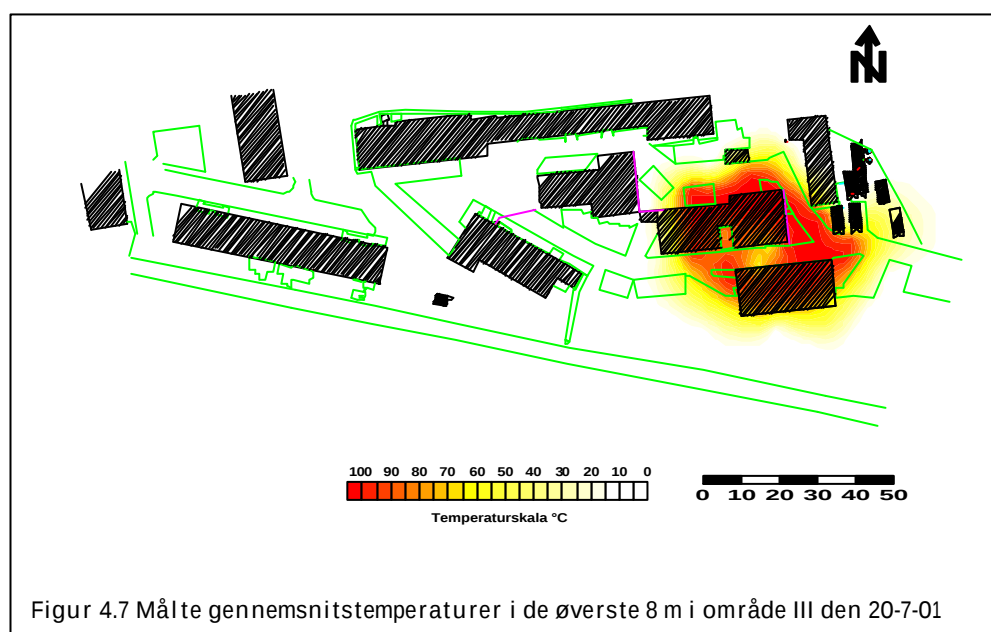
Som prognosticeringsværktøj til dampudbredelsen og dermed temperaturudviklingen i jorden, blev der anvendt en metode til beregning af den relative dampfordeling til borerne. Denne var baseret på den relative modstand i de enkelte injektionspunkter. Som angivet i kapitel 3.4 viste det sig at være forbundet med store problemer at måle denne modstand (udtrykt ved

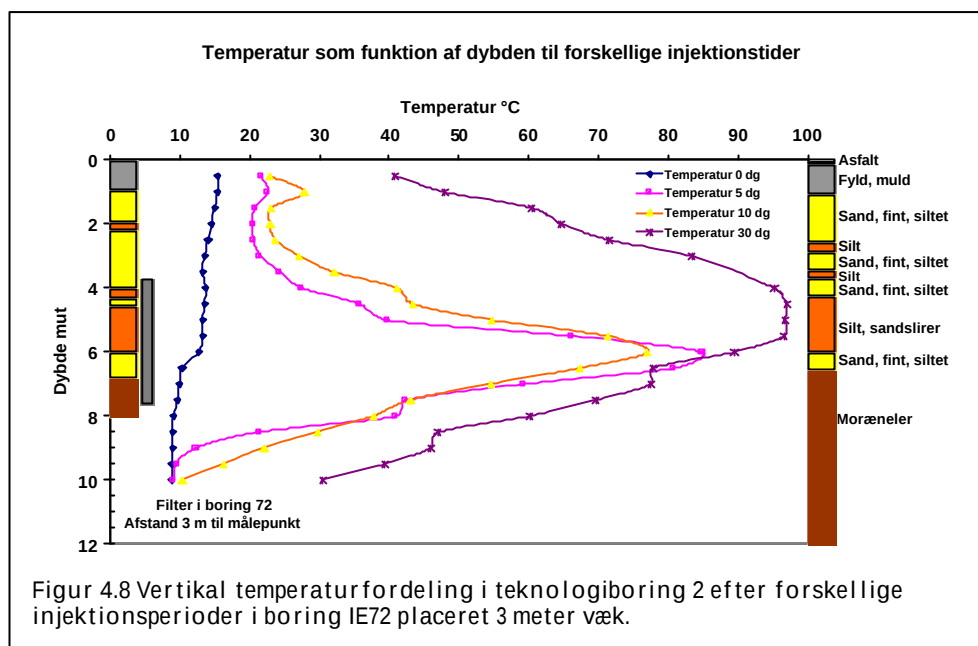




modtrykket i de enkelte boringer). Til trods for dette viste det sig i praksis, at den prognosticerede dampudbredelse og den faktisk målte temperaturudbredelse var i rimelig overensstemmelse med hinanden, hvilket er vist i eksemplerne på figur 4.4-4.7. På figurerne ses til 2 forskellige tidspunkter (henholdsvis 15-5- 2001 på figur 4.4 og 4.5 og 9-7-2001 på figur 4.6 og 4.7) dels de prognosticerede dampzoner og dels de konturerede temperaturer baseret på temperaturmålinger i injektions-, ekstraktions- og teknologiboringer.

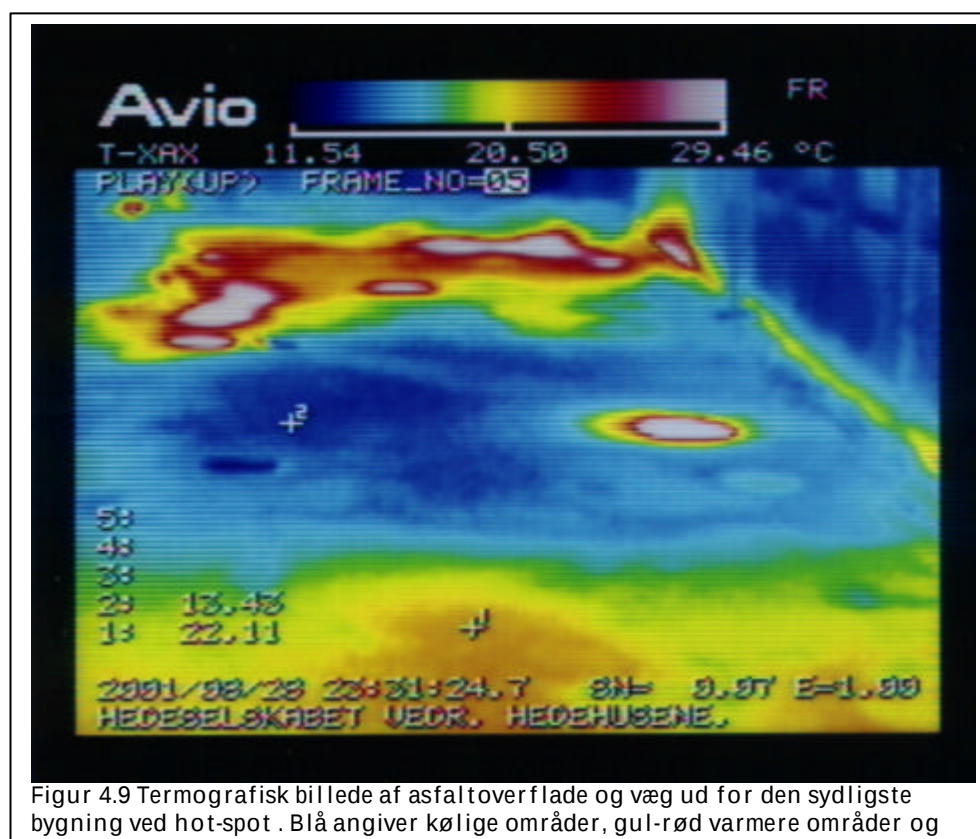
Temperaturmålinger skal dog som udgangspunkt udføres, da der kan være store forskelle i udbredelsen omkring boringerne i forskellige retninger. Dette gælder både den horisontale udbredelse såvel som den vertikale udbredelse. Det kan ses af både figur 4.5 og 4.7 at opvarmningen ikke er symmetrisk omkring boringerne. Ligeledes er der meget stor forskel i den vertikale fordeling af dampen, hvilket illustreres i figur 4.8, der viser den vertikale





temperatur i teknologiboring 2 til forskellige tider efter start af injektion.

Dampen ser omkring denne injektionsboring ud til i første omgang at blive spredt via et høppermeabelt sandlag umiddelbart over moræneleren. Dette viser med al tydelighed behovet for at kunne foretage en dybde specifik måling af temperaturen. Hvis man forestiller sig, at der var placeret en ekstraktionsboring samme sted som temperaturmåleboringen, ville det opsugede medie sandsynligvis være tæt på damptemperatur allerede efter en uges injektion. Som det kan ses af figur 4.8 er det kun i et ganske smalt bånd af det totale volumen at opvarmningen er tilstrækkelig. Efter 30 dage ses en



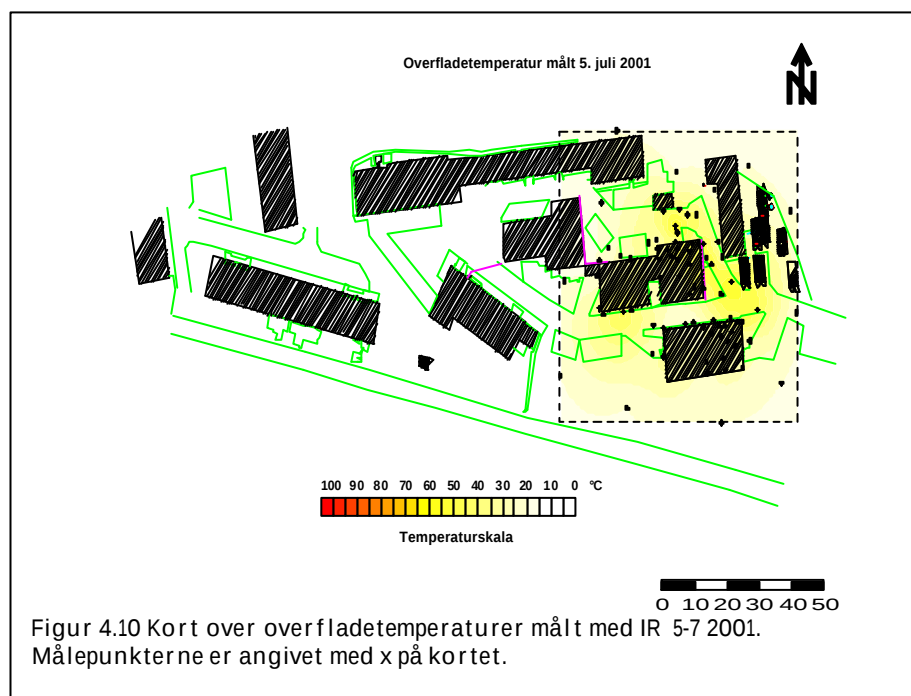
mere fremskreden opvarmning af hele volumenet, men stadig primært i det samme niveau som dampen injiceres i i den nærliggende boring. Varmeledning og vertikal dampspredning har endnu på dette tidspunkt ikke spillet en dominerende rolle i forhold til energiudbredelsen.

Selv efter at det blev konstateret, at temperaturen i samtlige målepunkter der blev målt både vertikalt og horisontalt havde opnået damptemperaturer (kontureringen er vedlagt som bilag B), viste det sig, at der var områder nær overfladen der forblev kolde. Forklaring kan være kloakker eller andre strukturer der forhindrer en effektiv damptransport.

Til belysning af overfladenære temperaturer kan anvendes den samme teknik der anvendes til afsløring af varme områder i bygninger og elinstallationer. Der anvendes et specielt infrarødt kamera, der anvendes til at tage billeder om natten hvor der ikke er solindstråling. I figur 4.9 er der vist et eksempel på et billede taget ved denne teknik. Billedet viser temperaturer som farver, med blå toner som det kolde og røde toner som det varme område. Billedet er taget mod øst ved den sydligste bygning i hot-spottet i område III.

På figur 4.9 ser man udover det kolde område midtfor i venstre side at der er et meget varmt dæksel til højre midtfor. Langs gavlen kan man også observere at der er varmere end omgivelserne, sandsynligvis pga. af strømning af mindre mængder af damp/energi langs med fundaments kanten. Specielt bagerst i billedet er dette fænomen udtalt.

Vi har i forbindelse med evaluering af effekter på bygningerne/komfort også udført målinger af overfladetemperaturer ved almindelig IR måling. På figur 4.10 er der vist et eksempel på et kort genereret på baggrund af en målerunde udført 5. juli 2001, hvilket gør den sammenlignelig med figur 4.6 og 4.7. Det ses at der er tale om kraftigt forhøjede overfladetemperaturer i de samme områder som dampgennembruddet er konstateret i længere nede. Det ses også at der er tale om relativt høje overfladetemperaturer, specielt i bygningerne hvor der er konstateret temperaturer på over 50 °C.



4.1.2 Område I+II

4.1.2.1 Gas- og olieforbrug

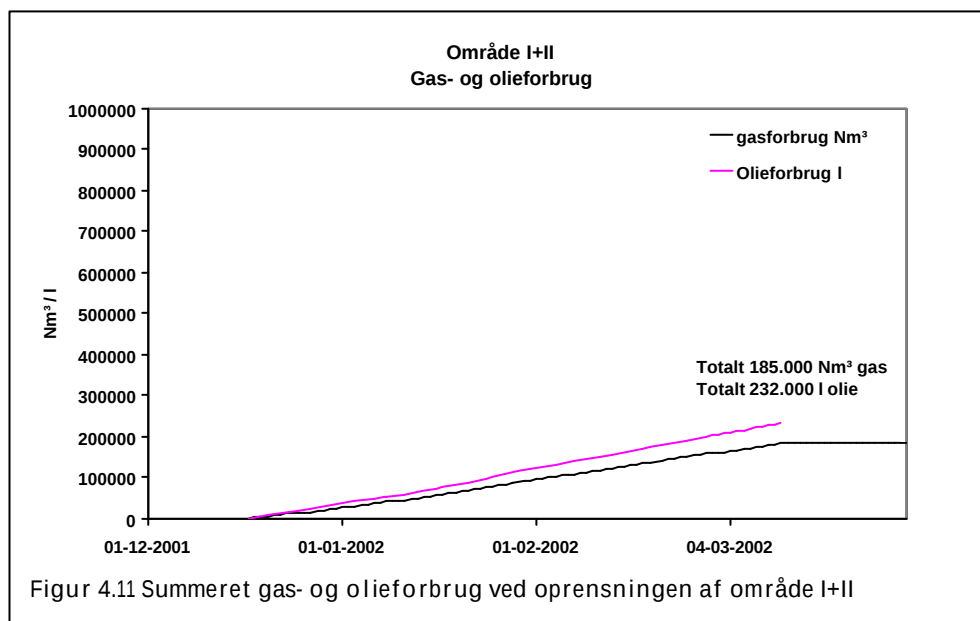
Dampen til opvarmning af jorden i område I+II blev produceret ved anvendelse af naturgas og olie. På figur 4.11 ses summeret gas- og olieforbrug som funktion af tiden under opvarmningen af område I+II.

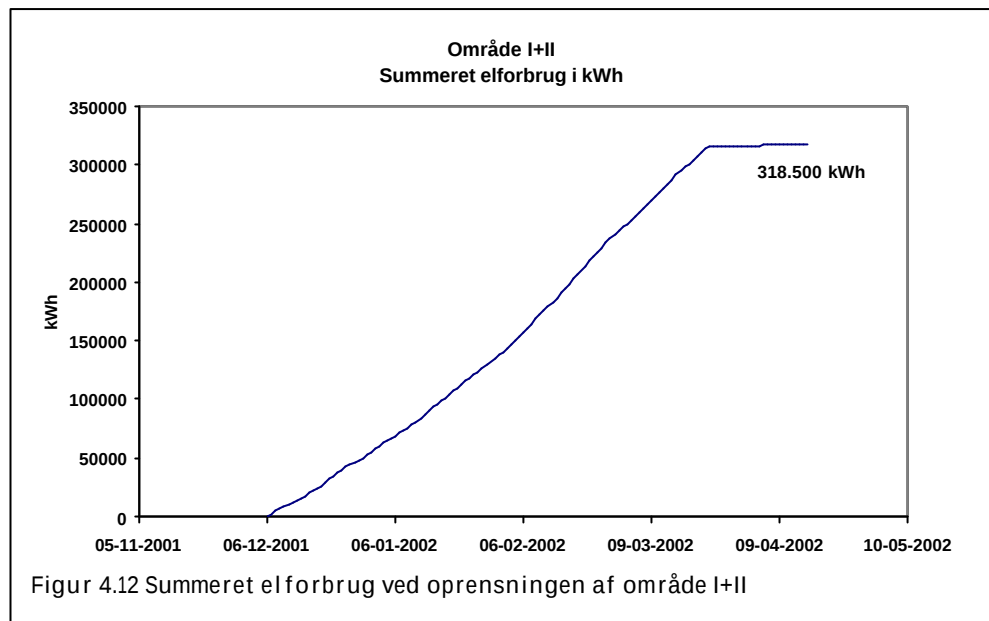
Oprensningen af område I+II blev igangsat 3-12-2001 med to ugers vakuum på samtlige borer til at fjerne ”stående” dampe. Der blev herefter injiceret damp i en periode fra den 17-12-2001 til udgangen af februar 2002. I starten af marts var det planlagt, at der skulle afvikles cykliske injektioner/ekstraktioner, men det blev klart at der var opstået et væsentligt problem der blev konstateret i forbindelse med temperaturmålinger den 6-3-2002 (se afsnit 4.1.2.3). Her kunne det konstateres, at der var en væsentlig ændring af vandspejlshøjden i borerne i område I i kombination med et meget signifikant temperaturfald i den nu mættede zone. Dampinjektionen blev herefter standset i område I den 9-3-2002, men fortsatte med cyklisk drift frem til den 15-3-2002 i område II.

I figur 4.11 er det samlede gas og olieforbrug til dampproduktion vist som funktion af tiden for oprensningen af område I+II.. Det ses af figuren at det samlede gasforbrug har været 185.000 m³ og det samlede olieforbrug på 232.000 l. Med et energiindhold på ca. 40 MJ/Nm³ gas og 33 MJ/l olie svarer dette til en samlet energiinput på 15.100 GJ eller 4,2 mill. kWh. Energiforbruget er stort set ligeligt fordelt på de to energiformer.

4.1.2.2 El-forbrug

I figur 4.12 er elforbruget til oprensningen i område I+II vist. Der har i lighed med oprensningen af område III været anvendt strøm til pumper mv. Det samlede forbrug er jf. figur 4.12 ca. 318.500 kWh. Dette udgør ca. 7 % af det samlede energiforbrug. Ved oprensningen af område III udgjorde elforbruget ca. 12 %.





Det ses at el-andelen blev kraftigt reduceret ved oprensningen i område I+II i forhold til oprensningen af område III. Dette skyldes dels den samlede oprensningstid var meget kortere, hvilket betyder at der ikke har været anvendt unødigt meget pumpetid, og dels har der været optimeret på hele processen i forhold til oprensningen af område III

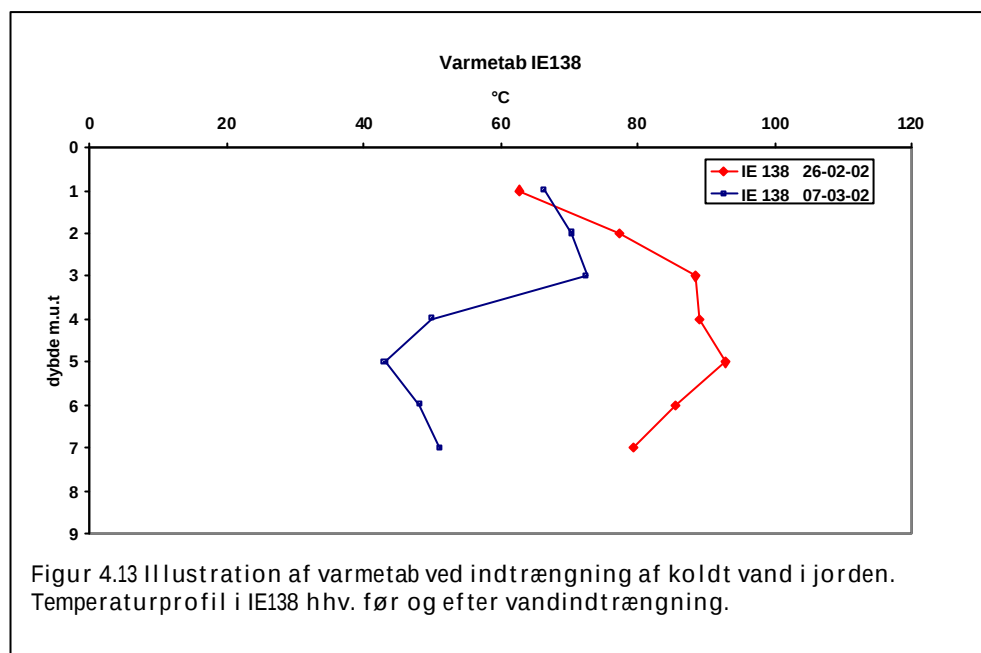
4.1.2.3 Dampinjektion og varmeudbredelse

Den samlede dampmængde der blev produceret og injiceret i område I+II var ca. 5.300 tons, svarende til en produktion på ca. 2.600 kg/h. Dampproduktionen er ligefrem proportional med forbruget og ikke illustreret grafisk.

Jf. afsnit 3.4 om måling af tryk og dampflow fra anlægget blev der udført en kraftig ombygning af målesystemet til måling og regulering af dampmængden til de enkelte borer. Dette gav sig udtryk i at prognosticeringen af dampudbredelsen blev endnu mere sikker end ved oprensningen i område III.

I område I+II var der ikke etableret teknologiborer. Temperaturmålingerne er derfor i disse to områder udelukkende udført ved nedstik med et såkaldt juletræ (se afsnit 3.4.1.2 for forklaring) i injektions- og ekstraktionsboringer efter aflukning af disse fra det aktive system.

Figurer der illustrerer de faktiske målinger af temperaturudbredelsen er vedlagt som bilag C.



Problemerne omkring indtrængning af koldt vand fra regnvandsledningen (se afsnit 3.1 for forklaring) er illustreret i figur 4.13. Figur 4.13 viser temperaturprofilen i boring IE138 før (26-8-2002) og efter (7-3-2002) store kolde vandmængder løb gennem område I. Vandspejlet stod på dette tidspunkt ca. 2 m ut. Det ses umiddelbart, at der er tale om temperaturfald på helt op til 50 °C i løbet af ganske få dage, og ca. 25 °C i gennemsnit over de øverste 7 m, svarende til at ca. 40 % af den tilførte energi umiddelbart var forsvundet.

Dette indikerer at der er et generelt incitament til at kontrollere tilstrømningen af koldt vand, da der meget hurtigt kan fjernes store energimængder fra et opvarmet område på denne måde.

4.2 Energibalance og tab til omgivelserne

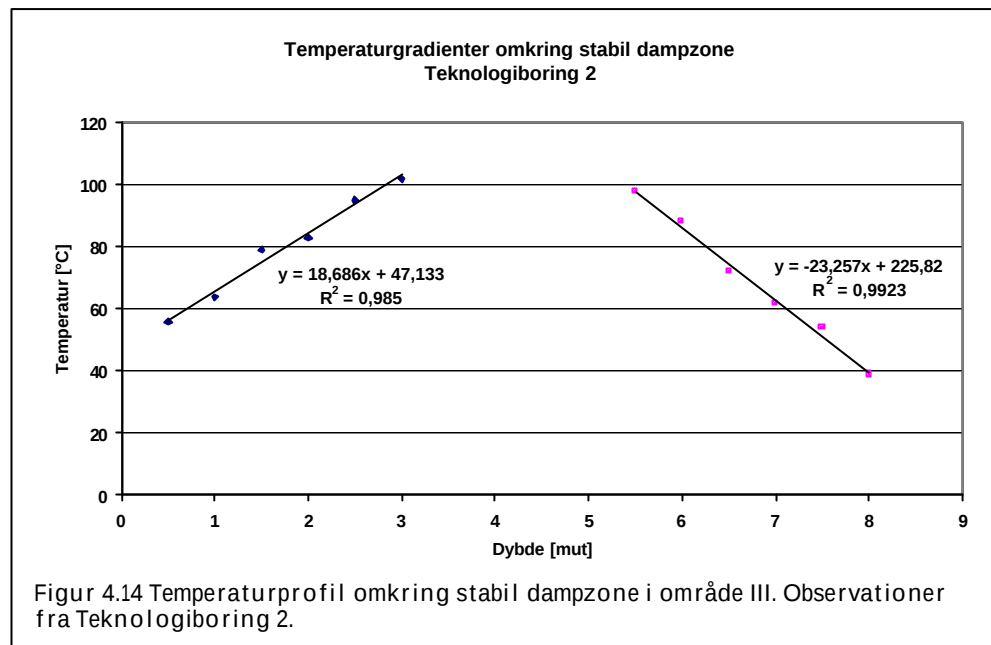
Den injicerede energi er ved oprensningen fordelt på en række delposter. Der er tale om følgende delelementer:

- Energi opsparet i jordmatricen ved oprensningens afslutning
- Energi tabt til overfladen og nedadtil ved varmeledning
- Energi suget op med det oppumpede vand
- Energi suget op med oppumpet gasfase

4.2.1.1 Tab til omgivelserne

Til vurdering af tabet via varmeledning har vi prøvet at beregne dette på baggrund af temperaturgradienter. I figur 4.14 og figur 4.15 er vist et eksempel på profiler med graderter hhv. op og nedad til i område III og område I.

Det ses af figur 4.14 af der er tale om en relativ smal zone med dampstemperaturer og en stor zone med varmeledning. Temperaturgradienten er rimelig ens både opad og nedad, med en værdi på ca. 20 °C/m. Det forventes pga. af kondensation at jorden over og under dampzonen er relativ våd. Som udgangspunkt anvendes derfor en termisk ledningsevne på 2,5

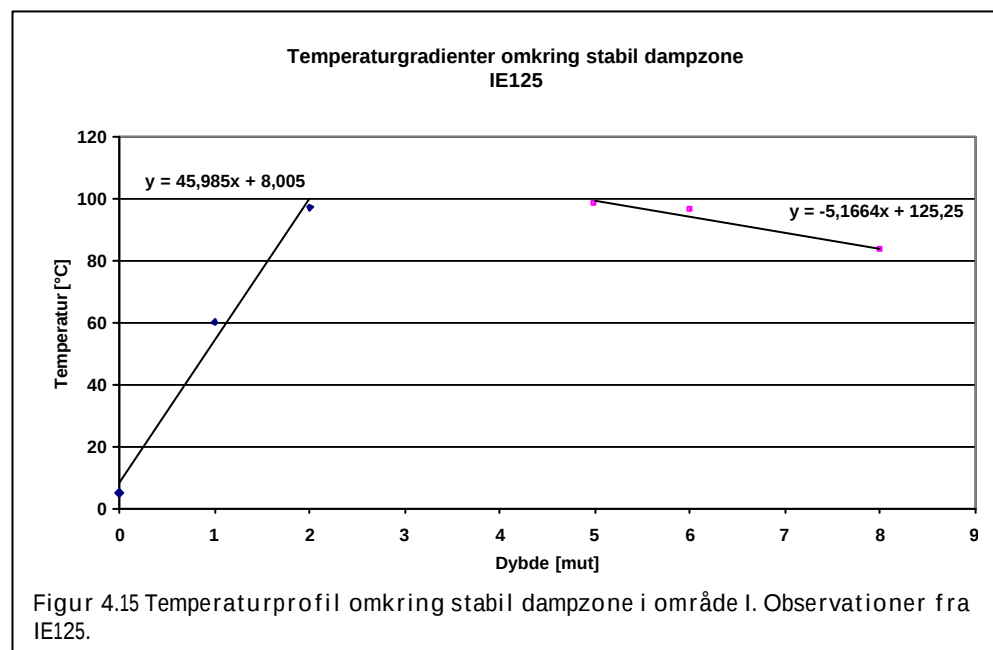


W/m°C. Under disse antagelser svarer det til at der er et tab på ca. 100 W/m² fordelt ligeligt op og ned.

I modsætning til dette står observationerne fra boring IE125 vist i figur 4.15. Her er der en stor forskel på gradienten op og ned, med en gradient på ca. 45 °C/m op og 5 °C/m ned. Der er sandsynligvis fordelt meget damp opad ved advektion, hvilket giver forskellen til forholdene vist i figur 4.14. Også nedadtil er der en meget stor forskel på de fundne gradienter. Som det ses er der en meget mindre gradient omkring boring IE125 (fig. 4.15). Dette skyldes sandsynligvis, at energitransporten i horisontal retning har været så hurtig, at det underliggende jordlag endnu ikke er opvarmet til ligevægtstemperaturen.

I begge tilfælde ses det, at det samlede tab er af samme størrelse, og udgør ca. 100 W/m². Ved en fuldt udbredt dampzone ved en radius på 10 m, svarer dette til et tab på ca. 31 kW.

De observerede gradienter er noget lavere end dem der indledningsvis blev



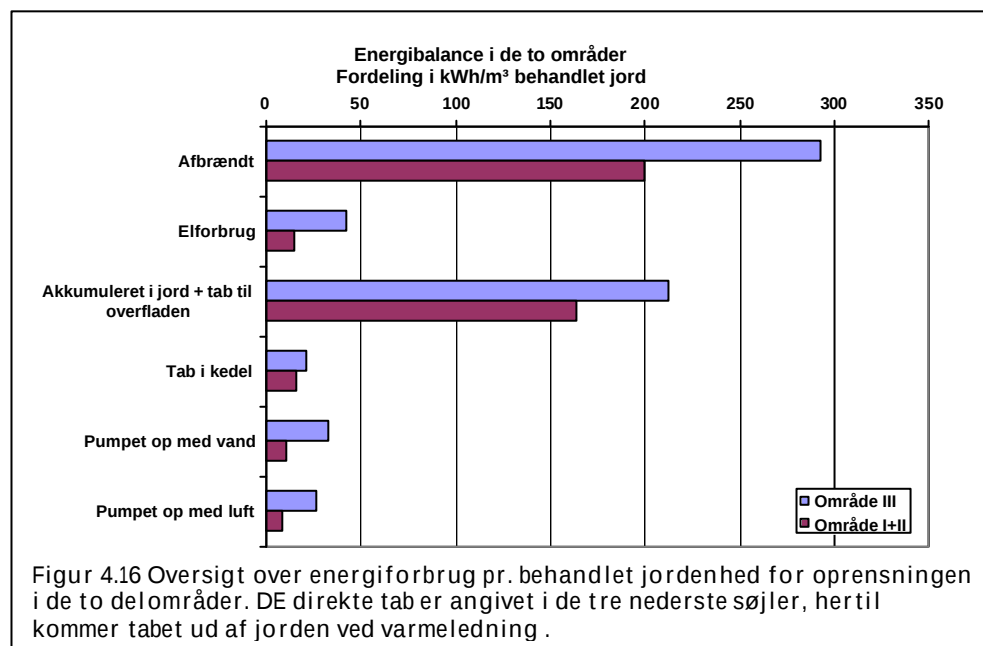
brugt til dimensioneringen. Ved dimensioneringen blev der anvendt en gradient på 90 K/m opad og 30 °C/m nedad. De observerede var i intervallet 20-50 °C/m opad og 5-25 °C/m nedad. Umiddelbart ville dette teoretisk lede til, at det vil være muligt at opnå en større udbredelse af dampen end oprindeligt antaget. I praksis viste det sig, at der i en lang række af borerne var problemer med at komme af med tilstrækkelig damp (jf. afsnit 3.2.1.4), således at de oprindelige antagelser om dampudbredelsen, specielt i område III hvor der var lavest permeabilitet, var vanskeligt opnåelige. I /1/ er der også angivet en tommelfingerregel om, at dampudbredelsen ikke overstiger dybden til top af filter væsentligt, hvilket i vores tilfælde svarer til 4-7 m.

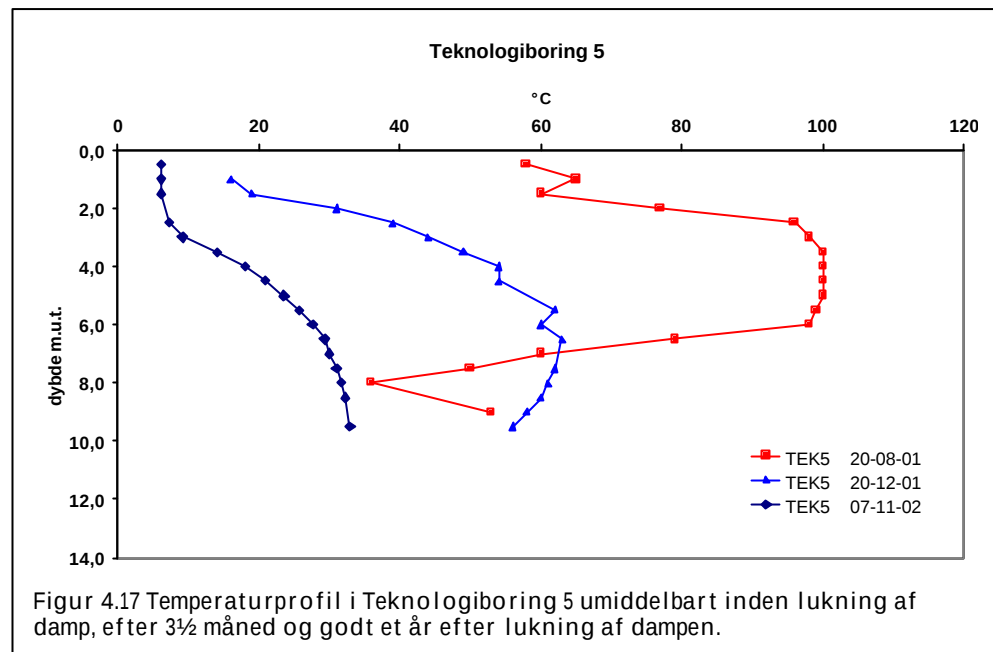
4.2.1.2 Energibalance

Energimængden oppumpet via vand og luft var i forhold til den injicerede mængde knap 20 % i område III og knap 10 % i område I+II, hvilket fremgår af figur 4.16.

Det samlede tab af energi ved oprensningen af område III var knap 25 % og blev reduceret til knap 16 % ved den efterfølgende oprensning af område I+II. Det samlede energiforbrug svarer til hhv. 336 kWh/m³ og 214 kWh/m³ for område III og område I+II.

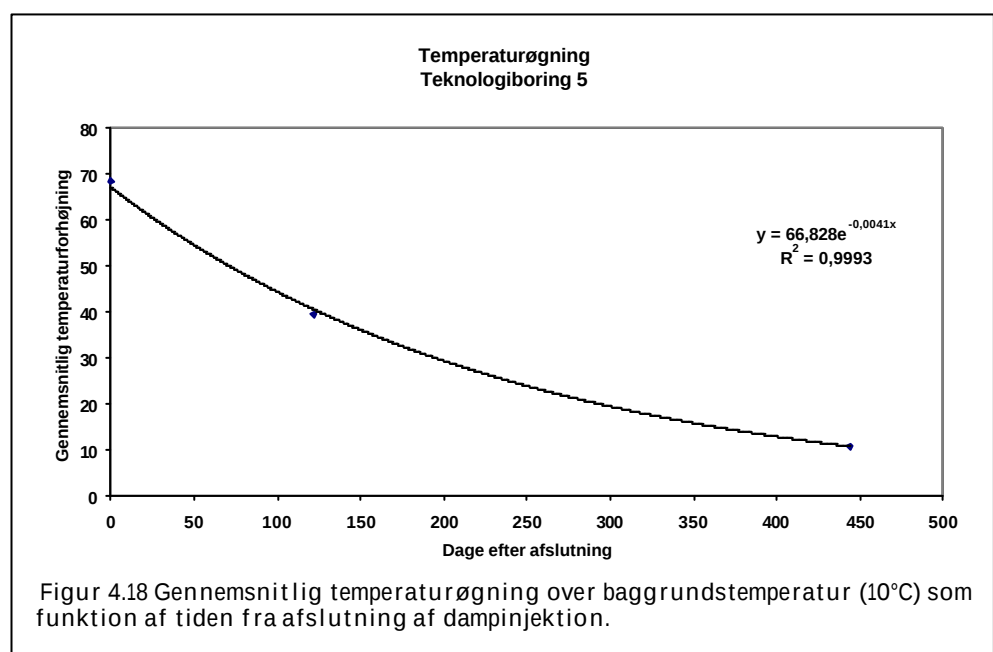
Til sammenligning er det teoretiske forbrug til opvarmning af 1 m³ jord i størrelsen 60-80 kWh/m³ jf. /1/. Der er altså brugt hvad der svarer til 3-5 gange så meget energi som teoretisk forudset pga. tab, hvoraf varmeledning til omgivelserne er det dominerende tab.





4.2.1.3 Afkøling efter oprensning

Efter endt oprensning er afkølingen fulgt i område III. I figur 4.17 er temperaturen i Teknologiboring 5 (TEK5) vist til tre forskellige tidspunkter, dels ved oprensningens afslutning og dels efter 3½ måned og et helt års afkøling. Det ses at temperaturen falder umiddelbart hurtigst i starten af forløbet og efter godt 3 mdr. allerede er nede på maksimalt 60 °C. Det bemærkes også, at temperaturfronten glattes ud over dybden pga. af varmeledning. Efter ca. et år er maksimal temperaturen ned på ca. 30 °C. I figur 4.18 er vist gennemsnitstemperaturen fratrasket 10 °C (baggrunds middel temperatur) i Teknologiboring 5 som funktion af tiden efter lukning af anlæg. Gennemsnitstemperaturen udtrykker samtidig energiopsparingen i jorden under forudsætning af, at den specifikke varmekapacitet er konstant. Det ses, at der er en eksponentiel sammenhæng. Dette er forventet, da gradienten reduceres og dermed tabet med tiden. Den fundne sammenhæng svarer til at 50 % af energien er tabt efter ca. 1 mdr. og 90 % efter ca. 1½ år. En anden implikation af tabskurven er, at et stop af dampinjektionen giver



endog meget store tab i starten. Hvis der tages udgangspunkt i den fundne funktion fås et initielt tab på ca. 500 W/m³, hvis der regnes med et døgnstilstand. Baseret på de stationære målinger af gradienten er det konstateret at tabet er i størrelsen 100 W/m², hvilket indikerer at tabsfunktionen sandsynligvis overvurderer det initielle tab. Selv ved tab på 100 W/m² er stop dog meget kritiske, da der typisk skal bruges yderligere én ekstra dag til injektionen for at indhente den tabte energimængde.

4.3 Forureningsmasse opsuget og behandlet på anlægget on site

Som beskrevet i kapitel 2.2 og 2.3 er der under dampoprensningen dels oppumpet vand fra borerne filtersat i det sekundære grundvandsmagasin (sekundært vandsystem) og dels opsuget en blanding af luft og damp ved vakuumelekstraktion fra IE-boringerne. I behandlingsanlægget on site separeres vand- og luftstrømmen og henholdsvis vand og luft blev renset inden udledning.

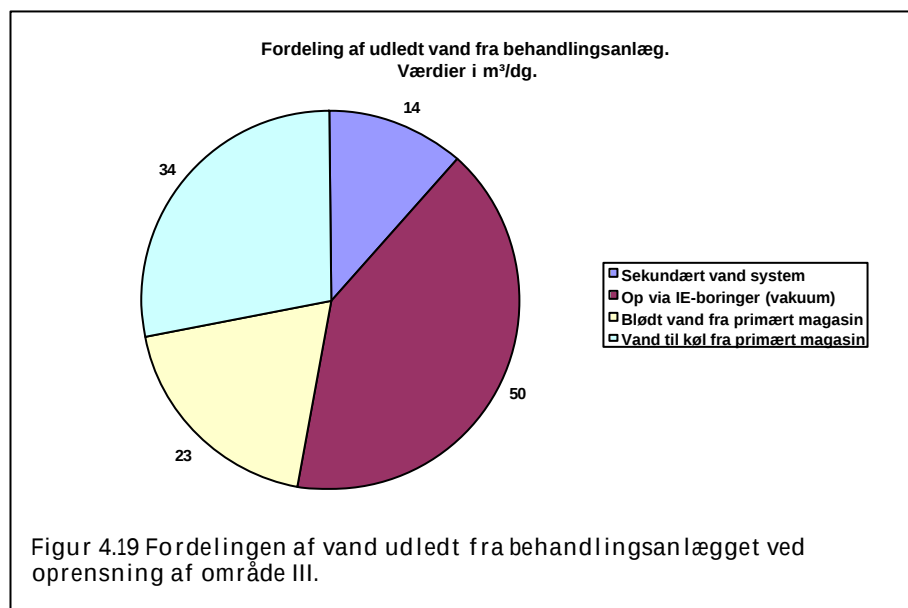
Som anført i kapitel 3.4 har der været perioder hvor flowmåling og koncentrationsmålinger har været behæftet med usikkerheder. Derfor skal mængderne angivet i dette kapitel vurderes med dette for øje.

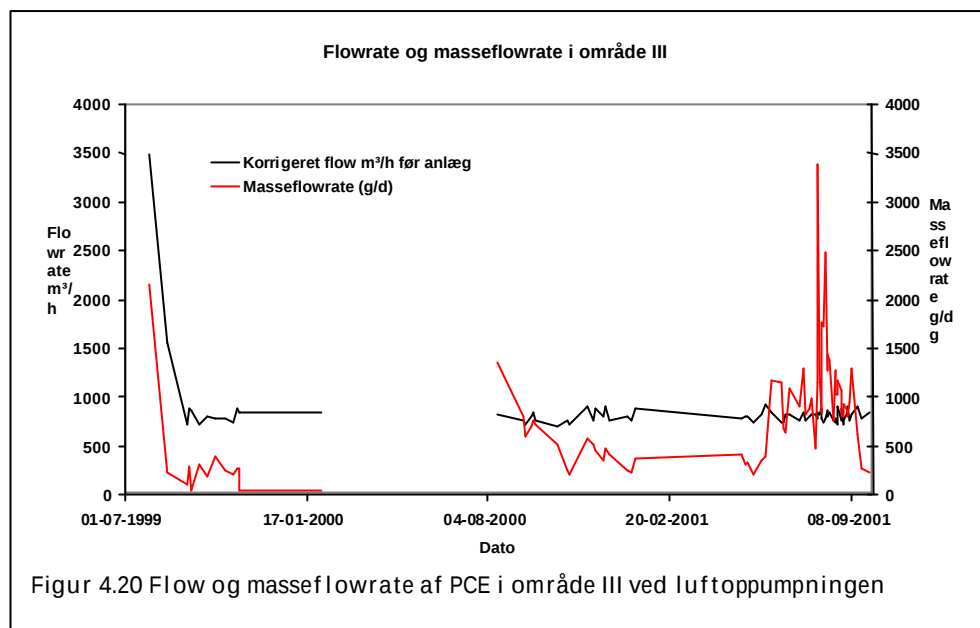
4.3.1 Område III

Ved oprensningen af område III er der udtaget prøver fra behandlingsanlægget ca. hver 3. dag til analyse for chlorerede opløsningsmidler. Da der primært er tale om PCE rent mængdemæssigt, er det denne komponent der er fokuseret på i figurerne. Som tidligere beskrevet er der oppumpet både vand fra det sekundære magasin og luft/damp fra området.

I gennemsnit igennem oprensningsperioden er der fra behandlingsanlægget udledt vand i størrelsesordenen ca. 120 m³ vand/dg (5 m³/h) som er fordelt som vist i figur 4.19.

Det ses af figur 4.19 at fordelingen er ca. 50 % fra det sekundære magasin og ca. 50 % fra det primære magasin. Det ses, at hovedparten af vandet fra det



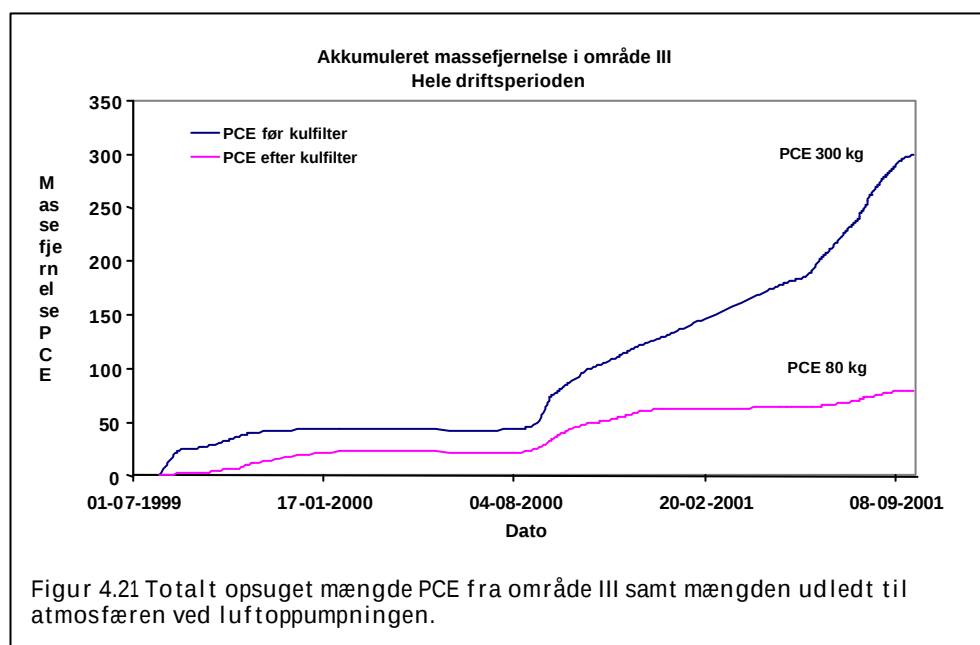


sekundære magasin hvor oprensningen foregik, blev ekstraheret via vakuumboringerne, hvorimod systemet der var konstrueret til dette formål kun bidrog med en mindre andel.

Vandet fra det primære magasin blev anvendt som kølemiddel/hjælpemiddel i væskeringspumperne efter blødgøring.

De typiske koncentrationer i vandet der blev ledt til rensning var i størrelsen 10-20 µg/l. Med de oppumpede vand- og luftmængder var dette helt insignifikant set på massebasis idet det kun udgjorde maksimalt 1 kg PCE svarende til mindre end 0,5 % af den samlede massefjernelse. Rensningen af vandet virkede i lange perioder meget dårligt pga. jern- og kalkudfældninger. Vandkvaliteten var i disse perioder sammenligneligt med det oppumpede vand fra det primære magasin, der blev udledt uden rensning.

I figur 4.20 er vist flowet og masseflowraten ved oprensningen af område III for luftoppumpningen. Det ses umiddelbart, at der i forbindelse med



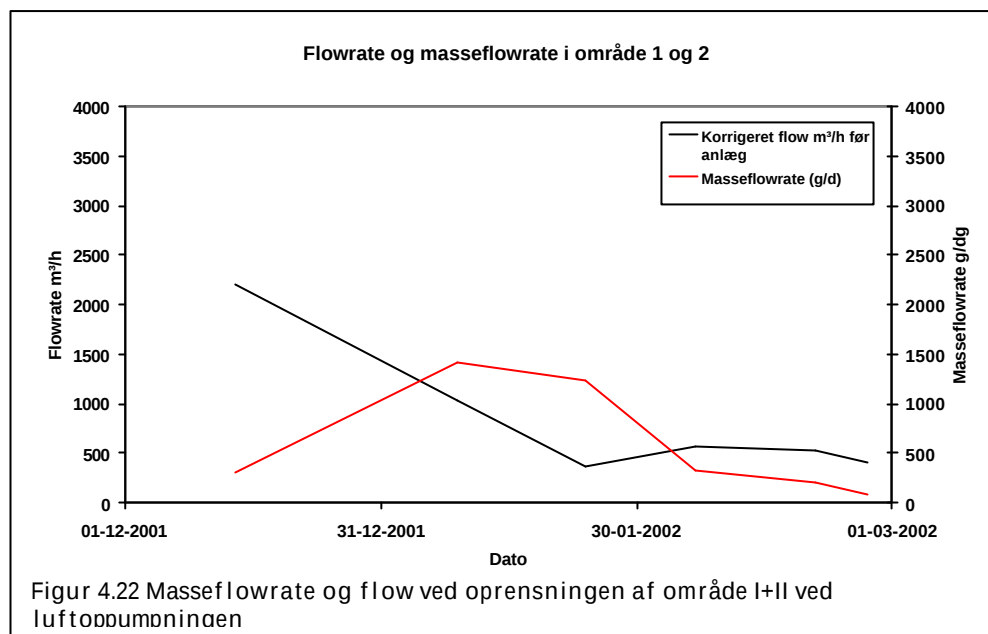
opstarten blev anvendt et meget stort flow, men at det hurtigt faldt, bl.a. på grund af udfældningsproblemerne beskrevet i kapitel 3.3.4. Efter ombygningen (se kapitel 3.1.1) blev der i de fleste periode kun anvendt én pumpe der pumpede ca. 800 Nm³/h i hele perioden ved et arbejdsstryk på 400-500 hPa absolut. De 800 Nm³/h var væsentligt lavere end specifikationerne, men var forårsaget af den store vandmængde der blev fjernet simultant via vakuumsystemet.

Initielt ses en stor masseflowrate af PCE, i lighed med hvad der typisk observeres ved traditionel vakuumventilation uden dampinjektion. Dette forløb gentager sig ved genopstart af anlægget efter ombygningen hvorefter massefjernelsen falder til et nogenlunde jævnt leje på 2-300 g/dg under dampningen af de ydre dele af forureningen. Ved dampning af hot-spot stiger fjernelsesraten til ca. 1.000 g/dg, og ved dampning i det mest forurenede område i kombination med cyklisk drift øges fjernelsesraten op til 3.000-4.000 g/dg. Efter opvarmningsfasens afslutning efterpoleres med vakuumventilation i ca. 4 uger, hvor raten falder ned til ca. 200 g/dg sidst i perioden.

Den samlede mængde PCE fjernet på luftfase er jf. figur 4.21 ca. 300 kg.

I figur 4.21 er den samlede masse i luftfasen vist som funktion af tiden sammen med den mængde, der er udledt til atmosfæren. I opstarten fungerede kulfilteret 100 %, men som følge af højt relativt vandindhold i luften var der problemer med at opretholde effektiviteten. Efter ombygningen med reheater og posefilter fungerede filteret bedre i en periode, men som det kan ses umiddelbart af kurven lykkedes det ikke at opnå en bedre filtereffektivitet end ca. 75 %, hvilket er relativt lavt. Forklaringen kan skyldes en relativt høj vandmætningsgrad, der gør kullenes mulighed for at absorbere væsentligt ringere, ligesom tilstedeværelsen af partikler i luftstrømmen kan have forårsaget kanalstrømning i gennem filteret.

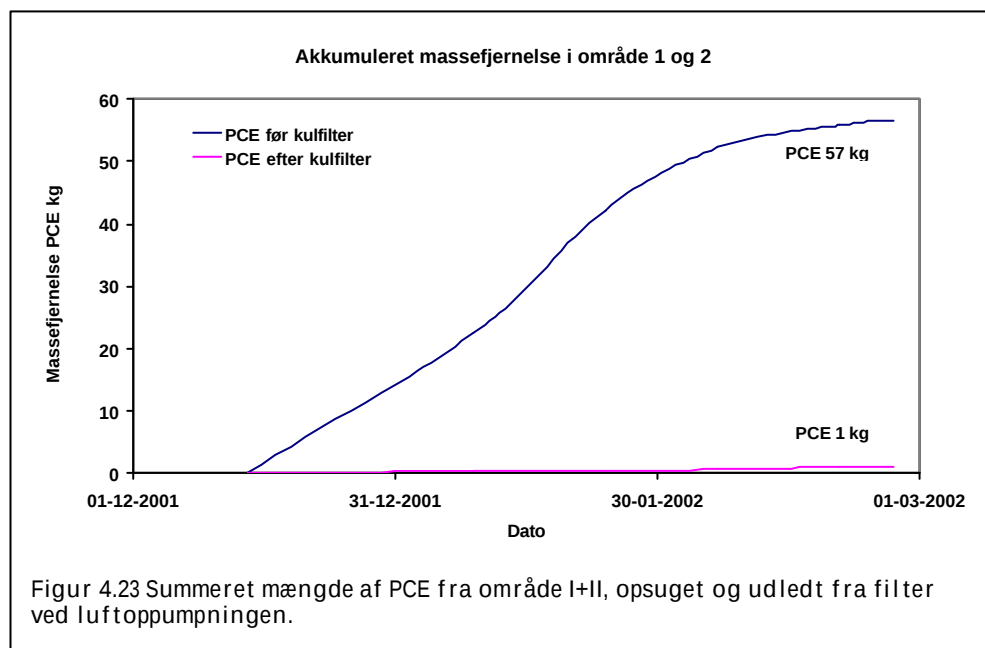
Den samlede luftmængde der blev suget igennem anlægget var ca. 13 mill. Nm³ svarende til en udskiftning på ca. 1.300 porevolumener i gennemsnit over det samlede jordvolumen.



4.3.2 Område I+II

Ved oprensningen i område I+II er der taget færre analyser end ved oprensningen af område III. Fokus var lagt på måling af temperaturerne i jorden, da de jf. de opnåede restkoncentrationer i område III viste sig at være den bedste indikator for fremdriften.

I figur 4.22 er masseflowrate og flowet for vakuumsystemet vist. Det ses umiddelbart, at flowet i opstartsperioden lå på ca. 2.000 Nm³/h for hurtigt at falde til ca. 1.000 Nm³/h i forbindelse med at dampinjektionen blev startet. Faldet skyldes sandsynligvis en blanding af temperaturstigning samt pumpning af vand via vakuumsystemet. Flowet faldt herefter yderligere for at stabilisere sig omkring 500 Nm³/h. Den observerede masseflowrate starter ud



ved den indledende vakuumelekstraktion på ca. 300 g/dg for at stige til ca. 1500

g/dg i dampbehandlingen af det værst forurenede område. Efter stop af dampinjektionen falder ydelsen til ca. 100 g/dg i den efterfølgende polering.

Den samlede mængde PCE der blev opsamlet via behandlingsanlægget er vist i figur 4.23 og udgør ca. 57 kg. Det ses at filteret ved driften i område I+II var væsentligt bedre end i område III. Årsagen er en kombination af skift af selve kullene samt en mere hensigtsmæssig styring af køling og genopvarmning af luften med deraf lavere relativt vandindhold til følge. Det ses at der var en effektivitet på ca. 98 %. Den samlede opsugede mængde af PCE var knap 60 kg, hertil kom ca. 8 kg TCE.

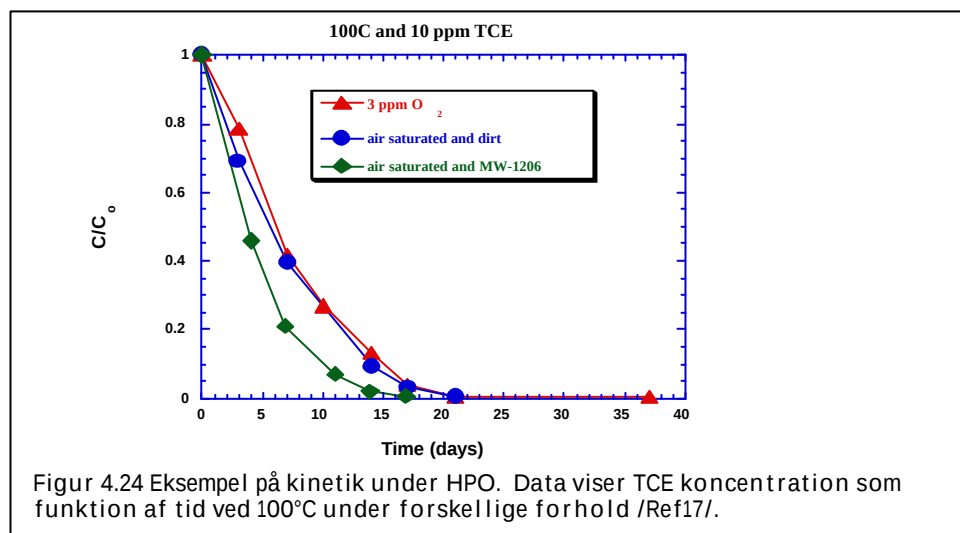
Udover de klorerede opløsningsmidler i område I+II blev der konstateret olieprodukter i det oppumpede medie. Cyklonen blev på et tidspunkt bundsuget. I den forbindelse blev det vurderet at der var 500-1.000 kg tungt olieprodukt i cyklonen.

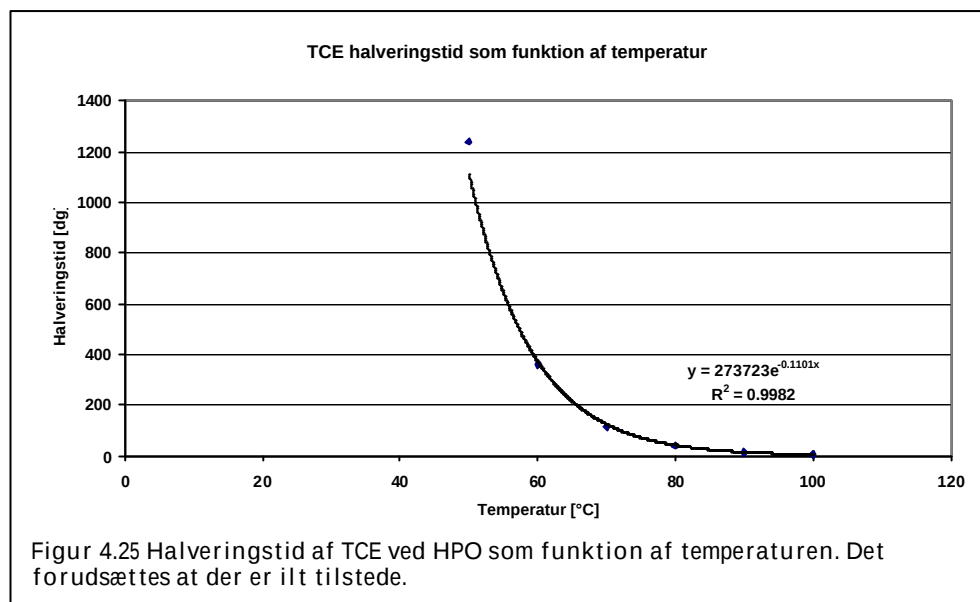
Det samlede luftflow der blev suget igennem område I+II var ca. 1,7 mill. Nm³ svarende til ca. 240 porevolumener. Dette er væsentligt lavere end i område III, hvilket skyldes primært den væsentligt kortere opvarmningsperiode.

Den fjernede mængde klorerede opløsningsmidler i det oppumpede og ekstraherede vand er estimeret til maks. 1 kg jf. argumentationen i kapitel 4.3.1.

4.4 HPO - forbrænding af organisk stof i jorden

HPO er forkortelsen for Hydrous Pyrolysis Oxidation, eller våd forbrænding på dansk. Fænomenet er observeret både i laboratoriet og ved en række af de udførte oprensninger hvor dampstripping har været anvendt som oprensningsmetode.





Forbrænding af en lang række af organiske stoffer finder sted i vandfasen hvis der er tilstrækkelig høj temperatur og ilt tilstede. Som eksempel på kinetikken ved HPO er vist data fra et nedbrydningsforsøg med TCE i figur 4.24. Det ses, at der er tale om en første ordens reaktion med en halveringstid på 5-10 dg. under de aktuelle konditioner. Processen er meget temperatur afhængig. I /17/ er der rapporteret en række kinetikforsøg. Data er anvendt til fremstilling af figur 4.25, der viser halveringstiden for TCE ved forskellige temperaturer under forudsætning af tilstedeværelsen af ilt i et støkiometrisk forhold. Det ses at temperaturen skal op på minimum 70-80° C før processen rigtig tager fart. /18/ angiver at hastigheder for HPO er af samme størrelsesorden for PCE og TCA som for TCE, der tages derfor udgang i disse for vurdering af størrelsen af HPO i det konkrete tilfælde.

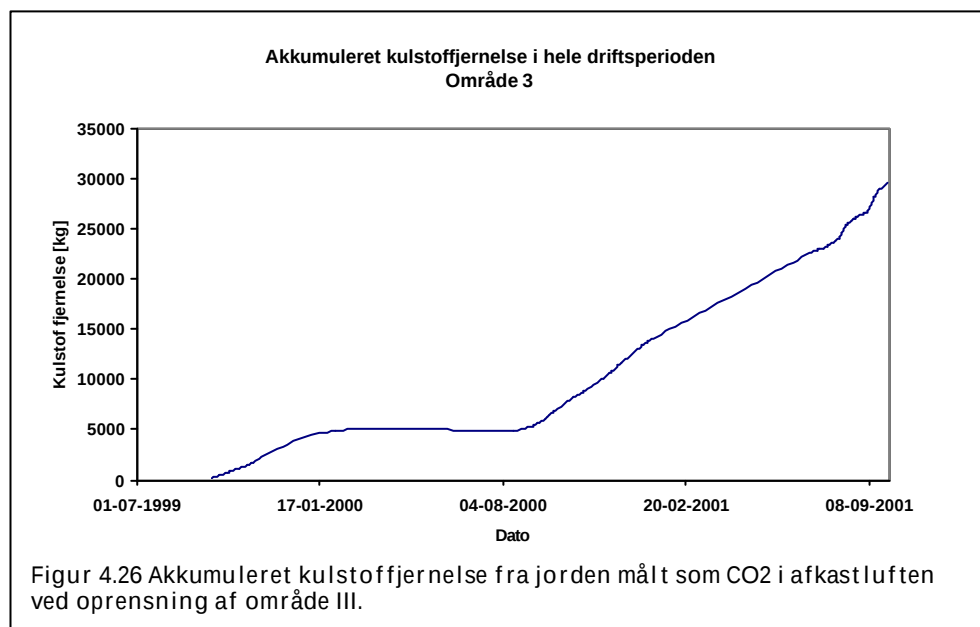
Baseret på metoderne angivet i /1/ kan det beregnes at Henrys lov konstanten for PCE i intervallet 80-100 ° C ligger i intervallet 7-12. Til en beregning af potentiel PCE omsætning antages en værdi på 10 af Henrys lov konstanten som et gennemsnit. Tilsvarende regnes med en halveringstid i den varme zone på 20 dg svarende til en gennemsnitstemperatur på 80-90°C i de perioder, hvor det er relevant at medtage HPO i overvejelserne over fjernelsen.

Gennemsnitskoncentrationen af PCE i den opsugede luft har ligget på 40-50 mg/m³ i den kondenserede luft. Med en Henrys Lov konstant på 10 svarer dette til en korresponderende porevandskoncentration på ca. 5 µg/l, hvilket er i rimelig overensstemmelse med de koncentrationer, der er konstateret i det oppumpede vand. Iltindholdet i vandet kendes ikke, men det forventes, at det er tilstrækkeligt til at det ikke vil være begrænsende for omsætningen, når det tages i betragtning at der er injiceret luft igennem oprensingsforløbet.

Med de opstillede forudsætninger kan det beregnes, at der vil være en fjernelse på ca. 0,2 µg/l dg i vandfasen. Baseret på de udførte temperaturmålinger vurderes det at være en rimelig antagelse, at der har været opvarmet i størrelsen 5.000 m² til tilstrækkelige temperaturer i gennemsnit i de to områder i en tykkelse på ca. 6 m, svarende til ca. 30.000 m³ jord. Jorden har som gennemsnit været relativt tør, til vurderingen anvendes en gennemsnitlig mætning på 0,05 svarende til at vandvolumenet der er opvarmet har været ca. 1.500 m³ i gennemsnit. I område III har der været anvendt damp i ca. et år (365 dage) og i område I+II i ca. 75 dg. På baggrund af dette kan det konservativt estimeres, at den samlede fjernelse i område III har været ca. 0,1 kg og 0,02 kg, altså flere størrelsesordener under det oppumpede masse, se kapitel 4.3. Selv med mindre konservative parametre ($T_{1/2}=5$ dg, $C_0=10$ µg/l, 3000 m³ vand) svarer fjernelsen kun til 1,5 kg i område III.

Selvom PCE og TCE kun i mindre omfang kan forventes fjernet ved HPO er det dog en betydelig proces for de mere vandopløselige dele af det organiske stof i jorden. Dette illustreres af figur 4.26, der viser den akkumulerede kulstoffjernelse i område III, baseret på CO₂ målinger på den opsugede luft. Det bemærkes, at der er tale om betydelige mængder, i alt er der oppumpet ca. 30 tons kulstof. I de vandanalyser der er foretaget er der konstateret et indhold af HCO₃ på ca. 400 mg/l både i det primære og sekundære vand. Kulstofmængden i det oppumpede vand (120 m³/dg) udgør ved denne koncentration kun ca. 10 % af den samlede kulstofmasse, hvis det forudsættes at alt CO₂ strippes fra vandfasen p.g.a de høje temperaturer og lave tryk. Den fjernede kulstofmængde svarer til en fjernelse på ca. 400 mg C/kg jord, hvilket for underjorde er meget, idet kulstofindholdet typisk ligger på 100-1.000 mg/kg, hvorimod det for overjorde er mere typisk med værdier i intervallet 5.000-30.000 mg/kg jord.

Det er ikke yderligere belyst hvorfra det oppumpede kulstof stammer.



4.5 Restkoncentrationer i sekundært grundvand

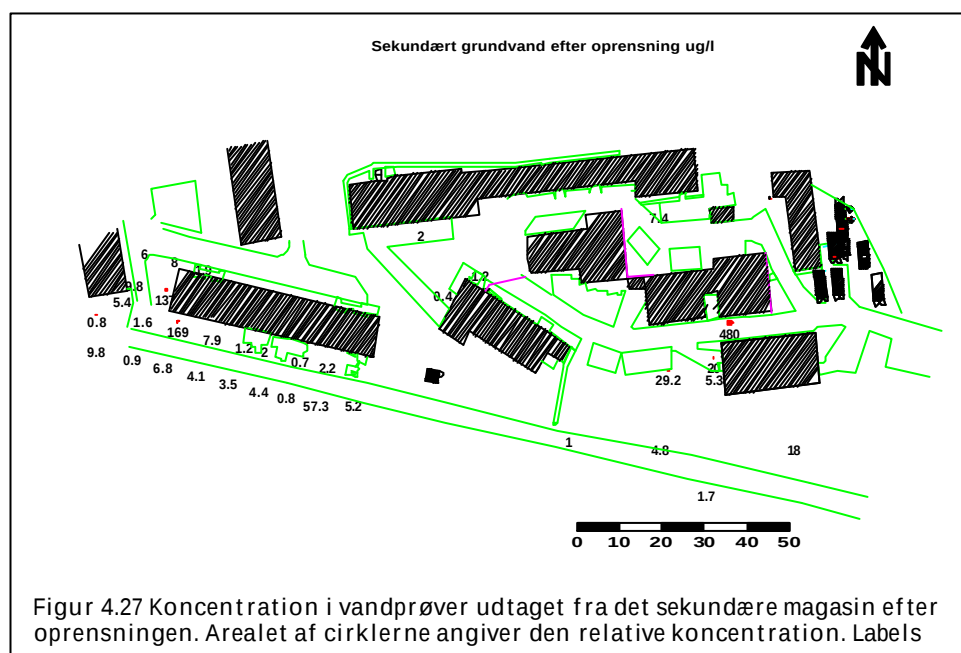
Efter oprensningen og afkøling til ca. 30-40 °C (6 mdr. hvile) er der udtaget en række jord, vand- og luftprøver fra de to oprensningsområder. I figur 4.27 er resultaterne af samtlige vandprøver i de to områder vist. Visuelt kan figur 4.27 sammenlignes med figur 1.12. Som det ses af figurerne er der i langt de fleste af områderne sket en kraftig reduktion af koncentrationerne.

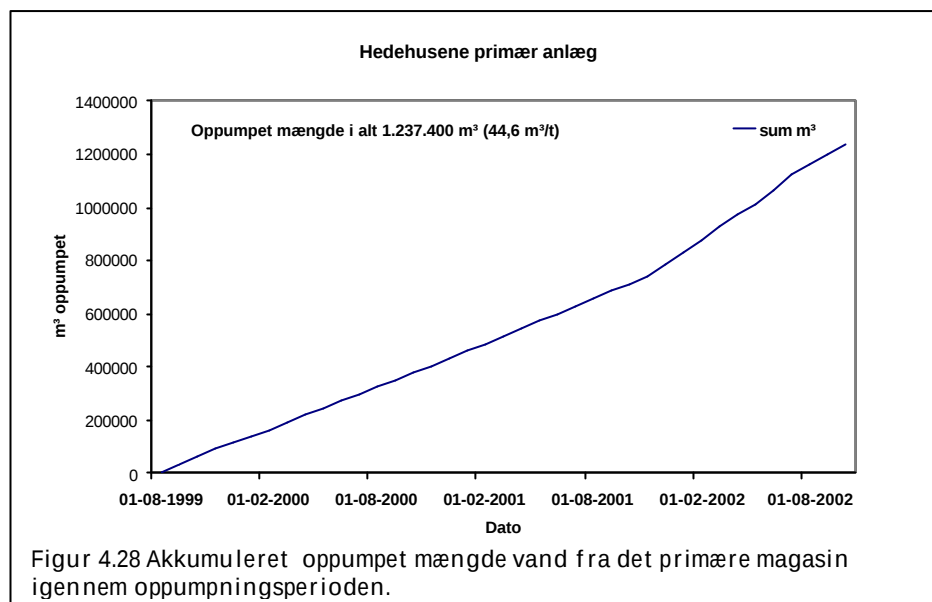
Udgangskoncentrationen lå i intervallet op til 3.900 µg PCE/l med et gennemsnit på ca. 800 µg PCE/l. Efter oprensningen er gennemsnittet ca. 30 µg PCE/l med maksimale koncentrationer på knap 500 µg PCE/l. De højeste koncentrationer er konstateret i de to hot-spot, hvor der indledningsvis ikke var udtaget vandprøver. De højeste startværdier repræsenterer derfor ikke de maksimale koncentrationer der var indledningsvis, men er sandsynligvis et udtryk for den mere generelle belastning.

Succeskriteriet var at nedbringe koncentrationen i det sekundære grundvand således at det primære magasin ikke påvirkes over grundvandskvalitetskriteriet opgivet af Miljøstyrelsen. Jf. afsnit 1.1 svarer dette til et indhold på maksimalt 40 µg/l. Dette er kun delvis lykkedes til trods for, at den gennemsnitlige koncentrationsreduktion er større end 96 %. Koncentrationsdataene er behandlet statistisk, hvor det viser sig at disse med rimelighed kan udtrykkes ved en logaritmisk normalfordeling. Ud fra denne kan det bestemmes at ca. 15 % af slutkoncentrationerne ligger under 1 µg PCE/l, at 90 % ligger under 40 µg PCE/l og 97 % under 100 µg PCE/l, eller at ca. 90 % af arealet opfylder kriteriet efter oprensningen. Til sammenligning viser den samme databehandling af startdata, at kun 18 % af arealet opfyldte kriteriet indledningsvis og at mere end 50 % af arealet havde koncentrationer over 100 µg PCE/l, hvor det efter oprensningen kun er 3 %.

4.6 Direkte påvirkning af primært grundvand

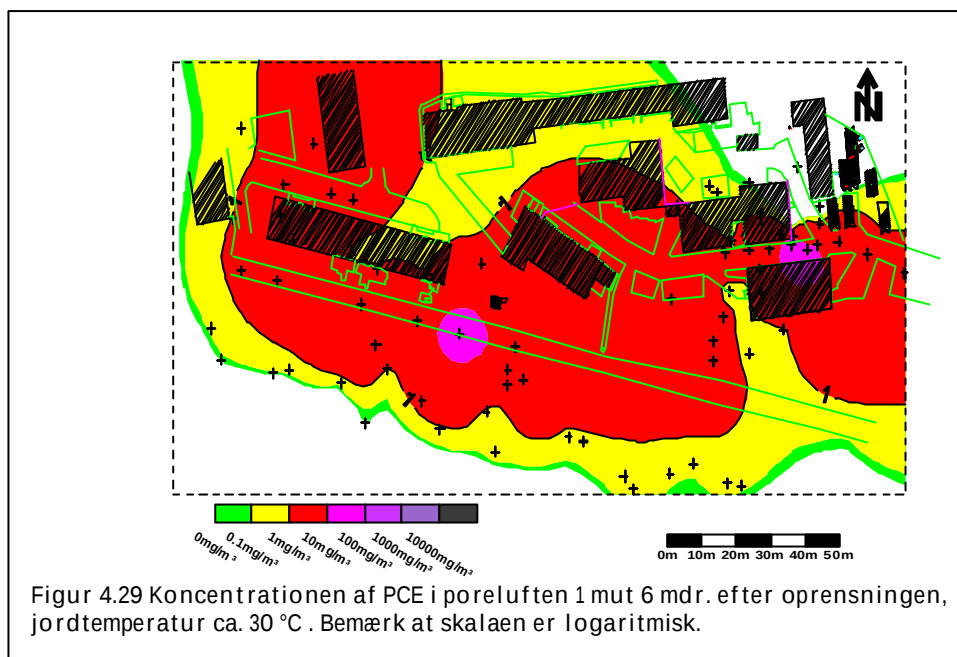
Jf. den indledende dimensionering blev det planlagt at oppumpe ca. 10 m³/h fra hver af de 6 borer placeret i det primære magasin, en strategi der stort set er blevet efterlevet igennem projektet. Kun i forbindelse med afsyring og tilstopning af et tilledningsrør har ydelsen i perioder været mindre. Vandet er blevet anvendt til køling i anlægget.





I figur 4.28 er den akkumulerede oppumpede vandmængde vist som funktion af tiden. Den gennemsnitlige ydelse har igennem hele driftsperioden været 45 m³/h. Der er udtaget 3 sæt analyser af vandet gennem forløbet. Disse viser, at der initielt inden oppumpningen startede var en gennemsnitskoncentration på ca. 30 µg/l opløsningsmidler (5-117 µg/l), som indtil den første analyse faldt til ca. 8 µg/l opløsningsmidler (1-17 µg/l), hvoraf PCE udgør ca. 70 %. Der er således fjernet ca. 10 kg opløsningsmidler gennem oppumpningen totalt.

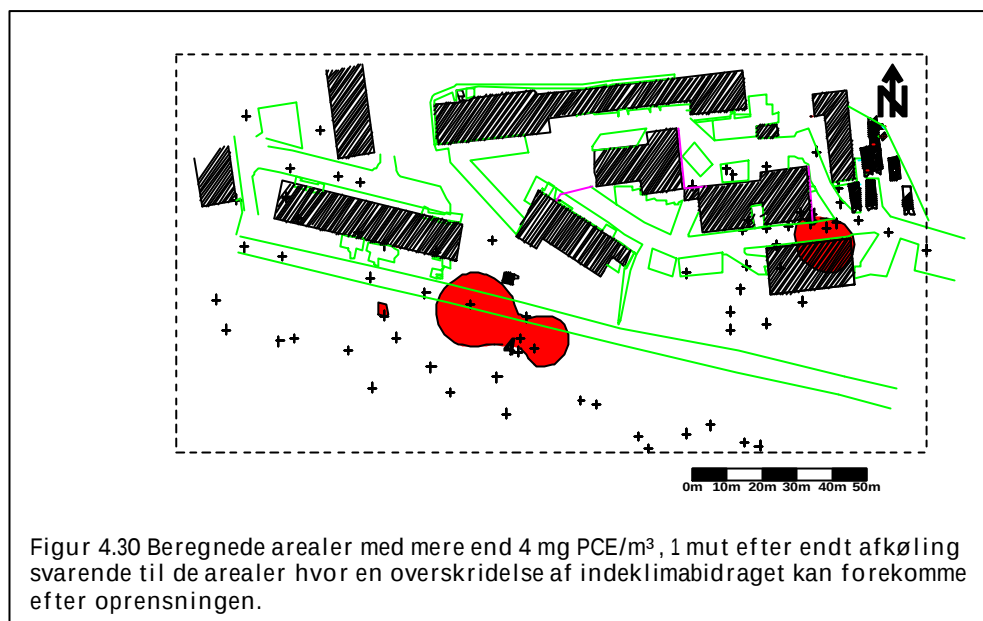
Der er ikke noget i de udførte analyser der indikerer hverken en stigning eller et fald forårsaget af de udførte aktiviteter i den overliggende jord, hvilket heller ikke var forventet. En egentlig effekt på det primære grundvand forventes først at slå igennem efter en længere periode med pumpning, idet der stadig er mindre mængder af forurening efterladt i moræneleren mellem den oprensede zone og det primære magasin.



4.7 Restkoncentrationer i poreluft

Der er udtaget et omfattende antal poreluftprøver til dokumentation af restforureningen i de øverste jordlag med henblik på at kunne vurdere en risiko overfor de bygninger der eksisterer på arealerne, samt vurdere effekten af den samlede oprensning. Det opstillede succeskriterium i forhold til en acceptabel påvirkning (mindre end 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i indeklimabidrag) svarer til, at der må efterlades en koncentration på 3-4 mg/m^3 én meter under terræn, hvis der foretages en beregning af indeklimabidraget ud fra JAGGs standard parametre.

Poreluftprøverne er udtaget ca. 1 m over ca. 6 mdr. stilstand i de to områder og kontureret. I figur 4.29 er kontureringen af data vist.



Koncentrationen forud for oprensningen er vist på figur 1.13 til sammenligning. Udgangskoncentrationen lå i intervallet 0-7.500 mg PCE/m³ med et gennemsnit på ca. 100 mg/m³. Maksimalkoncentrationen i område III er dårligt bestemt pga. prøveudtagningen stort set først kom til at fungere efter de første 4 ugers opslugning af dampe pga. stort vandindhold mv. Det forventes således, at den angivne gennemsnitsstartværdi er noget underestimeret.

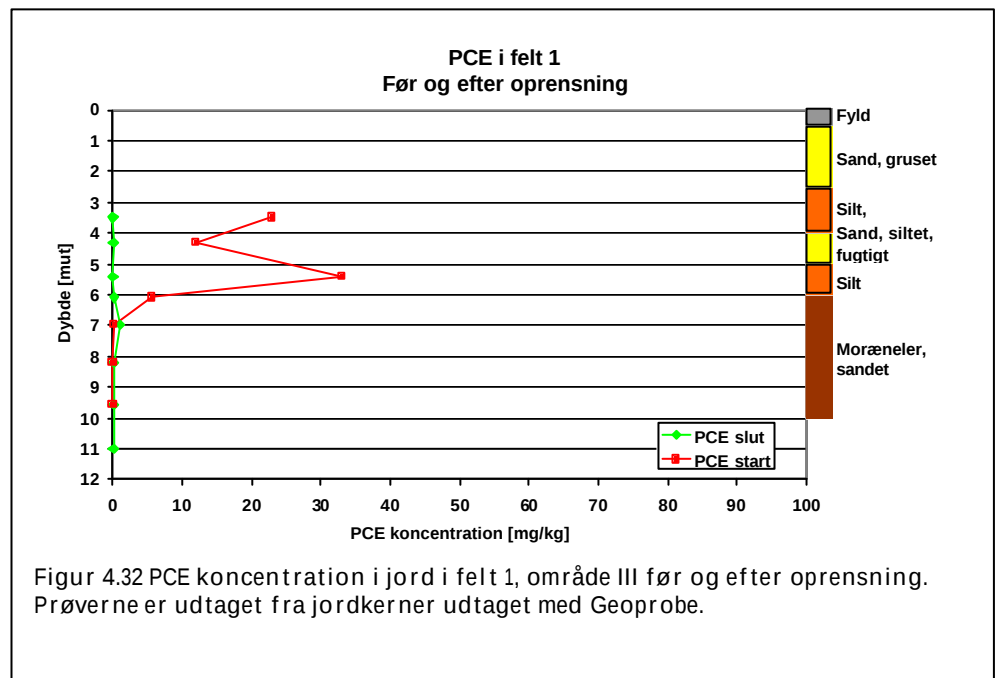
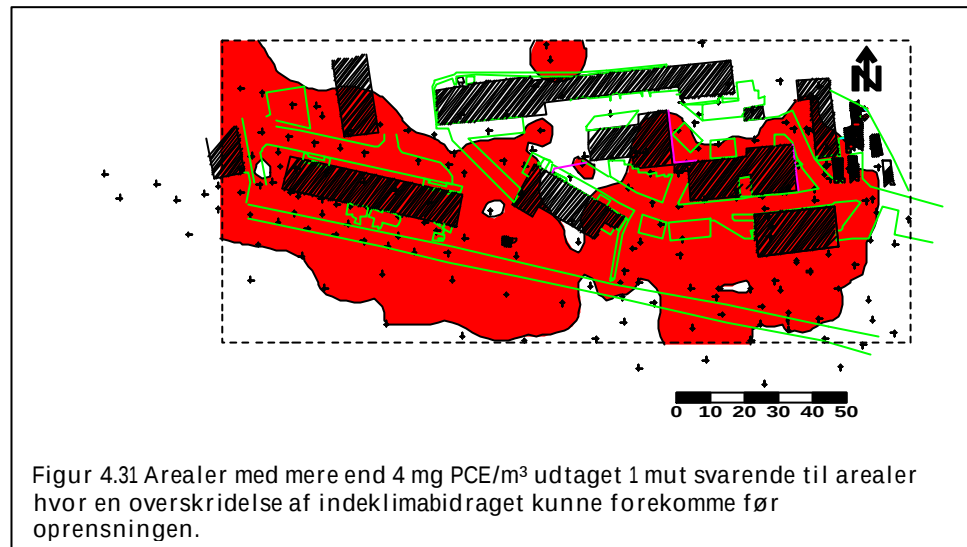
Slutkoncentrationen ligger i intervallet 0-22 mg PCE/m³ med et gennemsnit på ca. 3 mg/m³. Dette svarer til en oprensningseffektivitet på ca. 95 % målt på poreluften alene. Effektiviteten er sandsynligvis højere end de beregnede 95 %, idet temperaturerne var svagt forhøjede ved slutprøvetagningen, hvilket giver højere luftkoncentrationer, og udgangskoncentrationerne i område III var væsentligt større end det konturerede billede viser i figur 1.13 pga. tidspunktet for prøvetagningen (se afsnit 1.4.2).

Temperaturen var ved prøvetagningen ca. 30 °C i gennemsnit i prøverne. På denne baggrund vurderes det at koncentrationen i gasfasen vil være yderligere faldende frem til den normale jordtemperatur på ca. 10 °C opnås. Den endelige koncentration når området er slutafkølet forventes derfor at ligge i intervallet 0-10 mg/m³, baseret på at Henrys lov konstanten ændres. En fremskrivning til dette resultat er vist i figur 4.30 hvor en grænse på 4 mg/m³ er vist til illustration af hvor indeklimabidraget muligvis vil være overskredet efter oprensningen. Til sammenligning er arealet hvor de 4 mg/m³ var overskredet i startsituationen vist på figur 4.31. Det ses at arealet er meget kraftigt reduceret som følge af oprensningen.

Det bemærkes i øvrigt, at der ikke er konstateret over 0,9 mg PCE/m³ umiddelbart under gulvene i bygninger der anvendes til beboelse efter 6 mdr. stilstand, svarende til at indeklimabidraget beregnet efter JAGG allerede inden afkølingen ikke overstiger kvalitetskriteriet.

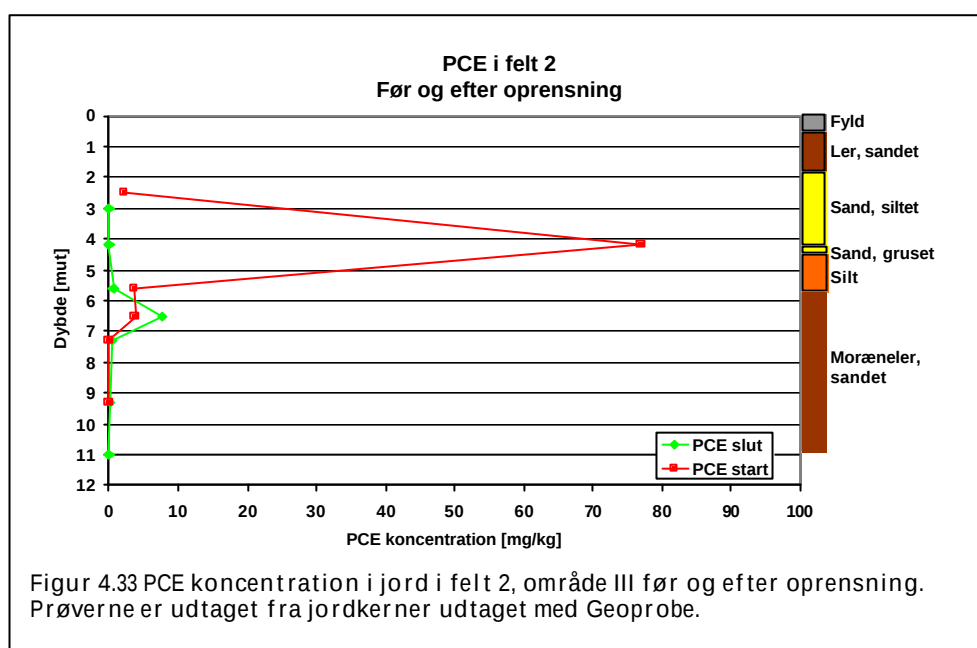
4.8 Restkoncentrationer i jord

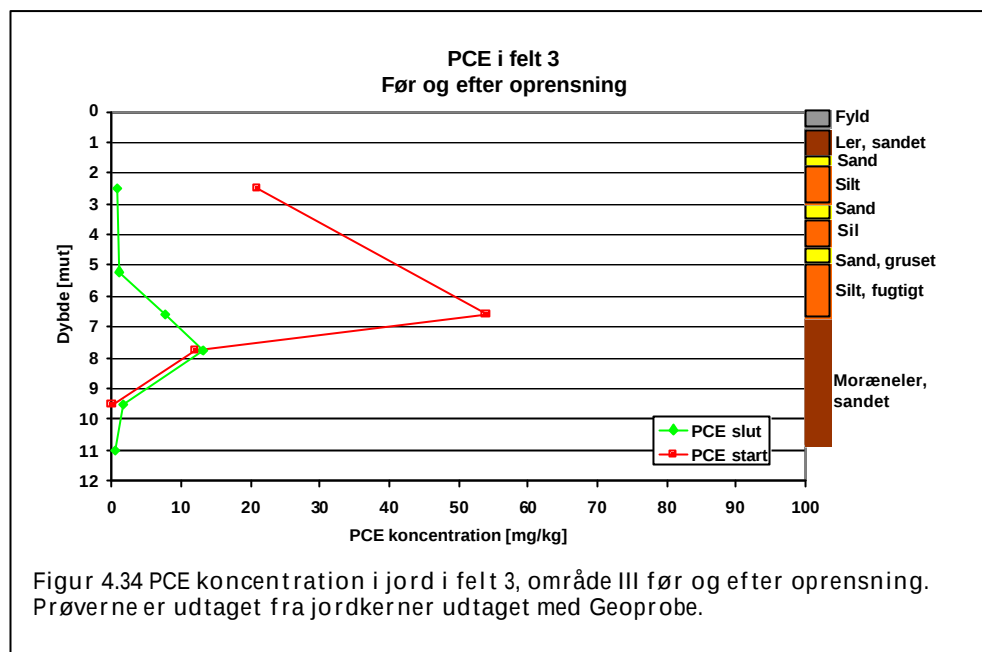
Der blev efter oprensningens i område III udført 4 Geoprobsonderinger, med udtag af kerneprøver i samme dybder som før oprensningen, se kapitel 1.4.2. Sonderingerne blev tilstræbt placeret så tæt som praktisk muligt på de sonderinger der blev udført inden oprensningen. Herudover blev der i forbindelse med vurdering af restforureningen i område I udført 3 Geoprobsonderinger i hot-spot af område I til dokumentation af restforureningen i dette område.



I figurerne 4.32-4.35 er vist de fundne koncentrationer før og efter i de 4 felter i område III. Det ses at der er relativt stor forskel på hvor effektivt de 4 jordsøjler er blevet oprenset, dog ses overalt en reduktion i de mere permeable dele. Derimod ses ingen eller meget lille effekt af oprensningen i den underliggende moræneler, idet koncentrationen i prøverne taget i denne del af formationen stort set har været konstant igennem oprensningen.

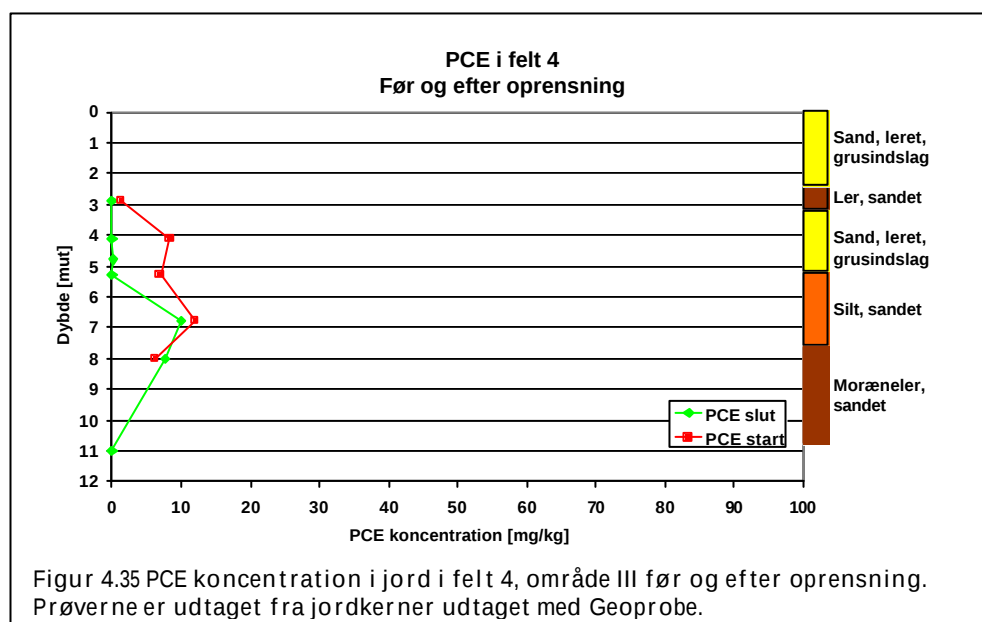
Oprensningseffektiviteten i de fire felter har været fra 63-98 % med felt 1 placeret i hot-spottet som det bedst oprensede og felt 4 beliggende lige i kanten af hot-spottet som det mindst oprensede. Hvis der udelukkende fokuseres på de øvre del fra 0-6 m dybde, svarende til de mest permeable dele af sedimentet, er der en effektivitet på 98 %, hvorimod effektiviteten i de underliggende sedimenter har været meget beskeden.

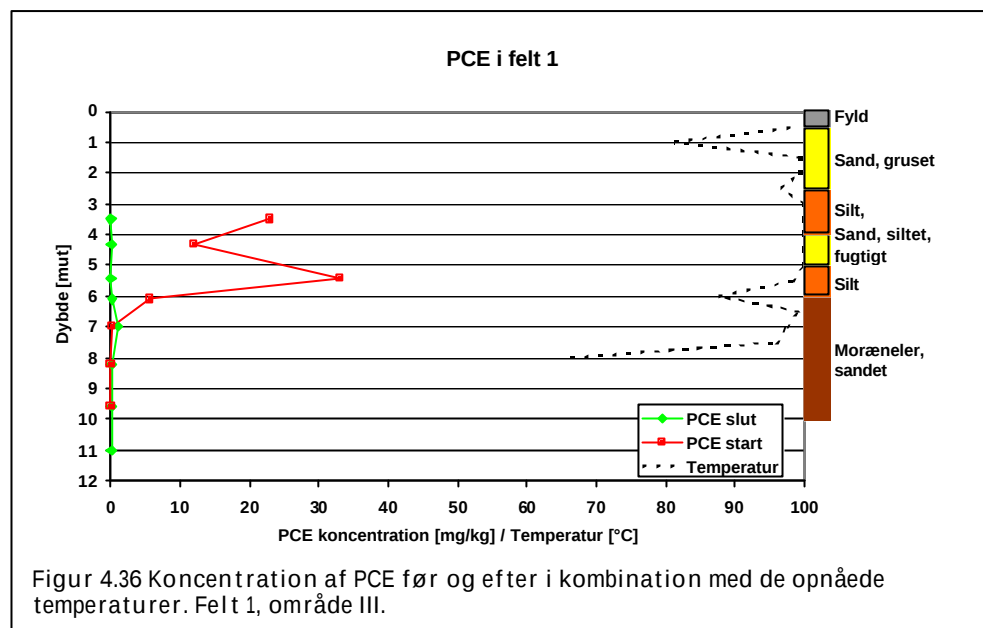




Fjernelsen svarer til 20-80 mg PCE/kg jord med mest i hot-spot området.

I lighed med område III blev der udført 3 Geoprobeforundersøgelser i område I med kerneprøveudtagning efter oprensningen. Der er ikke her udtaget startprøver. Observationerne i område I er de samme som i område III, idet den øverste permeable del af jordsøjlen er stort set fri for opløsningsmidler, hvorimod der i den underliggende moræneler er efterladt mindre koncentrationer, i område I op til ca. 4 mg/kg. Profilerne er vedlagt som bilag D. I område III var de efterladte restkoncentrationer op til ca. 10 mg PCE/kg. Ved anvendelse af fugacitetsmodellen i JAGG kan det beregnes, at dette giver en porevandskoncentration i omegnen af 10 mg/l i ler under mættede forhold. De fundne koncentrationer i det sekundære magasin har været op til ca. 0,5 mg/l, hvilket svarer til ca. 0,2 mg/kg i sand under mættede forhold. Dette svarer meget godt overens med de koncentrationer, der er konstateret i de dele af jorden der udgør det sekundære magasin.



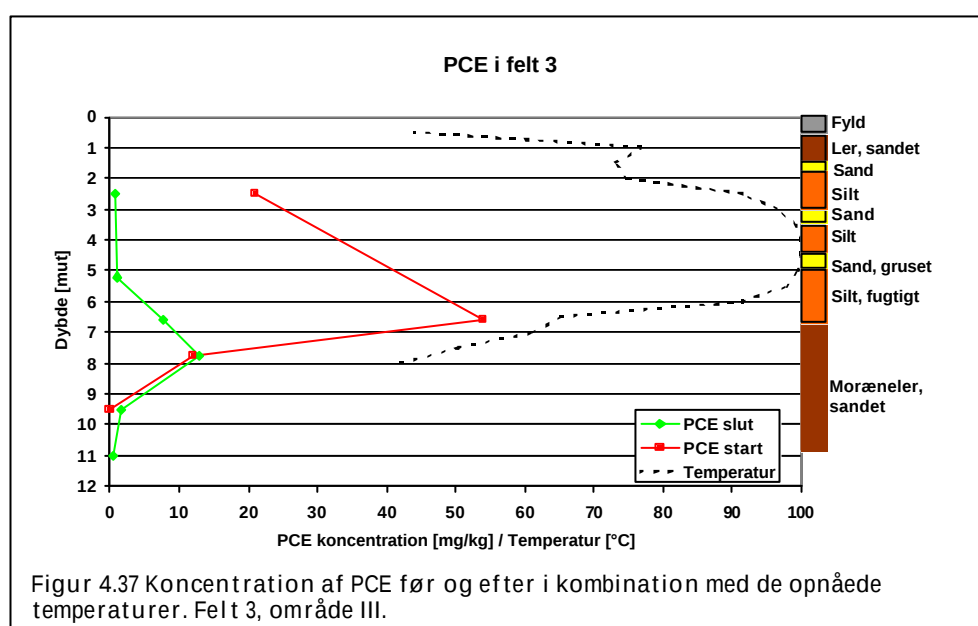


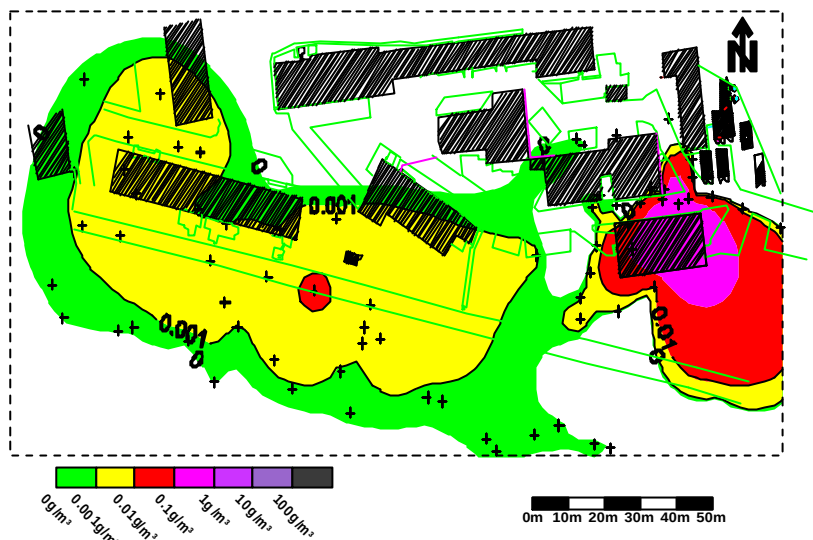
Det var fra starten forventet at det ville være muligt at rense op ca. 1 meter ned i moræneleren. Dette har stort set ikke været tilfældet i hverken område I eller III, kun i enkelte områder er dette opnået.

4.9 Samlet vurdering af restforurening i forhold til varmeudbredelse

I figur 4.32-4.35 er forureningen i jorden vist før og efter oprensningen. Effekten af en dampstripping er meget styret af hvor der har været opnået kogepunktstemperaturer. I figur 4.36 og 4.37 er de samme data vist for felt 1 og felt 3 med temperaturprofilen fra en meget nærliggende teknologiboring vist.

I felt 1 (figur 4.36) ses det at vi rent faktisk har været i stand til at opvarme den øverste del af moræneleren op til kogepunktstemperatur, sandsynlig pga. at permeabiliteten havde en tilstrækkelig størrelse til at dampen har haft

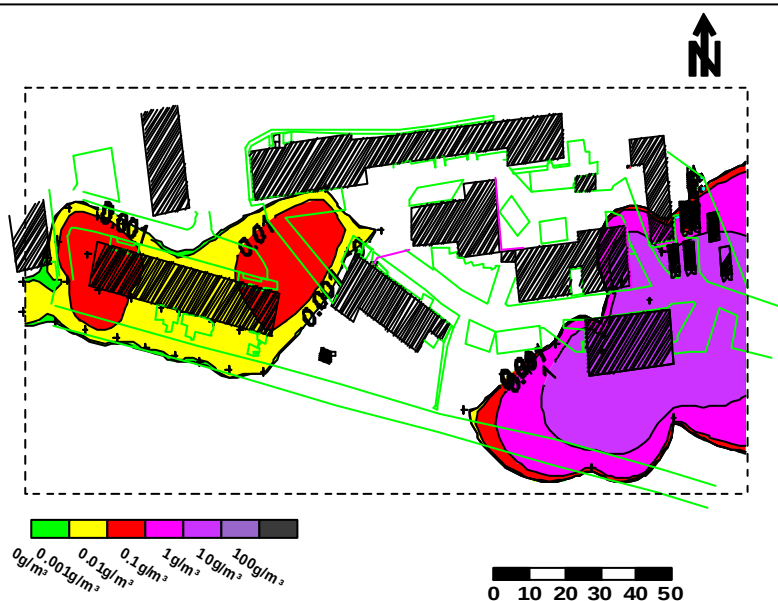




Figur 4.38 Konturering af det samlede indhold af PCE i den umættede zone efter oprensningen. Mængden er udtrykt som g PCE/m³ jordmatrice.

mulighed for at brede sig nedadtil. Samtidig er felt 1 placeret geografisk således, at der her har været den længste periode med dampinjektion, hvilket gør at energitransporten ved varmeledning (der er en relativt langsom proces) også har haft mulighed for at foregå over så lang en periode at den øverste del er blevet opvarmet.

Som kontrast viser figur 4.37 et profil hvor varmen ikke er nået ned i den øverste del af leren. Dampens udbredelse nedadtil er blevet standset af silten, enten pga. en lav permeabilitet eller pga. tilstrømning af (koldt) vand udefra. Ved oprensningen af område III er der i gennemsnit oppumpet ca. 2,7 m³ vand/h, hvor der i den samme periode er injiceret ca. 1,1 ton vand/h som damp. Generelt skal man have hydraulisk kontrol, hvilket der også har været



Figur 4.39 Konturering af det samlede indhold af PCE i den umættede zone efter oprensning. Mængden er udtrykt som g PCE/m³ jordmatrice.

ved den konkrete oprensning. Ulempen er blot at en del af tilstrømningen ikke kan holdes ude fra det opvarmede område og dermed kan ligge sig som en ”dyne” over leroverfladen og derved forhindre opvarmningen.

Det må derfor konkluderes, at der skal en detaljeret temperaturmonitoring i vertikalen til for at sikre at tilstrækkelige temperaturer er opnået med henblik på at kunne reducere forureningen, ligesom en større grad af kontrol med vandtilstrømningen er nødvendig hvis det skal være muligt at oprense med dampinjektion ovenfra og ned.

4.10 Massebalance

En egentlig massebalance på klorerede opløsningsmidler på oprensningen er behæftet med usikkerhed. Alligevel har vi forsøgt at gøre det for at give et estimat og fordeling af den samlede indsats.

I lighed med startsituationen har vi ved hjælp af fugacitetssomregninger integreret luft-, vand- og jordkoncentrationer til en samlet masse af klorerede opløsningsmidler i de øverste 8 m af jordsøjlen efter oprensningen. Forudsætningerne er de samme som der er antaget i kapitel 1.4.2. I figur 4.38 er det samlede indhold efter oprensningen i den umættede zone vist på figuren, og i figur 4.39 indholdet i den mættede zone. Ved numerisk integration er den samlede masse herefter bestemt som et skøn over de efterladte mængder af opløsningsmidler.

I tabel 4.1 har vi vist massen af klorerede opløsningsmidler før og efter i hhv. den umættede zone og den mættede zone samt estimatet af den oppumpede mængde af chlorerede opløsningsmidler fra hhv. den umættede og den mættede zone.

Tabel 4.1. Massebalance for oprensningen af Hedehusene, baseret på målte data.

	Umættet zone	Mættet zone
Før i jorden, kg PCE	37	273
Efter i jorden, kg PCE	1	19
Difference, kg PCE	36	254
Reduktion i %	97 %	93 %
Total difference start til slut, kg PCE	290	
Oppumpet luft, kg PCE	357	
Oppumpet vand, kg PCE	2	
Totalt oppumpet, fra oprensningsområde, kg PCE	359	
In-situ forbrændt i jorden (HPO)	< 1	
Oppumpet fra primært magasin, kg PCE	10	

Det ses at differencen i massen i mættet og umættet zone fra start til slut er målt til 290 kg PCE. Den oppumpede/ekstraherede mængde der er ledt til behandlingsanlægget on site er estimeret til ca. 360 kg. De to tal er stort set identiske set med de usikkerheder, der ligger i både estimation og måleteknikker, specielt set i lyset af, at startmængden i den umættede zone sandsynligvis var kraftigt underestimeret pga., at start prøvetagningen blev udført efter 2-4 ugers vakuumventilation.

5 Økonomi

I 1994 blev der udarbejdet en historisk redegørelse der i 1996 blev fulgt op af en registreringsundersøgelse. I 1998 blev der gennemført en omfattende undersøgelse og udarbejdet et skitseprojekt for oprensning på Industrivej og Teglstenen.

En tidsplan for hele projektet, fra den historiske redegørelse til nærværende rapport er angivet i bilag A.

Københavns Amts omkostninger til undersøgelser inden igangsætning af planlægningen til dampoprensning beløber sig til ca. kr. 840.000,-.

I tabel 5.1 er angivet omkostningerne til dampoprensningen fra den første test til der er retableret og afrapporteret.

Tabel 5.1 Den samlede økonomi for oprensningen af Industrivej og Teglstenen, fordelt rådgivning og entreprenør (herunder forbrugsomkostninger). Alle beløb i kr.

Hovedaktivitet	Ydelse	Rådgiver	Entreprenør
Dimensionering	Vakuumtest, prøvepumpning	75.000	70.000
	Projektredegørelse og projektering	95.000	
Etablering	Anlæg	1.570.000	13.570.000
	Anlægsombygning	260.000	4.920.000
Drift	Driftsomkostninger	1.570.000	3.900.000
	Forbrug af gas		2.804.000
	Forbrug af olie		570.000
	Forbrug af El		900.000
	Forbrug af Blødgjort vand		260.000
	Forbrug af kul		90.000
Afslutning	Dokumentation og rapport	510.000	60.000
	Retablering i jord		3.300.000
Afledte omkostninger	Retablering af bygninger		500.000
	Retablering af haver	3.000	140.000
Sum		4.083.000	31.080.000

Udover omkostningerne vist i tabel 5.1 skal Københavns Amt afholde udgifter til driften af det primære anlæg til oppumpning af grundvand fra kalkmagasinet i 10 – 15 år. Udgiften hertil vurderes at være kr. 250.000,- årligt.

Af de i tabel 5.1 viste omkostninger har Miljøstyrelsen dækket kr. 2,3 mill. kr. til etablering af monitoringsboringer, supplerende monitorering og nærværende rapport.

De i tabel 5.1 viste omkostninger er alene de udgifter der er påført Københavns Amt og Miljøstyrelsen. Københavns Amts interne omkostninger beløber sig til et timeforbrug på ca. 3.000 timer.

Inden oprensning af område 1 og 2 blev erfaringerne fra område 3 mht. driftsudgifter vurderet. Ved at benytte endnu en dampproduktionsenhed således at driften kunne forkortes fra 6 – 7 måneder til 3,5 måneder kunne der

spares mere end 1 mill. kr. hovedsaglig fordi den tid der foregår varmetab bliver formindsket.

Ved dampoprensningprojektet i Hedehusene er der behandlet ca. 90.000 tons jord. Den gennemsnitlige pris pr. tons jord har været mindre end kr. 400,- pr tons.

6 Konklusioner

Der blev over en effektiv driftsperiode på ca. 1½ år oprenset et område i Industribyen og Teglstenen i Hedehusene. Det samlede jordvolumen der blev behandlet var ca. 90.000 tons. Hovedforureningskomponenten var PCE (tetrachlorethylen). Oprensningen har været en succes, idet der er opnået store oprensningseffektiviteter, hhv. 97 % eller mere i umættet zone og 93 % i den mættede zone (sekundært magasin). Den efterladte restforurening har i størstedelen af området kunne overholde de opstillede succeskriterier.

De to helt overordnede succeskriterier var at reducere mængden af klorerede opløsningsmidler i de glacielle aflejringer på arealet til et niveau der gjorde, at der ikke ville være overskridelser af henholdsvis grundvandskvalitetskriteriet for PCE i det primære magasin efter initialfortynding i magasinet, eller indeklimabidraget på i bygninger på arealerne, der anvendes til beboelse. Kriterierne skulle være opfyldt for 90 % af arealet eller mere.

På baggrund af beregninger udført med dels de målte lokale parametre på arealet, og dels standardparametrene i Miljøstyrelsens risikovurderingsværktøj JAGG er det vurderet, at kriterierne for belastningen af det primære grundvand kan overholdes ved en maksimal koncentration på 40 µg PCE/l i det sekundære grundvand. Ved samme type beregninger er det vurderet at det maksimale indhold i poreluften 1 m.u.t må være ca. 4 mg PCE/m³, og direkte under husene 1 mg PCE/m³ for at indeklimabidraget ikke overstiger kriteriet.

På baggrund af statistisk bearbejdning af de indsamlede data fra vand- og poreluftprøver udtaget efter endt oprensning og delvis afkøling er det beregnet, at 90 % af arealet overholder kravene til indhold i grundvandet, og at 96 % af arealet overholdt kravet til indeklimaet. Der er ingen huse der i dag anvendes til bolig, der har et indhold under gulv der kan give anledning til overskridelser af indeklimakriteriet.

Udover opfyldelsen af de primære succeskriterier var der et sekundært kriterium, idet vi håbede, at metoden ville være effektiv ca. 1 m ned i den underliggende moræneler. Det må konkluderes, at en oprensningen ned i leren generelt ikke har været tilstrækkelig, og kun på mindre arealer er lykkedes. Dette skyldes primært, at tilstrømmende vand har forhindret en effektiv opvarmning af den øvre del af leren, og derved forhindret fjernelsen af PCE.

Der er i løbet af oprensningen gjort en lang række erfaringer af teknisk karakter, omkring komponentvalg til behandlingsanlæg, materialevalg til borerer etc. De vigtigste konklusioner på dette område er vist på listet herunder:

- Filtersætning og boringsudbygninger skal udføres meget omhyggeligt mht. filterkastningen, da materialeflugt ind i borerne giver store problemer, både i boringen, rørføring og behandlingsanlæg. Boringsafslutninger bør udføres så man kan komme ned i filterrøret, i forbindelse med eventuelle bundsugninger og udsyringer.

- Bentonit (både opslæmmet og pellets) er uegnet som afpropningsmateriale over filterstrækningerne for dampinjektionsboringer og vakuumelekstraktionsboringer, da det sprækker, kollapser og på den måde gør boringen uanvendelig. Brug i stedet en cementstabiliseret bentonitblanding, eksempelvis Storebæltsblanding (se opskrift afsnit 3.2.1)
- Væskeringspumper har den nødvendige kapacitet og kan levere tilstrækkeligt vakuum til at indgå i et dampstrippingssystem.
- Det er essentielt at have vandudskilning og køling før luften fra ekstraktionsboringerne ledes til væskeringspumpen. Hvis ikke vandudskilning sker før pumpen, er der stor risiko for at pumpen kalker til. For høje temperaturer i luften ved indgangen til pumpen reducerer kapaciteten.
- Hvis der anvendes blødgjort vand til recirkulation over væskeringspumper kan der opstå biologiske belægninger i rør, pumper mv. der forøger strømforbruget for roterende dele væsentligt. Problemet kan løses ved med jævne mellemrum at anvende et biocid i recirkulationskredsen.
- Køling af luft der indeholder olietåger giver potentielt problemer med reduktion af køleevnen. Oliefilm på køleribberne i køleren reducerer energioverførslen dramatisk. Under oprensningen opstod dette problem i forbindelse med dampfrontens passage gennem en tung fyringsolie forurening. Forsøg med forskellige rensmidler på kølefladerne havde kun meget begrænset effekt. Det er ikke konkluderet hvilke tiltag udover udskiftning af selve kølefladen, der kan afhjælpe sådanne problemer.
- Der er relativt lille kapacitet for aktivt kul anvendt til luftrensning ved dampstripping i kombination med vakuumventilation. Årsagen er, at luften har en høj relativ luftfugtighed, selv efter genopvarmning, hvilket nedsætter kullenes kapacitet overfor opløsningsmidler. Vi konstaterede gennembrud ved 1/3-1/4 af den forventede kapacitet ud fra leverandørens isotermer.
- Varm vanddamp med opløsningsmidler er meget reaktivt overfor de fleste former for fugemasse. Vær opmærksom på dette ved valg af dette i forbindelse med tætningsopgaver/pakninger.
- Den nominelle ydelse på en kedel er kun retningsgivende for hvad den kan levere under praktiske forhold. I dette projekt leverede den indkøbte kedel ca. 60 % af den nominelle ydelse kontinuert (målt som dampmængde der blev injiceret). Det anbefales af denne grund at vælge en kedel der har en nominel ydelse der er mindst det dobbelte af hvad der forventes kontinuert leveret.

Monitering af dampudbredelsen og oprensningens fremdrift skete ved en kombination af måling af temperaturer i jorden, ved hjælp af en række specielle boringer med temperaturfølere placeret med en halv meters mellemrum nedefter, målinger af damp-, luft og vandflow i anlægget forskellige steder, samt måling af PCE-, TCE-, ilt-, og kuldioxidkoncentration i anlæg samt udvalgte steder i jorden. Herudover blev der i løbet af projektet udviklet en målemetode til måling af temperaturen i de aktive injektions- og ekstraktionsboringer, samt målt overflade temperaturer ved direkte visende IR-måling og ved anvendelse af IR termografi.

Der kan drages en række konklusioner fra måleprogrammet af mere overordnet karakter. De vigtigste er listet op herunder:

- De installerede temperaturboringer har været anvendelige til at vurdere udbredelsen af dampzonen i det vertikale plan. Indledningsvis var der anvendt opslæmmet bentonit, hvilket ikke virkede. Boringerne blev efterfyldt med Storebæltsblanding, hvilket udbedrede denne skade. Boringer hvor der var fabriksindkapslede Pt100 følere har haft en væsentligt bedre overlevelsrate gennem projektet end de boringer hvor der var installeret Type K følere samlet af entreprenøren. Den store fejlrate skyldes sandsynligvis at indkapslingen af målepunktet har været udført tilstrækkelig resistent til at vanddamp har kunnet trænge ind i kablet og forårsage kortslutning.
- Temperaturmåling ved hjælp af nedsænkning af Type K følere i aktive boringer (i måleperioden aflukket fra systemet) viste sig at være et godt supplement til de specielle temperaturboringer. Opløsningen i dybden var dog dårligere end for de specielle boringer, ligesom on-line måling ikke var mulig.
- Temperaturmåling på de enkelte rørføringer fra vakuumboringerne har ikke fungeret tilfredsstillende ved det anvendte set-up, hvor målingen er udført indeni eller udenfor manifolden, hvor rørene blev samlet inden indgangen til behandlingsanlægget. Temperaturen skal i stedet måles ude i boringen.
- Flowmålinger af hhv. damp- og luftflow på de enkelte strenge kom aldrig til at virke med det først opstillede målesystem, til trods for at der blev udført et stort arbejde for at dette skulle ske. Systemet bestod af pitotrør med differenstrykmåling på de enkelt rørstrækninger til boringerne. Pga. kondensation af vanddamp i slanger, vanddråber og fine partikler virkede differenstrykmålingen meget dårligt, og dermed også flowmålingen. Vi vil på denne baggrund fraråde at anvende et system af denne type til dampstripping.
- Flowmåling af de enkelte strenges dampmængde lykkedes ved anvendelse af en måler af rotametertypen, frem for det ovenfor skitserede system.
- Trykmålinger i jorden viste sig at være vanskelige at måle. Der konstateres generelt små afvigelser fra atmosfæretrykket når man ikke er tæt på hhv. vakuum- eller injektionsboringer. De små trykforskelle er vanskelige at registrere pga. kondenserende vand ofte forstyrrer målingen. Da temperaturstigning stort set udtrykker de samme forhold som et overtryk anbefales det i stedet at måle denne parameter.
- Koncentration af de forskellige komponenter kan måles på en række måder. For at få et ensartet billede er det nødvendigt at måle ved standardbetingelser fra gang til gang. Vi valgte at bygge et konditioneringsystem, der udskilte vand og kølede luften ned til 5 °C inden målingen. Dette system var efter indkøring og retning af fejl i stand til at konditionere prøver så reproducerbarheden på målingerne var høj. De målte koncentrationer svarer derfor stort set til en normering til Nm³.

De primære oprensningresultater er gennemgået ovenfor men uddybes i de nedenstående punkter:

- Det samlede energiforbrug til oprensningen har været hhv. 336 kWh/m³ og 214 kWh/m³ i område III og område I+II. Det teoretiske forbrug til opvarmning af jord til kogepunktet ligger på 60-80 kWh/m³ afhængig af vandindholdet. Den primære forskel i forhold til det teoretiske forbrug skyldes tab til omgivelserne ved varmeledningsevne, og i mindre omfang den energimængde der fjernes ved oppumpning af vand og luft. Forskellen i energiforbrug mellem de to områder skyldes en optimering af driften i område I+II i forhold til område III samt muligheden for at levere et større dampflow, pga. indlejning af en ekstra kedel ved oprensningen af område I+II.
- Poreluftkoncentrationerne er blevet reduceret fra et niveau på op til 7500 mg PCE/m³ (gennemsnit ca. 100 mg PCE/m³) til et niveau på op til maksimalt 18 mg PCE /m³. Det forventes, at når jorden er endelig afkølet at koncentrationen i luften maksimalt vil være 10 mg PCE /m³ i oprensningsområdet. 96 % af arealet overholder efter oprensning og afkøling kriterierne for anvendelse til særlig følsom arealanvendelse mht. PCE afdampning. Ingen af de eksisterende boliger har efter oprensningen koncentrationer af PCE under gulvet, der efter en JAG G beregning med standardparametre giver anledning til overskridelse af det acceptable indeklimabidrag.
- Koncentrationen i vand udtaget fra det sekundære magasin havde inden oprensningen et indhold på 20-4.000 µg PCE/l (gennemsnittet ca. 800 µg PCE/l). Efter endt oprensning er koncentrationerne maksimalt 480 µg PCE/l med et aritmetisk gennemsnit på knap 30 µg PCE/l. Det bemærkes at der efter oprensningen er udtaget langt flere prøver i områder med forventet høje koncentrationer end før oprensningen. Baseret på en statistisk analyse af data overholder 90 % af arealet koncentrationer på under 40 µg PCE/l, der efter en JAG G beregning er det højest acceptable niveau i det sekundære magasin, når det underliggende primære magasin ikke skal belastes uacceptabelt.
- Koncentrationen i jordprøver før oprensningen udtaget i de glaciale aflejringer har vist koncentrationer fra under 1 mg PCE/kg TS op til 120 mg PCE/kg TS (gennemsnit 12 mg PCE/kg TS). Efter endt oprensning er koncentrationen i de områder hvor der har været opvarmet til damptemperaturer (> 90 °C) alle lave indhold, dvs. langt under 1 mg/kg. Den fundne fjernelsesrate i de øverste 6 m af lagfølgen svarer til 98 %. I de områder hvor der ikke har været tilstrækkelig opvarmning (primært i overgangen til den underliggende moræner) har rensningseffektiviteten været 60-70 %. I den underliggende moræner har det kun været muligt et enkelt sted at rense op ned i denne. Generelt konkluderer vi at indstrømmende vand har forhindret en effektiv opvarmning af moræneren nedadtil, med dårlig eller helt manglende oprensning til følge.
- Samlet er der fjernet ca. 370 kg PCE, heraf er ca. 10 kg fjernet ved oppumpning fra det primære magasin og resten via den direkte oprensning. Af de 360 kg fjernet ved den direkte oprensning er kun ca. 0,5 % fjernet via det oppumpede vand og resten med den vakuumekstraherede luft. Vådforbrænding (HPO) er vurderet ikke at være en væsentlig fjernelsesmekanisme for PCE under de betingelser der har været under oprensningen.

Derimod er der fjernet store mængder af andet kulstof, heraf en del sandsynligvis som følge af HPO af forskellige naturligt forekommende stoffer.

Der har været en række sideeffekter i forbindelse med oprensninger der har haft økonomiske konsekvenser, ligesom en del påvirkning af de daglige brugere af arealet har været uundgåelig. De vigtigste påvirkninger og konsekvenser er listet herunder:

- Forud for projektet blev det besluttet at omlægge gas og stærkstrømskabler. Undervejs i forløbet blev det også nødvendigt at omlægge brugsvand til brugerne af bygningerne i det opvarmede område. Der blev også under driften konstateret skader på et telefonkabel, der ligeledes måtte omlægges.
- Efter oprensningen er det konstateret at der kommet skader på en række af kloakledningerne igennem området. Skaderne er både opstået på rør af plast og cement. Derimod er gamle glaserede rør stort upåvirket. Skaderne er efter afkøling udbedret.
- Der opstod i forbindelse med driften en række komfortproblemer, specielt i område III. Temperaturen i bygningerne steg til uacceptable niveauer. Dette blev forsøgt imødegået ved kraftig ventilation, men da det var i sommerperioden havde dette kun begrænset effekt. I to tilfælde blev beboere flyttet ud af deres lejemål i en kortere periode i forbindelse med oprensningen.
- Der opstod mindre skader på bygningerne i område III som følge af dampopslag i gulve og vægge. Dette blev repareret efter afslutningen af vakuumperioden.
- I område I blev problemer med varme og fugt løst ved at etablere en meget kraftig udsugning under gulvet i det kapillarbrydende lag. Denne løsning forhindrede effektivt problemerne.
- Der blev konstateret hævnings/sænkning af bygningerne i forbindelse med oprensningen, op til ca. 10 mm. Disse ændringer i funderingsforholdene aktiverede allerede opståede revner i bygningerne og forårsagede mindre skader som eksempelvis nedfald af vægfliser. Disse skader er efterfølgende repareret.

Den samlede økonomi i oprensningen alt inklusive har været ca. 35 mill. Den behandlede jordmængde i alt ca. 90.000 tons, svarende til at rensningsprisen pr. ton har været ca. 400 kr. Den samlede sum er overordnet fordelt som:

- 18,5 mill. til anlægsentreprenøren for bygning af anlæg, omlægning af ledninger, ombygning mv.
- 4 mill. til driftsentreprenøren, vedligehold, mindre ombygninger mv. undervejs i driften.
- 4 mill. til retablering, heraf ca. 0,5 mill. til udbedring af skader på bygninger.
- 4,5 mill. til forbrugsudgifter på gas, olie, el mv.
- 4 mill. til rådgivning i forbindelse med de indledende tests, projektering, tilsyn med anlægsetablering og tilsyn/styring af drift, analyser i driftsfasen, slutmonitoring inkl. analyser og afrapportering.

7 Referencer

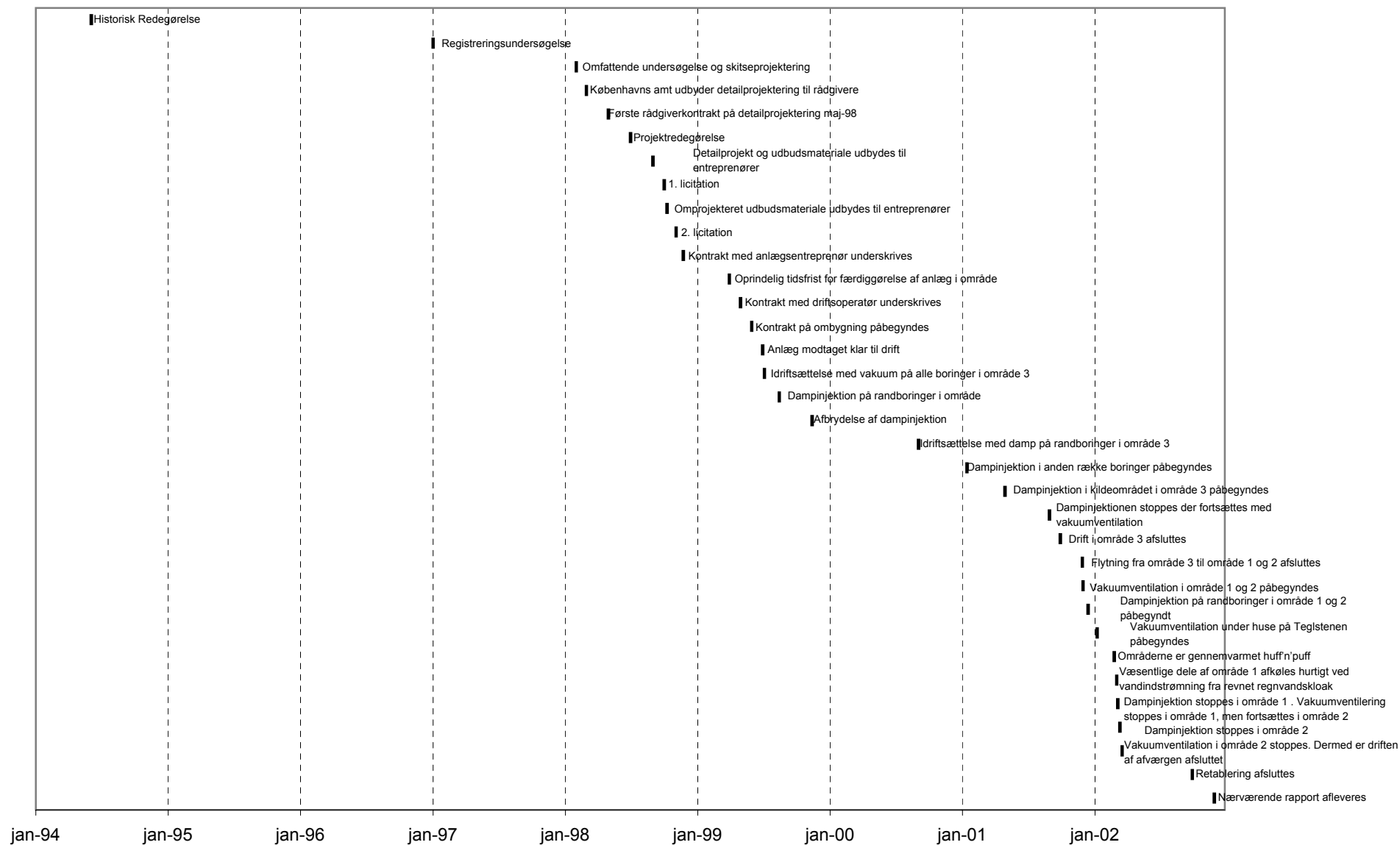
- /1/ Larsen, T.H. (2000) : Oprensning af klorerede opløsningsmidler ved dampstripping. Brüel og Kjær grunden. Miljøprojekt 543. Miljøstyrelsen.
- /2/ Stang, O., Jørgensen, K.,S. & Larsen, T.,H.(2000): Dampoprensning med vacuumekstraktion. Brüel og Kjær A/S. Miljøprojekt 552. Miljøstyrelsen.
- /3/ Heron, T. (ed) (2002) : Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøprojekt 714, Miljøstyrelsen.
- /4/ Heron, G., Heron, T., Larsen, T. H., Christensen, T. H. (1998) : Termisk assisterede oprensninger. Miljøprojekt 409, Miljøstyrelsen.
- /5/ Kemp og Lauritzen A/S(1997): Registreringsundersøgelse, Affaldsdepot 169-1, Industrivej, Høje-Taastrup Kommune. Udført for Københavns Amt.
- /6/ Rambøll (1998): Omfattende undersøgelser og skitseprojektering på depot 169-01, Industrivej, Høje Taastrup Kommune. Fase 1.Udført for Københavns Amt.
- /7/ Københavns Amt (1998): Indhentning af tilbud på detailprojektering af afværgeforanstaltninger, gennemførelse af licitation, bygge- og miljøtilsyn med etablering samt indkøring af afværgeforanstaltninger på Industrivej og Teglstenen, Høje Taastrup Kommune. Brev fra Københavns Amt til Hedeselskabet.
- /8/ Heron, T. & T.H. Larsen (1998): Oprensning ved dampinjektion, Teknologiuudviklingsprojekt, Industrivej, Hedehusene.
- /9/ Hedeselskabet (1998): Hedehusene – Industrivej. Projektredegørelse. Økonomi og redegørelse for afværgeprojekt. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /10/ Gudbjerg, J. (2002): Modellering af opvarmning ved dampinjektion (Modi). Miljøprojekt nr. 679; Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening.
- /11/ Hedeselskabet (1998): Hedehusene – Industrivej. Afværgeprojekt, SB, SAB og TAG. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /12/ Carl Bro as (1994): Historisk redegørelse Affaldsdepot 169-01, Høje Taastrup Kommune. Udført for Københavns Amt.
- /13/ Hedeselskabet (1998): Notat. Industrivej Hedehusene. Undersøgelse af det primære grundvandsmagasin. Affaldsdepot 169-1. Udført for Københavns Amt.

- /14/ Rambøll (1996): Københavnsregionen. Grundvandsniveauet i kalkmagasinet i oktober 1995. Kort udarbejdet af Rambøll, dateret juli 1996.
- /15/ Hedeselskabet (2000): Notat. Vandmængder i relation til eksisterende anlæg. Løsningsforslag til bortledning af vand i Hedehusene. Udført for Københavns Amt.
- /16/ Hedeselskabet (1998): Notat. Industrivej, Hedehusene. Ventilationstest. Affaldsdepot 169-1. Udført for Københavns Amt.
- /17/ DMU (2003) : Rapport om påvirkning af mikrofloraen ved opvarmning af jord. Udarbejdes i Teknologiprogrammet for Miljøstyrelsen. In Press.
- /19/ Hedeselskabet (2000): Notat om konstateret boringsopbygning. Udført for Københavns Amt.

Bilag A

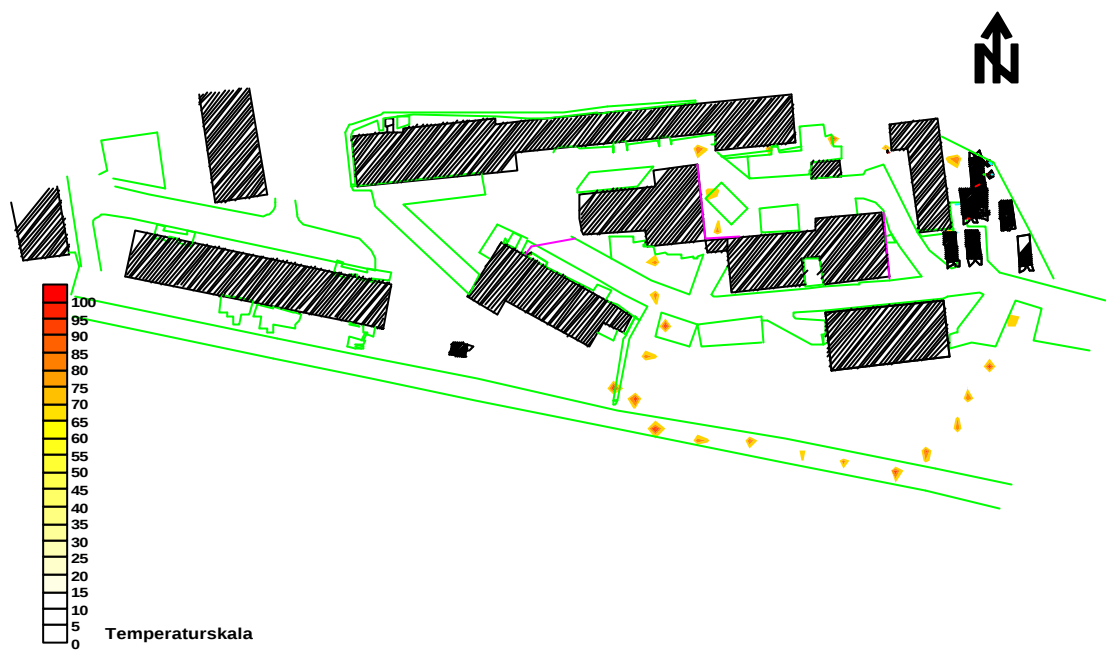
Bilag A: Tidslinie

1994	Historisk Redegørelse
1997 Januar	Registreringsundersøgelse
1998 Februar	Omfattende undersøgelse og skitseprojektering
1998 Marts	Københavns amt udbyder detailprojektering til rådgivere
1998 Maj	Første rådgiverkontrakt på detailprojektering
1998 Juli	Projektredegørelse
1998 September	Detailprojekt og udbudsmateriale udbydes til entreprenører
1998 Oktober 2.	1. licitation
1998 Oktober	Omprojekteret udbudsmateriale udbydes til entreprenører
1998 November 4.	2. licitation
Etablering af anlæg	
1998 November 24.	Kontrakt med anlægsentreprenør underskrives
1999 Marts 31.	Oprindelig tidsfrist for færdiggørelse af anlæg i område 3
1999 Maj 1.	Kontrakt med driftsoperatør underskrives
1999 juli 1.	Anlæg modtaget klar til drift
Drift i område 3	
1999 juli 6.	Idriftsættelse med vakuum på alle boringer i område 3
1999 August 16.	Dampinjektion på randboringer i område 3
1999 November 15.	Afbrydelse af dampinjektion
2000 Februar 1	Afbrydelse af vakuumventilation
2000 Juni	Kontrakt på ombygning påbegyndes
2000 September 4.	Idriftsættelse med damp på randboringer i område 3
2001 Januar 16.	Dampinjektion i anden række boringer påbegyndes
2001 maj 1.	Dampinjektion i kildeområdet i område 3 påbegyndes
2001 September 1.	Dampinjektionen stoppes der fortsættes med vakuumventilation
2001 Oktober 1.	Drift i område 3 afsluttes
2001 December 1.	Flytning fra område 3 til område 1 og 2 afsluttes.
Drift i område 1 og 2	
2001 December 3.	Vakuumventilation i område 1 og 2 påbegyndes
2001 December 17.	Dampinjektion på randboringer i område 1 og 2 påbegyndt
2002 Januar 11.	Vakuumventilation under huse på Teglstenen påbegyndes
2002 Februar 27.	Områderne er gennemvarmet huff'n'puff
2002 Marts 6.	Væsentlige dele af område 1 afkøles hurtigt ved vandindstrømning fra revnet regnvandskloak
2002 Marts 9.	Dampinjektion stoppes i område 1 . Vakuumventilering stoppes i område 1, men fortsættes i område 2.
2002 Marts 15.	Dampinjektion stoppes i område 2.
2002 Marts 21.	Vakuumventilation i område 2 stoppes. Dermed er driften af afværgen afsluttet.
Retablering, dokumentation og rapport	
2002 oktober	Retablering afsluttes
2002 December	Nærværende rapport udgives.

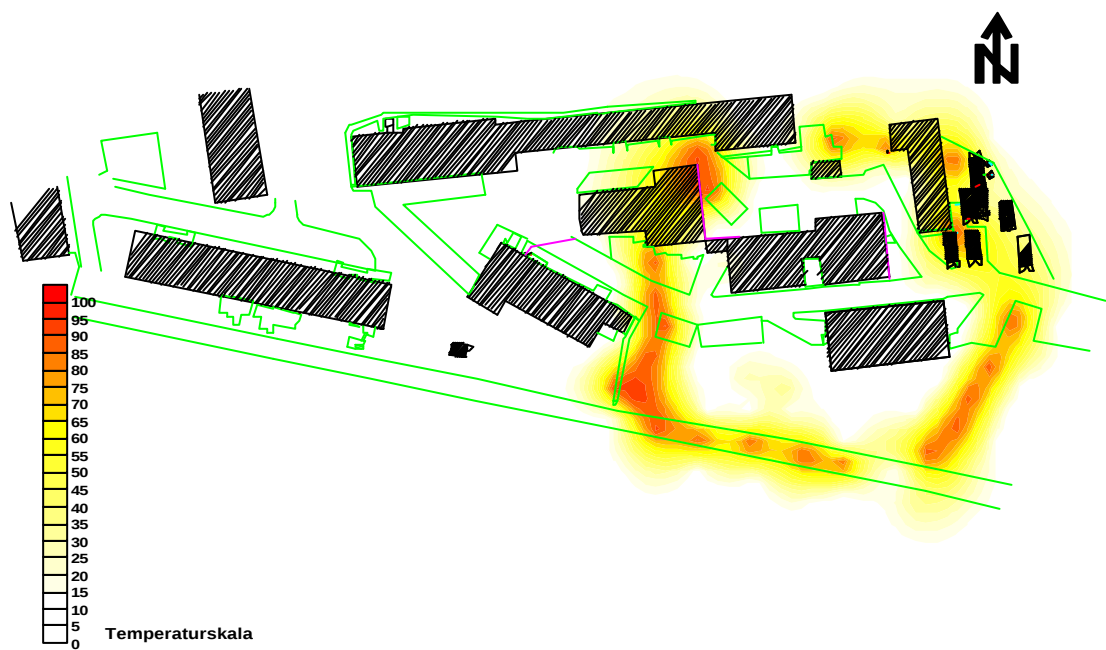


Bilag B

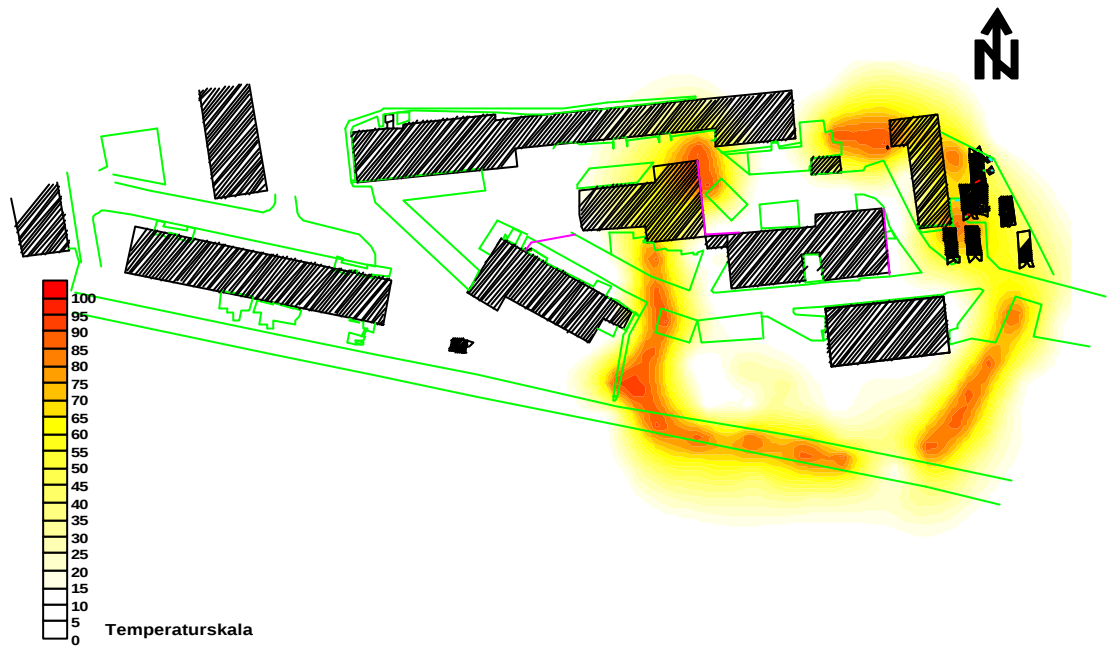
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 07-09-00



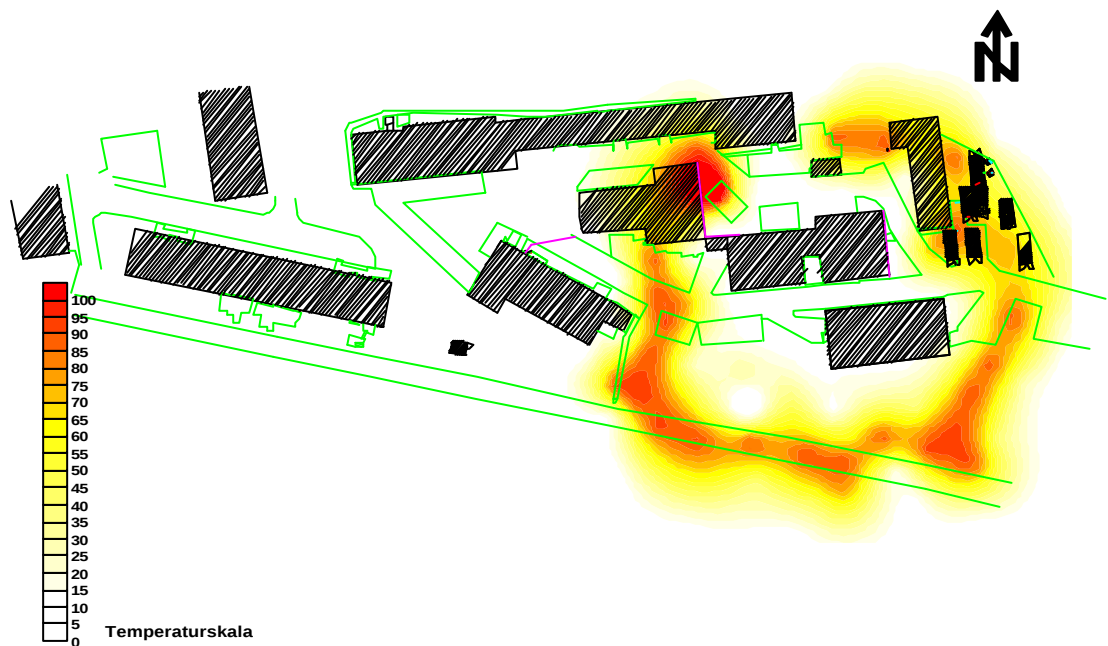
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 01-11-00



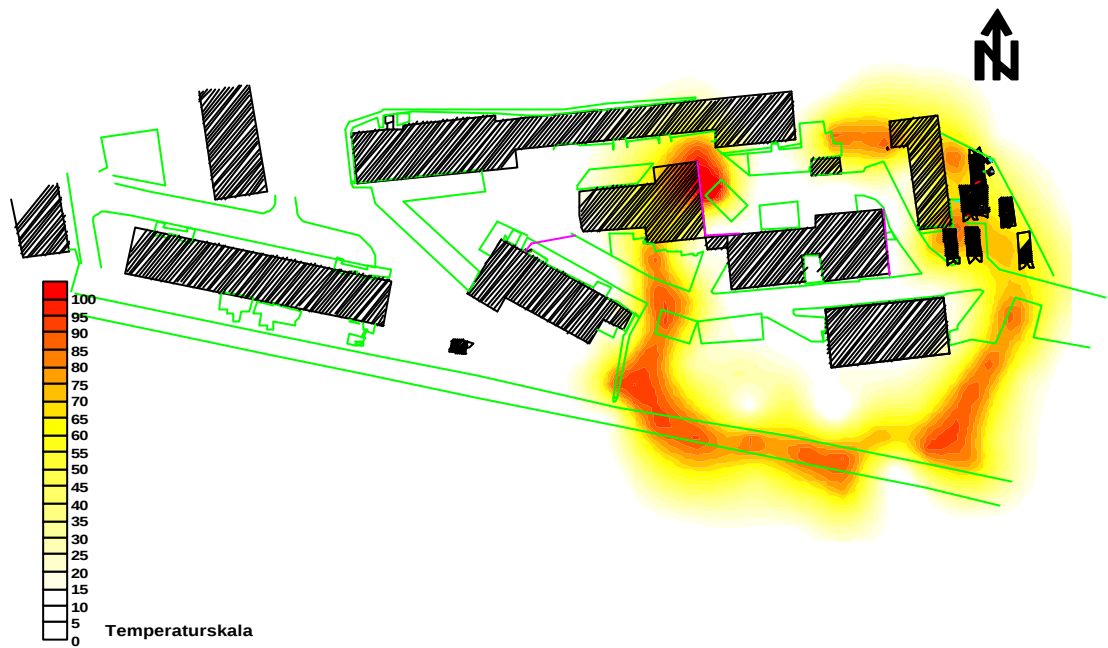
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 01-12-00



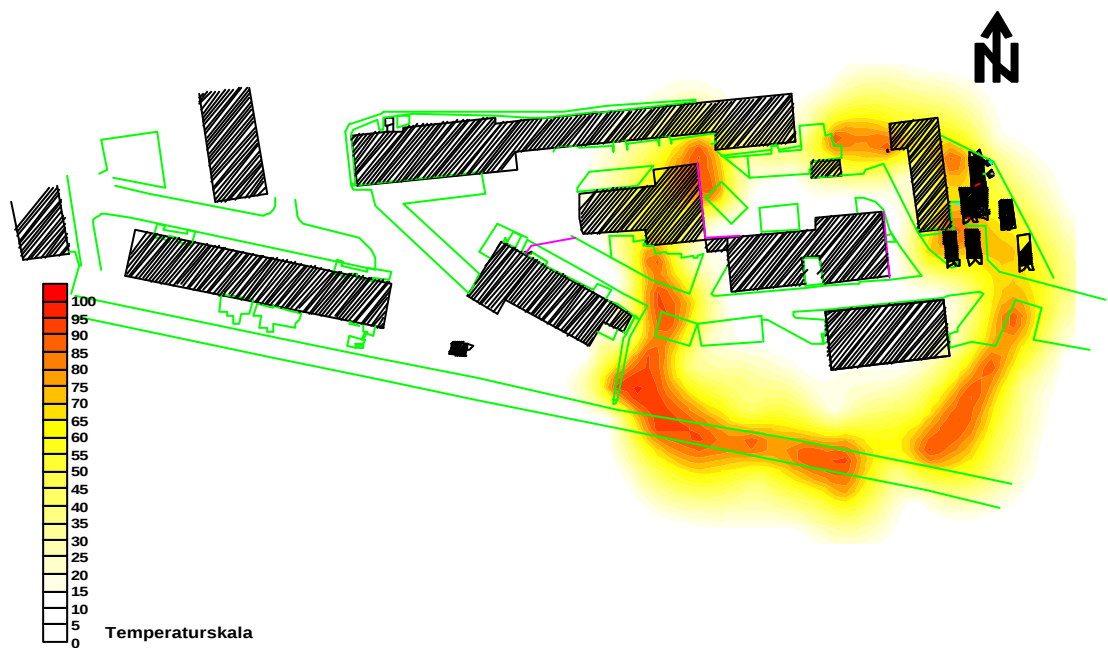
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 25-12-00



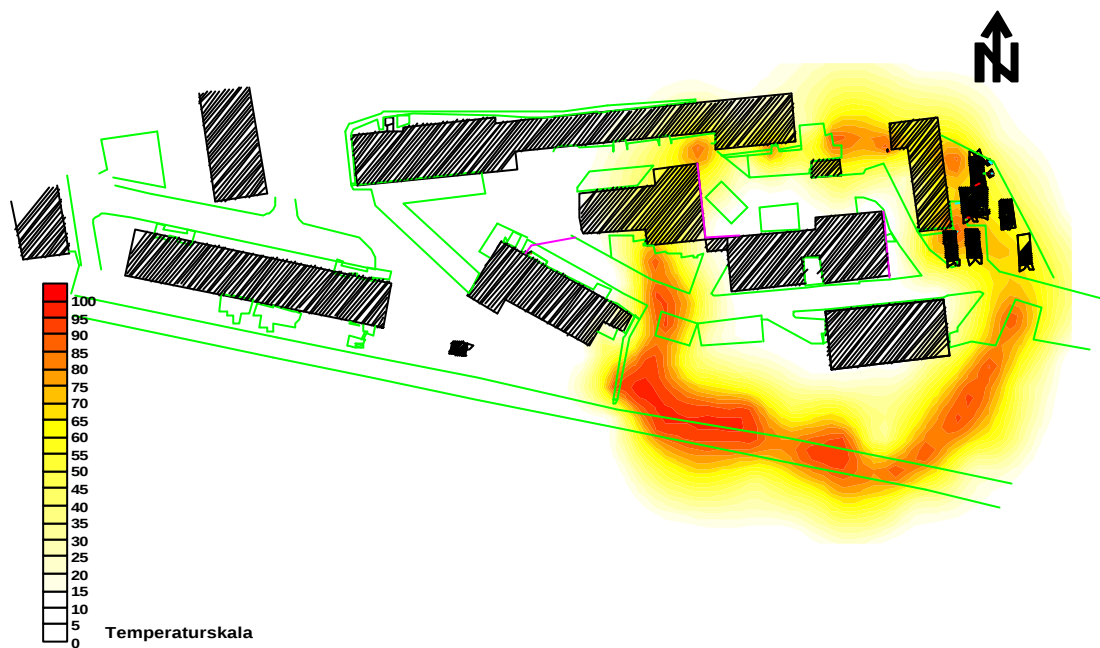
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 01-01-01



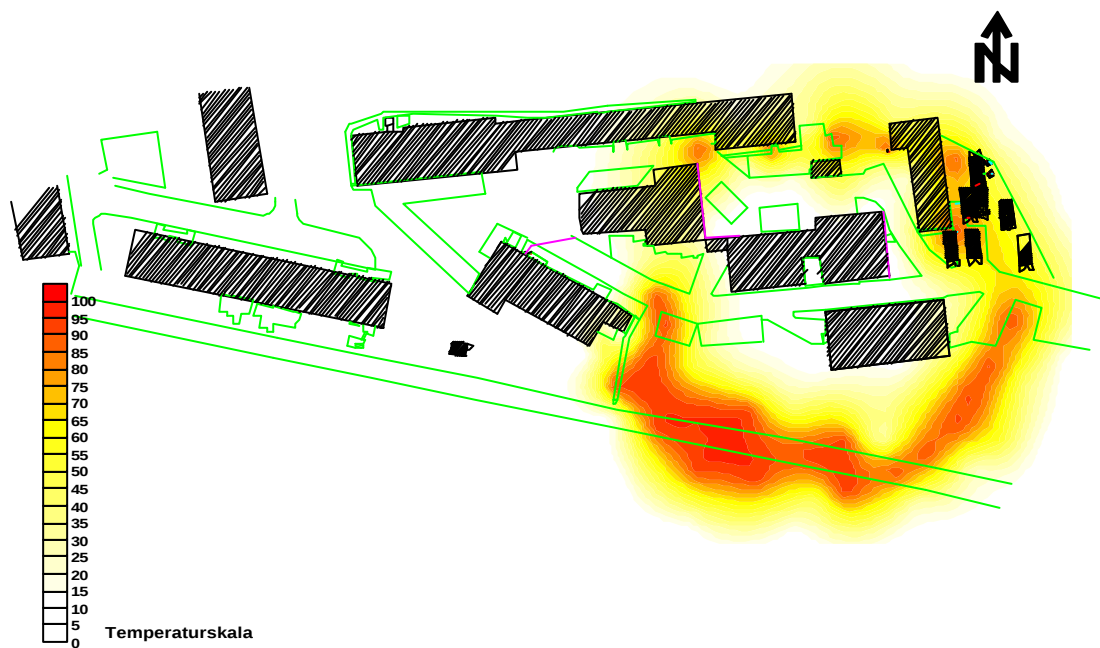
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 10-01-01



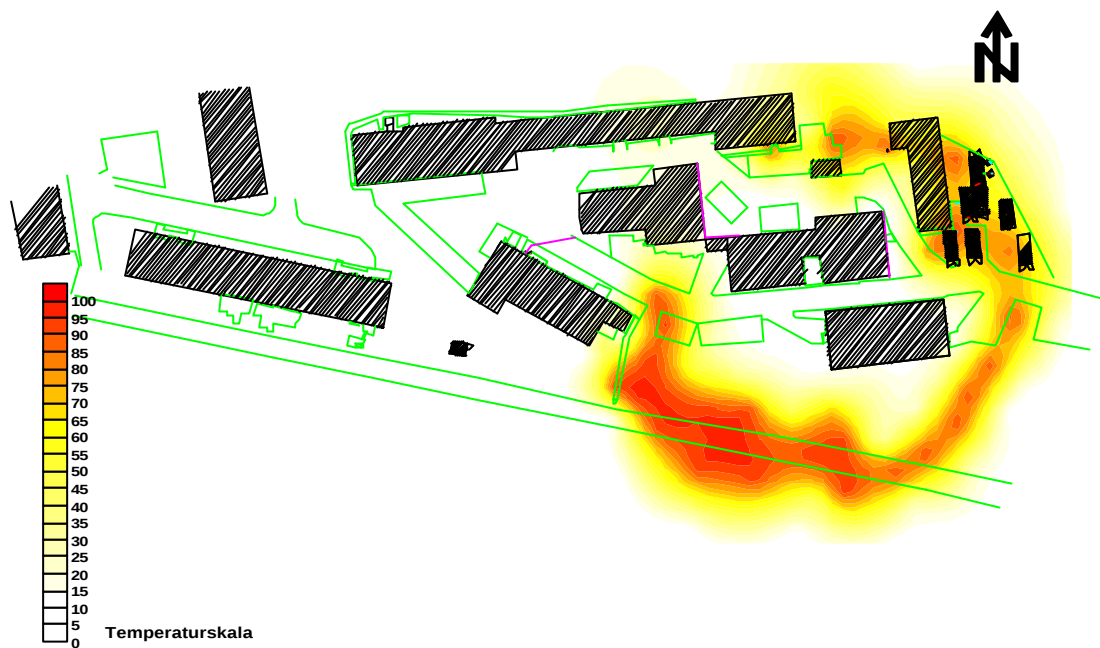
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 26-01-01



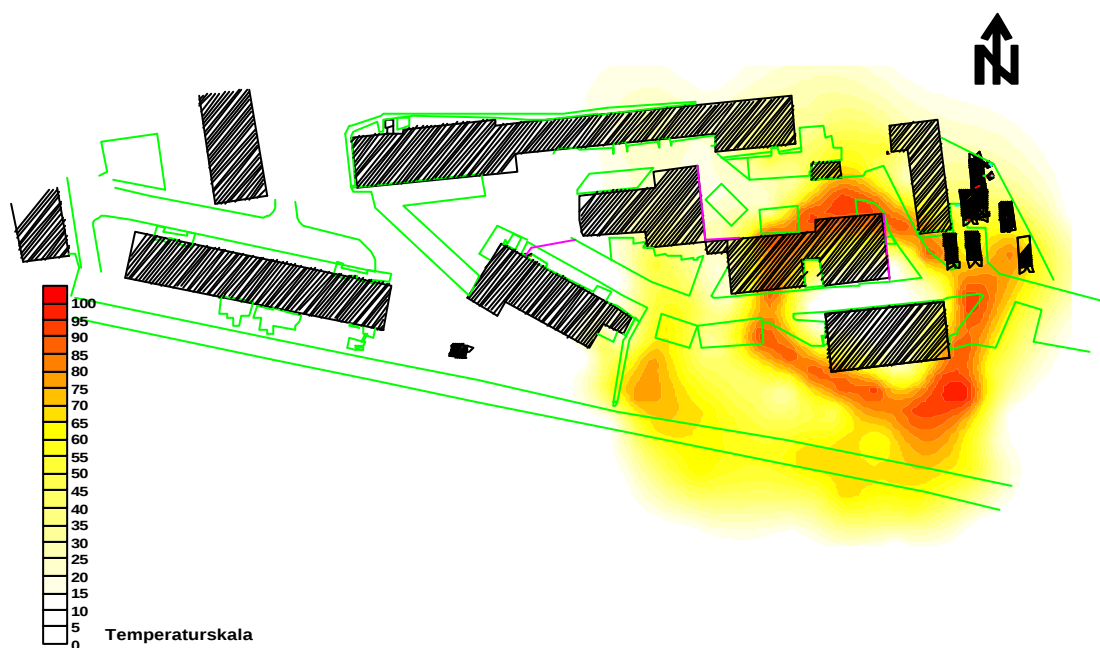
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 27-02-01



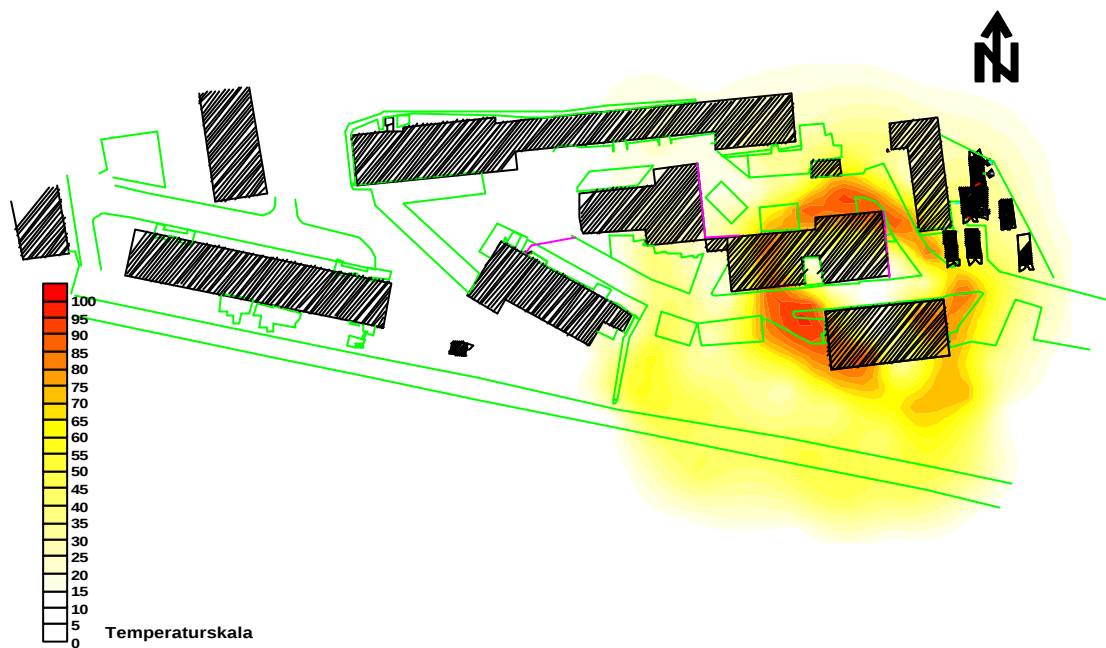
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 25-03-01



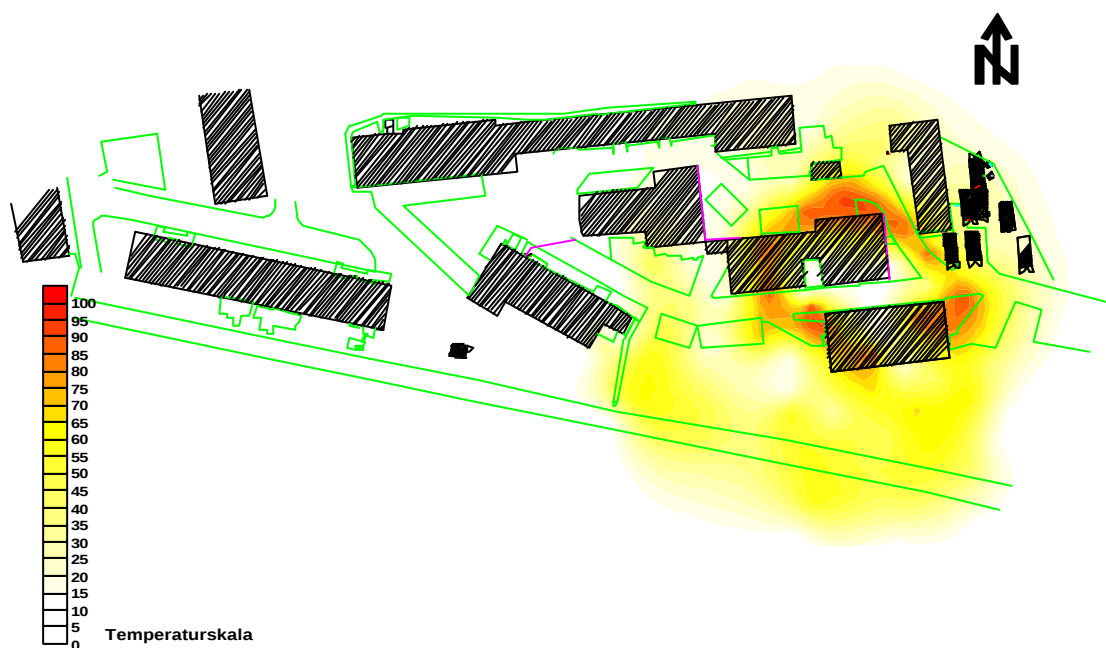
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 25-04-01



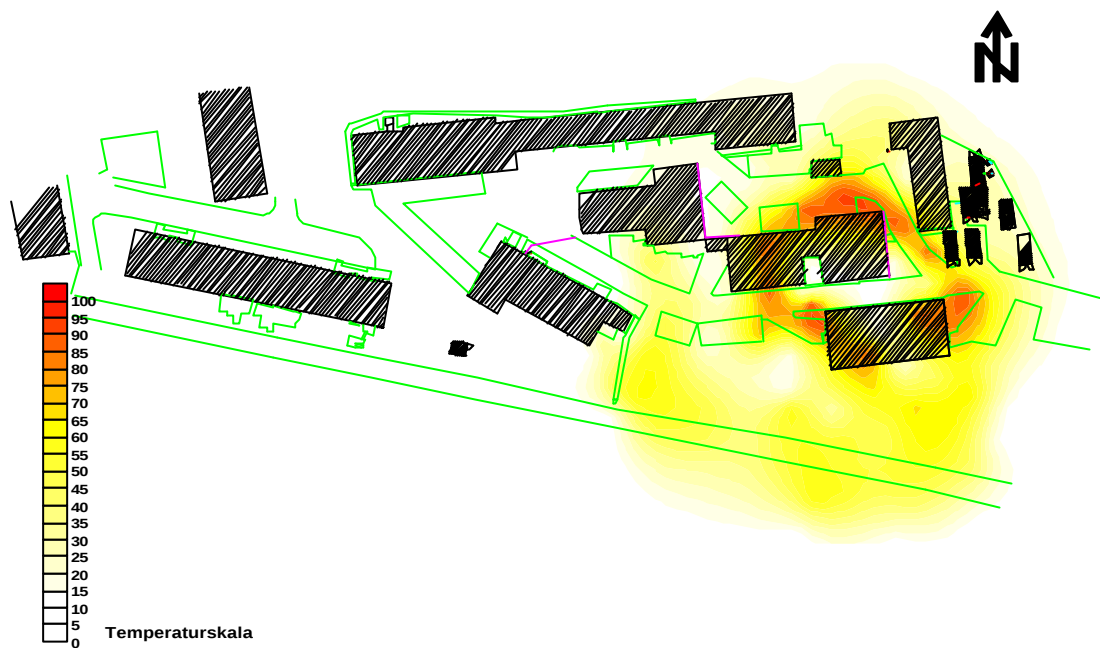
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 09-05-01



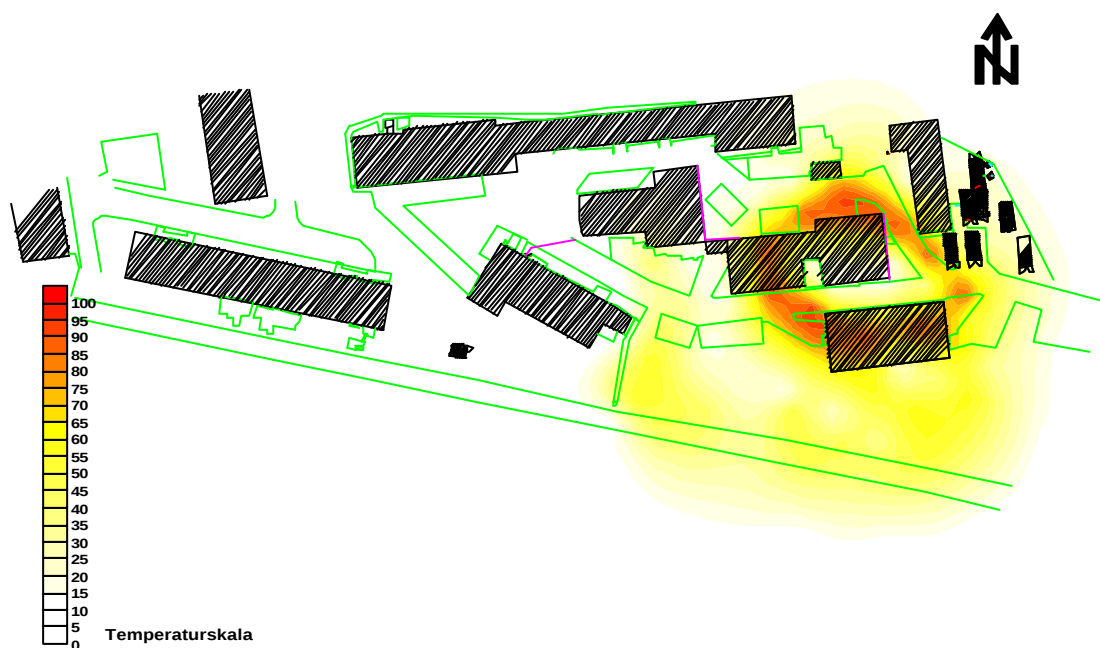
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 15-05-01



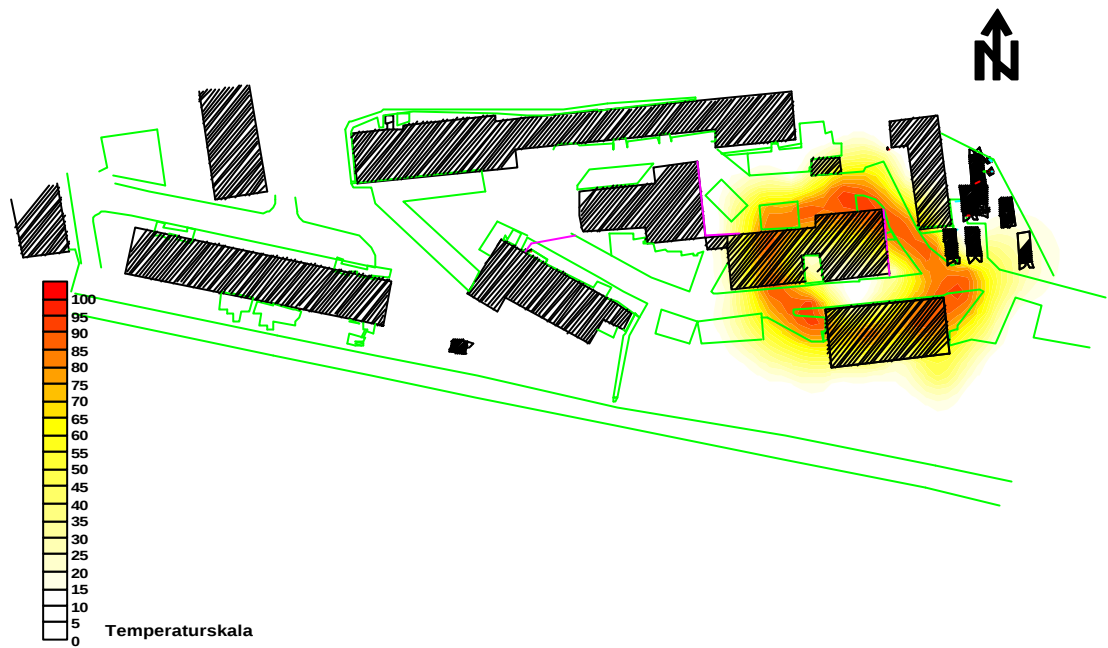
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 15-05-01



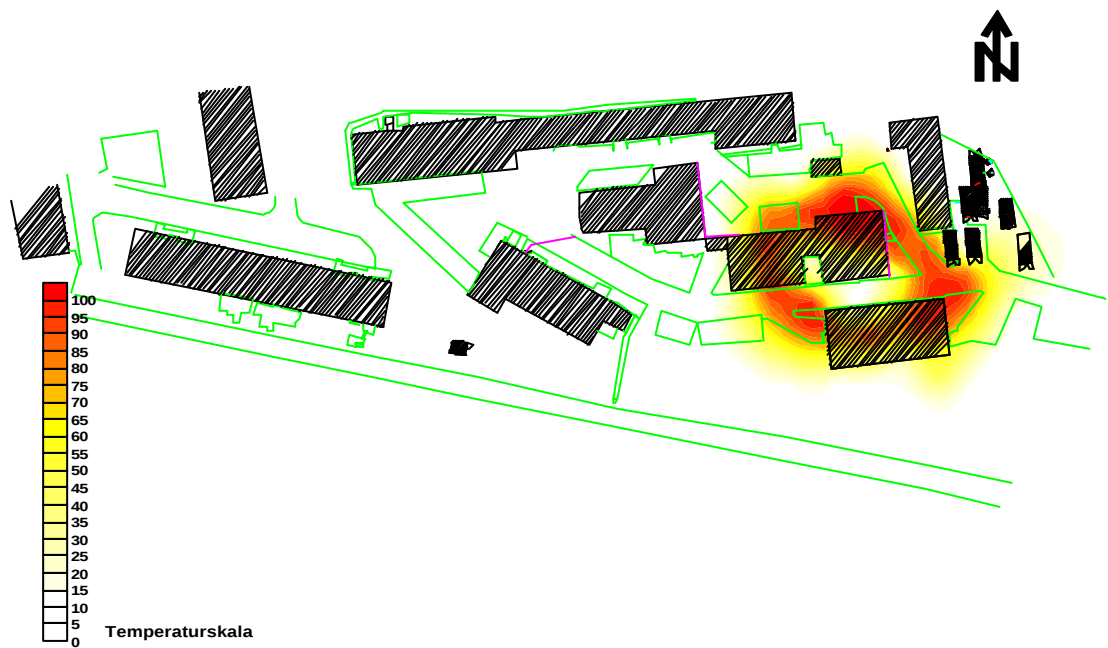
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 22-05-01



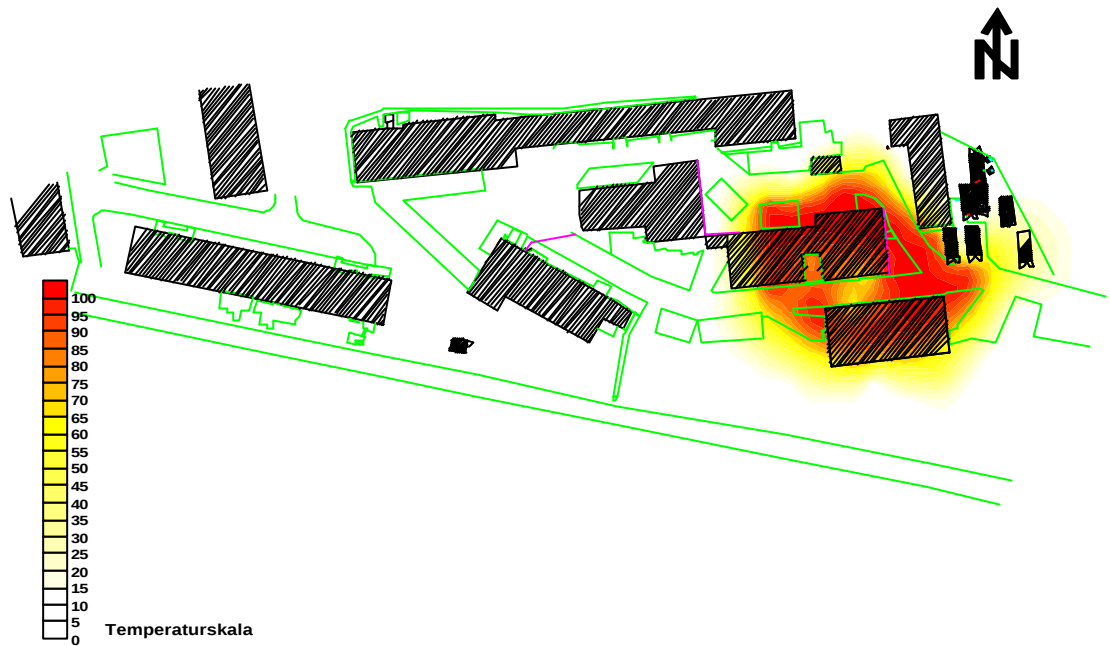
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 14-06-01



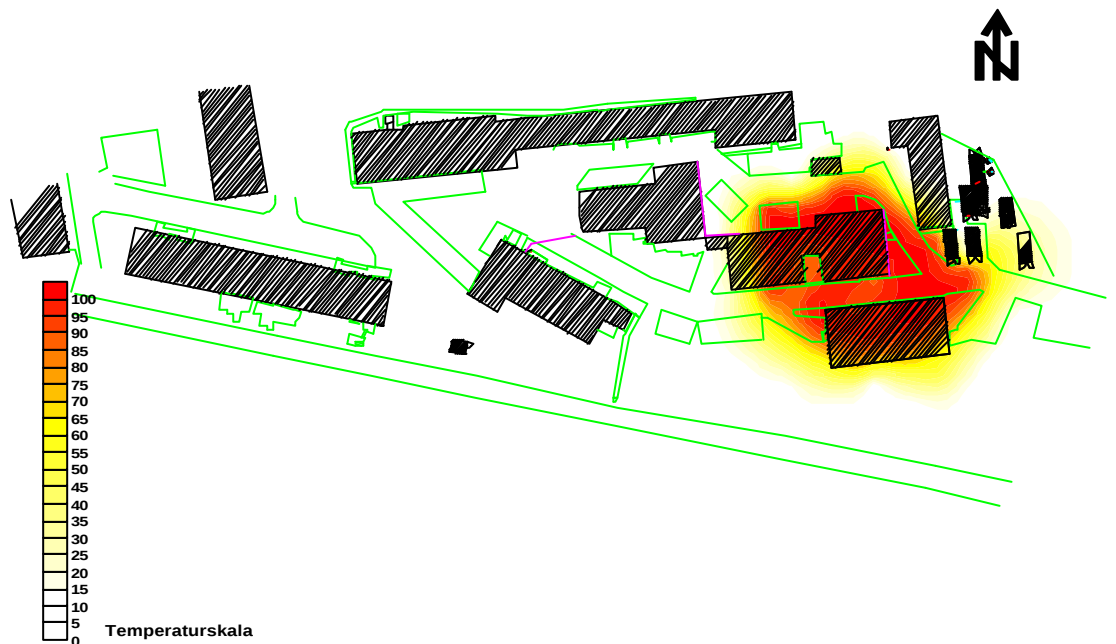
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 22-06-01



Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 27-07-01

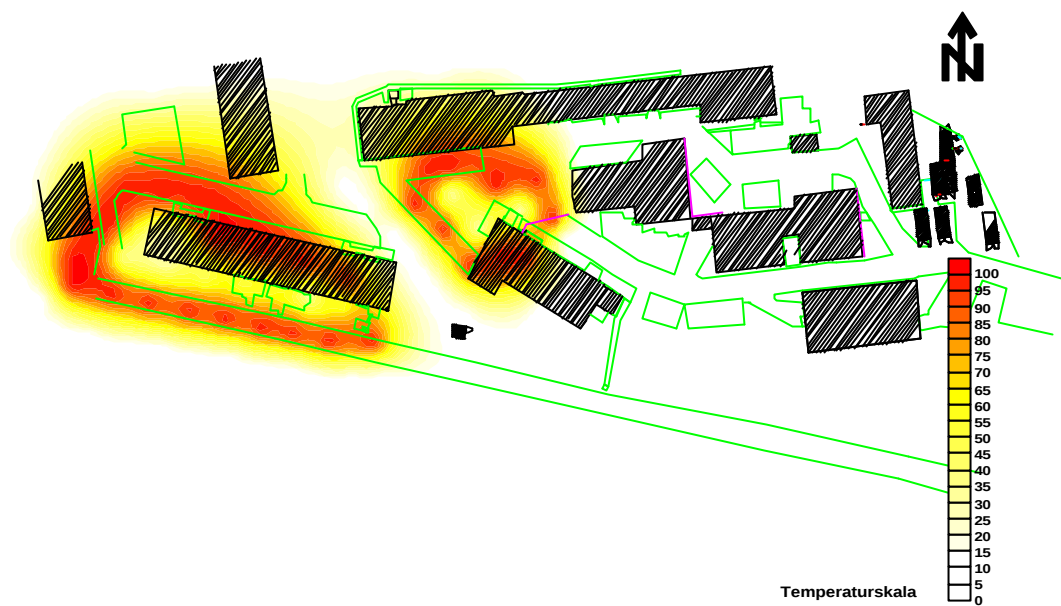


Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område III målt den. 03-09-01

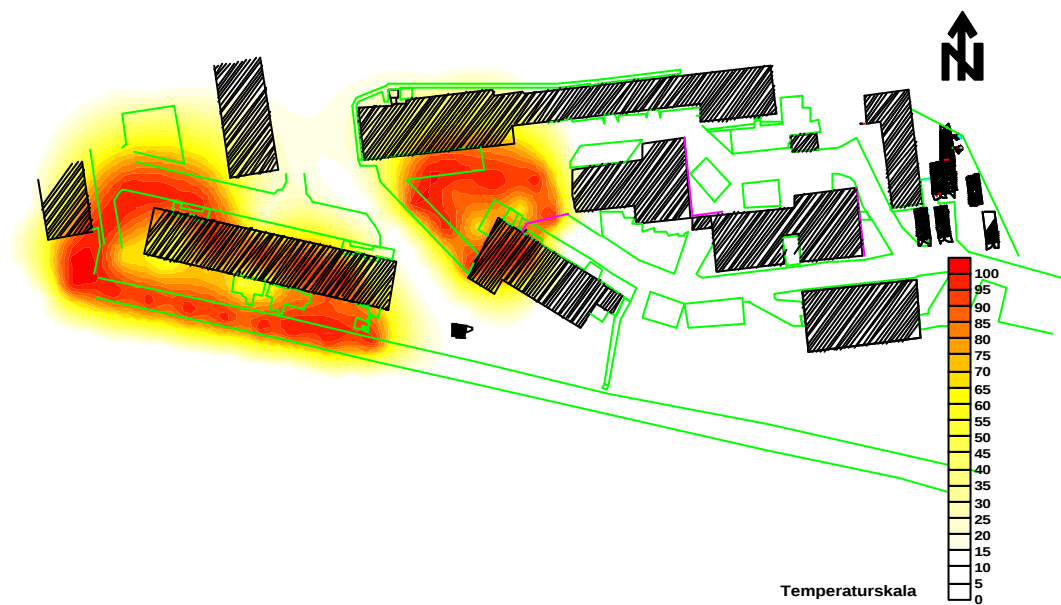


Bilag C

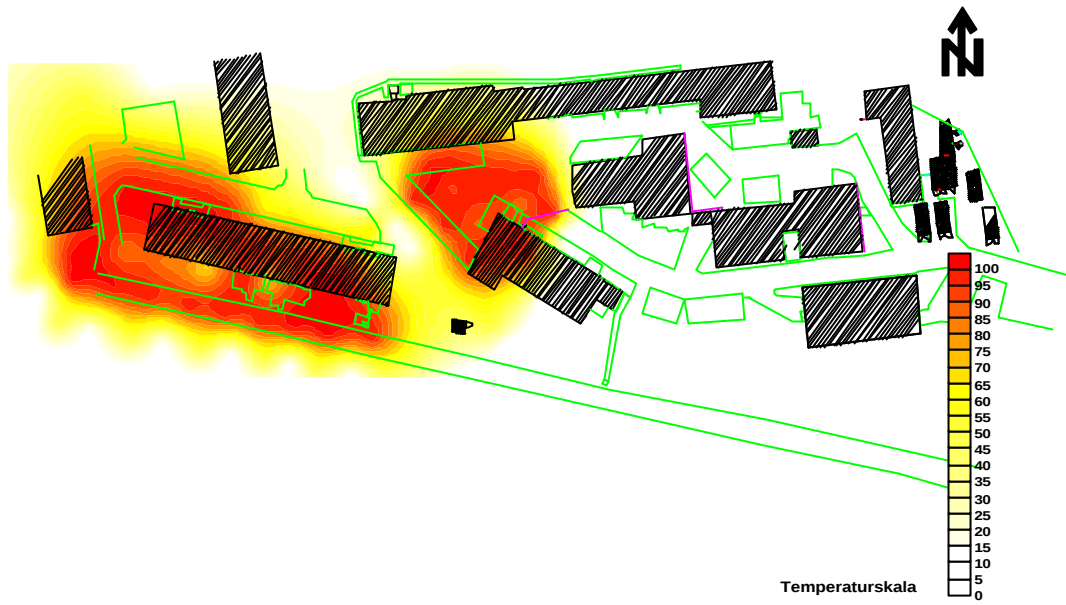
Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område I og II den 10-01-02



Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område I og II den 15-02-02

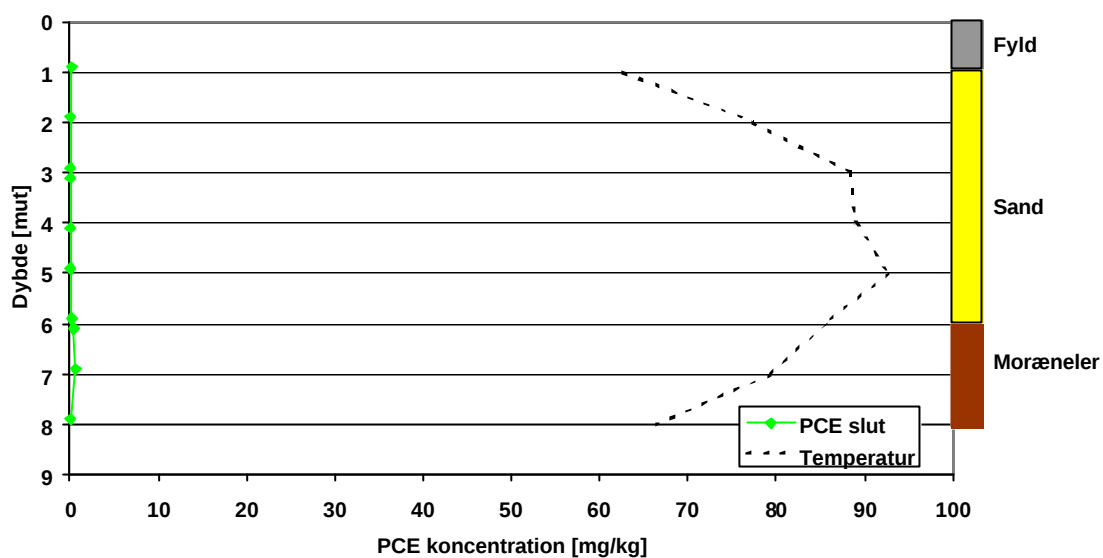


Målte gennemsnitstemperaturer i de øverste 8 m i område I og II den 26-02-02

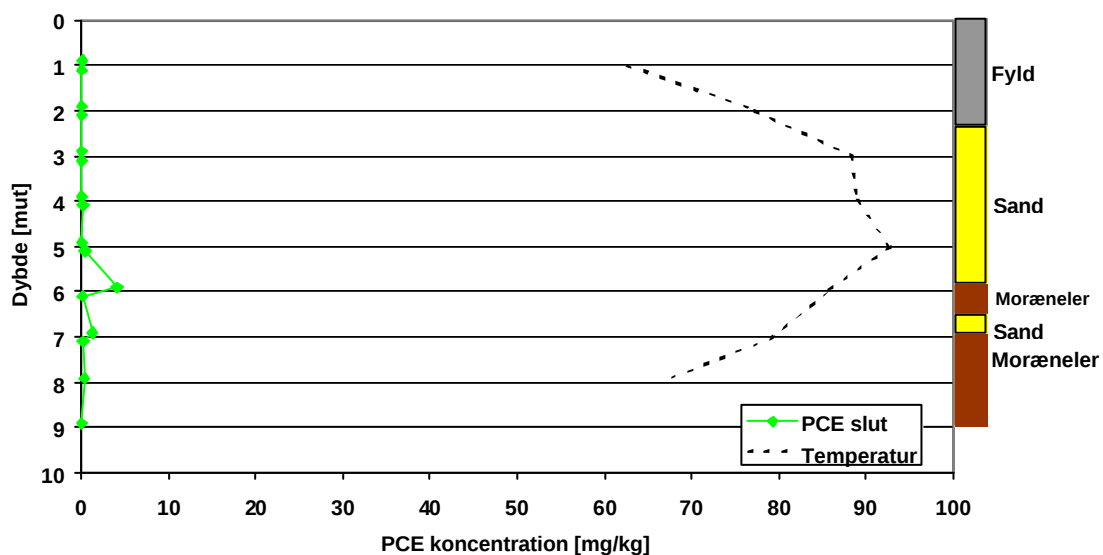


Bilag D

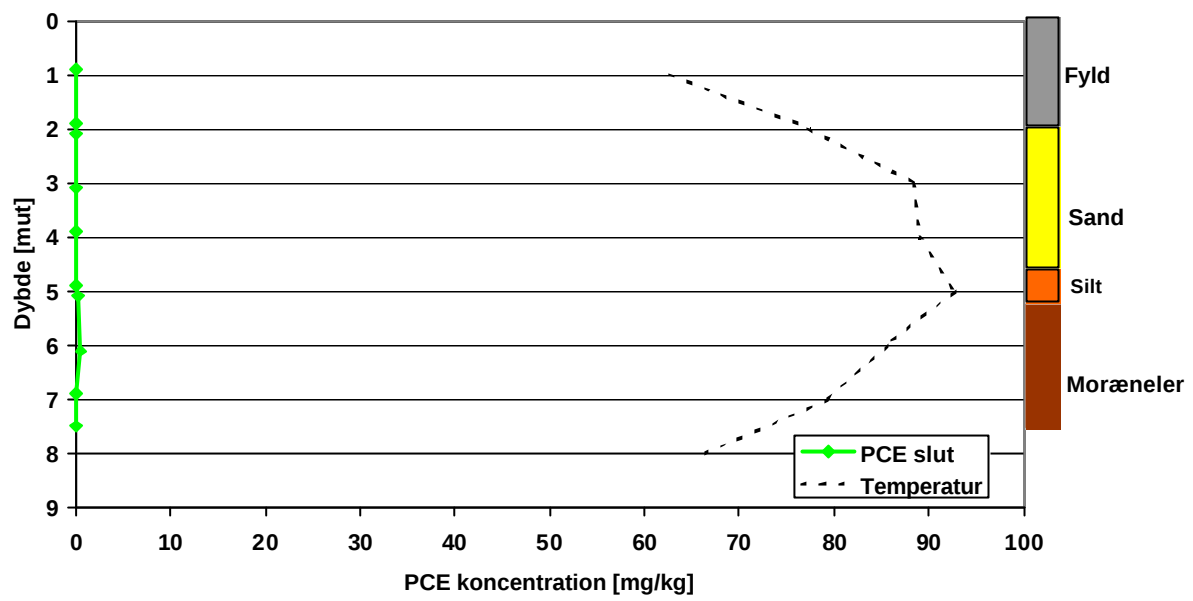
PCE i boring 1 Område I efter oprensning



PCE i boring 2 Område I efter oprensning



PCE i boring 3 Område I efter oprensning



Bilag E

