

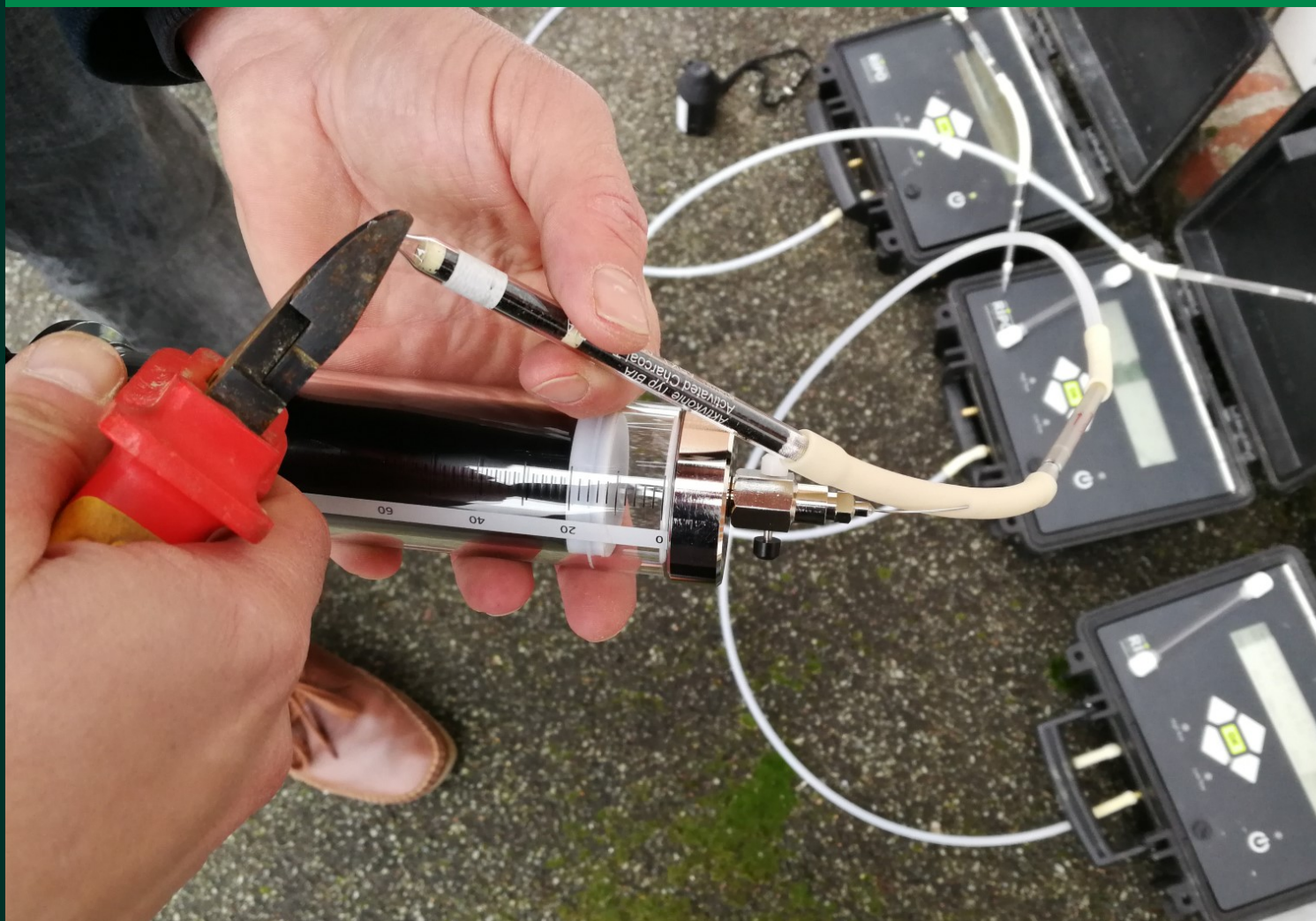


Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# Anvendelse af stof- specifikke isotoper og fingerprinting i indeklimaundersøgelser Jordforurening vs. interne kilder

Miljøprojekt Nr. 2202

April 2022



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Trine Skov Jepsen

Kresten Andersen

Isak Hjort Dahm

Thomas Hauerberg Larsen, Orbicon

ISBN: 978-87-7038-410-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. 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

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Forord</b>  | <b>5</b>  |
| Læsevejledning   | 5         |
| <b>Sammenfatning</b>   | <b>6</b>  |
| <b>Summary</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1. Indledning</b>   | <b>11</b> |
| 1.1 Baggrund og formål   | 11        |
| 1.2 Feltlokaliteter  | 12        |
| <b>2. Teori</b>  | <b>14</b> |
| 2.1 Stofspecifik Isotopanalyse (CSIA)  | 14        |
| 2.1.1 Stofspecifik isotopanalyse til skelnen mellem kilder til indeklimateforurening | 15        |
| 2.1.2 Hvornår er stofspecifik isotopanalyse egnet?                                   | 16        |
| 2.1.3 Processer med betydning for isotopsignaturen                                   | 17        |
| 2.1.3.1 Fordampning  | 17        |
| 2.1.3.2 Diffusion  | 18        |
| 2.2 Fingerprinting   | 18        |
| 2.2.1 Gas chromatografi (GC)   | 19        |
| <b>3. Prøvetagning</b>   | <b>21</b> |
| 3.1 Luftprøver til stofspecifik isotopanalyse  | 21        |
| 3.2 Prøvetagningsmetode og opstilling, stofspecifik isotopanalyse                    | 22        |
| 3.2.1 Lave koncentrationer   | 23        |
| 3.2.1.1 Indeluft   | 23        |
| 3.2.1.2 Poreluft   | 24        |
| 3.2.2 Høje koncentrationer   | 25        |
| 3.2.3 Observationer og læringspunkter  | 28        |
| 3.3 Analyselaboratorier, stofspecifik isotopanalyse                                  | 29        |
| 3.4 Prøver til fingerprinting  | 30        |
| 3.5 Analyselaboratorier, Fingerprinting  | 30        |
| <b>4. Gladsaxevej</b>  | <b>31</b> |
| 4.1 Lokalteten kort, Gladsaxevej   | 31        |
| 4.2 Udført arbejde, Gladsaxevej  | 31        |
| 4.3 Resultater og vurderinger, Gladsaxevej   | 32        |
| 4.3.1 Forureningskoncentrationer TVOC og benzen                                      | 32        |
| 4.3.2 Stofspecifik isotopanalyse   | 33        |
| 4.3.3 Fingerprinting   | 35        |
| 4.4 Samlede vurderinger, Gladsaxevej   | 41        |
| <b>5. Bymidten</b>   | <b>42</b> |
| 5.1 Lokalteten kort, Bymidten  | 42        |
| 5.2 Udført arbejde, Bymidten   | 42        |
| 5.3 Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Bymidten                 | 43        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>6.</b>  | <b>Amagerbrogade</b>  | <b>47</b> |
| 6.1        | Lokaliteten kort, Amagerbrogade   | 47        |
| 6.2        | Udført arbejde, Amagerbrogade   | 47        |
| 6.3        | Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Amagerbrogade                     | 48        |
| <b>7.</b>  | <b>Innovationsgaragen - Syd</b>   | <b>51</b> |
| 7.1        | Lokaliteten kort, Innovationsgaragen - Syd  | 51        |
| 7.2        | Udført arbejde, Innovationsgaragen – Syd  | 51        |
| 7.3        | Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Innovationsgaragen – Syd          | 52        |
| <b>8.</b>  | <b>Innovationsgaragen - Nord</b>  | <b>55</b> |
| 8.1        | Lokaliteten kort, Innovationsgaragen - Nord   | 55        |
| 8.2        | Udført arbejde, Innovationsgaragen – Nord   | 55        |
| 8.3        | Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Innovationsgaragen – Nord         | 56        |
| <b>9.</b>  | <b>Konklusioner på egnethed af stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting</b>           | <b>59</b> |
| <b>10.</b> | <b>Den alternative undersøgelsesstrategi</b>  | <b>61</b> |
| 10.1       | Traditional versus alternativ undersøgelsesstrategi                                       | 61        |
| 10.2       | Potentiale  | 63        |
| 10.3       | Anbefalinger  | 63        |
|            | <b>Referencer</b>   | <b>65</b> |
|            | <b>Bilag 1.Feltjournaler for prøver til stofspecifik isotopanalyse</b>                    | <b>67</b> |
| Bilag 1.1  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Gladsaxevej (2016)                | 68        |
| Bilag 1.2  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2016)                   | 69        |
| Bilag 1.3  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2017 – 1. prøvetagning) | 70        |
| Bilag 1.4  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2017 – 2. prøvetagning) | 71        |
| Bilag 1.5  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Amagerbrogade (2016)              | 72        |
| Bilag 1.6  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Innovationsgaragen syd (2016)     | 73        |
| Bilag 1.7  | Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Innovationsgaragen nord (2017)    | 74        |
|            | <b>Bilag 2.Telefonnotat – analyselaboratorier</b>   | <b>75</b> |
|            | <b>Bilag 3.Fingerprinting - De højeste peaks</b>  | <b>76</b> |
| Bilag 3.1  | De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften på 1. sal                                 | 76        |
| Bilag 3.2  | De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften i stueetagen                              | 76        |
| Bilag 3.3  | De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften i kælderen                                | 77        |
| Bilag 3.4  | De højeste peaks for prøve udtaget af poreluft i punktet PL3                              | 77        |
| Bilag 3.5  | De højeste peaks for prøve udtaget af poreluft i punktet PL2                              | 78        |

# Forord

Region Hovedstaden har igangsat nærværende projekt med henblik på at undersøge muligheder og perspektiver for at ændre undersøgelsespraksis i forbindelse med indeklimateforureninger. I øjeblikket vurderes en jordforurenings indeklimatepåvirkning på baggrund af data fra jordvand- og poreluftprøver indsamlet ved en traditionel "udefra og ind" undersøgelsesstrategi. I nærværende projekt undersøges potentialet for en alternativ undersøgelsesstrategi baseret på en indledende screening af forureningsniveauet i indeluften.

I projektet undersøges og videreudvikles metoderne fingeraftryk/fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse (Compound-specific Stable Isotope Analysis - CSIA). Begge metoder er avancerede teknologier, der kan anvendes til vurdering af, hvorvidt det primære bidrag til en indeklimateforurening stammer fra en underliggende jordforurening eller fra interne kilder så som aktiv rensedrift, oliebrændstof eller lign.

Denne rapport indeholder data og resultater fra et indledende litteraturstudie samt fra test af de avancerede undersøgelsesmetoder på en række feltlokaliteter.

Projektet er udarbejdet under Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening i samarbejde med Preben Bruun, Miljøstyrelsen. Arbejdet er udført af Orbicons projektgruppe bestående af Trine Skov Jepsen, Kresten Andersen, Isak Hjort Dahm og Thomas Hauerber Larsen. Fra Region Hovedstaden har Mariam Wahid og Ida Damgård deltaget.

## Læsevejledning

Rapporten starter med et indledende kapitel 1, der gennemgår baggrunden og formålet for projektet. Kapitel 2 giver en introduktion til teorien bag stofspecifik isotopanalyse (Compound-specific Stable Isotope Analysis – CSIA) og fingerprinting. I kapitel 3 beskrives metoden for prøvetagning til henholdsvis stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting og prøvetagningens egnethed diskuteres, endvidere præsenteres relevante analyseinstitutter. Herefter følger et kapitel for hver feltlokalitet (kapitel 4 til 8). Hvert af disse kapitler indeholder følgende afsnit: En kort beskrivelse af lokaliteten, udført arbejde samt resultater og vurderinger. På den første feltlokalitet (kapitel 4) er der tale om en kulbrinte/benzenforurening og der er udført undersøgelser med både stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting. På de resterende 4 feltlokaliteter (kapitel 5 til 8) er der tale om forureninger med chlorerede opløsningsmidler, og der er her udført undersøgelser med stofspecifik isotopanalyse. I kapitel 9 konkluderes der overordnet på metoderne stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting på baggrund af undersøgelserne på de fem feltlokaliteter. Endelig afsluttes rapporten i kapitel 10, med en vurdering af potentialet for den alternative undersøgelsesstrategi.

Rapporten kan læses i sin helhed eller man kan fokusere på metode og resultater for henholdsvis stofspecifik isotopanalyse eller fingerprinting, endelig kan man læse de fem cases uafhængigt af hinanden.

# Sammenfatning

Indsatsen overfor jordforureninger pga. en uacceptabel påvirkning af indeklimaet udgør en betragtelig del af regionernes samlede arbejde med den offentlige indsats. Den nuværende indsats baseres på en ressourcetung "traditionel" udefra og ind undersøgelsesstrategi. I dette projekt undersøges en "alternativ" undersøgelsesstrategi baseret på indeklimascreeninger, som eventuelt efterfølges af en vurdering af jordforureningens bidrag til indeluftforureningen.

Formålet med udviklingsprojektet har været at sammenligne den alternative undersøgelsesstrategi med den traditionelle udefra og ind strategi, med henblik på at evaluere potentialet for en videre udbredelse, herunder at undersøge, evaluere og udvikle brugen af de avancerede teknologier fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse til brug for den alternative undersøgelsesstrategi under danske forhold.

Stofspecifik isotopanalyse (Compound-specific Stable Isotope Analysis - CSIA) er en analytisk metode til bestemmelse af forholdet mellem stabile isotoper i specifikke kemiske forbindelser (stoffer). Stofspecifik isotopanalyse kan bruges til vurdering af oprindelsen af indeklimaforurening ved at sammenholde isotopsignaturen for prøver udtaget i indeluften med prøver udtaget af jordforureningen. Hvis de to isotopsignaturer er signifikant forskellige og isotopsignaturen for indeluften samtidig ligger inden for det kendte område for nyligt produceret stof f.eks. PCE, er dette en stærk indikation på, at indeklimaforureningen stammer fra en intern kilde.

Fingerprinting er en metode, der bygger på sammenligning af indholdet af specifikke kulbrinter flere prøver imellem. Ved fingerprinting identificeres og navngives typisk de 10 mest dominerende stoffer ud fra deres signalstyrke på MS-TIC (Total Ion Count) detektor. De mest markante peaks i chromatogrammer og de specifikke kulbrinter i prøver udtaget i indeluften og i kildeområdet til jordforureningen sammenlignes. Det kan på dette grundlag vurderes, om kulbrinter i indeluften stammer fra jordforurening eller fra interne kilder.

Til afprøvning af den alternative undersøgelsesstrategi, herunder teknologierne fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse er der i samarbejde med Region Hovedstaden udpeget 5 relevante lokaliteter.

På Gladsaxevej er der påvist en jordforurening med oliestoffer ved en smøregrav. Der er ligeledes påvist indhold af oliestoffer i indeluften. De stofspecifikke isotopanalyser indikerer, at benzen i indeluften i stueetagen og på 1. sal, stammer fra nyligt produceret stof. Ved fingerprinting indikeres det, at der sker indtrængning af poreluftforurening til indeluften i kælderen, men at der også er en sandsynlig påvirkning fra opbevaring af f.eks. mindre benzindunke. I indeluften i stueetagen og på 1. sal vurderes et mindre indhold af kulbrinter at stamme fra den underliggende forurening, men der er ligeledes indikationer på, at et væsentligt indhold stammer fra interne kilder som nåletræ, rengøringsmidler, produkter til personlig hygiejne og tryksager. Overordnet er der flere indikationer på, at indeluften i boligerne hovedsagelig er påvirket af oliestoffer fra interne kilder.

På Bymidten er der boliger på 1. og 2. sal over et aktivt renseri i stue- og kælderplan, hvorunder der er en ældre jordforurening. De stofspecifikke isotopanalyser viser, at PCE i kildeområdet er delvist nedbrudt. Isotopsignaturen for luften i renseriet ligger inden for området for nyligt produceret PCE. Isotopsignaturen for indeluften i boligerne er sammenfaldende med signaturen for indeluften i renseriet, hvilket indikerer, at den påviste PCE i boligerne primært stammer fra den aktive renseridrift. Isotopsignaturen for indeluften udtaget i renseriets kælder indikerer, at indeluften i kælderen både er påvirket af den aktive renseri drift og af jordforureningen.

På Amagerbrogade er der en PCE kilde under gulv i et aktivt renseri. Over renseriet er der beboelse. Der er signifikant forskel på isotopsignaturen for PCE i kildeområdet i jorden og PCE i indeluften i det aktive renseri. Prøverne udtaget i indeluften i boligerne og i indeluften i det aktive renseri har samme kulstof-isotopsammensætning, hvilket indikerer, at der er en væsentlig påvirkning af indeluften i boligerne med PCE fra den aktive renseridrift.

Innovationsgaragens sydlige bygning er en industribygning, hvorunder der er en PCE-forurening. De stofspecifikke isotopanalyser fra både poreluft og grundvand viser, at PCE i kildeområdet er delvist nedbrudt. Der er således et muligt potentiale for at bruge grundvandsprøver til at definere isotopsignaturen i kildeområdet. Isotopsignaturen for indeluftprøven viser en tydelig indikation på PCE påvirkning fra både indtrængende PCE fra kildeområdet og fra en intern kilde i bygningen. På baggrund af disse analyser er der fundet en intern kilde i bygningen.

Den nordlige bygning på Innovationsgaragen er en etplans industribygning, hvor under der er en kraftig PCE forurening. Luftprøver udtaget af poreluften fra kildeområdet under gulv og fra indeluften har samme isotopsignatur. Dette er en tydelig indikation af at PCE bidrager til indeluften stammer fra indtrængende PCE fra kildeområdet under gulv, og at der ikke er nogle interne kilder til PCE forurening i bygningen.

Følgende kan konkluderes i forhold til egnetheden af de avancerede metoder:

- For TCE og PCE vurderes det, at stofspecifik isotopanalyse er en hurtig og præcis metode til at bestemme oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft.
- For oliestoffer er der indikationer på, at stofspecifik isotopanalyse for kulstof i benzen kan bruges til at bestemme oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft.
- Fingerprinting for kulbrinterne i en olieforurening vurderes ligeledes at være en brugbar metode til bestemmelse af oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft.

Data fra stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting danner således grundlag for en hurtig og ikke invasiv strategi til risikovurdering over for indtrængning af forureningsstoffer fra en underliggende jordforurening til indeklimaet i en bolig.

Følgende fordele og ulemper er opstillet for henholdsvis den traditionelle udefra og ind undersøgelsesstrategi og den alternative undersøgelsesstrategi. Overordnet er den traditionelle undersøgelsesstrategi ressourcetung, skaber større gener for grundejer og kan introducere indtrængningsveje mellem jord og bolig gennem utætte prøvetagningssteder. Fordelene er, at prøver og analyser følger standardprocedurer som er kendt og gennemprøvet og at mulige indtrængningsveje fra poreluft til indeklima kan vurderes på baggrund af den traditionelle forureningsundersøgelsen. Den alternative undersøgelsesstrategi indledes med en meget simpel, hurtig og gennemprøvet screening af indeluften. Hvis der på baggrund af denne screening vurderes at være en mulig risiko i forhold til indeklimaet, udføres avancerede analyser som kræver specialuddannet prøvetager. De avancerede metoder er tidsmæssigt og økonomisk på niveau med undersøgelserne ved den traditionelle undersøgelsesstrategi. Hvis der ikke er en vurderet risiko på baggrund af de indledende målinger, er metoden både nem og meget billig sammenholdt med den traditionelle tilgang. Ulempen ved den alternative strategi er, at den giver et øjebliksbillede for indeklimaet, dvs. at fx ændringer i konstruktionen, der giver et større bidrag senere ikke kan evalueres. Herudover måler man ved den alternative tilgang i første omgang det samlede indhold af en given komponent i rummet og ikke bidraget fra jordforureningen direkte.

Det vurderes, at der er et væsentligt potentiale for en videreudvikling af den alternative undersøgelsesstrategi. Metoderne stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting er effektive til at vurdere oprindelsen af forureningsstoffer i indeluften. Det skal dog bemærkes, at hverken stofspecifik isotopanalyse eller fingerprinting umiddelbart kan bruges til at vurdere det eksakte bidrag fra henholdsvis jordforurening og interne kilder til indeluften. Det er således ikke muligt

med metodens nuværende stade at vurdere om bidraget fra jordforureningen f.eks. er under 30 %.

Det store potentiale i den alternative undersøgelsesstrategi ligger i muligheden for, at et antal ejendomme kan undgå af kortlægning baseret på indeluftprøver og herved at undgå langvarige og bekostelige forureningsundersøgelser på lokaliteter uden risiko for indeklime i bolig.



# Summary

The effort towards mitigation of impact on indoor air from soil contamination represents a considerable part of the region's overall work in the area. The current effort is based on a relative costly strategy working "outside -in". This study investigates an alternative strategy based on a first-hand screening with passive samplers in the indoor air followed up by a more complex analysis of the actual contribution from soil contamination if elevated levels are discovered.

The aim of the study has been a comparison with the traditional "outside-in" strategy evaluating the potential for a further development and use of the technologies Compound Specific Isotope Analysis (CSIA) and Fingerprinting in a Danish context.

CSIA is an analytical method that determines the ratio of different stable isotopes in specific chemical compounds. CSIA can be used as a tool for distinguishing between different sources of contamination in the indoor air. This is carried out by comparing the isotope composition in samples from indoors with isotope composition in samples from the soil gas. If the two isotopic signatures are significantly different and the isotope signature of the indoor air is like the known range in a newly produced substance, this is a strong indication that indoor air pollution originates from an internal source like dry cleaned clothes etc.

Fingerprinting is a method that is based on comparing the content of specific hydrocarbons several samples between. By fingerprinting, typically the 10 most dominant substances are identified and named based on their signal strength on the MS-TIC (Total Ion Count) detector. The most significant peaks in the chromatograms from samples taken in the indoor air and in the source area for soil contamination are compared. On this basis, it can be assessed whether hydrocarbons in the indoor air originate from soil contamination or from internal sources like paints, glue etc.

To test the alternative study strategy, including the technologies fingerprinting and CSIA, 5 relevant sites were identified in collaboration with the Capital Region of Denmark.

At Gladsaxevej, a soil contamination with hydrocarbons was found near a grease pit. Also, oil content in the indoor air was detected. CSIA indicates that the benzene in the indoor air on the ground floor and on the first floor comes from a newly produced substance. Fingerprinting analysis indicates that soil gas flows into the indoor air in the basement, but that there is also a likely contribution from storage of e.g. smaller gasoline canisters. In the indoor air on the ground floor and on the first floor, a minor volume of hydrocarbons is estimated to originate from the underlying pollution. Most of the content originates from internal sources such as pinewood, cleaning agents, personal hygiene products, and printed matter. Overall, there are several indications that indoor air in the home is mainly influenced by oil substances from internal sources.

At Bymidten there are residential apartments on the 1st and 2nd floor over an active dry-cleaner in the ground and basement planes. Below the dry-cleaner there is an older soil pollution with PCE. CSIA shows that PCE in the source region in the soil is partially degraded. The isotope signature for the air in the dry-cleaner is within the area of newly produced PCE. The isotope signature for the indoor air in the apartments coincides with the signature for the indoor air in the dry-cleaning room, which indicates that the detected PCE in the homes primarily originates from the active dry-cleaning operation. The isotope signature for the indoor air in the basement indicates that the indoor air in the basement is affected both by the active cleaning operation and by the soil contamination.

At Amagerbrogade there is a PCE source zone in the soil below an active dry-cleaning facility. Above the dry cleaning there is residential apartments. There is significant difference in the isotope signature for PCE in the source area of the soil and PCE in the indoor air in the dry-cleaners store. The samples taken in the indoor air in the apartments and in the indoor air in the active cleaning plant have the same carbon isotope composition, which indicates that there is a significant influence on the indoor air in the apartments with PCE from the active dry-cleaning operation.

The southern building of the Innovation Garage is an industrial building under which there is a PCE pollution. The CSIA from both soil gas and groundwater show that PCE in the source area is partially degraded. Thus, there is a potential for using groundwater samples as well as air samples to define the isotope signature in the source area. The isotope signature for the indoor air sample shows a clear indication of PCE impact from both PCE from the source area in the soils as well as from an internal source in the building. Based on these analyzes, an internal source has been localized in the building.

The northern building of the Innovation Garage is a one-level industrial building, under which there is a strong PCE pollution. Air samples taken from the soil gas from the source area under the floor and from the indoor air have the exact same isotope signature. This is a clear indication that the PCE contribution to the indoor air originates from invading PCE from the source area under floor and that there are no internal sources of PCE contamination in the building.

The following can be concluded in relation to the suitability of the advanced methods:

- For TCE and PCE, it is evaluated that CSIA is a quick and accurate method for determining the origin of pollutants in indoor air.
- For oils, there are indications that CSIA for carbon in benzene can be used to determine the origin of pollutants in indoor air.
- Fingerprinting for the hydrocarbons in an oil pollution is also considered a useful method for determining the origin of pollutants in indoor air.

Data from CSIA and fingerprinting thus form the basis for a fast and non-invasive strategy for risk assessment against the penetration of pollutants from an underlying soil contamination to the indoor air in a home.

The following advantages and disadvantages are set forth for the traditional "outside-in" strategy and the alternative study strategy, respectively. Overall, the traditional study strategy is resource-intensive, creating greater nuisance for landowners and potentially introducing "artificial" penetration pathways through leaky sampling points. The advantages are that samples and analyzes follow standard procedures that are known and tested and that possible penetration paths from soil gas to indoor air can be assessed on the basis of the traditional pollution survey. The alternative study strategy begins with a very simple, rapid and proven screening of the indoor air. If this screening shows a possible risk in relation to the indoor air, advanced analyzes are carried out which require specially trained personnel and equipment. The advanced methods are timely and economically level with the studies of the traditional strategy. If there is no assessed risk based on the initial measurements in the alternative strategy, the method is both easy and very cheap compared to the traditional approach. The disadvantage of the alternative strategy is that it provides a snapshot for the indoor climate, ie. that, for example, changes in the construction that make a larger contribution later cannot be evaluated. In addition, the alternative approach initially measures the total content of a given component in the room and not directly the contribution from the soil contamination.

# 1. Indledning

## 1.1 Baggrund og formål

I Danmark har data til vurdering af en jordforurenings indeklimapåvirkning baseret sig på en traditionel udefra og ind undersøgelsesstrategi, der primært bunder i oprydningvejledningen /1/. Strategien tager udgangspunkt i en fremgangsmåde for forureningsundersøgelsen, hvor forurening først påvises i jord/vand uden for en eventuel bygning. Hvis det vurderes, at der er risiko for en påvirkning af indeklimaet, udføres herefter målinger af indholdet i poreluften umiddelbart under gulvkonstruktionen. I fald der i poreluften påvises forureningsniveauer over et screeningsniveau på ca. 100 gange afdampningskriteriet, udtages prøver af luften i indeklimaet til endelig risikovurdering overfor indeklimaet.

Denne undersøgelsesstrategi er først og fremmest udviklet, fordi det ikke har været muligt at skelne mellem bidrag fra interne kilder i boligen eller i udeluften, og bidraget fra jordforureningen. En indsats overfor jordforureningen via jordforureningsloven kræver, at de konstaterede koncentrationer i indeklimaet skal komme fra en underliggende jordforurening. Denne problemstilling har formentlig været en betydelig årsag til, at man ikke tidligere i undersøgelsesforløbet har anbefalet at måle i indeklimaet fra første mistanke om påvirkning, men først taget dette skridt efter relativt omfattende undersøgelser på ydersiden af bygningskonstruktionen.

Den nuværende fremgangsmåde, til vurdering af indeklimapåvirkning, har en række svagheder. Kvaliteten af den traditionelle udefra og ind strategi er afhængig af et betydeligt antal prøvepunkter. Der skal udtages prøver af både jord og vand, hvilket kræver etablering af borer, og der udtages poreluftprøver under gulv i bygningen. Der påvises ofte en stor rummelig variation af indholdet i poreluften inden for korte afstande, hvilket nødvendiggør et relativt højt antal prøvepunkter for at opnå et repræsentativt billede af forureningsniveauerne. Det høje antal prøvepunkter gør denne undersøgelsesstrategi dyr og tidskrævende. En ulempe ved at lave målinger under gulv er desuden, at man gennembryder gulvkonstruktionen. I betongulve kan prøvepunkterne typisk reetableres fornuftigt, men så snart der er mere komplicerede gulvopbygninger som f.eks. trægulve, isolering, dampspærre eller gulvvarme, stiger risikoen for dels at etablere transportveje for både forurening og fugt ind i bygningen, som følge af mangelfuld afpropning/reparation af beton og dampspærre, og dels at det æstetiske udtryk, efter prøvetagningen, ikke er tilfredsstillende for grundejeren. Udover disse problematikker er der ved de traditionelle forureningsundersøgelser en risiko for at overse en transportvej, der i flere undersøgelser har vist sig at spille en dominerende rolle i forhold til påvirkning af indeklimaet. Transport via kloakker og ind i bygninger fra mere fjerntliggende kilder fanges således ikke nødvendigvis ved den traditionelle undersøgelsesstrategi.

I USA er man i de seneste år begyndt at anvende en alternativ undersøgelsesstrategi, som på væsentlige punkter adskiller sig fra den undersøgelsesstrategi, der er beskrevet ovenfor. På baggrund af mistanken om en indeklimapåvirkning, der overskrider afdampningskriterierne, starter man med en indendørs screening af forureningsniveauet i indeluften, fremfor at udføre en større undersøgelse. Finder man ved screeningen, at forureningskoncentrationen i indeluften overskrider afdampningskriteriet, inddrages metoder til differentiering af bidraget fra henholdsvis jordforurening og interne kilder, så som aktiv renseridrift, oliefyr eller lign. Det drejer sig om metoderne fingerprinting (ved overskridelse af samleparametre som eksempelvis TVOC) og stofspecifik isotopanalyse.

Den store fordel ved den alternative undersøgelsesstrategi er, at man på baggrund af indeluftmålinger umiddelbart kan vurdere, om der er et uacceptabelt indhold af forureningsstoffer i in-

deluften i en bolig. Denne strategi er derfor langt mindre invasiv og kan skabe et hurtigt overblik over risikobilledet. I fald der påvises overskridelser, skal de mere avancerede undersøgelsesmetoder, som f.eks. fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse tages i brug, således at det på baggrund af den generelle konceptuelle model for forureningsspredningen, samt resultaterne af de avancerede undersøgelsesmetoder, kan afgøres om det primære bidrag til den påviste indeklimateforurening stammer fra jordforureningen. Der vil således være behov for et betydeligt mindre undersøgelsesprogram, og der skal i en lang række tilfælde udføres færre eller ingen prøvetagning gennem gulvet. Denne undersøgelsesstrategi vil spare omkostninger samtidig med, at generne for boligejerne vil være betydeligt reduceret.

Dette er første gang den alternative undersøgelsesstrategi, herunder CSIA, har været afprøvet under danske forhold.

Formålet med udviklingsprojektet har været at sammenligne den alternative undersøgelsesstrategi med den traditionelle udefra og ind strategi, med henblik på at evaluere potentialet for en videre udbredelse. Herunder at undersøge, evaluere og udvikle brugen af de avancerede teknologier fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse til brug for den alternative undersøgelsesstrategi under danske forhold.

Der er tale om et projekt til afprøvning af teknologierne fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse på relevante feltlokaliteter, hvor der på baggrund af en traditionel forureningsundersøgelse er registreret indeklimateforurening med chlorerede opløsningsmidler eller oliestoffer. I forbindelse med projektet er der udført et litteraturstudie til afklaring af de vigtigste forhold omkring stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting, herunder hvilke laboratorier der tilbyder ydelsen samt priserne på dette.

På baggrund af litteraturgennemgangen og undersøgelser på feltlokaliteter opstilles fordele og ulemper ved den "traditionelle" strategi og den "alternative" strategi. Såfremt metoden viser sig lovende udarbejdes et sæt anbefalinger til udførsel og brug. Der arbejdes hen mod, at metoden kan bruges til at nuancere/kortlægge, så den opnår samme status som poreluftmålinger/indeklimatemålinger og lign.

## 1.2 Feltlokaliteter

Til afprøvning af den alternative undersøgelsesstrategi og herunder teknologierne fingerprinting og stofspecifik isotopanalyse er der udpeget 5 relevante lokaliteter. På alle fem lokaliteter lå der inden igangsættelse af dette projekt en traditionel undersøgelse af forholdene både i indeklimaet og i jorden. Projektet bygger således videre på eksisterende data. Feltlokaliteterne er karakteriseret inden for de tre følgende kategorier:

### 1. Jordforurening med kulbrinter/benzen, forventet påvirkning fra en intern kilde (1 stk.)

Der er udvalgt 1 feltlokalitet med kulbrinteforurening, idet det ikke var muligt at finde yderligere relevante kulbrintelokaliteter inden for den afsatte tidsramme. På Gladsaxevej ses høje indhold af benzen i indeluften sammenlignet med indholdet i poreluften. Det forventes således, at der er en ukendt intern kilde på ejendommen. På Gladsaxevej udtages prøver til udførelse af fingerprinting for de 10 vigtigste komponenter og deres relative fordeling. Der udtages desuden prøver til udførelse af stofspecifik isotopanalyse på benzen ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) fra poreluftforureningen under gulv samt i indeluften. Der udføres vurderinger af komponentsammensætningen og isotopsammensætning mellem indeluft- og poreluftprøver.

### 2. Jordforurening med PCE, ingen forventede interne kilder (2 stk.)

På Region Hovedstadens testgrund Innovationsgaragen forventes ingen interne kilder til indeklimateforurening med PCE. Der udføres undersøgelser i både den nordlige og den sydlige bygning. Bygningerne anses og behandles som to uafhængige undersøgelseslokaliteter. I begge

bygninger udføres stofs specifik isotopanalyse på PCE ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ) fra prøver udtaget under gulv i kildeområdet samt i indeluften. Desuden udtages en vandprøve fra forureningsfalten tilknyttet poreluftforureningen, og der udføres ligeledes stofs specifik isotopanalyse på PCE ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ) fra denne vandprøve.

### **3. Jordforurening med PCE, potentiel påvirkning fra intern kilde (2 stk.)**

På Bymidten samt på Amagerbrogade er der igangværende renserier samt forurening med chlorerede opløsningsmidler (PCE) i jorden under gulv. I indeklimaet i overliggende boliger er der påvist varierende indhold af PCE. Indholdet af PCE i lejlighederne kan potentielt stamme fra den aktive renseridrift (interne kilde) eller fra den underliggende jordforurening. Der udføres stofs specifik isotopanalyse på PCE ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ) fra luftprøver udtaget i kildeområdet under gulv, fra indeluften i det aktive renseri (den interne kilde) samt i relevante boliger. På Bymidten er der udført to målerunder med et års mellemrum.

## 2. Teori

### 2.1 Stofspecifik Isotopanalyse (CSIA)

Stofspecifik isotopanalyse (Compound-specific Stable Isotope Analysis - CSIA) er en analytisk metode til bestemmelse af forholdet mellem stabile isotoper i specifikke kemiske forbindelser (stoffer). En række atomer optræder som flere forskellige stabile isotoper (ikke radioaktive). De mest almindelige par anvendt i stofspecifik isotopanalyse er  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ,  $^2\text{H}/^1\text{H}$  og  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ . Isotoperne adskiller sig fra hinanden ved at variere i antallet af neutroner i atomets kerne. F.eks. består kulstof primært af atomer med 6 neutroner og 6 protoner i kernen ( $^{12}\text{C}$ ), men omkring 1% af atomerne har en ekstra neutron ( $^{13}\text{C}$ ) /2/.

Stofspecifik isotopanalyse kan bruges til vurdering af stoffers skæbne i forbindelse med forureningsundersøgelser. De relevante isotop-par afhænger af den kemiske sammensætning af de stoffer, man ønsker at undersøge. Ved brugen af stofspecifik isotopanalyse i jord- og grundvandsforurening vil det ofte være olieforureninger eller forureninger med chlorerede opløsningsmidler, der ønskes undersøgt. I forbindelse med olieforureninger kan der udføres stofspecifik isotopanalyse på kulstof og hydrogen ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) fra eksempelvis benzen (men i princippet fra enhver komponent i olien). I forbindelse med forureninger med chlorerede opløsningsmidler kan der udføres stofspecifik isotopanalyse på kulstof og chlorid ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ) fra hver af de specifikke stoffer og nedbrydningsprodukter f.eks. PCE, TCE og vinylchlorid. Ved at udføre stofspecifik isotopanalyse på to forskellige atomer i de samme molekyler, får man et betydeligt stærkere vurderingsgrundlag /14, 19/. Det skal bemærkes, at isotopforholdet for de to atomer ikke er afhængigt af hver andre. Der kan således godt være sket isotopfraktionering af f.eks. kulstof men ikke af chlorid eller vice versa. Dette afhænger af de relevante nedbrydningsprocesser og/eller nedbrydere.

Isotopforholdet måles ved hjælp af en massespektroskopisk GC metode, der er sat op specielt til formålet. Isotopforholdet udtrykkes ved en delta-notation ( $\delta$ ) som beskriver indholdet af tunge og lette isotoper i prøven i forhold til en international reference. Eksempelvis, er beregningen af  $\delta$  for kulstof vist i ligning 1 /2, 5/. Delta-notationen bruges for at sikre at resultaterne bliver ensartede og kan sammenlignes laboratorier imellem.

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} \right] \times 1000 \quad (1)$$

En mere positiv værdi af  $\delta$  angiver, at prøven har flere tunge isotoper end standardreferencen, mens en mere negativ værdi angiver, at prøven har flere lette isotoper /5/.

Forholdet mellem isotop-parrene i de forskellige molekyler afspejler dels oprindelsen af molekylet, og dels de processer molekylerne har undergået fra spildtidspunktet, til der udtages prøver. Under bionedbrydning eller abiotisk nedbrydning omdannes molekyler med lette isotoper lettere/hurtigere end molekyler med de tunge isotoper. Som følge af denne proces, vil materiale, der har været udsat for nedbrydning, blive beriget med tunge isotoper i forhold til de oprindeligt fremstillede produkter /6/. Med andre ord vil en prøve af det resterende materiale være "tungere" eller "mere positiv" end det oprindelige materiale /5/. Der vil være sket isotopfraktionering til en tungere isotopsammensætning/isotopsignatur.

I forbindelse med forureningsundersøgelser, kan stofspecifik isotopanalyse bruges til:

- At bestemme hvorvidt en forurening er naturlig eller skyldes et spild med f.eks. oliestoffer /7/.

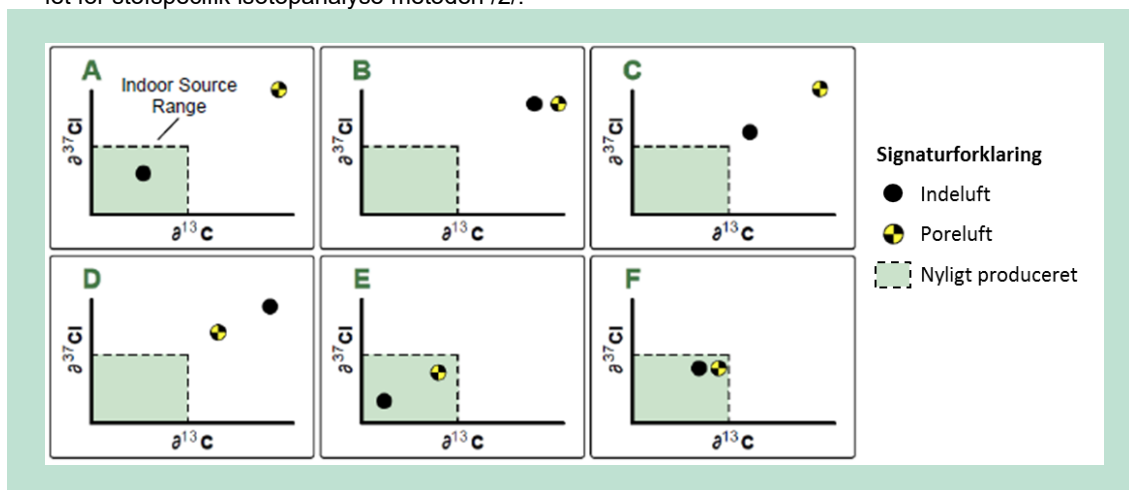
- At bestemme oprindelsen af forurening i grundvandsfaner til specifikke kilder eller udledninger. Herunder at bestemme forureningsstoffernes skæbne og evt. nedbrydningsrate i grundvandsfanen /7, 11, 13, 17, 19/.
- At bestemme oprindelsen af poreluftforurening i umættet zone til specifikke kilder /9, 10/.
- At skelne mellem kilder til forurening med flygtige organiske forbindelser (VOC) i indeluften i forbindelse med indeklimateundersøgelser, idet poreluftforurening og interne kilder ofte har forskellig isotopsignatur /2, 7, 18/.

I dette projekt undersøges brugen af stofs specifik isotopanalyse til skelnen mellem kilder til indeluftforurening i forbindelse med indeklimateundersøgelser, hvorfor de fortsatte afsnit om teori og metode udelukkende forholder sig til denne problematik.

### 2.1.1 Stofspecifik isotopanalyse til skelnen mellem kilder til indeklimateforurening

Metoden til differentiering af kilder til indeklimateforurening bygger på en sammenligning af den specifikke isotopsammensætning i indeklimate sammenholdt med prøver fra den relevante poreluftforurening og eventuelt den interne kilde. Der udføres stofs specifik isotopanalyse for den relevante kemiske forbindelse, således at isotopforholdet for henholdsvis kulstof og/eller chlor beskrives ved  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\delta^{37}\text{Cl}$ .

De påviste isotopforhold fortolkes ved at sammenligne isotopsignaturen for de forskellige prøver med hinanden, samt med et kendt interval for  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\delta^{37}\text{Cl}$  for nyligt produceret stof /8/. Dette er forsøgt illustreret i FIGUR 1, der stammer fra den amerikanske protokol, der er udviklet for stofs specifik isotopanalyse metoden /2/.



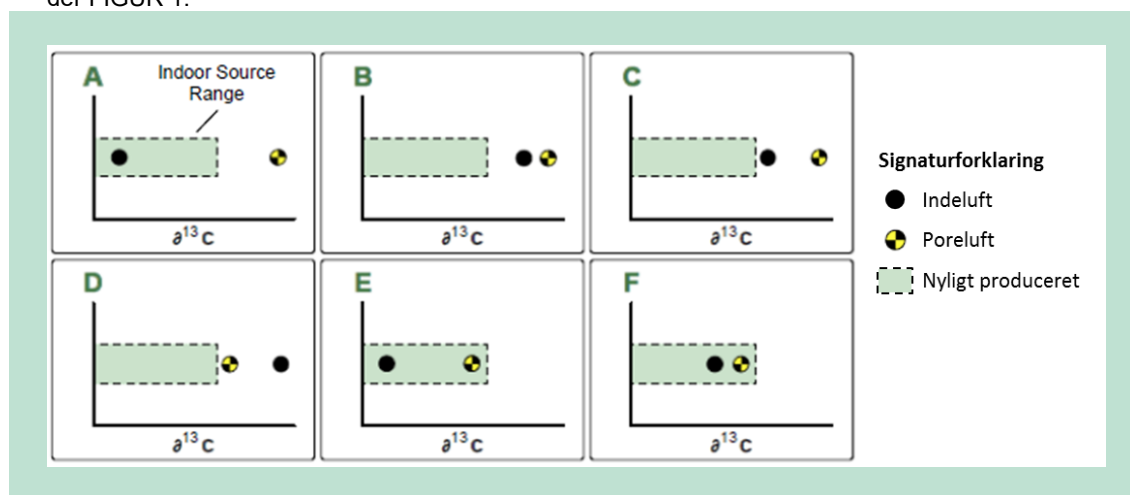
**FIGUR 1.** Fortolkning af resultater fra stofs specifik isotopanalyse.  $\delta^{13}\text{C}$  plottes på x akse og  $\delta^{37}\text{Cl}$  plottes på y akse /2/.

- Tydelig indikation af, at en intern kilde er den væsentlige kilde til indeklimateforureningen.
- Tydelig indikation af, at indtrængende poreluftforurening er den væsentlige kilde til indeklimateforureningen.
- Indikation af en blanding mellem forurening fra indtrængende poreluftforurening og en intern kilde.
- Indikation af, at indtrængende poreluftforurening er den væsentlige kilde til indeklimateforureningen og at der er sket yderligere isotopfraktionering til en tungere isotopsammensætning mellem poreluftprøvepunktet og prøven i indeluften.
- Svagere indikation af, at en intern kilde er den væsentlige kilde til indeklimateforureningen. Yderligere metoder til vurdering af kilden til indeklimateforureningen bør tages i brug.

- F) Svagere indikation af, at indtrængende poredluftforurening er den væsentlige kilde til indeklimateforureningen. Yderligere metoder til vurdering af kilden til indeklimateforureningen bør tages i brug.

Som det fremgår af figuren, er det forholdsvis simpelt at vurdere på data fra stofs specifik isotop analyse. Hvis isotopsignaturen for prøver udtaget af poredluftforureningen og prøver udtaget i indeluften ligger i det samme område, indikerer dette, at der er tale om den samme forurening, og at indeklimateforureningen således med stor sandsynlighed stammer fra indtrængende poredluftforurening. Ligger isotopsignaturen uden for området for nyligt produceret stof er indikationen betydeligt stærkere.

Er der ikke udført stofs specifik isotop analyse for to stoffer men kun for f.eks.  $\delta^{13}\text{C}$ , plottes resultatet blot på én akse og den samme metodik til vurdering af resultaterne kan bruges. For et eksempel se FIGUR 2. For beskrivelse af vurderingen baseret på de forskellige plot, se listen under FIGUR 1.



FIGUR 2. Fortolkning af resultater fra stofs specifik isotop analyse.  $\delta^{13}\text{C}$  plottes på x akse /2/.

### 2.1.2 Hvornår er stofs specifik isotop analyse egnet?

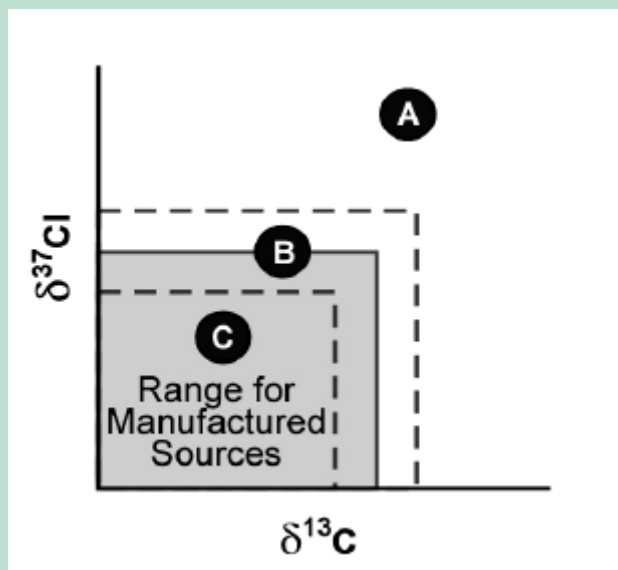
Stofs specifik isotop analyse kan anvendes på de fleste lokaliteter og er ikke afhængig af bygningstype. Metoden kan bruges til de mest gængse forureningstyper som olie og chlorerede opløsningsmidler. Derudover er der følgende fordele ved brugen af stofs specifik isotop analyse /15/:

- stofs specifik isotop analyse baserer sig ikke på trends i forureningsudbredelsen eller påvisningen af nedbrydningsprodukter.
- Ved stofs specifik isotop analyse laves analyser på et specifikt forureningsstof.
- stofs specifik isotop analyse kan detektere meget små ændringer i isotopsammensætningen og er derfor en meget sensitiv metode.
- Fordelen ved stofs specifik isotop analyse er større ved analyse af flere atomer i de samme molekyler (f.eks.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ).

Stofs specifik isotop analyse er afhængig af, at isotopsignaturen for poredluftforureningen og eventuelle interne kilder adskiller sig fra hinanden /2/. Poredluftforureningen skal således helst have undergået processer, der har ændret isotopsignaturen for de relevante stoffer. Det kunne f.eks. være nedbrydning af forureningen, hvor blot en mindre omdannelse vil ændre isotopsignaturen i en grad, så det registreres ved stofs specifik isotop analyse. Resultaterne fra stofs specifik isotop analyse vil give de tydeligste indikationer, hvis isotopsignaturen for poredluftforureningen ligger udenfor området for nyligt produceret stof. Dette vil ofte være tilfældet for en ældre forurening. Det kan være fornuftigt, at bestemme isotopsignaturen for poredluften, før et større måleprogram udføres, for således at vurdere om stofs specifik isotop analyse er egnet på den



relevante lokalitet. Af FIGUR 3 fremgår det, hvor egnet stofs specifik isotopanalyse er til vurdering af, hvorvidt en indeklimateforurening stammer fra indtrængning af poreluftforurening baseret på isotopsignaturen for poreluftforureningen.



**FIGUR 3.** Egnethed af stofs specifik isotopanalyse baseret på isotopsignaturen for poreluftforureningen /2/.

- A) Isotopsignaturen for poreluftforureningen ligger udenfor området for nyligt produceret stof. stofs specifik isotopanalyse kan potentielt give en tydelig indikation af hvorvidt poreluftforureningen er kilden til indeklimateforureningen.
- B) Isotopsignaturen for poreluftforureningen ligger i den "tunge" ende af intervallet for nyligt produceret stof. stofs specifik isotopanalyse kan potentielt give supplerende indikationer af hvorvidt poreluftforureningen er kilden til indeklimateforureningen.
- C) Isotopsignaturen for poreluftforureningen ligger indenfor området for nyligt produceret stof. stofs specifik isotopanalyse er ikke anvendelig til vurdering af, hvorvidt indeklimateforureningen stammer fra indtrængende poreluftforurening.

Stofs specifik isotopanalyse kan med fordel anvendes i kombination med andre undersøgelsesmetoder. Specielt hvor der er tale om en isotopsignatur for poreluften der ligger i område B.

### 2.1.3 Processer med betydning for isotopsignaturen

Som beskrevet tidligere, kan de processor et molekyle har været udsat for, være skyld i isotopfraktionering og dermed ændre på isotopsammensætningen i molekylet. Er der tale om biologisk nedbrydning, vil de lette molekyler, indeholdende en høj andel af  $^{12}\text{C}$ , blive nedbrudt først og det resterende moderprodukt vil blive beriget med de tungere  $^{13}\text{C}$  atomer. Men for andre processor vil isotopfraktioneringen ikke nødvendigvis forløbe på den samme måde. I nedenstående afsnit beskrives isotopfraktioneringen ved fordampning og diffusion.

#### 2.1.3.1 Fordampning

Isotopforholdet for kulstof og chlorid ændrer sig ved fordampning.

Ændringen i isotopforholdet (isotopfraktioneringen) for kulstof-molekylet i TCE er undersøgt ved temperaturer mellem 5 og 35 grader, resulterende i en forskel mellem isotopsammensætningen i luftfasen og vandfasen for  $\delta^{13}\text{C}_{\text{vapor-liquid}}$  på +0,07 til +0,82‰ /3/. Isotopfraktioneringen ved overgangen fra vand til luft resulterer således i en tungere isotopsammensætning (berigelse af  $^{13}\text{C}$ ) i luftfasen sammenholdt med vandfasen. Dette er ikke umiddelbart logisk, i det

det måtte forventes, at de lette isotoper ( $^{12}\text{C}$ ) i højere grad var tilbøjelige til at gå på luftform. Adskillige studier har dog vist, at dette ikke er tilfældet for kulstof-molekylet /3/.

Det modsatte er dog tilfældet for chlorid-molekylet i TCE. Ved ligevægt mellem TCE opløst i vand og luft ved stuetemperatur (22 grader  $\pm$  2 grader) vil isotopforholdet være henholdsvis  $\delta^{13}\text{C}_{\text{vapor-liquid}} = +0,35\text{‰}$  for kulstof og  $\delta^{37}\text{Cl}_{\text{vapor-liquid}} = -1,64\text{‰}$  for chlorid /3/. Den samme tendens ses for PCE i et andet studie, hvor ændringen i isotopforholdet for kulstof ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{vapor-liquid}} = +0,46\text{‰}$ ) er i samme størrelsesorden, som den påviste ændring for TCE i /3/, derimod er den påviste ændring for chlorid ( $\delta^{37}\text{Cl}_{\text{vapor-liquid}} = -0,2\text{‰}$ ) betydeligt lavere, men viser samme tendens /12/. For chlorid-molekylet resulterer isotopfraktioneringen således i en berigelse af  $^{13}\text{C}$  i vandfasen sammenholdt med indholdet i luftfasen /3, 12/.

I et andet studie af ændringen i isotopforhold for chlorerede opløsningsmidler (TCE, PCE og cis-1,2-DCE), i faseovergange fra vand til luft i umættet zone, ses en mindre berigelse af de tunge isotoper i vandfasen. Ændringen i isotopforholdet er dog begrænset i dette studie ( $<0,5\text{‰}$ ), og ligger inden for analyseusikkerheden. Denne proces vurderes derfor ikke, at være af betydning for den generelle isotopsammensætning /10/. I dette studie adskilles der ikke imellem  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\delta^{37}\text{Cl}$ .

Ved undersøgelser af biologisk nedbrydning versus fordampning af TCE, kan ændringen i isotopforholdet, ifølge Poulsen 1999, indikere den styrende proces, idet både  $\delta^{37}\text{Cl}$  og  $\delta^{13}\text{C}$  i vandet ved mikrobiologisk nedbrydning vil blive tungere (beriget med  $^{13}\text{C}$ ). Hvis der derimod er tale om en fjernelse af stof ved fordampning vil  $\delta^{37}\text{Cl}$  blive tungere (beriget med  $^{13}\text{C}$ ) mens  $\delta^{13}\text{C}$  vil blive lettere (færre  $^{13}\text{C}$ ) /3/.

### 2.1.3.2 Diffusion

For kulbrinter gælder det, at molekyler, der udelukkende indeholder  $^{12}\text{C}$  eller få  $^{13}\text{C}$ , diffunderer hurtigere i gasfasen i umættet zone end molekyler med et højere antal  $^{13}\text{C}$ -atomer. Dette ses ved, at  $\delta^{13}\text{C}$  efter 3 dage er mere negativ (består af færre  $^{13}\text{C}$ ) i udkanten af forureningsskyen og altså er blevet beriget med  $^{13}\text{C}$  i forhold til et centralt hotspot /4/. Denne tendens er tydeligere jo lettere molekylerne er (des kortere kulstofkæder der er tale om) /4/. Ændringen i isotopforholdet til lettere molekyler i udkanten af forureningsskyen grundet diffusion gør sig dog kun gældende i en begrænset periode, hvorefter isotopforholdet udjævnes og endda bliver tungere (beriget med  $^{13}\text{C}$ ), grundet mikrobiologisk nedbrydning i den aerobe zone i udkanten af forureningen /4/. Det vurderes, at ændringen i isotopforholdet grundet diffusion kun vil være den styrende faktor i en kortere periode lige efter et spild og når mere end 75% af kilden er fjernet ved mikrobiologisk nedbrydning. Ændringer i isotopforholdet vil derfor i de fleste tilfælde kunne bruges som indikation for mikrobiologisk nedbrydning af oliestoffer, og der kan ses bort fra ændringer som følge af diffusion /4/.

Flere studier har undersøgt betydningen af diffusion ved transport af TCE, PCE og cis-1,2-DCE fra en forureningsfane i grundvandet op igennem umættet zone til terræn /10, 12/. I det første studie er der udtaget prøver over dybden fra vandoverfladen og til terræn over en 18 meter umættet zone ved en naturlig forurening /10/. Det forventes således, at der er tale om en situation, der ligner steady state. Der ses ingen væsentlige ændringer i isotopsignaturen for de chlorerede opløsningsmidler fra vandoverfladen til terræn, uagtet de forskellige kemiske stoffers diffusions-koefficienter og ændringer i geologi. Der ses samme tendens for både kulstof og chlorid-atomer /10/. I det andet studie er der opstillet en sandkolonne med en højde på 0,8 meter ved 25 grader. I dette studie påvises ligeledes konstante isotopsignaturer for både kulstof og chlorid over den umættede zone i en ligevægtssituation /12/.

## 2.2 Fingerprinting

Fingerprinting er en metode, der bygger på sammenligning af indholdet af specifikke kulbrinter, flere prøver imellem. Når der udføres analyse af kulbrinter ved et analyselaboratorium, vil

udbyttet ofte være en værdi for det samlede indhold af kulbrinter (total kulbrinter/TVOC). Det er også muligt, at indholdet af kulbrinter inddeles i kulbrintefraktioner, på baggrund af længden af kulstofkæder i de respektive stoffer. Ofte bruges FID (flammeionisations-detektor) som detektionsmetode når TVOC bestemmes, dvs. der kan ikke, som ved MS detektion, sættes specifikke navne på enkeltkomponenterne, selvom retentionstiden (gennemløbstiden i GC apparatet) giver et fingerpeg om stoffernes identitet ud fra viden om kogepunkterne. Ser man på chromatogrammet for en olieprøve, kan man registrere et betydeligt antal peaks, som hver i sær repræsenterer et specifikt stof, typisk mere end 1000 enkeltkomponenter, hvis der optimeres på analysemetoden. Ved fingerprinting, sammenholdes de største peaks med efterfølgende navngivning via MS-detektion, hvorved det er muligt at vurdere på oprindelsen af kulbrinter i prøven.

I forbindelse med indeklimateundersøgelser kan denne form for fingerprinting bruges til at vurdere, hvor vidt kulbrinter påvist i indeluften, stammer fra en jordforurening med olie eller fra interne kilder i bygningen. Der udtages prøver i kildeområdet til jordforureningen og i indeluften. Herefter sammenlignes de mest markante (største) peaks i chromatogrammer og de specifikke kulbrinter i prøverne sammenlignes. Det kan på dette grundlag vurderes, om kulbrinter i indeluften stammer fra jordforurening eller fra interne kilder.

### 2.2.1 Gas chromatografi (GC)

Kulbrinteanalyser bliver udført ved brug af en gaskromatograf koblet med én eller flere detektorer. En gaskromatograf består af et injektionskammer, hvori prøven injiceres sammen med en bæregas f.eks. He, N<sub>2</sub> eller H<sub>2</sub>. I injektionskammeret bliver prøven varmet op, således at alle stoffer går på luftform. Herefter transporteres prøven/analytten, med bæregassen til en kolonne. I kolonnen bindes de forskellige stoffer i prøven til et sorptionsmateriale. Da stofferne har forskellige kemiske egenskaber og kogepunkter, vil de frigives fra sorbenten ved forskellige temperaturer. Kolonnen varmes op via et temperaturprogram, hvorved de forskellige stoffer i analytten frigives løbende og strømmer ud af kolonnen til detektoren. Indholdet af analyt registreres løbende i en detektor placeret efter kolonnen. Detektoren registrerer et signal til en bestemt tid, hvorved der fremkommer et chromatogram med peaks, se FIGUR 4. Højden af peaken viser styrken af signalet for det enkelte stof (angivet i TIC), og arealet under peaken viser indholdet af stoffer /23/.

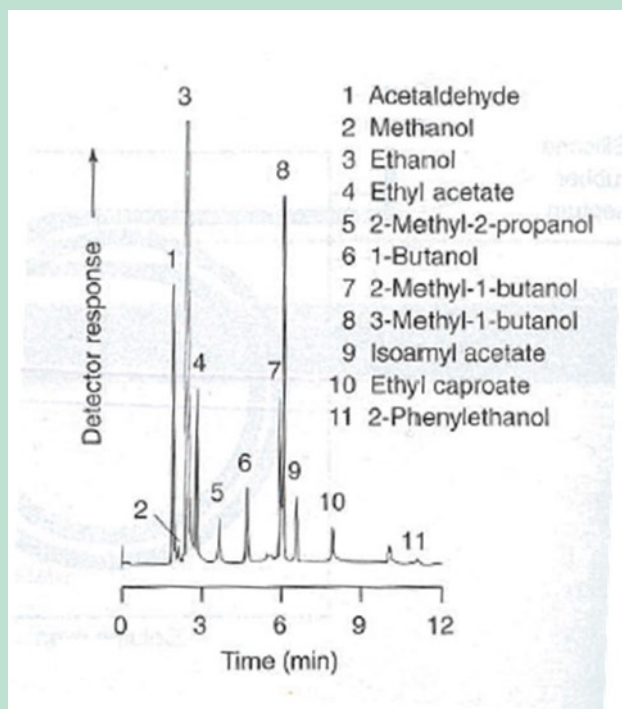
Der anvendes en række forskellige detektorer i forbindelse med gaschromatografi. I forhold til detektion af kulbrinter/oliekomponenter er de mest almindelige FI og MS.

Flammeionisationsdetektoren (FID) virker ved at prøven fra kolonnen ledes ind i et kammer, hvor der brænder en flamme (typisk med H<sub>2</sub> som brændstof). Ved afbrændingen danner kulbrinterne ladede ioner og der måles en spændingsforskel mellem to elektroder i gasskyen. Mængden af CH i gassen bestemmer det elektriske signals størrelse. Ved at sammenligne standardprøver af kendte stoffer/blandinger kan både stoffernes retentionstider og koncentration bestemmes på den enkelte GC-FID. Ulempen ved FID er primært at to stoffer der kommer igennem kolonnen på samme tid ikke kan adskilles analytisk. Fordelen er primært, at apparatet er relativt billigt og enkelt i brug, at det er lineært over et stort koncentrationsområde og at responset er relativt ens for forskellige kulbrinter. Eksempelvis giver 10 mg toluen nogenlunde samme elektriske udslag som 10 mg dodekan.

Der er en række forskellige MS detektorer. Den mest almindelige er quadropole (MSD, Mass Selective Detector), men også ion trap (IT-MS) og time of flight (TOF-MS) er anvendte i dag. Koblinger af disse apparater (MS-MS) forekommer også.

I en MSD kommer gassen fra kolonnen ind i et kammer, hvor den bestråles med elektroner via en højspændingskilde. Når elektronerne rammer de enkelte stoffer, skydes disse i stykker i helt karakteristiske ladede fragmenter. Gennem en række af elektroder afbøjes fragmenterne i

forhold til deres masse/ladning ( $m/Z$ ) i forskellige retninger, inden de rammer selve detektorfladerne og giver et elektrisk signal. Ud fra signalets styrke kan koncentrationen bestemmes, og ud fra hvilke fragmenter, der er i blandingen til et givent tidspunkt, kan stofferne identificeres ud fra et standardbibliotek. MS detektoren opereres i to forskellige tilstande. Total Ion Scan (TIC), hvor hele  $m/Z$  spekteret analyseres kontinuert, og Selective Ion Monitoring (SIM) hvor én eller få karakteristiske  $m/Z$  analyseres, for at få en meget lav detektionsgrænse for helt specifikke komponenter. Ved fingerprinting analyser bruges næsten udelukkende TIC tilstanden.



**FIGUR 4.** Eksempel på et kromatogram med 11 markante peaks /23/. De 11 peaks er sammenholdt med standarder, således at det specifikke stof for signalet er bestemt. Højden af peaken repræsenterer signalet i detektoren. På x-aksen fremgår tiden til hvilken signalet er registreret /23/.

Peaksene fremkommer som sagt til bestemte tider, afhængig af sorptionsmateriale og opvarmningsmønster for kolonnen. Ved at analysere på standarder (rene stoffer) for hvert enkelt stof, kan man sammenholde peaks fra den reelle prøve med peaks fra standarder. På baggrund af tiden til signal i detektoren (varmen til frigivelse af det sorberede materiale) samt peakens facon, kan det bestemmes hvilke enkeltstoffer, der ses af chromatogrammet. Det er vigtigt at huske at chromatografer og kolonner ikke er ens, hvorfor standarderne hører til den specifikke maskine/kolonne. I praksis betyder det, at det er nødvendigt at få det akkrediterede analyseinstitut til at vurdere enkeltstofferne i de højeste peaks i chromatogrammet, da analyseinstituttet har adgang til deres standarder /23/. Herefter kan vurderingen af oprindelsen til kulbrinter i de udtagne prøver vurderes på baggrund af sammenligning af de overordnede chromatogrammer og enkeltstoffer i de enkelte peaks.

# 3. Prøvetagning

## 3.1 Luftprøver til stofs specifik isotopanalyse

Ved brug af stofs specifik isotopanalyse til skelen mellem kilder til indeklimaforurening skal der udtages luftprøver af henholdsvis indeluft, poreluft og hvis muligt den interne kilde. I hvert målepunkt udtages prøver til analyse for henholdsvis koncentrationsmålinger ved akkrediteret analyselaboratorie, og stofs specifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  ved et analyselaboratorie, der kan udføre denne slags analyser på luftprøver. Prøvetagningen beskrevet i denne rapport er specifikt rettet mod analyse på University of Oklahoma, USA, der er udpeget af US-EPA til at udføre denne type af analyser.

Prøverne til stofs specifik isotopanalyse skal udtages på særlige kulrør (Supelco med Carboxen 1016). Det er vigtigt at sorbtionsmaterialet er korrekt, idet ikke alle kultyper binder alle isotoper lige effektivt. Hvis det forkerte sorbtionsmateriale bruges, kan der ske isotopfraktionering i forbindelse med prøvetagningen. Kommercielt tilgængelige sorbtionsmaterialer er i et studie fra 2012 blevet testet, og Carboxen 1016 blev fundet bedst egnet til brug ved prøver til stofs specifik isotopanalyse /16/. Brugen af det rette sorbtionsmateriale kan have stor indflydelse på resultatet af den stofs specifikke isotopanalyse, og kan føre til forkerte vurderinger og konklusioner på baggrund af isotopanalyserne. Der ud over kan analyselaboratoriet have krav til kulrørets dimensionering /21/.

For at undgå ændringer i isotopsammensætningen efter prøvetagningen, ved f.eks. nedbrydning af stofferne, mens de er sorberet på kulrørerne, anbefales det desuden, at kulrørerne analyseres hurtigst muligt efter prøvetagning. Kulrørerne bør ikke opbevares ved stuetemperatur. Hvis kulrørerne bliver opbevaret i køleskab, kan de opbevares i mindst 4 uger og på frost i op til 24 uger /2/.

Der skal udtages tre kulrør (Supelco med Carboxen 1016) per prøvepunkt (to kulrør ved olieforurening), og den samlede forureningsmasse på de tre kulrør må ikke variere mere end 30% fra hinanden. For at det er muligt at udføre selve analysen, skal massen af det specifikke stof (PCE, TCE, benzen eller andet) på kulrørerne være indenfor et bestemt interval. Der må altså hverken være for meget eller for lidt masse. Intervallet for forureningsmasse for de specifikke stoffer PCE, TCE og Benzen fremgår af TABEL 1. Desuden må den samlede masse af flygtige organiske forbindelser på kulrørerne ikke overstige 800 µg. Prøverne skal udtages ved et flow på 0,1 l/min, og der må ikke prøvetages mere end 100 liter luft per rør. Dette for at undgå, at prøvetagningen introducerer en ændring i isotopsammensætningen /2, 21/.

**TABEL 1.** Interval for forureningsmasse på kulrør til analyse for stofs specifik isotopanalyse /2, 21/.

|            | Isotop                          | Minimum masse | Maximum masse |
|------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| PCE og TCE | $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$   | 100 ng        | 2250 ng       |
| PCE og TCE | $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ | 100 ng        | 2250 ng       |
| Benzen     | $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$   | 50 ng         | 900 ng        |

Koncentrationen af forureningsstof (PCE, TCE eller benzen) i hvert prøvepunkt varierer, hvorfor det er nødvendigt, forud for prøvetagningen, at beregne den luftmængde der skal føres gennem kulrørerne, således at den samlede masse af det specifikke stof ligger inden for det angivne vindue. Denne luftmængde varierer fra 1 ml til 100 liter. De tre/fire kulrørsprøver (1 til akkrediteret analyse og 2 eller 3 til stofs specifik isotopanalyse) skal så vidt muligt udtages over

den samme tidsperiode, da den tidlige variation i forureningskoncentrationen, endda over meget kort tid, kan have stor betydning for den opsamlede masse af det specifikke stof.

Metoden til udtagning af prøverne er igennem projektperioden blevet forfinet af flere omgange, hvorfor der har været mindre justeringer i prøvetagningsmetoden undervejs. Desuden er en del prøver udtaget af flere omgange, for at opnå brugbare prøver. I det følgende beskrives den anbefalede prøvetagningsmetode og opstilling. Afsluttende vil observationer og læringspunkter fra udviklingen af prøvetagningen blive diskuteret og mulige ændringer/forbedringer nævnes.

### 3.2 Prøvetagningsmetode og opstilling, stofs specifik isotopanalyse

Prøverne udtages forskelligt, afhængigt af koncentrationsniveauet i det luft, der ønskes prøvetaget. Som forberedelse til prøvetagningen bør forureningsniveauet i prøvepunkterne vurderes. Dette kan gøres på baggrund af tidligere målinger og gerne på baggrund af flere målerunder, da den tidlige variation i forureningsniveauet kan være væsentlig. Det anbefales, at der på dagen for prøvetagning laves en indledende prøve af forureningsniveauet i luften i prøvepunktet på en felt-GC. På baggrund af den aktuelle koncentration ved prøvetagningstidspunktet beregnes den mængde luft, der skal opsamles på kulrørerne i hvert enkelt punkt, se TABEL 2.

TABEL 2. Eksempel på feltjournal for prøvetagning til stofs specifik isotopanalyse

| Prøve            | PCE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Ønsket masse (ng) | Luftmængde ved prøvetagning (l) | Usikkerhedsfaktor | Ny luftmængde ved prøvetagning (l) | Praktisk prøvemængde (ml) | Flow (l/min) | Tid for prøvetagning (min) | Praktisk tid for prøvetagning (min) | Tid for prøvetagning (timer) | Praktisk tid for prøvetagning (timer) | Antal sorptionsrør (Supeico) |
|------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| H                | 8,3                              | 100               | 12,05                           | 4                 | 48,19                              |                           | 0,1          | 481,93                     |                                     | 8,032                        | 7                                     | 3                            |
| 11               | 9,3                              | 100               | 10,75                           | 4                 | 43,01                              |                           | 0,1          | 430,11                     |                                     | 7,17                         | 7                                     | 3                            |
| I/L              | 15                               | 100               | 6,67                            | 4                 | 26,67                              |                           | 0,1          | 266,67                     |                                     | 4,44                         | 5                                     | 3                            |
| 12               | 4,3                              | 100               | 23,26                           | 4                 | 93,02                              |                           | 0,1          | 930,23                     |                                     | 15,50                        | 16                                    | 3                            |
| 15               | 100                              | 2250              | 22,5                            | 0,5               | 11,25                              |                           | 0,1          | 112,5                      |                                     | 1,88                         | 2                                     | 3                            |
| Indeluft renseri | 1400                             | 2250              | 1,61                            | 0,5               | 0,80                               |                           | 0,1          | 8,04                       | 10                                  | 0,13                         |                                       | 3                            |
| PL122            | 61000                            | 2250              | 0,037                           | 0,5               | 0,018                              | 20                        | 0,1          | 0,18                       |                                     | 0,0031                       |                                       | 3                            |
| PL121            | 100000                           | 2250              | 0,023                           | 0,5               | 0,011                              | 10                        | 0,1          | 0,11                       |                                     | 0,0019                       |                                       | 3                            |
| PL134            | 48000                            | 2250              | 0,047                           | 0,5               | 0,023                              | 20                        | 0,1          | 0,23                       |                                     | 0,0039                       |                                       | 3                            |

Prøvetagningen planlægges på baggrund af intervallet for masse på kulrørerne, se TABEL 1. Af TABEL 2, fremgår et eksempel på en feltjournal udfyldt i forbindelse med udtagning af prøver til stofs specifik isotopanalyse. Tabellen indeholder den aktuelle koncentration af det specifikke stof, for hvilket der ønskes udført stofs specifik isotopanalyse, beregning af luftmængde ved prøvetagning/tid for prøvetagning. Ved lave koncentrationer i prøvetagningsluften ( $<100 \mu\text{g PCE}/\text{m}^3$ ) tages udgangspunkt i den lavest mulige masse på kulrøret, og der ganges med

en usikkerhedsfaktor på 4 for at tage forbehold for eventuelle udsving i den aktuelle forureningssituation. Ved høje koncentrationer tages udgangspunkt i den højeste mulige masse på kulrøret og der ganges med en usikkerhedsfaktor på 0,5. Herefter vurderes det, om prøven kan udtages med pumper (Tid for prøvetagning >5 min), eller om luftmængden ved prøvetagning er så lav, at prøvetagningen skal udføres med sprøjte. Af eksemplet ovenfor ses det, at prøverne udtaget i indeluften i boligerne (H, 11, I/L, 12 og 15) med fordel kan udtages med pumper, og at pumperne skal køre i "timer", prøven udtaget i det aktive renseri (indeluft renseri), skal udtages med en oppumpningstid på 10 minutter og luftmængden til prøverne fra kildeområdet under gulv (PL122, PL121, PL134) er så lav, at det anbefales at udtage prøverne ved hjælp af sprøjter. Den specifikke prøveopstilling beskrives i nedenstående afsnit.

### **3.2.1 Lave koncentrationer**

Ved lave koncentrationer kan prøverne udtages som almindelige kulrørprøver, ved brug af poreluftpumper. Det anbefales, at bruge pumper med et stabilt flow og med mulighed for indstilling af tiden for prøvetagning, da det er essentielt for en succesfuld prøvetagning, at den luft der gennemløber kulrøret er korrekt. Der skal bruges tre til fire pumper ved hvert prøvetagningspunkt, således at hvert kulrør (1 stk til koncentrationsanalyse og 2 eller 3 til stofspecifik isotopanalyse) kan tilkobles sin egen pumpe, og prøverne udtages over den samme tidsperiode. Hvis koncentrationen er så lav, at der skal prøvetages mere end 10 liter luft, anbefales det, at der indsættes et ekstra kulrør lige inden pumpen, til kontrol af eventuelt gennembrud /21/. Dette kulrør sendes til analyse hos et almindeligt analyseinstitut, da formålet udelukkende er en verificering af prøvens egnethed. Dette vil have særlig betydning på lokaliteter med en høj koncentration af stoffer, som ikke indgår i den stofspecifik isotopanalyse, da disse vil binde sig til sorptionsmaterialet, hvorved der ikke er "plads" til de relevante stoffer. Dette kan ofte være tilfældet for stofspecifik isotopanalyse i forbindelse med benzen.

#### **3.2.1.1 Indeluft**

Ved prøvetagning af indeluft ved lave koncentrationer, prøvetages der ved at montere det ønskede antal kulrør til hver sin pumpe, se FIGUR 5. Pumperne startes simultant og det ønskede luftvolumen optages på kulrørene ved et flow på 0,1 liter pr. minut. Kulrørene placeres således, at de opsuger luft fra det samme område og gerne omkring 1,5 meter over gulv.



**FIGUR 5.** Prøvetagning af indeluft ved lave koncentrationer.

### 3.2.1.2 Poreluft

Ved prøvetagning af poreluft ved lave koncentrationer prøvetages ved at etablere et prøvetagningspunkt. Herefter renpumpes i to minutter, hvorefter en slange føres fra prøvetagningspunktet til de fire kulrør ved brug af Y-stykker, således at luftstrømmen fordeles til de tre/fire kulrør, se FIGUR 6. Hvert kulrør skal tilknyttes sin egen pumpe og der bør indsættes kontra-ventiler mellem kulrør og pumpe. Pumperne startes simultant og det ønskede luftvolumen optages på kulrørene ved et flow på 0,1 liter pr. minut.



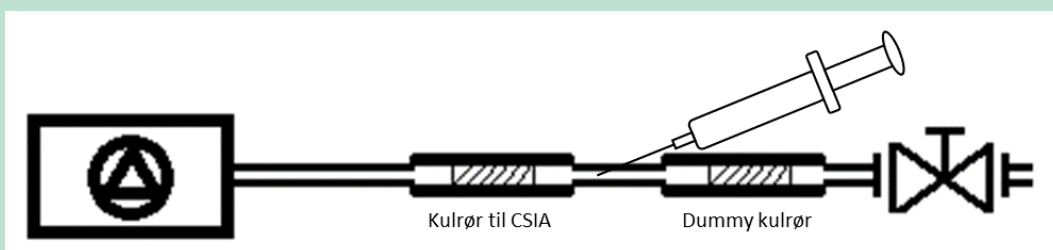


**FIGUR 6.** Prøvetagning af poreluft ved lave koncentrationer. Til højre ses kontraventil som bør placeres mellem kulrør og pumpe.

### 3.2.2 Høje koncentrationer

Ved høje forureningskoncentrationer er det ikke muligt at udtage prøverne som almindelige kulrørsprøver. Dette skyldes, at den samlede luftmængde, der skal gennemløbe kulrørerne, er så lav, at det ikke er muligt at justere en pumpe korrekt. Prøverne udtages i stedet ved brug af gastætte sprøjter, hvorfra den ønskede luftmængde overføres til kulrørerne.

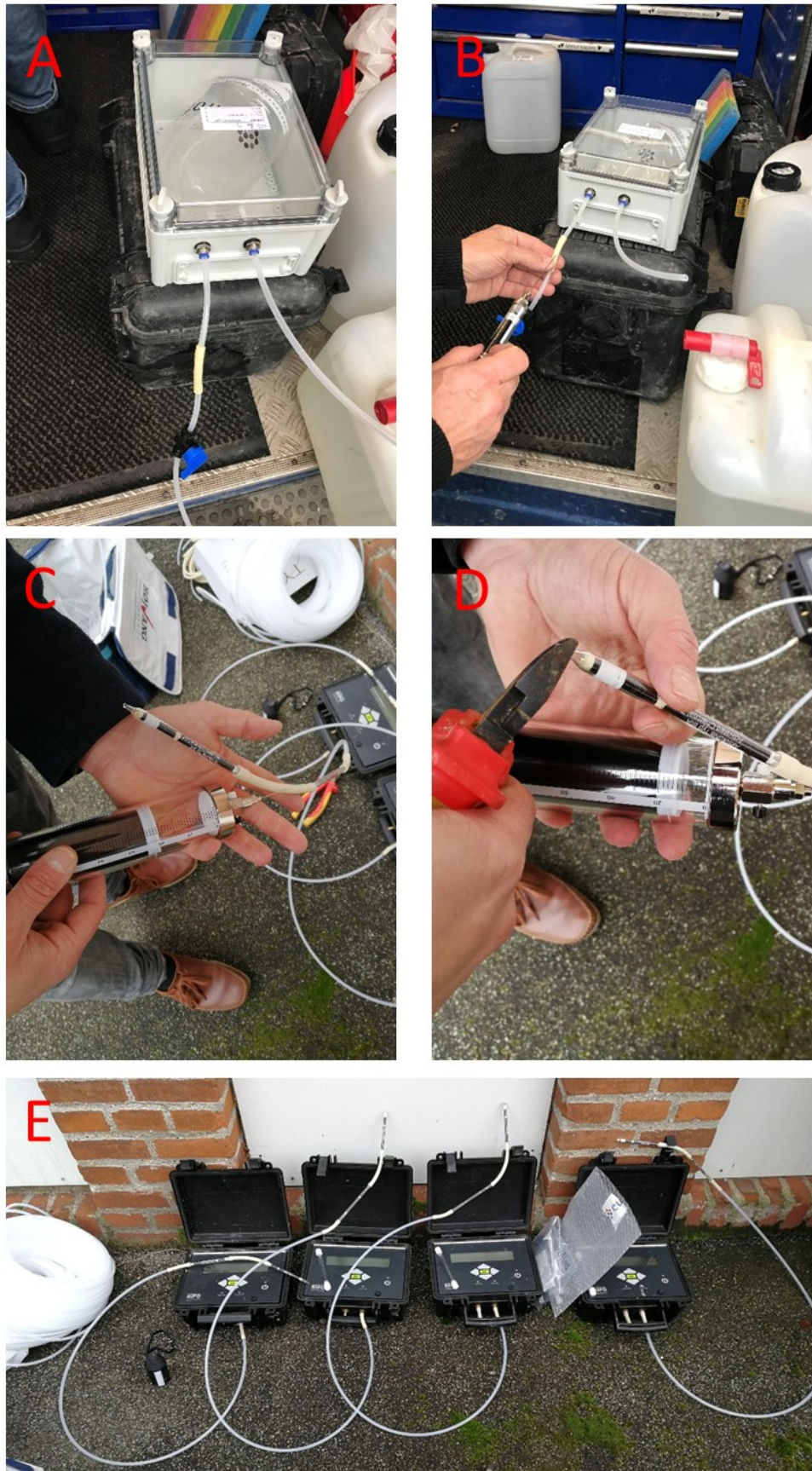
Der udtages, ved brug af et vakuum-kammer, en luftprøve fra prøvetagningsstedet i en gastæt pose (f.eks. Tedlarback eller rilsanpose), se billede A i FIGUR 8. Ved poreluftprøver bør der, efter etablering af prøvetagningspunkt, forpumpes omkring 2 liter, inden udtagning af prøven. Herefter bestemmes forureningskoncentrationen i det opsamlede luft ved brug af felt-GC, og den endelige mængde luft, der skal overføres til kulrørerne beregnes.



**FIGUR 7.** Opstilling til overførsel af luftprøve fra gastæt sprøjte til kulrør.

Herefter udtages den beregnede mængde luft fra posen til en gastæt sprøjte, se billede B i FIGUR 8. Fra sprøjten overføres luftprøven til et kulrør, se figur C i FIGUR 8. Overførslen kan udføres ved den opstilling som fremgår af FIGUR 7. En pumpe, indstillet til et flow på 0,1 l/min

kobles til to kulrør i serie. Det andet kulrør skal ikke åbnes i den ende der er længst væk fra pumpen. Det kulrør nærmest pumpen er prøvetagningsrøret hvortil forureningen skal overføres. Dette gøres gennem en fleksibel gummislange monteret mellem de to kulrør, ved at føre kanylen med luftprøven ind i gummislangen og tænde for pumpen. Når undertrykket i systemet bliver højt nok, vil prøvetagningsluften stille og roligt blive trukket ud af sprøjten og igennem prøvetagningsrøret. Når hele luftprøven er overført og sprøjten er tom, åbnes det bagerste kulrør, se billede D i FIGUR 8, og der pumpes fortsat i 20 minutter, således at der tilføres 2 L ren luft til prøvetagningsrøret. Herved trækkes forureningen længere ind på kullene. Det bagerste kulrør er et dummy-rør, der bruges til at sikre, at der ikke overføres anden forurening til prøvetagningsrøret. Fra den samme luftprøve (pose) udtages herefter luft til andet, tredje og evt. fjerde prøvetagningsrør. Af billede E i FIGUR 8 ses opstillingen af fire pumper med prøvetagningsrør og dummy-rør hvor der tilføres ren luft til prøvetagningsrørene.



FIGUR 8. Billeder fra prøvetagning ved høje forureningskoncentrationer.

### 3.2.3 Observationer og læringspunkter

Nedenfor beskrives observationer og læringspunkter fra udviklingen af prøvetagningen og mulige ændringer/forbedringer nævnes.

#### **Forureningskoncentrationen i de enkelte målepunkter er meget uforudsigelig**

I projektets første prøvetagningsrunde blev der ikke anvendt felt-GC. Prøverne blev udtaget på meget velundersøgte lokaliteter med op til 3 prøvetagningsrunder af både indeluft og poreluft, hvorfor mængden af luft til prøvetagning, blev beregnet ud fra de tidligere påviste koncentrationer. Det viste sig efterfølgende, at en del af de udtagne prøver ikke kunne analyseres pga. for lidt eller for meget forureningsmasse på kulrørerne. Introduktionen af en felt-GC ved prøvetagningen har gjort prøvetagningen betydeligt bedre.

Ved den ene prøvetagning, skulle der kun udtages et mindre antal prøver. I stedet for at bruge en felt-GC, blev der, på baggrund af koncentrationen ved tidligere prøverunder, vurderet et interval for forureningsniveauet i hvert prøvepunkt. Der blev herefter udtaget tre prøver af luft fra det samme prøvepunkt, med forskellig luftmængde ført igennem de tre prøver. Efter analyse af forureningskoncentrationen ved almindeligt laboratorium, kunne det vurderes, hvilken af prøverne der passede bedst med det ønskede interval for forureningsmasse. Denne prøve blev herefter analyseret ved stofs specifik isotopanalyse. Denne fremgangsmåde fungerer godt, og man er meget sikker på at få gode resultater. Man skal dog holde styr på et betydeligt antal kulrør, i det der skal bruges 3 eller fire rør per prøve (i alt 9 eller 12 rør per prøvepunkt). Disse rør er dyre, og der er derfor som oftest ikke et ubegrænset antal rør til rådighed. Endelig må det også forventes, at der fra laboratoriets side tages penge for at rense de ekstra rør, som ikke skal analyseres.

#### **Forureningskoncentrationen i en luftstrøm varierer betydeligt**

I projektets første prøvetagningsrunde er luftprøverne ved høje koncentrationer udtaget uden opsamling på pose. I denne prøverunde er der ved brug af en pumpe, etableret en luftstrøm fra prøvetagningspunktet gennem en plastslange. Luftprøverne er udtaget ved at trække luft fra denne luftstrøm og ind på en gastæt sprøjte, hvorfra luften er overført til prøvetagningsrøret. Herefter er endnu en luftprøve udtaget af luftstrømmen mellem prøvetagningspunktet og pumpen. Denne metode førte til store udsving i forureningsmassen på de fire prøvetagningsrør, der således havde en afvigelse på over 30%, hvilket vanskeliggjorde analysearbejdet. Problematikken blev afhjulpet ved at opsamle en luftmængde i en pose ved brug af et vakuumkammer og herudfra udtage prøver til overførsel på prøvetagningsrørerne.

#### **Kulrør, Summa canisters eller overførsel til et opløsningsmiddel**

I dette projekt er prøver til stofs specifik isotopanalyse udtaget på kulrør. Kulrørerne har den fordel at man kan koncentrere forureningen, således at man får en bestemt forureningsmasse sendt til analyse. Kulrørerne er lette og billige at transportere /2, 22/. Desuden ligner denne form for prøvetagning de gængse metoder til prøvetagning af luft i Danmark.

Det er dog også muligt at udtage prøver til stofs specifik isotopanalyse ved at overføre forureningsstoffet til et opløsningsmiddel. Dette gøres ved at boble luft fra prøvepunktet igennem en vaskeflaske med et opløsningsmiddel f.eks. metanol /20, 21/. Denne metode har den store fordel, at der er en større sikkerhed for, at der ikke sker isotopfraktionering i forbindelse med prøvetagningen. Desuden er prøvetagningsudstyret billigere end de meget dyre kulrør. Endelig er der ikke de samme krav til mængden af forureningsmasse i prøven. Ulemperne ved denne metode er, at selve opstillingen til prøveudtagningen ikke er en hyldevare og at transporten af prøverne til laboratoriet vanskeliggøres, i det der er tale om glasflasker med væske.

Endelig kan prøverne udtages som en urørt luftprøve i f.eks. en Summa canister. Denne prøvetagning er meget simpel, i det luft ved hjælp af trykforskel trækkes fra prøvepunktet og ind i

canisteren. Canisteren lukkes og kan herefter sendes til analyse. Der er ingen risiko for at isotopsammensætningen ændres ved prøvetagningen. Det kan være et problem, at forureningskoncentrationen i prøvepunktet er for lav til at der opsamles nok masse i canisteren til at udføre stofs specifik isotopanalyse /2, 22/. Der er ikke tradition for brugen af canisters i Danmark, og det er på nuværende tidspunkt ikke muligt at skaffe disse inden for landets grænser. Transporten af et betydeligt antal canisters til analyselaboratoriet er vanskeligere og mere bekosteligt end for kulrør.

### 3.3 Analyaselaboratorier, stofs specifik isotopanalyse

Der er, til forfatternes kendskab, kun et analyselaboratorium der i øjeblikket på kommerciel basis kan udføre stofs specifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  og  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  på luftprøver. Der er adskillige laboratorier i både Europa og USA, der udfører denne form for analyser på vand, men metoden til analyse af luftprøver har endnu ikke vundet indpas i samme grad.

I forbindelse med dette projekt, er der taget kontakt til de tre største analyselaboratorier, der arbejder i Danmark, fem analyselaboratorier herunder universitetslaboratorier i Europa, et universitet i Canada og endelig et i USA. Af de adspurgte laboratorier er to ikke vendt tilbage på henvendelsen. Af de resterende er det kun University of Oklahoma der på kommerciel basis kan udføre stofs specifik isotopanalyse på luftprøver. For kontaklinformationer og priser, se TABEL 3.

Det ene af de danske laboratorier, ville kunne udføre analysen, hvis de investerede i nyt maskineri. Det ene af de Europæiske universitetslaboratorier kan udføre analysen på forskningsniveau men ikke kommercielt. Fra de resterende laboratorier er der ingen positiv tilkendegivelse af muligheden for at få udført stofs specifik isotopanalyse. Af bilag 2 fremgår en oversigt over de analyselaboratorier der er kontaktet, samt deres svar på forespørgslen.

**TABEL 3.** Laboratorium der udfører stofs specifik isotopanalyse på luftprøver på kommerciel basis, samt pris for analysen.

| University of Oklahoma service laboratory                              | Email   | Stofs specifik isotopanalyse på luftprøve | Pris per prøvepunkt |
|--|---|---|---------------------|
| University of Oklahoma, Geology department<br>100E. Boyd St: Room A710 | Dr. Paul Philp:<br><a href="mailto:pphilp@ou.edu">pphilp@ou.edu</a>   | $\delta^{13}\text{C}$                     | \$500               |
| Norman OK 73019<br>USA   | Dr. Tomasz Kuder:<br><a href="mailto:tkuder@ou.edu">tkuder@ou.edu</a> | $\delta^{37}\text{Cl}$                    | \$450               |
|  |   | Kulrør<br>(Leje)                          | \$20                |

Prisen for stofs specifik isotopanalyse afhænger af hvilke isotoper der skal analyseres. I forbindelse med analyse af kulstof er det nødvendigt at udføre en screening af prøvematrixen, for at bestemme antallet af komponenter i prøven. Isotopanalysen for kulstof er derfor dyrere end for chlorid. Endelig er det muligt, for et mindre beløb, at låne kulrør til stofs specifik isotopanalyse af analyseinstituttet (University of Oklahoma), således at kulrørerne lever op til kravene til sorptionsmaterialer og dimensioner.

### 3.4 Prøver til fingerprinting

For at bruge fingerprinting til skelnen mellem kilder til indeklimateforurening skal der udtages luftprøver af henholdsvis indeluft, poreluft under gulv og eventuelt den interne kilde. I hvert målepunkt udtages prøver til analyse for kulbrinter ved akkrediteret analyseinstitut.

Luftprøverne udtages på samme måde, som ved en hver anden forureningsundersøgelse, f.eks. på ORSA-rør og/eller kulrør. Prøverne udtages som beskrevet af analyselaboratoriet, således at prøvetagningen følger retningslinjer for prøver til analyse for kulbrinter.

Analyselaboratoriet skal gøres opmærksom på, at der ud over standardanalysen for kulbrinter, også ønskes en vurdering af indholdet og navngivning af de største peaks i chromatogrammerne. Desuden skal chromatogrammerne fra de indsendte prøver rekvireres fra laboratoriet.

### 3.5 Analyselaboratorier, Fingerprinting

Chromatogrammer og bestemmelse af de højeste peaks bør kunne udleveres af alle akkrediterede analyseinstitutter.

Prisen for bestemmelse af de største peaks i chromatogrammerne, afhænger af antallet af peaks. I nedenstående TABEL 4, ses prisen for bestemmelse af de ti højeste peaks hos henholdsvis University of Oklahoma service laboratory, som har udført analysen i forbindelse med dette projekt, samt det danske analyseinstitut Eurofins. Det skal bemærkes, at prisen hos University of Oklahoma service laboratory er en del af en større ydelse, som også indbefattede et betydeligt antal stofs specifikke isotopanalyser. Hvor vidt prisen vil være den samme, hvis der udelukkende ønskes udført fingerprinting vides ikke.

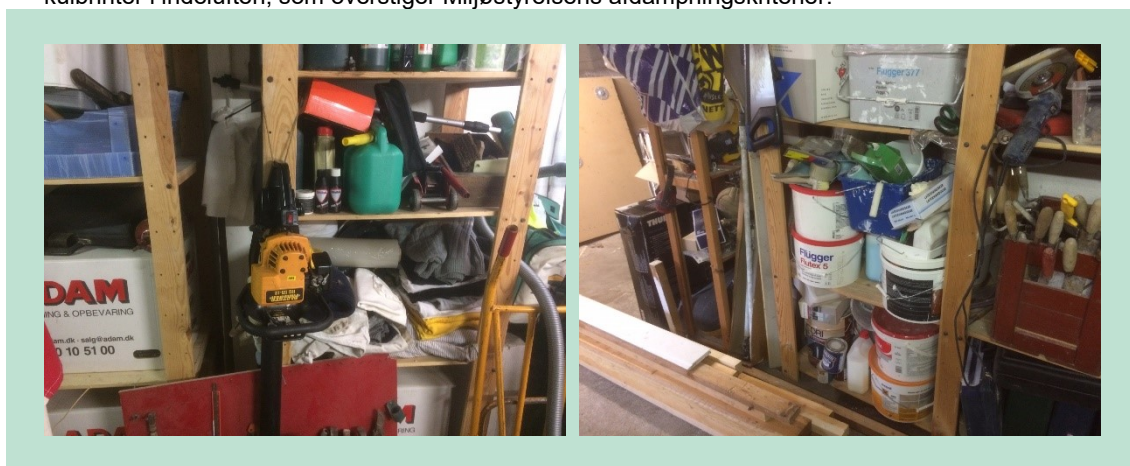
**TABEL 4.** Analyselaboratorier og pris for analyser af chromatogrammer til fingerprinting.

| Analyselaboratorium                       | Pris       |
|---|------------|
| University of Oklahoma service laboratory | \$ 100     |
| Eurofins                                  | D.kr 3.500 |

## 4. Gladsaxevej

### 4.1 Lokalteten kort, Gladsaxevej

Forureningsundersøgelserne på Gladsaxevej er udført i en villa i tre etager. Nederst findes en høj kælder. Der er nedkørsel til kælderen udefra. I kælderen er der desuden en smøregrav. Smøregraven er ikke i drift og er derfor overdækket. Der er i forbindelse med tidligere forureningsundersøgelser, påvist indhold af olieprodukter i jord og poreluft omkring smøregraven. I kælderen er der oplag af diverse kemikalier, benzindunke til påfyldning af haveredskaber, smøreolier og malinger. Der er desuden opbevaring af haveredskaber, rengøringsremedier osv. I nedenstående FIGUR 9 ses billeder fra kælderen. I stueetagen og på 1. sal er der beboelse. Der er tidligere udført indeluftmålinger i beboelse og kælder, hvor der er påvist indhold af kulbrinter i indeluften, som overstiger Miljøstyrelsens afdampningskriterier.



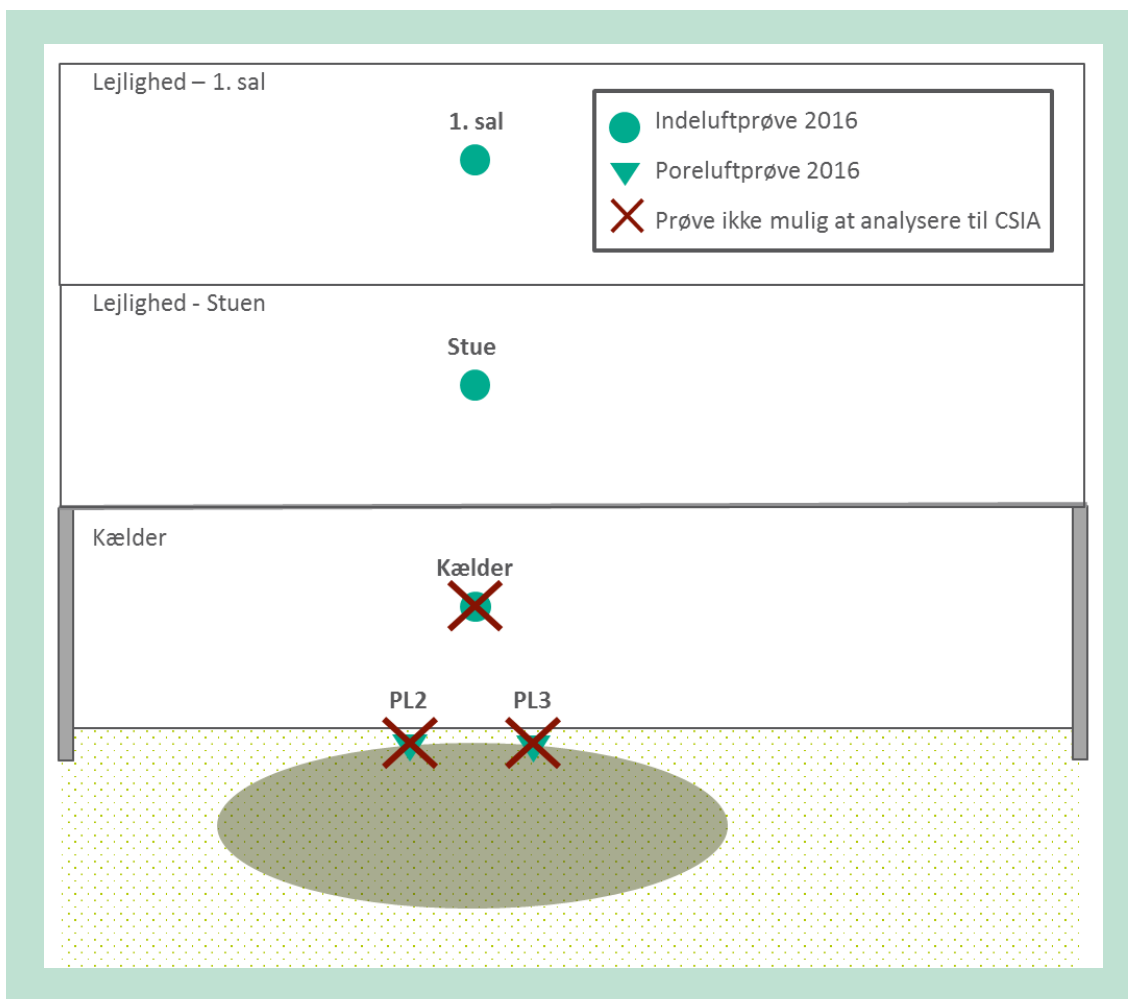
FIGUR 9. Billeder fra kælderen på Gladsaxevej.

Der er udført stofspecifikke isotopanalyser og fingerprinting med det formål, at bestemme et eventuelt bidrag af oliestoffer til indeluften fra ikke definerede interne kilder i bygningen.

### 4.2 Udført arbejde, Gladsaxevej

Der er i efteråret 2016 udtaget fem luftprøver (smøreolie m.m.) til henholdsvis stofspecifik isotopanalyse på benzen og fingerprinting. De to prøver er udtaget under kældergulv i kildeområdet. De tre prøver er udtaget i indeluften i henholdsvis kælder, stue og på 1. sal.

I FIGUR 10 ses en rummelig præsentation af de punkter, hvor der er udtaget prøver til stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting. For de prøver, der er markeret med et rødt kryds, er der ikke udført stofspecifik isotopanalyse, da der var et for højt indhold af andre komponenter end benzen. Dette gjorde det ikke muligt at adskille isotopsammensætningen for benzen fra de resterende komponenter. Der er udført fingerprinting på alle fem prøver.



**FIGUR 10.** Rummelig præsentation af placeringen af prøver udtaget til stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting på Gladsaxevej.

### 4.3 Resultater og vurderinger, Gladsaxevej

I nedenstående afsnit præsenteres resultaterne for henholdsvis forureningskoncentrationer, stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting.

#### 4.3.1 Forureningskoncentrationer TVOC og benzen

De påviste indhold af TVOC og benzen i de fem prøvepunkter er præsenteret i TABEL 5. Prøverne er udtaget i forbindelse med udtagning af prøver til stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting. Luftmængden opsamlet på kulrørerne varierer betydeligt pga. begrænsningerne for luftprøver til stofs specifik isotopanalyse, se afsnit 3.1. Detektionsgrænserne er således forskellige, og i flere tilfælde meget høje, da der er en direkte sammenhæng mellem luftvolumen og detektionsgrænse. Det har således ikke været muligt for analyselaboratoriet at give en eksakt værdi for indholdet af TVOC for prøverne udtaget i indeluften eller for benzen i kælderen og i PL3.



**TABEL 5.** Forureningskoncentrationer for TVOC og benzen i de fem prøvepunkter. Bemærk at det opsamlede luftvolumen og derved detektionsgrænsen varierer for de fem prøver.

| Prøvested | TVOC    | Benzen  | Luftvolumen |
|-----------|---------|---------|-------------|
| 1. sal    | < 130   | 1,4     | 78          |
| Stue      | < 240   | 3,4     | 42          |
| Kælder    | < 560   | < 0,28  | 18          |
| PL2       | 540.000 | 18      | 90          |
| PL3       | 160     | < 0,069 | 72          |

Som det fremgår af TABEL 5, er indholdet af TVOC og benzen højest i poreluftpunkt PL2. Der er ikke påvist væsentlige indhold af benzen i PL3 og indholdet af TVOC er også begrænset. Denne prøve vurderes således ikke at være udtaget i kildeområdet. Indholdet af benzen er ligeledes meget lavt i kælder, hvorimod indholdet på 1. sal og i stueetagen er højere end det almindelige baggrundniveau i udeluft i Danmark /29/.

#### 4.3.2 Stofspecifik isotopanalyse

Resultaterne af de stofspecifikke isotopanalyser for kulstof-atomerne i benzen fremgår af nedenstående TABEL 6. Af tabellen kan man se en beskrivelse af prøvestedet samt prøvens navn. Herefter ses resultatet som en delnotation der repræsenterer isotopsammensætningen i kulrørprøven. I nogle tilfælde er der udført flere analyser i samme punkt. Der er i så fald udregnet et gennemsnit over prøveresultaterne, se kolonnen middel C. Bemærk at der kun præsenteres data fra de prøver, det var muligt at analysere.

**TABEL 6.** Resultater af stofspecifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  på Gladsaxevej.

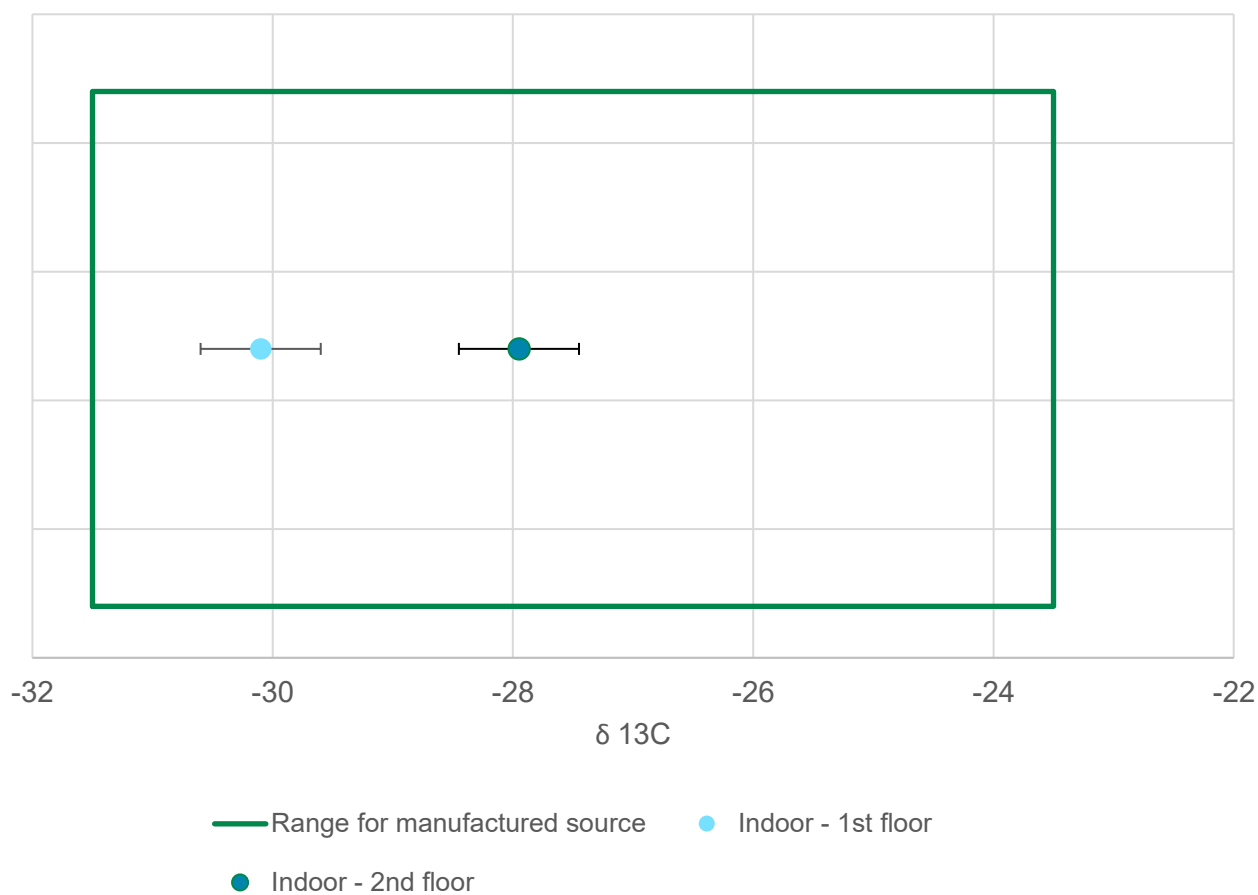
| Prøvested          | Prøve    | Delta $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ | Middel C | Kommentar |
|--------------------|----------|-------------------------------------|----------|-----------|
| Indoor - 2nd floor | 1. SAL A | -27,9                               | -27,95   |           |
|                    |          | -28,0                               |          |           |
| Indoor - 1st floor | Stue A   | -30,1                               | -30,1    |           |

Isotopsammensætningen for hvert prøvepunkt er i FIGUR 11 præsenteret i et diagram med  $\delta^{13}\text{C}$  hen af x-aksen. Den grønne firkant markerer området for isotopsignaturen for ikke omdannet benzen. For hvert prøvepunkt er analyseusikkerheden ( $\pm 0,5$  for  $\delta^{13}\text{C}$ ) markeret.

De runde markeringer i FIGUR 11 viser isotopsignaturen for benzen i indeluften på 1. og 2. sal. Der er mere end 2‰ forskel på isotopsammensætningen i de to prøver. Prøverne er således signifikant forskellige hvilket indikerer at benzen i indeluften på 1. og 2. sal har forskellig oprindelse. Isotopsignaturen for begge prøver ligger langt inde i området for ikke omdannet benzen. Dette indikerer, at den benzen, der påvises i indeluften, ikke stammer fra en jordforurening men derimod fra interne kilder.

Det har ikke været muligt, at udføre analyse på prøverne udtaget under gulv, hvorfor det ikke er muligt at sammenholde isotopsignaturen for benzen i oliekomponenterne fra kildeområdet med isotopsignaturen for benzen i indeklimaet.

# Gladsaxevej



**FIGUR 11.** Plot af isotopfraktionen (delta 13C på x-aksen) for hvert prøvepunkt. Desuden markering af området for isotopfraktionen af nyligt produceret benzen. De runde markeringer viser isotopfraktionen i indeklimaet.

### 4.3.3 Fingerprinting

Chromatogrammerne for kulbrinteanalyserne af de udtagne prøver på Gladsaxevej fremgår af FIGUR 12, FIGUR 13, FIGUR 14, FIGUR 15, FIGUR 16 og FIGUR 17. Bemærk at der er en væsentlig forskel i signalet for enkeltstofferne i de enkelte prøver. Generelt påvises der højest udslag (højest indhold) i prøven udtaget i poreluften i punktet PL2 (op til omkring  $27 \cdot 10^6$  i TIC (Total Ion Scan)). Der er påvist op til omkring  $5 \cdot 10^6$  i TIC i indeluften i kælderen og på 1. salen. Der er påvist omkring det halve i stueetagen. Det laveste signal på op til omkring 70.000 er påvist i poreluftpunktet PL3. Det skal bemærkes, at signalet ikke er et direkte udtryk, men kun en indikator for koncentrationen, da TIC responset ikke er ens for de forskellige stoffer. I de tilfælde hvor de enkelte navngivne stoffer sammenlignes er TIC et udtryk for den relative koncentration.

Af TABEL 8 fremgår det specifikke stof for hver af de højeste peaks i chromatogrammerne. Stofferne er listet i forhold til det tidspunkt, hvor signalet registreres i GC-ens detektor. Det er således muligt, at sammenholde signaler fra de fem prøver. Bruttolisten over de registrerede stoffer, som kan sammenholdes med numrene på peaks i chromatogrammerne kan ses af bilag 3. Numrene svarer således ikke til de samme stoffer i de 5 chromatogrammer.

Det ses af chromatogrammerne fra indeluftprøverne, FIGUR 12, FIGUR 13 og FIGUR 14, at de ved første øjekast har omtrent samme udtryk. Særligt ses en række af sammenhængende toppe, som bliver til et samlet signal i perioden 29 til 33 minutter. Der er tre markante peaks i denne periode svarende til tetradecan, pentadecan og hexadecan, se TABEL 8. Dette signal vurderes at stamme fra en gasolie. I prøven udtaget fra poreluften i punktet PL2 ses sammenhængende toppe i perioden 31 til 33 minutter med de højeste peaks svarende til heptadecan, pristan og phytan, se FIGUR 16 og TABEL 8. Dette vurderes ligeledes at være en gasolie. Det påviste indhold af gasolie i indeluften kan skyldes afdampning af de letteste komponenter i gasolien fra jordforureningen. At de lettere komponenter ses i indeluften kan skyldes diffusiv transport igennem betondæk, da stoffer med en mindre molekylestruktur "lettere" kan diffundere igennem betonen. Alternativt at det er en intern kilde der bidrager.

Chromatogrammet for poreluftprøven udtaget i PL2 er karakteriseret ved sammenhængende toppe i perioden fra 21 til 28 minutter, se FIGUR 16. Det samlede areal under toppene tyder på et væsentligt indhold. I FIGUR 17 er der zoomet ind på denne del af chromatogrammet, for bedre at kunne adskille de højeste peaks. Overordnet er der tale om et indhold af C3- og C4-benzen, se TABEL 8, svarende til et opløsningsmiddel som f.eks. solvesso, shellsol, petroleum eller terpentiner. Der er desuden påvist indhold af xylener i poreluftprøven fra PL2, se TABEL 8.

Der er i indeluftprøverne registreret mindre toppe, der karakteriseres som C3-benzen, se TABEL 8. Særligt for prøven udtaget af indeluften i kælderen viser chromatogrammet indhold svarende til opløsningsmidler. Det er således sandsynligt, at der er et bidrag af kulbrinter fra jordforureningen omkring poreluftpunkt PL2 til indeluften i kælderen.

I indeluften i kælderen ses også betydelige peaks for toluen og o-xylen, se FIGUR 14 og TABEL 8. I prøverne udtaget i stueetagen og på 1. sal påvises de samme stoffer, med omtrent samme signalstyrke, FIGUR 12, FIGUR 13 og TABEL 8. Xylen påvises med et væsentligt højere udslag i poreluftpunkt PL2, men her er ikke registreret indhold af toluen, se FIGUR 17 og TABEL 8. I poreluften udtaget i punktet PL3, er der peaks for både toluen og xylen, men udslaget er lavere end i indeluften, se FIGUR 15 og TABEL 8. Toluen og xylen kan stamme fra benzin. Benzin kan med stor sandsynlighed stamme fra en intern kilde i kælderen, idet der ved udtagning af prøverne blev registreret opbevaring af benzindunke og smørelolie i kælderen. Det vurderes, at i hvert fald en del af det påviste indhold med toluen og xylen i indeluften stammer fra interne kilder i kælderen. Hvor vidt der også er et bidrag til indeklimaet fra jordforureningen kan ikke afvises.

I chromatogrammerne for prøverne udtaget i beboelsen i stueetagen og på 1. sal er der flere toppe med væsentlige udslag fra kulbrinterne  $\alpha$ -pinen, caren, cymen og limonen, se FIGUR 12, FIGUR 13 og TABEL 8. Disse stoffer er ikke forbundet med en typisk olieforurening med fyringsolie/smøreolie eller benzin. Kulbrinterne kan stamme fra f.eks. nåletræer, duftstoffer fra rengøringsmidler, parfume osv. samt fra tryksager, se TABEL 7. Hvis dette er tilfældet, vurderes det, at en betydelig andel af de påviste kulbrinter i indeluften stammer fra interne kilder i boligen f.eks. produkter til personlig hygiejne, duftfriskere, tryksager eller træmøbler. Caren kan dog også stamme fra terpentiner, limonen kan også stamme fra miljøvenlige alternativer til affedtning af maskindele og cymen kan bruges som additiv til brændstof. I prøven udtaget af poreluften under kældergulvet i punktet PL3, påvises også indhold af  $\alpha$ -pinen, caren og limonen. Det relative indhold (TIC omkring 50.000) i denne prøve er dog 100 gange lavere end i indeluften (TIC fra  $5 \cdot 10^6$  til  $6,5 \cdot 10^6$ ). Det vurderes således ikke sandsynligt, at  $\alpha$ -pinen, caren, cymen og limonen i indeluften stammer fra jordforurening, men i stedet skyldes et bidrag fra interne kilder.

**TABEL 7.** Anvendelse af kulbrinterne  $\alpha$ -pinen, caren, limonen og cymen

#### $\alpha$ - og $\beta$ -Pinen

$\alpha$ -pinen er et stof der findes i de naturlige olier fra mange arter af nåletræer, specielt fyrretræer og afgives derfor fra eksempelvis møbeltræ af fyr. Stoffet kan bruges i farvestoffer til f.eks. tryksager og er blevet lokaliseret som flygtigt stof i forbindelse med f.eks. kataloger /24/.  $\beta$ -pinen er en smagsingrediens og findes f.eks. i lime skræl, ingefær, muskatnød, fennikel, rosmarin og salvie /25/.

#### Caren

Kan indgå i en terpentinblanding med et indhold helt op til 42%. Bruges også til parfume, pga. sin citrusagtige duft /26/. Findes naturligt i fx allehånde krydderi, enebær, fyrmåle og fyrretræ.

#### Limonen

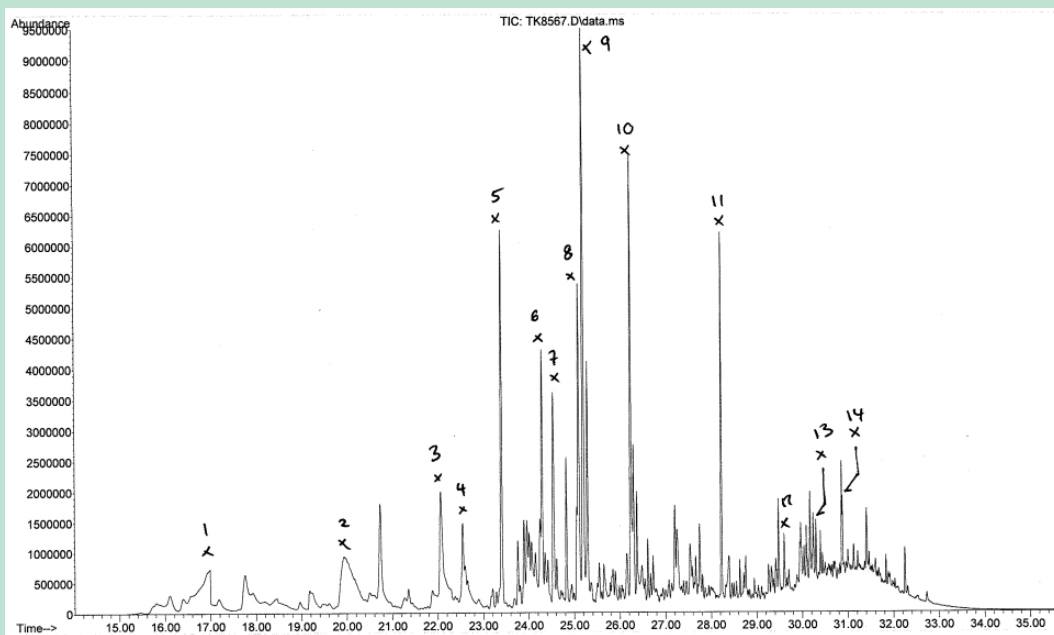
Har en kraftig duft af appelsin og disse frugter har da også et højt indhold af limonen i deres skræl. Denne egenskab udnyttes i fødevarerbranchen, hvor stoffet kan findes i frugtjuice, sodavand, bagværk, is og budding. Stoffet er ligeledes et almindeligt tilsætningsstof til sæber, vaskemidler, rengøringsmidler, parfume og deodoranter /27/. Findes naturligt i bl.a. rosmarin, enebær og forskellige fyrreprodukter. Limonen kan dog også bruges som et miljøvenligt alternativ til mineralolie og kan således bruges som et opløsningsmiddel i forbindelse med f.eks. affedtning af maskindele /27/.

#### Cymen

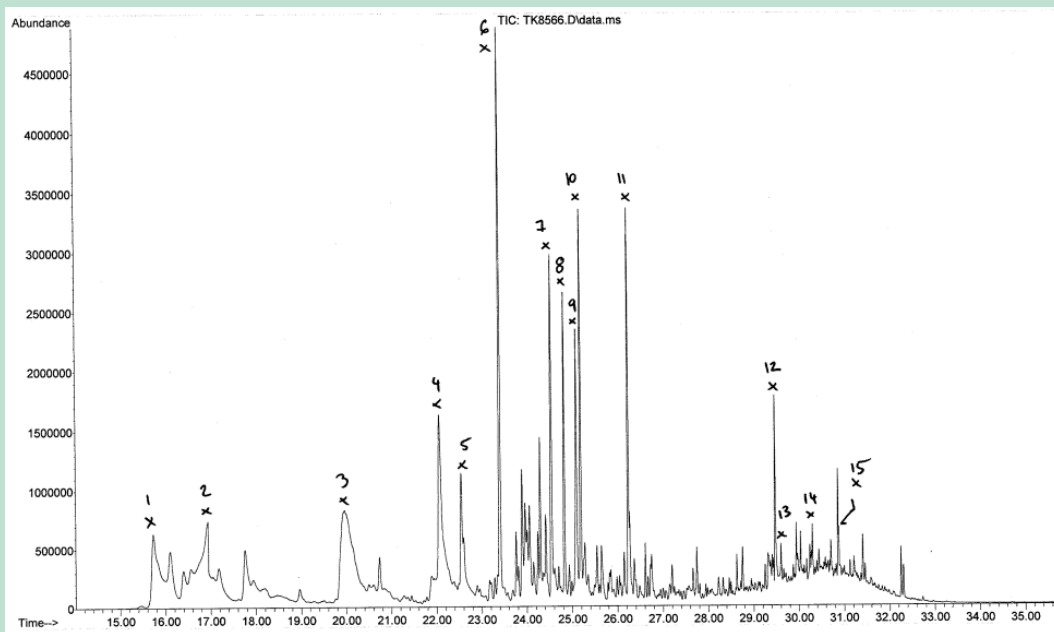
Bruges i industrien som additiv til brændstof. Stoffet bruges ligeledes som tilsætningsstof i fødevarerbranchen, til luftfriskere, rengøringsmidler, vaskepulver, opvaskemiddel og produkter til personlig hygiejne. Stoffet forekommer naturligt i fx timian og kommen /28/.

På baggrund af chromatogrammerne og bestemmelsen af de specifikke stoffer for hver af de højeste peaks i chromatogrammerne, er der således indikationer på følgende:

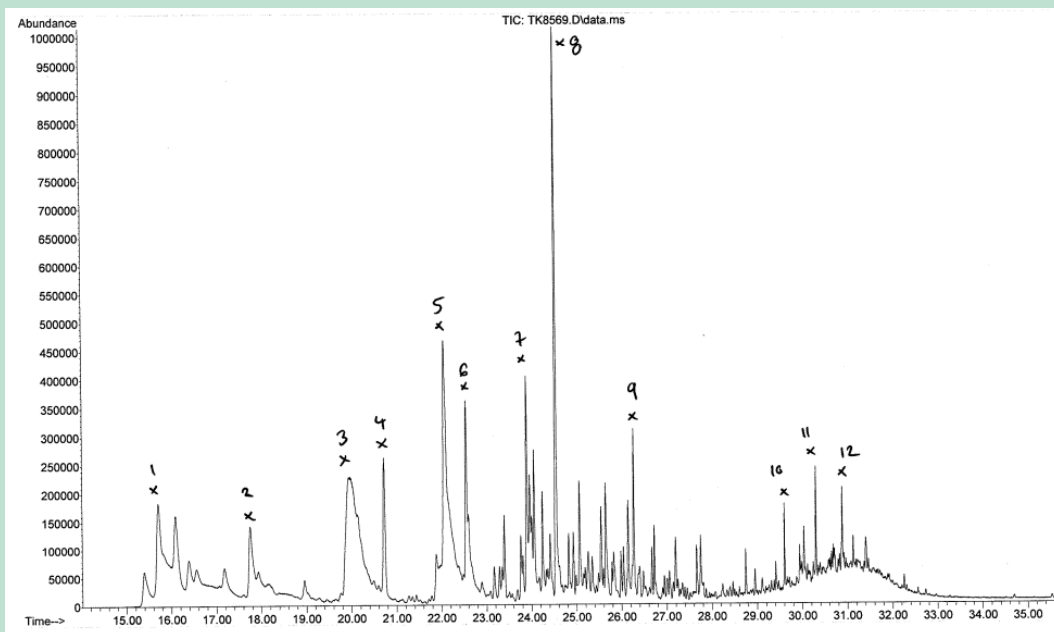
- at indholdet af opløsningsmidler i prøven i kælderen i nogen grad stammer fra indtrængende poreluft til indeluften, men at disse stoffer kun i ringe grad påvirker boligerne i stueetagen og på 1. salen.
- at indholdet af gasolie under gulv ved PL2 muligvis påvirker indeluften i begrænset omfang. Der påvises stoffer, der kan relateres til gasolie i både kælder, stueetage og 1. sal. De påviste stoffer i boligen har dog en mindre molekylestruktur end stofferne påvist under gulv i PL2. Dette kan indikere, at transporten sker ved diffusion over betondækket, eller at der er interne bidrag.
- at i hvert fald en del af det påviste indhold med toluen og xylene i indeluften stammer fra benzindunke (interne kilder) i kælderen. Hvor vidt der også er et mindre bidrag til indeklimaet fra jordforurening kan ikke helt afvises.
- at prøverne udtaget i beboelsen i stueetagen og på 1. sal påvirkes af et væsentligt bidrag fra interne kilder, i det de højeste peaks i chromatogrammerne tyder på indhold af naturlige kulbrinter der kan stamme fra nåletræer, rengøringsmidler, produkter til personlig hygiejne, tryksager osv.



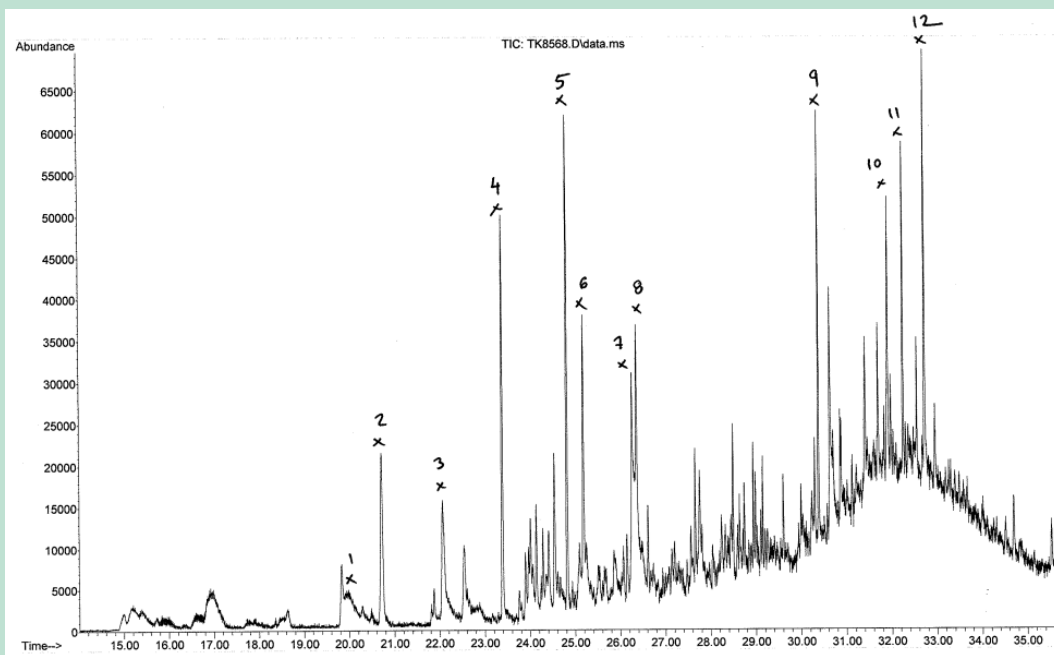
FIGUR 12. Chromatogram for prøve udtaget i indeluften på 1. salen.



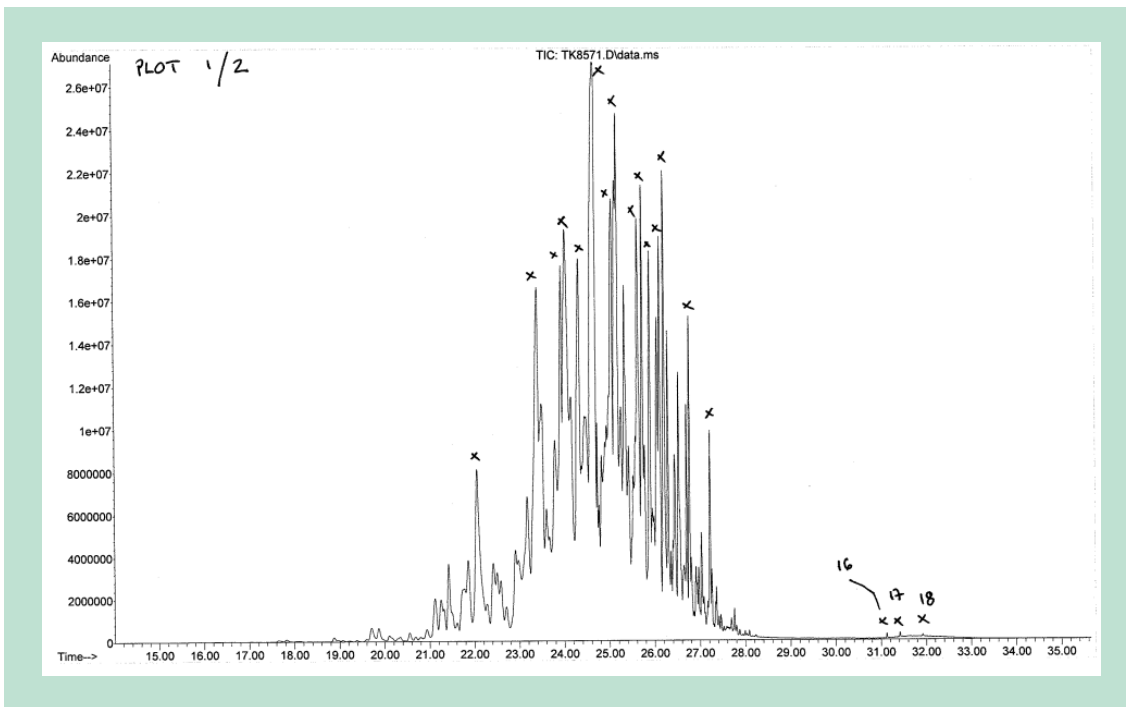
FIGUR 13. Chromatogram for prøve udtaget i indeluften i stueetagen.



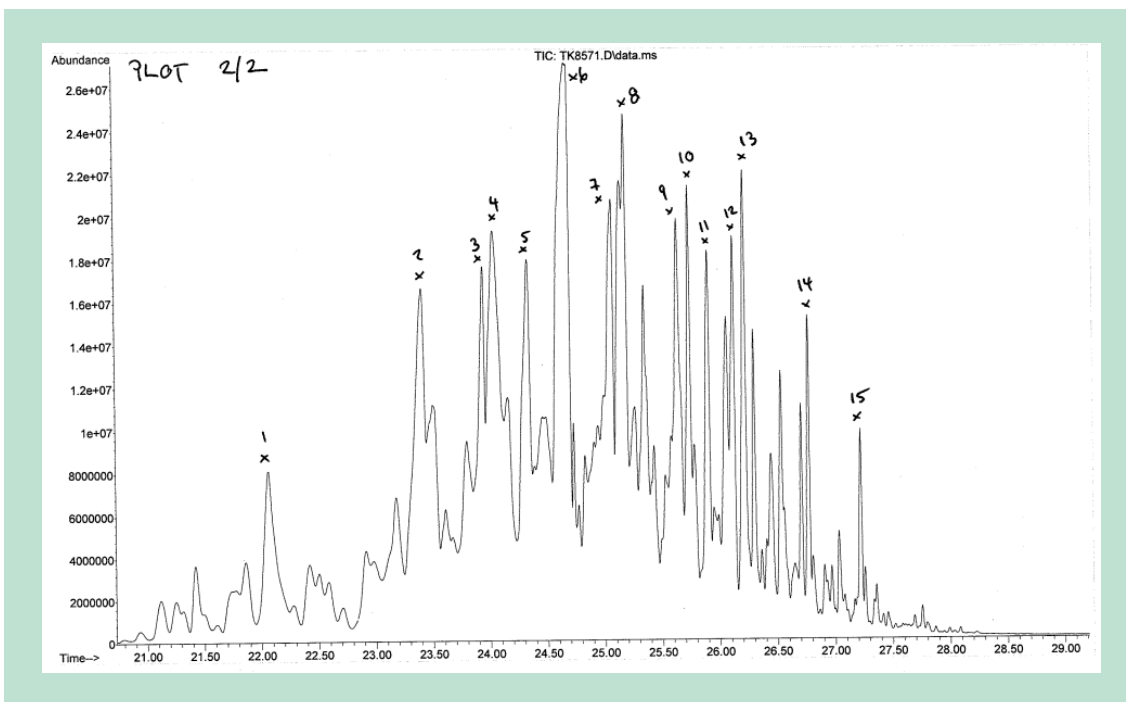
FIGUR 14. Chromatogram for prøve udtaget i indeluften i kælderen



FIGUR 15. Chromatogram for prøve udtaget i poreluften under kældergulvet i punktet PL3.



**FIGUR 16.** Chromatogram for prøve udtaget i poreluften under kældergulvet i punktet PL2.



**FIGUR 17.** Chromatogram for prøve udtaget i poreluften under kældergulvet i punktet PL2, for peaks påvist fra tiden 21 til 29 minutter.

**TABEL 8.** Stofnavn for de største peaks identificeret i chromatogrammerne for luftprøverne samt deres nummer i parentes. Prøverne er listet efter det tidspunkt, hvor de registreres i GC-detektoren. Toluen og xylener er markeret med blå farve, C3- og C4-benzen er markeret med lys grå farve, decaner er markeret med mørk grå farve og endelig er naturligt forekommende kulbrinter markeret med grøn farve.

| Tid (min) | PL 2  | PL3                             | Kælder               | Stue                                   | 1. sal                                 |
|-----------|---|---------------------------------|----------------------|--|--|
| 15,8      |   |                                 | (1) Isopentane       | (1) Isopentane                         |  |
| 17        |   |                                 |                      | (2) Eddikesyre                         | (1) Eddikesyre                         |
| 17,8      |   |                                 | (2) Cyclohexane      |  |  |
| 20        |   | (1) Toluen                      | (3) Toluen           | (3) Toluen                             | (2) Toluen                             |
| 20,7      |   | (2) lab contaminant*            | (4) lab contaminant* |  |  |
| 22,2      | (1) m/p-Xylen   | (3) m/p-Xylen                   | (5) m/p-Xylen        | (4) m/p-Xylen                          | (3) m/p-Xylen                          |
| 22,6      |   |                                 | (6) o-Xylen          | (5) o-Xylen                            | (4) o-Xylen                            |
| 23,4      | (2) Branched C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> hydrocarbon**  | (4) alpha-Pinen                 |                      | (6) alpha-Pinen                        | (5) alpha-Pinen                        |
| 23,9      | (3) C3-Benzen   |                                 | (7) C3-Benzen        |  |  |
| 24        | (4) C3-Benzen   |                                 |                      |  |  |
| 24,2      |   |                                 |                      |  | (6) beta-Pinen                         |
| 24,3      | (5) C3-Benzen   |                                 |                      |  |  |
| 24,6      | (6) C3-Benzen   |                                 | (8) C3-Benzen        | (7) C3-Benzen - Trimethylbenzen isomer | (7) C3-Benzen - Trimethylbenzen isomer |
| 24,8      |   | (5) Caren                       |                      | (8) Caren                              |  |
| 25,1      | (7) Branched C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> hydrocarbon*** |                                 |                      | (9) Cymen                              | (8) Cymen                              |
| 25,2      | (8) C3-Benzen   | (6) Limonen                     |                      | (10) Limonen                           | (9) Limonen                            |
| 25,6      | (9) C4-Benzen   |                                 |                      |  |  |
| 25,7      | (10) Diethylbenzen  |                                 |                      |  |  |
| 25,9      | (11) C4-Benzen  |                                 |                      |  |  |
| 26,1      | (12) C4-Benzen  |                                 |                      |  |  |
| 26,2      | (13) C4-Benzen  | (7) Isopropenyltoluen + unknown | (9) Undecan          | (11) Isopropenyltoluen                 | (10) Isopropenyltoluen                 |
| 26,3      |   | (8) Unknown                     |                      |  |  |
| 26,8      | (14) C4-Benzen****  |                                 |                      |  |  |
| 27,2      | (15) C4-Benzen****  |                                 |                      |  |  |
| 28,2      |   |                                 |                      |  | (11) Linalyl acetat                    |
| 29,5      |   |                                 |                      | (12) Unknown*****                      |  |
| 29,6      |   |                                 | (10) Tetradecan      | (13) Tetradecan                        | (12) Tetradecan                        |
| 30,3      |   |                                 | (11) Pentadecan      | (14) Pentadecan                        | (13) Pentadecan                        |
| 30,4      |   | (9) Di-tert-butylphenol         |                      |  |  |
| 30,9      |   |                                 | (12) Hexadecan       | (15) Hexadecan                         | (14) Hexadecan                         |
| 31,1      | (16) Heptadecan   |                                 |                      |  |  |
| 31,4      | (17) Pristan  |                                 |                      |  |  |
| 31,9      | (18) Phytan   | (10) Unknown                    |                      |  |  |
| 32,2      |   | (11) Di-isobutyl phthalat       |                      |  |  |
| 32,8      |   | (12) 2-Methoxyethyl phthalat    |                      |  |  |

\* Siloxan stof

\*\* sandsynligvis 2,6-Dimethyloctan

\*\*\* sandsynligvis 2,6-Dimethylnonane eller 4-Methyldecan

\*\*\*\* sandsynligvis en tetramethylbenzen isomer

\*\*\*\*\* foreløbigt ID: en propansyrester, f.eks. Propansyre, 2-methyl-, 2-ethyl-3-hydroxyhexyl-ester



#### **4.4 Samlede vurderinger, Gladsaxevej**

Sammenholdes indikationerne fra den stofsæcifikke isotopanalse og fingerprinting vurderes det, at der er et bidrag til oliestoffer i indeluften med oliestoffer fra jordforureningen omkring smøregraven i kælderen, men at en betydlig andel af de påviste kulbrinter i boligen stammer fra interne kilder som benzindunke, nåletræ, rengøringsmidler, produkter til personlig hygiejne, tryksager osv. Desuden indikerer begge metoder, at der kan være forskellige interne kilder til forureningen i indeluften etagerne imellem. Dette underbygges af de påviste indhold af benzen i prøverne.

# 5. Bymidten

## 5.1 Lokalteten kort, Bymidten

Bymidten er beliggende i en boligblok med forretninger i stueetagen og tilhørende underliggende kælderlokaler. På 1. og 2. sal er der boliger. Der er på nuværende tidspunkt aktiv renseridrft i den ene forretning og tilhørende kælder. Rensemaskinen, som er af nyere dato, er placeret i stueetagen og renevæsken, som indeholder PCE, opbevares i et skur i gården.

På ejendommen er der påvist en forurening med chlorerede opløsningsmidler, primært PCE, i jord, vand og poreluft under gulvet i og omkring kælderen tilhørende renseriet på lokaliteten. Forureningen vurderes, at stamme fra aktiviteter i forbindelse med tidligere renseridrft i 60erne og 70erne. I 4 ud af 10 af de overliggende boliger på 1. og 2. sal er der påvist indhold af PCE over Miljøstyrelsens afdampningskriterie for PCE i indeluften.

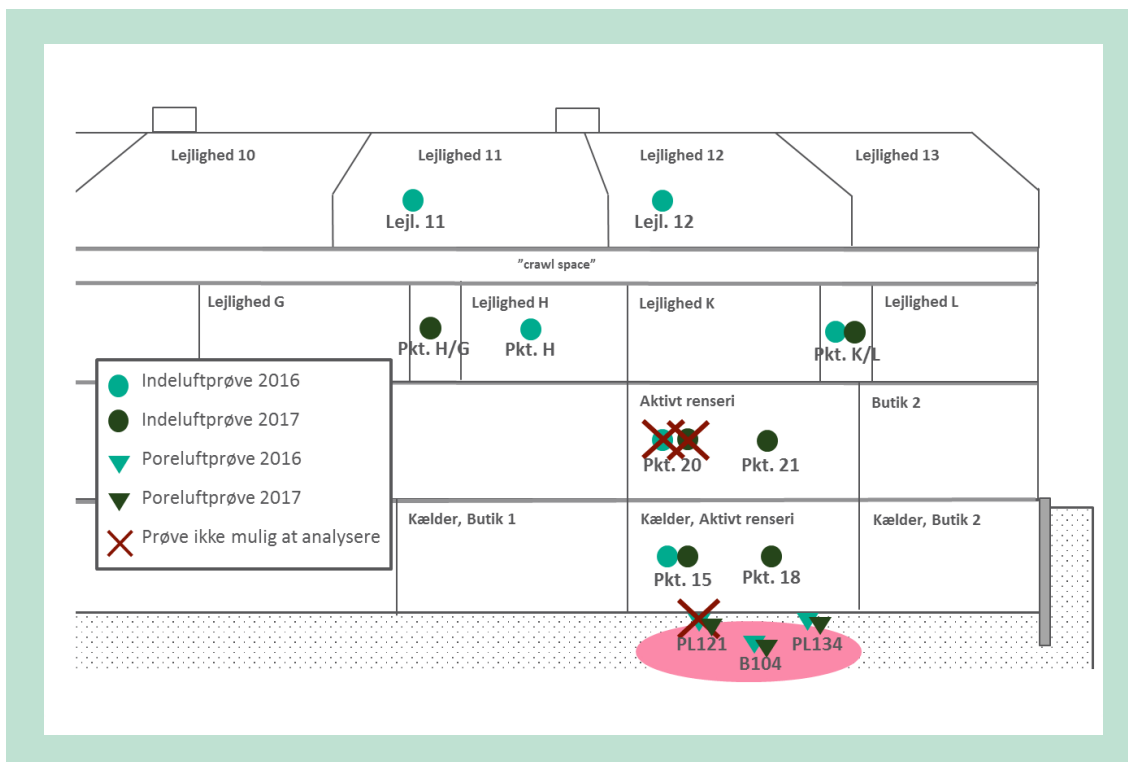
Der er udført stofspecifikke isotopanalyser med det formål, at danne baggrund for en differentiering mellem PCE-bidragene fra henholdsvis jordforureningen og den aktive renseridrft.

## 5.2 Udført arbejde, Bymidten

Der er udtaget prøver til stofspecifik isotopanalyse i to målerunder, henholdsvis efterår 2016 og efterår 2017.

I nedenstående FIGUR 18 ses en rummelig præsentation af de områder hvor der er udtaget prøver i de to målerunder. De prøver, der er markeret med et rødt kryds, er ikke analyseret, da der ikke var nok masse på kulrørene til at udføre analysen.

Prøverne udtaget under gulv, er udtaget efter indeluftmålingerne, således at der ikke er risiko for kontaminering af indeluftprøverne fra kildeområdet.



**FIGUR 18.** Rummelig præsentation af placeringen af prøver udtaget til stofs specifik isotopanalyse på Bymidten.

### 5.3 Resultater og vurderinger (stofs specifik isotopanalyse), Bymidten

Resultaterne af de stofs specifikke isotopanalyser for henholdsvis kulstof- og chlor-atomerne fremgår af nedenstående TABEL 9. Af tabellen kan man se en beskrivelse af prøvestedet samt prøvens navn. Herefter ses resultatet som en delnotation, der repræsenterer isotopsammensætningen i kulrørsprøven. I nogle tilfælde er der udført flere analyser i samme punkt. Der er i så fald udregnet et gennemsnit over prøveresultaterne, se kolonnerne middel C og middel CI. For enkelte prøver er peaken fra GC-analysen deformeret, sandsynligvis pga. en koalition mellem flere stoffer, således at peakene overlapper. For disse prøver er der usikkerhed omkring analyseresultatet. Data for disse målepunkter er i forbindelse med datahåndteringen behandlet som de resterende punkter, og som det fremgår af FIGUR 19 adskiller disse sig ikke væsentligt fra de resterende.

Isotopsammensætningen for hvert prøvepunkt er i FIGUR 19 præsenteret i et x-y diagram ( $\delta^{13}\text{C}$  på x-aksen mod  $\delta^{37}\text{Cl}$  på y-aksen). Den grønne firkant markerer området for isotopsignaturen for nyligt produceret PCE. For hvert prøvepunkt er analyseusikkerheden ( $\pm 0,5$  for  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\pm 1$  for  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) markeret.

Trekantene viser isotopsignaturen for jordforureningen. Som det ses af FIGUR 19 ligger alle fem målinger uden for området for nyligt produceret PCE, når der kigges på isotopsammensætningen for kulstof. Dette indikerer, at der er sket en delvis omdannelse af PCE i kildeområdet ved f.eks. nedbrydning, og at stofs specifik isotopanalyse således er en egnet metode til differentiering af kilder til indeklimaforurening på denne lokalitet.

Firkanten viser isotopsignaturen for det PCE, der kan måles i indeluften i renseriet. Denne måling ligger som forventet inden for området for nyligt produceret PCE. PCE i kildeområdet under gulv og i renseriet har forskellig kulstof-isotopsammensætning.

De runde markeringer viser isotopsignaturen for indeklimamålingerne. De blå markeringer repræsenterer prøver udtaget på 1. og 2. sal i boligerne. Som det ses af FIGUR 19 ligger disse prøver samlet i en klynge, hvilket vil sige at isotopsignaturen for prøverne er lig hinanden. Prøvernes isotopsignatur ligger inden for området for nyligt produceret PCE og isotopsignaturen er lig signaturen for PCE i indeluften i renseriet (den interne kilde). Dette indikerer, at PCE påvist i indeklimaet i lejlighederne hovedsageligt stammer fra den aktive renseridrift.

De runde lilla markeringer viser isotopsammensætningen i indeluftprøver udtaget i renseriets kælder. Isotopsignaturen for disse prøver er meget ens og resultaterne er samlet i en klynge. Isotopsammensætningen for kulstof adskiller sig fra både prøverne udtaget i selve renseriet og i kildeområdet under gulv. Isotopsignaturen indikerer, at den PCE der påvises i indeklimaet i kælderen er en blanding mellem nyligt produceret PCE brugt i renseriet og indtrængende PCE fra kildeområdet under gulv.

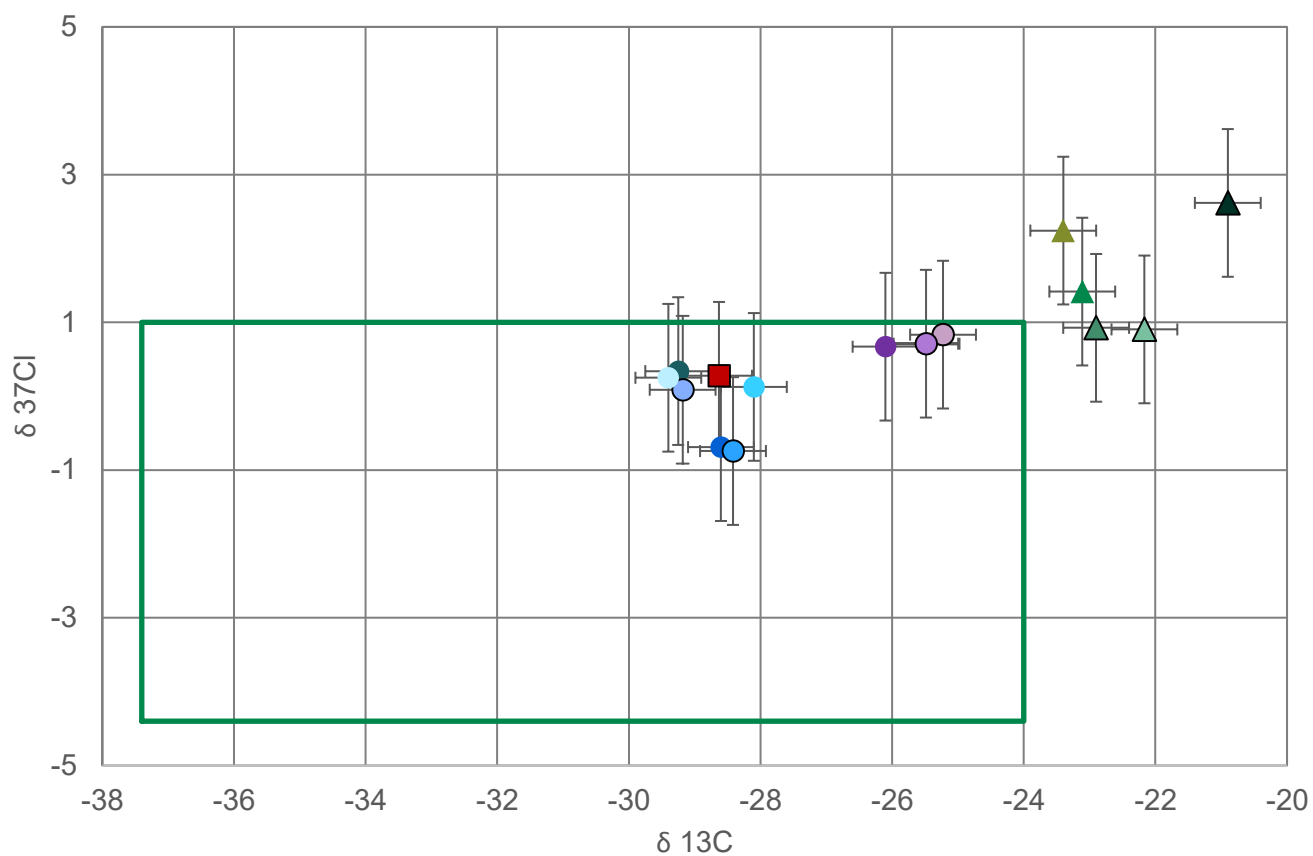
Der er ikke signifikant forskel på isotopsammensætningen for chlor i de udtagne prøver, da analyseusikkerheden i målingerne overlapper hinanden. Prøverne viser dog samme tendens som isotopsammensætningen for kulstof, idet prøverne fra kildeområdet generelt er mere positive end prøverne fra indeluften i boligerne/renseriet og prøverne fra indeluften i kælderen ligger midt imellem.

**TABEL 9.** Resultater af stofspecifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  på Bymidten

| Prøvested                              | Prøve           | Delta $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ | Middel C | Delta $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ | Middel Cl | Kommentar |
|--|-----------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>2016</b>                            |                 |                                     |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - B104        | B104 A          | -23,8                               | -23,1    |                                       | 1,4       |           |
|  | B104 B          | -22,6                               |          | 1,4                                   |           |           |
|  |                 | -22,9                               |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - PL134       | PL134 A         | -23,4                               | -23,4    | 1,9                                   | 2,2       |           |
|  | PL134 A         |                                     |          | 2,6                                   |           |           |
| Indoor - Basement Dry cleaning         | KÆLDER A        | -26,1                               | -26,1    | 0,7                                   | 0,7       |           |
| Indoor - 2nd floor, Apartment K/L      | L6 B            | -28,6                               | -28,6    | -0,7                                  | -0,7      |           |
| Indoor - 2nd floor, Apartment H        | LEJ H1 SAL B    | -28,1                               | -28,1    | 0,1                                   | 0,1       | 1)        |
| Indoor - 3rd floor, Apartment 12       | LEJ 12, 2 SAL A | -29,3                               | -29,3    | 0,4                                   | 0,3       | 1)        |
|  | LEJ 12, 2 SAL A | -29,2                               |          | 0,7                                   |           | 1)        |
|  | LEJ 12,2 SAL-B  |                                     |          | 0,0                                   |           |           |
| Indoor - 3rd floor, Apartment 11       | LEJ 11,2 B      | -29,4                               | -29,4    | 0,2                                   | 0,2       | 1)        |
| <b>2017</b>                            |                 |                                     |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - B104        | B104 A          |                                     | -20,9    | 3,0                                   | 2,6       |           |
|  | B104 B          |                                     |          | 2,3                                   |           |           |
|  | B104 C          | -20,9                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - Dry cleaning 21               | 21 A            | -28,6                               | -28,6    | -0,1                                  | 0,3       |           |
|  | 21 B            |                                     |          | 0,6                                   |           |           |
| Indoor – 2nd floor - Apartment G/H     | H/G A           |                                     | -29,2    | 0,1                                   | 0,1       |           |
|  | H/G B           |                                     |          | 0,1                                   |           |           |
|  | H/G C           | -29,2                               |          |                                       |           |           |
| Indoor – 2nd floor - Apartment K/L     | K/L A           | -28,6                               | -28,4    | -0,7                                  | -0,7      |           |
|  | K/L C           | -28,2                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - Basement Dry cleaning 18 (Gr) | 18 (Gr) A       | -25,2                               | -25,5    | 0,7                                   | 0,7       |           |
|  |                 |                                     |          | 0,7                                   |           |           |
|  | 18 (Gr) C       | -25,7                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - Basement Dry cleaning 15      | 15 A            | -25,7                               | -25,2    |                                       | 0,8       |           |
|  | 15 B            | -24,8                               |          | 0,8                                   |           |           |
|  |                 |                                     |          | 0,9                                   |           |           |
| Subsurface contamination - PL121       | PL 121          | -22,9                               | -22,9    |                                       | 0,9       |           |
|  | PL 121 C        |                                     |          | 0,9                                   |           |           |
| Subsurface contamination - PL134       | RENSERI PL134   | -21,9                               | -22,2    |                                       | 0,9       |           |
|  | RENSERI PL134   | -22,2                               |          |                                       |           |           |
|  | RENSERI PL134   | -22,4                               |          |                                       |           |           |
|  | RENSERI PL134 C |                                     |          | 0,9                                   |           |           |

1) GC peak shape deformation; minor coalition possible

# Bymidten



- Range for manufactured source
- ▲ Subsurface contamination - B104 - 2017
- ▲ Subsurface contamination - PL134 - 2017
- Indoor - 2nd floor, Apartment K/L - 2017
- Indoor - 2nd floor, Apartment H - 2017
- Indoor - 3rd floor, Apartment 12 - 2017
- Indoor - 3rd floor, Apartment 11 - 2017
- Indoor - Basement Dry cleaning 15 - 2017
- Indoor - Dry cleaning 21 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - B104 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - PL134 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - PL121 - 2018
- Indoor - 2nd floor - Apartment K/L - 2018
- Indoor - 2nd floor - Apartment G/H - 2018
- Indoor - Basement Dry cleaning 15 - 2018
- Indoor - Basement Dry cleaning 18 (Gr) - 2018

**FIGUR 19.** Plot af isotopfraktionen (delta 13C på x-aksen mod delta 37Cl på y-aksen) for hvert prøvepunkt. Desuden markering af området for isotopfraktionen af nyligt produceret PCE. Trekanten viser isotopfraktionen i kildeområdet under gulv. Runde viser isotopfraktionen i indeklimaet. Firkanten viser isotopfraktionen i renseriet (den interne kilde).

# 6. Amagerbrogade

## 6.1 Lokalteten kort, Amagerbrogade

På Amagerbrogade er undersøgelserne udført i en etageejendom. I stueetagen er der et aktivt renseri. Over renseriet er der boliger. Der er aktiv renseridrft i stueetagen, hvor der er placeret en rensemaskine af ældre dato. Der opbevares ligeledes PCE til rensemaskinen i renseriet. Der er påvist et betydeligt indhold af PCE i poreluften under renseriet. Kildeområdet for jordforureningen er placeret under det nuværende renseri. Forureningen vurderes, at stamme fra aktiviteter i forbindelse med tidligere renseridrft. I de to lejligheder, der ligger umiddelbart over renseriet på 1. sal, er der påvist indhold af PCE over Miljøstyrelsens afdampningskriterie i indeluften.

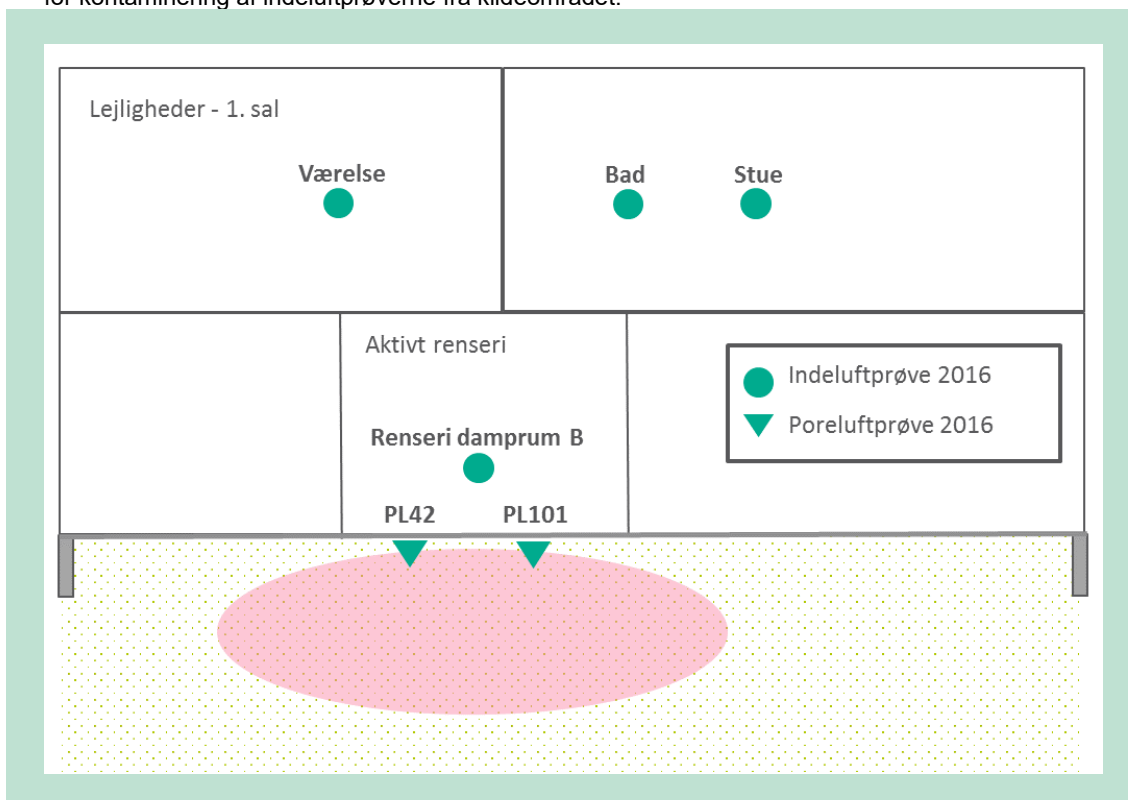
Der er udført stofs specifikke isotopanalyser med det formål at danne baggrund for en differentiering mellem PCE-bidragene fra henholdsvis jordforureningen og den aktive renseridrft.

## 6.2 Udført arbejde, Amagerbrogade

Der er udtaget prøver til stofs specifik isotopanalyse i efteråret 2016.

I nedenstående FIGUR 20 ses en rummelig præsentation af de områder, hvor der er udtaget prøver. Det har været muligt at analysere alle udtagne prøver.

Prøverne udtaget under gulv, er udtaget efter indeluftmålingerne, således at der ikke er risiko for kontaminering af indeluftprøverne fra kildeområdet.



**FIGUR 20.** Rummelig præsentation af placeringen af prøver udtaget til stofs specifik isotopanalyse på Amagerbrogade.

### 6.3 Resultater og vurderinger (stofs specifik isotopanalyse), Amagerbrogade

Resultaterne af de stofs specifikke isotopanalyser for henholdsvis kulstof- og chlor-atomerne fremgår af nedenstående TABEL 10. Af tabellen kan man se en beskrivelse af prøvestedet samt prøvens navn. Herefter ses resultatet som en delnotation, der repræsenterer isotopsammensætningen i kulrørsprøven. I nogle tilfælde er der udført flere analyser i samme punkt. Der er i så fald udregnet et gennemsnit over prøveresultaterne, se kolonnerne middel C og middel CI. For en af prøverne var signalet i forbindelse med analysen lavt, hvorfor der muligvis er en øget usikkerhed for dette målepunkt. Data for dette målepunkt er i forbindelse med datahåndteringen behandlet som de resterende punkter, og som det fremgår af FIGUR 21 adskiller dette punkt sig ikke væsentligt fra de resterende.

**TABEL 10.** Resultater af stofs specifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  på Amagerbrogade.

| Prøvested                               | Prøve             | Delta $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ | Middel C | Delta $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ | Middel CI | Kommentar |
|---|-------------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Subsurface contamination - PL42         | PL42 A            | -24,7                               | -24,7    | 1,6                                   | 1,4       |           |
|   | PL42 B            |                                     |          | 1,3                                   |           |           |
| Subsurface contamination - PL101        | PL101 A           | -25,4                               | -25,2    | 0,2                                   | 0,1       |           |
|   | PL101 C           | -24,9                               |          | -0,1                                  |           |           |
| Indoor - Apartment N2                   | 1TH C             | -26,8                               | -27,1    | -0,2                                  | -0,2      | 1)        |
|   | 1TH A             | -27,4                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - Apartment A (Shower)           | 1TH BAD A         | -28,2                               | -28,3    | -0,5                                  | -0,8      |           |
|   |                   | -28,4                               |          | -0,6                                  |           |           |
|   | 1TH BAD B         |                                     |          | -0,9                                  |           |           |
| Indoor - Apartment A (Living room)      | 1TH STUE A        | -27,9                               | -27,9    | -0,6                                  | -0,6      |           |
| Internal source - Indoor - Dry cleaning | RENSERI DAMPRUM B | -27,8                               | -27,8    | -1,8                                  | -1,8      |           |

1) Lavt signal, mulig øget usikkerhed

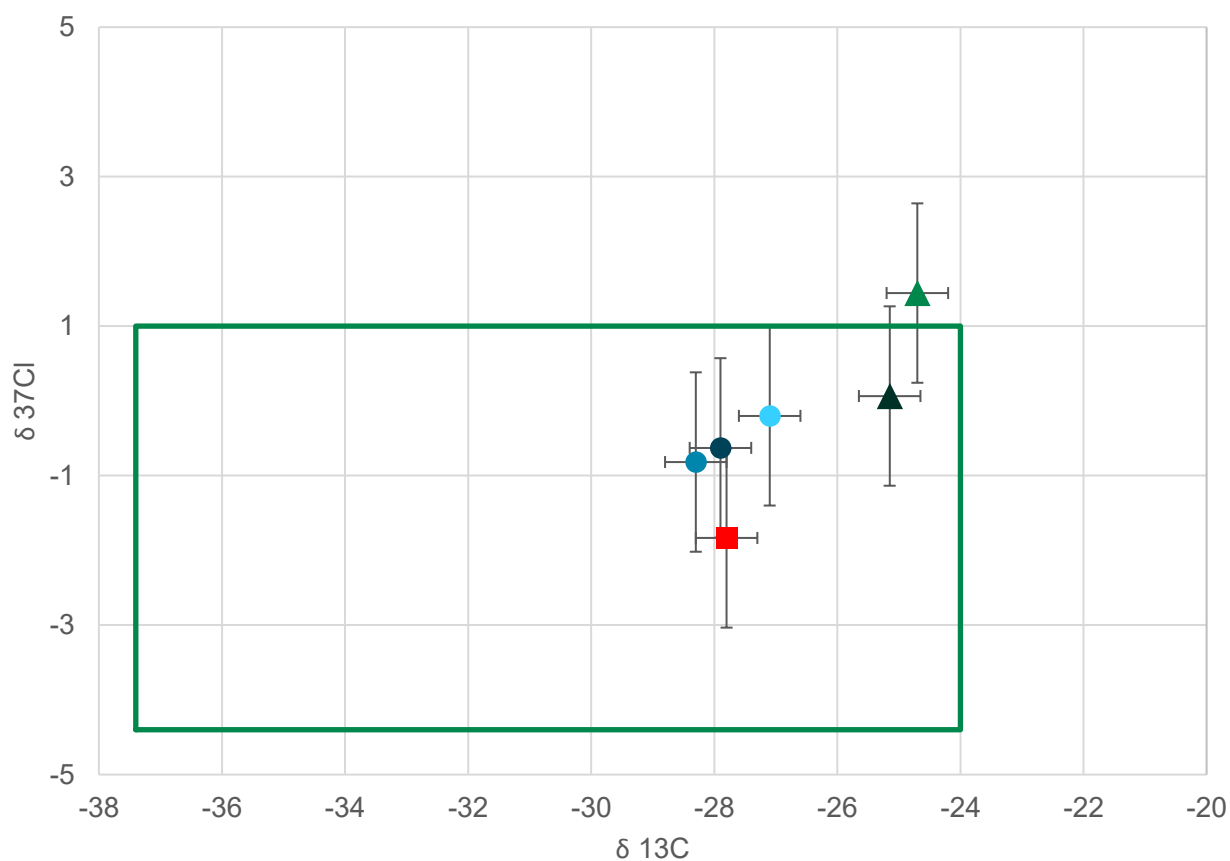
Isotopsammensætningen for hvert prøvepunkt er i FIGUR 21 præsenteret i et x-y diagram ( $\delta^{13}\text{C}$  på x-aksen mod  $\delta^{37}\text{Cl}$  på y-aksen). Den grønne firkant markerer området for isotopsignaturen for nyligt produceret PCE. For hvert prøvepunkt er analyseusikkerheden ( $\pm 0,5$  for  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\pm 1$  for  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) markeret.

Firkanten viser isotopsignaturen for det PCE, der kan måles i indeluften i renseriet. Som det ses af FIGUR 21, ligger denne måling som forventet inden for området for nyligt produceret PCE.

Trekanterne viser isotopsignaturen for jordforureningen. Som det ses af FIGUR 21 ligger de to målinger et stykke fra hinanden, men er dog ikke signifikant forskellige, i det de ligger inden for hinandens analyseusikkerhed. Isotopsammensætningen for kulstof adskiller sig ikke fra sammensætningen i nyligt produceret PCE. For den ene af de to prøver adskiller chlor-isotopsammensætningen sig fra nyligt produceret PCE. Kulstof-isotoperne i disse prøver er dog tungere end i luftprøven udtaget i indeluften. Dette indikerer, at der er sket isotopfraktionering ved f.eks. nedbrydning, hvorved de tungere isotoper er koncentreret i det resterende PCE i kildeområdet. Der kan også blot være tale om to forskellige PCE produkter.



# Amagerbrogade



- Range for manufactured source
- ▲ Subsurface contamination - PL42
- Indoor - Apartment A32 (Living room)
- Indoor - Apartment A32 (Shower)
- Internal source - Dry cleaning facility
- ▲ Subsurface contamination - PL101
- Indoor - Apartment N2

**FIGUR 21.** Plot af isotopfraktionen (delta  $^{13}\text{C}$  på x-aksen mod delta  $^{37}\text{Cl}$  på y-aksen) for hvert prøvepunkt. Desuden markering af området for isotopfraktionen af nyligt produceret PCE. Trekanten viser isotopfraktionen i kildeområdet under gulv. Runde viser isotopfraktionen i indeklimaet. Firkanten viser isotopfraktionen i renseriet (den interne kilde).

De runde markeringer viser isotopsignaturen for indeklimamålingerne udtaget i boligerne over renseriet. Isotopsignaturen for de tre indeluftprøver adskiller sig ikke signifikant fra hinanden. Isotopsammensætningen for chlor adskiller sig ikke signifikant fra sammensætningen i hverken indeluften i renseriet eller jordforureningen. Isotopsammensætningen for kulstof i indeluftprøverne fra lejlighederne er derimod lig med kulstof-isotopsammensætningen i PCE i det aktive renseri og adskiller sig samtidig væsentligt fra sammensætningen i jordforureningen. Dette indikerer, at der er en væsentlig påvirkning af indeluften i lejlighederne med PCE fra renseriet.

Isotopsammensætningen for chloratomerne i de 6 prøver der er udtaget på Amagerbrogade adskiller sig ikke signifikant fra hinanden. Der er dog en tendens til at luftprøven udtaget i indeklimaet har den "letteste" chlor-isotopsammensætning og altså er mindst nedbrudt. Prøverne udtaget i kildeområdet under gulv har den "tungeste" chlor-isotopsammensætning, hvorfor der kan være sket isotopfraktionering til tungere chlor-atomer. Isotopsammensætningen for prøverne udtaget i indeluften i lejlighederne ligger midt imellem og kan således være påvirket af PCE fra både jordforureningen og det aktive renseri. Dette er dog kun en tendens og kan derfor ikke ligge til grund for reelle vurderinger, da isotopsammensætningen ikke er signifikant forskellig.

# 7. Innovationsgaragen - Syd

## 7.1 Lokalteten kort, Innovationsgaragen - Syd

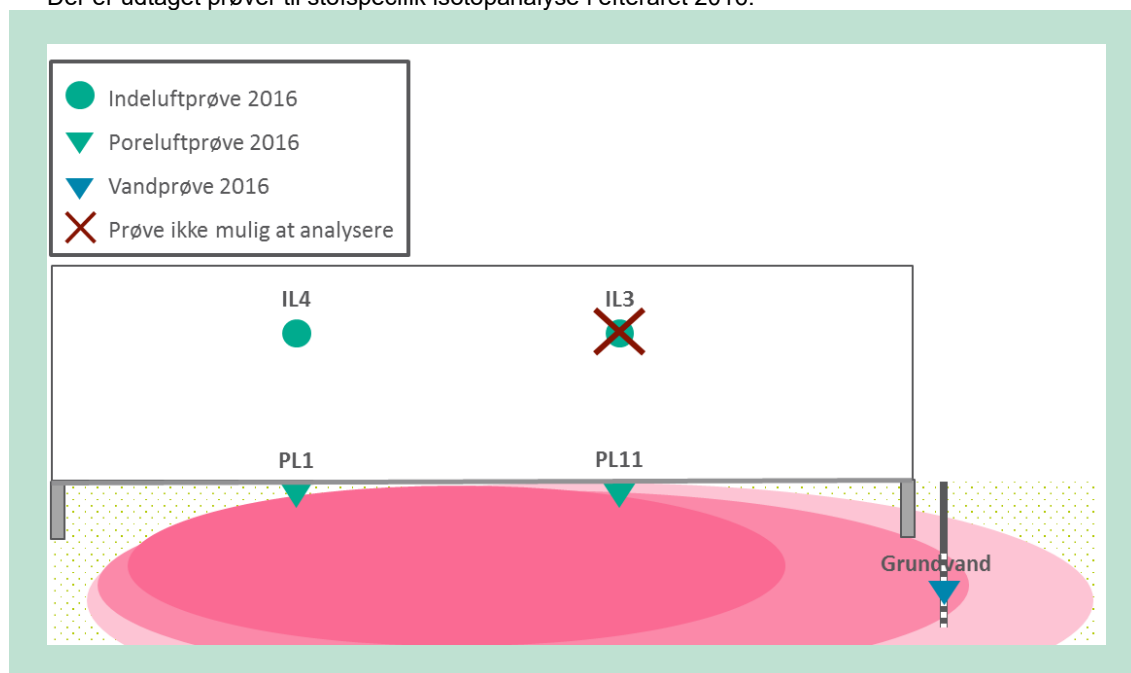
Innovationsgaragen er en testgrund ejet af Region Hovedstaden. Ejendommen er beliggende i Skovlunde vest for København. Der er tale om en industrigrund i én etage uden kælder men med flere uafhængige bygninger. Der har været renseri på ejendommen i perioden fra 1960 til 1987.

Der er påvist en kraftig forurening med det chlorerede opløsningsmiddel tetrachlorethylen (PCE) på ejendommen. Forureningen er påvist i både jord, vand og poreluft samt i indeluften i bygningerne på ejendommen. I det terrænnære og i det dybere grundvand er der påvist indhold af nedbrydningsprodukter. Det vurderes således, at der sker naturlig nedbrydning af de chlorerede nedbrydningsprodukter i både mættet og umættet zone. Forureningen er påvist i et større regionalt sandmagasin under ejendommen, hvorfor der er udført en hydraulisk fiksering af forureningen i dette sandlag. Testgrundens sydlige bygning ligger ikke lige ovenpå forureningens hotspot, men der er påvist en betydelig poreluftforurening under bygningen, og der er påvist et indhold af PCE i indeluften på omkring 20-60 µg/m<sup>3</sup>. Der var ved undersøgelsens start ingen oplysninger om kendte interne kilder i den sydlige bygning. Bygningen har været brugt til diverse test og forsøgspstillinger.

Der er udført stofspecifikke isotopanalyser i den sydlige bygning på innovationsgaragen med det formål, at undersøge metodens egnethed til at vurdere forureningsoprindelsen på lokaliteter, hvor poreluftforureningen er den primære kilde til indeklimaforurening. Der er desuden udtaget en vandprøve fra afværganlægget, til sammenligning af isotopsignaturen i grundvandet i hotspot og poreluften under bygningen.

## 7.2 Udført arbejde, Innovationsgaragen – Syd

Der er udtaget prøver til stofspecifik isotopanalyse i efteråret 2016.



**FIGUR 22.** Rummelig præsentation af placeringen af prøver udtaget til stofspecifik isotopanalyse på Innovationsgaragen – Syd.

I ovenstående FIGUR 22 ses en rummelig præsentation af de områder, hvor der er udtaget prøver i Innovationsgaragens sydlige bygning. Prøven markeret med et rødt kryds, er ikke analyseret, da der ikke var opsamlet nok PCE i dette punkt.

Prøverne udtaget under gulv, er udtaget efter indeluftmålingerne, således at der ikke er risiko for kontaminering af indeluftprøverne fra kildeområdet. Grundvandsprøven er udtaget i afværgeanlægget til hydraulisk fiksering af grundvandsforureningen i det større regionale magasin. Det vides således ikke præcis i hvilken dybde, eller i hvilket filter prøven er udtaget.

### 7.3 Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Innovationsgaragen – Syd

Resultaterne af de stofspecifikke isotopanalyser for henholdsvis kulstof- og chlor-atomerne fremgår af nedenstående

TABEL 11. Af tabellen kan man se en beskrivelse af prøvestedet samt prøvens navn. Herefter ses resultatet som en delnotation, der repræsenterer isotopsammensætningen i kulrørsprøven. I nogle tilfælde er der udført flere analyser i samme punkt. Der er i så fald udregnet et gennemsnit over prøveresultaterne, se kolonnerne middel C og middel CI. For nogle prøver er der i forbindelse med analysearbejdet til bestemmelse af chlorid-isotopforholdet registreret et lavt signal, hvorfor der er en mulig øget usikkerhed. Disse resultater behandles som de resterende resultater i forbindelse med vurderinger osv. I de samme prøvepunkter er der ved analysearbejdet til bestemmelse af kulstof-isotopforholdet et lavt signal, hvilket medfører, at usikkerheden ved analysen øges fra 0,5‰ til 2‰. Dette fremgår af FIGUR 23 og tages med i betragtning ved vurdering af resultaterne.

Isotopsammensætningen for hvert prøvepunkt er i FIGUR 23 præsenteret i et x-y diagram ( $\delta^{13}\text{C}$  på x-aksen mod  $\delta^{37}\text{Cl}$  på y-aksen). Den grønne firkant markerer området for isotopsignaturen for nyligt produceret PCE. For hvert prøvepunkt er analyseusikkerheden ( $\pm 0,5$  for  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\pm 1$  for  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) markeret. For to af prøvepunkterne (PL11 og IL4) er analyseusikkerheden for  $\delta^{13}\text{C}$  øget fra  $\pm 0,5$  til  $\pm 2$ .

**TABEL 11.** Resultater af stofspecifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  på Innovationsgaragen – Syd.

| Prøvested                               | Prøve     | Delta $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ | Middel C | Delta $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ | Middel CI | Kommentar |
|---|-----------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Groundwater 2017                        | Grundvand | -22,1                               | -22,2    | 2,0                                   | 2,0       |           |
|   |           | -22,4                               |          | 2,1                                   |           |           |
| Subsurface contamination - PL 1 - 2017  | PL1 A     | -22,6                               | -23,4    |                                       | 2,4       |           |
|   | PL1 B     |                                     |          | 2,4                                   |           |           |
|   | PL1 C     | -24,1                               |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - PL 11 - 2017 | PL11 A    | -23,8                               | -23,8    |                                       | 2,9       | 2)        |
|   | PL11 B    |                                     |          | 2,9                                   |           | 1)        |
| Indoor - IL4 - 2017                     | IL4 A     | -22,4                               | -22,4    |                                       | -1,1      | 2)        |
|   | IL4 C     |                                     |          | -1,1                                  |           | 1)        |

- 1) Lavt signal, mulig øget usikkerhed
- 2) Lavt signal, usikkerhed øget til  $\pm 2\%$

Trekanterne viser isotopsignaturen for poreluftforureningen. De to prøver har overordnet den samme isotopsammensætning, i det de ligger inden for hinandens analyseusikkerhed. Som det ses af FIGUR 23 ligger de to målinger uden for området for nyligt produceret PCE, når der

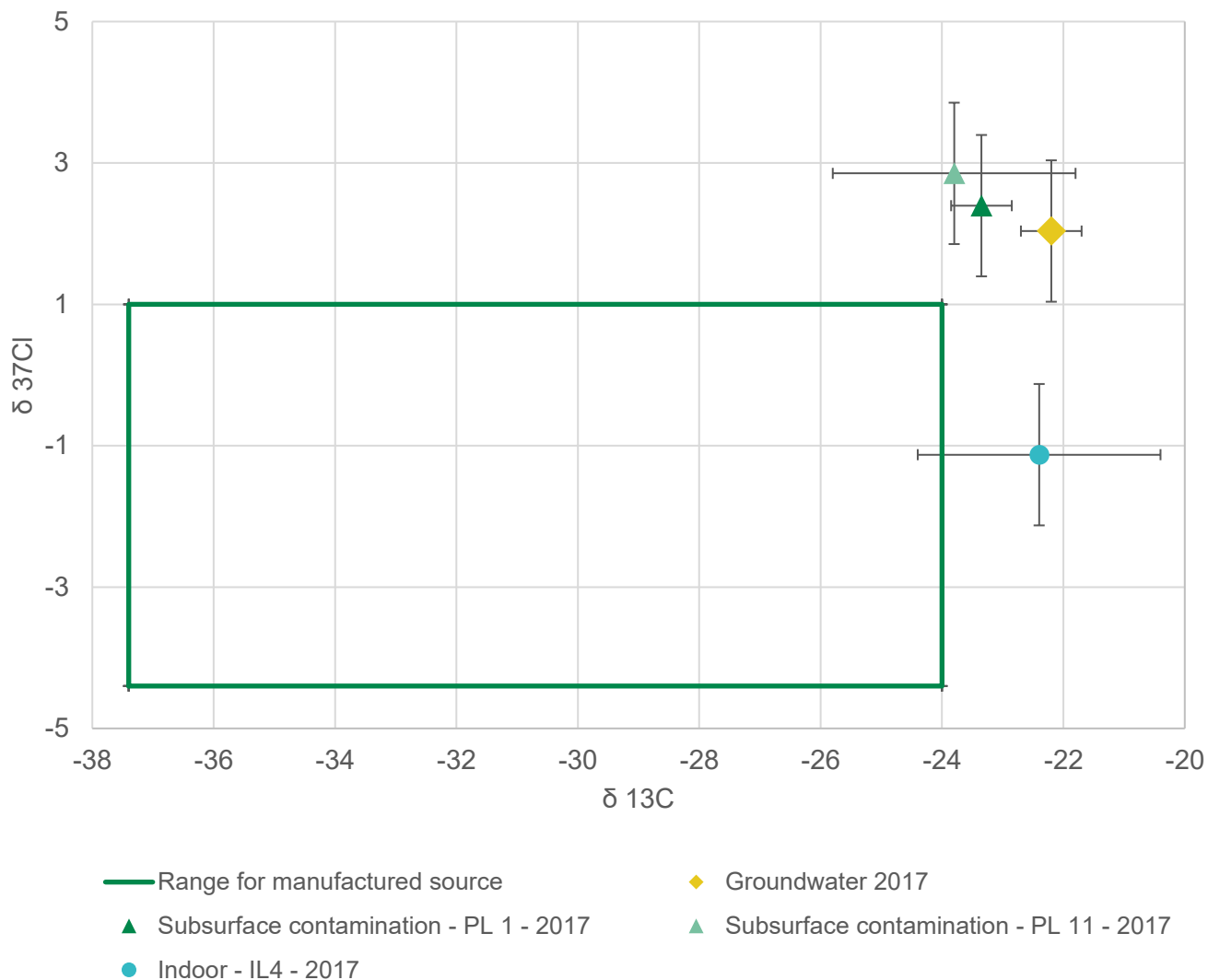
kigges på isotopsammensætningen for chlor. Desuden ligger isotopsammensætningen for kulstof på kanten af området for nyligt produceret PCE. Dette indikerer, at der er sket en delvis omdannelse af PCE i kildeområdet ved f.eks. nedbrydning, hvorfor metoden stofsætspecifik isotopanalyse vurderes egnet til vurdering af indeluftforureningens oprindelse.

Den gule diamant viser isotopsignaturen for grundvandet udtaget i afværgeanlægget, se FIGUR 23. Denne måling ligger uden for området for nyligt produceret PCE for både chlor og kulstof og isotopsignaturen er altså signifikant forskellig fra nyt PCE. Isotopsammensætningen for chlor er sammenfaldende for prøverne udtaget i poreluften og prøven udtaget i grundvandet. Isotopsammensætningen for kulstof ligger meget tæt, men er dog ikke den samme for den ene af de to poreluftprøver og grundvandsprøven. Den øgede usikkerhed på den anden poreluftprøve, gør det vanskeligt at konkludere på denne. Der er således, et muligt potentiale for at bruge grundvandsprøver i stedet for poreluftprøver til at definere isotopsignaturen i kildeområdet på denne lokalitet.

Den runde markering viser isotopsignaturen for indeklimatemålingen. Som det fremgår af FIGUR 23 er isotopsammensætningen for kulstof i indeluftprøven sammenfaldende med isotopsammensætningen for poreluftprøverne og for grundvandsprøven. Dette indikerer, at den PCE, der påvises i indeluften, stammer fra indtrængende PCE fra kildeområdet under gulv. Af FIGUR 23 ses det dog ligeledes, at isotopsammensætningen for chlor-atomerne i indeluftprøven er signifikant forskellig fra poreluftprøverne og grundvandsprøven, det endda med en betydelig forskel i  $\delta^{37}\text{Cl}$  på omkring 1‰. Isotopsammensætningen for chlor i indeluftprøven ligger desuden langt inde i intervallet for nyligt produceret PCE. Dette er en indikation på et bidrag af PCE fra en intern kilde. På baggrund af isotopanalyserne må det således vurderes, at der er tale om en blandet kilde til indeklimateforureningen, i det der er indikationer på bidrag fra både indtrængning af PCE fra kilden under gulv og fra en intern kilde i bygningen.

På baggrund af de udførte isotopanalyser, er der i den sydlige bygning på Innovationsgaragen påvist indikationer på påvirkning fra en intern kilde med nyligt produceret PCE. Efterfølgende er der fremkommet oplysninger om en ikke registreret intern kilde i form af et meget beskedent spild på betongulvet med nyligt produceret PCE i forbindelse med et tidligere udført udviklingsforsøg på lokaliteten.

# Innovationsgaragen - Syd



**FIGUR 23.** Plot af isotopfraktionen (delta  $^{13}\text{C}$  på x-aksen mod delta  $^{37}\text{Cl}$  på y-aksen) for hvert prøvopunkt. Desuden markering af området for isotopfraktionen af nyligt produceret PCE. Grønne trekanter viser isotopfraktionen i kildeområdet under gulv. Runde viser isotopfraktionen i indeklimaet. Den gule diamant viser isotopfraktionen i grundvandet.

# 8. Innovationsgaragen - Nord

## 8.1 Lokalteten kort, Innovationsgaragen - Nord

For en generel introduktion til Region Hovedstadens testgrund med navnet innovationsgaragen, henvises til beskrivelsen i afsnit 8.1 under innovationsgaragen – Syd.

De højeste PCE poreluftkoncentrationer påvist på ejendommen Innovationsgaragen, ses under ejendommens nordlige bygning. I denne bygning er der ligeledes påvist et betydeligt indhold af PCE i indeluften med koncentrationer helt op til omkring 1.000 µg/m<sup>3</sup>. Der er ingen kendte interne kilder i denne bygning. Bygningen bruges til diverse tests og forsøgsopstillinger. Der ud over har dele af bygningen været brugt til kontoraktiviteter, hvorfor der i perioder har været opstillet transportable luftrensere i enkelte rum.

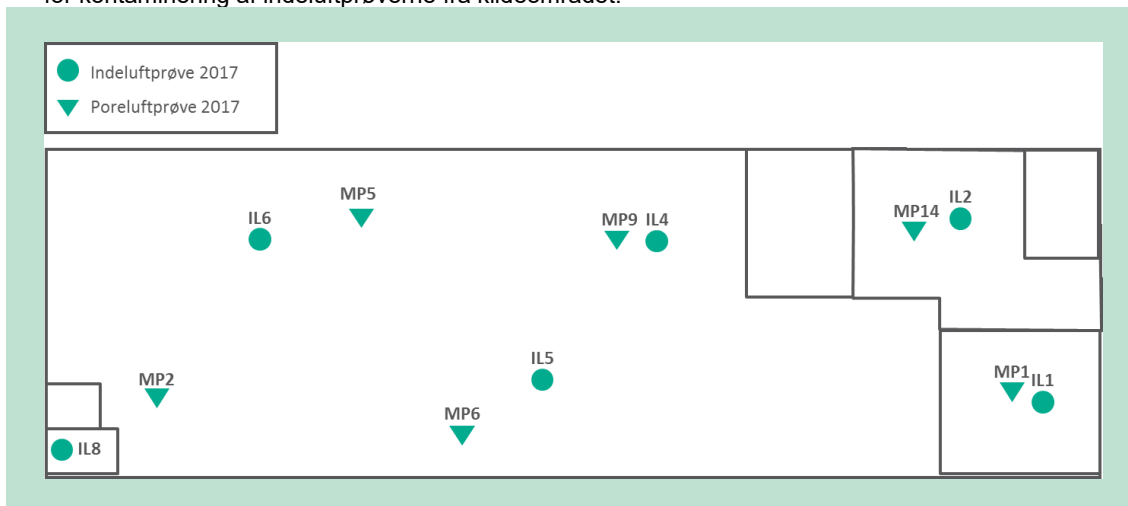
Der er udført stofspecifikke isotopanalyser i den nordlige bygning på innovationsgaragen med det formål at undersøge metodens egnethed til at vurdere forureningsoprindelsen på lokaliteter, hvor poreluftforureningen er den primære kilde til indeklimaforurening.

## 8.2 Udført arbejde, Innovationsgaragen – Nord

Der er udtaget prøver til stofspecifik isotopanalyse i efteråret 2017.

I nedenstående FIGUR 24 ses en rummelig præsentation af de områder, i den nordlige bygning på innovationsgaragen, hvor der er udtaget prøver. I figuren ses bygningen oppefra. Alle prøver er udtaget og analyseret med succes.

Prøverne udtaget under gulv, er udtaget efter indeluftmålingerne, således at der ikke er risiko for kontaminering af indeluftprøverne fra kildeområdet.



**FIGUR 24.** Rummelig præsentation af placeringen af prøver udtaget til stofspecifik isotopanalyse på Innovationsgaragen – Nord. Bygningen ses oppefra.

### 8.3 Resultater og vurderinger (stofspecifik isotopanalyse), Innovationsgaragen – Nord

Resultaterne af de stofspecifikke isotopanalyser for henholdsvis kulstof- og chlor-atomerne fremgår af nedenstående TABEL 12. Af tabellen kan man se en beskrivelse af prøvestedet samt prøvens navn. Herefter ses resultatet som en delnotation der repræsenterer isotopsammensætningen i kulrørsprøven. I nogle tilfælde er der udført flere analyser i samme punkt. Der er i så fald udregnet et gennemsnit over prøveresultaterne, se kolonnerne middel C og middel CI.

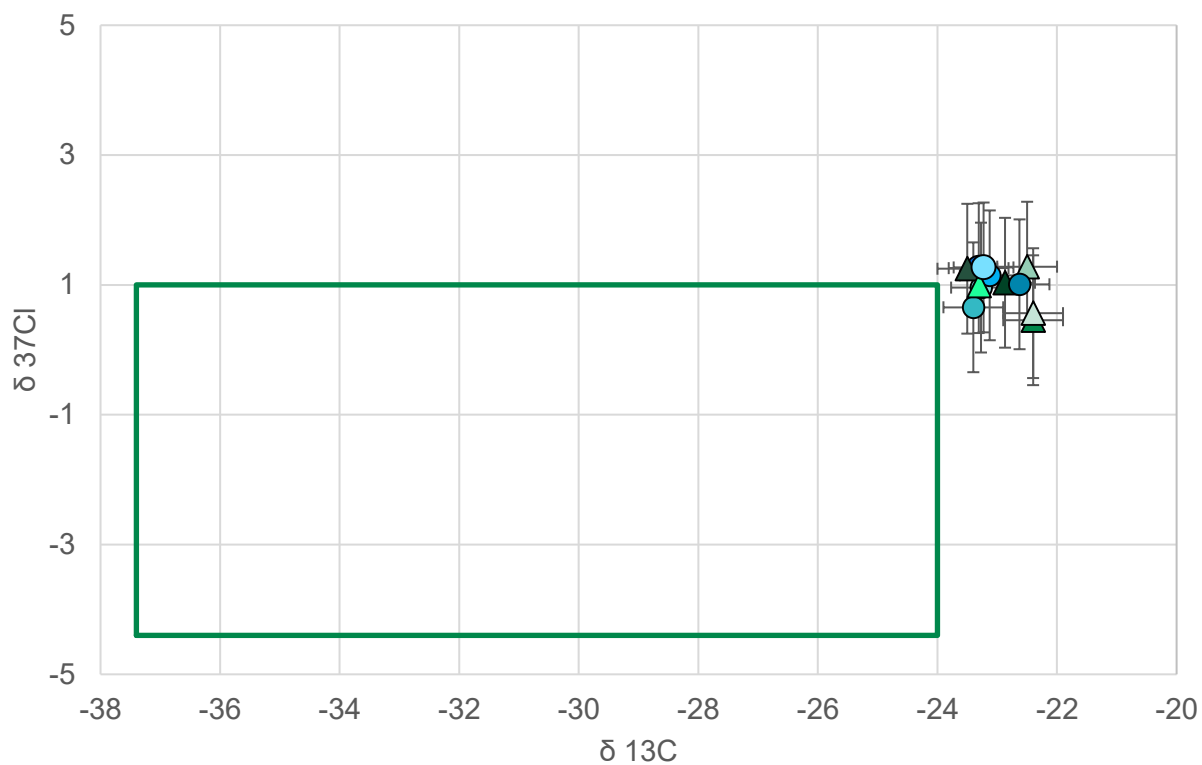
**TABEL 12.** Resultater af stofspecifik isotopanalyse for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  på Innovationsgaragen – Nord.

| Prøvested                       | Prøve  | Delta $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ | Middel C | Delta $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ | Middel CI | Kommentar |
|---------------------------------|--------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Indoor - IL1                    | IL1 A  | -23,3                               | -23,3    | 1,3                                   | 1,3       |           |
|                                 |        |                                     |          | 0,6                                   |           |           |
|                                 | IL1 C  |                                     |          | 1,9                                   |           |           |
|                                 |        |                                     |          | 1,1                                   |           |           |
| Indoor - IL2                    | IL2 A  | -23,8                               | -23,3    | 1,0                                   | 1,0       |           |
|                                 | IL2 A  | -22,7                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - IL4                    | IL4 A  | -23,1                               | -23,1    | 1,7                                   | 1,1       |           |
|                                 |        |                                     |          | 0,6                                   |           |           |
| Indoor - IL5                    | IL5 A  | -23,2                               | -23,4    | 0,7                                   | 0,7       |           |
|                                 | IL5 C  | -23,6                               |          |                                       |           |           |
| Indoor - IL6                    | IL6 A  | -22,6                               | -22,6    | 1,2                                   | 1,0       |           |
|                                 |        |                                     |          | 0,8                                   |           |           |
| Indoor - IL8                    | IL8 A  | -23,2                               | -23,2    | 1,2                                   | 1,3       |           |
|                                 | IL8 B  |                                     |          | 1,4                                   |           |           |
| Subsurface contamination - MP1  | MP1 A  |                                     | -22,4    | 0,5                                   | 0,5       |           |
|                                 | MP1 C  | -22,4                               |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - MP2  | MP2 A  | -22,5                               | -22,5    | 1,2                                   | 1,3       |           |
|                                 |        |                                     |          | 1,4                                   |           |           |
| Subsurface contamination - MP5  | MP5 A  | -23,5                               | -23,3    | 1,1                                   | 1,2       |           |
|                                 |        |                                     |          | 1,3                                   |           |           |
|                                 | MP5 B  | -23,0                               |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - MP6  | MP6 A  | -23,2                               | -22,9    | 1,0                                   | 1,0       |           |
|                                 | MP6 C  | -22,6                               |          |                                       |           |           |
| Subsurface contamination - MP9  | MP9 A  | -23,3                               | -23,3    | 1,0                                   | 1,0       |           |
| Subsurface contamination - MP14 | MP14 A | -22,4                               | -22,4    | 0,6                                   | 0,6       |           |

Isotopsammensætningen for hvert prøvepunkt er i FIGUR 25 præsenteret i et x-y diagram ( $\delta^{13}\text{C}$  på x-aksen mod  $\delta^{37}\text{Cl}$  på y-aksen). Den grønne firkant markerer området for isotopsignaturen for nyligt produceret PCE. For hvert prøvepunkt er analyseusikkerheden ( $\pm 0,5$  for  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\pm 1$  for  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) markeret.



# Innovationsgaragen - Nord



- Range for manufactured source
- ▲ Subsurface contamination - MP1 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - MP2 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - MP5 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - MP6 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - MP9 - 2018
- ▲ Subsurface contamination - MP14 - 2018
- Indoor - IL1 - 2018
- Indoor - IL2 - 2018
- Indoor - IL4 - 2018
- Indoor - IL5 - 2018
- Indoor - IL6 - 2018
- Indoor - IL8 - 2018

**FIGUR 25.** Plot af isotopfraktionen (delta 13C på x-aksen mod delta 37Cl på y-aksen) for hvert prøvepunkt. Desuden markering af området for isotopfraktionen af nyligt produceret PCE. Trekantner viser isotopfraktionen i kildeområdet under gulv. Runder viser isotopfraktionen i indeklimaet.

Trekanterne viser isotopsignaturen for de seks prøver udtaget i poreluftforureningen. Isotopsignaturen for de seks poreluftprøver er overordnet den samme, se FIGUR 25. Isotopsammensætningen for kulstof er forskellig for sammensætningen i nyligt produceret PCE. Isotopsammensætningen for chlor ligger på kanten af området for nyligt produceret PCE. Det vurderes således, at der er sket delvis nedbrydning i kildeområdet, og at stofspecifik isotopanalyse er en egnet metode til differentiering af kilder til indeklimateforurening.

De runde markeringer viser isotopsignaturen for de seks indeklimatemålinger. Isotopsignaturen for de seks indeluftprøver er overordnet den samme. Som det fremgår af FIGUR 25 er isotopsammensætningen for både kulstof og chlor i indeluftprøverne sammenfaldende med isotopsammensætningen for poreluftprøverne. Dette er en tydelig indikation på, at den PCE, der påvises i indeluften, stammer fra indtrængende PCE fra kildeområdet under gulv, og at der ikke er nogen interne kilder til PCE forurening i bygningen.

## 9. Konklusioner på egnethed af stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting

På baggrund af de fem feltlokaliteter kan følgende konkluderes i forhold til egnetheden af metoderne stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting til vurdering af bidrag fra jordforurening versus interne kilder.

For TCE og PCE vurderes det, at stofs specifik isotopanalyse er en hurtig og præcis metode til at bestemme oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft.

På to af de fire lokaliteter (Bymidten og Amagerbrogade) er der indikationer på en væsentlig påvirkning af indeklimaet i boligerne med PCE fra interne kilder. I disse tilfælde aktiv renserridrift.

På den ene af de fire lokaliteter (Innovationsgaragen Nord) er der tydelige indikationer på en væsentlig påvirkning af indeklimaet fra jordforureningen.

På to af de fire lokaliteter (Bymidten og Innovationsgaragen Syd) er der indikationer på at indeklimaet er påvirket af bidrag fra både jordforureningen og fra interne kilder.

I bygningen Innovationsgaragen Syd, var der ikke kendte interne kilder til indeklimaforurening med PCE. På baggrund af de stofs specifikke isotopanalyser, blev det belyst, at der muligvis var en intern kilde i bygningen. Denne blev efterfølgende lokaliseret.

Forskellen på isotopforholdene for en intern kilde og for jordforurening på de fire ejendomme er meget lille. Isotopsignaturerne er dog signifikant forskellige på de ejendomme, hvor der er både en kendt intern kilde og en jordforurening.

For oliestoffer er der indikationer på, at stofs specifik isotopanalyse for kulstof i benzen kan bruges til at bestemme oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft. Der er dog kun udtaget prøver på en enkelt lokalitet, og der forelå kun resultater fra et beskedent antal analyser. Det var dog muligt, at trække væsentlige vurderinger ud af dette begrænsede datagrundlag, hvorfor metoden vurderes egnet. Det skal dog helt generelt overvejes, hvor vidt baggrundsniveauerne af andre kulbrinter i prøverne gør det muligt, at udføre stofs specifik isotopanalyse, da prøverne helst skal være relativt "rene".

Fingerprinting for kulbrinterne i en olieforurening vurderes ligeledes at være en brugbar metode til bestemmelse af oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft. Igen er der kun udtaget prøver på en enkelt lokalitet, men datagrundlaget for denne lokalitet var udmærket. På baggrund af disse data, var der indikationer på at oprindelsen af kulbrinterne i indeluften i beboelsen primært stammer fra interne kilder og er naturligt forekommende stoffer som pinen og limonen mfl.

På den ene af de fem lokaliteter (Innovationsgaragen Syd) er der, ud over luftprøver udtaget i kildeområdet, udtaget en vandprøve fra det forurenede grundvand. Isotopsignaturen for poreluftprøver og grundvandsprøve er ikke signifikant forskellige. I dette tilfælde, er det således muligt, at udtage grundvandsprøver til vurdering af oprindelsen af forurening til indeluften, i stedet for poreluftprøver. Dette kan være en fordel, da grundvandsprøver er betydeligt lettere

at udtage og billigere at få analyseret. Der er dog ikke belæg for at vurdere, at dette altid er tilfældet, i det processor som faseovergang fra vand til poreluft, diffusion igennem umættet zone osv. kan ændre på isotopsammensætningen.

Det er en fordel ved vurdering af oprindelsen af forureningsstoffer i indeluften, at udføre stofspecifik isotopanalyse for flere atomer f.eks. både kulstof og chlor. Dette er muligt for de chlorerede opløsningsmidler TCE og PCE. På flere af lokaliteterne ses kun en signifikant forskel mellem prøverne for det ene af de to atomer, hvorfor det ikke ville have været muligt, at lave de samme vurderinger, hvis der kun var udført analyse på det andet atom.

For olieforureninger er det en fordel at udføre både stofspecifik isotopanalyse for kulstof i benzen og at udføre fingerprinting på kulbrintesammensætningen. Dette vil give mulighed for at vurdere på to "lines of evidence" og på den måde gøre vurderingerne stærkere. Et alternativ er at udføre stofspecifik isotopanalyse på både kulstof og brint (H), men dette er ikke afprøvet i dette projekt.

Data fra stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting danner således grundlag for en hurtig og ikke invasiv strategi til risikovurdering over for indtrængning af forureningsstoffer fra en underliggende jordforurening til indeklimaet i en bolig. Metoderne kan dog ikke give en specifik vurdering af andelen af forurening fra henholdsvis jordforurening og intern kilde. Det er således ikke muligt at vurdere om bidraget fra jordforureningen, præcist er under 30 %. Endvidere kræver undersøgelsesmetoden en specialuddannelse af prøvetageren.

Udtagning af prøver til stofspecifik isotopanalyse på de fem ejendomme og særligt gentagelsen af prøvetagningen på Bymidten, har ført til udviklingen af en velfungerende procedure for prøvetagning til stofspecifik isotopanalyse. Prøvetagningen er en videreudvikling af den nuværende prøvetagningsprocedure for aktive luftprøver i Danmark og bygger således videre på velkendte metoder.

# 10. Den alternative undersøgelsesstrategi

På baggrund af litteraturgennemgangen, undersøgelserne på de fem feltlokaliteter og afprøvnings af de avancerede undersøgelsesmetoder stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting opstilles fordele og ulemper ved henholdsvis den traditionelle udefra og ind undersøgelsesstrategi og den alternative undersøgelsesstrategi. Desuden vurderes det, hvorvidt den alternative undersøgelsesstrategi, her under de alternative undersøgelsesmetoder stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting, er egnet til at indgå i administreringen af jordforureningsloven. Endelig er der formuleret en række anbefalinger til brug af metoden.

## 10.1 Traditionel versus alternativ undersøgelsesstrategi

Nedenfor er fordele og ulemper beskrevet i forhold til udtagning af prøver, gener for grundejer, tid til første risikovurdering, økonomi og fortolkning. Konklusionerne er opsummeret i TABEL 13.

Den traditionelle udefra og ind undersøgelsesstrategi bygger på udtagning af et betydeligt antal prøver, herunder både jord-, grundvands og poreluftprøver. Særligt jord og grundvandsprøver kræver en del, i det der skal udføres borearbejde. Det er således en ulempe ved denne strategi, at omfanget af undersøgelsen er betydeligt. Desuden er der betydelige gener for grundejer, fordi selve prøvetagningen strækker sig over en længere periode. Det larmer, når man udfører borearbejde, og det kan være vanskeligt at udføre i private haver uden at efterlade sig spor. Endelig skal der udføres et stort antal poreluftprøver igennem gulv, hvilket ligeledes er vanskeligt at reetablere tilfredsstillende for grundejer. Modsat er det en stor fordel ved denne traditionelle undersøgelsesstrategi, at alle prøvetagningsprocedurer er velkendte, gennemprøvede og følger fastsatte retningslinjer. En gennemsnitlig traditionel afgrænsende indeklimaundersøgelse tager omkring et halvt år fra opstart af feltarbejde til risikovurderingen er udarbejdet. De mange prøver skal udtages, analyserne skal udføres, og der skal udarbejdes en konceptuel forståelse, som ligger til grund for risikovurderingen. Tiden for risikovurderingen er således en ulempe ved den traditionelle undersøgelsesstrategi. Til gengæld er det en væsentlig fordel ved denne traditionelle undersøgelsesstrategi, at der udarbejdes en konceptuel forståelse af jordforureningen, indeklimateforureningen samt indtrængningsvejene fra jordforurening til indeklima. Særligt viden om indtrængningsveje er væsentlige, da denne forståelse kan ligge til grund for forslag til afværgeforanstaltninger i f.eks. et afværgeprogram.

Den alternative undersøgelsesstrategi er todelt. Den bygger på en indledende screening af forureningsniveauet i indeklimaet i boligen. Hvis der ikke påvises indhold af forureningsstoffer over Miljøstyrelsens afdampningskriterier i indeluften, vurderes der ikke at være en risiko i forhold til boligen. En meget væsentlig fordel ved den indledende screening er det meget lave antal prøver og det faktum, at der kun er tale om indeluftprøver, som kan udtages næsten fuldstændig uden gene for grundejer. For nogle ejendomme vil kortlægningen af boligen kunne fjernes uden yderligere undersøgelser. En betydelig fordel ved den indledende screening er, at den første risikovurdering kan foreligge omkring en måned efter opstart af undersøgelsen, da der kun skal udtages indeluftprøver. I de fleste tilfælde, vil en sikker vurdering dog kræve to indeklimatemålinger, hvorfor den endelige vurdering kan være udarbejdet efter 3-4 måneder, hvis prøvetagning kan foregå i vinterhalvåret. Det er desuden en fordel, at vurderingen af prøveresultaterne er meget simpel, i det vurderingen blot bygger på en sammenligning med Miljøstyrelsens afdampningskriterier. Endelig vil denne undersøgelse ikke koste betydeligt.

**TABEL 13.** Fordele og ulemper ved den traditionelle udefra og ind undersøgelsesstrategi versus den alternative undersøgelsesstrategi.

| Traditionel undersøgelsesstrategi   | Alternativ undersøgelsesstrategi   |
|---|--|
| <b>Udtagning af prøver</b>  |  |
| Der skal udtages et betydeligt antal prøver.  | Der skal udtages færre prøver.   |
| Der skal ofte udtages prøver af både jord, vand og poreluft. Som minimum udtages prøver af poreluft under gulvkonstruktionen.   | Der skal kun udtages luftprøver  |
| Prøverne udtages efter standardprocedure som er kendt og gennemprøvet.  | Indledende prøvetagning er meget simpel fx ORSA rør. Efterfølgende prøvetagning til stofspecifik isotopanalyse er avanceret og kræver specialuddannelse af prøvetager.   |
| <b>Gener for grundejer</b>  |  |
| Der skal ofte udføres betydeligt feltarbejde inklusiv borearbejde, hvilket tager tid.   | Til den indledende screening skal der udtages et beskedent antal indeluftprøver og indeluftprøver udtages uden gene for grundejer.   |
| Der skal ofte udføres borearbejde som larmer og kan være vanskeligt at udføre i private haver uden at efterlade sig spor.   | Til den udvidede risikovurdering i forhold til bolig skal der udtages enkelte poreluftprøver under gulv, kan være vanskeligt at reetablere tilfredsstillende. Der skal udtages færre poreluftprøver end ved den traditionelle strategi. Herudover skal der udføres en byggeteknisk gennemgang. |
| Der skal udtages et betydeligt antal poreluftprøver under gulv, hvilket kan være vanskeligt at reetablere tilfredsstillende. Herudover skal der udføres en byggeteknisk gennemgang.                         |  |
| <b>Tid til første risikovurdering</b>   |  |
| Der skal udføres et betydeligt antal analyser, før det er muligt at udføre risikovurdering i forhold til bolig, hvorfor denne vurdering typisk foreligger omkring et halvt år efter undersøgelsens opstart. | Den indledende screening udføres på baggrund af et beskedent antal analyser og risikovurdering i forhold til bolig kan således foreligge omkring en måned efter undersøgelsens opstart.  |
|   | En udvidet risikovurdering i forhold til bolig kræver flere prøver og avancerede analyser, hvorfor den udvidede risikovurdering kan foreligge omkring et halvt år efter undersøgelsens opstart.  |
| <b>Økonomi</b>  |  |
|   | Den indledende screening baseret på indeluftprøver koster ikke betydeligt.   |
|   | Den udvidede risikovurdering i forhold til bolig baseret på avancerede analyser ligger økonomisk på niveau med en traditionel undersøgelse.  |
| <b>Fortolkning</b>  |  |
| Risikovurderingen i forhold til boligen bygger på en samlet vurdering af den konceptuelle forståelse af jordforureningen, indeklimaforureningen og indtrængningsveje.                                       | Den indledende screening er en simpel vurdering af om indeluftkoncentrationen er over eller under Miljøstyrelsens afdampningskriterier.  |
| Forureningsundersøgelsen giver også et billede af indtrængningsveje.  | Den udvidede risikovurdering i forhold til boligen er avanceret og kræver særlig viden i forhold til stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting  |
|   | Det er ikke muligt på baggrund af stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting at komme med en specifik vurdering af andelen af forurening fra henholdsvis jordforurening og interne kilder.   |

Hvis der derimod er indhold i indeluften over eller tæt på Miljøstyrelsens afdampningskriterier kan der være en risiko, og det er nødvendigt at udføre yderligere avancerede analyser til adskillelse af bidrag fra jordforureningen og fra eventuelle interne kilder. Disse analyser kræver udtagning af poreluftprøver og indeluftprøver. Der skal udtages færre poreluftprøver, end ved den traditionelle undersøgelsesmetode, men det kan stadig være vanskeligt at reetablere prøvetagningsstederne tilfredsstillende. Det er ikke nødvendigt at udtage jord- og grundvandsprøver, og der skal således ikke udføres borearbejde. Dette er en væsentlig fordel ved den alternative undersøgelsesstrategi. Det er derimod en ulempe ved den alternative undersøgelsesmetode, at udtagning af prøver til stofspecifik isotopanalyse adskiller sig fra de almindeligt kendte prøvetagninger og kræver specialuddannelse af prøvetageren. Hvis der skal udføres udvidet risikovurdering ved adskillelse af bidrag fra jordforurening og interne kilder, vil der gå omkring et halvt år fra prøverne udtages, til risikovurderingen foreligger. Der skal udføres avancerede analyser, og der skal vurderes på resultaterne. Den udvidede undersøgelse i den alternative undersøgelsesstrategi kræver særlig viden i forhold til stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting, hvilket er en ulempe ved denne strategi. Det er vigtigt at holde sig for øje, at det ikke på baggrund af stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting er muligt at komme med en specifik vurdering af andelen af forurening fra henholdsvis jordforurening og interne kilder. Den udvidede risikovurdering vurderes økonomisk at være på niveau med en traditionel afgrænsende indeklimateundersøgelse.

## 10.2 Potentiale

Det vurderes, at der er et betydeligt potentiale for en videreudvikling af den alternative undersøgelsesstrategi. Metoderne stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting er effektive til at vurdere oprindelsen af forureningsstoffer i indeluften. Disse metoder gør det muligt at udtage indeluftprøver for efterfølgende om nødvendigt at bestemme oprindelsen af de påviste forureningsindhold. Det skal dog bemærkes, at hverken stofspecifik isotopanalyse eller fingerprinting umiddelbart kan bruges til at vurdere det eksakte bidrag fra henholdsvis jordforurening og interne kilder til indeluften. Fingerprinting kan dog bruges semikvantitativt til at vurdere de enkelte stoffers bidrag til et samlet TVOC indhold. Det er således ikke muligt at vurdere om bidraget fra jordforureningen f.eks. præcist er under 30 %. Desuden er det med disse metoder som med alle andre metoder, at vurderinger bør baseres på flere "lines of evidence". Metoderne kan således ikke stå alene.

Et potentiale i den alternative undersøgelsesstrategi ligger i muligheden for, at et antal ejendomme kan undgå af kortlægningen baseret på indeluftprøver alene (hvis dette er den eneste betydende risiko) og herved at undgå langvarige og bekostelige forureningsundersøgelser på lokaliteter, hvor det efterfølgende påvises, at der ikke er risiko for indeklimate i bolig. Et andet potentiale er, at der relativt hurtigt kan ske en afklaring af risikoforholdene i de undersøgte boliger. Det vurderes, at den alternative undersøgelsesstrategi bør videreudvikles både i forhold til administrative udfordringer og metoder til vurdering af oprindelsen af forurening i indeluften.

## 10.3 Anbefalinger

- Som indledende screening udtages udelukkende indeluftprøver. Disse bør udtages i alle rum på alle etager.
- Hvis indholdet i indeluften er højere end Miljøstyrelsens afdampningskriterier, og der samtidig er mistanke om interne kilder til forurening i boligen, bør der udføres stofspecifik isotopanalyse og eventuelt fingerprinting (ved overskridelser af TVOC kriteriet), således at det kan vurderes, hvorvidt der er et bidrag fra de interne kilder til de påviste indhold i indeluften.
- Hvis der er tale om en forurening med chlorerede opløsningsmidler (TCE og PCE) bør der udføres stofspecifik isotopanalyse for både kulstof og chlor atomer.
- Hvis der er tale om en forurening med oliestoffer, bør der udføres både stofspecifik isotopanalyse for kulstof i benzen og fingerprinting for TVOC.

- Ved stofs specifik isotopanalyse og fingerprinting skal der udtages luftprøver fra både jordforureningen, indeluft og hvis muligt den interne kilde.
- Ved stofs specifik isotopanalyse er det vigtigt, at prøvetagningen udføres velovervejet og grundigt.



# Referencer

- /1/ Miljøstyrelsen (1998): Vejledning i oprydning på lokaliteter, Vejledning 6 (Hovedbind) og Vejledning 7 (Appendix). Udgivet af Miljøstyrelsen.
- /2/ Beckley, L., McHugh, T., Kuder, T., Philip, P. (2014): Use of compound-specific stable isotopes to distinguish between vapor intrusion and indoor sources of VOCs – Users guide for CSIA protocol. Guidance document, ESTCP project ER-201025. Udgivet af SERDP/ESTCP.
- /3/ Poulsen, S.R.; Drever, J.I. (1999): Stable Isotope (C, Cl, and H) Fractionation during Vaporization of Trichloroethylene, *Environmental Science & Technology*, vol. 33, No. 20, pp. 3689-3694
- /4/ Bouchard, D. et al. (2008): Carbon isotope Fractionation during Diffusion and Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons in the unsaturated Zone: Field Experiment at Værløse Airbase, Denmark, and Modeling, *Environmental Science and Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 596-601
- /5/ Beckley, L.; McHugh, T.; Philip, P. (2016): Utility of Compound-Specific Isotop Analysis for Vapor Intrusion Investigations, *Groundwater Monitoring & Remediation*, vol. 36, no. 4, pp. 31-40
- /6/ Hunkeler, D.; Meckenstock, R.U.; Lollar, B.; Schmidt, T.C.; Wilson, J.T. (2009): A Guide for Assessing Biodegradation and Source Identification of Organic Groundwater Contaminants Using Compound Specific Isotope Analysis (CSIA). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-08/148
- /7/ Cincinelli, A.; Pieri, F.; Zhang, Y.; Seed, M.; Jones, K.C. (2012): Compound Specific Isotope Analysis (CSIA) for chlorine and bromine: A review of techniques and applications to elucidate environmental sources and processes, *Environmental Pollution*, vol. 169, pp. 112-127
- /8/ McHugh, T.; Kuder, T.; Fiorenza, S.; Gorder, K.; Dettenmaier, E.; Philip, P. (2011): Application of CSIA to Distinguish Between Vapor Intrusion and Indoor Sources of VOCs, *Environmental Science and Technology*, vol. 45, no. 14, pp. 5952-5958
- /9/ Orbicon A/S (2018): CSIA Klintehøj Vænge – Stofspecifikke Isortopanalyser til vurdering af forureningsoprindelse, Region Hovedstaden
- /10/ Hunkeler, D. et al. (2011): Carbon and Chlorine Isotope Ratios of Chlorinated Ethenes Migrating through a Thick Unsaturated Zone of a Sandy Aquifer, *Environmental Science and Technology*, vol. 45, pp. 8247-8253
- /11/ Sherwood Lollar, B. et al. (2001): Stable Carbon Isotope Evidence for Intrinsic Bioremediation of Tetrachloroethene and Trichloroethene at Area 6, Dover Air Force Base, *Environmental Science and Technology*, vol. 35, pp. 261-269
- /12/ Jeannotat, S.; Hunkeler, D. (2013): Can Soil Gas VOCs be Related to Groundwater Plumes Based on Their Isotope Signature? *Environmental Science and Technology*, vol. 47, pp. 12115-12122

- /13/ Milosevic, N. (2013): Combined isotope and enantiomer analysis to assess the fate of phenoxy acids in a heterogeneous geologic setting at an old landfill, *Water Research*, vol. 47, pp. 637-649
- /14/ Elsner, M. (-): For Better Site Assessments and Fate Studies in the Environment: The Benefit of Multielement Compound-Specific Isotope Analysis, HelmholtzZentrum münchen, German Research Center for Environmental Health, Powerpoint
- /15/ EMD Team Fact Sheet (2011): Compound Specific Isotope Analysis, ITRC Environmental Molecular Diagnostics Team
- /16/ Klisch, M.; Kuder, T.; Paul Philp, R.; McHugh, T.E. (2012): Validation of adsorbents for sample preconcentration in compound-specific isotope analysis of common vapor intrusion pollutants, *Journal of Chromatography A*, vol. 1270, pp. 20-27
- /17/ Meckenstock, R.U.; Morasch, B.; Griebler C.; Richnow, H.H. (2004): Stable isotope fractionation analysis as a tool to monitor biodegradation in contaminated aquifers, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 75, pp. 215– 255
- /18/ McHugh, T. et al. (-): Use of CSIA to Distinguish Between Vapor Intrusion and Indoor Sources of VOCs
- /19/ Hunkeler, D. (2011): Assessing chlorinated ethene degradation in a large scale contaminant plume by dual carbon–chlorine isotope analysis and quantitative PCR, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 119, pp. 69–79
- /20/ Bouchard, D.; Hunkeler, D. (2014): Solvent-based dissolution method to sample gas-phase volatile organic compounds for compound-specific isotope analysis, *Journal of Chromatography A*, vol. 1325, pp. 16-22
- /21/ Kuder, T. (2016-2018): Personlig kommunikation med Trine Skov Jepsen.
- /22/ Vitzthum von Eckstaedt, C.D.; Grice, K.; Ioppolo-Armanios, M.; Kelly, D.; Gibberd, M. (2012): Compound specific carbon and hydrogen stable isotope analyses of volatile organic compounds in various emissions of combustion processes, *Chemosphere*, vol. 89, pp. 1407-1413
- /23/ Harris, D.C. (2007): *Quantitative Chemical Analysis*, Seventh Edition
- /24/ Pub@Chem (2018): Alpha-pinene, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/alpha-pinene#section=Top>, 09-08-2018
- /25/ Pub@Chem (2018): Beta-pinene, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/beta-pinene>, 09-08-2018
- /26/ Wikipedia (2018): Carene, <https://en.wikipedia.org/wiki/Carene>, 09-08-2018
- /27/ Wikipedia (2018): Limonen, <https://en.wikipedia.org/wiki/Limonene>, 09-08-2018
- /28/ Pub@Chem (2018): P-Cymene, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/p-cymene#section=Use-and-Manufacturing>, 09-08-2018
- /29/ The Danish Environmental Protection Agency (2018): Hydrocarbon background levels in Denmark - Outdoor and indoor air, Environmental Project No. 2019.

# **Bilag 1. Feltjournaler for prøver til stofs specifik isotopanalyse**

**Bilag 1.1 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Gladsaxevej (2016)**

| Location | Sample | Description | Benzen |  | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (timer) | Practical Time of sampling (hours) |  | Amount of tubes |
|----------|--------|-------------|--------|--|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|-----------------|
| GL       | ORSA2  | Kælder      | 11     |  | 50               | 4,545455          | 4                  | 18,18182              |                              | 0,1          | 181,8182               |                                  | 3,030303                 | 3                                  |  | 2               |
| GL       | ORSA2  | Stue        | 4,8    |  | 50               | 10,41667          | 4                  | 41,66667              |                              | 0,1          | 416,6667               |                                  | 6,944444                 | 7                                  |  | 2               |
| GL       | ORSA2  | 1.sal       | 2,6    |  | 50               | 19,23077          | 4                  | 76,92308              |                              | 0,1          | 769,2308               |                                  | 12,82051                 | 13                                 |  | 2               |
| GL       | PL2    | Fyrrum      | 2,3    |  | 50               | 21,73913          | 4                  | 86,95652              |                              | 0,1          | 869,5652               |                                  | 14,49275                 | 15                                 |  | 2               |
| GL       | PL3    | Fyrrum      | 2,7    |  | 50               | 18,51852          | 4                  | 74,07407              |                              | 0,1          | 740,7407               |                                  | 12,34568                 | 12                                 |  | 2               |

**Bilag 1.2 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2016)**

| Location | Sample | Description       | PCE    | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (hours) | Practical Time of sampling (hours) | Amount of tubes |
|----------|--------|-------------------|--------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|
| BY       | H      | Lejlighed 1. sal  | 8,3    | 100              | 12,04819          | 4                  | 48,19277              |                              | 0,1          | 481,9277               |                                  | 8,032129                 | 7                                  | 3               |
| BY       | 11     | Lejlighed 2. sal  | 9,3    | 100              | 10,75269          | 4                  | 43,01075              |                              | 0,1          | 430,1075               |                                  | 7,168459                 | 7                                  | 3               |
| BY       | I/L    | Mellemgang 1. sal | 15     | 100              | 6,666667          | 4                  | 26,66667              |                              | 0,1          | 266,6667               |                                  | 4,444444                 | 5                                  | 3               |
| BY       | 12     | Lejlighed 2. sal  | 4,3    | 100              | 23,25581          | 4                  | 93,02326              |                              | 0,1          | 930,2326               |                                  | 15,50388                 | 16                                 | 3               |
| BY       | 15     | kælder            | 100    | 2250             | 22,5              | 0,5                | 11,25                 |                              | 0,1          | 112,5                  |                                  | 1,875                    | 2                                  | 3               |
| BY       | 20     | Renseri           | 1400   | 2250             | 1,607143          | 0,5                | 0,803571              |                              | 0,1          | 8,035714               | 10                               | 0,133929                 |                                    | 3               |
| BY       | PL122  | Renseri           | 61000  | 2250             | 0,036885          | 0,5                | 0,018443              | 20                           | 0,1          | 0,184426               |                                  | 0,003074                 |                                    | 3               |
| BY       | PL121  | Renseri           | 100000 | 2250             | 0,0225            | 0,5                | 0,01125               | 10                           | 0,1          | 0,1125                 |                                  | 0,001875                 |                                    | 3               |
| BY       | PL134  | gang              | 48000  | 2250             | 0,046875          | 0,5                | 0,023438              | 20                           | 0,1          | 0,234375               |                                  | 0,003906                 |                                    | 3               |

**Bilag 1.3 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2017 – 1. prøvetagning)**

| Location | Sample | PCE µg/m3 = ng/l (FeltGC - Right before sampling) | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | New sample volume (ml) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (hours) | Practical Time of sampling (hours) | Name of Tubes A | Name of Tubes B | Name of Tubes C | PCE mass µg/tube (From lab) | PCE mass ng/tube (From lab) |
|----------|--------|---|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| BY       | H/G    | 0   | 100              | #DIVISION/0!      | 4                  | #####                 | #####                  |                              | 0,1          | #####                  |                                  | #####                    | 16                                 | J03765***       | M17685**        | M17756****      | 0,12                        | 120                         |
| BY       | K/L    | 150   | 100              | 0,666666667       | 4                  | 2,66666667            | 2666,66667             |                              | 0,1          | 26,6666667             | 27                               | 0,44444444               |                                    | A046021         | A046012         | A046205         | 0,51                        | 510                         |
| BY       | 15     | 4   | 100              | 25                | 4                  | 100                   | 100000                 |                              | 0,1          | 1000                   |                                  | 16,6666667               | 16                                 | A045983         | A046096         | A046124         | 6,8                         | 6800                        |
| BY       | 21     | 1160  | 2250             | 1,939655172       | 0,5                | 0,96982759            | 969,827586             |                              | 0,1          | 9,69827586             | 10                               | 0,16163793               |                                    | A046011         | A046013         | A045968         | 1,5                         | 1500                        |
| BY       | 20     | 2440  | 2250             | 0,922131148       | 0,5                | 0,46106557            | 461,065574             |                              | 0,1          | 4,61065574             | 5                                | 0,07684426               |                                    | A046234         | A045976         | A046010         | 1,8                         | 1800                        |
| BY       | B104   | 2840000   | 2250             | 0,000792254       | 0,5                | 0,00039613            | 0,39612676             | 0,5                          | 0,1          | 0,00396127             |                                  | 6,6021E-05               |                                    | J07356          | L00982          | M17854          | -                           | #VÆRDI!                     |
| BY       | PL121  | 54400   | 2250             | 0,041360294       | 0,5                | 0,02068015            | 20,6801471             | 20                           | 0,1          | 0,20680147             |                                  | 0,00344669               |                                    | J03664          | M17688          | M17720*         | -                           | #VÆRDI!                     |
| BY       | PL134  | 66300   | 2250             | 0,033936652       | 0,5                | 0,01696833            | 16,9683258             | 20                           | 0,1          | 0,16968326             |                                  | 0,00282805               |                                    | K08419          | M17681          | M17682          | 0,05                        | 50                          |
| By       | Gr     | 11  | 100              | 9,090909091       | 4                  | 36,3636364            | 36363,6364             |                              | 0,1          | 363,636364             | 360                              | 6,06060606               |                                    | A045842         | L10198          | L10205          | 0,53                        | 530                         |

\* Tube broke while handling

Regarding Sample H/G - The pumps should have run for 16 hours. The pumps stopped at different times - Se below:

\*\* Air collected in 578 minuttes

\*\*\* Air collected in 654 minuttes

\*\*\*\* Air collected in 960 minuttes

Tube for concentration at Eurofins - Air collected in 567 minuttes - 0,12 µg/tube = 120 ng/tube

**Bilag 1.4 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Bymidten (2017 – 2. prøvetagning)**

| Location | Sample | PCE µg/m <sup>3</sup> = ng/l | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | New sample volume (ml) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Name of Tubes A | Name of Tubes B | Name of Tubes C | PCE mass µg/rør (From lab) | PCE mass ng/rør (From lab) |
|----------|--------|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| BY       | B104   | 470000                       | 2250             | 0,004787234       | 0,5                | 0,00239362            | 2,39361702             | 2                            | 0,1          | M17749          | M16542          | M17687          | 0,083                      | 83                         |
| BY       | B104   | 100000                       | 2250             | 0,0225            | 0,5                | 0,01125               | 11,25                  | 10                           | 0,1          | M17752          | M17721          | L00984          | 0,28                       | 280                        |
| BY       | B104   | 50000                        | 2250             | 0,045             | 0,5                | 0,0225                | 22,5                   | 20                           | 0,1          | K08458          | K08417          | M17689          | 5,6                        | 5600                       |
| BY       | PL121  | 775000                       | 2250             | 0,002903226       | 0,5                | 0,00145161            | 1,4516129              | 5                            | 0,1          | M17818          | L10172          | M17787          | 0,028                      | 28                         |
| BY       | PL121  | 100000                       | 2250             | 0,0225            | 0,5                | 0,01125               | 11,25                  | 20                           | 0,1          | J06979          | J04853          | J03973          | 0,13                       | 130                        |
| BY       | PL121  | 15000                        | 2250             | 0,15              | 0,5                | 0,075                 | 75                     | 75                           | 0,1          | K08449          | L09450          | L01050          | 0,69                       | 690                        |
| BY       | PL134  | 48000                        | 2250             | 0,046875          | 0,5                | 0,0234375             | 23,4375                | 20                           | 0,1          | K08457          | L01019          | J04342          | 0,12                       | 120                        |
| BY       | PL134  | 29000                        | 2250             | 0,077586207       | 0,5                | 0,0387931             | 38,7931034             | 40                           | 0,1          | J03703          | J03696          | K08444          | 0,31                       | 310                        |
| BY       | PL134  | 2500                         | 2250             | 0,9               | 0,5                | 0,45                  | 450                    | 100                          | 0,1          | L00950          | L09449          | K08426          | 0,8                        | 800                        |

**Bilag 1.5 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Amagerbrogade (2016)**

| Location | Sample | Description | PCE   | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (hours) | Practical Time of sampling (hours) | Amount of tubes |
|----------|--------|-------------|-------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|
| A        | PL42   | Damprum     | 74000 | 2250             | 0,030405          | 0,5                | 0,015203              | 20                           | 0,1          | 0,152027               |                                  | 0,002534                 |                                    | 3               |
| A        | PL101  | Damprum     | 15000 | 2250             | 0,15              | 0,5                | 0,075                 | 100                          | 0,1          | 0,75                   |                                  | 0,0125                   |                                    | 3               |
| A        |        | Renseri     | 1000  | 2250             | 2,25              | 0,5                | 1,125                 |                              | 0,1          | 11,25                  | 10                               | 0,1875                   |                                    | 3               |
| A        | 3      | A, 1.th     | 4,4   | 100              | 22,72727          | 4                  | 90,90909              |                              | 0,1          | 909,0909               |                                  | 15,15152                 | 16                                 | 2               |
| A        | 7      | A, 1.th     | 4,3   | 100              | 23,25581          | 4                  | 93,02326              |                              | 0,1          | 930,2326               |                                  | 15,50388                 | 16                                 | 3               |
| A        | 3      | N, 1.th     | 2     | 100              | 50                | 2                  | 100                   |                              | 0,1          | 1000                   |                                  | 16,66667                 | 16                                 | 3               |



**Bilag 1.6 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Innovationsgaragen syd (2016)**

| Location | Sample | Description          | PCE  |  | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (hours) | Practical Time of sampling (hours) |  | Amount of tubes |
|----------|--------|----------------------|------|--|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|-----------------|
| IG       | IL3    | Bygning syd - Zone 1 | 140  |  | 100              | 0,714286          | 4                  | 2,857143              |                              | 0,1          | 28,57143               | 30                               | 0,47619                  |                                    |  | 3               |
| IG       | IL4    | Bygning syd - Zone 2 | 95   |  | 100              | 1,052632          | 4                  | 4,210526              |                              | 0,1          | 42,10526               | 40                               | 0,701754                 |                                    |  | 3               |
| IG       | PL1    | Bygning syd - Zone 1 | 6700 |  | 100              | 0,014925          | 4                  | 0,059701              | 100                          | 0,1          | 0,597015               |                                  | 0,00995                  |                                    |  | 3               |
| IG       | PL11   | Bygning syd - Zone 2 | 7300 |  | 100              | 0,013699          | 4                  | 0,054795              | 100                          | 0,1          | 0,547945               |                                  | 0,009132                 |                                    |  | 3               |

**Bilag 1.7 Feltjournal for prøver til stofspecifik isotopanalyse – Innovationsgaragen nord (2017)**

| Location | Sample | PCE µg/m3 = ng/l (FeltGC - Right before sampling) | Target mass (ng) | Sample volume (l) | Uncertainty factor | New sample volume (l) | New sample volume (ml) | practical sample volume (ml) | Flow (l/min) | Time of sampling (min) | Practical Time of sampling (min) | Time of sampling (hours) | Practical Time of sampling (hours) | Name of Tubes A | Name of Tubes B | Name of Tubes C | PCE mass µg/rør (From lab) | PCE mass ng/rør (From lab) |
|----------|--------|---|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| IG-nord  | IL1    | 635   | 2250             | 3,543307          | 0,5                | 1,771654              | 1771,654               |                              | 0,1          | 17,71654               | 20                               | 0,295276                 |                                    | A045955         | A046211         | A046241         | 2                          | 2000                       |
| IG-nord  | IL2    | 484   | 2250             | 4,64876           | 0,5                | 2,32438               | 2324,38                |                              | 0,1          | 23,2438                | 20                               | 0,387397                 |                                    | A045996         | A046008         | A046020         | 2                          | 2000                       |
| IG-nord  | IL4    | 406   | 2250             | 5,541872          | 0,5                | 2,770936              | 2770,936               |                              | 0,1          | 27,70936               | 30                               | 0,461823                 |                                    | A045987         | A046209         | A046044         | 3,5                        | 3500                       |
| IG-nord  | IL5    | 463   | 2250             | 4,859611          | 0,5                | 2,429806              | 2429,806               |                              | 0,1          | 24,29806               | 25                               | 0,404968                 |                                    | A045819         | A046206         | A046148         | 2,9                        | 2900                       |
| IG-nord  | IL6    | 578   | 2250             | 3,892734          | 0,5                | 1,946367              | 1946,367               |                              | 0,1          | 19,46367               | 20                               | 0,324394                 |                                    | A046025         | A046236         | A046121         | 1,9                        | 1900                       |
| IG-nord  | IL8    | 174   | 2250             | 12,93103          | 0,5                | 6,465517              | 6465,517               |                              | 0,1          | 64,65517               |                                  | 1,077586                 | 1                                  | A046248         | A046202         | A046226         | 2,3                        | 2300                       |
| IG-nord  | MP1    | 403   | 2250             | 5,583127          | 0,5                | 2,791563              | 2791,563               |                              | 0,1          | 27,91563               | 30                               | 0,465261                 |                                    | A045961         | A045964         | A046145         | 1,6                        | 1600                       |
| IG-nord  | MP14   | 2430  | 2250             | 0,925926          | 0,5                | 0,462963              | 462,963                |                              | 0,1          | 4,62963                | 5                                | 0,07716                  |                                    | A046237         | A045958         | A048140         | 1,5                        | 1500                       |
| IG-nord  | MP9    | 44500   | 2250             | 0,050562          | 0,5                | 0,025281              | 25,2809                | 20                           | 0,1          | 0,252809               |                                  | 0,004213                 |                                    | A046223         | A046246         | A045990         | 0,74                       | 740                        |
| IG-nord  | MP6    | 53800   | 2250             | 0,041822          | 0,5                | 0,020911              | 20,91078               | 20                           | 0,1          | 0,209108               |                                  | 0,003485                 |                                    | A046238         | A045967         | A046250         | 0,83                       | 830                        |
| IG-nord  | MP5    | 58300   | 2250             | 0,038593          | 0,5                | 0,019297              | 19,29674               | 20                           | 0,1          | 0,192967               |                                  | 0,003216                 |                                    | A048115         | A048141         | A046099         | 2                          | 2000                       |
| IG-nord  | MP2    | 5580  | 2250             | 0,403226          | 0,5                | 0,201613              | 201,6129               | 100                          | 0,1          | 2,016129               |                                  | 0,033602                 |                                    | A046210         | A048098         | A046005         | 2,4                        | 2400                       |

## Bilag 2. Telefonnotat – analyselaboratorier

| Forespurgt   | Dato  | Hvordan                | Svar  | Bemærkning  |
|--|-------|------------------------|-------|---|
| Eurofins   | 22-09 | Mail                   | 23-09 | Kan ikke, hverken internationalt eller her hjemme   |
| Højvang  | 21-09 | Telefon                | 21-09 | Kan ikke. Kender teknikkerne men mangler maskinen til at udføre analysen  |
| ALS  | 30-09 | Mail                   | 03-10 | Har spurgt deres isotop laboratorie i Luleå. De kan ikke lave analyser på de adspurgte isotoper.  |
| Mette Broholm  | 19-09 | Mail                   | 19-09 | Foreslår Isodetect  |
| Microbial Insights   | 30-09 | Mail                   |       | Intet svar  |
| Isodetect  | 30-09 | Mail                   | 04-10 | Vil kigge nærmere på metoden. Vender tilbage indenfor et par dage.  |
|  | 04-10 | Mail m. konc. Og antal | 07-10 | De er usikre på om det vil lykkes ved lave koncentrationer. De foreslår opkoncentrering osv. Men skal bruge en del tid og økonomi på at udvikle metoden. – Sender os videre til Tomasz Kuder.<br><br>De regner med at kunne køre analysen ved højere koncentrationer.<br><br>Vil evt. bruge tid på at udvikle metoden, hvis der kommer flere projekter. |
| Helmholtz centrum München  | 30-09 | Mail                   | 04-10 | Sendt mig videre til Isodetect  |
| EAWAG, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology | 30-09 | Mail                   | 30-09 | Kan ikke på luft<br><br>Foreslår Daniel Hunkeler og Isodetect   |
| University of Waterloo   | 30-09 | Mail                   |       | Intet svar  |
| UNINE, University of Neuchâtel                                   | 30-09 | Mail                   | 30-09 | Kan på forskningsniveau. Spørger efter koncentrationer og antal.  |
|  | 03-10 | Mail m. konc. Og antal |       |   |
| University of Oklahoma   | 03-10 | Mail                   | 10-08 | Kan lave analyserne med 4 ugers analysetid  |
|  | 03-10 | Mail m. konc. Og antal | 05-10 | Mail med beskrivelse af prøveudtagning, priser og analysetid.   |

# Bilag 3. Fingerprinting - De højeste peaks

## Bilag 3.1 De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften på 1. sal

| File number | Sample ID   | Peak # | Compound name                      |
|-------------|-------------|--------|------------------------------------|
| 8567        | GL, 1 SAL B | 1      | Acetic acid                        |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 2      | Toluen                             |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 3      | m/p-Xylen                          |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 4      | o-Xylen                            |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 5      | alpha-Pinen                        |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 6      | beta-Pinen                         |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 7      | Trimethylbenzen isomer (C3-Benzen) |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 8      | Cymen                              |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 9      | Limonen                            |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 10     | Isopropenyltoluen                  |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 11     | Linalyl acetat                     |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 12     | Tetradecan                         |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 13     | Pentadecan                         |
| 8567        | GL, 1 SAL B | 14     | Hexadecan                          |

## Bilag 3.2 De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften i stueetagen

| File number | Sample ID  | Peak # | Compound name   |
|-------------|------------|--------|---|
| 8566        | GL, Stue B | 1      | Isopentane  |
| 8566        | GL, Stue B | 2      | Acetic acid   |
| 8566        | GL, Stue B | 3      | Toluen  |
| 8566        | GL, Stue B | 4      | m/p-Xylen   |
| 8566        | GL, Stue B | 5      | o-Xylen   |
| 8566        | GL, Stue B | 6      | alpha-Pinen   |
| 8566        | GL, Stue B | 7      | Trimethylbenzen isomer (C3-Benzen)  |
| 8566        | GL, Stue B | 8      | Caren   |
| 8566        | GL, Stue B | 9      | Cymen   |
| 8566        | GL, Stue B | 10     | Limonen   |
| 8566        | GL, Stue B | 11     | Isopropenyltoluen   |
| 8566        | GL, Stue B | 12     | Unknown; tentative ID: a propanoic acid ester, e.g. Propanoic acid, 2-methyl-, 2-ethyl-3-hydroxyhexyl ester |
| 8566        | GL, Stue B | 13     | Tetradecan  |
| 8566        | GL, Stue B | 14     | Pentadecan  |

**Bilag 3.3 De højeste peaks for prøve udtaget i indeluften i kælderen**

| File number | Sample ID    | Peak # | Compound name                       |
|-------------|--------------|--------|-------------------------------------|
| 8569        | GL, KELDER A | 1      | Isopentane                          |
| 8569        | GL, KELDER A | 2      | Cyclohexane                         |
| 8569        | GL, KELDER A | 3      | Toluen                              |
| 8569        | GL, KELDER A | 4      | Siloxane compound (lab contaminant) |
| 8569        | GL, KELDER A | 5      | m/p-Xylen                           |
| 8569        | GL, KELDER A | 6      | o-Xylen                             |
| 8569        | GL, KELDER A | 7      | C3-Benzen                           |
| 8569        | GL, KELDER A | 8      | C3-Benzen                           |
| 8569        | GL, KELDER A | 9      | Undecan                             |
| 8569        | GL, KELDER A | 10     | Tetradecan                          |
| 8569        | GL, KELDER A | 11     | Pentadecan                          |
| 8569        | GL, KELDER A | 12     | Hexadecan                           |

**Bilag 3.4 De højeste peaks for prøve udtaget af poreluft i punktet PL3**

| File number | Sample ID  | Peak # | Compound name                       |
|-------------|------------|--------|-------------------------------------|
| 8568        | GL, PL 3 A | 1      | Toluen                              |
| 8568        | GL, PL 3 A | 2      | Siloxane compound (lab contaminant) |
| 8568        | GL, PL 3 A | 3      | m/p-Xylen                           |
| 8568        | GL, PL 3 A | 4      | alpha-Pinen                         |
| 8568        | GL, PL 3 A | 5      | Caren                               |
| 8568        | GL, PL 3 A | 6      | Limonen                             |
| 8568        | GL, PL 3 A | 7      | Isopropenyltoluen + unknown         |
| 8568        | GL, PL 3 A | 8      | Unknown                             |
| 8568        | GL, PL 3 A | 9      | Di-tert-butylphenol                 |
| 8568        | GL, PL 3 A | 10     | Unknown                             |
| 8568        | GL, PL 3 A | 11     | Di-isobutyl phthalat                |
| 8568        | GL, PL 3 A | 12     | 2-Methoxyethyl phthalat             |

### Bilag 3.5 De højeste peaks for prøve udtaget af poreluft i punktet PL2

| File number | Sample ID | Peak # | Compound name  |
|-------------|-----------|--------|--|
| 8571        | PL 2 B    | 1      | m/p-Xylen  |
| 8571        | PL 2 B    | 2      | Branched C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> hydrocarbon, likely 2,6-Dimethyloctane                  |
| 8571        | PL 2 B    | 3      | C <sub>3</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 4      | C <sub>3</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 5      | C <sub>3</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 6      | C <sub>3</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 7      | Branched C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> hydrocarbon, likely 2,6-Dimethylnonane or 4-Methyldecan |
| 8571        | PL 2 B    | 8      | C <sub>3</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 9      | C <sub>4</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 10     | Diethylbenzen  |
| 8571        | PL 2 B    | 11     | C <sub>4</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 12     | C <sub>4</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 13     | C <sub>4</sub> -Benzen   |
| 8571        | PL 2 B    | 14     | C <sub>4</sub> -Benzen, likely a Tetramethylbenzen isomer  |
| 8571        | PL 2 B    | 15     | C <sub>4</sub> -Benzen, likely a Tetramethylbenzen isomer  |
| 8571        | PL 2 B    | 16     | Heptadecan   |
| 8571        | PL 2 B    | 17     | Pristan  |
| 8571        | PL 2 B    | 18     | Phytan   |







### **Stofspecifikke isotoper og fingerprinting i indeklimaundersøgelser**

Der er undersøgt en alternativ tilgang til vurdering af påvirkning af indeklimaet fra jordforurening. Den traditionelle tilgang til indeklimaundersøgelser er en "udefra og ind" strategi, hvor man undersøger forurening under gulv, og herpå beregner et indeklimabidraget. Viser beregningen overskridelser, måles der efterfølgende i indeklimaet. Ulempen ved denne tilgang er, at metoden er relativt invasiv ift. grundejere og omkostningstung.

En alternativ tilgang er " indefra og ud", hvor man starter med en simpel indeklimatemåling med passiv opsamling. Findes betydende indhold i indeluften afklares det, om der er tale om jordforureningsbidrag. De to metoder, der er afprøvet i undersøgelsen, er stofspecifik isotopanalyse (CSIA) og fingerprinting. Stofspecifik isotopanalyse ser på forholdet mellem stabile isotoper i prøver fra indeklimaet og fra poreluften. Ud fra forskelle i forholdet kan det sandsynliggøres om forurening i indeklimaet stammer fra en jordforurening eller fra interne kilder. Fingerprinting benytter sig af kvantificering af de mest betydende kulbrinter i en blanding. På denne måde kan man sammenligne indholdet i prøver i indeklimaet og i poreluft.

Metoden er afprøvet på 5 lokaliteter i Region Hovedstaden. Vi konkluderer, at stofspecifik isotopanalyse er en hurtig og præcis metode til at bestemme oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft for TCE/PCE og benzen. Fingerprinting for kulbrinterne i en olieforurening vurderes ligeledes at være en brugbar metode til bestemmelse af oprindelsen af forureningsstoffer i indeluft.

Data fra stofspecifik isotopanalyse og fingerprinting danner således grundlag for en hurtig og ikke invasiv strategi til risikovurdering over for indtrængning af forureningsstoffer fra en underliggende jordforurening til indeklimaet i en bolig.



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)