



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Effektive poreluftstrategier

Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening

Miljøprojekt nr. 1587, 2014

Titel:

Effektive poreluftstrategier
Effektive
poreluftstrategier

Redaktion:

Andreas Houlberg Kristensen
Per Loll
Claus Larsen
Poul Larsen

Dansk Miljørådgivning A/S

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2014

ISBN nr.

978-87-93178-79-3

Ansvarsfraskrivelse:

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.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	6
Sammenfatning	7
Baggrund og formål	7
Undersøgelsen	7
Hovedkonklusioner	7
Projektresultater	8
Summary	10
Background and study purpose.....	10
The study.....	10
Main results	11
1. Indledning	12
1.1 Baggrund	12
1.2 Formål	13
2. Strategi og metoder	14
2.1 Lokaltetsoversigt.....	14
2.2 Feltundersøgelser.....	15
2.2.1 Poreluftscreening	15
2.2.2 Poreluftmålinger	16
2.3 Databehandling.....	16
3. Konceptuel forståelse af prøve-tagningsvolumener og forurenings- udbredelse	17
3.1 Poreluftvolumen og jordvolumen	17
3.1.1 Prøvetagning under homogene forhold	17
3.1.2 Prøvetagning under inhomogene forhold	19
3.2 Naturlig nedbrydning af poreluftforurening	20
4. Erfaringer og resultater	21
4.1 Poreluftscreening vs. akkrediterede analyser	21
4.1.1 Chlorerede opløsningsmidler	21
4.1.2 Oliekomponenter	22
4.2 Horisontal afgrænsning vha. poreluftscreening	23
4.2.1 Chlorerede opløsningsmidler	23
4.2.2 Oliekomponenter	25
4.3 Vertikal afgrænsning vha. poreluftscreening.....	26
4.4 Hensigtsmæssig prøveafstand og prøvetæthed	28
4.4.1 Jordforureningens influensradius.....	28
4.4.2 Estimering af arealvægtet middelkoncentration	30
4.4.3 Korrelationsafstand mellem målepunkter	30
4.4.4 Sammenfatning af dataanalyser	31
4.5 Dynamiske undersøgelser	33
4.6 Mulige fejlkilder	34
4.6.1 4.6.1 Interne kilder i indeklimaet	34
4.6.2 4.6.2 Udvaskning af dampe på ubefæstede arealer	34

4.6.3	4.6.3 Interferens fra metangas	35
5.	Vurderinger og anbefalinger	36
5.1	Poreluftscreening som undersøgelsesværktøj	36
5.2	Dynamiske undersøgelser	36
5.3	Anbefalinger til fremtidige undersøgelser	37
5.3.1	Karakterisering af kendt kilde	37
5.3.2	Afgrænsning af en kendt kilde	38
5.3.3	Lokalisering af ukendte kilder	38
	Referencer	39
	Bilag A: Fremgangsmåde for poreluftscreening og poreluftmålinger.....	41
	Bilag B: Fremgangsmåde for databehandling.....	43
B.1	Indledende databehandling.....	43
B.1.1	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger.....	43
B.1.2	Afgrænsning af fokusområde.....	43
B.1.3	Fastlæggelse af det "sande" forureningsniveau	43
B.2	Percentile-t bootstrapping (metode 1)	44
B.2.1	Målparameter for analysen.....	44
B.1.2	Fremgangsmåde.....	44
B.3	Variogramanalyse (metode 2)	45
B.3.1	Målparameter for analysen.....	45
B.3.2	Fremgangsmåde.....	46
	Bilag C: Halsvej	50
C.1	Baggrund og datagrundlag	50
C.1.1	Ejendomsbeskrivelse	50
C.1.2	Indledende undersøgelse.....	51
C.1.3	Udvidet undersøgelse.....	51
C.2	Indledende databehandling.....	52
C.2.1	Valg af forureningskomponent og fokusområde	52
C.2.2	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger	52
C.2.2	Konturplots.....	53
C.3	Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	55
C.3.1	Fremgangsmåde.....	55
C.3.2	Resultater	55
C.4	Metode 2 (variogramanalyse).....	56
C.4.1.	Fremgangsmåde.....	56
C.4.2	Resultater	56
C.4	Samlede resultater	57
	Bilag D: Gammel Østergade	58
D.1	Baggrund og datagrundlag	58
D.1.1	Ejendomsbeskrivelse	58
D.1.2	Indledende undersøgelse.....	59
D.1.3	Udvidet undersøgelse.....	59
D.2	Indledende databehandling.....	59
D.2.1	Valg af forureningskomponent og fokusområde	59
D.2.2	Konturplots	60
D.2.3	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger	62
D.3	Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	63
D.3.1	Fremgangsmåde.....	63
D.3.2	Resultater	63
D.4	Metode 2 (variogramanalyse).....	64

D.4.1.	Fremgangsmåde	64
D.4.2	Resultater	64
D.4	Samlede resultater	65
Bilag E: Kajerødvej		66
E.1	Baggrund og datagrundlag	66
E.1.1	Ejendomsbeskrivelse	66
E.1.2	Udvidet undersøgelse.....	66
E.2	Indledende databehandling.....	67
E.2.1	Valg af forureningskomponent og fokusområde	67
E.2.2	Konturplots	68
E.2.3	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger	69
E.3	Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	70
E.3.1	Fremgangsmåde	70
E.3.2	Resultater	70
E.4	Metode 2 (variogramanalyse).....	71
E.4.1.	Fremgangsmåde	71
E.4.2	Resultater	71
E.4	Samlede resultater	72
Bilag F: Databehandling, Møllevej		73
F.1	Baggrund og datagrundlag	73
F.1.1	Ejendomsbeskrivelse	73
F.1.2	Udvidet undersøgelse.....	73
F.2	Indledende databehandling.....	74
F.2.1	Valg af forureningskomponent og fokusområde	74
F.2.2	Konturplots	74
F.2.3	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger	75
F.3	Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	76
F.3.1	Fremgangsmåde	76
F.3.2	Resultater	76
F.4	Metode 2 (variogramanalyse).....	77
F.4.1.	Fremgangsmåde	77
F.4.2	Resultater	77
F.4	Samlede resultater	78
Bilag G: Houvej.....		79
G.1.1	Ejendomsbeskrivelse	79
G.1.2	Udførte undersøgelser	79
G.2	Indledende databehandling.....	80
G.2.1	Valg af forureningskomponent og fokusområde	80
G.2.2	Konturplots	80
G.2.3	Poreluftscreening vs. poreluftmålinger	82
G.3	Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	83
G.3.1	Fremgangsmåde.....	83
G.3.2	Resultater	83
G.4	Metode 2 (variogramanalyse).....	84
G.4.1.	Fremgangsmåde	84
G.4.2	Resultater	84
G.4	Samlede resultater	85

Forord

Denne rapport omhandler optimering af prøvetagningsstrategier ved undersøgelse af poreluftforureninger i den terrænnære umættede zone.

Projektet er baseret på fem forurenede lokaliteter, hvor der er udført hhv. poreluftscreening (med ppbRAE) og traditionelle poreluftmålinger med akkrediterede poreluftanalyser. Ved undersøgelse er der opnået en række erfaringer med anvendelse af poreluftscreening, som præsenteres i projektet. Derudover er der udført en statistisk efterbearbejdning af data med henblik på at opstille anbefalinger for hvordan man med færrest mulige målinger kan opnå størst mulig sikkerhed for at lokalisere, afgrænse og/eller karakterisere en poreluftforurening korrekt.

Målgruppen for projektrapporten er rådgivere og medarbejdere hos regioner og kommuner, der beskæftiger sig med poreluftundersøgelser på forurenede lokaliteter. Det er derfor tilstræbt at perspektivere rapportens hovedpointer i en række anbefalinger (kapitel 5), der kan inddrages i det daglige arbejde.

Projektet er gennemført af Dansk Miljørådgivning A/S (DMR) i perioden september 2010 til januar 2013. Projektet er udført under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram og i samarbejde med Region Nordjylland, der desuden har stillet tre ud af fem forsøgslokaliteter til rådighed. Derudover har Region Hovedstaden bidraget med de to resterende lokaliteter.

Tak til Grontmij, NIRAS og COWI for udlevering af baggrundsmateriale og tidligere undersøgelsesresultater fra de tre forsøgslokaliteter i Region Nordjylland.

Sammenfatning

Baggrund og formål

De senere år er akkrediterede poreluftanalyser i stigende grad suppleret med en såkaldt poreluftscrening i området med forventet poreluftforurening - bl.a. for at kunne opnå en højere prøvetæthed. Screeningen kan f.eks. foretages med ppbRAE, der giver et semikvantitativt mål for det samlede indhold af flygtige organiske stoffer i den udtagne poreluft. Efter screeningen udtages et udvalgt antal poreluftprøver til akkrediteret analyse af poreluftforureningens sammensætning og koncentrationsniveau.

Poreluftscrening med on-site brug af feltudstyr har den fordel, at nye målepunkters placering kan fastlægges løbende på baggrund af de foreløbige resultater. Man opnår på denne måde en dynamisk arbejdsproces, hvor der er mulighed for at justere prøvetagningsprogrammet løbende.

Screeningsprøver til anvendelse med ppbRAE udtages oftest som 2,5 L poreluft, mens prøver til akkrediteret analyse ofte udtages som 100 L poreluft (10 L for nogle forureningsstoffer).

Det lille prøvevolumen anvendt ved screeningen tillader, at der kan foretages en mere præcis nuancering af forureningsniveauet og kildeplaceringen både horisontalt og vertikalt. På den anden side kan et større prøvevolumen være en fordel når der eftersøges kilder med ukendt placering.

Formålet med projektet er at præsentere en dynamisk prøvetagningsstrategi baseret på poreluftscrening med ppbRAE. Prøvetagningsstrategien anvendes på de fem forsøgslokaliteter, hvor der er påvist poreluftforurening med chlorerede opløsningsmidler eller oliekomponenter.

Undersøgelsen

I forbindelse med projektet er der foretaget poreluftscrening med ppbRAE på fem kortlagte lokaliteter. Tre af de fem forsøgslokaliteter er forurenede med chlorerede opløsningsmidler og to med oliekuilbrinter.

Som dokumentation af poreluftscreningen er der på alle lokaliteter efterfølgende foretaget akkrediterede poreluftanalyser til detaljeret karakterisering af den aktuelle poreluftforurening.

På baggrund af de indsamlede data er der gennemført en række dataanalyser med henblik på at undersøge hvilken tæthed af poreluftprøver, der er hhv. påkrævet og tilstrækkeligt, afhængigt af undersøgelsesformålet.

Der opstilles anbefalinger til metodevalg, prøvevolumen, prøvetæthed og hensigtsmæssig indbyrdes afstand mellem målepunkterne ift. tre forskellige undersøgelsesformål:

- Karakterisering af en kendt forureningskilde.
- Afgrænsning af en kendt forureningskilde.
- Lokalisering af ukendte kilder.

Hovedkonklusioner

Poreluftundersøgelser bør udføres med udgangspunkt i den konceptuelle forståelse af forureningssituationen, de geologiske forhold og eventuelle præferentielle spredningsveje og bør

målrettes det konkrete undersøgelsesformål, både hvad angår metodevalg, prøvevolumen, prøvetæthed og indbyrdes afstand mellem målepunkterne.

Poreluftscreening med opsamling af 2,5 L poreluft og analyse med ppBRAE kan være et nyttigt redskab til at foretage dynamiske poreluftundersøgelser, og kan benyttes til strategisk udvælgelse af færre prøvepunkter til akkrediteret kemisk analyse.

I terrænnære jordlag (op til 2 meters dybde) er der klare indikationer på at chlorerede opløsningsmidler spreder sig længere væk fra jordforureningen end oliekomponenter. Dermed kan ukendt jordforurening med chlorerede opløsningsmidler opdages fra større afstand med poreluftprøver end det er tilfældet for jordforureninger med oliekomponenter. Derfor kræver undersøgelser på olieforurenede lokaliteter – som udgangspunkt – større prøvetæthed end undersøgelser på lokaliteter forurenede med chlorerede opløsningsmidler.

Prøvevolumenet bør, uanset analysemetode (feltinstrument eller akkrediteret analyse), vælges i forhold til undersøgelsesformålet. Således er små volumener (2,5-50 L) bedre egnede til såvel horisontal som vertikal karakterisering og afgrænsning af kendte kilder, mens større prøvevolumener (100 L), alt andet lige, er bedre egnede til lokalisering af kilder med ukendt placering. Ved valg af mindre prøvevolumen skal det sikres, at analysernes detektionsgrænser lever op til kravene til undersøgelsen.

Projektresultater

Grundet forskelle i analysemetoder og prøvevolumener kan der ikke forventes entydige lineære sammenhænge imellem resultater opnået ved poreluftscreening med ppBRAE (2,5 L poreluft) og akkrediterede analyseresultater efter opsamling på kulrør (100 L poreluft). Da ppBRAE'en er udstyret med en uspecifik PID-detektor kan der forekomme udslag på flygtige stoffer som ikke kan måles i de kemiske analyser for chlorerede opløsningsmidler.

For chlorerede opløsningsmidler kan der generelt forventes en bedre lineær sammenhæng end for oliekomponenter; dog med forbehold for fysiske forhold der leder til store forskelle i det jordvolumen som poreluften opsamles fra. Forskelle i opsamlingszonen kan lede til såvel over- som underestimering af de reelle poreluftkoncentrationer i målepunktet, både ved små og store prøvevolumener.

På trods af metodeforskelle og forskelle i opsamlingsvolumener er der generelt opnået gode overensstemmelser i det relative forureningsbillede opnået ved poreluftscreening med ppBRAE og ved akkrediterede poreluftanalyser for forurenningernes hovedkomponenter på de enkelte undersøgte lokaliteter. Med udgangspunkt heri vurderes poreluftscreening med opsamling af 2,5 L poreluft og måling med ppBRAE at være et nyttigt redskab til at foretage dynamiske poreluftundersøgelser. Alle undersøgelser bør dog tage udgangspunkt i den konceptuelle forståelse af forurenings- og prøvetagningssituationen.

En analyse af jordforureningens influensradius mht. en målbar forureningspåvirkning af poreluften på de fem lokaliteter viser, at jordforurening med chlorerede opløsningsmidler (PCE) kan forventes at påvirke poreluften målbart (> 20 % af kildekonzentration) i en radius uden for jordforureningen på 2-6 meter, mens radius udenfor for ældre jordforureninger med olie forventes at være mindre end 3-4 meter, hvor der er konstateret mindre end 10 % af kildekonzentrationen.

En geostatistisk analyse af korrelationsafstande for de undersøgte poreluftforureninger viser, at der ved undersøgelse for ukendte kilder opnås en maksimering af den viden der opnås – uden at der opstår huller i informationsbilledet – ved en prøveafstand på i størrelsesordenen 2-6 meter for chlorerede opløsningsmidler, og formentlig ved < 1,5 meter for olieforureninger (meget usikkert).

Der er gennemført en statistisk analyse af usikkerheden på den arealvægtede middelværdi som funktion af prøvetætheden på de fem lokaliteter. Denne analyse viser, at balancepunktet imellem stor statistisk sikkerhed i estimatet på den arealvægtede middelværdi og antallet af målepunkter (dvs. ressourceforbrug) ligger i størrelsesordenen 2,5-12 poreluftprøver pr. 100 m², med en overvægt på omkring 5-10 prøver pr. 100 m². Der er en tendens til at undersøgelser for oliekomponenter ligger i den høje ende, mens undersøgelser for chlorerede opløsningsmidler ligger i den lave ende.

Summary

Background and study purpose

In later years there has been an increasing use of on-site soil vapor screening in addition to the ordinary soil vapor sampling with analyses at a chemical lab. One of the reasons for this is that it is possible to obtain a higher sample density. The screening can be performed with e.g. a ppbRAE yielding a semi quantitative analytical result for the combined content of organic vapors in the sample. Based on the screening results it is possible to make an informed selection of sampling points for regular soil vapor sampling and external analysis.

On-site soil vapor screening, using field equipment, has the advantage that new sampling points can be selected based on results from already sampled points in a dynamical work flow.

Screenings samples used for ppbRAE analysis is often 2.5 liters in volume whereas samples for external analysis are often 100 liters (or 10 liters for some components).

The small sample volume used during the screening will often permit a more precise determination of the contaminant level and the source delineation both horizontally and vertically. A large sample volume, on the other hand, can often be of value when the investigation purpose is finding unknown source areas.

The specific purpose of this project is to present a dynamical sampling strategy based on soil vapor screening using a ppbRAE. The strategy is applied to five locations with known contamination with chlorinated solvents or petroleum hydrocarbons.

Based on the results, a number of analyses are performed with the purpose of investigating the sampling density yielding the most value for our money. Lastly, we recommend sampling strategies aimed at common investigation purposes.

The study

The project is based on soil vapor screening, using a ppbRAE, at five contaminated sites. Three sites are contaminated with chlorinated solvents and two sites with petroleum hydrocarbons.

As documentation for the screening results a number of sam-pling points have been chosen for soil vapor sampling with external lab analyses at each site.

Based on the collected data we have performed a number of analyses aiming at examining which sampling density is required and necessary, depending on the specific study purposes.

We recommend choice of sampling strategy, sampling volume, sample density and sample spacing with regard to three different investigation purposes:

- Characterization of a known source.
- Delineation of a known source.
- Localization of unknown sources.

Main results

Soil vapor investigations should always be performed with the conceptual understanding of the contamination, the geology and possible preferential transport pathways in mind. The investigation should be tailored to suit the specific investigation purpose with regard to the methodological choices, sampling volumes, sample density and sample spacing.

Soil vapor screening using 2.5 liter vapor samples for ppbRAE analysis can be a very useful tool for dynamical soil vapor investigations and can be used for strategical selection of samples for external lab analysis, hereby reducing analytical costs.

In surface soils (up to 2 meter depth bgs.) we have seen clear evidence that chlorinated solvents travel further away from soil contamination than petroleum hydrocarbons. Hence, unknown contamination with chlorinated solvents can be spotted from a greater distance away (at a given sample volume) than soil contamination with petroleum hydrocarbons. As a consequence, site investigations at hydrocarbon release sites require larger sampling densities compared to investigations at chlorinated solvent sites.

No matter what analysis method is used, the sample volume should be selected according to the investigation purpose. Smaller volumes (2.5-50 liters) are better suited for horizontal and vertical characterization and delineation of known sources whereas larger volumes (100 liters) are better suited for localizing unknown sources. When the choice of a smaller sample volume is made, the increased analytical detection limits should be considered in connection to the investigation purpose.

1. Indledning

1.1 Baggrund

Jord- og grundvandsforurening med flygtige forureningskomponenter kan udgøre en potentiel risiko for indtrængning af forurenede poreluft til nærliggende bygninger. Undersøgelser af indeklimarisikoen baseres som regel på udtagning af poreluftprøver i terræn-nære jordlag eller under bygningen. Prøverne udtages ofte som 100 L poreluft (10 L for nogle komponentgrupper), der opsamles på kulrør og sendes til akkrediteret analyse på et eksternt laboratorium /1/. Resultaterne har til formål enten at afgrænse en allerede konstateret forurening eller at lokalisere og karakterisere en forurening med ukendt placering /2/.

Antallet af poreluftmålinger fastsættes normalt ud fra en vurdering af det areal, der ønskes undersøgt samt ud fra den konceptuelle forståelse af de konkrete forhold på lokaliteten, herunder antal og placering af potentielle kilder, transport- og spredningsveje, arealanvendelse mm. Desuden kan det have betydning, hvis der er begrænsede ressourcer til rådighed til den pågældende undersøgelse, og det derfor er nødvendigt at prioritere mellem hvilke områder der ønskes undersøgt.

Hvis antallet af poreluftprøver er lavt øges risikoen for, at poreluftundersøgelsen ikke påviser det korrekte forureningsniveau på lokaliteten eller at undersøgelsen helt overser en væsentlig forurening, /2/, /3/. Det er derfor vigtigt, at indledende forureningsundersøgelser anvender en prøvetagningsstrategi, der afspejler de konkrete forhold og den eksisterende viden om lokaliteten. Hvis man eksempelvis kender den nøjagtige placering af de potentielle kilder på en lokalitet kan antallet af prøver reduceres betydeligt sammenlignet med en situation, hvor mulige forureningskilder kan være hvor som helst på lokaliteten – f.eks. diffus forurening eller ikke-registrerede nedgravede tanke og installationer /2/.

De seneste år er det i stigende grad anvendt at supplere akkrediterede poreluftanalyser med en såkaldt poreluftscreening i området med forventet poreluftforurening. Screeningen kan f.eks. foretages med MIMS eller felt-GC, som kan anvendes ude på lokaliteten til stofspecifikke koncentrationsmålinger i en poreluftprøve, f.eks. /4/. En anden målemetode er ppbRAE eller PID, der giver et semikvantitativt mål for det samlede indhold af flygtige organiske stoffer i den udtagne poreluft /5/, /6/. Efter screeningen udtages typisk et udvalgt antal poreluftprøver til akkrediteret analyse af poreluftforureningens sammensætning og koncentrationsniveau.

Poreluftscreening med on-site brug af feltudstyr har den åbenlyse fordel, at nye målepunkters placering kan fastlægges på baggrund af de foreløbige resultater. Man opnår på denne måde en dynamisk arbejdsproces, hvor der er mulighed for at placere målepunkterne mere hensigtsmæssigt end ved traditionelle undersøgelsesforløb, hvor der ofte går 1-2 uger inden resultaterne foreligger.

Desuden tillader et lille prøvevolumen anvendt ved screeningen, at der kan foretages en mere præcis nuancering af forureningsniveauet og -placeringen både horisontalt og vertikalt. Der kan således f.eks. udføres screening i flere forskellige dybder i samme målepunkt ned til ca. 0,5 meters vertikal afstand, hvilket ikke er hensigtsmæssigt ved udtagning af poreluftprøver á 100 L, hvor den effektive radius for poreluftmålingen er ca. en halv meter /7/. Dybdenuanceringen kan vise, om poreluftkoncentrationerne øges med dybden eller eksempelvis kun findes lige under gulv, hvilket

kan være nyttigt ift. den konceptuelle forståelse af forureningens spredningsmønster; til brug ved både risikovurdering og vurdering af afværgemuligheder.

I forbindelse med dette miljøprojekt er der foretaget poreluft-screening med ppBRAE på fem kortlagte lokaliteter. Som dokumentation af poreluftscreningen er der på alle lokaliteter efterfølgende foretaget akkrediterede poreluftanalyser til detaljeret karakterisering af den aktuelle poreluftforurening. Tre forsøgslokaliteter er forurenede med chlorerede opløsningsmidler og to med oliekuilbrinter.

De udvalgte lokaliteter repræsenterer forskellige hydrogeologiske og kildemæssige forhold og vurderes at repræsentere et bredt udsnit typiske danske lokaliteter.

1.2 Formål

Der præsenteres en dynamisk prøvetagningsstrategi baseret på poreluftscrening med ppBRAE med efterfølgende validering med akkrediterede poreluftanalyser. Prøvetagningsstrategien anvendes på de fem forsøgslokaliteter, hvor der er påvist poreluftforurening med chlorerede opløsningsmidler eller oliekomponenter.

Med udgangspunkt i de opnåede undersøgelsesresultater foretages en række dataanalyser, der har til formål at vise, hvilken tæthed af poreluftprøver, der giver mest viden med færrest mulige målepunkter.

Ud fra dataanalysen opstilles anbefalinger til strategier, der er tilpasset følgende typiske formål ift. undersøgelse af poreluftforurening:

- Karakterisering af en kendt forureningskilde.
- Afgrænsning af en kendt forureningskilde.
- Lokalisering af ukendte kilder.

De anbefalede strategier omfatter metodevalg, prøvevolumen, prøvetæthed samt en hensigtsmæssig indbyrdes afstand mellem målepunkterne.

2. Strategi og metoder

Datagrundlaget for dette projekt er tilvejebragt ved poreluftscreening og poreluftmålinger på fem forsøgslokaliteter. Undersøgelserne er udført i forbindelse med aktuelle supplerende undersøgelsestiltag og på flere af lokaliteterne er der inddraget eksisterende undersøgelsesresultater.

I det følgende er der givet en overordnet præsentation af de fem forsøgslokaliteter. Derudover gives et overblik over de anvendte feltmetoder og den efterfølgende statistiske databehandling. Detaljer vedrørende databehandlingen på de enkelte lokaliteter er vedlagt som bilag C-G.

2.1 Lokalitetsoversigt

Tabel 2.1 viser en overordnet beskrivelse af forsøgslokaliteterne, mens tabel 2.2 opsummerer de fysiske og geologiske forhold på hver lokalitet. Der er tale om sager, hvor der hovedsageligt er konstateret poreluftforurening i sandede aflejringer med potentiel risiko for afdampning til indeklima, men hvor forureningskilden og/eller hotspot-områder ikke er endeligt lokaliseret og afgrænset.

TABEL 2.1 OVERSIGT OVER FORSØGSLOKALITETER INDDRAGET I PROJEKTET.

Sagsnavn	Undersøgt aktivitet	Primær forurening	Forureningskilde	Undersøgelsesformål
Halsvej	Renseri (1973-1993)	PCE	Spild ved rensemaskine og kloak	Karakterisering og afgrænsning
Gammel Østergade	Renseri (1939-1980'erne)	PCE	Ukendt	Karakterisering og afgrænsning
Kajerødvej	Vaskeri/renseri (1964-1977)	PCE	Ukendt	Screening, karakterisering og afgrænsning
Møllevej	Vognmandsforretning og -metalværksted (1965-1998)	TVOC	Ukendt	Screening, karakterisering og afgrænsning
Houvej	Produktion af vinduer og døre (1975-nu)	TVOC	Spildbakke under	

Forsøgslokaliteterne omfatter tre sager, hvor drift af renseri har givet anledning til forurening med især perchlorethylen (PCE). Derudover er to lokaliteter forurenede med olieprodukter med totalindhold af kulbrinter (TVOC) som primær forureningskomponent.

TABEL 2.2 GEOLOGISKE OG FYSISKE FORHOLD PÅ DE FEM FORSØGSLOKALITETER.

Sagsnavn	Prøvetagningsområde	Primær jordtype i den øvre umættede zone	Afstand til grundvand
Halsvej	Div. lagerrum med betongulv	Sand med indslag af grus og muld	0,5-1,0 m
Gammel Østergade	Flisebelagt P-areal	Ca. 1 m fyldsand, hvorefter der træffes 1-2 m sand efterfuldt af ler	3,0-4,0 m
Kajerødvej	Kælder med betongulv og as-falt-/flisebelagte P-arealer	Ca. 0,3-0,6 m fyldsand, der efterfølges af sandet moræneler	Ca. 17 m
Møllevej	Erhverv/bolig med betongulv	Op til 2,2 m fyldlag bestående af gruset sand	3,1-4,3 m

2.2 Feltundersøgelser

2.2.1 Poreluftscreening

Ved poreluftscreening udtages normalt et relativt lille prøvevolumen fra den ønskede dybde i jorden (typisk ca. 2,5 L), hvorefter der i felten foretages en semikvantitativ bestemmelse af flygtige organiske stoffer i poreluften – i dette projekt med ppBRAE. Det højeste udslag noteres og antages at repræsentere niveauet af flygtige forureningskomponenter i poreluftprøven. Fremgangsmåden ved poreluftscreeningen er beskrevet i bilag A.

Poreluftscreeningen danner typisk grundlag for udvælgelse af målepunkter til akkrediterede poreluftanalyser ved opsamling af poreluft på kulrør. Man kan således drage en parallel til anvendelsen af PID-måler (Photoionization Detector) ved udvælgelse af jordprøver til akkrediteret analyse fra miljøtekniske boringer.

Poreluftscreeningen på de fem forsøgslokaliteter er udført som beskrevet i bilag A. Screeningen er indenfor bygninger typisk foretaget umiddelbart under betongulv (evt. under kældergulv). På udendørsarealer er prøverne udtaget via poreluftspyd nedbanket til de ønskede dybder; typisk 0,5, 1,0, 1,5 og 1,8 meter under terræn. Udstyr anvendt ved poreluftscreeningen er sammenfattet i tabel 2.3.

Poreluftscreening med ppBRAE er semikvantitativ og er ikke akkrediteret. Derfor foretages normalt en validering af screeningsresultaterne ved udtagning af poreluftprøver til akkrediteret analyse.

TABEL 2.3 Udstyr anvendt ved poreluftscreening.

Udstyr
ppBRAE 3000
PID-måler (MiniRAE 2000) - anvendt ved udslag højere end ca. 6 ppm
Poreluftspyd (1,8 eller 2,1 meter)
SKC poreluftpumpe (1 L/min)
Vakuumboks (ca. 5 L)
Slanger, rilsanposer, mv.

2.2.2 Poreluftmålinger

På de fem forsøgslokaliteter er der udtaget et antal poreluftprøver til akkrediteret analyse, svarende til mellem ca. 20 og 100 % af antallet af screeningspunkter. Poreluftprøverne er udtaget som beskrevet i bilag A, typisk ved opsamling af 100 L poreluft på kulrør. Prøverne er analyseret for oliedulbrinter (herunder TVOC) eller chlorerede opløsningsmidler (herunder PCE og TCE).

2.3 Databehandling

Som udgangspunkt for databehandlingen på hver forsøgslokalitet antages det, at det tilvejebragte datagrundlag er tilstrækkeligt beskrivende for det faktiske forureningsbillede på de fem forsøgslokaliteter.

I projektet er der benyttet tre forskellige analyser for at vurdere hensigtsmæssige prøveafstande og prøvetagningstætheder på hver enkelt lokalitet:

1. Poreluftens forureningsindhold som funktion af den radiære afstand fra punktet med det højeste indhold. Denne analyse afspejler poreluftforureningens effektive radius omkring jordforureningerne.
2. Usikkerheden på poreluftkoncentrationens arealvægtede middelværdi som funktion af prøvetætheden. Usikkerheden bliver mindre når prøvetætheden øges, men den ekstra sikkerhed koster ressourcer. Der defineres et balancepunkt imellem usikkerhed og prøvetæthed.
3. Graden af ny information som funktion af prøveafstanden. Punkter udtaget meget tæt på hinanden indeholder et informationsoverlap, mens forurening måske overses, hvis punkterne placeres langt fra hinanden.

De udførte dataanalyser er anvendt retrospektivt, altså som skrivebordsanalyser efter at undersøgelserne er udført. Formålet har været at uddrage tendenser og erfaringer, der kan benyttes i forhold til fremtidige sager.

Bilag B indeholder en beskrivelse af den anvendte tilgang til databehandlingen samt en forklaring af de anvendte statistiske metoder (analyse 2 og 3). Den konkrete statistiske databehandling på hver enkelt forsøgslokalitet, samt resultaterne heraf, er beskrevet i bilag C-G.

3. Konceptuel forståelse af prøve-tagningsvolumener og forurenings-udbredelse

En vigtig forudsætning for at kunne gennemføre en effektiv undersøgelse af en given poreluftforurening er en god konceptuel forståelse af de forhold der gør sig gældende ved valg af prøvetagningsstrategi.

3.1 Poreluftvolumen og jordvolumen

Hidtidige erfaringer med poreluftscreening viser generelt en tendens til at der opnås høje udslag på ppbRAE når der efterfølgende påvises høje forureningskoncentrationer i akkrediterede poreluftmålinger fra samme målepunkt, og omvendt – altså en overordnet overensstemmelse imellem resultaterne opnået ved de to metoder /6/.

Ved poreluftscreening, som anvendt i dette projekt, opsamles der først ca. 2,5 L poreluft til screening med ppbRAE, mens der efterfølgende typisk opsamles 100 L poreluft på kulrør til kemisk analyse for indhold af hovedforureningskomponenterne, dvs. chlorerede opløsningsmidler eller flygtige oliekuilbrinter.

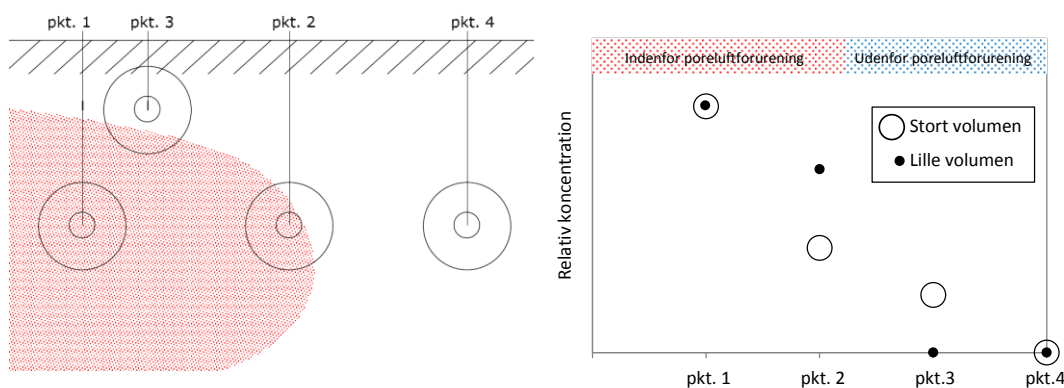
Med udgangspunkt i JAGG-modellens standardværdier for luftfyldt porehulrum svarer 2,5 L poreluft til, at prøven udtages fra et jordvolumen på ca. 8-25 L, mens 100 L poreluft svarer til poreluften i et jordvolumen på ca. 330-1.000 L.

Der er altså ikke tale om to analyser udført på det samme luftvolumen, hvorfor der heller ikke kan forventes en fuldstændig overensstemmelse imellem de opnåede niveauer; specielt ikke hvis der er rumlige forskelle i forureningsniveauerne indenfor afstande svarende til prøvevolumenerne for de forskellige prøvetagninger.

Alt andet lige vil et mindre prøvevolumen være bedst egnet til at karakterisere forureningsniveauet i et givent punkt og en given dybde, mens et større prøvevolumen vil kunne tiltrække mere ren eller forurennet poreluft fra en større afstand og medføre en udglatning af koncentrationsbilledet.

3.1.1 Prøvetagning under homogene forhold

Ovenstående principper er illustreret i figur 3.1 for homogene geologiske forhold.



FIGUR 3.1 RELATIV KONCENTRATION OPNÅET MED HHV. STORT OG LILLE PRØVEVOLUMEN I FIRE PORELUFTPUNKTER, PLACERET FORSKELLIGT IFT. PORELUFTFORURENINGEN (HOMOGEN GEOLOGI).

Som det ses af grafen i figur 3.1 opnås der samstemmende resultater, uanset om man udtager et stort eller et lille poreluftvolumen, for pkt. 1 og 4, der enten er placeret helt inde i poreluftforureningen eller helt udenfor.

Hvis målepunktet findes lige inden for poreluftforureningen (pkt. 2) vil et stort poreluftvolumen tiltrække ren poreluft og medføre en fortynding af den reelle koncentration i prøvetagningspunktet. På samme måde kan udtagning af store poreluftvolumener lige udenfor en poreluftforurening (pkt. 3) medføre tiltrækning af forurenede poreluft som reelt ikke findes i punktet.

Et (forholdsvist) lille prøvevolumen er således bedst egnet til at beskrive store kontraster i forureningsniveauer og dermed til at afgrænse og karakterisere en given poreluftforurening. Analysemetoden (ppbRAE, MIMS, felt-GC eller akkrediteret analyse) er i princippet underordnet, når blot krav til følsomhed/detektionsgrænser sættes i forhold til den efterfølgende anvendelse af resultaterne.

Modsat vil et større prøvevolumen mindske risikoen for helt at overse en jordforurening med en given porelufts sky omkring sig, hvorfor et forholdsvist stort prøvevolumen alt andet lige vil være bedre egnet til en screening for tilstedeværelsen af kilder med ukendt beliggenhed.

Tabel 3.1 viser diameteren af prøvetagningszonen i homogen jord for udvalgte prøvevolumener.

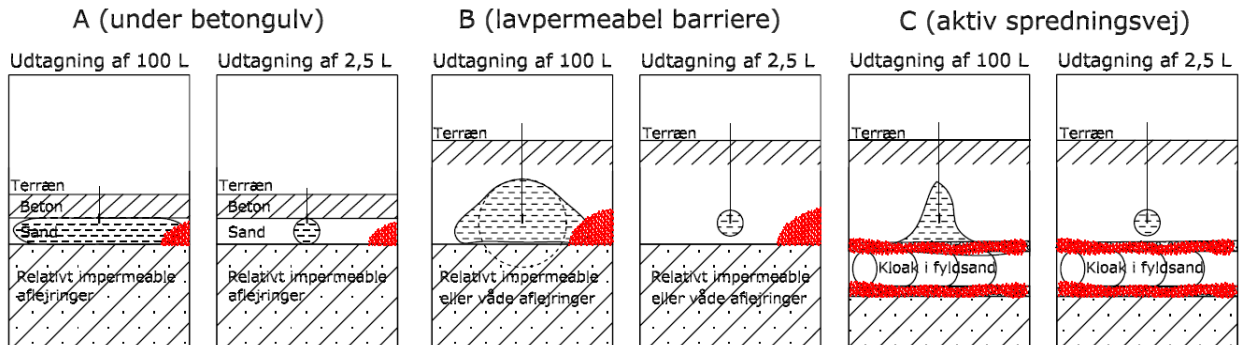
TABEL 3.1: DIAMETER AF PRØVETAGNINGSZONE I HOMOGEN JORD VED UDTAGNING AF ET PORELUFTVOLUMEN PÅ HHV. 2,5, 25 OG 100 L. PRØVETAGNINGSZONEN ANTAGES AT VÆRE KUGLEFORMET OG DEN LUFTFYLDTE PORØSITET I JORDEN ER ANTAGET LIG 10-30 %, JF. JAGG.

Prøvevolumen (poreluft)	Prøvetagningszonen (jordvolumen)	Diameter af kugleformet jordvolumen
2,5 L	8-25 L	25-36 CM
25 L	83-250 L	54-78 CM
100 L	330-1.000 L	86-124 CM

Bemærkelsesværdigt ift. resultaterne i tabel 3.1 er, at diameteren af prøvetagningszonen for 100 L poreluft i homogen jord er i størrelsesordenen 1 meter, hvilket muligvis kan være problematisk hvis prøven skal danne grundlag for en risikovurdering og henføres til en bestemt dybde i f.eks. JAGG-modellen. Her vurderes det at kunne være relevant at udtage et mindre prøvevolumen med en mere veldefineret prøvedybde til følge.

3.1.2 Prøvetagning under inhomogene forhold

Figur 3.2 viser tre konceptuelle modeller for inhomogene scenarier, hvor koncentrationen i den udtagne poreluft kan være påvirket af prøvevolumenet. Der er taget udgangspunkt i et prøvevolumen på hhv. 100 L og 2,5 L, svarende til typiske prøvevolumener ved hhv. en traditionel poreluftmåling og poreluftscreening, som gennemført i undersøgelserne i forbindelse med dette projekt.



FIGUR 3.2 KONCEPTUELLER MODELLER FOR INHOMOGENE SCENARIER, HVOR PRØVEVOLUMENET KAN PÅVIRKE DEN KONCENTRATION, DER BESTEMMES FOR DEN UDTAGNE PORELUFT.

Model A illustrerer en situation, hvor poreluftprøven udtages direkte under betongulv i et tyndt lag af relativt permeable aflejringer; f.eks. et afretningslag af sand, et kapillarbrydende lag eller udtørrede jordlag lige under betonen. Under det permeable lag er der nogle forholdsvist impermeable aflejringer; f.eks. moræneler med højere fugtighed end i laget lige under betonen. Hvis det antages, at der er tale om et afretningslag af sand med en porøsitet på 20 % vil en prøvevolumen på 100 L modsvare en effektiv diameter for poreluftprøven på omkring 2,5 meter, mens et prøvevolumen på 2,5 L vil modsvare en diameter på ca. 40 cm. Den større eller mindre prøvetagningsdiameter kan have betydning for om der konstateres poreluftforurening i prøvetagningspunktet eller ej.

Model B vil være gældende hvis der er en lavpermeabel geologisk barriere under poreluftforureningen eller hvis der er terrænnært grundvand, der begrænser den vertikale udbredelse af poreluftforureningen. Her kan prøvetagningsvolumenet for et prøvevolumen på 100 L blive deformeret og muligvis være afgørende for om der konstateres poreluftforurening i prøvetagningspunktet eller ej.

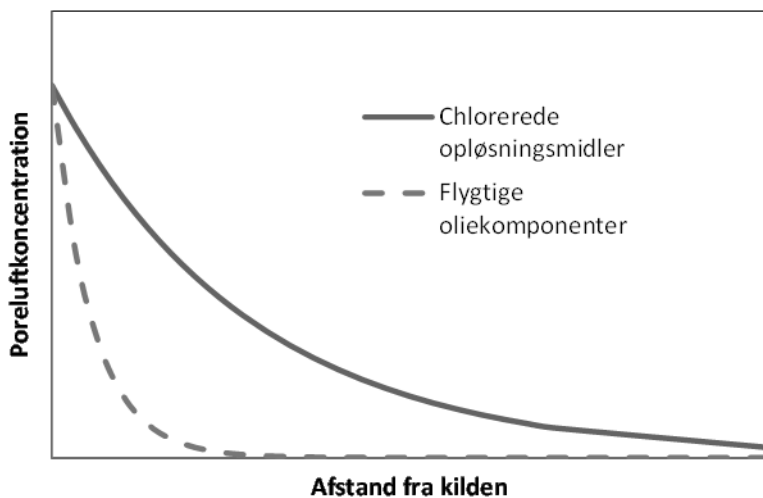
Model C repræsenterer udtagning af poreluft i jordzoner med højpermeable geologiske lag/slirer eller aktive spredningstracéer som kloakken vist i figuren. Prøvetagning under disse forhold kan være problematisk, idet man reelt ikke ved hvor poreluften udtages fra. Eksempler på aktive spredningsveje i den umættede zone kan være kloakker, dræn, ledningstracéer, sand- eller grusslirer samt rødder. Forureningssituationen kan for dette inhomogene scenarium også være vendt om, således at forureningen findes i de geologiske aflejringer omkring tracéer, permeable lag eller lign, således at det store prøvevolumen fører til, at der tiltrækkes ren luft, selvom punktet reelt ligger i forurenede aflejringer.

Ud fra de konceptuelle modeller i figur 3.2 kan det konkluderes, at et prøvevolumen på 100 L ofte ikke kan betragtes som en punktmåling, idet der tiltrækkes poreluft fra andre jordzoner gennem højpermeable åbninger eller lagdelinger i jorden. Dette kan medføre en middelkoncentration i den udtagne poreluft, der repræsenterer både ren og forurenede luft blandet sammen under prøvetagningen, hvilket kan være problematisk i forbindelse med en afgrænsning – men som omvendt kan være en fordel i forbindelse med en screening til lokalisering af eventuelle ukendte kilder.

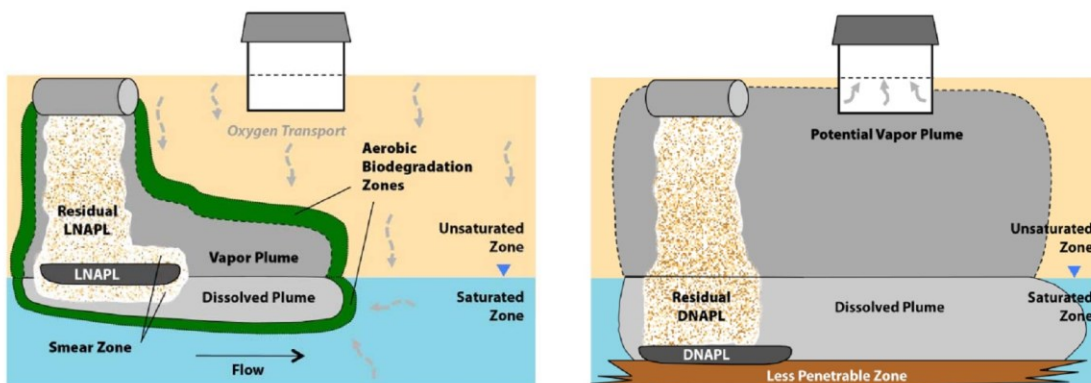
3.2 Naturlig nedbrydning af poreluftforurening

Betydningen af naturlige nedbrydningsprocesser for udbredelsen af poreluftforureninger afhænger især af forureningstypen. Oliekomponenter vil generelt nedbrydes i et vist omfang af de bakterier, der findes naturligt i jorden /8/, /10/. Nedbrydningen foregår i vandfilmen på jordpartiklerne, hvor koncentrationen af opløst forurening primært afhænger stoffernes vandopløselighed. Særligt i terrænnære aflejringer vil tilførslen af atmosfærisk ilt normalt tillade en effektiv aerob nedbrydning, der kan reducere den afstand som oliedampene spredes fra kilden /10/, /11/.

I modsætning oliekomponenter vil chlorerede opløsningsmidler (PCE og TCE) typisk kun blive nedbrudt under anaerobe forhold – og sjældent i den umættede zone /12/. Chlorerede opløsningsmidler i den umættede zone forventes derfor at spredes i større afstand fra kilden end flygtige oliekomponenter /3/. Dette er illustreret i figur 3.3. De to forskellige forureningstyper er desuden beskrevet konceptuelt i figur 3.4.



FIGUR 3.3 KONCENTRATIONSPROFIL, DER BESKRIVER HVORDAN PORELUFTKONCENTRATIONEN I EN UMÆTTET ZONE MED HHV. OLIEKOMponentER OG CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER FORVENTES AT VARIERE SOM FUNKTION AF AFSTANDEN TIL KILDEN.



FIGUR 3.4 SIMPLICERET KONCEPTUEL MODEL AF SPREDNING AF FLYGTIG FORURENING PÅ HHV. EN OLIEFORURENET LOKALITET (TIL VENSTRE) OG EN LOKALITET FORURENET MED CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER /13/.

På baggrund af ovenstående vil vi forvente, at lokalisering og karakterisering af forureninger med oliestoffer generelt vil kræve flere målepunkter end tilsvarende forureninger med chlorerede opløsningsmidler.

4. Erfaringer og resultater

I det følgende gennemgås og diskuteres resultater af de udførte undersøgelser og den efterfølgende databehandling. Resultaterne fra hver enkelt forsøgslokalitet er desuden beskrevet i bilag C til G.

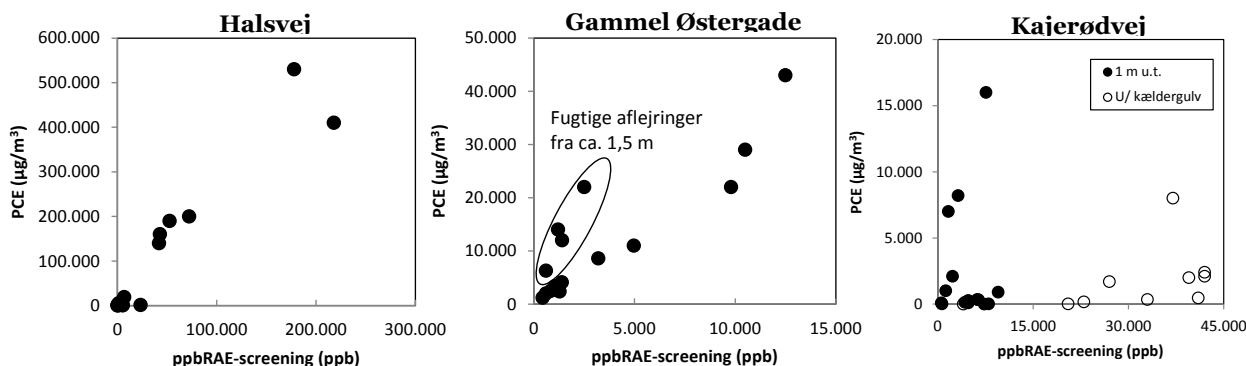
4.1 Poreluftscreening vs. akkrediterede analyser

Som beskrevet i afsnit 3.1 kan man ikke nødvendigvis forvente en entydig lineær sammenhæng mellem akkrediterede analyseresultater og resultaterne af en poreluftscreening med ppbRAE; dels da der er forskel på det poreluftvolumen der analyseres på og dels på analysernes grad af specificitet.

I det følgende er der lavet en direkte (1D) sammenligning af data fremkommet med de to metoder i samme målepunkt, hvor eventuelle afvigelser er forklaret på baggrund af den konceptuelle forståelse givet i afsnit 3.1.

4.1.1 Chlorerede opløsningsmidler

På de tre forsøgslokaliteter forurenede med chlorerede opløsningsmidler består den konstaterede poreluftforurening af mere end 90 % PCE. Poreluftscreeningens resultater forventes derfor at være sammenlignelige med PCE-koncentrationer bestemt i samme målepunkt. Figur 4.1 viser dog, at de tre lokaliteter umiddelbart skal forklares ud fra tre forskellige konceptuelle modeller.



FIGUR 4.1 PCE-KONCENTRATION (100 L LUFT) PLOTTET MOD PPBRAE-UDSLAG (2,5 L LUFT) PÅ FORSØGSLOKALITETER FORURENET MED PCE.

Halsvej

På Halsvej konstateres en overordnet lineær tendens og en god korrelation mellem ppbRAE-udslag og PCE-koncentrationer. Den lineære sammenhæng tyder på, at der er tale om nogenlunde ensformige koncentrationsniveauer i det undersøgte fokusområde således, at forskellen på prøvevolumenet ikke har væsentlig indvirkning på middelkoncentrationen i den udtagne prøve (jf. pkt. 1 og 4 i figur 3.1).

Gammel Østergade

På Gammel Østergade ses ligeledes en lineær tendens med en hældning af den lineære regression på niveau med hvad der observeres på Halsvej. Der bemærkes dog en afvigelse for fire målepunkter, der er udtaget i et område af lokaliteten med fugtige aflejringer fra ca. 1,5 meter under terræn

(muligvis som følge af utætte kloakker i dette område). De højtliggende fugtige jordlag kan her betyde, at poreluftprøver á 100 L opsuges fra en større horisontal afstand end hvis der var tale om en umættet zone med ensformig luftpermeabilitet. Denne effekt er betydeligt mindre ved anvendelse af et mindre prøvevolumen, jf. model B i figur 3.2.

Kajerødvej

På Kajerødvej ses ikke samme lineære sammenhæng som på de to øvrige lokaliteter forurenet med chlorerede opløsningsmidler. Det bemærkes, at ppbRAE-udslag under poreluftscreeningen er betydeligt højere i målepunkter placeret under kældergulv end i punkter udenfor bygningen. Samme tendens ses ikke for de målte PCE-koncentrationer, hvilket bevirker en tydelig opdeling af datapunkterne i figur 4.3.

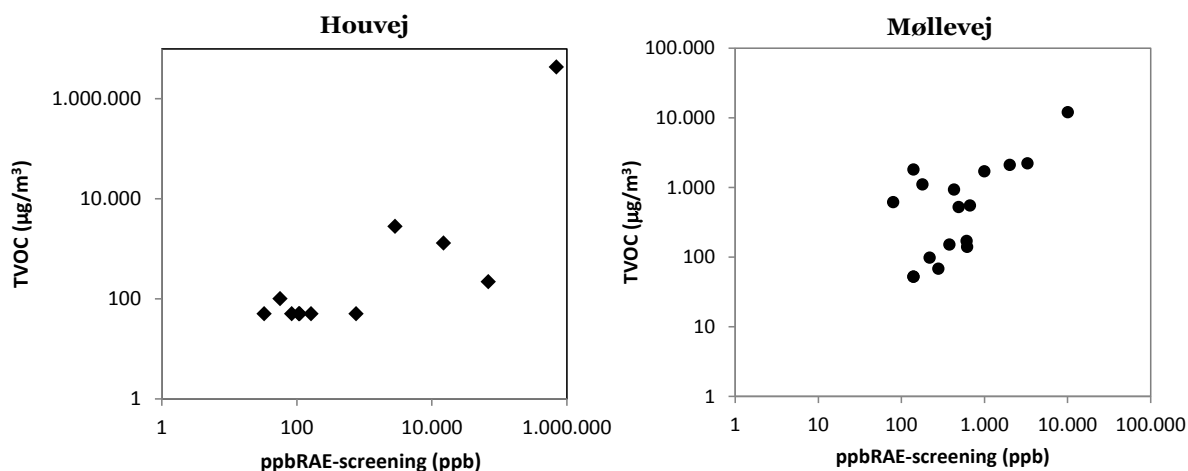
De høje ppbRAE-udslag under gulv vurderes at være en konsekvens af en ”baglæns kontaminering” af poreluften fra interne forureningskilder i bygningens kælder, der anvendes som værksted og lagerrum med opbevaring af diverse produkter tilhørende en værktøjsbutik, herunder maling, olie, lim- og fugeprodukter. Indeklimamålinger viste TVOC-koncentrationer på ca. 2.000-5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i stueetagen og kælderen, mens TVOC-koncentrationer i poreluften var på maksimalt 570 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De interne kilder til TVOC som slår ud på ppbRAE’en leder derfor til en dårlig korrelation imellem ppbRAE-udslag og PCE-koncentration.

4.1.2 Oliekomponenter

På olieforurenede lokaliteter udgøres poreluftforureningen typisk af en lang række forskellige flygtige kulbrinter, som analyseteknisk set kvantificeres som totalindhold af flygtige kulbrinter (TVOC).

De enkelte oliestoffer kan imidlertid medføre forskellige udslag på ppbRAE’en, afhængigt af molekylerens ioniseringspotentiale. Det forventes derfor, at forholdet mellem ppbRAE-udslag og målte TVOC-koncentrationer vil variere mellem forskellige lokaliteter og evt. mellem forskellige kildeområder på samme lokalitet.

I figur 4.2 ses en sammenligning af poreluftscreening og akkrediterede poreluftanalyser på de to forsøgslokaliteter forurenet med oliestoffer.



FIGUR 4.2 TVOC-KONCENTRATION (25-100 L LUFT) SOM FUNKTION AF PPBRAE-UDSLAG (2,5 L LUFT) PÅ FORSØGSLOKALITETER FORURENET MED OLIEKOMponenter (BEMÆRK LOGARITMISKE AKSER).

Houvej

På Houvej udgøres poreluftforureningen af terpentin-baserede imprægneringsvæsker, der forventes at være relativt flygtige. Dette afspejler sig i meget høje ppbRAE-udslag og høje TVOC-koncentrationer ved kilden, mens koncentrationen falder drastisk indenfor få meter. Som beskrevet i afsnit 3.2 kan dette hænge sammen med naturlig nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone.

Møllevej

På Møllevej udgøres poreluftforureningen formentligt af forskellige typer olie (gasolie og motor/smøreolie) og der konstateres generelt lave ppbRAE-udslag og poreluftkoncentrationer.

Der ses dog generelt, at de højeste ppbRAE-udslag konstateres i samme målepunkter, som de højeste TVOC-koncentrationer påvises i.

4.2 Horisontal afgrænsning vha. poreluftscreening

Udover den direkte 1D sammenligning af resultater fra poreluftscreening og akkrediterede analyser er der derfor foretaget en 2D sammenligning ved brug af konturplot udarbejdet med softwaren Surfer. Herved undersøges det rent visuelt, om anvendelse af de to målemetoder overordnet leder til udpegning af de samme relative hotspot-områder på forsøgslokaliteterne.

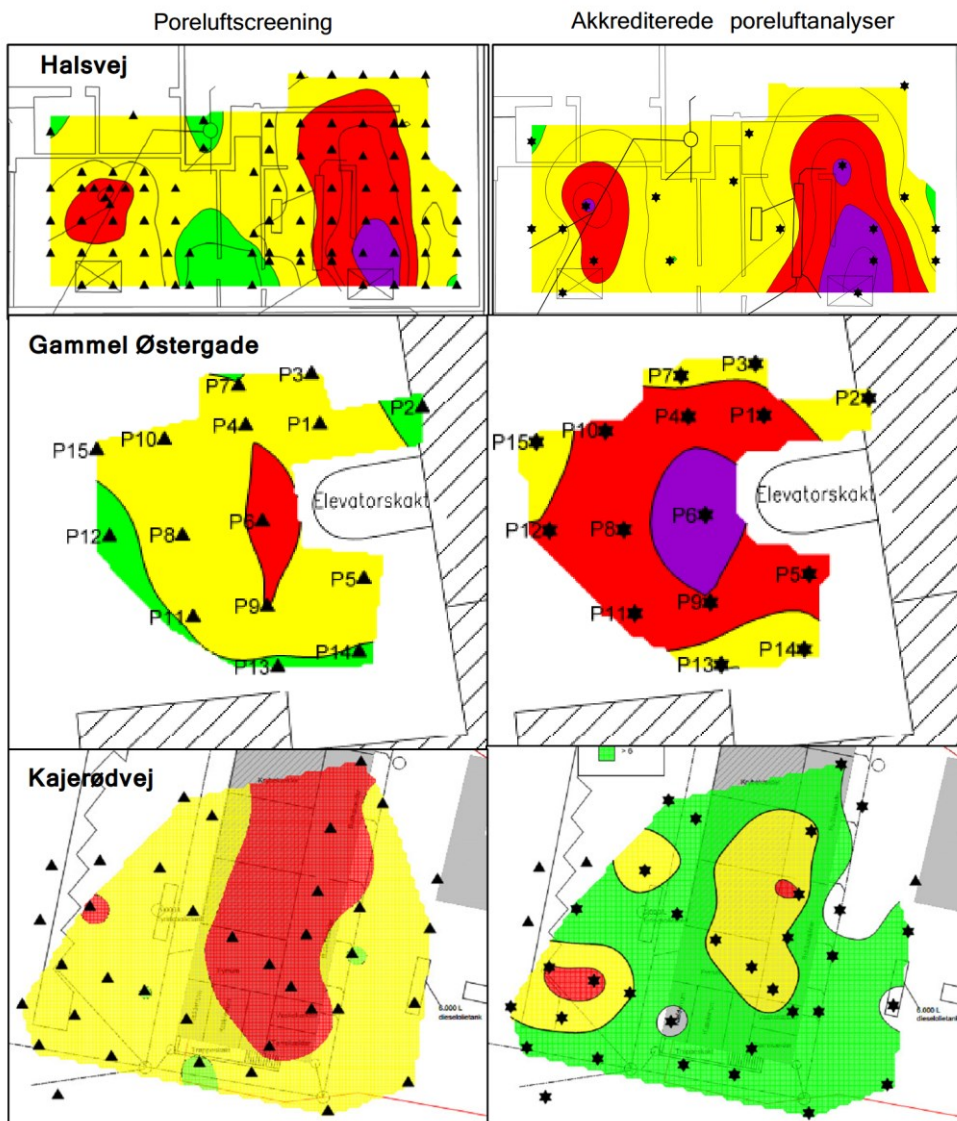
4.2.1 Chlorerede opløsningsmidler

Figur 4.3 sammenstiller rent visuelt resultaterne fra de tre lokaliteter forurenede med chlorerede opløsningsmidler.

Bemærk at farveskalaen for screeningsresultaterne (ppb-niveau) er valgt arbitrært for hver enkelt lokalitet. I modsætning hertil er farveskalaen for poreluftundersøgelserne på de tre lokaliteter valgt ens, således at de repræsenterer 1-100 gange afdampningskriteriet (grøn), 100-1.000 gange afdampningskriteriet (gul), 1.000-5.000 gange afdampningskriteriet (rød) og >5.000 gange afdampningskriteriet (lilla).

Farveskalaerne for poreluftscreening og poreluftundersøgelse for de enkelte lokaliteter kan således ikke sammenlignes direkte. F.eks. forventes gult niveau i ppb-screeningen ikke at have nogen sammenhæng med gul i poreluftundersøgelsen. Lige så lidt som der kan forventes en entydig sammenhæng imellem PID-målinger på jordprøver fra en miljøteknisk boring og det endelige forureningsindhold i jordprøven efter kemisk analyse. Som beskrevet i afsnit 4.1 forventes der dog en form for korrelation imellem høje screeningsniveauer og høje forureningsindhold i poreluften.

I den visuelle sammenligning fokuseres derfor på placering, form og udbredelse af de *relative* hotspots for hver enkelt lokalitet.



FIGUR 4.3 KONTUREREDE RESULTATER AF HHV. PORELUFTSCREENING I CA. 2,5 L PORELUFT (TIL VENSTRE) OG AKKREDITEREDE PORELUFTANALYSER AF PCE PÅ 100 L PORELUFT (TIL HØJRE) PÅ TRE FORSØGSLOKALITETER FORURENET MED CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER. SPECIFIKKE FORURENINGSNIVEAUER PÅ DE VISTE KONTURPLOT FREMGÅR AF BILAG C-E.

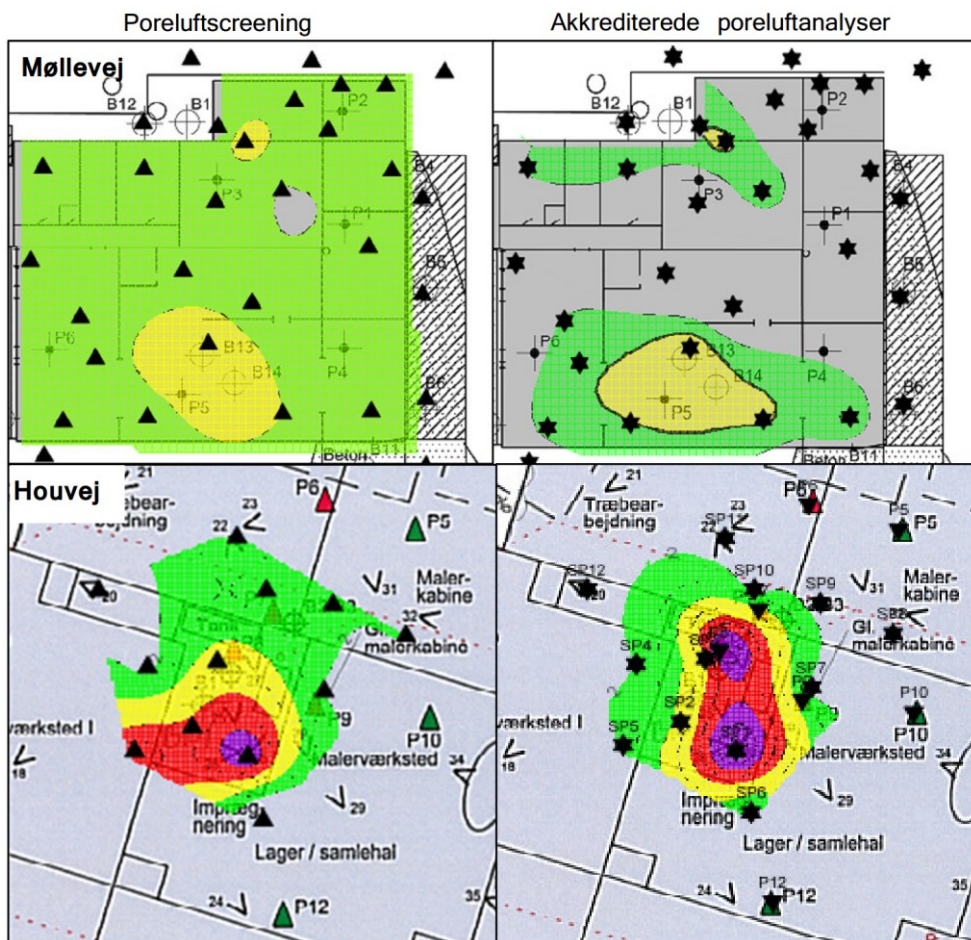
Af figur 4.3 ses der helt overordnet en god overensstemmelse imellem placering og afgrænsning af hotspot-områder ved poreluftscreening (2,5 L og ppbRAE) og ved akkrediterede poreluftanalyser (100 L og kulrør). Ligeledes er der en overordnet overensstemmelse mht. områder, hvor der ikke konstateres kraftig poreluftforurening.

For Kajerødvej var der en dårlig direkte korrelation imellem screeningsresultaterne (ppbRAE-screening) og poreluftkoncentrationerne (kulrørsanalyser), jf. figur 4.1. Dette slår igennem på de visuelle resultater i figur 4.3, hvor screeningen (venstre plot) overrepræsenterer hotspottet under bygningen, mens hotspottet til venstre for bygningen underrepræsenteres ift. poreluftplottet (højre plot).

På baggrund af de konkrete undersøgelser vurderes poreluftscreening med ppbRAE, at give et godt udgangspunkt for vurdering af placering og afgrænsning af forureninger med chlorerede opløsningsmidler (her PCE). Resultaterne kan evt. benyttes i et dynamisk undersøgelsesforløb, hvor der løbende tages stilling til eventuel placering af nye målepunkter.

4.2.2 Oliekomponenter

Figur 4.4 sammenstiller konturplot af resultater fra hhv. poreluftscreening og akkrediterede poreluftanalyser af TVOC på de to lokaliteter forurenet med oliekomponenter. Bemærk igen, at farveskalaen for screeningsresultaterne (ppb-niveau) er valgt arbitrært, hvorfor farveniveauerne for screeningsundersøgelsen og poreluftundersøgelsen ikke kan sammenlignes direkte.



FIGUR 4.4 KONTUREREDE RESULTATER AF HHV. PORELUFTSCRENING I CA. 2,5 L PORELUFT (TIL VENSTRE) OG AKKREDITEREDE PORELUFTANALYSER AF 100 L PORELUFT (TIL HØJRE) PÅ TO FORSØGSLOKALITETER FORURENET MED OLIEKOMPONENTER. SPECIFIKKE FORURENINGSNIVEAUER PÅ DE VISTE KONTURPLOT FREMGÅR AF BILAG F OG G.

Af figur 4.4 ses – også for oliekomponenter - en god overordnet visuel overensstemmelse imellem placering og delvist også af afgrænsning af hotspot-områder ved poreluftscreening (2,5 L og ppbRAE) og ved akkrediterede poreluftanalyser (25-100 L og kulrør). Ligeledes er der overensstemmelse mht. områder, hvor der ikke konstateres kraftig poreluftforurening.

På Møllevej er der generelt lave forureningsniveauer, men de to metoder lokaliserer de samme to områder med let forhøjede indhold af flygtige kulbrinter i poreluften under bygningen.

På Houvej viser poreluftscreeningen udført 1 meter under terræn, at forureningen i denne dybde er trukket mod sydvest, mens de akkrediterede analyser indikerer, at poreluftforureningen er nogenlunde afgrænset. Desuden er der forskel på beliggenhed og udbredelse af hot-spot for de to metoder. Forskellene vurderes at skyldes forskelle i prøvetagningsvolumenet ved de to metoder, jf. afsnit 3.1, samt det forhold, at der netop på denne lokalitet er tale om en kraftig afdampning af flygtige forureningskomponenter fra et højtliggende grundvandspejl udenfor selve hotspot, jf. figuren i afsnit 3.2.

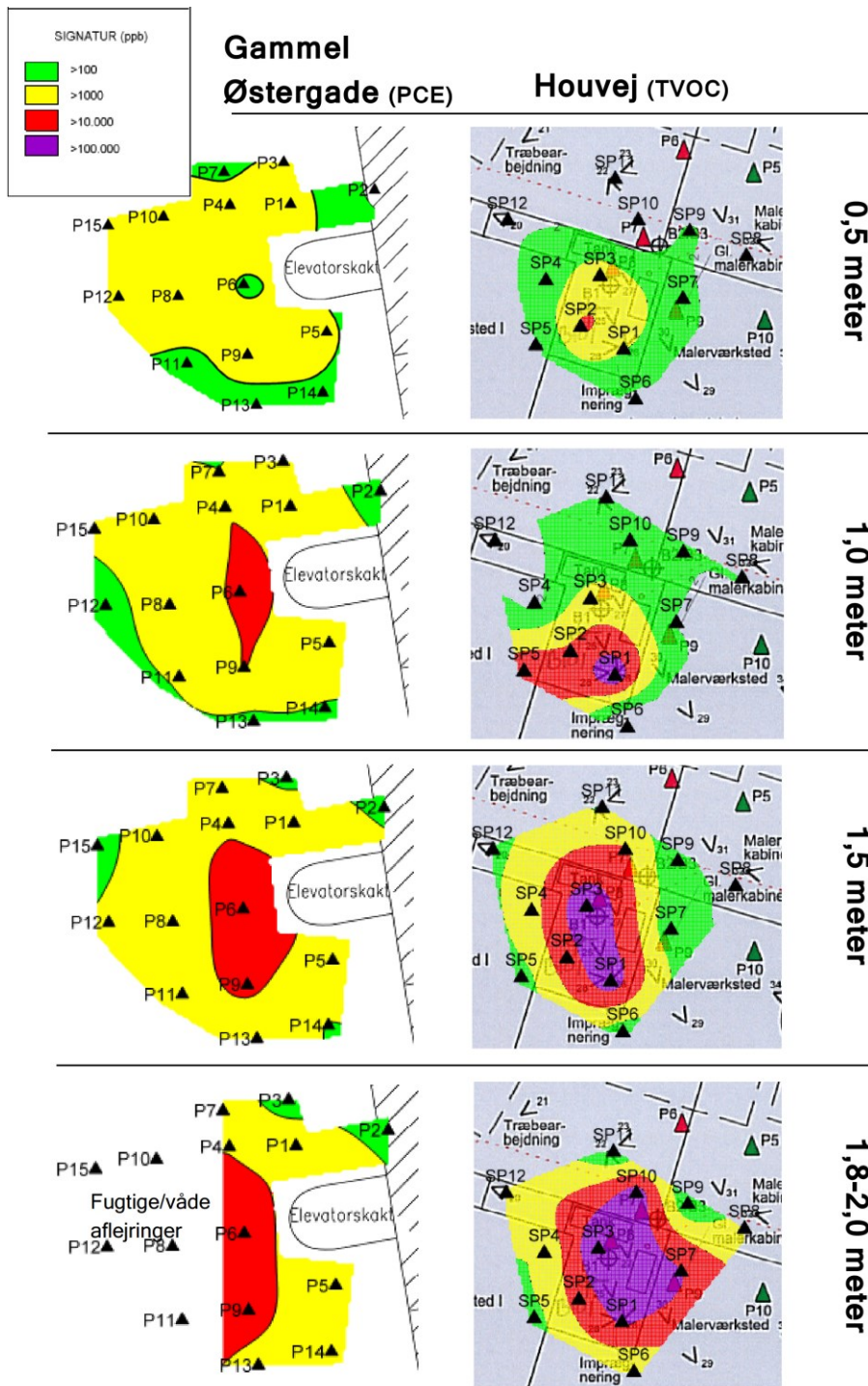
4.3 Vertikal afgrænsning vha. poreluftscreening

På to testlokaliteter (Gammel Østergade og Houvej) blev der foretaget poreluftscreening i fire forskellige dybder: hhv. 0,5 - 1,0, 1,5 og 1,8-2,0 meter under terræn eller betongulv.

Dybdenuanceringen kunne udføres samme feltdag, da anvendelse af et prøvelømlen på 2,5 L poreluft vurderes at påvirke resultaterne fra andre prøvedybder minimalt (se tabel 3.1).

I figur 4.5 ses på begge lokaliteter, at indholdet af flygtig forurening er lavest tæt på terræn, mens koncentrationen stiger med dybden. Dette skyldes formentlig en kombination af jordforureningens og kildens beliggenhed samt fortynding med atmosfærisk luft nær terræn.

Desuden bemærkes det for Gammel Østergade, at poreluftscreeningen påviser fugtige lavpermeable aflejringer på en del af lokaliteten (hvorfra der ikke kunne udtages poreluft). Screening i flere dybder giver på denne lokalitet således ekstra oplysninger, der kan indgå i den geologiske og konceptuelle model af lokaliteten.



FIGUR 4.5 RESULTATER AF PORELUFTSCREENING PÅ GAMMEL ØSTERGADE (TIL VENSTRE) OG HOUEJ (TIL HØJRE). DER ER FORETAGET PORELUFTSCREENING MED PPBRÆ (2,5 L PORELUFT) I ALLE VISTE MÅLEPUNKTER.

Det vurderes, at poreluftscreening med dybdenuancering kan være et brugbart værktøj i situationer, hvor poreforureningen er dybdemæssigt relateret til specifikke lagdelinger, installationer eller ledningstracéer, se f.eks. /5/. Poreluftscreeningen kan således i nogle tilfælde være med til at øge detaljeringsgraden i den konceptuelle forståelse af lokaliteten – vel at mærke for relativt få ekstra omkostninger.

4.4 Hensigtsmæssig prøveafstand og prøvetæthed

Effektiv lokalisering, karakterisering og afgrænsning af ukendte forurenings-hotspots med færrest mulige poreluftmålinger forudsætter en hensigtsmæssig afstand mellem målepunkterne samt en hensigtsmæssig prøvetæthed, der i dette projekt defineres som antal målepunkter pr. 100 m².

Hvis afstanden mellem målingerne er stor, medfører det en risiko for at fejlbedømme eller helt overse et hotspot-område. Omvendt vil kort afstand mellem målepunkterne give et informationsoverslap, hvilket er ensbetydende med unødvendige undersøgelsesomkostninger.

Som beskrevet i afsnit 2.3 er der benyttet tre forskellige analyser til at vurdere hensigtsmæssige prøveafstande og prøvetagningstætheder på hver enkelt af de fem undersøgte lokaliteter. Resultaterne er gengivet i det følgende.

4.4.1 Jordforureningens influensradius

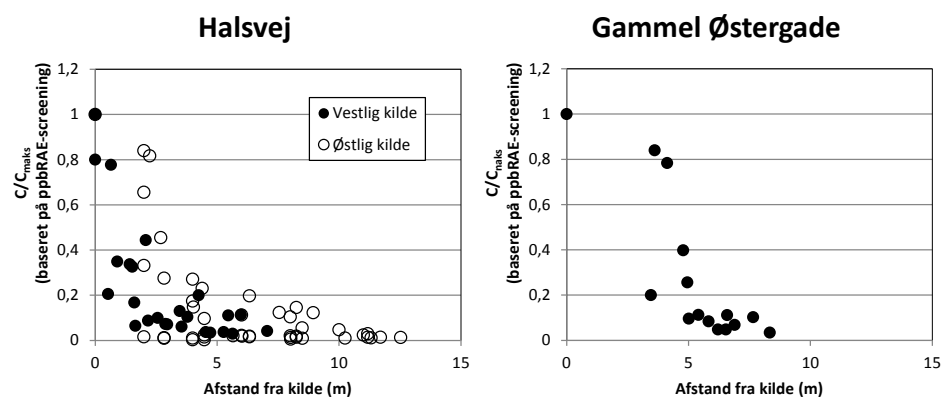
Den nødvendige prøvetæthed vil i stor grad afhænge af jordforureningens udbredelse på den givne lokalitet samt af jordforureningens influensradius mht. afsmitning til poreluften, jf. figur 3.3 og 3.4.

Risikoen for at overse et arealmæssigt begrænset hotspot, eller et hotspot med en begrænset afsmitning til poreluften omkring sig, er således større end risikoen for at overse et meget stort hotspot eller et hotspot med stor afsmitning til poreluften. I den forbindelse bemærkes det, at et lille hotspot-område ikke er ensbetydende med, at forureningen ikke kan udgøre et indeklimaproblem i bygninger beliggende umiddelbart ved forureningen.

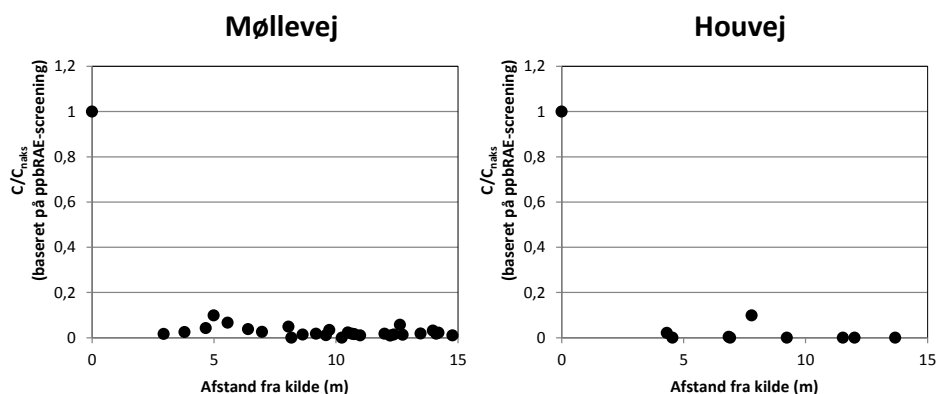
I figur 4.6 (PCE-lokaliteter) og figur 4.7 (olie-lokaliteter) er relative ppbRAE-udslag (C/C_{maks}) vist som funktion af den horisontale afstand fra punktet med det højeste ppb-udslag (C_{maks}). Dette er dog ikke gjort for Kajerødvej, hvor ppbRAE-resultaterne under bygningen vurderes at være påvirket af høje indeklimakoncentrationer, og derfor ikke afspejler jordforureningen, jf. diskussionen i afsnit 4.1.1.

På baggrund af overvejelserne omkring poreluftvolumener (afsnit 3.1) er det bevist valgt, at optegne resultaterne fra ppbRAE-screeningerne (2,5 L) frem for absolutte koncentrationer fra de akkrediterede poreluftanalyser (25-100 L). Dette er gjort for at opnå den størst mulige rumlige opløsning (og mindst mulig koncentrationsudjævning) i data.

De optegnede grafer udviser en vis grad af støj selvom de forskellige målepunkter er påvirket af samme kilde. Forklaringen herpå er bl.a., at poreluftudbredelserne på forsøgslokaliteterne udviser anisotropi – dvs. at der ikke ses en cirkelformet udbredelse af poreluftforurening fra kilden.



4.6 RELATIVT RESULTAT AF PPBRAE-SCREENING (C/C_{maks}) SOM FUNKTION AF AFSTAND FRA MÅLEPUNKTET MED DET HØJESTE PPB-UDSLAG PÅ LOKALITETER FORURENET MED CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER. PÅ HALSVEJ ER DER TALE OM TO HOTSPOTS.



FIGUR 4.7 RELATIVT RESULTAT AF PPBRAE-SCREENING (C/C_{maks}) SOM FUNKTION AF AFSTAND FRA MÅLEPUNKTET MED DET HØJESTE PPB-UDSLAG PÅ LOKALITETER FORURENET MED OLIEKOMPONENTER. PÅ MØLLEVEJ ER DER KUN MEDTAGET MÅLEPUNKTER PÅVIRKET AF DET SYDLIGE HOTSPOT.

Figur 4.6 viser, at indholdet af poreluftforurening (PCE) er reduceret til ca. 20 % af kildekonzentrationen i en afstand på 2-6 m fra punktet med den højeste koncentration. Den største reduktion ses for den relativt svage vestlige kilde på Halsvej, mens både den østlige kilde på Halsvej og kilden på Gammel Østergade vurderes at have en større udbredelse. Generelt ses kildestyrkekoncentrationen at være reduceret til under 10 % af det maksimale niveau i en afstand på 3-10 m fra kilden (igen størst reduktion for den vestlige kilde på Halsvej).

I figur 4.7 ses et markant anderledes billede for de to oliestoffer, idet den relative koncentration allerede indenfor en afstand af 3-4 meter er reduceret til < 10 % af kildestyrkekoncentrationen. Dette til trods for, at der på Houvej er tale om en meget kraftig kilde med flygtige kulbrinter i poreluften i koncentrationen $4.300.000 \mu\text{g TVOC}/\text{m}^3$. Udbredelsen af oliekomponenter i poreluften er således generelt betydeligt mindre end for chlorerede opløsningsmidler.

En maksimal poreluftudbredelse af oliestoffer på < 3-4 m stemmer i øvrigt godt overens med en erfaringsopsamling beskrevet i /14/. Her blev det beskrevet, at 1 meter ikke-forurenede jord medfører en meget kraftig reduktion i poreluftforurening fra fyringsoliespild sket for mere end 6 måneder siden. Den begrænsede udbredelse af oliestoffer vurderes bl.a. at kunne relateres til naturlige nedbrydningsprocesser, jf. den konceptuelle model beskrevet i afsnit 3.2.

Resultaterne peger på, at der ved eftersøgning af ukendte jordforureninger med chlorerede opløsningsmidler kan anvendes en afstand mellem målepunkterne på i størrelsesordenen 4-6 m. Herved vurderes risikoen for helt at overse et hotspot-område at være begrænset. Dette er i overensstemmelse med en anbefalet prøveafstand beskrevet i /24/ på ca. 5 m, primært baseret på erfaringer fra lokaliteter forurenede med PCE og TCE.

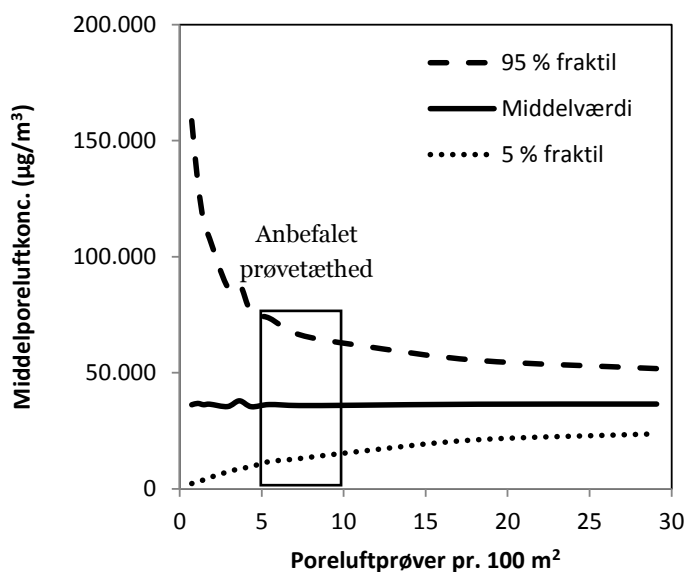
Derimod kan det, ved eftersøgning af ukendte kilder til flygtige oliekomponenter, generelt være hensigtsmæssigt med en afstand mellem målepunkterne på mindre end 3-4 m. Afstanden skal evt. reduceres helt ned til 1-2 meter hvis der er mistanke om mindre spild, hvilket hovedsageligt vurderes at skyldes at olieforureninger er forbundet med en relativt hurtig afdampning af de mest flygtige komponenter, /11/ og /14/, samt at terrænnære olieforureninger generelt har en mindre influensradius pga. naturlige nedbrydningsprocesser, jf. afsnit 3.2. Konklusionen for oliestoffer er på niveau med en teoretisk analyse tidligere beskrevet i /3/.

Resultaterne for de fire lokaliteter er opsummeret i afsnit 4.4.4.

4.4.2 Estimering af arealvægtet middelkoncentration

Betydningen af prøvetætheden på de fem forsøgslokaliteter er endvidere undersøgt ved en statistisk analyse i form af percentile-t bootstrapping. Præmissen for analysen har været at finde et balancepunkt imellem stor statistisk sikkerhed på den arealvægtede middelkoncentration i undersøgelsesområdet og antallet af målepunkter. Fremgangsmåden for analysen er beskrevet i bilag B mens analyserne for de konkrete lokaliteter fremgår af bilag C-G.

Som eksempel viser figur 4.8 den arealvægtede middelkoncentration på Halsvej, samt 5 og 95 % fraktilen på middelkoncentrationen, som funktion af prøvetætheden (antal poreluftprøver pr. 100 m²).



FIGUR 4.8 USIKKERHED PÅ PORELUFTUNDERSØGELSE PÅ HALSVEJ SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN (PORELUFTPRØVER PR. 100 M²).

På baggrund af analysen vurderes en hensigtsmæssig prøvetæthed, baseret på kriteriet ”mest sikkerhed/værdi for pengene”, på Halsvej at være 5-10 poreluftprøver pr. 100 m². Den ekstra sikkerhed der opnås ved at anvende prøvetætheder på op til 5 prøver pr. 100 m² er meget stor, mens den ekstra sikkerhed der opnås ved at anvende prøvetætheder på mere end 10 prøver pr. 100 m² er relativt begrænset.

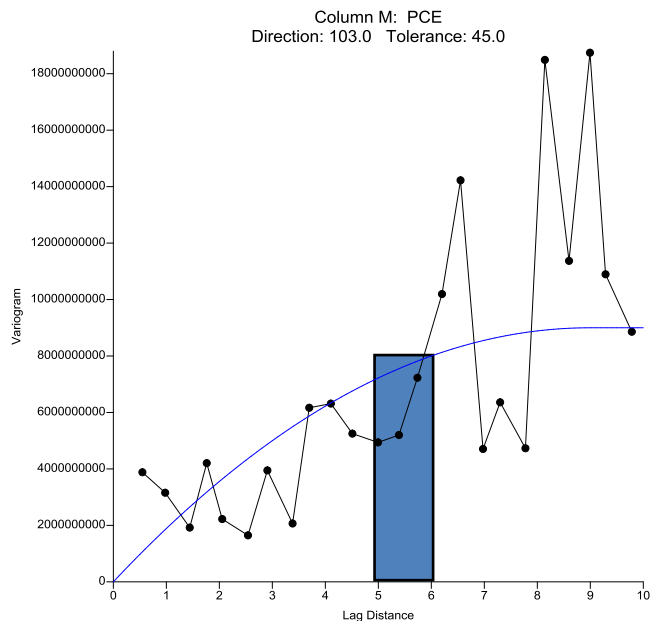
Ved den statistiske analyse baseret på percentile-t bootstrapping ses der principielt bort fra den rumlige struktur af poreluftkoncentrationerne. Vurderingerne af hensigtsmæssig prøvetæthed skal derfor betragtes som overordnede prøvetætheder på lokalitetsskala og kan ikke sammenlignes direkte med de anbefalede afstande mellem målepunkter, jf. analyserne i afsnit 4.4.3.

4.4.3 Korrelationsafstand mellem målepunkter

Som beskrevet ovenfor vil forureningstype, kildestyrke og formentlig også geologiske forhold have indflydelse på den afstand hvori et givent hotspot vil påvirke den omkringliggende poreluft. Generelt forventes en større grad af korrelation mellem koncentrationen i poreluftprøver udtaget i kort afstand fra hinanden end for poreluftprøver udtaget langt fra hinanden. Forholdet imellem graden af korrelation som funktion af afstanden imellem målepunkter kan analyseres vha. variogramanalyse. Fremgangsmåden for analysen er beskrevet i bilag B mens analyserne for de konkrete lokaliteter fremgår af bilag C-G.

Variogramanalyse stiller dog meget store krav til datamængden og -kvaliteten for at der kan opnås entydige resultater. Datagrundlaget på de fem forsøgslokaliteter opfylder grundlæggende ikke betingelserne for at udføre en entydig variogramanalyse, hvorfor analysen på fire ud af fem lokaliteter kun delvist giver viden om korrelationsafstanden.

Den PCE-forureneede Halsvej er den lokalitet, der har det største antal målepunkter (82 målepunkter) og den største datatæthed (ca. 30 målepunkter pr. 100 m²). Det omfattende datasæt giver derfor de bedste forudsætninger for variogramanalysen, til trods for at poreluftforureningen ikke er afgrænset i alle retninger. Som eksempel er variogrammet for Halsvej vist i figur 4.9.



FIGUR 4.9 VARIOGRAM FOR HALSVEJ. VARIOGRAMMET ER GÆLDENDE FOR ORIENTERINGEN NORD-SYD, DER ER RETNINGEN DEN STØRSTE KORRELATIONSAAFSTAND. DET MARKEREDE OMRÅDE SVARER TIL INTERVALLET, HVOR DER OPNÅS 80-90 % AF DEN MAKSIMALE VARIANS, JF. DEN FITTEDE KVADRATISKE MODEL (BLÅ LINJE).

Af variogrammet i figur 4.9 fremgår det, at variansen (på den lodrette akse) overordnet set er stigende ved større og større afstand mellem målepunkterne (angivet i meter på den vandrette akse). Som beskrevet i bilag B vurderes en hensigtsmæssig prøveafstand at svare til det markerede interval (på den vandrette akse), hvor der opnås 80-90 % af den maksimale varians. På Halsvej anbefales på denne baggrund at anvende en prøveafstand på 5-6 m.

Som beskrevet i bilag C-G er den anbefalede prøveafstand ligeledes anvendt til at estimere en prøvetæthed (poreluftprøver pr. 100 m²), der kan sammenlignes med den øvrige databehandling. Resultaterne er sammenfattet i afsnit 4.4.4.

4.4.4 Sammenfatning af dataanalyser

I tabel 4.1 ses en sammenfatning af de forskellige analyser af hensigtsmæssige prøveafstande og prøvetætheder på de undersøgte lokaliteter.

Selvom flere af de faktisk gennemførte undersøgelser er udført under kendskab til kildeplaceringen (f.eks. på baggrund af en V2-undersøgelse), så er de anbefalede prøveafstande og prøvetætheder i tabel 4.1 at betragte som vejledende hvis man *ikke* havde denne viden. Dette svarer til at man står på en ny lokalitet hvor eventuelle kilder skal lokaliseres og afgrænses vha. en poreluftundersøgelse; evt. som screening i et givent område på ejendommen.

Hvis der findes historisk materiale om placeringen af forureningskilder på en given lokalitet kan prøvetætheden reduceres under hensyntagen til det præcise formål med undersøgelsen (karakterisering eller afgrænsning). I afsnit 5.3 gives der bud på hensigtsmæssige undersøgelsesstrategier baseret på erfaringerne i tabel 4.1.

TABEL 4.1 OVERSIGT OVER ANBEFALET PRØVEAFSTAND OG PRØVETÆTHED VED FREMTIDIGE UNDERSØGELSER VED SCREENING FOR UKENDTE KILDER. I.M. = ANALYSE IKKE MULIG.

	Vurderingskriterium	Chlorerede opløsningsmidler (PCE)			Oliekomponenter (TVOC)	
		Halsvej	Gl. Østergade	Kajerødvej	Møllevej	Houvej
Anbefalet afstand mellem målepunkter	Poreluftforurening omkring hotspots	2-6 m	ca. 5 m	i.m.	< 3 m	< 4 m
	Korrelationsafstand (variogramanalyse)	2,5-6 m	4-5 m (usikkert)	2-5 m (usikkert)	<1,5 m	i.m.
	Samlet vurdering	2,5-6 m	4-5 m	2-5 m	<1,5-3 m	< 4 m
Anbefalet prøvetæthed (pr. 100 m ²)	Arealvægtet middel (bootstrapping)	5-10	5-10	2,5-5	6-12	7-12
	Korrelationsafstand (variogramanalyse)	7-13	4-6 (usikkert)	5-16 (usikkert)	i.m.	i.m.
	Samlet vurdering	5-13 pr. 100 m²	5-10 pr. 100 m²	2,5-16 pr. 100 m²	6-12 pr. 100 m²	7-12 pr. 100 m²

Af ovenstående sammenfatning fremgår det, at der generelt er god overensstemmelse mellem resultaterne af de forskellige vurderinger af prøveafstand og prøvetæthed. Overordnet set er der indikationer på at betydelige koncentrationsfald i poreluften, radiært ud fra jordforureninger med oliekomponenter, sker indenfor kortere afstande end for jordforureninger med chlorerede opløsningsmidler (PCE). Derfor bør der benyttes mindre prøveafstand og større prøvetæthed ved eftersøgning af ukendte kilder til jordforurening med oliekomponenter end med chlorerede opløsningsmidler, svarende til den konceptuelle forståelse præsenteret i afsnit 3.2.

På baggrund af de opnåede resultater vurderes en hensigtsmæssig prøveafstand ved eftersøgning af ukendte kilder til forurening med chlorerede opløsningsmidler (PCE) overordnet set at være 2,5-6 m, mens den ved eftersøgning af ukendte kilder til jordforurening med oliekomponenter er ca. 1-3 m. Som beskrevet i afsnit 3.1 kan større prøvevolumener evt. benyttes til at opnå en større prøvetagningsradius og dermed øge sandsynligheden for at lokalisere jordforurening med en større prøvetagningsafstand (mindre tæthed).

Endvidere vurderes en overordnet hensigtsmæssig prøvetæthed både på sager med chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter at være ca. 2,5-16 poreluftprøver pr. 100 m², med en overvægt på omkring 5-10 prøver pr. 100 m².

Ovenstående prøvetætheder svarer niveaumæssigt til hvad der tidligere er konkluderet ved lignende statistiske analyser beskrevet i /24/ samt i /3/ og /15/ for hhv. olieforureninger og en forurening med TCE.

4.5 Dynamiske undersøgelser

Et dynamisk undersøgelsesforløb defineres typisk ved at undersøgelsens målepunkter placeres på baggrund af de foreløbige resultater, der vurderes ude i felten /16/.

Undersøgelsen på Halsvej blev udført som en dynamisk undersøgelse hvor målepunkter til akkrediteret poreluftanalyse, svarende til ca. 20 % af antallet af målepunkter til poreluftscreening, blev foretaget på baggrund af screeningsresultaterne. På de øvrige forsøgslokaliteter blev der foretaget akkrediterede analyser i alle målepunkter, og der var derfor ikke i samme grad tale om en dynamisk undersøgelse. Der er dog ingen tvivl om at poreluftscreening med ppBRAE har et potentiale som en dynamisk undersøgelsesstrategi, hvor også supplerende målepunkter kan fastlægges løbende efterhånden som screeningsresultaterne indkommer.

Figur 4.10 og 4.11 viser de konturerede resultater fra Halsvej af hhv. poreluftscreening i 82 målepunkter og akkrediterede poreluftanalyser i 19 målepunkter, svarende til prøvetætheder på hhv. 30 og 7 prøver pr. 100 m². Ved de udførte undersøgelser var ønsket, udelukkende at fokusere på det indendørs areal og det var derfor et bevidst valg ikke at afgrænse poreluftforureningen fuldstændigt mod syd.



FIGUR 4.10 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE PÅ HALSVEJ I 82 MÅLEPUNKTER.



FIGUR 4.11 KONTURPLOT AF AKKREDITEREDE PORELUFTANALYSER PÅ HALSVEJ I 19 MÅLEPUNKTER

Ovenstående eksempel illustrerer, hvordan man ved brug af en poreluftscreening kan udvælge målepunkter til akkrediterede analyser således at man opnår en effektiv karakterisering og afgrænsning af hotspot-områderne. Her ses altså et eksempel på hvordan et stort antal screeningsresultater kan benyttes til at udvælge et langt mindre antal punkter til akkrediteret analyse, hvorved man sørger for at få mest mulig information for færrest mulige ressourcer, og samlet set et bedre informationsniveau.

Ved dynamiske undersøgelsesforløb er det helt essentielt, at resultaterne vurderes løbende og at der tillades mulighed for, at undersøgelsesplanen kan justeres løbende. Derfor kan det være en fordel, hvis projektlederen er til stede i felten, således at de vigtige beslutninger træffes på baggrund af de foreløbige resultater. På den måde vil det eksempelvis være lettere at øge eller reducere antallet af målepunkter, eller justere placeringen af efterfølgende målepunkter ift. den oprindelige plan.

Eksempelvis ville det for data som dem vist i figur 4.10 være muligt for en erfaren projektleder at spotte, at der er anisotropi i data (ovale forureningsudbredelser i stedet for cirkulære), hvorved prøvetætheden med fordel kan mindskes relativt i den primære udbredelsesretning og øges relativt i den sekundære.

4.6 4.6 Mulige fejlkilder

Med udgangspunkt i erfaringerne fra de fem forsøgslokaliteter gennemgås i det følgende en række forhold, som hver især kan medføre usikkerhed på resultatet af en poreluftundersøgelse med poreluftscreening og/eller akkrediterede poreluftanalyser.

De fleste af de beskrevne fejlkilder var aktuelle på én eller flere af forsøgslokaliteterne.

4.6.1 4.6.1 Interne kilder i indeklimaet

Meget kraftige interne kilder til indeluftforurening kan forplante sig i den underliggende poreluft og gøre det vanskeligt at vurdere udbredelsen af poreluftforurening fra den kilde som er årsagen til, at forureningsundersøgelsen udføres /17/.

På forsøgslokaliteten Kajerødvej blev der konstateret høje ppbRAE-udslag lige under gulv. Bygningens kælder blev dog anvendt til opbevaring af diverse produkter med kraftig afdampning af flygtige stoffer og der blev målt TVOC-koncentrationer i indeklimaet på ca. 2.000-5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Her betød det interne TVOC-bidrag, at poreluftscreening (2,5 L) under gulv gav misvisende resultater som følge af nedtrængning af indeklimakulbrinter til poreluften under gulvet.

4.6.2 4.6.2 Udvaskning af dampe på ubefæstede arealer

Pludselige ændringer af vejrforholdene på en lokalitet kan have betydning for udbredelsen af poreluftforurening i den terrænnære umættede zone. I visse situationer vil ændringer af atmosfæretrykket eksempelvis pumpe poreluftforurening dybere ned eller længere op mod terrænoverfladen /18/. Dette vurderes dog kun at have en begrænset betydning /24/.

Desuden er det sandsynligt, at kraftige regnskyl kan udvaske flygtig forurening og andre naturligt forekommende jordgasser. Dette vurderes at have været tilfældet under poreluftscreening på forsøgslokaliteten Møllevvej. Her kunne der efter et kraftigt regnvejr om natten mellem to feltdage konstateres en tendens til reducerede baggrundsniveauer af ppbRAE-udslag i de terrænnære jordlag.

Desuden kan nedbør medføre høje vandindhold og lav permeabilitet tæt ved terræn, hvilket kan forstyrre og besværliggøre udtagningen af poreluft.

Vejrmæssige forhold bør altid noteres i forbindelse med feltarbejdet, således at der er mulighed for at tage dem i betragtning ved vurdering af måledataene.

4.6.3 4.6.3 Interferens fra metangas

Det er blevet vist, at høje koncentrationer af metan-gas (CH₄) kan have en hæmmende effekt på PID-baserede målemetoder, hvilket også omfatter ppbRAE. Således kan luftkoncentrationer på bare 0,5 % CH₄ medføre en reduktion af metodens følsomhed med 30 %, mens 5 % CH₄ kan reducere følsomheden med helt op til 90 % /19/.

Poreluftscrening i metan-rige jorder kan således medføre en vis usikkerhed på resultatet. På denne baggrund anbefales det generelt ikke at udføre poreluftscreninger på gamle losseplader, i moser og i visse skovområder, hvor der forventes høje metan-indhold i poreluften. Alternativt kan man indledningsvis eller sideløbende med undersøgelsen måle metan-koncentrationen i jorden for at afklare risikoen for interferens.

5. Vurderinger og anbefalinger

Undersøgelser og dataanalyser udført på de fem forsøgslokaliteter har resulteret i en række observationer og erfaringer, der fremadrettet vurderes at kunne være nyttige ved lokalisering og afgrænsning af poreluftforurening bestående af chlorerede opløsningsmidler og oliekomponenter.

Mange af projektets anbefalinger er på linje med hvad der allerede er god undersøgelsespraksis, men kan evt. danne basis for mindre justeringer af strategi, metodevalg og fremgangsmåder ved fremtidige undersøgelser.

5.1 Poreluftscreening som undersøgelsesværktøj

Resultater fra de fem meget forskellige forsøgslokaliteter illustrerer, at der ikke altid kan forventes en lineær sammenhæng mellem resultatet af en poreluftscreening og en akkrediteret poreluftanalyse i samme målepunkt. Derudover vil hældning og form af en eventuel korrelation typisk afhænge af de anvendte prøvevolumener, sammensætning af forureningen og en række lokalitetsspecifikke forhold. Som konsekvens heraf kan der ikke opstilles generelt gældende transformationsformler fra ppbRAE-data til poreluftkoncentrationer.

Imidlertid viser de opnåede resultater, at anvendelse af hhv. poreluftscreening med ppbRAE og akkrediterede poreluftanalyser generelt giver samme billede af hotspot-områdets beliggenhed. Poreluftscreening er derfor velegnet både til afgrænsning af kendte hotspots og til eftersøgning af ukendte kildeområder, jf. anbefalingerne i afsnit 5.3.

Da poreluftscreeningen ikke er stofspecifik vil det altid være nødvendigt at supplere og validere ppbRAE-screeningen med akkrediterede poreluftanalyser til stofspecifik karakterisering af poreluftforureningen – f.eks. i 20 % af målepunkterne anvendt ved screeningen.

Hvilke målepunkter der udvælges til akkrediteret analyse bør afhænge af formålet med undersøgelsen og resultaterne af poreluftscreeningen. Derudover kan poreluftscreening med høj prøvetæthed anvendes til planlægning af kommende undersøgelsesfaser. Eksempelvis kan screeningen danne basis for placeringen af miljøtekniske borer, således at der kan udtages jordprøver direkte i hotspot.

5.2 Dynamiske undersøgelser

Poreluftscreening med on-site ppbRAE-målinger muliggør en dynamisk undersøgelsesstrategi, hvor målepunkternes placering fastlægges løbende på baggrund af de foreløbige resultater. Denne strategi vil øge muligheden for at placere målepunkterne optimalt i forhold til at karakterisere og afgrænse poreluftforureningen samt gennemføre undersøgelsesforløbet i én feltkampagne.

Det er en vigtig pointe, at et dynamisk undersøgelsesforløb kræver, at beslutningerne tages ude i felten på baggrund af det seneste måleresultat, hvorfor det er nødvendigt, at den ansvarlige projektleder deltager i feltarbejdet og løbende opdaterer kortmateriale med forureningens udbredelse – enten elektronisk eller på en printet situationsplan.

Hvis den løbende evaluering af undersøgelsesresultaterne nedprioriteres er der stor sandsynlighed for, at målepunkterne udelukkende bliver placeret som angivet på den foreløbige plan, der blev udarbejdet inden undersøgelsen. Herved udnyttes man ikke poreluftscreeningens fulde potentiale.

Ved en dynamisk tilgang til valg af målepunkter er der mulighed for at benytte højere datatæthed i én retning end i en anden, hvis foreløbige resultater indikerer anisotropi, som f.eks. på Halsvej, jf. bilag C. I dette tilfælde kan der (med samme sikkerhed i vurderingerne) benyttes en lavere datatæthed i den primære udbredelsesretning end i den sekundære.

5.3 Anbefalinger til fremtidige undersøgelser

I det følgende sammenfattes projektets resultater i konkrete anbefalinger, der er struktureret i forhold til hvad der er hovedformålet med en given undersøgelse. Der skal selvfølgelig tages forbehold for at anbefalingerne er fremkommet på baggrund af fem konkrete undersøgelser, og at væsentligt anderledes forhold på andre lokaliteter til enhver tid skal tages i betragtning.

Udvalgte anbefalinger er vist i nedenstående tabel 5.1, og skal ses som supplement til anbefalinger i f.eks. /2/, /24/ og /25/.

TABEL 5.1 OVERSIGT OVER ANBEFALEDE PORELUFTSTRATEGIER.

Formål med undersøgelsen	Metodevalg og prøvevolumen	Prøvetæthed	Afstand (JF = jordforurening; MP = målepunkter)
Karakterisering af kendt kilde	Akkrediterede poreluftanalyser (10-50 L)	2-3 ved kilden	Chlorerede: <2 m fra kilde Oliekomponenter: ca. 1 m fra kilde
Afgrænsning af kendt kilde	Poreluftscreening eller akkrediterede poreluftanalyser (10-50 L)	5-10 pr. 100 m ²	Chlorerede: 4-6 m radiært fra JF Oliekomponenter: 2-3 m radiært fra JF
Lokalisering af ukendte kilder	Poreluftscreening eller akkrediterede poreluftanalyser (100 L)	5-10 pr. 100 m ²	Chlorerede: 2,5-4 m mellem MP Oliekomponenter: <1,5 m mellem MP

Bemærk, at det naturligvis altid er nødvendigt at tage den aktuelle forureningssituation i betragtning, således at der ved meget store jordforureninger, eller spredningsmønstre præget af geologiske lagdelinger/inhomogeniteter eller installationer, formentlig bør afviges fra de anførte tommelfingerregler.

5.3.1 Karakterisering af kendt kilde

Til tider kendes forureningskildernes eller hotspot-områdernes placering på forhånd inden undersøgelsen sættes i gang. Det kan være på sager hvor der foreligger en orienterende forureningsundersøgelse eller hvor der f.eks. er registreret overfladepild eller er sket brud på kemikalietanke.

Målepunkter til karakterisering af kendte kilder bør placeres så tæt på kilden som muligt. Ud fra størrelsen af hotspot-områder observeret i dette projekt anbefales det på oliesager at placere målepunkterne omkring 1 m fra der hvor forureningen vurderes at være kraftigst (typisk lige ved kilden). På sager med chlorerede opløsningsmidler anbefales denne afstand at være maksimalt 2 m.

Typisk vil 2-3 målepunkter være tilstrækkeligt til at foretage en grundig karakterisering til brug i en risikovurdering. Målingerne bør foretages med akkrediterede analyser af relevante forureningskomponenter.

Ved karakterisering af et hotspot-område kan det være hensigtsmæssigt at reducere prøvevolumenet til f.eks. 10-50 L. Herved mindskes risikoen for at fortynde kildestyrkekonzentrationen med ren luft samt for at overmætte de kulrør, som poreluften opsamles på.

5.3.2 Afgrænsning af en kendt kilde

Erfaringerne fra dette projekt viser, at poreluftscreening med fordel kan anvendes til afgrænsning af et kendt hotspot-område.

Screeningen kan foretages med høj prøvetæthed i flere dybder i hvert målepunkt. Da poreluftscreening typisk kun udføres i dybder op til 2 m under terræn vurderes det normalt, at være tilstrækkeligt med screening i 2-3 forskellige dybder – f.eks. lige under gulv, 1 m under terræn og 2 meter under terræn.

Afgrænsning af et hotspot med poreluftscreening kan som tidligere beskrevet foretages dynamisk, hvilket forbedrer muligheden for at placere målepunkterne hensigtsmæssigt i forhold til poreluftforureningens udbredelse.

Som tidligere beskrevet vurderes en hensigtsmæssig afstand mellem målepunkterne, at være 4-6 m på sager med chlorerede opløsningsmidler, mens afstanden bør reduceres til 2-3 m på sager forurenede med oliekomponenter. Det bemærkes, at ovenstående afstande primært er gældende for jordforureninger af samme størrelse som dem der er undersøgt i dette projekt. Hvis der er tale om væsentligt større jordforureninger benyttes ovenstående prøveafstande nær kanten af jordforureningen.

Hvis forureningen ønskes afgrænset ved akkrediterede poreluftanalyser anbefales det at anvende et reduceret prøvevolumen (f.eks. 10-50 L). Herved mindskes risikoen for sammenblanding af forurenede og ren poreluft ved kanten af poreluftforureningen og der opnås en skarpere afgrænsning end ved anvendelse af et standardvolumen på 100 L poreluft. Man skal dog sikre sig, at det anvendte prøvevolumen modsvarer en analyseteknisk detektionsgrænse, der er tilstrækkeligt lav for alle de relevante forureningskomponenter.

5.3.3 Lokalisering af ukendte kilder

Hotspot-eftersøgning kan foretages som poreluftscreening når det ud fra de aktuelle analysepriser vurderes at være fordelagtigt frem for akkrediterede analyser. I så fald anbefales det dog stadig at foretage akkrediterede analyser i ca. 20 % af screeningspunkterne. Målepunkter til akkrediteret analyse udvælges på baggrund af screeningsresultaterne samt formålet med undersøgelsen.

Hvis hotspot-eftersøgningen primært foretages med akkrediterede analyser anbefales det at udtage ca. 100 L poreluft til hver analyse. Herved øges sandsynligheden for at påvise en eventuel forurening sammenlignet med poreluftscreening, hvor der kun udtages ca. 2,5 L poreluft.

På baggrund af de udførte statistiske analyser vurderes en hensigtsmæssig afstand mellem målepunkterne på sager med chlorerede opløsningsmidler at være 2,5-4 m. På sager med mulige olieforureninger bør afstanden reduceres til <1,5 m, da hotspot-områder med oliekomponenter generelt påvirker poreluften i en mindre afstand end det er tilfældet med chlorerede opløsningsmidler.

En overordnet hensigtsmæssig prøvetæthed på både sager med chlorerede opløsningsmidler oliekomponenter vurderes at være ca. 5-10 poreluftprøver pr. 100 m².

Referencer

- /1/ Amternes Videncenter for Jordforurening (1998). Håndbog for poreluftundersøgelser. Teknik og administration nr. 7.
- /2/ Videncenter for Jordforurening (2010). Strategier og gode råd til undersøgelserne. Teknik og Administration nr. 3.
- /3/ Larsen, C. og Loll, P (2012). Er poreluftmålinger egnede i forhold til kortlægning af olieforureninger? Jordforurening.info nr. 4, s. 2-6.
- /4/ Thrane, B. (2012). Sammenligning af MIMS og kulrørs-analyser udført på renserigrund på Ærø – fejlfinding og tolkning – kan vi bruge resultaterne? Præsentation ved ATV Vintermøde 2012, Spor 3 - Metoder.
- /5/ Larsen, P., Loll, P., Larsen, C. og Dohm, A (2010). Lokalisering af hot-spot under bygning på renserigrund. Jordforurening.info nr. 1, s. 11-15.
- /6/ Hyldegaard, W. og Lauridsen, S. G. (2011). Erfaringer med anvendelse af ppb-RAE til poreluftundersøgelser – bredt samarbejde mellem regioner og rådgivere. Jordforurening.info nr. 4, s. 2-4, 2011.
- /7/ Loll, P. og Bondgaard, I (2007). Hvorfor opsamles poreluftprøver til risikovurdering ikke på ATD-rør? Jordforurening.info nr. 4, s. 10-15.
- /8/ CSIRO (2004). Petroleum and solvent vapours: Quantifying their behavior, assessment and exposure. A report to the Western Australian Department of Environment, July 2004.
- /9/ Kristensen, A. H., Loll, P., Henriksen, K, Mortensen, L. og Møldrup P (2011). Nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone. Vand & Jord nr. 1, s. 12-16.
- /10/ Miljøstyrelsen (2012). Litteraturgennemgang af strategier til dokumentation af nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone. Miljøprojekt nr. 1413 (bilag 3).
- /11/ Höhener, P., Dakhel, N., Christophersen, M., Broholm, M. og Kjeldsen, P. (2006). Biodegradation of hydrocarbons vapors: Comparison of laboratory studies and field investigations in the vadose zone at the emplaced fuel source experiment, Airbase Vaerlose, Denmark. Journal of Contaminant Hydrology nr. 88, s. 337-358.
- /12/ Broholm, M. M., Damgaard, I., Cong, L., Chambon, J. Claire C., Jakobsen, C. S., Hunkeler, D., Jeannotat, S., Tuxen, N., Kerrn-Jespersen, H., Scheutz, C., Binning, P. J., Bjerg, P. L. (2012). Konceptuel model for forureningsfordeling og processer for chlorerede opløsningsmidler i moræneler. Har vi et samlet overblik?. ATV-møde -Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer - udfordringer og metoder, s. 39-52.
- /13/ US EPA (2012). Petroleum hydrocarbons and chlorinated hydrocarbons differ in their potential for vapor intrusion. Office of Underground Storage Tanks, Washington DC. 20460, March 2012.

- /14/ Miljøstyrelsen (2009). Erfaringsopsamling på udviklingen i poreluftkoncentrationer på villatanksager. Miljøprojekt nr. 1310.
- /15/ Larsen, T. H. (2009). V2 undersøgelser og kortlægning – en sammenligning på tværs af regioner. ATV-møde - Kortlægning af jordforurening og brug af kvalitetsstyring.
- /16/ Tüchsen, P. L. og Therkelsen, M. Dynamiske undersøgelser – Erfaringer og overvejelser (2012). Præsentation ved ATV-møde – Nye undersøgelsesmetoder til jord- og grundvandsforurening.
- /17/ Christensen, A. G. (2012). Indlæg VT-8 på kursus for Videncenter for Jordforurening vedr. videregående indeklimateundersøgelser, d. 27.-28. november 2012.
- /18/ Miljøstyrelsen (2010). Variationer i poreluftens forureningsindhold – spor 1. Opstilling af modelscenarier, udvælgelse af modeller og modelberegninger. Miljøprojekt 1326.
- /19/ Nyquist, J. E. og Wilson, D. L. (1990). Decreased sensibility of photoionization detector total organic vapor detectors in the presence of methane. American Industrial Hygiene Association Journal 51, s. 326-330.
- /20/ Efron, B. (1982). The jackknife, the bootstrap and other resampling plans. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), ISBN: 0-89871-179-7.
- /21/ Efron, B. og Tibshirani, R. J. (1993) An introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall, ISBN: 0-412-04231-2.
- /22/ Wilcox, R.R. (1997). Introduction to robust estimation and hypothesis testing. Academic Press, ISBN:0-12-751545-3.
- /23/ Loll, P. (2001). Videregående databehandling. Ikke-publiceret kompendium, AAU. Kan rekvireres ved henvendelse til Per Loll (pl@dmr.dk).
- /24/ Miljøstyrelsen (2011). Variationer i poreluftens forureningsindhold – spor 2. Anvendelse og formidling af eksisterende viden. Miljøprojekt 1368.
- /25/ Miljøstyrelsen (2009). Undersøgelse og oprensning af forurening fra villaolietanke. Vejledning nr. 2, 2009.

Bilag A: Fremgangsmåde for poreluftscreening og poreluftmålinger

Ved poreluftscreening anvendes en ppbRAE (ppbRAE 3000 fra RAE Systems) til semikvantitativ måling af organiske forureningskomponenter i poreluften. I tilfælde med kraftig poreluftforurening bruges alternativt en PID-måler (miniRAE 2000 fra RAE Systems). Derudover anvendes en SKC poreluftpumpe, en vakuumboks, en boremaskine, en hammer, poreluftluftsdyd eller prøvetagningsstuds samt slanger, rilsanposer og strips. Poreluftscreeningen i dette projekt er udført som følger.

1. I bygninger gennembøres betongulvet og der installeres en prøvetagningsstuds lige under gulv. Udenfor bygninger udføres målingerne generelt ca. 0,5; 1,0; 1,5 og 1,8-2,0 meter under terræn fra et nedbanket poreluftspyd. Der tætnes ved gulv/terræn med dekorationsler eller bentonit.
2. Der foretages renpumpning med poreluftpumpen svarende til ca. 2-5 liter poreluft (2-5 min og et flow på 1 L/min).
3. Prøvetagningspunktet forbindes med en slange til vakuumboksen, hvori der monteres en Rilsan-pose (ca. 2,5 L).
4. Vakuumboksen tømmes vha. poreluftpumpen med et flow på 1 L/min, hvorved der opsamles poreluft i Rilsan-posen. Når posen er fuld tages den af og lukkes med en strip.
5. Umiddelbart herefter foretages en måling med ppbRAE ved at stikke en påmonteret nål gennem siden af posen og derefter notere det højeste udslag.



FIGUR A.1 FORSØGSOPSTILLING VED PORELUFTSCRENING UNDER BETONGULV: (A) PRØVETAGNINGSTUDS; (B) SKC PORELUFTPUMPE; (C) VAKUUM-BOKS MED EN RILSAN-POSE TIL OPSAMLING AF PORELUFT OG (D) PPBRAE TIL SCRENING FOR FLYGTIGE ORGANISKE KOMPONENTER. PÅ BILLEDET ER OGSÅ VIST EN IR GASMÅLER (E), DER KAN ANVENDES TIL SIDELØBENDE MÅLINGER I DE TILFÆLDE, HVOR RE-DOX-FORHOLDENE ØNSKES UNDERSØGT.

Udtagning af poreluftprøver ved opsamling på kulrør er under dette projekt foretaget i samme punkter som poreluftscreeningen. Prøvetagningen er udført som beskrevet i /2/. Der er enten anvendt en prøvetagningsstuds (ved prøvetagning lige under betongulv) eller et nedbanket poreluftspyd. Der er som udgangspunkt udtaget ca. 100 L poreluft, der er opsamlet på kulrør

(Dräger B) og sendt til et eksternt analyselaboratorium til akkrediteret analyse for benzin- og oliekuilbrinter og/eller chlorerede nedbrydningsprodukter. Poreluften er oppumpet med en SKC-pumpe med et flow på 1 L/min.

Bilag B: Fremgangsmåde for databehandling

I det følgende gennemgås de enkelte trin i den statistiske databehandling udført for de fem forsøgslokaliteter.

B.1 Indledende databehandling

B.1.1 Poreluftscreening vs. poreluftmålinger

For hver forsøgslokalitet foretages en simpel lineær korrelationsanalyse af sammenhængen mellem resultatet af poreluftscreening og akkrediteret poreluftmåling opnået i samme målepunkt.

På baggrund heraf tilpasses en lineær model, der på en enkelt af forsøgslokaliteterne (Halsvej) er anvendt til transformering af screeningsresultater til poreluftkoncentrationer i screeningspunkter, hvor der ikke er foretaget akkrediterede poreluftanalyser.

B.1.2 Afgrænsning af fokusområde

Inden den videre databehandling er det samlede areal med datapunkter - og dermed den samlede datamængde - reduceret til det såkaldte "fokusområde", som danner basis for den efterfølgende statistiske og geostatistiske analyse.

Fastlæggelse af fokusområdet på hver enkelt forsøgslokalitet er sket efter følgende forskrift:

- (i) Området er så vidt muligt er inddækket med nogen-lunde jævnt fordelte målepunkter med en datatæthed på mellem ca. 4 og 30 målepunkter pr. 100 m².
- (ii) Poreluftkoncentrationen af den primære forureningskomponent er generelt mindst 100 gange Miljøstyrelsens afdampningskriterium.
- (iii) De fysiske og geologiske forhold er så vidt muligt de samme i hele fokusområdet. Eksempelvis er det tilstræbt, at fokusområdet er beliggende enten indenfor eller udenfor en bygning.

B.1.3 Fastlæggelse af det "sande" forureningsniveau

Når fokusområdet på forsøgslokaliteten er fastlagt, foretages en interpolation/ekstrapolation af måledata i Surfer 9 (Golden Software), hvorefter der genereres en situationsplan med den konturerede udbredelse af poreluftforureningen. Måledata udgøres her af poreluftmålinger samt – på Halsvej - poreluftkoncentrationer estimeret på baggrund af en semikvantitativ poreluftscreening.

Kontureringen i Surfer på forsøgslokaliteterne genererer mellem ca. 900 og 5.500 datapunkter indenfor fokusområdet, alt afhængig af områdets størrelse. Dette datasæt antages, at repræsentere det "sande" forureningsbillede og vil på denne måde indgå som reference i den efterfølgende databehandling. Antagelsen vurderes at være realistisk da der på alle forsøgslokaliteter er tale om et overordentligt robust datagrundlag.

B.2 Percentile-t bootstrapping (metode 1)

Percentile-t bootstrapping er et numerisk statistisk redskab, hvor man benytter sig af ét datasæt til at estimere statistiske egenskaber (f.eks. middelværdi og fraktiler) for den underliggende statistiske population på baggrund af re-sampling af det ene datasæt man har til rådighed.

B.2.1 Målparameter for analysen

Som målparameter for vores statistiske analyse benyttes den arealvægtede middelværdi af poreluftkoncentrationen samt den statistiske usikkerhed på denne. Den arealvægtede middelmiddelværdi forventes at være proportional med den risiko en given poreluftforurening udgør for indeklimaet på en given lokalitet.

Percentile-t bootstrapping benyttes til at estimere den arealvægtede middelværdi af poreluftkoncentrationen, og usikkerheden på denne, som funktion af antallet af målepunkter (eller prøvetætheden). Usikkerheden har vi valgt at udtrykke som et 90 % konfidensinterval på den arealvægtede middelværdi.

Formålet med analysen er at komme med et bud på den prøvetæthed, hvormed vi får størst mulig sikkerhed på undersøgelsesresultatet ved brug af færrest mulige målepunkter. Det handler altså om at finde et fornuftigt balancepunkt mellem ønsket om at udtage nok prøver til at der opnås en "lille" usikkerhed på middelværdien og ikke at udtage så mange prøver, at der bliver tale om et informationsoverlap.

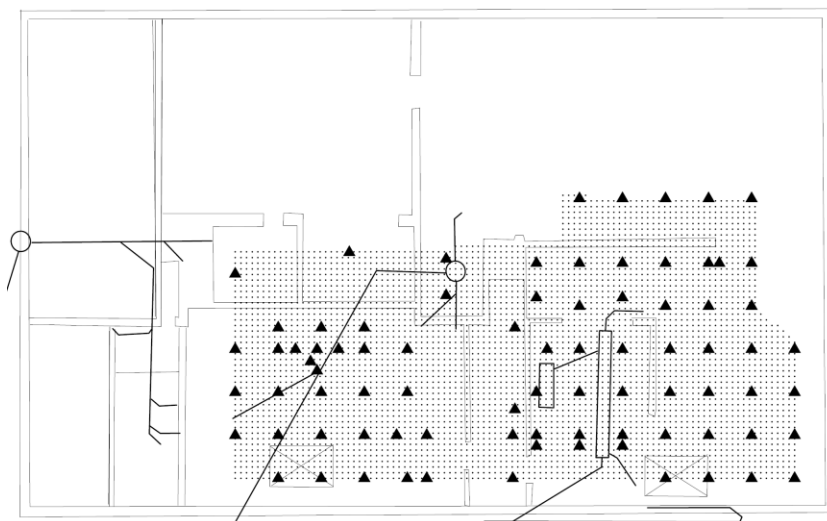
B.1.2 Fremgangsmåde

De basale metodemæssige begreber for bootstrapping-analyser er beskrevet i /20/, /21/ og /22/, mens en vejledning i Excelprogrammering af rutiner til udførelse af percentile-t bootstrapping kan rekvireres /23/.

I det følgende gives en kort generel beskrivelse af den procedure der er anvendt her i projektet.

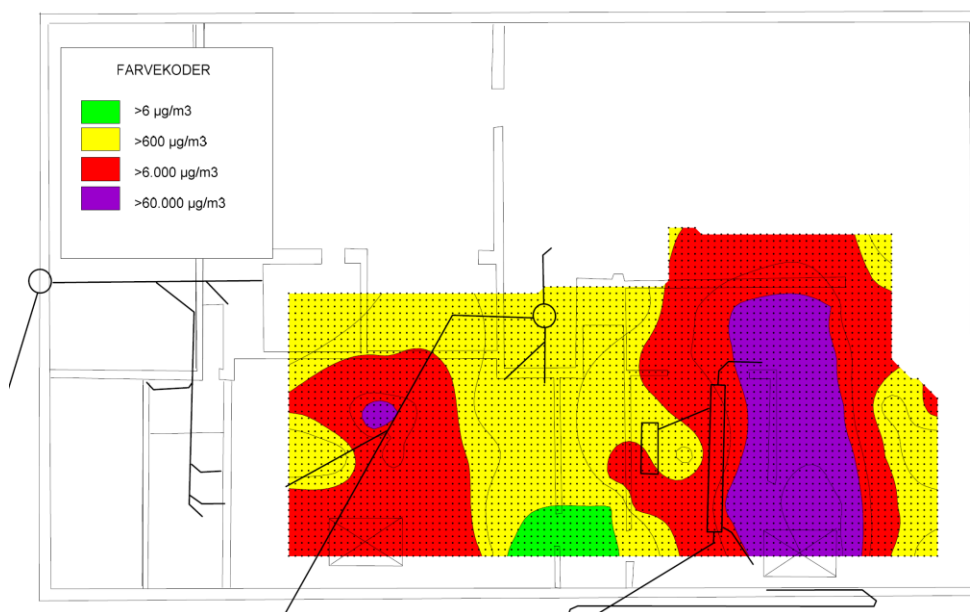
Der tages udgangspunkt i det interpolerede datanet med ca. 900-5.500 genererede datapunkter, som beskrevet i afsnit B.1.3. Vi antager, at dette interpolerede billede giver det bedste bud på den faktiske koncentrationsfordeling i poreluften på lokaliteten.

Som eksempel er der i figur B.1 vist punkter med målte/estimerede poreluftkoncentrationer af PCE fra Halsvej (i alt 82 trekanter). Når data skal kontureres benyttes standardfunktionen i Surfer til generering af en grid-fil indeholdende et meget stort antal jævnt fordelte punkter (4.344 prikker).



FIGUR B.1 FOKUSOMRÅDE FOR UNDERSØGELSEN PÅ HALSVEJ, MED INDTEGNEDE MÅLEPUNKTER (82 TREKANTER) OG SURFER-INDLAGTE GRIDPUNKTER (4.344 PRIKKER).

På baggrund af de målte koncentrationer i målepunkterne beregner Surfer en interpoleret poreluftkoncentration i hver af prikkerne og der optegnes et konturplot, jf. figur B.2. Det er dette høje antal punkter, hver med en beregnet koncentration, der tages udgangspunkt i ved percentile-t bootstrapping-analysen.



FIGUR B.2 FOKUSOMRÅDE FOR UNDERSØGELSEN PÅ HALSVEJ, MED KONTUREREDE PORELUFTKONCENTRATIONER OPTEGNET PÅ BAGGRUND AF SURFER-INTERPOLEREDE PORELUFTKONCENTRATIONER (4.344 VÆRDIER), DER DANNER UDGANGSPUNKT FOR DE STATISTISKE ANALYSER.

Ved selve bootstrapping-proceduren vælges derefter en stikprøvestørrelse, f.eks. 80 poreluftmålinger, svarende nogenlunde til undersøgelsesniveauet på Halsvej. Der udtages derefter 80 tilfældige punkter fra ovenstående grid-fil med hver sin tilknyttede poreluftkoncentration. Der ses bort fra den rumlige placering af punkterne. For disse 80 målinger beregnes en middelværdi. Dernæst udtages på ny 80 tilfældige punkter, og der beregnes igen en middelværdi. Dette gentages, således at der i alt genereres 2.000 middelværdier for en stikprøvestørrelse på 80 målepunkter. På baggrund af disse 2.000 middelværdier findes 5 og 95 % fraktilerne, svarende til grænserne i et 90 % konfidensinterval på middelværdien.

Dernæst gentages proceduren med en ny stikprøvestørrelse indtil man kan optegne den arealvægtede middelværdi som funktion af prøvetætheden pr. 100 m² (f.eks. 80 prøver pr. 275 m² på Halsvej = 29 punkter pr. 100 m²).

Eksemplet fra Halsvej er gennemgået i detaljer i bilag C.

B.3 Variogramanalyse (metode 2)

Variogrammet er et geostatistisk redskab, der udtrykker variansen for en række måleresultater som funktion af afstanden mellem målepunkterne. I variogramanalysen er det den rumlige struktur af datamaterialet der fokuseres på, mens den absolutte niveaumæssige struktur er underordnet. Analyserne er gennemført i Surfer 9 (Golden Software), der har indbyggede funktioner til udarbejdelse af variogrammer.

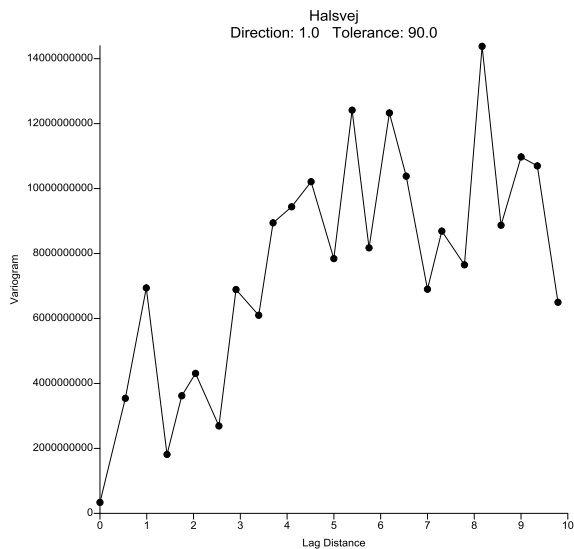
B.3.1 Målparameter for analysen

Variansen (spredningen i anden potens) er et udtryk for forskelle mellem dataværdier; jo større varians, jo større forskelle er der tale om.

Ved at plotte variansen som funktion af afstanden mellem to målepunkter kan variogrammet benyttes til at analysere datamaterialets tendens til, at poreluftresultater fra punkter placeret tæt på hinanden er koncentrationsmæssigt mere lig hinanden end poreluftresultater fra punkter placeret langt fra hinanden.

B.3.2 Fremgangsmåde

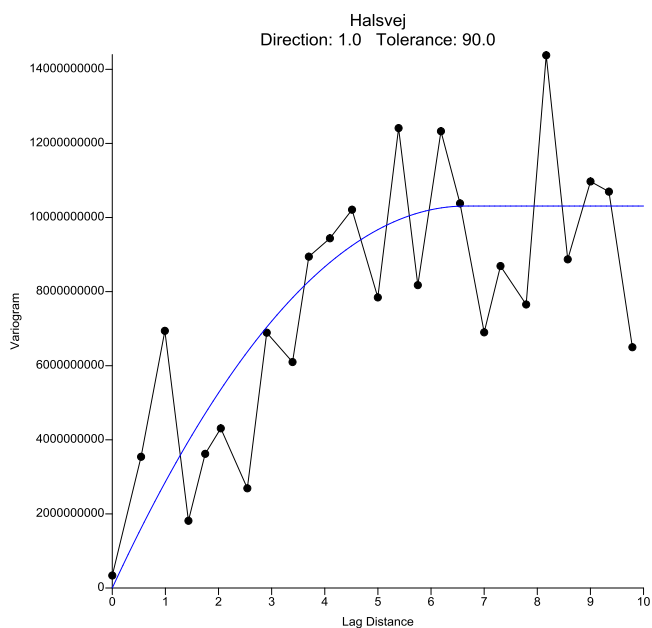
På baggrund af målepunkternes koordinater samt de tilhørende poreluftkoncentrationer beregner variogram-proceduren i Surfer variansen mellem data placeret i givne afstandsintervaller fra hinanden. I princippet opstiller programmet en stor matrice med retninger, afstande og varianser, som man efterfølgende kan arbejde med rent grafisk ved opstilling af et *eksperimentelt variogram*. Det eksperimentelle variogram for Halsvej er gengivet i figur B.3.



FIGUR B.3 EKSPERIMENTELT VARIOGRAM FOR PCE PÅ HALSVEJ. VARIOGRAMMET UDTRYKKER VARIANSEN IMELLEM PORELUFTKONCENTRATIONER SOM FUNKTION AF AFSTANDEN IMELLEM DE PUNKTER HVOR I KONCENTRATIONERNE ER MÅLT (SEPARATIONSAFSTAND ELLER "LAG DISTANCE").

Desuden er det muligt, at få programmet til at fitte forskellige modeludtryk til det eksperimentelle variogram. Her har vi lagt os fast på den kvadratiske model, der giver en jævn, men gradvist aftagende stigning op til en konstant værdi. Afstanden hvorved variansen overgår fra at være stigende til at være stabil betegnes *korrelationsafstanden*.

Det eksperimentelle variogram er i dette projekt sammenlignet med en standardiseret model (kvadratisk model) som vist i figur B.4 for Halsvej. Dette er dog kun gjort i de tilfælde, hvor modellen kunne give en tilfredsstillende beskrivelse af det eksperimentelle variogram.



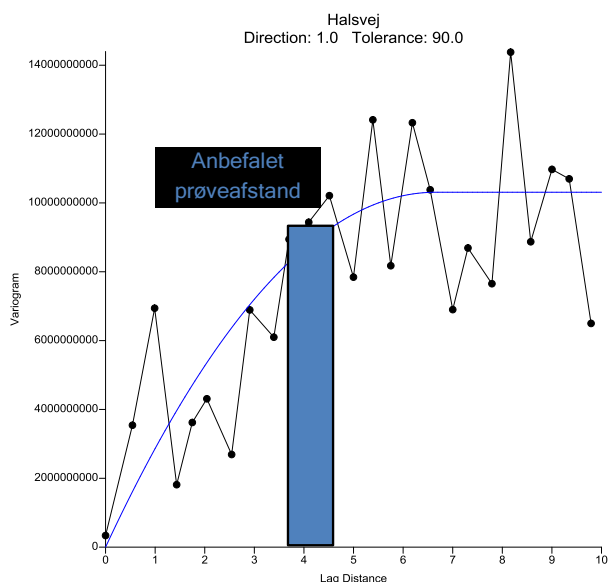
FIGUR B.4 ET KVADRATISK MODELUDTRYK FITTET TIL DET EKSPERIMENTELLE VARIOGRAM FOR PCE PÅ HALSVEJ. DEN SEPARATIONSAFSTAND HVOR MODELUDTRYKKET OPNÅR EN MAKSIMAL VÆRDI BETEGNES KORRELATIONSAFSTANDEN (HER CA. 6,7 METER).

Når korrelationsafstanden for variogrammodellen fittet til det eksperimentelle variogram fra Halsvej er 6,7 meter, udtrykker modellen således, at hvis man udtager en poreluftprøve (prøve B) mere end ca. 6,7 meter fra en anden poreluftprøve (prøve A), så vil der være en given varians mellem de to prøver. Hvis man udtager endnu en prøve (prøve C) f.eks. 20 meter fra prøve A vil der være den samme varians mellem dem som hvis de var udtaget 6,7 meter fra hinanden. Det betyder i dette tilfælde, at poreluftkoncentrationer målt længere end 6,7 m fra hinanden er geostatistisk uafhængige af hinanden. Med andre ord giver poreluftprøver udtaget hhv. 6,7 og 20 meter fra et givent punkt A lige lidt information om den koncentration man havde i punkt A.

Omvendt vil to prøver udtaget mindre end ca. 6,7 meter fra hinanden have en mindre varians (dvs. der er mindre forskel på resultaterne). Disse prøver vil være geostatistisk afhængige, hvilket betyder, at resultatet i det første punkt vil være relateret til resultatet i det andet punkt.

Den "optimale" afstand mellem målepunkter må således være en afstand, hvor man ikke får for meget informationsoverlap, men hvor prøverne på den anden side ikke er udtaget så langt fra hinanden, at der er tale om helt ny information. Sidstnævnte situation medfører nemlig, at der kan ligge "uopdaget" information imellem de målepunkter man har placeret. Med udgangspunkt i disse betragtninger defineres den "optimale" eller "anbefalede" afstand, som er anvendt i dette projekt, som den separationsafstand mellem målepunkter, hvor variansen på poreluftresultaterne er omkring 80-90 % af den maksimale varians.

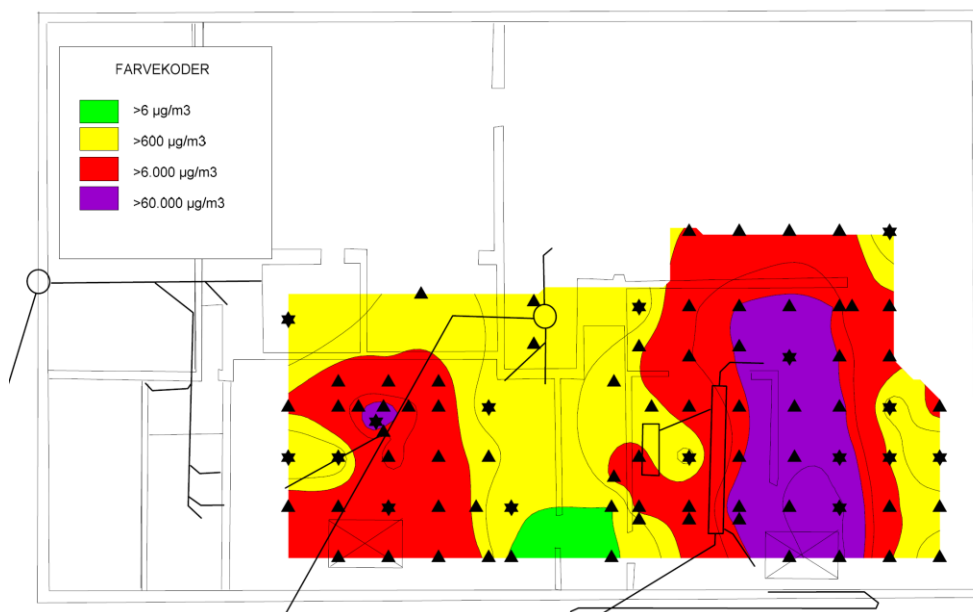
På baggrund af ovenstående valg af definition af optimal prøvetæthed opnås på baggrund af den fittede kvadratiske model for data fra Halsvej en anbefalet separationsafstand mellem målepunkterne på ca. 3,7-4,6 meter, jf. figur B.7.



FIGUR B.5 ANBEFALET SEPARATIONSAFSTAND SOM DEN AFSTAND HVOR 80-90 % AF DEN MAKSIMALE VARIANS ER OPNÅET I DEN FITTEDE KVADRATISKE MODEL TIL DET EKSPERIMENTELLE VARIOGRAM FRA HALSVEJ (HER 3,7-4,6 METER).

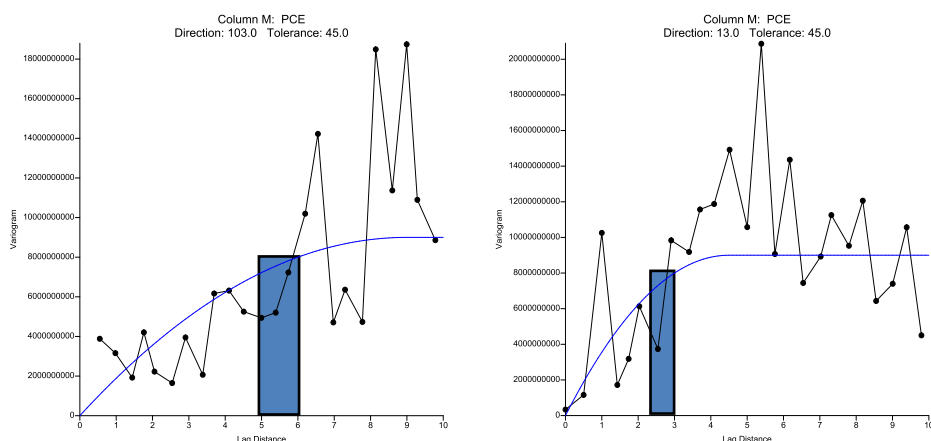
Som det ses af figur B.3-B.5, er de empiriske variogrammer (punkterne) præget af betydelig variation. Det er derfor væsentligt at pointere, at bestemmelsen af korrelationsafstanden (punktet hvor modelvariansen ikke længere stiger som funktion af separationsafstanden) ikke er nogen eksakt videnskab, men tjener til at give et groft bud på de underliggende tendenser.

I Surfer 9 er der indlagt en funktion til beskrivelse af eventuel anisotropi i de underliggende data – dvs. en tendens til, at poreluftskyn udbreder sig mere i én retning end en anden. Som det fremgår af figur B.6, er det i høj grad tilfældet for poreluftdataene for PCE på Halsvej, hvor poreluftresultaterne i højere grad orienterer sig i en nord-sydlig retning end i en øst-vestlig retning.



FIGUR B.6 KONTUREREDE PORELUFTKONCENTRATIONER FOR PCE PÅ HALSVEJ MED EN TYDELIG NORD-SYDLIG ORIENTERING I PORELUFTRESULTATERNE.

Når anisotropi i poreluftresultaterne tages i betragtning ved opstillingen af variogrammerne for Halsvej opnåes resultaterne vist i figur B.7.



FIGUR B.7 RETNINGSBESTEMTE VARIOGRAMMER FOR HALSVEJ I HHV. DEN NORD-SYDLIGE "HOVEDRETNING" (VENSTRE GRAF DIRECTION 103° MOD URET FRA STIK ØST) OG DEN ØST-VESTLIGE RETNING (HØJRE GRAF, DIRECTION 13°).

Som det fremgår af figur B.7 bliver den anbefalede separationsafstand på 5-6 meter i den nord-sydlig hovedretning, mens den bliver 2,5-3 meter i den øst-vestlige retning. Denne forskel på de to retninger afspejler, at poreluftkoncentrationen ændrer sig mere markant indenfor korte afstande i den øst-vestlige retning end i den nord-sydlig retning. Altså skal der flere prøver til i den øst-vestlige retning for at karakterisere poreluftforureningen tilstrækkeligt godt.

Bilag C: Halsvej

C.1 Baggrund og datagrundlag

Datagrundlaget på denne ejendom udgøres af resultater fra en videregående undersøgelse udført af Grontmij|Carl Bro (nu Grontmij) i december 2010 for Region Nordjylland samt en udvidet undersøgelse udført af DMR i januar 2011 i forbindelse med nærværende projekt.

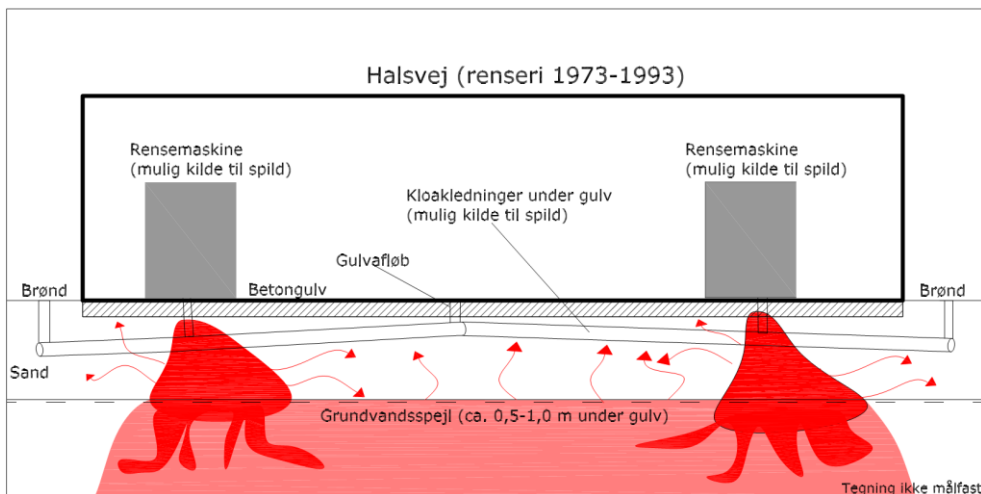
C.1.1 Ejendomsbeskrivelse

Ejendommen har i størstedelen af perioden 1973-2010 fungeret som renseri med anvendelse af perchlorethylen (PCE) til to rensemaskiner placeret langs den sydvendte væg i bygningen.

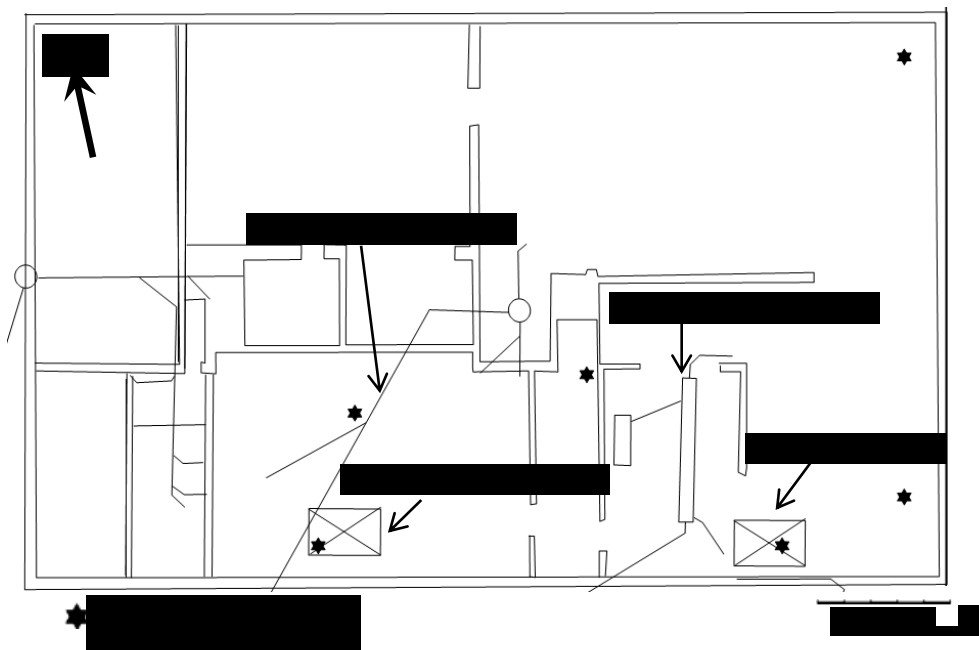
Størstedelen af bygningen er indrettet som lagerrum med ca. 5-10 cm uarmeret betongulv. Der findes to kloakledninger under bygningens gulv. Bygningen stod ubenyttet hen på tidspunktet for undersøgelserne.

Grundvandsspejlet på lokaliteten træffes fra 0,5-1,0 m under terræn. Den umættede zone består af sand med indslag af grus og muld.

En konceptuel model af lokaliteten er vist i figur C.1 og en plantegning med placeringen af de tidligere udtagne poreluftprøver er vist i figur C.2.



FIGUR C.1 FORSIMPLET KONCEPTUEL MODEL MED ANGIVELSE AF FORMODET JORDFORURENING/DNAPL OG GRUNDVANDSFORURENING SAMT KLOAKKER OG MULIGE FORURENINGSKILDER.



FIGUR C.2 PLAN OVER BYGNINGEN MED PLACERING RENSEMASKINER, PRØVETAGNINGSPUNKTER VED INDLEDENDE UNDERSØGELSE SAMT KLOAKLEDNINGER UNDER GULV.

C.1.2 Indledende undersøgelse

Grontmij|Carl Bro etablerede i december 2010 sammenlagt 20 målepunkter spredt over hele ejendommen (ca. 2.200 m²), hvoraf 6 punkter er placeret indenfor bygningen, der udgør ca. 760 m², jf. figur C.2.

Grontmij|Carl Bro har i samtlige målepunkter foretaget poreluftscreening med ppBRAE eller PID-måler og efterfølgende opsamlet ca. 100 L poreluft på kulrør til analyse for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter. Poreluftscreening i den indledende undersøgelse er gennemført med sammenligneligt udstyr og sammenlignelige procedurer i forhold til undersøgelserne udført i forbindelse med dette projekt.

Poreluftdata og situationsplaner vedr. den indledende undersøgelse er venligst udleveret af Grontmij|Carl Bro i forbindelse med dette projekt.

C.1.3 Udvidet undersøgelse

De indledende resultater viste, poreluftforurening med PCE som var koncentreret i to områder under betongulvet i den sydlige del af bygningen. Derfor blev der i den udvidede undersøgelse fokuseret på dette område.

Der etableredes 82 målepunkter umiddelbart under betongulv (inkl. genetablering af ét hotspot målepunkt fra den tidligere undersøgelse). Det var generelt muligt at etablere målepunkter i et net med en indbyrdes afstand på ca. 2 meter. I dagene for den udvidede undersøgelse var vandspejlet under ejendommen beliggende i op til 0,5 meters dybde, hvorfor der kun blev udført prøvetagning umiddelbart under gulv.

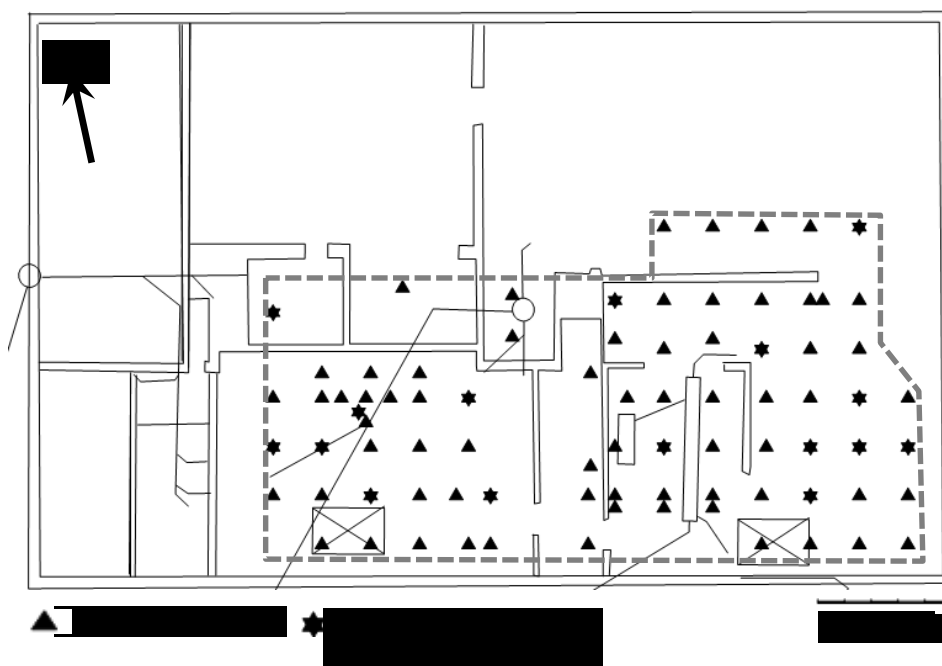
I alt 15 målepunkter fra poreluftscreening blev udvalgt til kontrolmåling ved opsamling af ca. 100 L poreluft på kulrør og efterfølgende analyse for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter.

C.2 Indledende databehandling

C.2.1 Valg af forureningskomponent og fokusområde

Undersøgelsesresultaterne viste poreluftforurening med PCE i koncentrationer op til 530.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Derudover blev der konstateret mindre indhold af andre chlorerede ethener, der dog generelt udgjorde under 10 % af den samlede mængde chlorerede kulbrinter i poreluften. I den følgende databehandling fokuseres der derfor udelukkende på PCE.

Fokusområdet på Halsvej er afgrænset til et område indendørs med målepunkterne vist i figur C.3.

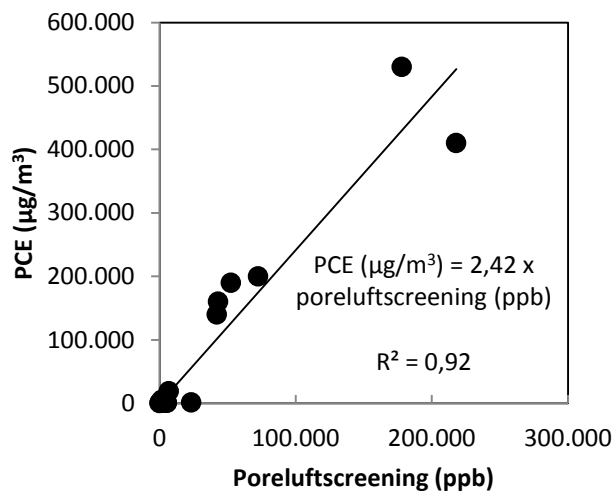


FIGUR C.3 PLAN OVER BYGNINGEN MED PLACERING AF FOKUSOMRÅDE (MARKERET MED STIPLET LINIE) MED PRØVETAGNINGSPUNKTER TIL PORELUFTSCREENING (82 PUNKTER), HVORAF DER I UDVALGTE PUNKTER OGSÅ ER UDTAGET EN PORELUFTPRØVE (15 PUNKTER).

Fokusområdet dækker ca. 275 m^2 af bygningens areal. Med 82 målepunkter er der en tæthed af målepunkter på ca. 30 pr. 100 m^2 .

C.2.2 Poreluftscreening vs. poreluftmålinger

Figur C.4 viser sammenhængen mellem resultater af poreluftscreening (ca. 2,5 L) og traditionelle poreluftmålinger (ca. 100 L). I figuren er inddraget 15 målepunkter etableret i forbindelse med DMR's undersøgelser samt 6 målepunkter etableret ved Grontmij|Carl Bro's undersøgelser, hvor der ligeledes er foretaget poreluftscreening og poreluftmåling i samme punkt.

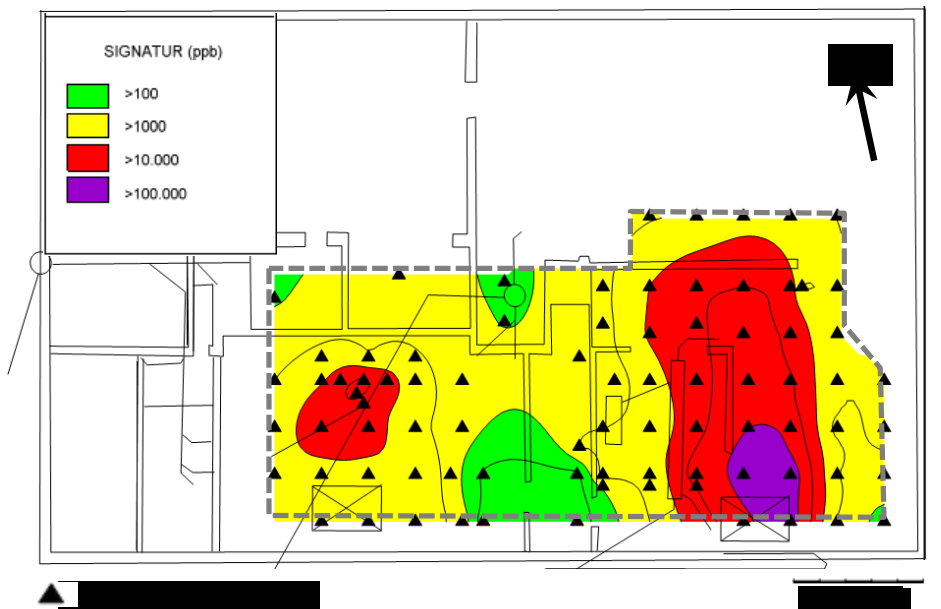


FIGUR C.4 SAMMENHÆNG MELLEM RESULTATER FRA PORELUFTSCREENING MED PPBRAE (PPB) OG PORELUFTMÅLINGER MED OPSAMLING AF PORELUFT PÅ KULRØR (21 PUNKTER).

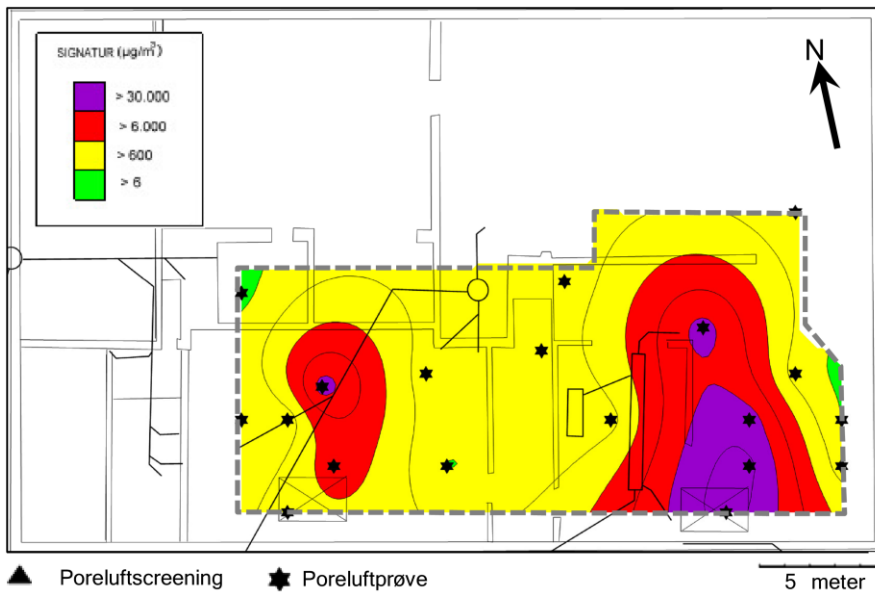
Sammenhængen mellem poreluftscreening og poreluftmåling vist i figur C.4 tyder på en overordnet lineær sammenhæng imellem data. Som grundlag for den videre databehandling er denne sammenhæng anvendt til at estimere en poreluftkoncentration af PCE i de 67 målepunkter på Halsvej, hvor der er foretaget poreluftscreening, men ikke er udtaget poreluftprøver på kulrør. Samlet set består datasættet med målte og estimerede PCE-koncentrationer i poreluften nu af 82 målepunkter, som danner udgangspunkt for de videre statistiske analyser i afsnit C.3 og C.4.

C.2.2 Konturplots

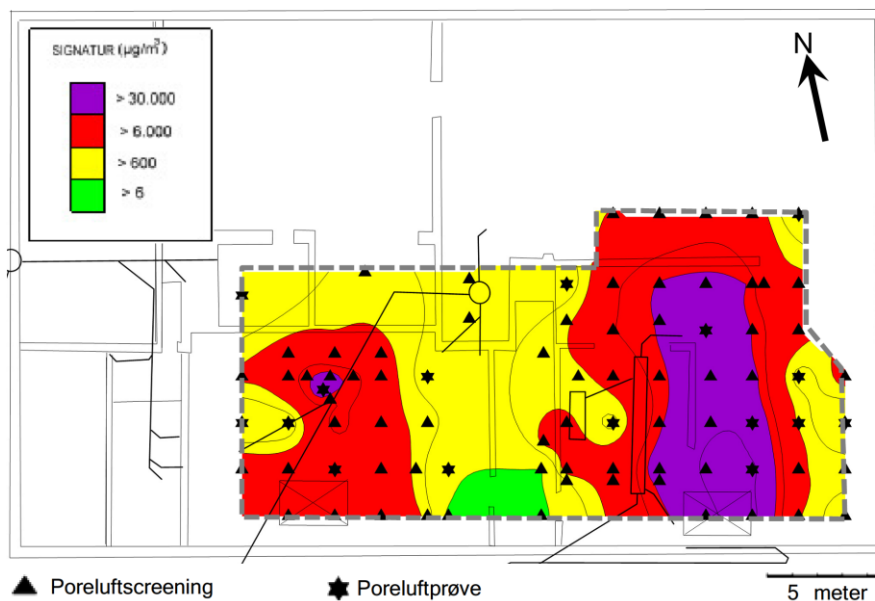
Figur C.5-C.7 viser konturerede resultater af hhv. poreluftscreening, målte poreluftkoncentrationer og målte/estimerede poreluftkoncentrationer af PCE på Halsvej. Kontureringen er foretaget og visualiseret ved brug af Surfer og omfatter 82 målepunkter i det udvalgte fokusområde.



FIGUR C.5 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE I 82 MÅLEPUNKTER.



FIGUR C.6 KONTURPLOT AF AKKREDITEREDE PORELUFTANALYSER I 19 PUNKTER, HVORAF FIRE PUNKTER STAMMER FRA DEN INDLEDENDE UNDERSØGELSE FORETAGET AF GRONTMIJ|CARL BRO.



FIGUR C.7 KONTURPLOT AF PORELUFTKONCENTRATIONER AF PCE (BASERET PÅ 15 MÅLTE OG 67 ESTIMEREDE VÆRDIER).

Det ses af figur C.5-C.7, at undersøgelsen har lokaliseret to adskilte hotspots af poreluftforurening med PCE relateret til de tidligere rensmaskiner eller kloakker under gulv.

Desuden skal det bemærkes, at poreluftfanen af PCE i begge hotspots umiddelbart strækker sig mere i retningen nord-syd end i øst-vest, hvilket er en klar indikation af at poreluftforureningen er anisotropisk (variationen er større i øst-vest end i nord-syd retningen). Poreluftforureningerne er ikke fuldt afgrænset i orienteringen nord-syd, hvor poreluftfanen strækker sig uden for bygningen (mod syd) og fokusområdet (mod nord).

C.3 Metode 1 (percentile-t bootstrapping)

Ved konturering af poreluftdata i Surfer genereres automatisk et net af datapunkter med hver sin beregnede koncentration. På Halsvej genereres på denne måde et udvidet/beregnet datasæt bestående af 4.344 poreluftkoncentrationer indenfor fokusområdet. Middelværdien af PCE-koncentrationen for disse punkter er ca. 36.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Da datapunkterne er jævnt fordelt (hvert punkt repræsenterer ca. 0,06 m^2), svarer denne værdi til den arealvægtede middelmiddelværdi af PCE under fokusområdet.

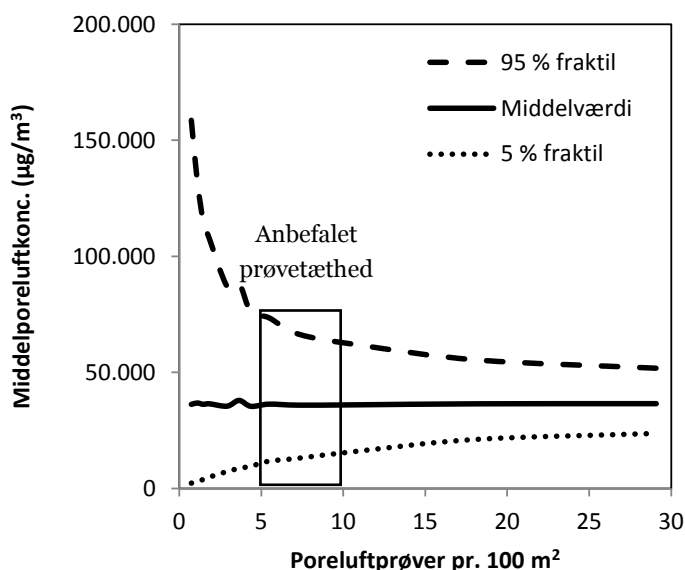
C.3.1 Fremgangsmåde

Den statistiske dataanalyse ved percentile t-bootstrapping udføres med udgangspunkt i det udvidede datasæt (4.344 punkter), der repræsenterer vores bedste bud på den sande koncentrationsfordeling under gulvet på lokaliteten.

Der udtages 2.000 stikprøver med en given størrelse (med tilbagelægning) for hver af følgende stikprøvestørrelser: 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 20, 30, 50 og 80, hvilket svarer til en prøvetæthed på Halsvej på mellem ca. 0,7 og 29 poreluftprøver pr. 100 m^2 . På baggrund af de 2.000 stikprøver beregnes, for hver stikprøvestørrelse, en (arealvægtet) middelværdi og et 90 % konfidensinterval for middelværdien. Dermed udtrykkes den statistiske usikkerhed på den arealvægtede middelværdi af poreluftkoncentrationen som funktion af antallet af poreluftprøver.

C.3.2 Resultater

Nedenstående figur C.8 angiver middelmiddelværdien som funktion af prøvetætheden pr. 100 m^2 . Usikkerheden på middelværdien er vist som hhv. 5 % og 95 % fraktiler, svarende til et 90 % konfidensinterval på middelværdien. Forskellen mellem de beregnede fraktiler og middelværdien kan betragtes, som et udtryk for usikkerheden på en poreluftundersøgelse med den givne prøvetæthed.



FIGUR C.8 DEN AREALVÆGTETDE MIDDLEVÆRDI AF PORELUFTKONCENTRATIONEN SAMT ET 90 % KONFIDENSINTERVAL PÅ DENNE SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN.

Som forventet bliver der mindre og mindre usikkerhed på middelværdien i takt med, at prøvetætheden øges. Effekten af øget prøvetæthed er størst op til ca. 5 poreluftprøver pr. 100 m^2 , hvorefter effekten aftager gradvist. Det betyder, at den effekt (givet som opnået ekstra sikkerhed på den arealvægtede middelværdi) bliver gradvist mindre og mindre jo flere prøver man tager udover 10 prøver pr. 100 m^2 .

Hvis formålet med poreluftundersøgelsen er at fastlægge den arealvægtede middelværdi så nøjagtigt som muligt med et minimum af ressourceinput, anbefales det, at der udtages ca. 5-10 poreluftprøver pr. 100 m² på den konkrete lokalitet.

C.4 Metode 2 (variogramanalyse)

C.4.1. Fremgangsmåde

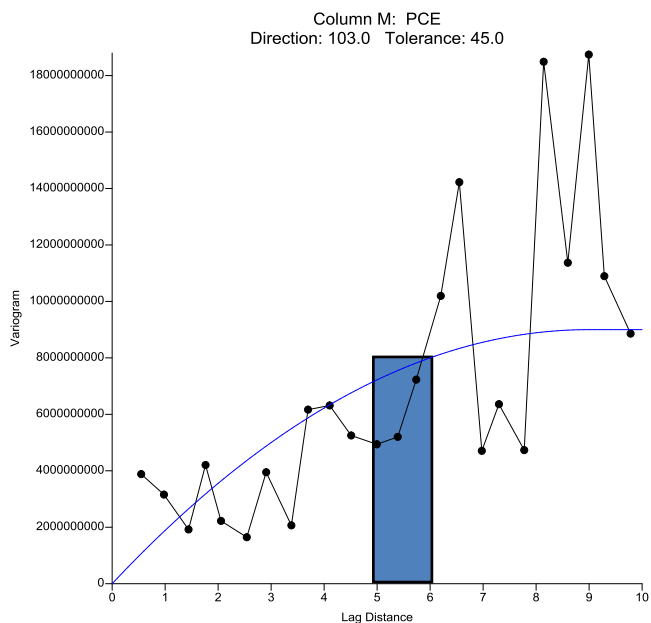
Den rumlige korrelation og variabilitet på lokaliteten undersøges ved, i udvalgte retninger, at beregne variansen som funktion af afstanden mellem to målepunkter – dvs. der optegnes et variogram.

Variogrammet beregnes ved standardindstillinger i Surfer og med udgangspunkt i de 82 målte/estimerede PCE-koncentrationer i det udvalgte fokusområde. Med autofit-funktionen i Surfer sammenlignes det eksperimentelle variogram med en modelligning (kvadratisk model).

C.4.2 Resultater

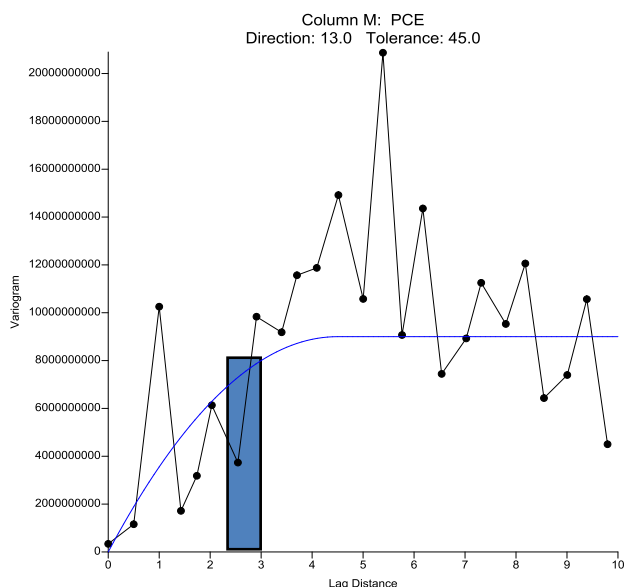
Modeltilpasningen i Surfer påviste anisotropi i de underliggende poreluftdata, svarende til den aflange poreluftudbredelse i nord-sydgående retning (vinkel ca. 103° fra stik øst og mod urets retning). Med andre ord er der en tendens til, at poreluftforureningen breder sig mere i nord-sydlig retning end i øst-vestlig retning.

Dette afspejler sig i de fittede variogrammer, som i nord-sydlig retning viser en korrelationsafstand i størrelsesordenen 9 meter (figur C.8). I henhold til den fittede kvadratiske model opnås 80-90 % af den maksimale varians i en afstand på ca. 5-6 meter, svarende til det mørkeblå felt i figur C.9. Dette svarer til, at der med en afstand imellem poreluftprøverne på 5-6 meter opnås forholdsvist megen ny information om poreluftkoncentrationens fordeling under gulvet.



FIGUR C.9 RESULTAT AF VARIOGRAMANALYSE I NORD-SYDLIG RETNING, HVOR DER VAR HØJEST RUMLIG KORRELATION. DET MØRKEBLÅ FELT ANGIVER DEN PRØVEAFSTAND, HVOR DER OPNÅS 80-90 % AF DEN MAKSIMALE VARIANS.

I retningen vinkelret på ovenstående hovedretning (dvs. orienteringen vest-øst) vurderes korrelationsafstanden at være ca. det halve, altså 4,5 meter (figur C.10). Ud fra modelsammenligningen i Surfer er det bestemt, at 80-90 % af den maksimale varians opnås i en afstand på ca. 2,5-3 meter, svarende til det mørkeblå felt i figur C.9.



FIGUR C.10 RESULTAT AF VARIOGRAMANALYSE I ØST-VESTLIG RETNING, VINKELRET PÅ DEN RETNING, HVOR DER ER STØRST RUGLIG KORRELATION (FIGUR C.9). DET MØRKEBLÅ FELT ANGIVER INTERVALLET AF LAGAFSTANDE, HVOR DER OPNÅS 80-90 % AF DEN MAKSIMALE VARIANS, JF. DEN FITTEDE MODEL.

Ud fra den geostatistiske analyse af data fra Halsvej vurderes en hensigtsmæssig prøveafstand på lokaliteten at være i størrelsesordenen ca. 2,5-3 m baseret på 80-90 % af korrelationsafstanden i den retning, hvor variationen er størst (øst-vest). Da korrelationsafstanden er længere i orienteringen fra syd til nord kunne man i dette tilfælde øge afstanden mellem målepunkter i denne retning til ca. 5-6 m, eventuelt som følge af et dynamisk undersøgelsesforløb.

På denne baggrund vurderes en poreluftprøve overslagsmæssigt at kunne repræsentere et areal på mellem 7,5 m² (2,75·2,75 meter) og 15,1 m² (2,75·5,5 meter). Dette svarer til en prøvetæthed på ca. 7-13 prøver pr. 100 m².

C.4 Samlede resultater

Nøgletal for Halsvej er opsummeret i nedenstående tabel.

TABEL C.1 OPSUMMERING AF NØGLETAL FOR HALSVEJ.

Areal af fokusområde	275 m ²
Datagrundlag	82 målepunkter
Prøvetæthed	30 pr. 100 m ²
Primær forureningskomponent	PCE
Maks. koncentration i poreluft	530.000 µg/m ³
Arealvægtet middelkoncentration	36.000 µg/m ³
Anbefalet afstand mellem målepunkter	2,5-6,0 meter
Anbefalet prøvetæthed:	
Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	5-10 prøver pr. 100 m ²
Metode 2 (variogramanalyse)	7-13 prøver pr. 100 m ²

Bilag D: Gammel Østergade

D.1 Baggrund og datagrundlag

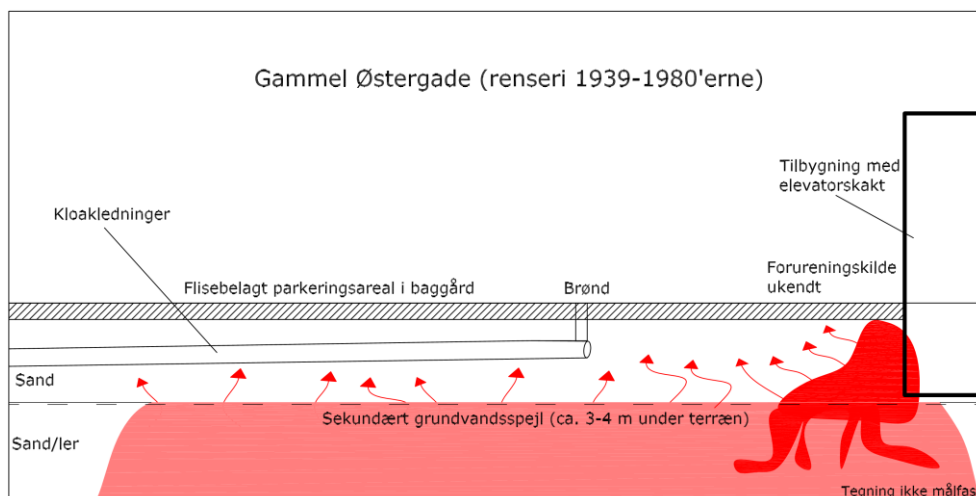
Datagrundlaget på denne ejendom udgøres af resultater fra en supplerende undersøgelse udført af NIRAS i 2011 for Region Nordjylland samt en udvidet undersøgelse udført af DMR senere samme år i forbindelse med nærværende projekt.

D.1.1 Ejendomsbeskrivelse

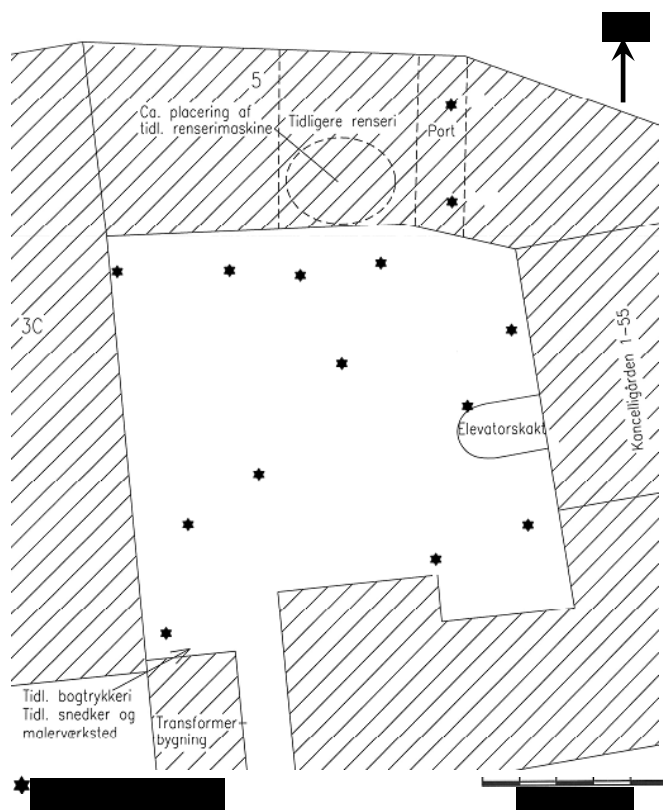
På lokaliteten har der i perioden 1939-1980'erne bl.a. været renseri, som har givet anledning til poreluftforurening med PCE.

Bygningerne på lokaliteten anvendes i dag fortrinsvis til beboelse. Gårdarealet mellem bygningerne er befæstet med herregårdssten og bruges som parkeringsplads. En konceptuel model af lokaliteten er vist i figur D1 og en plan over ejendommen og prøvetagningspunkterne fra den indledende poreluftundersøgelse er vist i figur D.2.

På lokaliteten træffes sekundært grundvand fra 3-4 m under terræn. De overliggende jordlag udgøres af sand til ca. 4 m, hvorefter der er et lerlag.



FIGUR D.1 FORSIMPLET KONCEPTUEL MODEL MED ANGIVELSE AF FORMODET JORDFORURENING/DNAPL OG GRUNDVANDSFORURENING SAMT KLOAKKER.



FIGUR D.2 PLAN OVER LOKALITETEN SAMT UDTAGNING AF PORELUFTPRØVER VED DEN INDLEDENDE UNDERSØGELSE UDFØRT AF NIRAS.

D.1.2 Indledende undersøgelse

NIRAS etablerede i 2011 sammenlagt 17 målepunkter i et område på ca. 1.100 m² (de 14 ses af figur D.1).

Der blev i disse målepunkter opsamlet ca. 100 L poreluft på kulrør til analyse for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter. Der blev ikke udført poreluftscrening ved den indledende undersøgelse.

Poreluftdata og situationsplaner mm. er venligst udleveret af NIRAS i forbindelse med dette projekt.

D.1.3 Udvidet undersøgelse

De første resultater viste, at poreluftforureningen med PCE tilsyneladende havde et hotspot i gårdarealet mellem bygningerne. Derfor blev der i den udvidede undersøgelse fokuseret på dette område.

I alt 15 målepunkter blev etableret gennem flisebelægningen og der blev foretaget poreluftscrening i dybderne 0,5; 1,0; 1,5 og 1,8 meter. I alle 15 punkter blev der foretaget kontrolmåling i dybden 1,0 meter ved opsamling af ca. 100 L poreluft kulrør og efterfølgende analyse for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter.

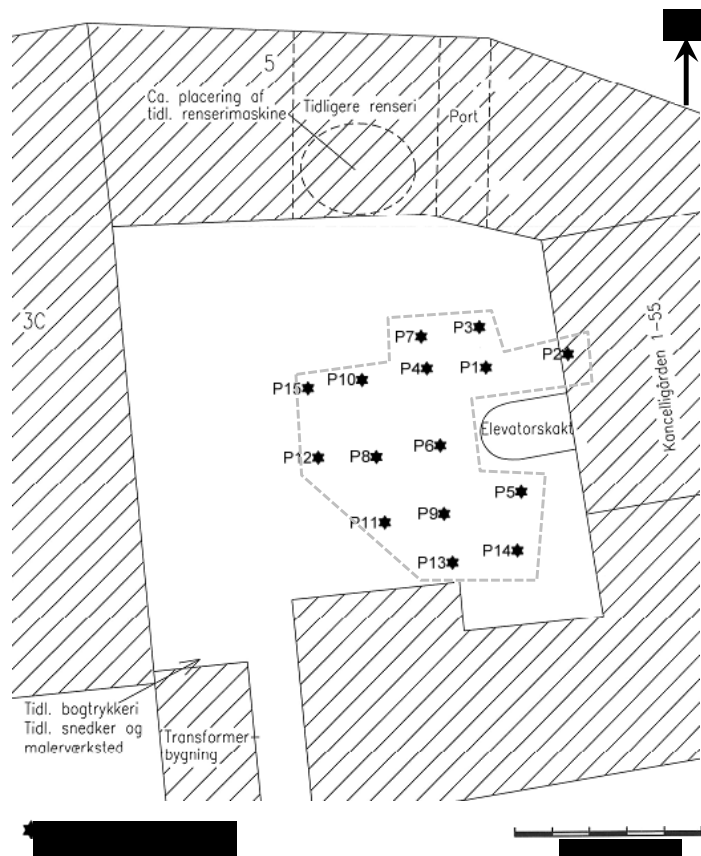
D.2 Indledende databehandling

D.2.1 Valg af forureningskomponent og fokusområde

Undersøgelseresultaterne viste poreluftforurening med PCE i koncentrationer op til 43.000 µg/m³. Derudover blev der konstateret mindre indhold af TCE og nedbrydningsprodukter af PCE, der dog

generelt udgjorde mindre end 10 % af den samlede mængde chlorerede kulbrinter i poreluften. Derfor fokuseres der udelukkende på PCE i den efterfølgende databehandling.

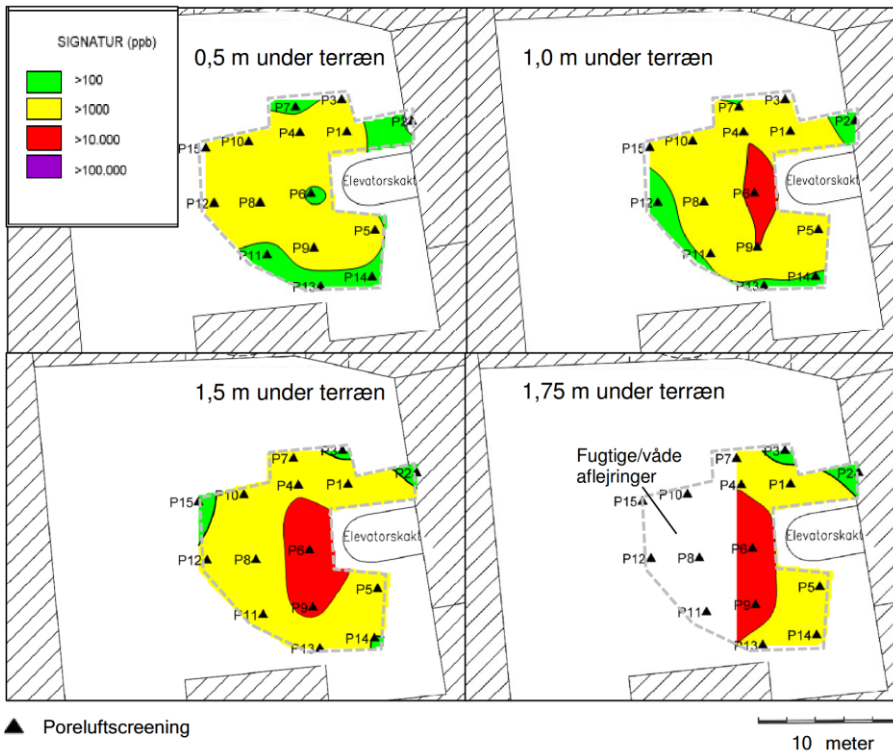
Det samlede fokusområde (og dermed den samlede datamængde) er reduceret inden den videre databehandling. På Gammel Østergade er det valgt at fokusere på gårdarealet med de 15 nye målepunkter (i fire forskellige dybder) vist i figur D.3. Fokusområdet dækker ca. 165 m², hvilket resulterer i en tæthed af målepunkter på ca. 9 pr. 100 m².



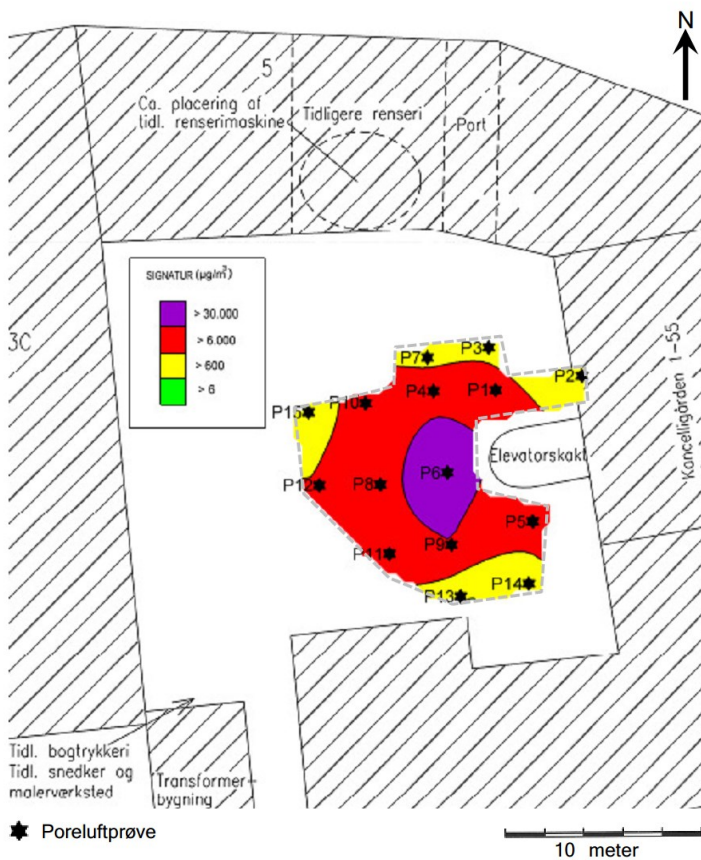
FIGUR D.3 DET UDVALGTE FOKUSOMRÅDE PÅ LOKALITETEN MED PLACERING PRØVETAGNINGSPUNKTER ANVENDT I DATABEHANDLINGEN.

D.2.2 Konturplots

Figur D.4 viser konturerede resultater af poreluftscreningen udført i forskellige dybder med ppbRAE. Desuden viser figur D.5 de konturerede poreluftmålinger af PCE foretaget 1,0 meter under terræn ved opsamling af ca. 100 L poreluft på kulrør. Kontureringen omfatter 15 målepunkter i det udvalgte fokusområde.



FIGUR D.4 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE (PPB) I DYBDERNE 0,5, 1,0, 1,5 OG 1,8 METER UNDER TERRÆN. I DYBDEN 1,75 METER UNDER TERRÆN. I DEN VESTLIGE DEL AF FOKUSOMRÅDET KUNNE DER IKKE UDTAGES PORELUFT I DENNE DYBDE PGA. FUGTIGE/VÅDE AFLEJRINGER.



FIGUR D.5 KONTURPLOT AF PORELUFTMÅLINGER AF PCE ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) I DYBDEN 1,0 METER UNDER TERRÆN.

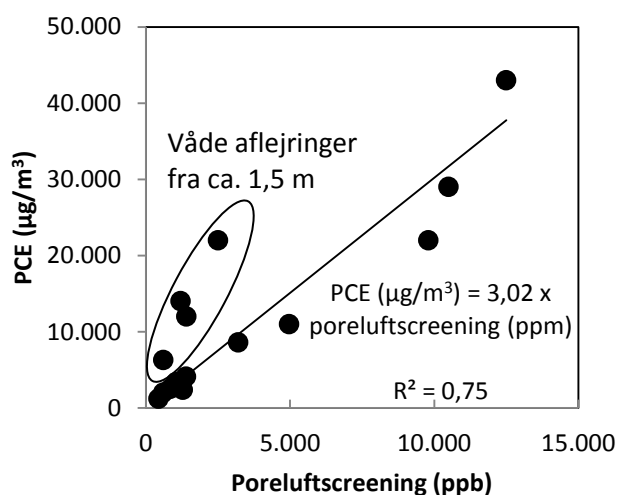
Resultaterne vist i figur D.4 og D.5 udpeger et hotspot med PCE-forurening ud for elevatorskakten på den østlige del af parkeringspladsen. Elevatorskakten blev bygget i 2010 og det er uvist, hvorvidt der blev truffet forurening i forbindelse med byggearbejdet.

Desuden viser de udførte poreluftscreeneringer i flere dybder, at poreluftforureningen bliver kraftigere med dybden. Dog bliver poreluftforureningen i den vestlige del af området afgrænset nedadtil af fugtige aflejringer fra 1,5-1,75 meters dybde. Det må forventes, at fugtige aflejringer konstateret under poreluftforureningen indikerer høje porevandskoncentrationer af PCE. Porevandskoncentrationerne blev ikke målt i forbindelse med dette projekt.

D.2.3 Poreluftscreening vs. poreluftmålinger

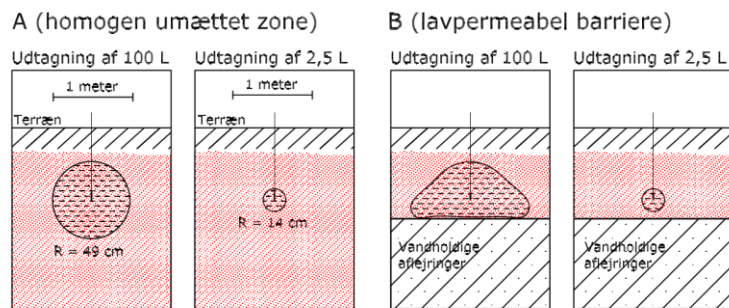
Figur D.6 viser sammenhængen mellem resultater af poreluftscreening (ca. 2,5 L) og de traditionelle poreluftmålinger (ca. 100 L). I figuren er inddraget de 15 målepunkter etableret i forbindelse med DMR's undersøgelser. Både poreluftmålinger og poreluftscreening er foretaget i dybden 1 m u.t.

Korrelationen mellem poreluftscreening og poreluftmåling vist i figur D.6 viser overordnet set en lineær sammenhæng.



FIGUR D.6 SAMMENHÆNG MELLEM PORELUFTSCRENING MED PPBRAE OG PORELUFTMÅLINGER MED OPSAMLING AF PORELUFT PÅ KULRØR (15 PUNKTER). DATA FRA 1,0 M U.T.

På figuren er der markeret en gruppe af målepunkter (P8, P10, P11 og P12), der udviser en anden korrelation end de øvrige målepunkter (højere poreluftkoncentrationer ved samme ppbRAE-udslag). I netop disse målepunkter var det ikke muligt at udtage poreluft dybere end ca. 1,5 meter under terræn som følge af fugtige/våde aflejringer. I dette område vil opsamling af 100 L poreluft i dybden 1,0 meter under terræn muligvis medføre, at der tiltrækkes (mere forurenede) luft fra et "pandekage-formet" område oven på det kapillare vandspejl/de lavpermeable aflejringer (se figur D.7). Dermed tiltrækkes (forurenede) luft fra et større område end ved poreluftscreening, hvor der kun udtages ca. 2,5 L poreluft (40 gange mindre end ved poreluftmålingen).



FIGUR D.7 PRINCIPSKITSE AF PRØVEUDTAGINGSOMRÅDE VED UDTAGNING AF HHV. 100 L PÅ KULRØR OG 2,5 L VED PORELUFTSCREENING I HHV. HOMOGEN SANDJORD OG SANDJORD MED UNDERLIGGENDE VÅDE AFLEJRINGER.

Der er foretaget poreluftmålinger i samtlige punkter i det udvalgte fokusområde, hvorfor screeningsresultaterne ikke indgår direkte i den efterfølgende databehandling.

D.3 Metode 1 (percentile-t bootstrapping)

Ved konturering i Surfer genereres et net af datapunkter med hver sin beregnede poreluftkoncentration. På Gammel Østergade fås på denne måde et udvidet/beregnet datasæt bestående af 2.228 poreluftkoncentrationer indenfor fokusområdet, der repræsenterer vores bedste bud på den faktiske forureningsfordeling i poreluften på lokaliteten. Middelværdien af PCE-koncentrationen for disse punkter er ca. $6.300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Da datapunkterne er jævnt fordelt (ca. $0,07 \text{ m}^2$ pr. punkt), repræsenterer dette tal den arealvægtede middelværdi af PCE-koncentrationen i fokusområdet.

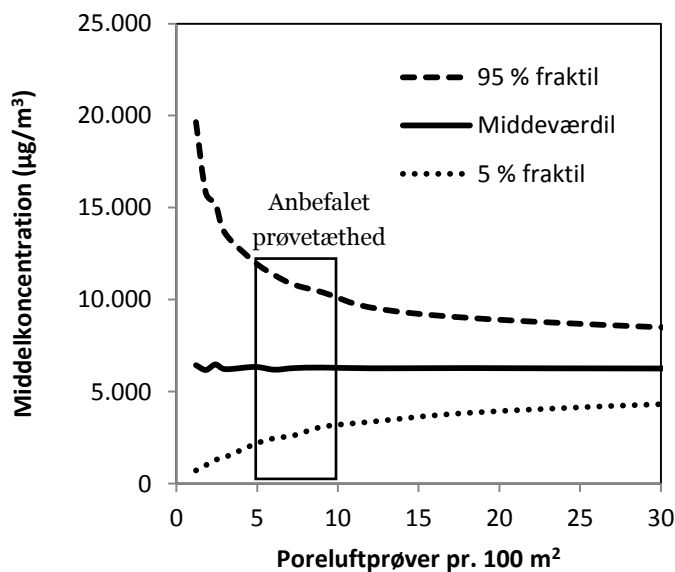
D.3.1 Fremgangsmåde

Den statistiske dataanalyse ved percentile t-bootstrapping udføres med udgangspunkt i det udvidede datasæt (2.228 punkter), hvorfra der udtages stikprøver med en given størrelse (med tilbagelægning). Denne proces gentages 2.000 gange for hver stikprøvestørrelse med efterfølgende beregning af middelværdien af PCE-koncentrationen.

Processen gentages for en række stikprøvestørrelser; hhv. 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 20, 30, 50 og 80, hvilket svarer til en prøvetæthed på Gammel Østergade på mellem ca. 1,2 og 48 poreluftprøver pr. 100 m^2 .

D.3.2 Resultater

Nedenstående figur D.8 viser middelkoncentrationen som funktion af prøvetætheden pr. 100 m^2 . Usikkerheden på middelværdien er vist som hhv. 5 % og 95 % fraktiler, svarende til et 90 % konfidensinterval på middelværdien.



FIGUR D.8 DEN AREALVÆGTETDE MIDDELVÆRDI AF PORELUFTKONCENTRATIONEN SAMT ET 90 % KONFIDENSINTERVAL PÅ DENNE SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN.

Der ses at være mindre og mindre usikkerhed på middelværdien i takt med, at prøvetætheden øges. Effekten af øget prøvetæthed er størst op til ca. 5 poreluftprøver pr. 100 m², hvorefter effekten aftager gradvist. Det betyder, at den ekstra effekt der opnås ved udtagning poreluftprøver udover ca. 10 prøver pr. 100 m², bliver mindre desto flere prøver man udtager.

Ud fra den statistiske analyse på den konkrete forsøgslokalitet vurderes ca. 5-10 poreluftprøver pr. 100 m², at være den optimale strategi i forhold til at få mest mulig sikkerhed på undersøgelsen med færrest mulige ressourcer.

D.4 Metode 2 (variogramanalyse)

D.4.1. Fremgangsmåde

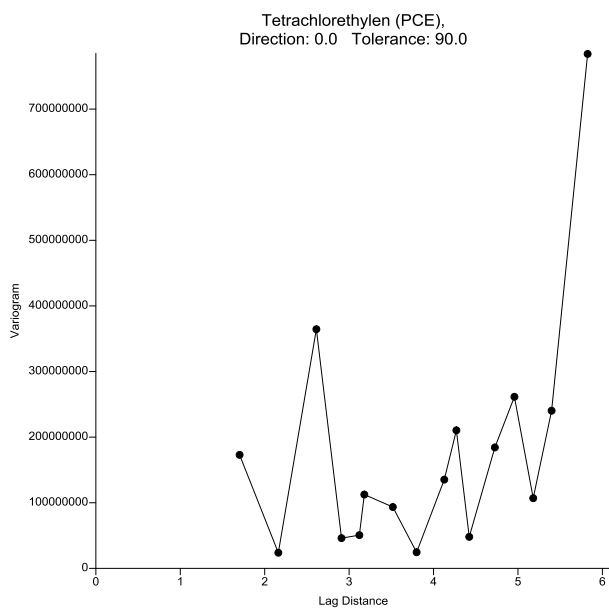
Den rumlige korrelation og variabilitet på lokaliteten undersøges ved at beregne variansen som funktion af afstanden mellem to målepunkter (dvs. der udarbejdes et variogram).

Variogrammet beregnes ved standardindstillinger i Surfer 9 (Golden Software) med udgangspunkt i de 15 målte PCE-koncentrationer i det udvalgte fokusområde.

D.4.2 Resultater

På baggrund af variogrammet for poreluftdata for PCE på Gammel Østergade (figur D.9) vurderes det ikke at være meningsfyldt, at foretage en modelfitning. Dermed vurderes datagrundlaget ikke at være egnet til vurdering af korrelationsafstanden på lokaliteten; formentlig pga. et forholdsvist lavt poreluftantal og en begrænset afgrænsning af poreluftforureningen.

Variogrammet indikerer, at korrelationsafstanden på lokaliteten er større end den maksimale korrelationsafstand, som det er muligt at beregne variogrammet for i dette fokusområde (ca. 5,8 m), da variansen fortsat stiger ved den længste separationsafstand.



FIGUR D.9 RESULTAT AF VARIOGRAMANALYSE FOR PCE PÅ GAMMEL ØSTERGADE.

Hvis det antages, at korrelationsafstanden er 6 meter kan der gættes på en hensigtsmæssig prøveafstand på omkring 4-5 meter. Hvis korrelationsafstanden i virkeligheden er mere end 6 meter, som variogrammet indikerer, vil en prøveafstand på 4-5 meter formentlig være konservativt (flere end nødvendigt).

På denne baggrund vurderes en poreluftprøve overslagsmæssigt at kunne repræsentere et areal på mellem 16 m² (4·4 meter) og 25 m² (5·5 meter), svarende til et forsigtigt gæt på en prøvetæthed på 4-6 prøver pr. 100 m².

D.4 Samlede resultater

Nøgletal for Gammel Østergade er opsummeret i nedenstående tabel.

TABEL D.1 OPSUMMERING AF NØGLETAL FOR GAMMEL ØSTERGADE.

Areal af fokusområde	165 m ²
Datagrundlag	15 målepunkter
Prøvetæthed	9 pr. 100 m ²
Primær forureningskomponent	PCE
Maks. koncentration i poreluft	43.000 µg/m ³
Arealvægtet middelkoncentration	6.300 µg/m ³
Anbefalet afstand mellem målepunkter	4-5 meter (usikkert, vurderet konservativt)
Anbefalet prøvetæthed:	
- Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	5-10 prøver pr. 100 m ²
- Metode 2 (variogramanalyse)	4-6 pr. 100 m ² (usikkert, vurderet konservativt)

Bilag E: Kajerødvej

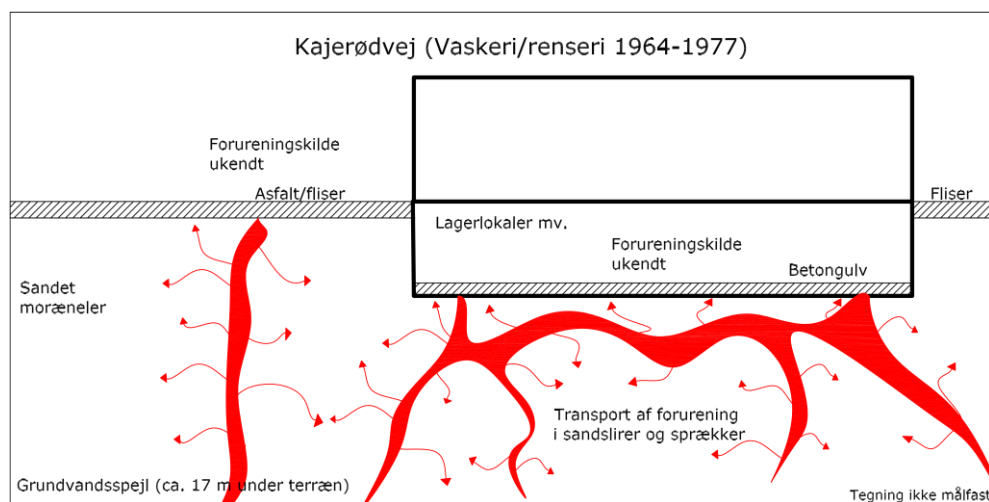
E.1 Baggrund og datagrundlag

På denne ejendom blev der ved en registreringsundersøgelse i 1996 påvist forurening med især PCE. Datagrundlaget i dette projekt udgøres af en afgrænsende forureningsundersøgelse udført af DMR i 2011.

E.1.1 Ejendomsbeskrivelse

På lokaliteten har der i perioden 1964-1977 bl.a. været renseri/vaskeri, hvor PCE er blevet anvendt som rensesvæske. Ejendommen anvendes i dag til beboelse og butikslokaler med kælder under en del af bygningen. Forureningskilden er ikke kendt.

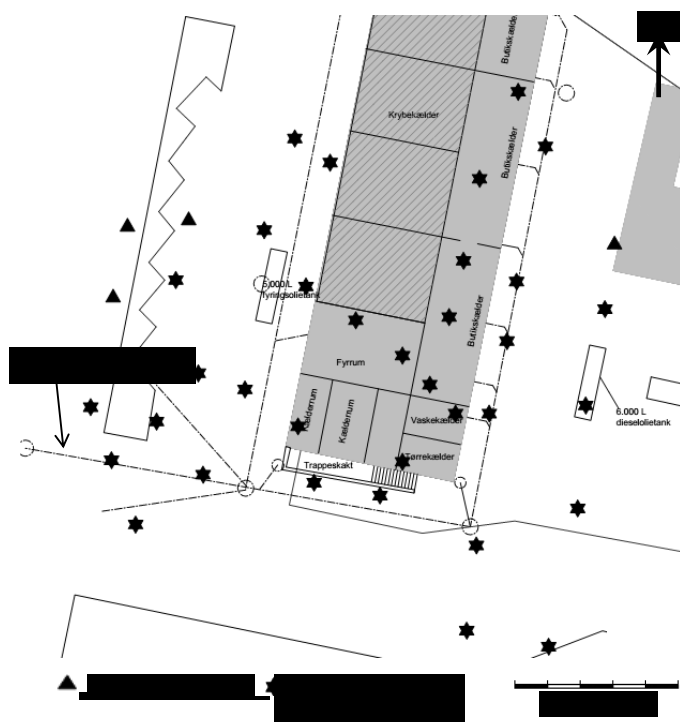
Områdets primære grundvandsspejl er beliggende ca. 17 m under terræn. Øverst træffes 0,3-0,6 m fyldsand, hvorunder der generelt træffes sandet moræneler med fugtige slirer ned til grundvandsspejlet. I figur E.1 ses en konceptuel model af lokaliteten.



FIGUR E.1 FORSIMPLET KONCEPTUEL MODEL MED SPREDNING AF FORURENING/DNAPL I TYNDE SLIRER OG SPRÆKKER SAMT AFDAMPNING HERFRA TIL GASFASEN.

E.1.2 Udvidet undersøgelse

Der etableredes 39 målepunkter under flisebelægningen eller under betongulv i bygningens kælder. En plan over ejendommen og de etablerede målepunkter er vist i figur E.2.



FIGUR E.2 PLAN OVER LOKALITETEN SAMT PLACERING AF PRØVETAGNINGSPUNKTER TIL PORELUFTSCREENING OG PORELUFTMÅLINGER.

I de 39 målepunkter blev der generelt foretaget poreluftscrening i dybderne 0,5; 1,0; 1,5 og 1,8 meter under terræn. I kælderen blev der foretaget en screening lige under betongulv, samt i flere dybder op til 1,8 meter under gulv, hvor det var muligt.

Som kontrol blev der udtaget poreluftprøver til analyse fra 35 målepunkter. 10 af prøverne blev udtaget umiddelbart under betongulv i kælderen (ca. 2,1 meter under terræn), mens 25 prøver blev udtaget fra de udendørs arealer i dybden 1 meter under terræn. I fire screeningspunkter blev der ikke udtaget poreluftprøver. Poreluftprøverne blev udtaget ved opsamling af ca. 100 L poreluft på kulrør og efterfølgende analyseret for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter.

E.2 Indledende databehandling

E.2.1 Valg af forureningskomponent og fokusområde

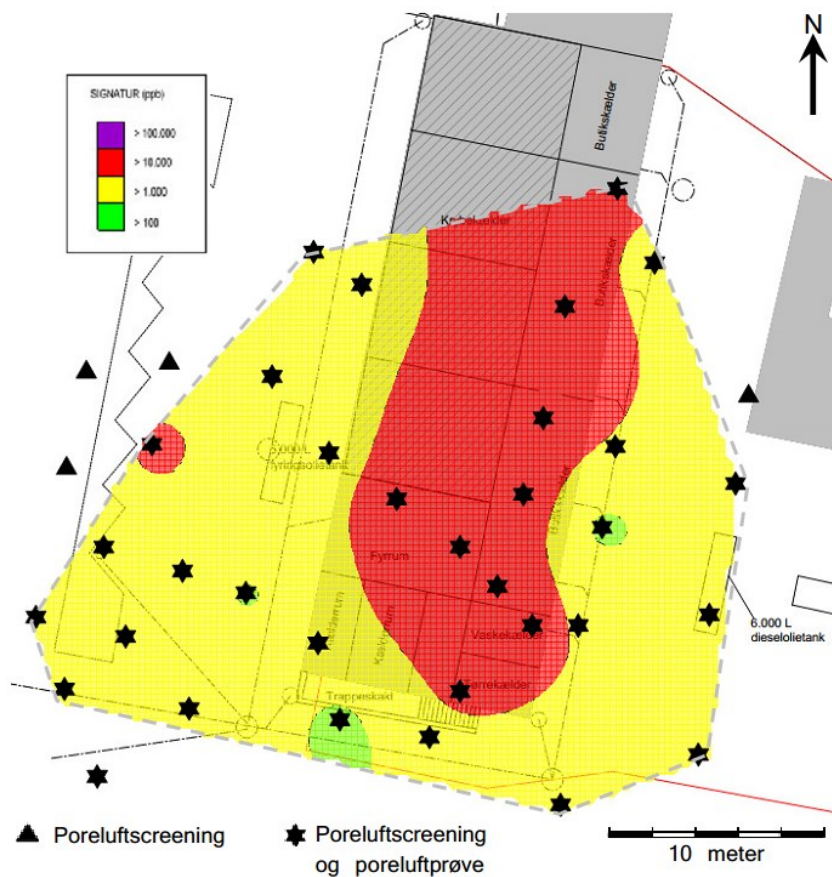
Undersøgelsesresultaterne viste poreluftforurening med PCE i koncentrationer på op til 16.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Derudover blev der konstateret mindre indhold af nedbrydningsprodukter af PCE, som dog generelt udgjorde mindre end 1 % af den samlede mængde chlorerede kulbrinter i poreluften. Dog er der mange interne kilder til kulbrinter i kælderen og butikkens indeklime (værktøjsforretning med salg/lager af maling, lim, kemikalier mv.) – og der er målt totalindhold af kulbrinter på op mod 5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i kælderen indeklime, som muligvis kan smitte af til poreluften umiddelbart under gulvet i bygningen. I den efterfølgende databehandling fokuseres der primært på PCE.

Det samlede fokusområde (og dermed den samlede datamængde) er reduceret inden den videre databehandling. På Kajerødvej er det valgt at fokusere på området som vist i figur E.3. Fokusområdet dækker ca. 600 m^2 og i alt 32 målepunkter, hvilket resulterer i en tæthed af målepunkter på ca. 5 pr. 100 m^2 .

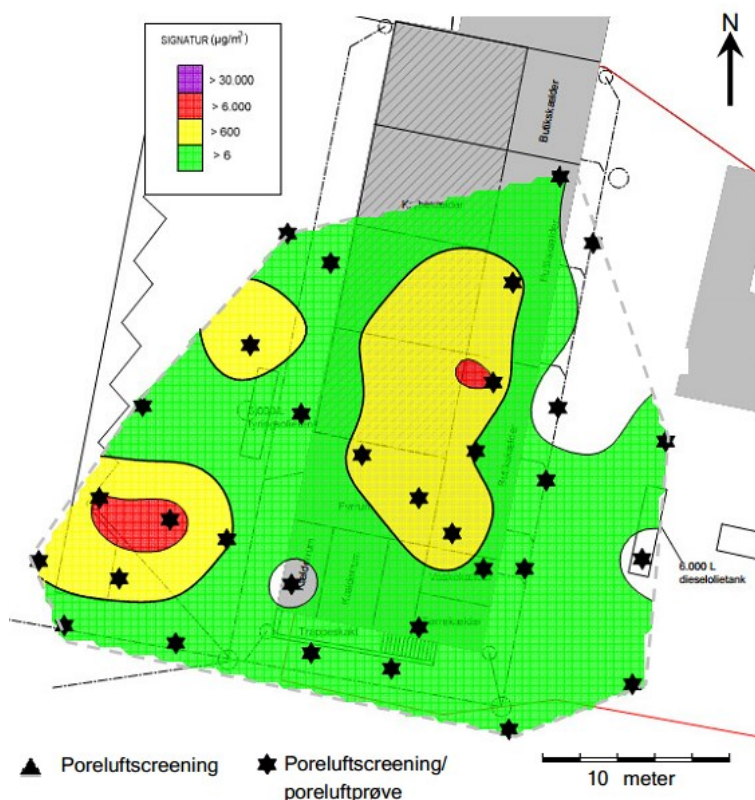
E.2.2 Konturplots

Poreluftscreening udført i forskellige dybder viste, at forureningen er kraftigst i jorden beliggende lige under til 0,5 m under kældergulv. Uden for bygningerne træffes den kraftigste poreluftforurening ifølge screeningen fra 0,5-1,0 meter under terræn.

Figur E.3 viser konturerede resultater af poreluftscreening (maksimalt ppbRAE-udslag i de målte dybder), mens figur E.4 viser de konturerede poreluftmålinger af PCE foretaget 1,0 meter under terræn eller under kældergulv.



FIGUR E.3 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE (PPB). DA DER ER FORETAGET MÅLINGER I FØRSKELLIGE DYBDER ER DER TAGET UDGANGSPUNKT I DET HØJESTE PPBRAE-UDSLAG I HVERT PUNKT.

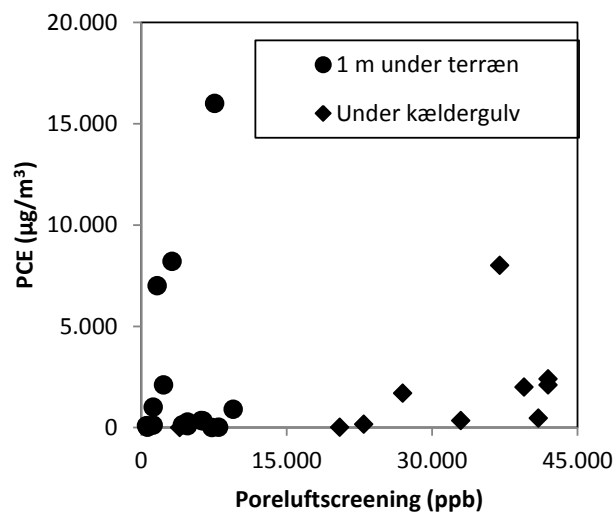


FIGUR E.4 KONTURPLOT AF PORELUFTMÅLINGER AF PCE ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) UDTAGET 1,0 METER UNDER TERRÆN ELLER UNDER KÆLDERGULV.

Poreluftscreeningen vist i figur E.3 viser, at der findes op til tre mindre hotspots med PCE-forurening vest for bygningen samt et større hotspot under selve bygningen, hvilket overordnet set bekræftes af de udførte poreluftmålinger (figur E.4).

E.2.3 Poreluftscreening vs. poreluftmålinger

Figur E.5 viser sammenhængen mellem resultater af poreluftscreeningen (ca. 2,5 L) og de traditionelle poreluftmålinger (ca. 100 L). I figuren er inddraget 32 målepunkter fra fokusområdet, hvor der er foretaget poreluftscreening og poreluftmåling i samme punkt.



FIGUR E.5 SAMMENHÆNG MELLEM RESULTATET AF PORELUFTSCRENING MED PPBRAE OG PORELUFTMÅLINGER MED OPSAMLING AF PORELUFT PÅ KULRØR (32 PUNKTER). MÅLEPUNKTERNE ER PLACERET LIGE UNDER BETONGULV ELLER CA. 1 METER UNDER TERRÆN UDEN FOR BYGNINGEN.

Korrelationen mellem poreluftscreening og poreluftmåling i figur E.5 viser tydeligt højere resultat af poreluftscreening under kældergulv end udenfor bygningen (1 meter under terræn), hvilket sandsynligvis skyldes de mange interne kilder i kælderens indeklime. Desuden vurderes meget heterogene fysiske forhold (med/uden bygning, kloakker mv.) at medføre en betydning af prøveløbet (2,5 L eller 100 L) for den konkrete værdi der opnås ved hhv. poreluftscreening og akkrediterede analyser.

På trods heraf var det med de to metoder muligt at udpege en entydig placering af det primære hotspot-område under bygningen, mens der er uoverensstemmelse med hensyn til 1-2 mindre hotspots vest for bygningen, jf. figur E.3 og E.4.

I den følgende databehandling tages der udgangspunkt i de målte poreluftkoncentrationer i 32 punkter i dybden 1 meter under terræn eller lige under betongulv i kælderen. Screeningsresultaterne indgår således ikke i den videre databehandling.

E.3 Metode 1 (percentile-t bootstrapping)

Ved konturering i Surfer genereres et net af datapunkter med hver sin beregnede koncentration. På Kajerødvej fås på denne måde 5.466 poreluftkoncentrationer indenfor fokusområdet (ca. 0,1 m² pr. punkt). Middelværdien af PCE-koncentrationen for disse punkter er ca. 762 µg/m³. Da datapunkterne er jævnt fordelt, repræsenterer denne værdi en arealvægtet middelværdi af PCE-koncentrationen i fokusområdet.

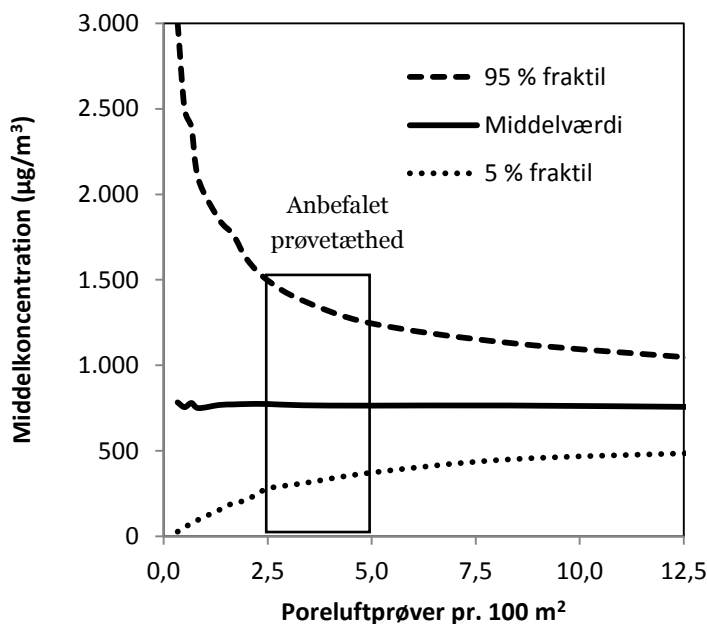
E.3.1 Fremgangsmåde

Den statistiske dataanalyse ved percentile t-bootstrapping udføres med udgangspunkt i det udvidede datasæt (5.466 punkter), svarende til vores bedste bud på den faktiske forureningssituation i poreluften på lokaliteten.

Der udtages 2.000 stikprøver med givne størrelser (med tilbagelægning). Processen gentages for en række stikprøvestørrelser; hhv. 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 20, 30, 50 og 80, hvilket svarer til en prøvetæthed på Halsvej på mellem ca. 0,3 og 13 poreluftprøver pr. 100 m².

E.3.2 Resultater

Nedenstående figur E.6 angiver middelkoncentrationen som funktion af prøvetætheden pr. 100 m². Usikkerheden på middelværdien er vist som hhv. 5 % og 95 % fraktiler, svarende til et 90 % konfidensinterval på middelværdien.



FIGUR E.6 DEN AREALVÆGTETDE MIDDELVÆRDI AF PORELUFTKONCENTRATIONEN SAMT ET 90 % KONFIDENSINTERVAL PÅ DENNE SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN.

Som det fremgår af figuren opnås der, som forventet, mindre og mindre usikkerhed på middelværdien i takt med, at prøvetætheden øges. Det bemærkes desuden, at effekten af øget prøvetæthed er størst op til ca. 2,5-5 poreluftprøver pr. 100 m², hvorefter effekten aftager gradvist. Det betyder, at den ekstra effekt der opnås ved udtagning af poreluftprøver, udover ca. 5 prøver pr. 100 m², bliver mindre desto flere prøver man udtager.

På den konkrete forsøgslokalitet vurderes en overordnet prøvetæthed på ca. 2,5-5 poreluftprøver pr. 100 m², at være den optimale strategi i forhold til at få mest mulig sikkerhed på undersøgelsen med færrest mulige ressourcer.

E.4 Metode 2 (variogramanalyse)

E.4.1. Fremgangsmåde

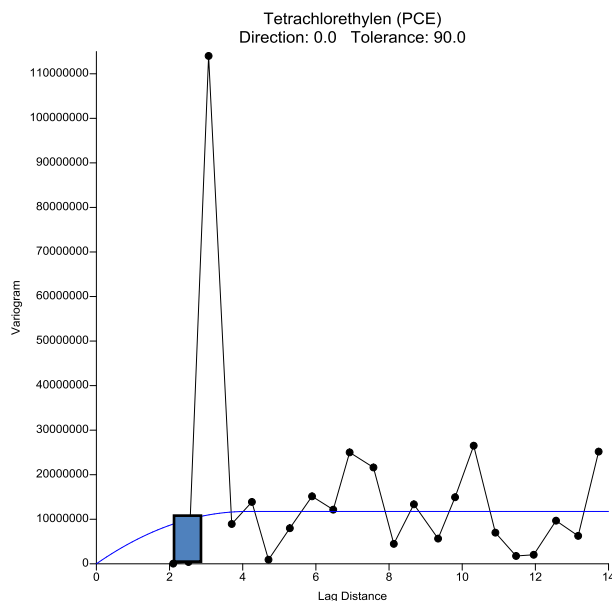
Den rumlige korrelation og variabilitet på lokaliteten undersøges ved at beregne variansen som funktion af afstanden mellem to målepunkter - dvs. der udarbejdes et variogram.

Variogrammet beregnes ved standardindstillinger i Surfer 9 med udgangspunkt i de 32 målte PCE-koncentrationer i det udvalgte fokusområde. Med autofit-funktionen i Surfer sammenlignes det eksperimentelle variogram med en modelligning (kvadratisk model).

E.4.2 Resultater

Modeltilpasningen i Surfer påviste en svag anisotropi i poreluftdataene for PCE fra Kajerødvej, med størst korrelation i nord-sydlig retning (vinkel ca. 98° fra stik øst og mod urets retning; jf. det østlige hotspot i figur E.4). Grundet de to separate hotspots, hvor det vestlige rent visuelt er uden anisotropi, er den overordnede tendens for data under ét dog meget svag og den følgende analyse er lavet uden anisotropi.

Af figur E.7 ses en stigende varians op til en lagafstand på ca. 4,1 meter. Det enkelte punkt med høj varians ved en lagafstand på ca. 3,5 meter skyldes det vestlige hotspot.



FIGUR E.7 RESULTAT AF VARIOGRAMANALYSE FOR PCE PÅ KAJERØDVEJ. DET MØRKEBLÅ FELT ANGIVER DEN LAGAFSTAND, HVOR DER OPNÅS 80-90 % AF DEN MAKSIMALE VARIANS.

Baseret på den geostatistiske analyse af data fra Kajerødvej vurderes en hensigtsmæssig prøveafstand på lokaliteten at være ca. 2-3 m, mens en orienterende variogramanalyse af data uden det vestlige hotspot giver en hensigtsmæssig prøveafstand på ca. 4-5 meter (og i øvrigt et variogram uden den meget høje varians ved lave separationsafstande som ses i E.7).

På baggrund af ovenstående vurderes en poreluftprøve overslagsmæssigt at kunne repræsentere et areal på mellem ca. 6 m² (2,5 · 2,5 meter) og 20 m² (4,5 · 4,5 meter), svarende til et bud på en prøvetæthed på 5-16 prøver pr. 100 m².

E.4 Samlede resultater

Nøgletal for Kajerødvej er opsummeret i nedenstående tabel.

TABEL E.1 OPSUMMERING AF NØGLETAL FOR KAJERØDVEJ.

Areal af fokusområde	600 m ²
Datagrundlag	32 målepunkter
Prøvetæthed	5,3 pr. 100 m ²
Primær forureningskomponent	PCE
Maks. koncentration i poreluft	16.000 µg/m ³
Arealvægtet middelkoncentration	762 µg/m ³
Anbefalet afstand mellem målepunkter	2-5 m (usikkert resultat)
Anbefalet prøvetæthed:	
Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	2,5-5 prøver pr. 100 m²
Metode 2 (variogramanalyse)	5-16 prøver pr. 100 m² (usikkert resultat)

Bilag F: Databehandling, Møllevej

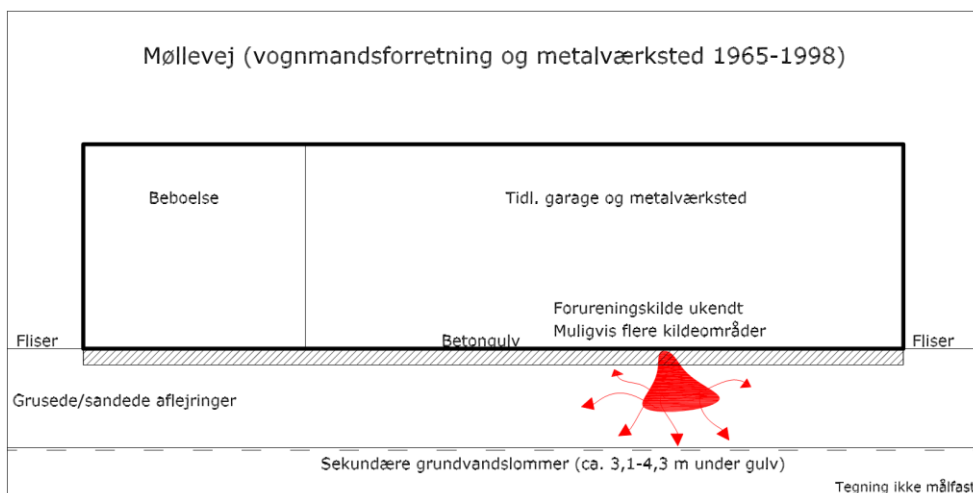
F.1 Baggrund og datagrundlag

På denne ejendom blev der ved en indledende/orienterende forureningsundersøgelse i 2005 påvist en svag poreluftforurening med flygtige kulbrinter (oliekomponenter). Datagrundlaget i nærværende projekt udgøres af en afgrænsende forureningsundersøgelse udført af DMR i 2011.

F.1.1 Ejendomsbeskrivelse

På lokaliteten har der i perioden 1965-1998 været vognmandsforretning og metalværksted. Ejendommen anvendes i dag til beboelse og erhverv (gulvmand).

Lokalitetens umættede zone består af op til 2,2 m gruset sandfyld. Herunder træffes svagt leret morænesand til grundvandsspejlet beliggende 3,1-4,3 m under terræn. En konceptuel oversigt over lokaliteten er givet i figur F.1.



FIGUR F.1 KONCEPTUEL MODEL AF LOKALITETEN MED ANGIVELSE AF JORDFORURENING MED AFDAMPNING TIL GASFASEN I DEN UMÆTTEDE ZONE.

F.1.2 Udvidet undersøgelse

Der etableredes 63 målepunkter til opsamling af poreluft på kulrør. I 43 af målepunkterne blev der ligeledes udført poreluftscreening. En plan over ejendommen og de etablerede målepunkter er vist i figur F.2.



FIGUR F.2 PLAN OVER LOKALITETEN SAMT PLACERING AF PRØVETAGNINGSPUNKTER TIL PORELUFTMÅLINGER.

I 43 af de 63 punkter blev der foretaget poreluftscreening enten under betongulv eller i dybderne 0,5; 1,0; 1,5 og 1,8 meter under terræn. Poreluftprøverne blev udtaget ved opsamling af ca. 100 L poreluft på kulrør og efterfølgende analyse for kulbrintefraktioner, BTEX og chlorerede opløsningsmidler.

F.2 Indledende databehandling

F.2.1 Valg af forureningskomponent og fokusområde

Undersøgelsesresultaterne viste poreluftforurening med TVOC i koncentrationer op til 12.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Derudover blev der konstateret mindre indhold af benzen og PCE, der dog generelt svarer til mindre end 1 % af TVOC i poreluften. Derfor fokuseres der udelukkende på TVOC i den efterfølgende databehandling.

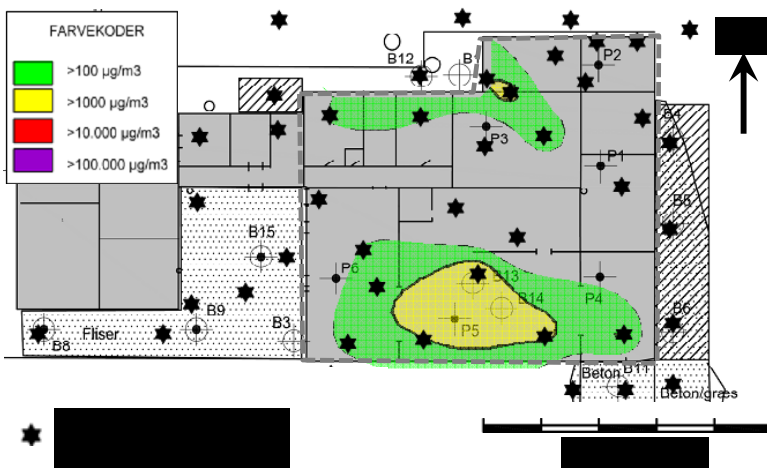
Det samlede fokusområde (og dermed den samlede datamængde) er reduceret inden den videre databehandling. På Møllevej er det valgt at fokusere på den østlige del af bygningen, som vist i figur F.3. Fokusområdet indeholder 22 målepunkter under betongulv og dækker ca. 320 m^2 , hvilket resulterer i en tæthed af målepunkter indenfor fokusområdet på ca. 7 pr. 100 m^2 . I alle målepunkterne er der både foretaget poreluftscreening med ppBRAE og opsamlet poreluft på kulrør.

F.2.2 Konturplots

Figur F.3 viser konturerede resultater af poreluftscreening foretaget under gulv i fokusområdet, mens figur F.4 viser et konturplot af de akkrediterede poreluftmålinger af TVOC.



FIGUR F.3 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE (PPB) UNDER GULV I FOKUSOMRÅDET.

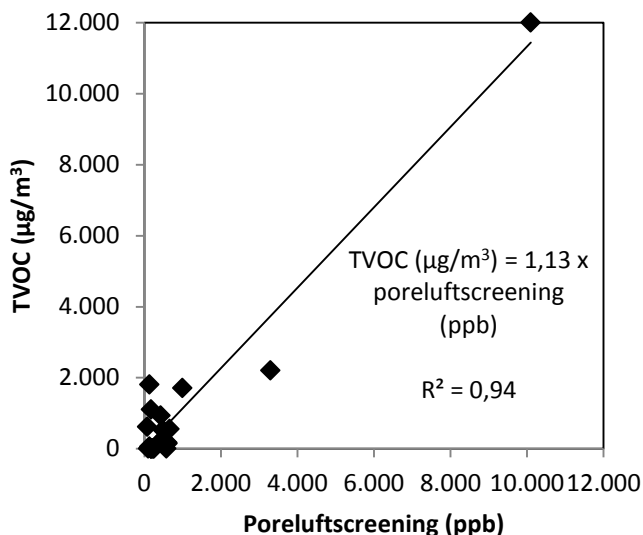


FIGUR F.4 KONTURPLOT AF PORELUFTMÅLINGER AF TVOC (µG/M³) UNDER GULV I FOKUSOMRÅDET.

Poreluftscreningen illustreret i figur F.3 viser, at der findes 2 mindre hotspots med poreluftforurening indenfor fokusområdet. Dette bekræftes af de udførte poreluftmålinger, jf. figur F.4.

F.2.3 Poreluftscrening vs. poreluftmålinger

Figur F.5 viser sammenhængen mellem resultater af poreluftscreningen (ca. 2,5 L) og de traditionelle poreluftmålinger (ca. 100 L). I figuren er inddraget 22 målepunkter fra fokusområdet, hvor der er foretaget poreluftscrening og poreluftmåling i samme punkt og dybde.



FIGUR F.5 SAMMENHÆNG MELLEM RESULTATET AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE OG PORELUFTMÅLINGER MED OPSAMLING AF PORELUFT PÅ KULRØR (22 PUNKTER PLACERET LIGE UNDER BETONGULV).

Korrelationen mellem poreluftscreening og poreluftmåling vist i figur F.4 indikerer en sammenhæng, om end størstedelen af målepunkterne har lave koncentrationer og udviser en betydelig spredning.

Der er foretaget poreluftmålinger i samtlige punkter i det udvalgte fokusområde, hvorfor screeningsresultaterne ikke indgår direkte i den efterfølgende databehandling.

F.3 Metode 1 (percentile-t bootstrapping)

Ved konturering i Surfer genereres et net af datapunkter med hver sin beregnede koncentration. På Møllevvej fås på denne måde et udvidet datasæt bestående af 898 poreluftkoncentrationer indenfor fokusområdet (ca. 0,36 m² pr. punkt). Middelværdien af TVOC-koncentrationen for disse punkter er ca. 340 µg/m³. Da datapunkterne er jævnt fordelt, repræsenterer denne værdi den arealvægtede middelværdi af TVOC-koncentrationen i fokusområdet.

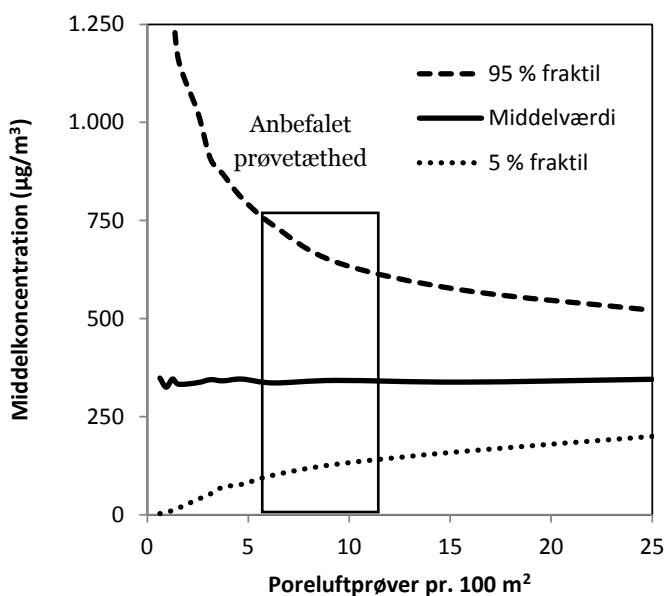
F.3.1 Fremgangsmåde

Den statistiske dataanalyse ved percentile t-bootstrapping udføres med udgangspunkt i det udvidede datasæt (898 punkter), svarende til vores bedste bud på den faktiske forureningssituation i poreluften på lokaliteten.

Der udtages 2.000 stikprøver med givne størrelser (med tilbagelægning). Processen gentages for en række stikprøvestørrelser; hhv. 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 20, 30, 50 og 80, hvilket svarer til en prøvetæthed på Møllevvej på mellem ca. 0,6 og 25 poreluftprøver pr. 100 m².

F.3.2 Resultater

Nedenstående figur F.6 angiver middelkoncentrationen som funktion af prøvetætheden pr. 100 m². Usikkerheden på middelværdien er vist som hhv. 5 % og 95 % fraktiler, svarende til et 90 % konfidensinterval på middelværdien.



FIGUR F.6 DEN AREALVÆGTETDE MIDDELVÆRDI AF PORELUFTKONCENTRATIONEN SAMT ET 90 % KONFIDENSINTERVAL PÅ DENNE SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN.

Som det fremgår af figuren opnås mindre og mindre usikkerhed på middelværdien i takt med, at prøvetætheden øges. Effekten af øget prøvetæthed er størst op til ca. 6 poreluftprøver pr. 100 m², hvorefter effekten aftager gradvist. Det betyder, at den effekt der opnås ved udtagning af en poreluftprøve, udover ca. 12 pr. 100 m², bliver mindre desto flere prøver der udtages.

På den konkrete forsøgslokalitet vurderes ca. 6-12 poreluftprøver pr. 100 m², at være den optimale strategi i forhold til at få mest mulig sikkerhed på undersøgelsen med færrest mulige ressourcer.

F.4 Metode 2 (variogramanalyse)

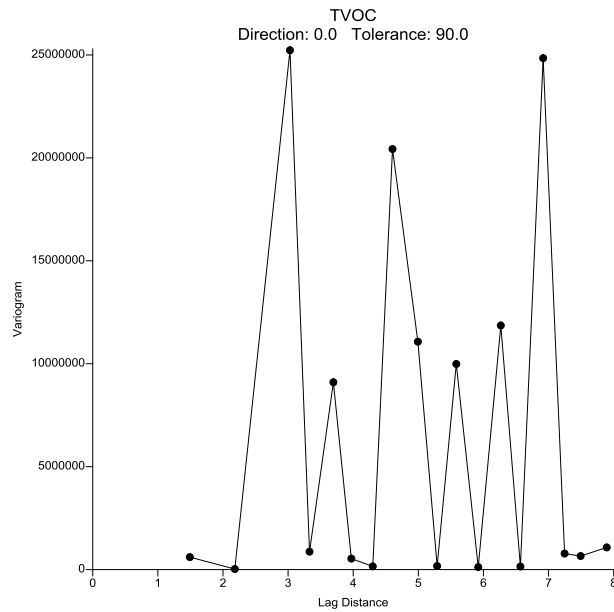
F.4.1. Fremgangsmåde

Et variogram for poreluftdataene beregnes ved standardindstillinger i Surfer 9 (Golden Software) og med udgangspunkt i de 22 målte TVOC-koncentrationer i det udvalgte fokusområde.

F.4.2 Resultater

På baggrund af variogrammet for poreluftdata for TVOC på Møllevvej (figur F.7) vurderes det ikke at være meningsfyldt, at foretage en modelfitning. Dermed vurderes datagrundlaget ikke at være egnet til vurdering af korrelationsafstanden på lokaliteten.

Variogrammet indikerer dog, at korrelationsafstanden på lokaliteten er mindre end den minimale korrelationsafstand, som det er muligt at beregne variogrammet for i dette fokusområde (ca. 1,5 meter). Dette vurderes at være påvirket af de generelt lave poreluftkoncentrationer, der er målt i fokusområdet, hvor kun tre prøver viser indhold af TVOC over 1.000 µg/m³, og hvor den arealvægtede middeldkoncentration er estimeret til 340 µg/m³.



FIGUR F.7 VARIOGRAM FOR TVOC PÅ MØLLEVEJ.

På ovenstående baggrund giver det ikke mening at uddrage en anbefalet prøvetæthed.

F.4 Samlede resultater

Nøgletal for Møllevvej er opsummeret i nedenstående tabel.

TABEL F.1 OPSUMMERING AF NØGLETAL FOR MØLLEVEJ.

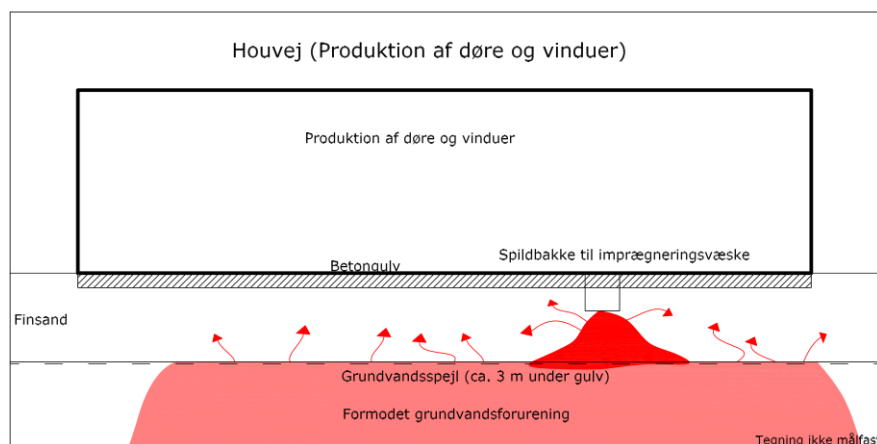
Areal af fokusområde	320 m ²
Datagrundlag	22 målepunkter
Prøvetæthed	7 pr. 100 m ²
Primær forureningskomponent	TVOC
Maks. koncentration i poreluft	12.000 µg/m ³
Arealvægtet middelkoncentration	340 µg/m ³
Anbefalet afstand mellem målepunkter	< 1,5 meter
Anbefalet prøvetæthed	
- Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	6-12 prøver pr. 100 m²
- Metode 2 (variogramanalyse)	Kan ikke vurderes

Bilag G: Houvej

G.1.1 Ejendomsbeskrivelse

På lokaliteten er der igangværende produktion af vinduer og døre, herunder træbearbejdning, malearbejde og imprægnering.

Grundvandet på lokaliteten er beliggende ca. 3 m under terræn. Den umættede zone består primært af finsand. En konceptuel oversigt for lokaliteten er givet i figur G.1.

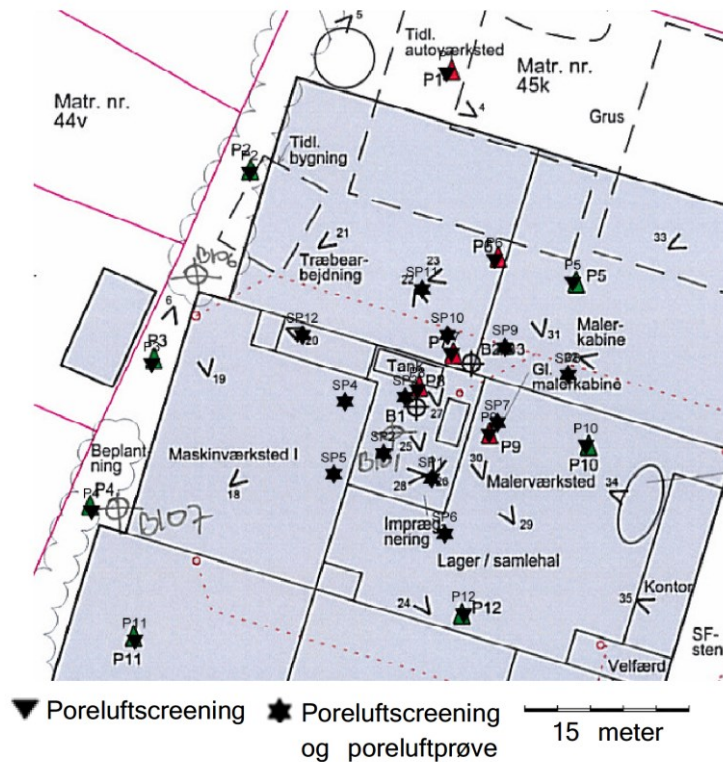


FIGUR G.1 FORSIMPLET KONCEPTUEL MODEL MED PLACERING AF KILDE (SPILDBAKKE) SAMT JORD- OG GRUNDVANDSFORURENING MED AFDAMPNING TIL GASFASEN.

G.1.2 Udførte undersøgelser

I sommeren 2012 udførte COWI en poreluftundersøgelse på ejendommen. Der blev udtaget 12 poreluftprøver i dybder fra lige under betongulv til 1,5 meter under terræn. Ved undersøgelsen blev der analyseret for TVOC, BTEX, chlorerede kulbrinter og vandblandbare opløsningsmidler. Den væsentligste poreluftforurening bestod dog af TVOC, der blev påvist i koncentrationer på op til $>3.500.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gennemslag på både A og B-rør) ved en tidligere spildbakke placeret under gulv i et imprægneringsrum. Imprægneringsvæsken vurderes bl.a. at have indeholdt terpentiner og petroleum. I det følgende fokuseres på poreluftforurening med TVOC. Poreluftdata og situationsplaner mm. er venligst udleveret af COWI i forbindelse med dette projekt.

I september 2012 udførte DMR en supplerende undersøgelse i forbindelse med dette miljøprojekt. Undersøgelsen bestod af 12 målepunkter ved og omkring det konstaterede hotspot ved spildbakken. I alle punkter blev der udført en poreluftscreening i dybderne 0,5, 1,0, 1,5 og 2,0 meter under gulv. Dernæst blev der i samtlige punkter udtaget poreluftprøver til akkrediteret analyse i dybden 1,0 meter under gulv. Som følge af høje ppbRAE-udslag blev prøvevolumenet ved poreluftmålingerne reduceret til 25 eller 50 L poreluft. Poreluftprøverne blev analyseret for totalindhold i kulbrintefraktioner og BTEX. En plan over ejendommen og de etablerede målepunkter er vist i figur G.2.



FIGUR G.2 PLAN OVER LOKALITETEN SAMT PLACERING AF PRØVETAGNINGSPUNKTER TIL PORELUFTMÅLINGER. MÅLEPUNKTER FRA DEN INDLEDENDE UNDERSØGELSE ER BENÆVNT P1-P12, MENS MÅLEPUNKTER FRA DEN AFGRÆSENDE UNDERSØGELSE ER BENÆVNT SP1-SP12.

G.2 Indledende databehandling

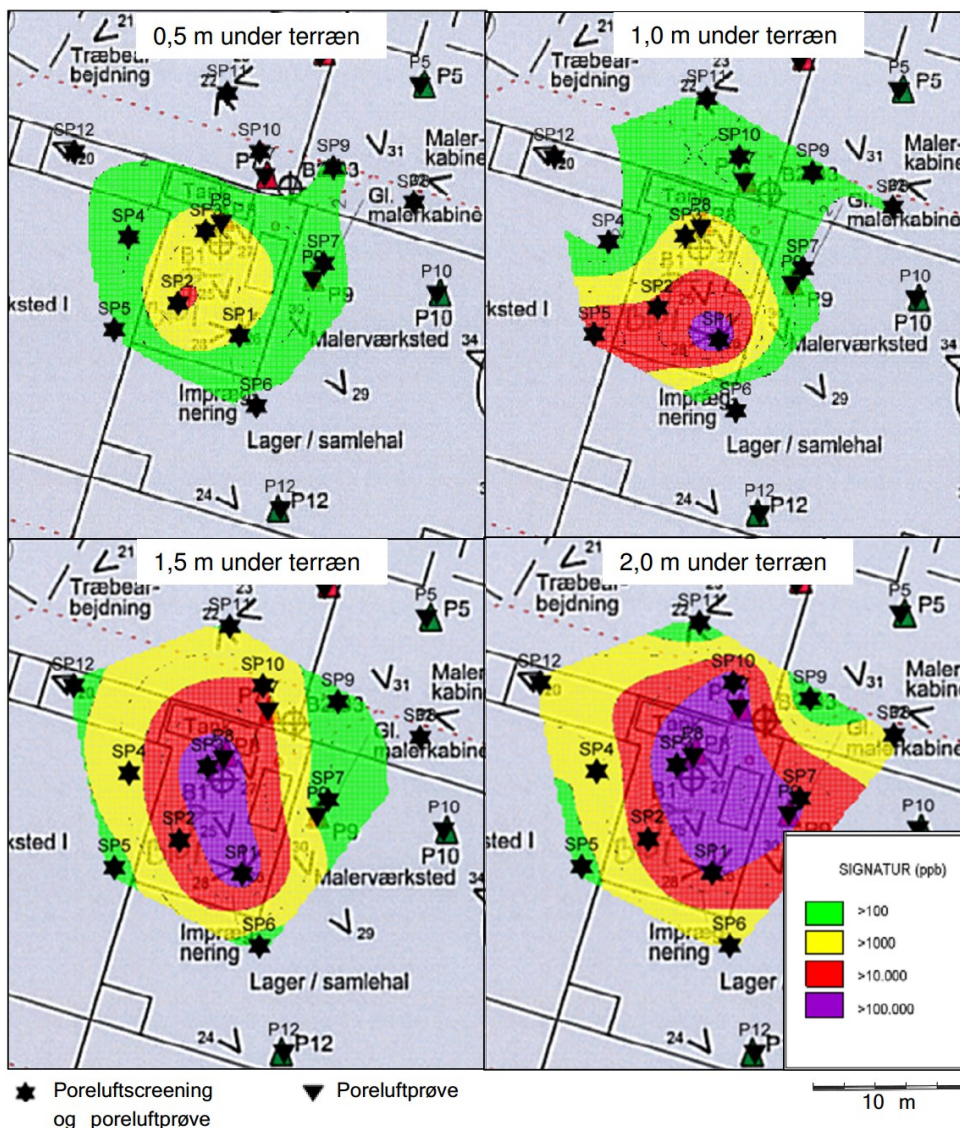
G.2.1 Valg af forureningskomponent og fokusområde

Undersøgelseresultaterne viste poreluftforurening med TVOC i koncentrationer op til 4.300.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Indhold af BTEX udgjorde mindre end 1 % af TVOC. Derfor fokuseres der udelukkende på TVOC i den efterfølgende databehandling.

Det samlede areal er reduceret inden den videre databehandling. På Houvej er det valgt at fokusere på imprægneringsrummet og de tilstødende produktionslokaler, hvor DMR udførte den supplerende undersøgelse med 12 målepunkter. Fokusområdet indeholder desuden tre målepunkter, hvor COWI udtog poreluftprøver ved den indledende undersøgelse. Områdets samlede areal er ca. 340 m^2 , hvilket resulterer i en tæthed af poreluftmålinger på ca. 4,4 pr. 100 m^2 .

G.2.2 Konturplots

Figur G.3 viser konturerede resultater af poreluftscreeningen foretaget i fokusområdet omkring kilden i imprægneringsrummet.

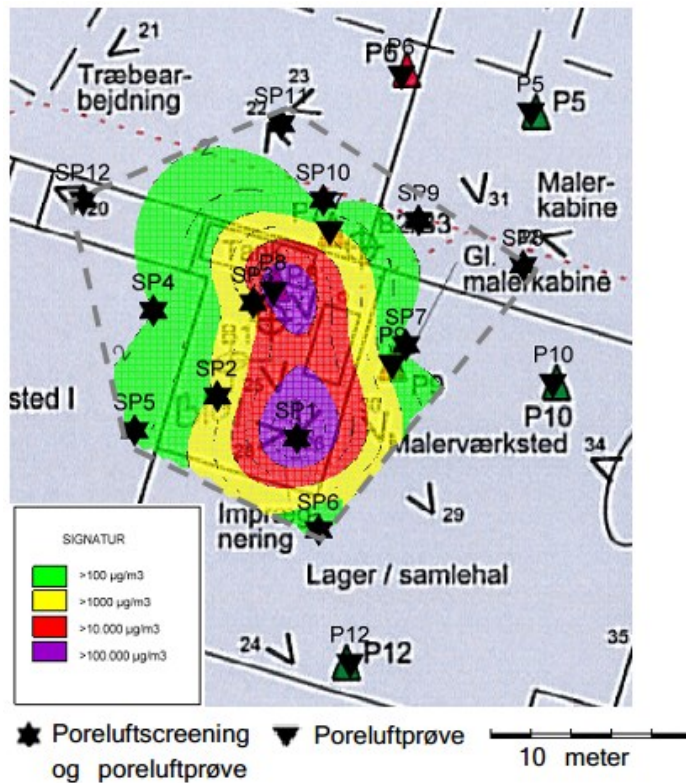


FIGUR G.3 KONTURPLOT AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE (PPB) FORETAGET I DYBDERNE 0,5, 1,0, 1,5 OG 2,0 METER UNDER GULV.

Ud fra resultatet af poreluftscreeningen vist i figur G.3 vurderes poreluftforureningen at være kraftigst i dybden 2 m under terræn (ca. 1 m over grundvandspejlet) og aftage op mod gulv. Det tyder umiddelbart på spredning i grundvandet beliggende ca. 3 m under gulv.

Poreluftforureningens hotspot træffes under imprægneringsrummet, hvor spildet vurderes at være sket over længere tid ved en spildbakke. Den præcise placering af hotspot ses dog at variere med dybden. Poreluftforureningen er ikke fuldt afgrænset i sydvestlig retning (1,0 m under gulv), hvor der i SP5 ved poreluftscreeningen er målt 69.500 ppb, eller i sydøstlig retning (2,0 meter under gulv), hvor der i SP7 er målt 116.000 ppb.

Resultatet af poreluftprøverne i figur G.4 viser overordnet set det samme billede som poreluftscreeningen med poreluftkoncentrationer op 4.300.000 µg/m³, og afgrænsning i periferipunkterne til < 100 µg/m³. Selvom kontureringen i G6 indikerer tilstedeværelse af hotspots ved hhv. SP8 og SP1, vurderes der at være tale om ét hotspot, som det fremgår af poreluftscreeningen (der er ikke målt imellem de to hotspots).

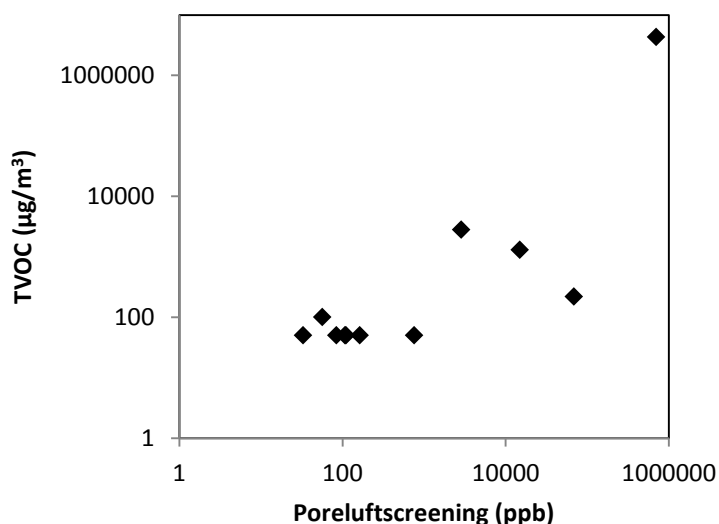


FIGUR G.4 KONTURPLOT AF PORELUFTKONCENTRATIONER AF TVOC I FOKUSOMRÅDET.

G.2.3 Poreluftscreening vs. poreluftmålinger

Figur G.5 viser sammenhængen mellem resultater af poreluftscreening og de traditionelle poreluftmålinger. Otte ud af 12 poreluftmålinger viste indhold af kulbrinter under detektionsgrænsen på 100 eller 200 µg/L (hhv. ved udtagning af 50 og 25 L poreluft). For disse målinger er der i databehandlingen anvendt en værdi svarende til halvdelen af detektionsgrænsen, hvilket naturligvis påvirker korrelationen i figur G.5, hvor målepunkter under detektionsgrænsen får samme koordinat på 2. akse.

Der er foretaget poreluftmålinger i alle 12 målepunkter i det udvalgte fokusområde, hvorfor screeningsresultaterne ikke indgår direkte i den efterfølgende databehandling. Derudover indgår tre tidligere poreluftmålinger i databehandlingen.



FIGUR G.5 SAMMENHÆNG MELLEM RESULTATET AF PORELUFTSCREENING MED PPBRAE OG PORELUFTMÅLINGER AF TBVOC EFTER OPSAMLING AF PORELUFT PÅ KULRØR (12 PUNKTER). MÅLEPUNKTERNE ER PLACERET CA. 1 METER UNDER BYGNINGENS BETONGULV. BEMÆRK DOBBELTLOGARITMISKE AKSER.'

G.3 Metode 1 (percentile-t bootstrapping)

Ved konturering i Surfer genereres et net af datapunkter med hver sin beregnede koncentration. På Houvej fås på denne måde et udvidet datasæt bestående af 1.329 poreluftkoncentrationer indenfor fokusområdet (ca. 0,26 m² pr. punkt). Middelværdien af TVOC-koncentrationen for disse punkter er ca. 40.000 µg/m³. Da datapunkterne er jævnt fordelt, repræsenterer denne værdi den arealvægtede middelværdi af TVOC-koncentrationen i fokusområdet.

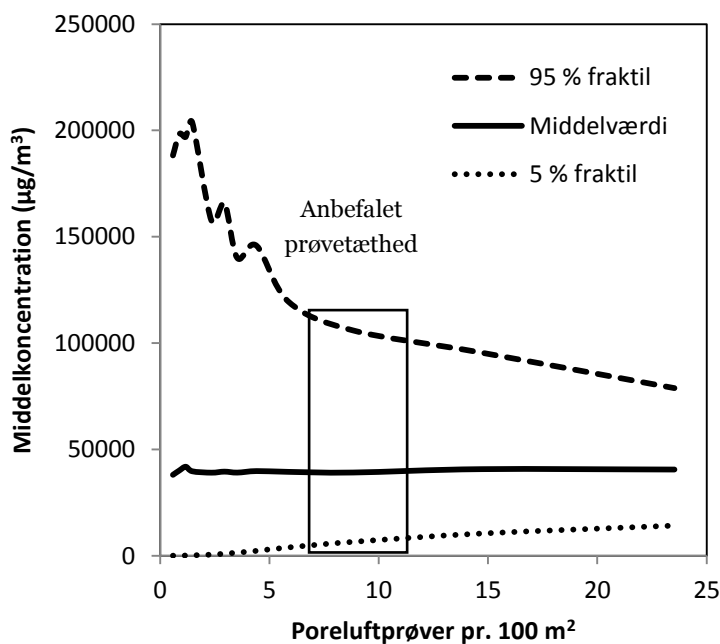
G.3.1 Fremgangsmåde

Den statistiske dataanalyse ved percentile t-bootstrapping udføres med udgangspunkt i det udvidede datasæt (1.329 punkter), svarende til vores bedste bud på den faktiske forureningssituation i poreluften på lokaliteten.

Der udtages 2.000 stikprøver med givne størrelser (med tilbagelægning). Processen gentages for en række stikprøvestørrelser; hhv. 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 20, 30, 50 og 80, hvilket svarer til en prøvetæthed på Houvej på mellem ca. 0,6 og 24 poreluftprøver pr. 100 m².

G.3.2 Resultater

Nedenstående figur G.6 angiver middelkoncentrationen som funktion af prøvetætheden pr. 100 m². Usikkerheden på middelværdien er vist som hhv. 5 % og 95 % fraktiler, svarende til et 90 % konfidensinterval på middelværdien.



FIGUR G.6 DEN AREALVÆGTETDE MIDDELVÆRDI AF PORELUFTKONCENTRATIONEN SAMT ET 90 % KONFIDENSINTERVAL PÅ DENNE SOM FUNKTION AF PRØVETÆTHEDEN.

Som det fremgår af figuren er effekten af øget prøvetæthed størst op til ca. 7 poreluftprøver pr. 100 m², hvorefter effekten aftager gradvist. Det betyder, at den effekt der opnås ved udtagning af en poreluftprøve, udover ca. 12 pr. 100 m², bliver mindre desto flere prøver der udtages.

På den konkrete forsøgslokalitet vurderes ca. 7-12 poreluftprøver pr. 100 m², at være den optimale tæthed i forhold til at få mest mulig sikkerhed på undersøgelsen med færrest mulige ressourcer.

G.4 Metode 2 (variogramanalyse)

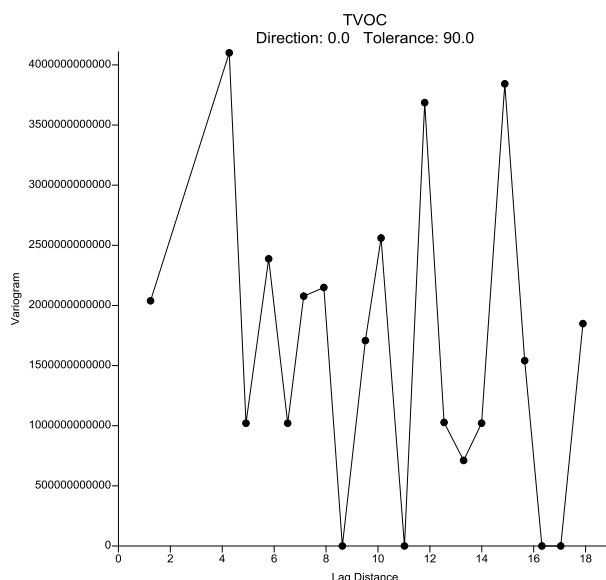
G.4.1. Fremgangsmåde

Et variogram for poreluftdata på Houvej er beregnet ved brug af standardindstillinger i Surfer 9 (Golden Software) og med udgangspunkt i de 15 målte TVOC-koncentrationer i det udvalgte fokusområde.

G.4.2 Resultater

På baggrund af variogrammet for poreluftdata for TVOC på Houvej (figur G.7) vurderes det ikke at være meningsfyldt, at foretage en modelfitning. Dermed vurderes datagrundlaget ikke at være egnet til vurdering af korrelationsafstanden på lokaliteten.

Dette vurderes at skyldes, at TVOC-koncentrationerne varierer med omkring 3-4 dekader over afstande på 4-6 meter (jf. figur G.4).



FIGUR G.7 VARIOGRAM FOR TVOC PÅ HOUVEJ.

På ovenstående baggrund giver det ikke mening at uddrage en anbefalet prøvetæthed.

G.4 Samlede resultater

Nøgletal for Houvej er opsummeret i nedenstående tabel.

TABEL G.1 OPSUMMERING AF NØGLETAL FOR HOUVEJ.

1. Areal af fokusområde	2. 340 m ²
3. Datagrundlag	4. 15 målepunkter
5. Prøvetæthed	6. 4,4 pr. 100 m ²
7. Primær forureningskomponent	8. TVOC
9. Maks. koncentration i poreluft	10. 4.300.000 µg/m ³
11. Arealvægtet middelkoncentration	12. Ca. 40.000 µg/m ³
13. Anbefalet afstand mellem målepunkter	14. Kan ikke vurderes
15. Anbefalet prøvetæthed:	16.
- Metode 1 (percentile-t bootstrapping)	17. 7-12 prøver pr. 100 m²
- Metode 2 (variogramanalyse)	18. Kan ikke vurderes

Effektive poreluftstrategier

Rapporten omhandler optimering af prøvetagningsstrategier ved undersøgelse af poreluftforurening. På fem forurenede lokaliteter er der udført poreluftscreening med ppbRAE og traditionelle poreluftmålinger med akkrediterede poreluftanalyser. Erfaringer med anvendelse af poreluftscreening præsenteres i projektet og der er opstillet anbefalinger til hvordan man med færrest mulige målinger kan opnå størst mulig sikkerhed for at lokalisere, afgrænse og/eller karakterisere en poreluftforurening korrekt.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk