

Miljøprojekt Nr. 646 2001

Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening

Måling af indtrængningen af
gasformige forbindelser fra forurenede
jord til indeluften: Foliemetoden.
Del 1. Laboratorieundersøgelse

Karsten Fuglsang
DK-Teknik Energi & Miljø

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

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

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

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	6
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	8
SUMMARY AND CONCLUSIONS	11
1 BAGGRUND	15
2 LITTERATURGENNEMGANG	19
3 BESKRIVELSE AF FOLIEMETODEN	23
3.1 Måleprincip	23
3.2 Fremgangsmåde	24
3.3 Beregning af bidrag til indeluften ud fra målingen	25
4 FORSØGSBETINGELSER	27
4.1 Forsøgsopstilling	27
4.2 Oversigt over gennemførte forsøg	29
4.3 Analysemetoder	30
5 RESULTATER OG DISKUSSION	31
5.1 Undersøgelse af revnedannelser i forsøgopstillingens betonplade	31
5.2 Tab af TCE og toluen til betonen	32
5.3 Sammenligning mellem målt flux til topkammeret og målt flux til folien	33
5.4 Sammenligning mellem målt og beregnet flux	36
5.5 Effekt af flowbetingelser og folietype	40
5.6 Undersøgelse af potentielle fejlkilder	42
5.7 Måleusikkerhed	45
6 KONKLUSION	47
7 LISTE OVER FORKORTELSER OG UDVALGTE FAGUDTRYK	49

Bilagsoversigt.

- Bilag A Forsøgsbetingelser
- Bilag B Analysemetoder
- Bilag C Beregning af tab af TCE og toluen ud fra massebalance
- Bilag D Måling af differenstryk under/over folie. Resultater af forsøg udført i november 1998
- Bilag E Variansanalyse – test af indflydelsen af folietype og flow

Forord

Miljøstyrelsen iværksatte i 1998 dette projekt, der har til formål at udvikle en ny metode til at udføre måling på gulvarealer for direkte at kunne bestemme indtrængningen af flygtige forbindelser fra forurenede jord under gulv til indeluften.

Projektet er iværksat og finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiprogram for Jord- og Grundvandsforurening.

Denne rapport er resultatet af en laboratorieundersøgelse med det formål at teste metodens anvendelighed. Laboratorieundersøgelsen blev efterfulgt af en test af metoden under feltforhold. Felttesten er beskrevet særskilt i rapporten "Måling af indtrængningen af gasformige forbindelser fra forurenede jord til indeluften: Foliemetoden. Del 2: Felttest" /1/.

Projektet er blevet gennemført af dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ v/Karsten Fuglsang og Flemming Mikkelsen. Projektet har været tilknyttet en styregruppe bestående af

Irene Edelgaard, Miljøstyrelsen
Preben Bruun, Miljøstyrelsen
Ove Nielsen, By- og Boligministeriet
Lars Gunnarsen, Statens Byggeforskningsinstitut
Jes Holm, GEO
Astrid Zeuthen Jeppesen, Amternes Videncenter for Jordforurening
Vibeke Meno, Frederiksborg Amt
Tommy Jacobsen, Teknologisk Institut
Flemming Mikkelsen, dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ
Karsten Fuglsang, dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ

Sammenfatning og konklusioner

Denne rapport beskriver en ny målemetode, der har til formål at bestemme fluxen af flygtige organiske forbindelser fra betongulve, hvorunder der er forurenet jord. Der findes i øjeblikket ingen velegnede metoder, der kan benyttes i felten til måling af bidraget af luftforurenende stoffer til indeluften fra forurenet jord. Den nuværende praksis er baseret på beregningsmetoder, der bruger empiriske formler til at estimere bidraget. Ved beregning af bidraget til indeluften kan der opstå en betydelig fejlvurdering, blandt andet fordi kendskabet til betonen, forureningens størrelse og fordeling, revnedannelser m.v. ofte er begrænset.

Målemetoden er udviklet og testet som et led i et projekt under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for Jord- og Grundvandsforurening.

Det har været Miljøstyrelsens mål, at den foreslåede målemetode skal kunne benyttes som et supplement til den beregningsmæssige vurdering til kortlægning af bidraget af luftforurenende stoffer til indeluften fra jordforurening.

Målemetoden baserer sig på, at et gulvareal på det forurenede område afdækkes med en blød folie. Folien fæstnes til betonen ved hjælp af en gummibaseret tape og beluftes med kulfiltreret luft. De stoffer, der transporteres fra det afdækkede areal, vil opblandes med den tilførte luft, og emissionen fra arealet kan bestemmes ud fra det tilførte flow af ren luft til folien og en koncentrationsmåling i den luft, der føres ud af folien. Hvis der opstår en væsentlig trykændring ved måling på en porøs overflade som beton, vil fluxen fra overfladen kunne øges eller mindskes. Ved at benytte en blød folie med en lav vægt reduceres trykforskelle mellem luften under og over folien til et minimum.

Folietoden forventes også at kunne bruges til måling omkring områder på gulve eller vægge, hvor der kan forekomme en særlig høj indtrængning af f.ex. VOC fra jordforurening under gulv. Sådanne områder kan f.ex. være rørgennemføringer og samlinger langs paneler. Det forventes, at disse områder kan afdækkes med folie og kortlægges ved måling efter samme princip som for gulvarealer. En test af metodens anvendelighed til måling på områder med særlig høj indtrængning er beskrevet i rapporten over felttesten af foliemetoden /1/.

For at undersøge om foliemetoden er anvendelig til feltmåling på gulvarealer, blev der opbygget en forsøgsopstilling i laboratoriet. Forsøgsopstillingen bestod af en 1 m x 1 m x 0,05 m betonplade, der var placeret i et lukket kammer af rustfrit stål. Under betonpladen var der et bundkammer, der kunne tilføres en kendt mængde forurenet luft. Over betonpladen var et topkammer, som kunne tilføres forureningsfri luft eller benyttes uden låg, idet diffusionen i så fald skete til rumluften. Diffusionen fra bundkammeret til topkammeret kunne herefter bestemmes, dels ved måling af fluxen til det lukkede topkammer, dels ved afdækning af betonpladen med folie.

Den opbyggede laboratorieopstilling blev fundet anvendelig til test af foliemetoden. Ud fra sporstofdoserings og tryksætning af forsøgsopstillingens

bundkammer blev det konstateret, at der ikke var målelige revner i betonen. Fluxen af stof fra bund- til topkammer konkluderes derfor som ønsket at være helt domineret af diffusiv transport.

Ud fra den målte flux kunne der ikke påvises nogen signifikant forskel på, om afdækningen blev udført med TEDLAR folie eller Nalophan folie. Der blev heller ikke fundet signifikant effekt af variationer af det arealspecifikke flow i området $0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2 - 0,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$.

Der blev ikke fundet nævneværdige tab af TCE og toluen til folievæg af TEDLAR. Tabet af TCE og toluen via adsorption til den anvendte tape konkluderes ud fra forsøgene at være uden betydning for målingen.

Sammenfattende konkluderes det, at såvel TEDLAR som Nalophan er egnet til afdækning ved brug af foliemetoden.

En vurdering af foliemetodens anvendelighed vil afhænge af de krav, der stilles til metodens nøjagtighed og præcision. Ud fra laboratorieforsøgene vurderes det, at metoden er anvendelig til målinger af fluxen fra betonarealer med en skønnet præcision på $\pm 50\%$. Dette skal sammenholdes med den faktiske variation af fluxen under feltforhold. Den faktiske flux vil på samme gulv kunne afvige fra sted til sted med en langt større variation end $\pm 50\%$.

Ud fra massebalancer kunne der konstateres et betydeligt tab af TCE og toluen til betonpladen i opstillingen. Det beregnede tab var af størrelsesordenen 20%-30%, og dette tab blev fundet, efter at der i flere måneder havde været konstant dosering af TCE og toluen til bundkammeret. En egentlig undersøgelse af den aktuelle betontypes evne til at adsorbere VOC ligger uden for dette projekts rammer og er ikke nærmere vurderet.

Med henblik på at vurdere om den adsorbere mængde TCE og toluen til betonen kunne afgives ved højere temperaturer, blev den målte flux sammenlignet med temperaturen i forsøgsopstillingen. Der kunne i temperaturområdet $19^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}$ ikke påvises at være en sammenhæng mellem den målte flux gennem betonen og temperaturen.

Betons evne til optagelse og afgivelse af flygtige organiske forbindelser kan spille en afgørende rolle i forbindelse med transport af flygtige forbindelser til indeluften. De udførte laboratorieforsøg bekræfter resultatet af nyere undersøgelser. De har vist, at beton har en meget høj sorptionskapacitet over for VOC. Beton kan "gemme" betydelige mængder forurening for senere - under indflydelse af svingninger i temperatur- og fugtighed - at afgive en større eller mindre del af den optagne forurening. I givet fald vil der skulle tages højde for betonens optagelse og afgivelse i forbindelse med måleprogrammer og beregningsmodeller for estimering af fluxen.

Den målte flux i de enkelte delforsøg er sammenlignet med den beregnede, teoretiske flux. Beregningen blev foretaget i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 af 1998 og under antagelse af, at transporten af stof fra bundkammer til topkammer udelukkende er diffusiv. Der blev anvendt en materialekonstant for beton af passiv klasse. I de fleste forsøgsrækker var der inden for en variation på $\pm 50\%$ overensstemmelse mellem den målte og den beregnede flux. Dette gælder både for TCE og for toluen. Der blev fundet en 2-3 gange højere målt flux under de første forsøgsrækker. Årsagen hertil er ikke fundet. Doseringen til bundkammeret var konstant i forsøgene, og en

reduktion i fluxen kan heller ikke forklares ud fra temperaturvariationer i forsøgsopstillingen. Det kunne ud fra forsøgene ikke afgøres, om den målte flux aftager som følge af, at vandindholdet i betonpladen i nogen grad kan have varieret.

En fastlæggelse af proceduren for gennemførelse af fluxmålinger med foliemetoden vil blive foretaget i forbindelse med udførelse af felttesten.

Summary and conclusions

This report describes a new method for determination of the emission of gaseous compounds from polluted soil to indoor air in buildings. The method has been developed and evaluated during a project supported by the Danish Environmental Protection Agency.

The flux of VOC's through concrete floors can be estimated through model calculations of the diffusive and convective transport. In Denmark, model calculations should be performed according to guidelines from the Danish EPA /4/, /5/. Calculation models are based on empirical formulas, and the contribution of the flux of VOC's to the indoor air can be strongly over- or underestimated, depending on the level to which the site can be described. Often, the quality of input data is questionable for parameters such as the properties of the concrete, the magnitude and distribution of the soil pollution, the description of cracks in the concrete etc. Therefore there is a need to validate model calculations with direct measurement methods for field determination of the flux of gaseous compounds from polluted soil to the indoor air.

It has been the objective of Danish EPA to develop a measurement method to be used as a supplement to the presently used model calculations.

The measurement method is based on the enclosure with an inert film of an area of the floor over the polluted soil. The film is attached to the floor by means of an adhesive tape, and clean, filtered air is pumped into the enclosure. The compounds that are transported from the area covered by the film will be mixed with the air pumped into the enclosure, and the compounds are removed by an outlet flow. The emission from the area can be determined from the flow of air supplied to the enclosure and from the concentration of pollutants in the outlet air. If the pressure under the film is significantly different from the pressure in the indoor air, and when measurement is performed on the flux from a porous material such as concrete, there is a risk that the flux into the enclosure will be over- or underestimated. By using a soft film with a low weight, the pressure difference between the indoor air and the air under the film can be minimised. It is expected that the described "film enclosure method" can also be used for measurement of the emission from "hot spots" that can contribute significantly to the transport of e.g. VOC's from soil pollution. Hot spots can arise because of gaps in constructions such as pipe penetrations in basement floors. It is expected that such hot spots can be enclosed by film, and that measurement can be performed according to the same principle as for floor areas. A test of the suitability of the method for use at hot spots was performed in connection with a second phase of the project, where a field evaluation of the method was performed. The field evaluation is described in a separate report /1/.

To evaluate the method proposed for measurement of the flux of VOC's through concrete floors, a test facility was build in the laboratory. The test facility consisted of a 1m x 1m x 0.05m concrete slab, placed in a closed stainless steel chamber. The concrete slab was placed in horizontal position,

and it divided the chamber into two chambers: a top chamber and a lower chamber. The lower chamber was a closed chamber to which polluted air could be added in a known concentration and with a known flow. Clean, filtered air was added to the top chamber, and the diffusion through the concrete slab due to the concentration gradient could be determined by measurement of the emission via the outlet air from the top chamber. The top chamber had a removable lid, allowing for change of films.

The test facility was found suitable for test of the film enclosure method. This was concluded from the results of a trace gas experiment, where SF₆ was injected into the lower chamber. When the lower chamber was closed and pressurised, the flux of SF₆ to the top chamber was found to be constant and independent of pressure. From this experiment, it is concluded that the flux from the lower chamber to the top chamber is solely controlled by diffusive transport.

The influence on the measured flux from the use of TEDLAR or Nalophan film was found not to be statistically significant. The area specific flow was tested in the range 0,07 m³/h/m² – 0,28 m³/h/m². The test showed no significant effect of variations of the area specific flow.

From the tests performed, only minor losses of TCE and toluene to the walls of the TEDLAR film were found. The loss of TCE and toluene through sorption to the tape was also very small.

It is concluded that TEDLAR as well as Nalophan film is suitable for use in connection with the film enclosure method.

An assessment of the suitability of the method will depend on the requirements for the precision and accuracy of the method. From the performed laboratory test it is estimated that the method is applicable for measurements of the flux from concrete floors with a precision of ±50%. This should be compared with the variations of the flux found under actual field conditions. The flux can under field conditions vary from place to place on the same floor with a much larger variation than ±50%.

From mass balance calculations, a considerable loss of TCE and toluene to the concrete slab was found. The calculated loss was about 20% - 30%, and this loss was found even after several months of constant mass stream of TCE and toluene to the lower chamber. The ability of the concrete to adsorb VOC is outside the scope of this project and further investigation of the sorption capacity was not performed.

The effect of the temperature in the test facility on the measured flux to the top chamber was investigated. In the temperature range of the tests performed (19°C – 23°C), no effect of the temperature was found.

Recent studies have proved that the ability of concrete to adsorb and desorb volatile organic compounds can play an important role in the transport of volatile pollutants in indoor climate. This is confirmed by the results of the laboratory tests performed in this study. The results indicate that sorption capacity of VOC's such as TCE and toluene in concrete is very high. Concrete can adsorb considerable amounts of VOC's, depending on temperature, humidity and concentration gradients. If the influence of sorption to and from concrete is as strong as indicated by the test results,

measures must be taken to avoid misinterpretation of results from model calculations and monitoring programmes.

The measurement results from the individual test series have been compared to the theoretical flux, found through calculation of the diffusive transport through a concrete floor according to the guidelines given by the Danish EPA. The value of the constant N for diffusive transport through concrete was 0,002, corresponding to N for a concrete without reinforcing iron and with a strength of 15MPa. In most of the performed test series, and for both TCE and toluene, the difference between the measured and the calculated flux was less than $\pm 50\%$ of the measured flux. The measured flux in the first test series was 2-3 times higher than the theoretical, calculated flux. The reason for this has not been found. The charge of TCE and toluene to the lower chamber was constant in all test series, and a reduction in the flux can not be explained by variations in temperature either. A possible explanation can be variations in the relative humidity. However, it has not been possible from the test results to find a relation between the relative humidity and the flux.

More detailed procedures for the performance of the “film enclosure method” will be laid down during the field evaluation programme planned to be performed as a second phase of this project.

1 Baggrund

Gennem de seneste år er der i Danmark konstateret flere eksempler på, at gasformige forbindelser trænger ind i indeluften fra forurenede jord under ejendomme. Der har været eksempler på, at indtrængningen af sundhedsskadelige stoffer fra forurenede jord under tidligere kemiske renserier eller benzinstationer har overskredet de afdampningskriterier, Miljøstyrelsen har fastsat.

Afdampningskriterierne definerer, hvor stort bidraget til den ovenstående luft må være fra forurenede jord og angives som maksimale bidrag til koncentrationen i indeluften. Afdampningskriteriet sætter med andre ord ikke en grænse for den samlede koncentration i indeluften, men kun for den del af koncentrationen, der udgøres af indtrængningen af gasser fra jordforureningen.

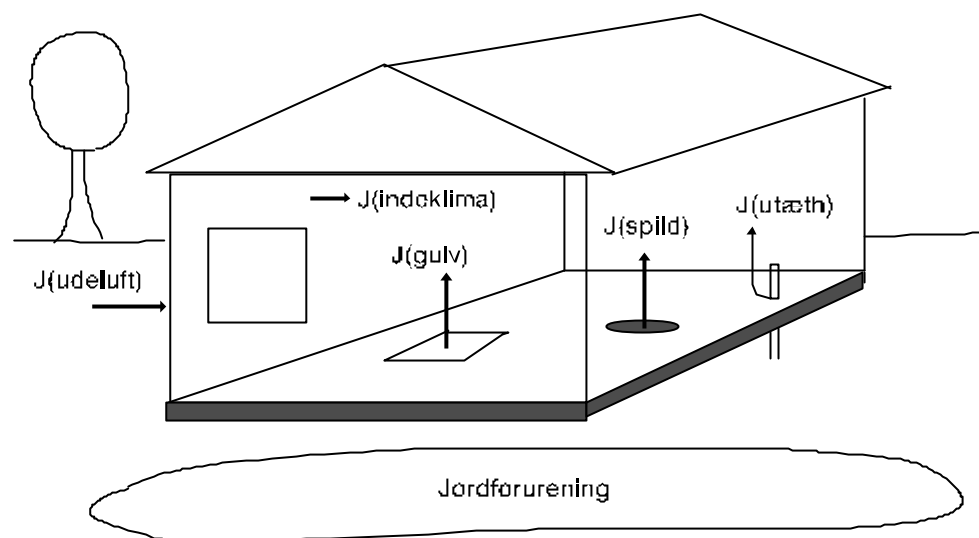
Den samlede koncentration i indeluften vil typisk være en sum af bidrag fra flere kilder. Dette illustreres af figur 1, der viser de typiske transportveje for indtrængning af flygtige organiske forureninger til indeluften.

For visse stoffer som f.ex. benzen og perchlorethylen vil bidraget fra andre kilder end jordforureningen kunne medføre, at den samlede koncentration i indeluften bliver højere end afdampningskriteriet. Afdampningskriteriet for benzen er for eksempel $0,000125 \text{ mg/m}^3$. I trafikerede byområder i Danmark er koncentrationen af benzen i gadeluften som gennemsnit over et år målt at være ca. 40 gange højere /2/. Da tobaksrygning samtidig kan udgøre en væsentlig kilde til benzen i indeluften, vil den samlede koncentration af benzen i indeluften nemt kunne overskride $0,000125 \text{ mg/m}^3$, uden at der forekommer bidrag fra en evt. jordforurening under bygningen.

Måling af den samlede koncentration i indeluften kan udføres efter kendte metoder, idet der kan anvendes fremgangsmåder som anvist af Bygge- og Boligstyrelsen /3/. Imidlertid medfører ovenstående problematik, at det ikke vil være tilstrækkeligt at udføre en måling af den samlede koncentration i indeluften, når det skal kontrolleres, om Miljøstyrelsens afdampningskriterier er overholdt.

Jordforureningens bidrag til indeluften skal kortlægges separat ved undersøgelser på grunde, der er forurenede med flygtige forbindelser. Kortlægningen foretages efter Miljøstyrelsens anvisninger i vejledning nr. 6 af 1990 /4/.

Figur 1. Principskitse for transportveje, der er relevante i forbindelse med vurdering af indtrængningen af gasformige forureninger fra forurenede jord.



$J(\text{udeluft})$ = Flux fra udeluft som følge af udeluftens baggrundsbidrag.

$J(\text{indeklima})$ = Flux fra kilder i indeklimaet. Eksempler kan være afdampning fra lim, maling, fugemasser, møbler eller kemisk rensede tøj. Den samlede flux fra indeklimaets "egne" materialer kan også være negativ, da overflader af f.ex. vægge, tæpper og møbler afhængig af bl.a. temperatur og koncentration både kan afgive og optage flygtige organiske forbindelser.

$J(\text{gulv})$ = Flux fra jorden via gulvarealer eller fra ydervægge, der er i jorden. Transporten kan være overvejende diffusiv, hvis der er et intakt betondæk mod jorden, men også konvektiv, hvis der er revnedannelser i betonen.

$J(\text{utæth})$ = Flux fra jorden via evt. utætheder i gulvkonstruktionen. Der vil kunne opstå betydelige konvektive bidrag fra sprækker eller åbninger omkring f.ex. rørgennemføringer eller langs samlinger mellem vægge og gulve.

$J(\text{spild})$ = Flux fra gulvarealer, hvor der er forekommet spild af forurening direkte på gulvet.

Transporten J til indeluften fra en given kilde kan beskrives ud fra måling eller beregning af fluxen fra kilden. Fluxen angives f.ex. i enheden $\text{g}/\text{m}^2/\text{time}$, og fluxen vil variere afhængig af tid og sted.

Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 af 1990 foreskriver, at indtrængningen til indeluften skal bestemmes, når koncentrationen af forureningen i luften under gulvet er fundet at være mindst 100 gange højere end afdampningskriteriet. Beregning af indtrængningen kan udføres i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 7 af 1998, appendix 5.3 /5/. Beregningen er nyttig til vurdering af, om en konkret jordforurening kan give anledning til problemer på grund af forhøjede koncentrationer i indeluften. Beregningen gennemføres under en række antagelser, herunder at

- bidraget fra den forurenede zone er konstant som funktion af tiden
- jordens og betonens evne til at dæmpe transporten af forureningen (porøsiteter og materialekonstanter) er kendt og konstant
- transporten som følge af ændringer i barometerstanden er negligerbar
- der kan ses bort fra sorptionsprocesser og nedbrydning under transporten fra den forurenede zone, således at der kan regnes med stationær transport
- revnedannelse i betongulve kan beskrives ud fra en beregning af udtørringssvind i den givne betontype, eller at revnevidder og –længder kan måles på den aktuelle lokalitet
- koncentrationen af den forurenende komponent er meget mindre end koncentrationen under gulv

Endvidere er det i praksis vanskeligt at indhente data for utætheder mellem gulvkonstruktionen og vægge/rørgennemføringer, og anvende disse data i modellen.

At diffusionen gennem beton varierer kraftigt afhængig af betontypen blev vist af Geoteknisk Institut, der for By- og Boligstyrelsen i 1992 udførte en række laboratorieforsøg til beskrivelse af diffusionen af TCE og toluen gennem betonprøver udtaget fra ikke revnede arealer /6/.

Når der forekommer revner i betongulve, kan forureningstransporten til indeluften være mange gange større end den diffusive transport, der sker gennem luftfyldte porer i betonen. For at skønne den flux, der sker gennem revner, beregnes i henhold til vejledning 7/98 en teoretisk revnevidde og –længde ud fra et kendskab til betontypen, og den konvektive transport gennem revner beregnes for et givent differenstryk over betonen. Med mindre der udføres en egentlig måling af revnevidder og –bredder, er usikkerheden på denne beregning betydelig. Man vil i praksis ofte have ringe kendskab til betonen, og beregningen af den teoretiske revnedannelse er baseret på en række erfaringsmæssige konstanter for specifikke betontyper. Der vil derfor nemt kunne opstå situationer, hvor der ikke tages højde for ovennævnte forhold under brugen af beregningsmodellen.

Der er behov for at kunne gennemføre målinger af fluxen med metoder, der kan anvendes direkte på gulvarealer. Der har været anvendt fluxkamre på udendørsarealer i en årrække. Disse kamre kan imidlertid ikke umiddelbart anvendes til måling på gulvarealer, fordi befæstelsen til gulvets overflade kræver helt andre teknikker for forsegling. Desuden kan dannelse af over- eller undertryk i et fast kammer af f.ex. stål medføre en forøget eller reduceret flux gennem betonen.

Denne rapport omhandler en laboratorietest af, om folieafdækning kan benyttes som metode til at bestemme fluxen fra gulvarealer, d.v.s. $J(\text{gulv})$ og/eller $J(\text{spild})$ som angivet i figur 1. Der skønnes at være mulighed for, at metoden kan anvendes til bestemmelse af bidraget fra sprækker og rørgennemføringer, angivet som $J(\text{utæth})$ på figur 1. Det sidstnævnte anvendelsesområde er dog ikke omfattet af denne laboratorieundersøgelse.

2 Litteraturgennemgang

Der er i forbindelse med projektets start i januar 1999 udført en litteratursøgning i en række databaser, herunder Chemical Abstracts. Resultatet af søgningen er kort beskrevet herunder sammen med litteratur, der er fundet relevant i forbindelse med måletekniske metoder til bestemmelse af indtrængning af forurening fra jord til indeluften i boliger.

Metoder til måling af emissioner fra overflader kan inddeles i følgende principielt forskellige typer:

- måling af flux ved hjælp af et beluftet kammer
- måling af flux ved afdækning med et statisk kammer, d.v.s. til et kammer uden nogen form for beluftning
- måling ved hjælp af vindtunneller, der lægges hen over overfladen
- måling med direkte afdækning med passive opsamlere
- måling ved hjælp af sporstofdosering til det underliggende lag

I det følgende kommenteres de enkelte typers anvendelighed i forhold til brug for bestemmelse af fluxen af VOC fra faste, porøse overflader som beton eller jord.

Måling af fluxen ved hjælp af beluftede kamre vil blive omtalt sidst i dette afsnit. Først gennemgås kort fordele og ulemper ved de øvrige nævnte typer målemetoder.

Statiske kamre er enkle at bruge, idet de består af et lukket kammer, der uden tilførsel af luft dækker den berørte overflade. Da statiske kamre ikke kræver en konstant tilførsel af rensede luft, er de simple og enkle at bruge. Et statisk kammer har imidlertid den ulempe, at koncentrationen i kammeret akkumuleres, og at diffusionen dermed reduceres som følge af den faldende koncentrationsgradient fra poreluften i det underliggende lag til luften i kammeret.

Ved måling ved hjælp af vindtunneller afdækkes et smalt, forholdsvis langt areal af en "tunnel", hvorigennem der blæses ren luft. Den tilførte forurening måles ved at måle emissionen via luften ud af tunnelen. Vindtunnelmetoden har været afprøvet til bestemmelse af lugtemissioner fra faste overflader, men har også været anvendt til bestemmelse af VOC [7]. Metoden har den fordel, at den påvirker overfladen med et meget lille modtryk, hvilket reducerer risikoen for at ændre fluxen fra en porøs overflade. Ulempen er, at der kræves et relativt højt flow til metoden, og at detektionsgrænsen derfor bliver relativt høj.

Måling med direkte afdækning med passive opsamlere er en metode, der endnu ikke har fundet stor udbredelse, men som er særdeles enkel og billig at anvende. Ved måling med passive opsamlere afdækkes et mindre areal med et materiale, der adsorberer det eller de pågældende stoffer. Afdækningen sker ved, at det adsorberende materiale klæbes direkte på overfladen, og fluxen bestemmes herefter ved bestemmelse af den absorberede mængde på den givne overflade over den givne opsamlingsperiode. Der er fundet et eksempel på

anvendelse til bestemmelse af fluxen af VOC fra materialer til indeluft. Wuske et al. /8/ har udviklet en passiv prøveopsamler til bestemmelse af fluxen af pentachlorophenol fra trykimprægneret træ. Et areal på 0,002 m² (4,5 cm x 4,5 cm) afdækkes med en adsorbent, som efterfølgende analyseres i laboratoriet. Metoden findes anvendelig til bestemmelse i felten af emissionen fra imprægneret træ. Ulempen ved metoden er, at det er et meget lille areal, der dækkes af målingen, og det vil derfor være nødvendigt med et stort antal prøver, i det tilfælde fluxen er ujævnt fordelt over overfladen. Dette vil oftest være tilfældet i forbindelse med fluxen af VOC fra forurenede jord.

Statens Byggeforskningsinstitut har undersøgt en metode til indtrængning af jordgasser i bygninger ved måling ved hjælp af sporstofdosering /9/. Metoden har været testet til bestemmelse af den samlede indtrængning af jordgas til indeluften. Princippet i metoden er, at der doseres et sporstof under betongulv, og ved at måle koncentration af sporstoffet i indeluften kan det samlede bidrag fra jorden bestemmes. Ulempen er, at doseringsrørene skal lægges ned under gulvet, således at poreluftkoncentrationen og dens fordeling under gulv er kendt, så der ikke dannes luftkanaler i gulvkonstruktionen. Kanaldannelser vil kunne øge indtrængningen væsentligt. Hvis sporgassens indtrængning skal simulere en given forurening, skal der endvidere tages højde for, at overfladeinteraktioner mellem betonen og sporgassen kan være forskellig fra de interaktioner, der sker mellem betonen og det forurenende stof.

I det følgende gennemgås kort metoder til måling af fluxen ved hjælp af et beluftet kammer. Princippet er, at kammeret tilføres nulluft, som efter at have passeret kammeret bliver analyseret for den tilførte mængde VOC. Den typiske størrelse af de kamre, der har været anvendt i felten til fluxmåling på jord, er typisk på mellem 0,1 m² – 0,5 m².

US-EPA iværksatte i 80'erne udvikling af en metode til måling af emissioner fra affaldsdeponier med farligt affald /10/ ved hjælp af et beluftet kammer, som lægges over overfladen. Metoden er baseret på et kammer, der er udviklet til måling af fluxen af VOC fra spildevandsbassiner, og som senere er evalueret af US-EPA til dette formål /11/. Til måling af VOC-emissioner fra forurenede jord har metoden ligeledes været anvendt i Danmark /12/. I USA blev der i starten af 90'erne udviklet kommercielt tilgængelige fluxkamre til måling på forurenede jord. Miljøstyrelsen iværksatte i 1992 en evaluering af fluxkammermetoden til måling på forurenede jord /13/. Denne undersøgelse viste, at metoden er anvendelig, men at trykforholdene har afgørende betydning for den målte flux. I forhold til statiske kamre har de beluftede kamre den fordel, at de fjerner forureningen og dermed ikke dæmper den diffusive transport fra overfladen. Ulempen er – når det drejer sig om måling med kamre med fast væg – at trykforholdene i kammeret ved måling på porøse overflader kan influere på emissionen fra det område, fluxkammeret dækker. Grove og Wille /13/ undersøgte ved laboratorieforsøg fluxen fra forurenede jord til et beluftet fluxkammer af stål. Et overtryk på 2 Pa reducerede fluxen til kammeret betydeligt. Når det drejer sig om måling på et porøst materiale som beton, vil der endvidere skulle tages højde for forseglingen mellem kammeret og betonoverfladen.

Det danske Arbejds miljøinstitut har i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut udviklet små fluxkamre (FLEC) til måling af VOC-emissioner fra faste overflader /14/. Kamrene finder i dag udbredt anvendelse til bestemmelse af emissioner fra byggematerialer til indeluften. FLEC-kamre

kan også anvendes i felten til "detektivopgaver", hvor der er mistanke om, at afdampning fra materialer kan forårsage problemer på grund af forhøjede koncentrationer i indeluften. Kammeret består af rustfrit stål, der dækker et areal på 0,0177 m² og tættes mod en fast, plan overflade med en pakning af skumsilikone. Der er en europæisk standard under udarbejdelse, der beskriver FLEC til bestemmelse af emissioner fra byggematerialer /15/. FLEC'en har været anvendt til måling på betonoverflader med det formål at bestemme egenemissioner fra beton. Disse målinger har primært været udført som laboratorieforsøg, hvor betonen skæres ud og kapsles ind under kammeret inden måling. Fordelen ved FLEC er, at metoden er enkel at håndtere, og den har en kort stabiliseringstid på grund af kammerets lille volumen, hvilket betyder, at måling kan påbegyndes relativt hurtigt efter opstart. Ulempen i forbindelse med porøse overflader er ligesom for andre faste fluxkamre, at trykforskelle vil kunne influere på fluxen til det areal, der dækkes. Ligeledes vil forseglingen mellem det faste kammer og den ofte ujævne overflade være vanskelig at gennemføre. Endvidere vil det på grund af den relativt lille overflade, der dækkes af FLEC, være vanskeligt at opnå en repræsentativ måling på overflader med inhomogen flux. Dette er påvist ved måling af emissioner af terpener fra spånplader af Udel /16/, der konkluderer, at små testkamre ikke bør bruges til måling på materialer med inhomogen flux.

Det skal nævnes, at den samlede indtrængning af jordgas til indeluften kan vurderes ud fra målinger af koncentrationen af radon. Bidraget af radon fra jorden til indeluften i danske etplanshuse vil typisk være dominerende i forhold til bidraget af radon fra udeluften, primært på grund af et højt indhold af radon i moræner /17/. Derfor kan indholdet af radon i indeluften under normale omstændigheder henføres til indtrængning af jordluft. Indholdet af radon i jordluft vil variere fra landsdel til landsdel, afhængig af de geologiske forhold. Andersen /18/ har ud fra måling af radonkoncentrationer over og under gulv bestemt volumenstrømmen af jordluft til indeluften i en bolig. Jorden under boligen var forurenet med PCE fra et renseri, og radonmålingerne er benyttet til at påvise effekten af vakuumentilering, der er en afværgeteknik til reduktion af indtrængning af gasser fra forurenet jord under boliger. Radon blev på denne måde benyttet som sporgas til at afgøre, om den samlede volumenstrøm af jordluft til indeluften kunne reduceres ved hjælp af vakuumentilering. Indtrængningen af gasformige stoffer fra forurening under en bygning kan imidlertid ikke umiddelbart forudsiges ud fra en måling af radonindtrængningen. Radonindtrængningen kan benyttes som et mål for den samlede indtrængning af jordluft. En efterfølgende bestemmelse af fluxen af specifikke gasser fra jorden til indeluften vil kræve, at der samtidig udføres poreluftmålinger under gulv, så der opnås kendskab til fordelingen af koncentrationen af gasser under gulvet. Da både volumenstrøm af jordluft til indeluften og koncentrationen af forurening under det samme gulv vil kunne variere ganske meget fra sted til sted, vil måling af radon næppe i praksis blive benyttet som en enkel metode til bestemmelse af fluxen af flygtige forbindelser til indeluften fra forurenede zoner under bygninger.

Sammenfattende konkluderes det, at der er ved litteraturgennemgangen ikke er fundet andre teknikker, der kan benyttes i felten til direkte bestemmelse af indtrængningen af gasformige forbindelser fra forurenet jord til indeluften.

3 Beskrivelse af foliemetoden

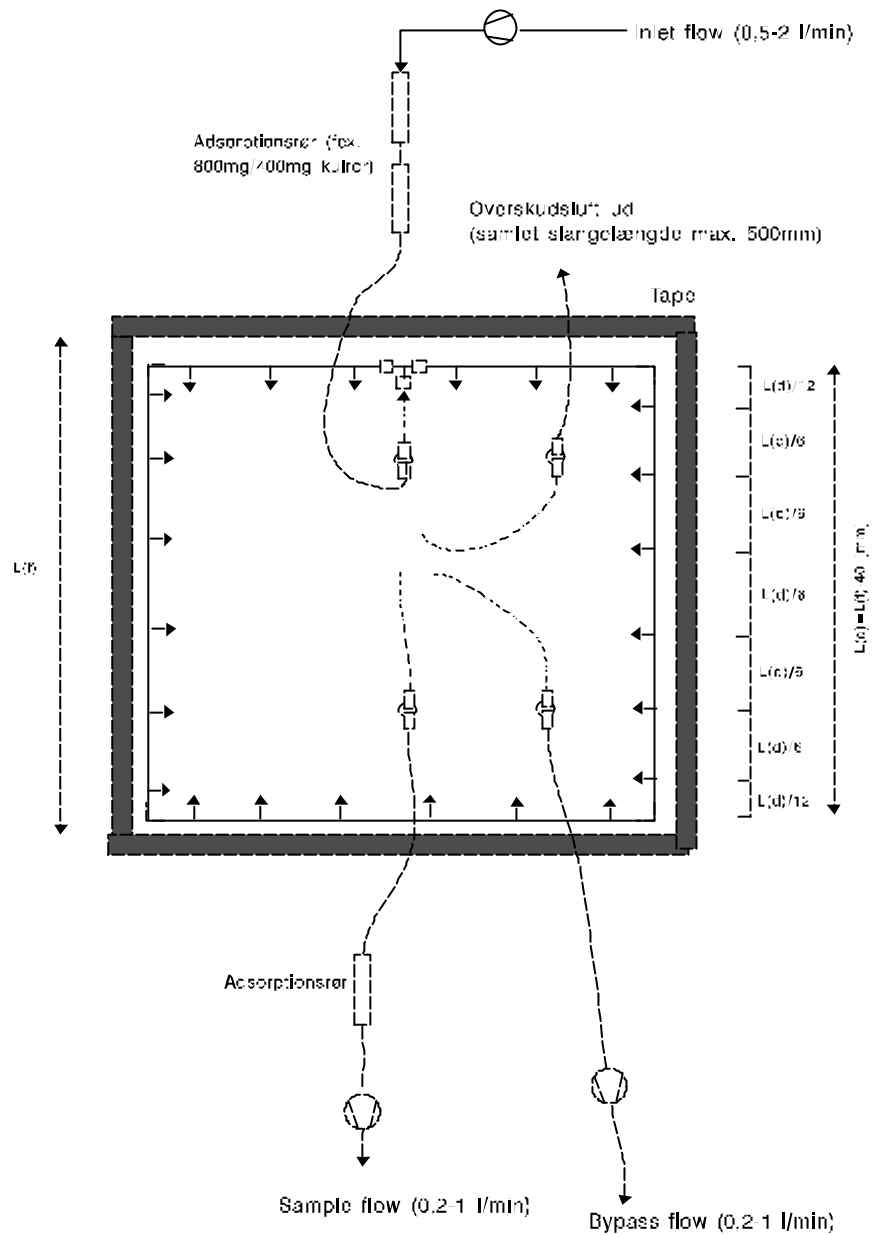
3.1 Måleprincip

Den her foreslåede metode er i princippet et beluftet kammer. For at reducere problemerne med trykforskelle som følge af det flow, der skal tilføres kammeret, foretages afdækningen med en folie. Figur 2 skitserer metoden. Folien fæstnes til betonen ved hjælp af tape, og folien beluftes med kulfiltreret luft. For at opnå at der sker en god opblanding af den indblæste luft, sker beluftningen jævnt langs det afdækkede areals 4 sider og ind mod midten af arealet. Indblæsningen sker via en række jævnt fordelte huller i en perforeret slange, der ligger langs de 4 sider. For at undgå lokale områder med undertryk er der ikke anvendt mekanisk ventilation under folien.

Efter opblanding under folien passerer luften ud via slanger placeret i den centrale del af arealet. Ved at udtage luften fra den centrale del af arealet undgås i videst mulige omfang "kortslutning", det vil sige det undgås, at den indblæste luft ikke når at blive opblandet, inden den passerer ud. En delstrøm af luften ud af folien føres til analyse for bestemmelse af indholdet af den eller de forurenende komponenter.

Folien fastgøres til betonoverfladen ved hjælp af en 5 cm bred tape med gummieret klæbeside. Befæstelse med tape på en porøs overflade vil i praksis ikke kunne foretages helt tæt. Imidlertid vil et meget svagt overtryk under folien sikre, at der ikke vil trænge luft ind under folien fra den omgivende luft. En eventuel luftkanal, der måtte opstå mellem tapen og betonen, vil give anledning til en luftbevægelse fra arealet under folien mod omgivelsesluften.

Figur 2. Måling af flux ved folieafdækning. Principskitse med beskrivelse af flowforhold som anvendt under laboratorietesten.



3.2 Fremgangsmåde

Folien blev udskåret af TEDLAR eller Nalophan i den ønskede størrelse. I de fleste forsøg blev en folie af størrelsen 0,7 m x 0,7 m benyttet, jf. tabel 1, afsnit 4.2. Der blev som vist på figur 2 monteret 4 stk. slangegennemføringer på folien, hvorigennem der kunne føres teflonslanger med en ydre diameter på 6 mm.

Til udførelse af beluftning blev der anvendt en perforeret doseringssonde af teflonslanger med indre diameter 4 mm. Hullerne i perforeringen placeres ligeligt med en afstand på 100 mm langs hver af perforeringssondens 4 sider.

Doseringssonden blev fremstillet således, at den fulgte kanten af folien ca. 2 cm fra yderkanten.

Den perforerede doseringssonde placeredes på betonoverfladen, og derefter blev folien lagt over og fastgjort med tape af typen Nichiban RNI 116-G, PE-coated lærred, med en gummibaseret klæbeside. Det øvrige udstyr monteredes som vist på figur 2.

Herefter blev der tilført beluftning med rensset luft med det ønskede arealspecifikke flow. Denne luft forsynedes under laboratorieforsøgene fra et trykluftanlæg, og luften blev inden dosering rensset ved hjælp af aktivt kul (Anasorb CSC). Beluftning skete med flow i området 1 l/min./m² - 2 l/min./m². Det givne flow blev holdt konstant under hvert enkelt forsøg ved hjælp af en masseflowcontroller.

Ca. 50% af det tilførte beluftningsflow blev udsuget aktivt ved hjælp af en "bypass pumpe". De øvrige 50% af den indblæste luft blev dels udsuget til gaschromatografisk analyse, dels ledt til det fri via en slange til "overskudsluft", jf. figur 2.

3.3 Beregning af bidrag til indeluften ud fra målingen

Den målte flux J beregnes ud fra den målte koncentration under folien, det målte flow af ren luft, der tilføres under folien, samt ud fra gulvarealet under folien. Fluxen beregnes efter (I):

$$J = c \cdot F_A = c \cdot \frac{F_{ind}}{A} \quad (I)$$

hvor J = fluxen [mg/m²/sek]
 c = koncentrationen af den forurenende komponent under folien [mg/m³]
 F_A = det arealspecifikke flow under folien [m³/sek/m²]
 $F(ind)$ = flowet af ren luft, der blæses ind under folien [m³/sek]
og A = det gulvareal, som folien dækker [m²]

Ud fra den målte flux, luftskiftet og loftshøjden i det givne lokale kan der foretages en beregning af hvor meget bidrag, der kommer til indeluften fra gulvet. Under antagelse af, at fluxen er den samme over hele gulvet som i det målte punkt, foretages beregningen efter (II):

$$c_B = \frac{J}{L_h \cdot L_s} \quad (II)$$

hvor c_B = jordforureningens (d.v.s. gulvarealets) bidrag til lokalets koncentration af det pågældende stof [mg/m³]
 L_h = loftshøjden i det pågældende lokale [m]
og L_s = luftskiftet i det pågældende lokale [h⁻¹]

4 Forsøgsbetingelser

Testen af målemetoden blev gennemført ved en laboratorieundersøgelse. Formålet med testen var at undersøge, om det med den foreslåede metode vil være muligt at måle "den sande flux" af flygtige organiske forbindelser fra betongulve, der ligger på områder med forurenede jord.

For at kunne udføre en række forsøg med kendte og reproducerbare betingelser, blev der opbygget en forsøgsopstilling, som skulle simulere transporten af en forurening til indeluften gennem et betongulv. Lignende forsøgsopstillinger har været anvendt i mindre skala til bestemmelse af den diffusionshæmmende effekt af forskellige betontyper i forbindelse med en undersøgelse af fluxen fra forurenede jord til indeluft gennem betongulve /x/.

Til forsøgene blev der anvendt to stoffer, der repræsenterer hyppigt forekommende forureninger med VOC, nemlig trichlorethylen (TCE) og toluen. TCE er valgt som en repræsentativ komponent for forureninger på grunde, hvor der forekommer chlorerede opløsningsmidler. Toluene er repræsentativ for forureninger, hvor der forekommer forurening med benzin. Den største fokus i forbindelse med forurening med benzin og olie sættes oftest på benzen, der i denne forbindelse har den laveste grænse for den tilladelige afdampning til indeluften /19/, og derfor ofte bliver dimensionerende i forbindelse med benzin- og olieforurening. Toluene er valgt i stedet for benzen til laboratorieforsøgene på grund af dets mindre giftighed, men det forventes i øvrigt, at toluen og benzen vil opføre sig nogenlunde ens med hensyn til diffusion og adsorption til overflader, som er afgørende faktorer i forbindelse med transporten fra jord til indeluft.

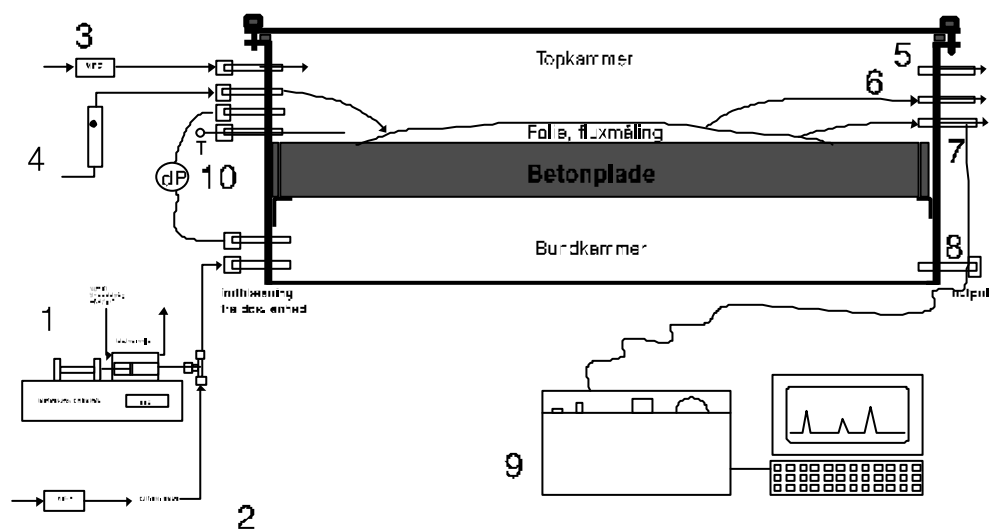
4.1 Forsøgsopstilling

Til laboratorieforsøgene blev der anvendt en 1000 mm x 1000 mm betonplade med en tykkelse på 50 mm. Betonen er en passiv miljøklasse (styrke 15MPa), der blev fremstillet af Teknologisk Instituts Betoncenter. Vand/cementforholdet (v/c-forhold) på den fremstillede beton var 0,72. Dette svarer til v/c forholdet for den standardbeton (v/c = 0,67), der benyttes som eksempel i Miljøstyrelsens vejledning /5/, og cementindholdet svarer også til standardbetonen i vejledningen. Der er regnet med samme materialekonstant som for denne standardbeton. Betonen blev støbt primo juli 1999, og pladerne blev tørret i 4 uger ved 40°C på Teknologisk Institut inden levering. Vandindholdet i betonens poreluft blev af Teknologisk Institut målt til 65% RH efter tørring. Efter levering blev betonpladen opbevaret ved normale indeklimabetingelser, d.v.s. stuetemperatur og 30-40% fugtighed. Fra støbning af betonpladen til de første forsøg blev udført, gik der ca. 5 måneder, hvorved restindholdet af vand forventes at være tørret ud.

Betonpladen blev støbt i en stålramme og placeret i et specialkonstrueret stålkammer som vist på figur 3. Mellem stålrammen og kammerets inderside var der et mellemrum på 15 mm, og dette mellemrum blev fyldt med en ikke-vandbaseret mellemkylær epoxy. Denne type epoxy er kendt for at være diffusionstæt.

Figur 3. Doseringskammer anvendt til laboratorieforsøgene:

1. Doseringsenhed baseret på konstant injektion af væske i et konstant gasflow. Doseringsprincip er nærmere beskrevet i /20/. Doseringsenheden tilfører TCE og toluen til bundkammer.
2. Konstant gasflow til doseringsenhed. Der tilføres kulfiltreret nulluft via en masseflowcontroller. Flow til bundkammer 1,0 l/min.
3. Konstant gasflow til topkammer. Der tilføres kulfiltreret nulluft direkte til topkammeret via en masseflowcontroller. Flow til topkammer 1,0 l/min.
4. Dosering af kulfiltreret nulluft til volumen under folie. Tilførslen føres ind via perforeringer i teflonslange langs indersiden af foliens kanter, jf. figur 2. Flow ind under folie varierer mellem 0,5 l/min. – 2,0 l/min.
5. Udgangsluft fra topkammer. Føres til afkast til det fri.
6. Udgangsluft fra volumen under folie (overskudsluft). Føres til afkast til det fri.
7. Udsugning af konstant delstrøm fra volumen under folie ved hjælp af pumpe. Det udsugede flow sættes til ca. 50% af det tilførte flow via (4). Afgangsluft fra pumpe føres til afkast til det fri. Via et T-stykke på (7) udtages ca. 1 gang pr. time en gasprøve til gaschromatografisk analyse (9).
8. Udgangsluft fra bundkammer. Føres til afkast til det fri.
9. Gaschromatograf med kapillarkolonne og fotoionisationsdetektor. Data opsamles og behandles automatisk på PC.
10. Måling af temperatur (T) og differenstryk (dP) mellem bund- og topkammer.



4.2 Oversigt over gennemførte forsøg

Tabel 1 viser en oversigt over de forsøgsrækker, der er gennemført i laboratorietesten. En nærmere beskrivelse af forsøgsbetingelserne er beskrevet i bilag A.

Tabel 1. Oversigt over gennemførte forsøg under laboratorietesten. Indledende forsøgsrækker beskrives ikke nærmere i denne rapport.

Forsøgsrække nr.	Formål	Betingelser
1	Indledende test af opstilling/stabilitet.	Dosering af TCE til bundkammer. Låg på topkammer. Forsøget udført uden folie. Konc. forsyningsluft bund: 44 mg/m ³ . Flow topkammer 1,0 l/min. Flow bundkammer 1,0 l/min.
2	Indledende undersøgelse af betydningen af varierende trykdifferens mellem top- og bundkammer.	Dosering af TCE til bundkammer. Låg på topkammer. Forsøget udført uden folie. Konc. forsyningsluft bund: 44 mg/m ³ . Flow topkammer 1,0 l/min. Flow bundkammer 1,0 l/min. Trykdifferens mellem bund- og topkammer: -35Pa - +25Pa.
3	Sammenligning mellem målt flux til topkammeret og målt flux til folien (kap. 5.3). Sammenligning mellem målt og beregnet flux (kap. 5.4).	Dosering af TCE og toluen til bundkammer. Låg på topkammer. Tedlarfolie udskåret i størrelse 0,7 m x 0,7 m (0,49 m ²) placeret centralt på flise. Konc. forsyningsluft bund: TCE 38 mg/m ³ ; Toluen 23 mg/m ³ . Flow topkammer 1,0 l/min. Flow bundkammer 1,0 l/min. Folie flow forsyningsluft 0,7 l/min.
4	Validering af resultatet af forsøg 3.	Identisk med forsøg 3.
5	Undersøgelse af tab af TCE og toluen til betonen (massebalance, kap. 5.2). Sammenligning mellem målt flux til topkammeret og målt flux til folien (kap. 5.3). Sammenligning mellem målt og beregnet flux (kap. 5.4). Indledende undersøgelse af indflydelsen af det arealspecifikke flow.	Dosering af TCE og toluen. Låg på topkammer. Konc. forsyningsluft bund: TCE 39 mg/m ³ ; Toluen 23 mg/m ³ . Tedlarfolie str. 0,7 m x 0,7 m centreret på flise. Flow topkammer 1,0 l/min. Flow bundkammer 1,0 l/min. Folie flow forsyningsluft 0,5 l/min.
6	Sammenligning mellem målt og beregnet flux (kap. 5.4). Indledende undersøgelse af diffusion gennem folie til rumluften.	Forsøgsbetingelser er identiske med forsøg 5, men med låget på topkammeret afmonteret. Koncentration over folien svarer hermed til rumluftens koncentration.
7	Kontrol af, om fluxen er homogent fordelt over betonpladen. Sammenligning mellem målt flux til topkammeret og målt flux til folien (kap. 5.3). Sammenligning mellem målt og beregnet flux (kap. 5.4). Undersøgelse af tab af TCE og toluen til betonen (massebalance, kap. 5.2).	Ny folie monteret på halvdelen af flisearealet, fastgjort langs kammerets kant. Folie størrelse 0,5 m x 0,97 m (0,49 m ²). Låg på topkammer. Konc. forsyningsluft bund: TCE 39 mg/m ³ Toluen 23 mg/m ³ Tedlarfolie på 0,5 m ² langs kant af flise. Flow topkammer 1,0 l/min. Flow bundkammer 1,0 l/min. Folie flow forsyningsluft 0,5 l/min.

Forsøgsrække nr.	Formål	Betingelser
8	Sammenligning mellem målt og beregnet flux (kap. 5.4). Indledende undersøgelse af diffusion gennem folie til rumluften.	Forsøgsbetingelser er identiske med forsøg 5, men med låget på topkammeret afmonteret. Koncentration over folien svarer hermed til rumluftens koncentration.
9	Effekt af flowbetingelser og folietyper (kap. 5.5).	Effekten blev undersøgt for to forskellige folietyper (TEDLAR og Nalophan) og ved et "lavt" ($0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$) og et "højt" ($0,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$) arealspecifikt flow under folien. Ved 2-sidet variansanalyse testedes, om den målte flux er uafhængig af folietyper og flow. Tedlarfolie udskåret i størrelse $0,7 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$ ($0,49 \text{ m}^2$) placeret centralt på flise.
10	Undersøgelse af revnedannelser i forsøgsopstillingens betonplade (kap. 5.1).	SF_6 tilføres bundkammer, og efter stabil diffusion til topkammer påføres bundkammeret overtryk på ca. 200 Pa. SF_6 måles kontinuert i topkammeret under forsøget.
11	Undersøgelse af tab via diffusion gennem TEDLAR væg og/eller et tab ved absorption til tape. Undersøgelse af potentielle fejlkilder (kap. 5.6).	Tabet af TCE h.h.v. toluen blev testet som funktion af tiden ved måling på: 1. TEDLAR pose med N_2 2. TEDLAR pose med TCE/toluen 3. TEDLAR pose med tape og N_2 4. TEDLAR pose med tape og TCE/toluen Nichiban tape af størrelsen $5 \text{ cm} \times 37 \text{ cm}$ blev klæbet på indersiden af posen.

4.3 Analysemetoder

En nærmere beskrivelse af de anvendte analysemetoder fremgår af bilag B.

Til måling af koncentrationer af TCE og toluen i topkammer og bundkammer benyttedes en gaschromatograf med photoionisationsdetektor. Med gaschromatografen er der udført en automatisk prøvetagning og analyse af TCE og toluen hver time.

Med det formål at undersøge stabiliteten af koncentrationen i bundkammeret - og dermed doseringen til forsøgsopstillingen - blev der som kontrol i visse af forsøgsrækkerne udført analyse af koncentrationen af TCE og vand i luften i bundkammeret ved måleprincippet PAIR (fotoakustisk infrarød spektrometri). Der er i denne forbindelse udført automatisk måling med instrumentet B&K 1302 hver time. Måling af TCE blev udført ved absorption ved bølgelængden $10,6 \mu\text{m}$.

Metoder til trykdifferens- og temperaturmåling fremgår af bilag B.

5 Resultater og diskussion

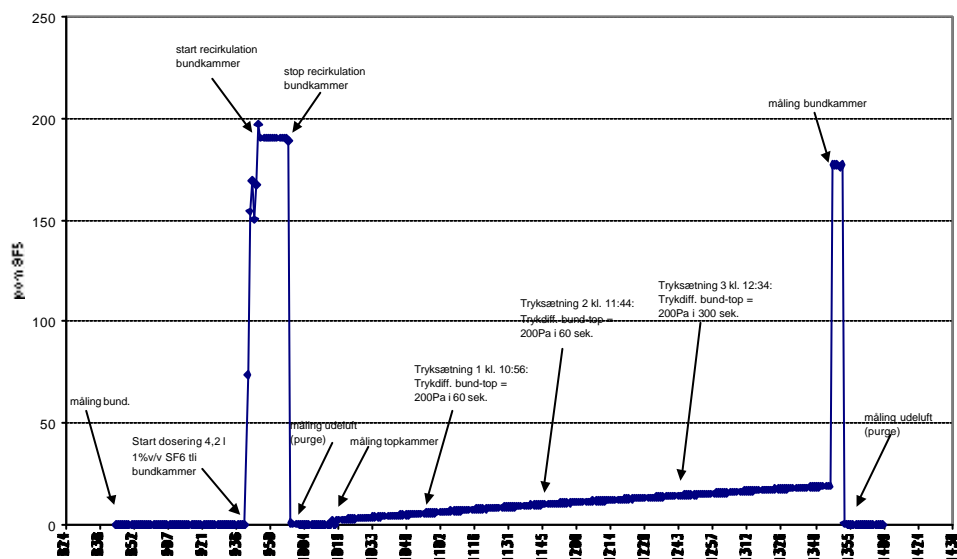
Forsøgsrækkerne er for overskuelighedens skyld i det følgende inddelt i: test af revnedannelser, massebalance, tab af stof til folie/tape samt test af indflydelsen af flowbetingelser og folietype.

5.1 Undersøgelse af revnedannelser i forsøgsopstillingsens betonplade

Det er ved fremstillingen af betonpladen og opbygning af forsøgsopstillingen tilstræbt, at der ikke forekommer revner i betonen. Revnedannelser kan tænkes at opstå, når en betonplade af størrelsen 1 m x 1 m x 0,05 m, fremstillet uden armering, placeres i vandret position og kun understøttes langs betonpladens kanter. Eventuelle revner vil medføre, at fluxen øges betydeligt på grund af konvektiv transport, og der vil samtidigt ske en ujævn fordeling af fluxen hen over betonens overflade. Hermed vil den målte flux afhænge af foliens placering på betonpladen, og en sammenligning med den beregnede flux vil vanskeliggøres. Der var ingen synlige revner i betonpladen i forsøgsopstillingen, men den egentlige undersøgelse af revnedannelser blev gennemført ved trykforsøg.

Der blev i forsøg 2 udført en indledende undersøgelse af betydningen af varierende trykdifferens mellem top- og bundkammer, og denne undersøgelse viste ingen afhængighed af trykdifferenser inden for området $-35\text{Pa} - +25\text{Pa}$. Forsøgsrække nr. 2 blev kontrolleret ved tilførelse af sporstof og en noget højere tryksætning i forsøg nr. 10. Resultatet af forsøg 10 er vist i figur 4.

Figur 4. Måling af SF_6 i bund- og topkammer under kortvarigt overtryk i bundkammer. Måling udført ved hjælp af PAIR detektor den 24-08-2000.



Af figur 4 fremgår, at den målte koncentration af SF_6 stiger jævnt i topkammeret uden pludselige koncentrationstigninger under trykforøgelserne. Trykforøgelserne i bundkammeret har ingen effekt på den

målte koncentration i topkammeret, og fluxen gennem betonpladen synes udelukkende domineret af diffusiv transport.

5.2 Tab af TCE og toluen til betonen

For at undersøge om den tilførte TCE og toluen til bundkammeret kunne genfindes i den luft, der føres ud af kammeret, blev der udført en massebalance. Massebalancen blev udført ud fra resultater af forsøg nr. 5 og 7, der begge blev udført med lukket topkammer, hvorved en massebalance kunne udføres. Resultaterne af de målte koncentrationer og flow samt de deraf beregnede massestrømme ind og ud af forsøgsopstillingen er vist i bilag C.

Den samlede målte flux ind og ud af kammeret er vist i tabel 2.

Tabel 2. Massebalance for TCE og toluen udført i forbindelse med forsøg 5 og 7.

Forsøg nr.	Komponent	Målte værdier		TAB	
		Samlet flux IND mg/sek	Samlet flux UD mg/sek	Beregnet tab pr. sek. mg/sek	TAB i % af IND
5	TCE	7,27E-04	5,10E-04	2,2E-04	30%
	Toluen	4,29E-04	3,39E-04	9,0E-05	21%
7	TCE	7,31E-04	6,00E-04	1,3E-04	18%
	Toluen	4,29E-04	3,39E-04	9,0E-05	21%

Det fremgår af tabel 2, at der er et betydeligt tab (20-30%) i fluxkammeret for såvel TCE som toluen. Tabet skyldes efter al sandsynlighed adsorption i betonpladen. Sorptionskapaciteten for beton er i tidligere undersøgelser vist at være stor for flygtige organiske forbindelser/21/, /22/. En undersøgelse af den aktuelle betontypes sorptionskapacitet ligger uden for dette projekts rammer og er ikke nærmere vurderet.

Et væsentligt tab af stof til betonen vil medføre, at der vil gå lang tid, før der opstår stabile koncentrationer i topkammeret. Den målte flux vil først vise sig stabil, når betonen er "mættet" med TCE og toluen. På det tidspunkt, forsøg 5 og 7 blev udført, havde betonen været udsat for eksponering i 3 måneder. Koncentrationen og det tilførte flow i bundkammeret blev under alle forsøgene holdt konstant. Det fremgår af forsøg 5 og 7, at der efter 3 måneders eksponering stadig er et betydeligt tab af stof til betonen. Tabet synes at aftage så langsomt, at det ikke reflekteres i en signifikant stigning i den målte flux over et tidsrum på 1-2 uger (forsøg 5 og 7 viste stabile koncentrationer i topkammer over 1-2 uger).

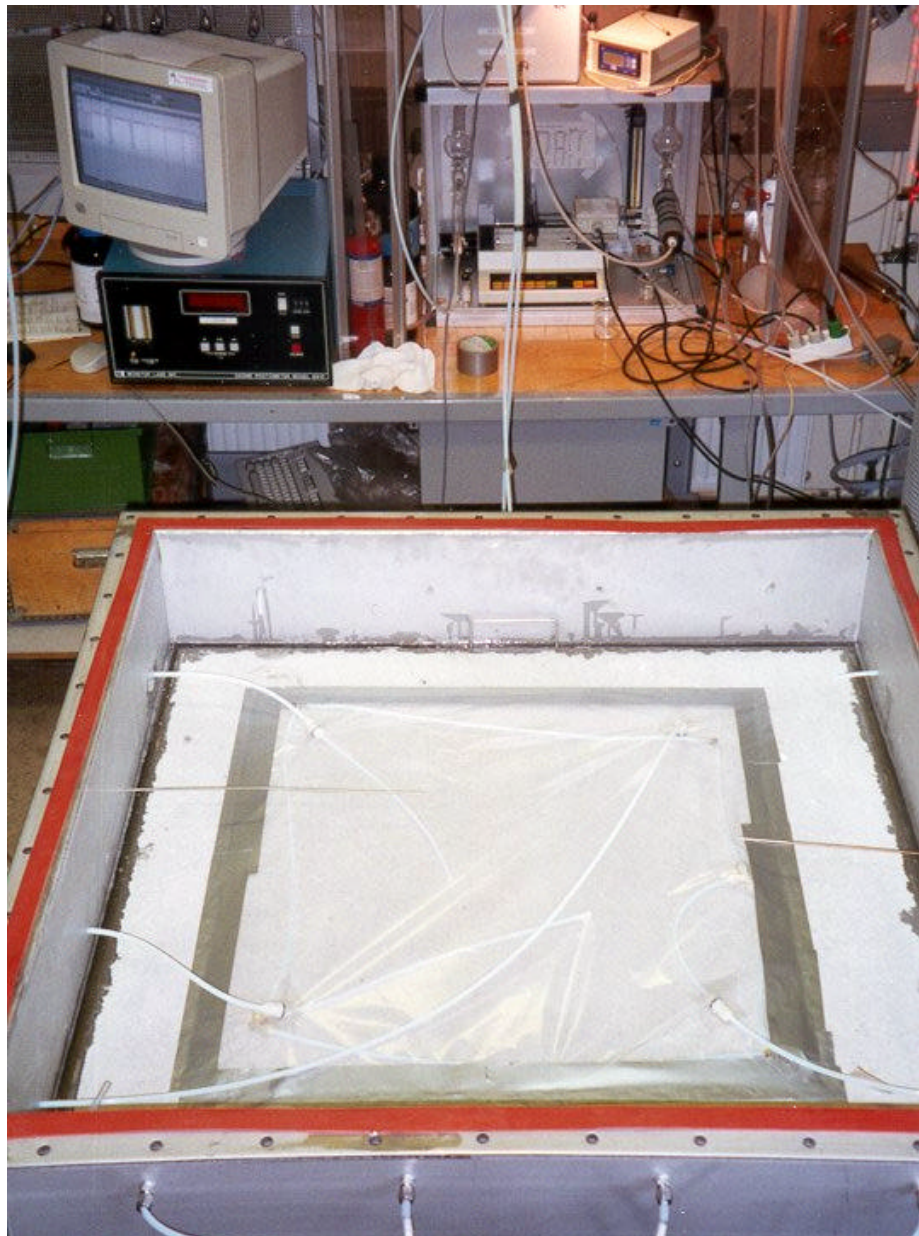
Tabet til betonen konkluderes at have haft en afgørende betydning for størrelsen af den målte flux under laboratorieforsøgene. Når samtlige udførte forsøgsrækker 3-9 betragtes (se afsnit 5.4), har der været en faldende tendens i den målte flux. Under konstante doseringsforhold skulle det forventes, at fluxen til topkammeret ville stige, idet en tilnærmelse til mætning i betonen ville medføre et faldende tab med tiden. Det er på den baggrund fundet rimeligt at antage, at tabet til betonen kan betragtes som konstant under de enkelte forsøgsrækker, og at variationer i den målte flux kan tilskrives andre faktorer end tab til betonen.

Såfremt betonpladen udsættes for temperaturstigninger, vil den adsorbere TCE og toluen kunne afgives igen ved termisk desorption. Forsøgsopstillingen har under forsøgene været placeret under almindelige rumtemperaturer. Effekten af temperaturændringer i forsøgsopstillingen er efterfølgende undersøgt ved at sammenligne den målte flux med den målte temperatur i topkammeret, og der kunne ikke påvises nogen sammenhæng mellem den målte flux og temperaturen i det område, forsøgene blev udført under (19°C - 23°C).

5.3 Sammenligning mellem målt flux til topkammeret og målt flux til folien

Den flux, der måles til arealet under folien, er sammenlignet med den målte flux til topkammeret via det fri betonareal uden om folien, jf. figur 5.

Figur 5. Forsøgsopstilling – forrest: topkammer set fra oven, uden låg. Bagest doseringsenhed.



I forsøg 3, 4, 5 og 7 er der udført målinger af fluxen fra arealet under folien og arealet uden om folien. Tabel 3 og 4 viser resultaterne. En grafisk sammenstilling er vist på figur 6.

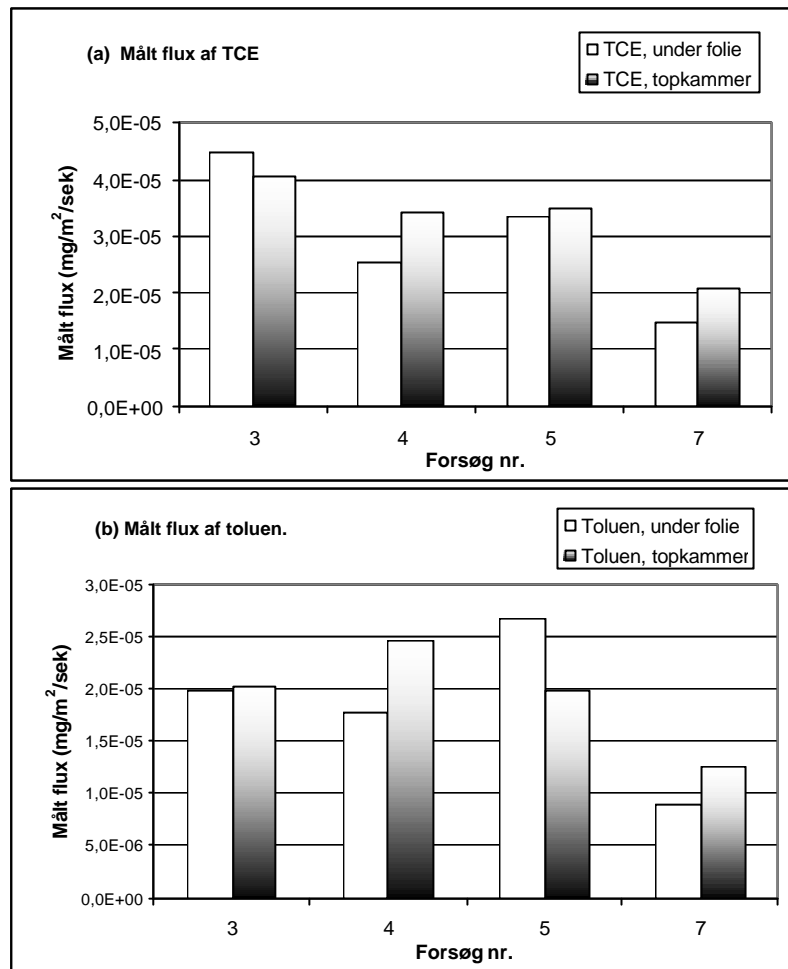
Table 3. Measured concentrations and flow and thereby calculated flux of TCE to the foil and the top chamber for experiments 3, 4, 5 and 7.

		TCE					
		Under folie			Topkammer		
Forsøg nr.	Forsøg startdato	Arealspecifikt flow	Koncentration	Flux	Arealspecifikt flow	Koncentration	Flux
		m ³ /sek/m ²	mg/m ³	mg/m ² /sek	m ³ /sek/m ²	mg/m ³	mg/m ² /sek
3	10-12-99	2,48E-05	1,8	4,5E-05	5,07E-05	0,8	4,1E-05
4	20-01-00	2,54E-05	1,0	2,5E-05	4,90E-05	0,7	3,4E-05
5	07-02-00	1,67E-05	2,0	3,3E-05	4,97E-05	0,7	3,5E-05
7	27-04-00	1,48E-05	1,0	1,5E-05	4,16E-05	0,5	2,1E-05

Table 4. Measured concentrations and flow and thereby calculated flux of toluene to the foil and the top chamber for experiments 3, 4, 5 and 7.

		Toluen					
		Under folie			Topkammer		
Forsøg nr.	Forsøg startdato	Arealspecifikt flow	Koncentration	Flux	Arealspecifikt flow	Koncentration	Flux
		m ³ /sek/m ²	mg/m ³	mg/m ² /sek	m ³ /sek/m ²	mg/m ³	mg/m ² /sek
3	10-12-99	2,48E-05	0,8	2,0E-05	5,07E-05	0,4	2,0E-05
4	20-01-00	2,54E-05	0,7	1,8E-05	4,90E-05	0,5	2,5E-05
5	07-02-00	1,67E-05	1,6	2,7E-05	4,97E-05	0,4	2,0E-05
7	27-04-00	1,48E-05	0,6	8,9E-06	4,16E-05	0,3	1,2E-05

Figur 6. Målt flux af TCE (figur a) og toluen (figur b) til betonareal dækket af folie og til topkammer via frit betonareal.



Det fremgår af figur 6, at der generelt er god overensstemmelse mellem den målte flux til foliearealet og til topkammeret. Der er dog i forsøg 4 og 7 en tydelig afvigelse, idet der måles 30% lavere flux til foliearealet end til topkammeret. I forsøg 5 måles der for toluen 40% højere flux under folien. Årsagen til disse afvigelser er ikke afklaret, men en mulig årsag er usikkerheder på de enkelte målemetoder, der benyttes til flow- og koncentrationsbestemmelse. En nærmere vurdering af usikkerheder indgår i afsnit 5.5.

5.4 Sammenligning mellem målt og beregnet flux

Den målte flux i de enkelte delforsøg er sammenlignet med den beregnede, teoretiske flux. Fluxen er beregnet under antagelse af, at transporten af stof fra bundkammer til topkammer er diffusiv. Beregningen er foretaget efter (III) jf. Miljøstyrelsens vejledning 7 af 1998 /5/:

$$J_B = D \cdot N \cdot \frac{c_L - c_0}{L_B} \text{ (III)}$$

hvor J_B = den beregnede flux [mg/m²/sek].
 D = diffusionskoefficienten for det givne stof [m²/sek].
 Diffusionskoefficient for TCE = $8,8 \cdot 10^{-6}$ m²/sek.

- Diffusionskoefficient for toluen = $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sek}$.
- N = materialekonstant, der er udtryk for den givne betons evne til at dæmpe transporten gennem betonen [dimensionsløs]. For den givne beton er anvendt $N = 0,002$.
- c_L = koncentrationen af den forurenende komponent umiddelbart under betonen, d.v.s. i bundkammer [mg/m^3].
- c_0 = koncentrationen af den forurenende komponent umiddelbart over betonen, d.v.s. i topkammer [mg/m^3].
- L_B = tykkelsen af betonen [m] (i alle forsøg = 0,05 m).

Tabel 5 viser de målte og beregnede værdier af fluxen i de enkelte forsøg. Det er tydeligt, at der fra starten af forsøg 3 i december 1999 til afslutningen af forsøg 9 i juli 2000 har været en tendens til, at den målte flux har været faldende. Dette er overraskende, da betonen må formodes at være mindre "mættet" med TCE og toluen ved forsøgenes start, og da det derfor skulle forventes, at adsorptionen til betonen vil være størst i starten, og at der derfor vil være en mindre flux til topkammeret i de første forsøg i forhold til de forsøg, der udførtes efter adskillige måneders dosering. Der blev udført indledende forsøg med TCE i november 1999, hvilket vil sige, at betonen havde været eksponeret for TCE i ca. 4 uger inden forsøgets start, men toluen blev først introduceret til bundkammeret i forbindelse med forsøg 3. De udførte massebalancer (jf. afsnit 5.2) viser, at tabet til betonen stadig er betydeligt i forsøg 3 og 5. Det har ikke været muligt at afdække, i hvilket omfang tabet varierer som funktion af eksponeringstiden.

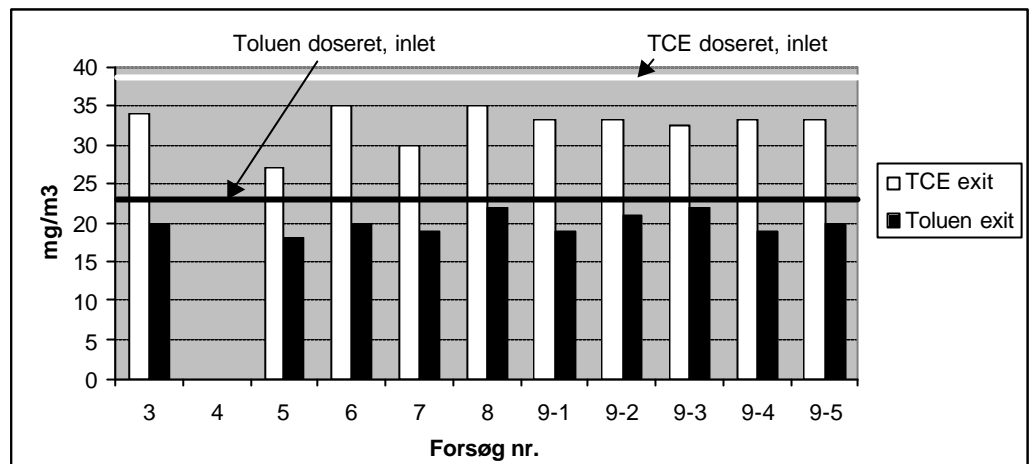
Tabel 5. Målte og beregnede værdier af fluxen i forsøg 3-9.
(L): Forsøg udført med lukket topkammer.

Forsøg nr.	TCE			Toluen		
	Målt flux	Beregnet flux	Ratio målt/ber.	Målt flux	Beregnet flux	Ratio målt/ber.
	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{sek} \cdot 10^{-6}$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{sek} \cdot 10^{-6}$		$\text{mg}/\text{m}^2/\text{sek} \cdot 10^{-6}$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{sek} \cdot 10^{-6}$	
3 (L)	45	13	3,5	20	7,1	2,8
4 (L)	25	13	2,0	18	7,1	2,5
5 (L)	33	13	2,5	27	7,2	3,7
6	29	13	2,2	26	7,2	3,6
7 (L)	15	14	1,1	8,9	7,5	1,2
8	17	14	1,3	7,4	7,4	1,0
9-1	8,0	14	0,6	4,5	7,8	0,6
9-2	6,3	14	0,5	2,8	7,8	0,4
9-3	19	13	1,4	13	7,6	1,7
9-4	8,6	14	0,6	4,0	7,9	0,5
9-5	14	13	1,1	5,9	7,4	0,8
9-6	8,2	14	0,6	4,0	7,9	0,5
9-7	14	14	1,0	7,3	7,9	0,9
9-8	9,2	13	0,7	3,8	7,4	0,5

En nærliggende årsag til at den målte flux falder, vil være, at doseringen af TCE og toluen til bundkammer har været højere i starten. Doseringen til bundkammeret foretages ved fordampning af et konstant flow af væskestrøm via injektionssprøjter til et konstant gasflow. Injektionssprøjterne skiftes og genfyldes ca. hver 10. dag. På det tidspunkt, hvor der påfyldes væske på injektionssprøjterne, har der i enkelte tilfælde været observeret et kortvarigt peak i bundkammeret, men efter få timer er denne top aftaget til konstant niveau. Målinger af TCE- og toluenkonzentrationer i bundkammeret er

udført som kontrol af doseringens stabilitet under forsøg 3 – 9-5 (koncentrationer i bundkammer er ikke målt i forsøg 9-6, 9-7 og 9-8). Disse kontrolmålinger er illustreret i figur 7.

Figur 7. Målte koncentrationer i bundkammer.



Det fremgår af figur 7, at der ikke kan konstateres et generelt fald i koncentrationen af TCE og toluen i bundkammeret hen over forsøgsrækkerne. Årsagen til den lavere målte flux i forsøg 7, 8 og 9 kan derfor ikke tilskrives varierende dosering til bundkammeret.

En reduceret flux til topkammeret vil teoretisk set kunne forekomme, hvis betonpladen udsættes for et temperaturfald, hvorved betonens sorptionskapacitet formodentlig vil øges. Med henvisning til afsnit 5.2 kan det afvises, at temperatursvingninger i området 19°C – 23°C giver anledning til en reduktion i den målte flux. En anden potentiel påvirkning på fluxen er vandindholdet i betonen, d.v.s. vandindholdet i luften over og under betonpladen i opstillingen. Vandindholdet i forsøgsopstillingen vil kunne påvirke betonens evne til at adsorbere VOC. Vandindholdet i luften i bundkammeret er under forsøgene målt ved hjælp af PAIR. Da doseringsluften til såvel bundkammer, folie og topkammer forsynes fra et trykluftanlæg, er vandindholdet forholdsvis lavt og konstant. Alle målinger i bundkammeret viser et vandindhold på mellem 2,4 g/m³ – 2,6 g/m³. Såfremt vandindholdet har en væsentlig indflydelse på tabet af stof til betonen, skulle der opstå en signifikant forskel på de målte værdier i forsøg 5 og 6 samt 7 og 8, der er udført med henholdsvis uden lukket topkammer og i øvrigt under identiske forhold. Sammenligningen vanskeliggøres imidlertid af, at luften til folien er tør, hvorimod rumluften, som kommer i kontakt med betonfladen uden om folien, når topkammeret er åben, har en koncentration af vand, der varierer mellem ca. 6 g/m³ – 10 g/m³.

Det kan ud fra forsøgene ikke afgøres, om den målte flux aftager som følge af, at vandindholdet i betonpladen øges, når der udføres forsøg med åbent topkammer.

Vandindholdet og temperaturen i betonen kan have en afgørende betydning for fluxen til indeklimaet på forurenede grunde. Variationer af temperatur og vandindhold vil i givet fald kunne medføre en årstidsvariation i fluxen til indeklimaet. I modsætning til beregningsmodellen har betonens temperatur og vandindhold ingen betydning for målemetoden. En nærmere undersøgelse af

indflydelsen af temperatur og vandindhold på betons sorptionskapacitet er ikke omfattet af dette projekt.

5.5 Effekt af flowbetingelser og folietype

For at undersøge om det har arealspecifikke flow, eller folietypen har indflydelse på den flux, der måles ved hjælp af foliemetoden, er der udført en forsøgsrække som vist i tabel 6. Hvert forsøg blev udført to gange, og forsøgene blev udført i randomiseret rækkefølge som vist i tabel 7.

Tabel 6. Forsøgsbetingelser ved test af indflydelsen af folietype og flow på foliemetoden.

		Flow, folie	
		0,07 m ³ /h/m ² (500 ml/min.)	0,28 m ³ /h/m ² (2000 ml/min.)
Folietype	Nalophan	(1)	(b)
	TEDLAR	(a)	(ab)

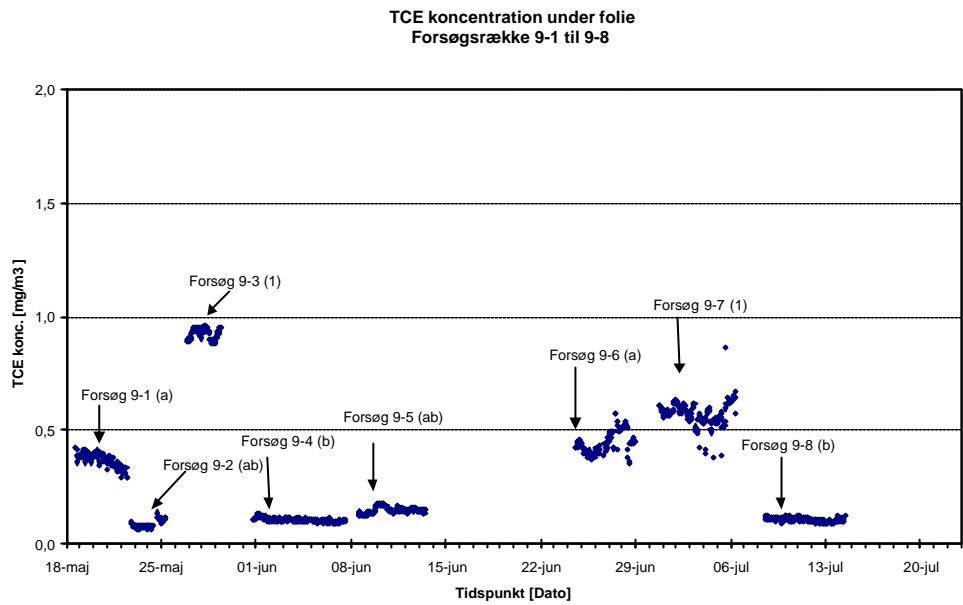
En nærmere beskrivelse af forsøgsbetingelserne fremgår af bilag A.

Tabel 7. Udførelse af forsøg til test af indflydelsen af folietype og flow på foliemetoden.

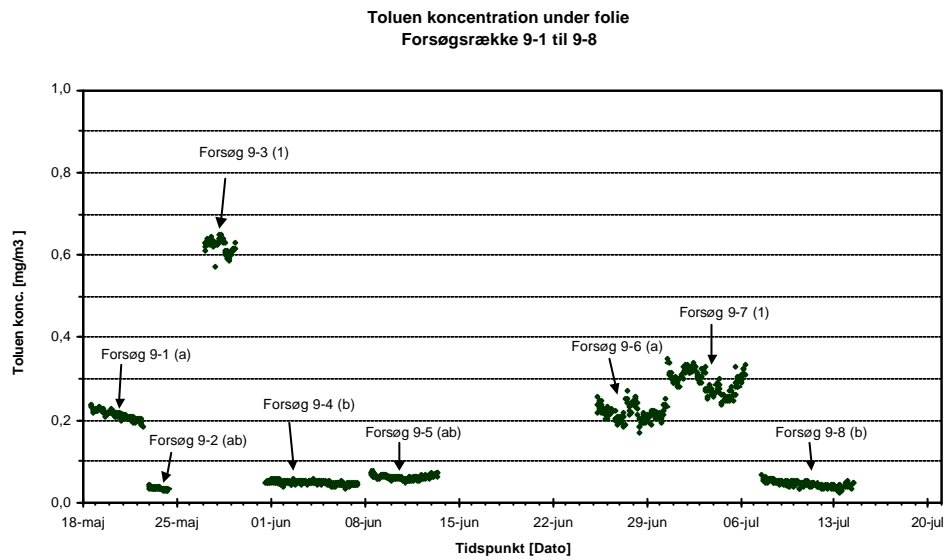
Forsøgsindstilling				
Forsøg nr.	Betegnelse	Folietype	Flow ind, folie	Flow pumpet ud, folie
9-1	(a)	TEDLAR	500 ml/min.	300 ml/min.
9-2	(ab)	TEDLAR	2.000 ml/min.	1.000 ml/min.
9-3	(1)	Nalophan	500 ml/min.	300 ml/min.
9-4	(b)	Nalophan	2.000 ml/min.	1.000 ml/min.
9-5	(ab)	TEDLAR	2.000 ml/min.	1.000 ml/min.
9-6	(a)	TEDLAR	500 ml/min.	300 ml/min.
9-7	(1)	Nalophan	500 ml/min.	300 ml/min.
9-8	(b)	Nalophan	2.000 ml/min.	1.000 ml/min.

De målte koncentrationer under de enkelte delforsøg er vist i figur 8 og 9, og resultaterne er opsummeret i tabel 8 og 9. Differensen mellem trykket under og over folien blev i alle forsøg målt at være mindre end 0,5 Pa. Dette bekræfter tidligere udførte forsøg (jf. bilag D), som selv ved relativt høje flow viste meget lave trykdifferenser over en folie, der lægges på en betonflade og beluftes (mindre end 0,3 Pa ved et indblæsningsflow på 10 l/min.).

Figur 8. Det målte koncentrationsforløb under folien i forsøg 9-1 til 9-8:TCE.



Figur 9. Det målte koncentrationsforløb under folien i forsøg 9-1 til 9-8:Toluen.



Tabel 8. Resultater af forsøg 9-1 til 9-8: Målt flux af TCE.

Resultater for TCE		Areal specifikt flow					
		0,07 m ³ /h/m ²			0,28 m ³ /h/m ²		
		Forsøg nr.	mg/m ² /sek * 10 ⁶		Forsøg nr.	mg/m ² /sek * 10 ⁶	
			målte værdier	x̄ ± SD		målte værdier	x̄ ± SD
Folietype	Nalophan	9-3	19,1	16,6 ± 3,5	9-4	8,6	8,9 ± 0,4
		9-7	14,1		9-8	9,2	
	TEDLAR	9-1	8,0	8,1 ± 0,1	9-2	6,3	10,1 ± 5,3
		9-6	8,2		9-5	13,8	

Tabel 9. Resultater af forsøg 9-1 til 9-8: Målt flux af toluen.

Resultater for toluen		Areal specifikt flow					
		0,07 m ³ /h/m ²			0,28 m ³ /h/m ²		
		Forsøg nr.	mg/m ² /sek * 10 ⁶		Forsøg nr.	mg/m ² /sek * 10 ⁶	
			målte værdier	x̄ ± SD		målte værdier	x̄ ± SD
Folietype	Nalophan	9-3	12,9	10,1 ± 4,0	9-4	4,0	3,9 ± 0,1
		9-7	7,3		9-8	3,8	
	TEDLAR	9-1	4,5	4,3 ± 0,4	9-2	2,8	4,4 ± 2,2
		9-6	4,0		9-5	5,9	

En to-sidet variansanalyse er udført på resultaterne, og resultatet er vist i bilag E.

Det konkluderes ud fra variansanalysens resultat, at der ikke er en signifikant effekt af hverken folietype og flow. Det målte resultat er uafhængigt af, om der benyttes et flow i området 0,07 m³/h/m² - 0,28 m³/h/m². Det kan heller ikke ud fra måleresultatet påvises, om der bruges Nalophan folie eller TEDLAR folie.

5.6 Undersøgelse af potentielle fejlkilder

En række gasarter – herunder også flygtige organiske forbindelser - adsorberes i større eller mindre grad til overflader. De valgte folietyper Tedlar og Nalophan vides at have de mest afvisende overflader over for de VOC'er, der typisk vil optræde i forbindelse med stoftransport fra jordforurening. En anden potentiel kilde til tab af stof ved brug af foliemetoden vil kunne opstå, hvis der sker permeation gennem folien, hvorved det målte stof trænger

igennem på grund af en koncentrationsgradient mellem luften under folien og luften over folien.

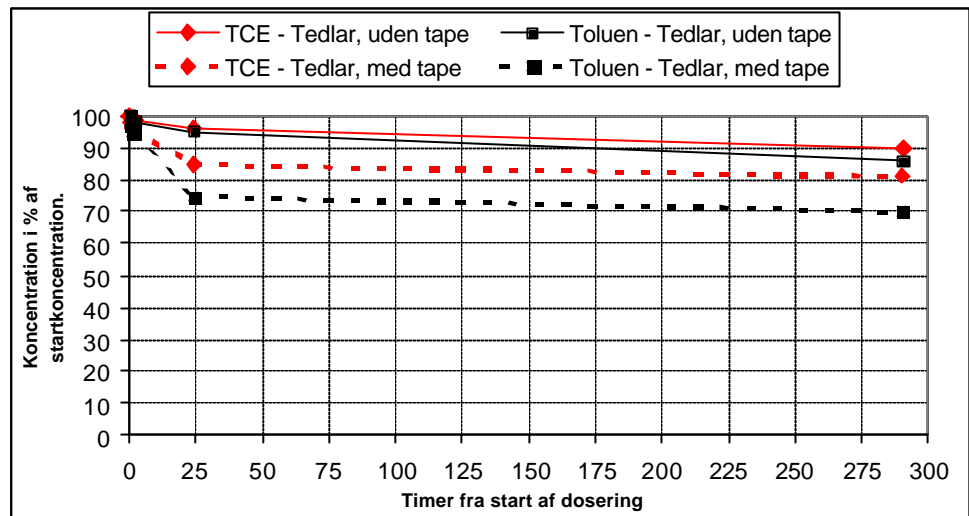
Det var i forbindelse med laboratorietesten derfor væsentligt at afklare, om der kan opstå et væsentligt tab af stof som følge af adsorption til eller permeation gennem den folie, der lægges på betonen. Endvidere blev det undersøgt, om den anvendte tape kunne være en årsag til tab af stof via absorption til tapen, herunder især til klæbemidlet, der fastgør folien til betonen.

Der blev udført en række forsøg med TEDLAR folie. Der blev fremstillet fire TEDLAR poser, hvoraf der i to af poserne blev klæbet et stykke Nichiban PE-coated lærredstape af størrelsen 5 cm x 37 cm på indersiden af posen. Forsøgene blev udført med såvel høje som lave koncentrationer, og der blev samtidigt udført blindforsøg for at kontrollere, om der kunne opstå en afdampning fra den anvendte tape. De nærmere forsøgsbetingelser fremgår af bilag A. Figur 10 viser det gaschromatografiske udstyr til analyse af PCE og toluen i poserne. Figur 11 og 12 viser resultaterne af forsøgene.

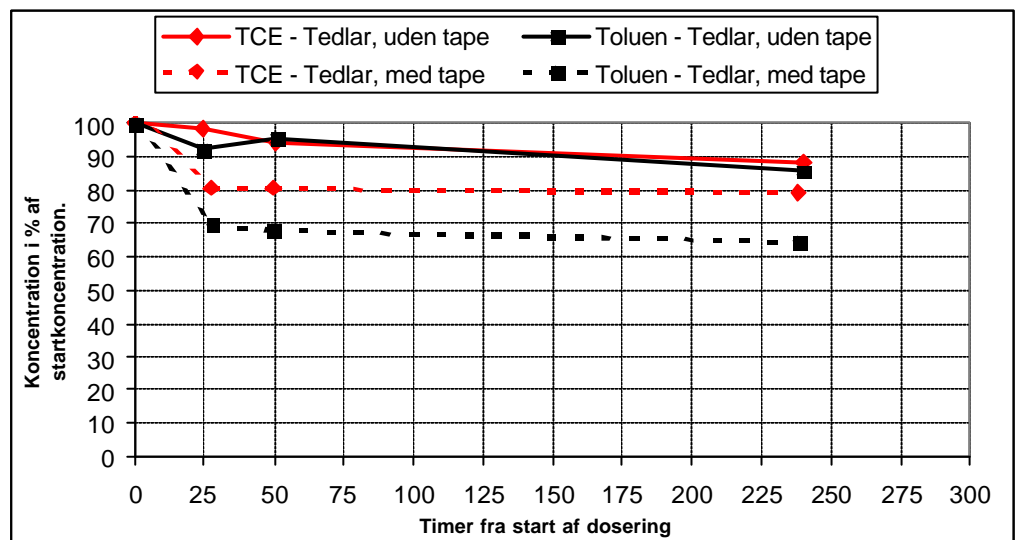
Figur 10. Gaschromatografisk analyse af PCE og toluen for kontrol af adsorption og permeation af stof ved brug af Tedlar folie. Opsamling og behandling af data på PC.



Figur 11. Tab af TCE og toluen under opbevaring af gasblanding i TEDLAR pose. Startkoncentrationer: TCE: 35 mg/m³, toluen: 15 mg/m³.



Figur 12. Tab af TCE og toluen under opbevaring af gasblanding i Tedlar pose. Startkoncentrationer: TCE: 1,05 mg/m³, toluen: 0,65 mg/m³.



Figur 11 og 12 viser, at der observeres et tab på ca. 2% over de første to timer efter dosering af gassen i TEDLAR poser uden tape, og tabet er ca. 5% efter 24 timer. Dette gælder såvel for TCE som for toluen. For de poser, der indeholdt Nichiban tape, var tabet en 1 time efter dosering 4% - 5%, og tabet var efter 1 time ikke højere for poser med lave koncentrationer af TCE og toluen. Efter 24 timer er tabet på 15% for TCE og 25% for toluen for poser med høje koncentrationer (figur 11), og for poser med lave koncentrationer var tabet 19% for TCE og 30% for toluen.

Det må derfor konkluderes, at gassernes kontakt med tapen medfører et øget tab af TCE og toluen. Overfladen af tapen, som gassen er i kontakt med, er imidlertid væsentlig større i "poseforsøget" i forhold til under fluxmålingen, hvor der kun vil være mulighed for kontakt langs kanten af folien. Endvidere er de udførte forsøg med TEDLAR poser udført med statistisk fortynding,

d.v.s. med stillestående luft, og effekten af et tab vurderes at være væsentligt reduceret, når der anvendes en konstant beluftning af folien.

Der vurderes derfor ikke at være nogen risiko for et betydende tab af hverken TCE eller toluen gennem TEDLAR vægge eller via tapen. Det er i afsnit 5.6 vist, at det ikke har en effekt, om der vælges TEDLAR folie eller Nalophan folie. Derfor konkluderes det, at der efter al sandsynlighed heller ikke vil være risiko for et måleligt tab ved brug af Nalophan folie.

5.7 Måleusikkerhed

En vurdering af måleusikkerheden ved foliemetoden kan foretages ud fra en fastlæggelse af metodens nøjagtighed og præcision. Nøjagtigheden angiver, hvor tæt på det sande resultat metoden er, og præcisionen angiver, hvor præcist metoden rammer det samme tal fra gang til gang ved gentagne målinger.

En vurdering af nøjagtigheden kræver kendskab til den sande værdi af fluxen. Den sande værdi er ikke kendt, da der er et varierende tab af stof til betonen under forsøgene. Som groft skøn kan fluxen målt med foliemetoden sammenlignes med den målte flux til topkammeret. Denne sammenligning er beskrevet i afsnit 5.4 og viser, at den målte flux under folien stemmer godt overens med den målte flux til topkammeret. Afvigelsen mellem de to målte flux er på mellem 0% og 30%, hvilket giver en indikation af metodens nøjagtighed.

Som et estimat for præcisionen kan anvendes den tilfældige fejl på målingen. Den tilfældige fejl kan vurderes ud fra standardafvigelsen mellem gentagelser af forsøg, der er udført under samme betingelser og med en konstant flux gennem betonen. Forsøg 3, 4, 5 og 7 er udført med lag på topkammeret, og disse forsøg viste, at fluxen gennem betonen var faldende i perioden december 1999 – april 2000. Derfor er resultaterne af disse forsøg ikke anvendt til bestemmelse af præcisionen. Præcisionen vurderes bedst at kunne estimeres ud fra de 8 delforsøg i forsøg 9, der blev udført i maj-juli 2000. På grund af at betonen har været eksponeret i længere tid, antages fluxen at være mindre varierende på dette tidspunkt, og dette bekræftes af de målte resultater. Ud fra den statistiske analyse af resultaterne af forsøg 9 kan udtrages et estimat for den tilfældige variation (s_m), jf. afsnit 5.6. Ud fra variansanalysen på forsøg nr. 9 estimeres for standardafvigelsen mellem gentagelser ved estimatet s_m til ca. $2 \cdot 10^{-6}$ mg/m²/sek for såvel TCE som toluen. Dette giver en relativ standardafvigelse på gentagne målinger på 15% - 50%, afhængig af størrelsen af den målte flux – jo lavere målt flux, jo højere relativ usikkerhed.

Samlet vurderes det, at der under de givne forhold er opnået en præcision, der er mindre end $\pm 50\%$. Med andre ord vil der ved gentagne målinger på samme lokalitet kunne opnås en tilfældig variation mellem de enkelte målinger, der er mindre end $\pm 50\%$. Denne præcision skal sammenlignes med den variation, der i praksis vil være i den faktiske flux hen over et betongulv på en forurenede lokalitet. Fluxen vil variere afhængig af bl.a. koncentrationerne under gulvet, af betongulvets beskaffenhed og indhold af revner. Den faktiske flux vurderes ud fra erfaringer med fra poreluftmålinger typisk at variere hen over gulvet med langt mere end $\pm 50\%$ under feltforhold, og foliemetodens præcision vurderes derfor at være fuldt acceptabel.

6 Konklusion

Den opbyggede laboratorieopstilling blev fundet anvendelig til test af foliemetoden. Ud fra sporstofdosering og tryksætning af forsøgsopstillingens bundkammer blev det konstateret, at der ikke var målelige revner i betonen. Fluxen af stof fra bund- til topkammer konkluderes derfor som ønsket at være helt domineret af diffusiv transport.

Beregnete massebalancer har vist, at der var et betydeligt tab af TCE og toluen til betonpladen i opstillingen. Det beregnede tab var af størrelsesordenen 20%-30%. Dette tab blev fundet efter, at der i flere måneder havde været konstant dosering af TCE og toluen til bundkammeret. Dette bekræfter resultatet af nyere undersøgelser, der har vist, at beton har en meget høj sorptionskapacitet over for VOC. En egentlig undersøgelse af den aktuelle betontypes evne til at adsorbere VOC ligger uden for dette projekts rammer og er ikke nærmere vurderet.

Adsorptionen til betonen kunne ikke påvises at have nogen betydende indflydelse på variationen af den målte flux over de forholdsvis korte tidsrum, som de enkelte forsøg blev udført over (typisk 1-2 uger).

Med henblik på at vurdere om den adsorberede mængde TCE og toluen til betonen kunne afgives ved højere temperaturer, blev den målte flux sammenlignet med temperaturen i forsøgsopstillingen. Der kunne i temperaturområdet 19°C – 23°C ikke påvises at være en sammenhæng mellem den målte flux gennem betonen og temperaturen.

Fluxen målt med foliemetoden blev sammenlignet med fluxen, der kunne måles til topkammeret. Der blev fundet overensstemmelse inden for 10%-40%, hvilket vurderes at være tilfredsstillende, når den generelle usikkerhed på måleresultaterne tages i betragtning.

Det kunne ikke påvises at have signifikant indflydelse på den målte flux, om der benyttedes TEDLAR folie eller Nalophan folie. Der blev heller ikke fundet signifikant effekt af flowvariationer i området $0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ – $0,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Det konkluderes derfor, at såvel Tedlar som Nalophan er egnet til afdækning ved brug af foliemetoden, og flowindstilling kan foretages i området $0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ – $0,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$.

Der er ikke fundet nævneværdige tab af TCE og toluen til folievæg af TEDLAR. Tabet af TCE og toluen via absorption til den anvendte tape konkluderes ud fra forsøgene at være uden betydning for målingen.

Den målte flux i de enkelte delforsøg er sammenlignet med den beregnede, teoretiske flux. Beregningen er foretaget i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 af 1998 og under antagelse af, at transporten af stof fra bundkammer til topkammer er diffusiv. Som angivet i vejledningen for beton af passiv type er der anvendt en materialekonstant på $N = 0,002$. Den målte flux er i de første 4 forsøgsrækker 2-3 gange højere end den beregnede flux. Dette gælder for såvel TCE som for toluen. I de sidste 10 forsøgsrækker er

der inden for en variation på $\pm 50\%$ overensstemmelse mellem den målte og den beregnede flux.

Forsøgsbetingelserne har været uændrede under alle forsøgene, og der er ikke fundet nogen forklaring på, at den målte flux falder. Doseringen til bundkammeret har ikke været faldende, og en reduktion i fluxen kan heller ikke forklares ud fra temperaturen i forsøgsopstillingen, der under alle forsøgene var i området $19^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$. Der var ud fra forsøgene ikke tegn på, at den målte flux aftager, når der udføres forsøg med åbent topkammer, hvorved vandindholdet i betonpladen i nogen grad vil øges, idet betonarealet uden om folien vil være i kontakt med rumluften, der har et noget højere vandindhold end doseringsluften til bundkammer og folie.

Temperatur og vandindhold i betonen kan have afgørende betydning for forureningsbidraget til indeluften på forurenede grunde, hvor såvel temperaturen som vandindholdet i betonen vil kunne variere betydeligt hen over årstiderne på vore breddegrader. I modsætning til beregningsmodellen har betonens temperatur og vandindhold ingen betydning for målemetoden.

Ud fra gentagne forsøg med foliemetoden findes en tilfældig variation på 15%-50%. Det vurderes på denne baggrund, at metoden er anvendelig til målinger af fluxen fra betonarealer med en skønnet præcision på op til $\pm 50\%$. Med andre ord vil der ved gentagne målinger på samme lokalitet kunne opnås en tilfældig variation mellem de enkelte målinger, der er mindre end $\pm 50\%$. Denne præcision skal sammenlignes med den variation, der i praksis vil være i den faktiske flux hen over et betongulv på en forurenede lokalitet. Fluxen vil variere afhængig af bla. koncentrationerne under gulvet, af betongulvets beskaffenhed og indhold af revner. Den faktiske flux vurderes ud fra erfaringer med fra poreluftmålinger typisk at variere hen over gulvet med langt mere end $\pm 50\%$ under feltforhold, og foliemetodens præcision vurderes derfor at være fuldt acceptabel.

En fastlæggelse af proceduren for gennemførelse af fluxmålinger med foliemetoden vil blive foretaget i forbindelse med en planlagt felttest.

Ud over at kunne anvendes til gulvarealer, forventes foliemetoden at kunne bruges til måling omkring afgrænsede områder på gulve, hvor der kan forekomme en særlig kraftig stoftransport fra jordforurening under gulv. Sådanne områder kan f.ex. være rørgennemføringer og samlinger langs paneler. Det forventes, at særligt forurenende områder kan afdækkes med folie og kortlægges ved måling efter samme princip som for gulvarealer. En test af metodens anvendelighed til måling på særligt forurenende områder vil blive udført i forbindelse med feltafprøvningen af metoden.

7 Liste over forkortelser og udvalgte fagudtryk

Arealspecifikt flow	En betegnelse for flowet pr. arealenhed. Benyttes til at beskrive beluften af et folieafdækket areal, d.v.s. forsyningsflowet pr. afdækket m ² gulvareal. Enhed fex. m ³ /h/m ² .
Beton af passiv klasse	Beton, der fremstilles til anvendelse i indendørs miljø med tør, ikke-aggressiv atmosfære, hvor korrosion ikke forekommer.
BTEX	Forkortelser for flygtige forbindelser, der typisk karakteriserer bidrag fra benzinfurening: B = benzen, T = toluen, E = Ethylbenzen. X = xylener (o-xylen, m-xylen og p-xylen).
FLEC	Field and Laboratory Emission Cell.
Flux	En betegnelse for stofmængden, der pr. tidsenhed transporteres gennem et givent areal. Eksempel på enhed: mg/m ² /sek.
GC	Gaschromatograf. Analyseinstrument hyppigt anvendt til bestemmelse af specifikke organiske komponenter.
Nalophan	Folie fremstillet af PET (polyethylen terephthalat ester).
Nulluft	Luft, der er rensat og dermed fri for de komponenter, der måles for.
PAIR	Fotoakustisk infrarød spektrometri.
PCE	Perchlorethylen, også kaldet tetrachlortethylen. Et af de hyppigst benyttede stoffer af kemisk renserier.
PID	Fotoionisationsdetektor.
SF ₆	Svovlhexafluorid. Et stof der er inert og inaktivt i forhold til overfladeinteraktioner. Benyttes af samme grund ofte som sporstof i forbindelse med undersøgelse af luftbevægelser.
TCA	1,1,1 -trichlorethan. Benyttes som metalaffedtningsmiddel i industrien og som opløsningsmiddel i produkter som maling og lim.
TCE	Trichlorethylen. Benyttes som affedtningsmiddel i industrien, som rensmiddel og som opløsningsmiddel for visse produkter.
TEDLAR®	Folie fremstillet af PVF (polyvinyl fluorid).
USEPA	United States' Environmental Protection Agency.
VOC	Forkortelse for "Volatile Organic Compounds", en samlet betegnelse for flygtige organiske forbindelser. Defineres som organiske stoffer med kogepunkt i intervallet x grc - x.

8 Referencer

- 1 Måling af indtrængningen af gasformige forbindelser fra forurenede jord til indeluften: Foliemetoden. Del 2. Felttest. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen.
- 2 Benzene from traffic. Fuel content and ambient air concentrations. NERI Technical Report No. 309, Danmarks Miljøundersøgelser.
- 3 Bygge- og Boligstyrelsen (1994). Vejledning: Måling af stoffer i indeluften fra forurening fra jorden.
- 4 Miljøstyrelsen (1998). Oprydning på forurenede lokaliteter. Vejledning Nr. 6, 1998.
- 5 Miljøstyrelsen (1998). Oprydning på forurenede lokaliteter – Appendikser. Vejledning Nr. 7, 1998.
- 6 Vendelboe, N. og Holm, J. (1992). Diffusionsforsøg – Betongulve. Rapport til Bygge- og Boligstyrelsen udarbejdet af Geoteknisk Institut.
- 7 Shen, T., Schmidt, C.E. and Card, T.R. (1993). Assessment and Control of VOC emissions from Waste Treatment Facilities. Van Nostrand Reinhold, NY.
- 8 Wuske, T. Fittkau, I., Mahn, J., Polzius, R. and Manus, A. (1998). Pentachlorophenol detection at the source of emission. Sampling equipment and immunochemical analysis. *Analytica Chimica Acta* **359**, pp. 321-328.
- 9 Bergsøe, N. (1993). Anvendelse af passiv sporgas-teknik i praksis til undersøgelse af indtrængning af jordgasser i boliger. ATV-komiteen vedrørende grundvandsforurening, den 4. nov. 1993, Schæffergården.
- 10 Dupont, R. R. (1987). Measurement of Volatile Hazardous Organic Emissions from Land Treatment Facilities. *Journal of Air Poll. Control Assoc.* **37**, pp. 168-176.
- 11 Gholson, A.R., Albritton, J.R., Jayanty, R.K.M., Knoll, J.E., Midgett, M.R. (1991). Evaluation of the Flux Chamber Method for Measuring Volatile Organic Emissions from Quiescent Liquid Surfaces. *Environm. Sci. Technol.* **21**, pp. 519-524.
- 12 Fuglsang, K. (1989). Målemetode til bestemmelse af emissioner af flygtige organiske forbindelser fra forurenede byggegrunde. ATV-Komiteen vedrørende grundvandsforurening, Vingstedcentret, 7.-8. marts 1989.
- 13 Grove, A. og Wille, E. (1993). Måling af den luftbårne emission af kulbrinter fra forurenede jord. Rapport til Miljøstyrelsen fra Dansk Teknologisk Institut.
- 14 Wolkoff, P., Clausen, P.A., Nielsen, P.A. and Gunnarsen, L. (1993). Documentation of Field and Laboratory Emission Cell "FLEC" – Identification of Emission Processes from Carpet, Linoleum, Paint and Sealant by Modelling. *Indoor Air* **3**, pp. 291-297.
- 15 prENV 13419-2 (1998) (Draft standard): Building products – Determination of the emission of volatile organic compounds – Part 2: Emission test cell method. European Committee for Standardization (CEN).
- 16 Udel, E. (1998). Application of the FLEC for VOC emission testing of wood based furniture and coating testing. 1st Int. Discussion Meeting on

-
- FLEC Applications, AMI Copenhagen, 26.-27. November 1998. Oral Presentation.
- 17 En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse (1997). Claus E. Andersen et al. Rapport udarbejdet for Bygge- og Boligstyrelsen og Statens Institut for Strålehygiejne, Forskningscenter Risø, Roskilde.
 - 18 Radon som sporgas for jordluftindtrængning til hus ved forurenet grund (2001). Claus E. Andersen. Forskningscenter Risø, Roskilde.
 - 19 Miljøstyrelsen (1998). Oprydning på forurenede lokaliteter – Hovedbind. Vejledning Nr. 6, 1998.
 - 20 VDI-Richtlinien (1981). Messen von Gasen – Prüfgase. Herstellung durch kontinuierliche Injektion. VDI 3490, Blatt 8.
 - 21 Meininghaus, R., Knudsen, H.N., and Gunnersen, L (1998). Diffusion and Sorption of Volatile Organic Compounds in Indoor Surface Materials. Proc. EPIC 2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, France, Nov. 1998.
 - 22 Meininghaus, R., Knudsen, H.N., and Gunnersen, L. (1999). Impact of Sorption and Diffusion on Indoor Air Pollution, Proc. Indoor Air Conference, August 1999, Scotland.

Forsøgsbetingelser.

Indhold:

1.	Test af revnedannelser i forsøgopstillingens betonplade	53
2.	Massebalance	53
3.	Test af tab af stof til folie eller tape	54
4.	Test af indflydelsen af flowbetingelser og folietype	54

Der blev under laboratorietesten udført en række forsøg, som for overskuelighedens skyld er inddelt i: test af revnedannelser, massebalance, tab af stof til folie/tape samt test af indflydelsen af flowbetingelser og folietype.

1. Test af revnedannelser i forsøgopstillingens betonplade

Formålet med testen var, om der er revner i betonpladen i forsøgopstillingen ved hjælp af sporstofforsøg med SF₆. SF₆ blev tilført bundkammeret, og herefter blev koncentrationen af SF₆ i topkammeret målt. Revnedannelser kan påvises ved, at koncentrationen i topkammeret stiger kraftigere, når der påføres overtryk i bundkammeret.

Forsøget blev udført med lukket topkammeret, idet der blev lagt et tætsluttende låg på kammeret.

Der blev indledningsvis udført måling af SF₆ i topkammeret ved hjælp af PAIR teknik med det formål at fastlægge en "basislinie". Den udtagne prøveluft føres fra instrumentet tilbage til topkammeret. Efter, at en stabil basislinie er opnået i topkammeret, måles koncentrationen af SF₆ i bundkammeret, ligeledes med recirkulation af prøveluften.

SF₆ tilførtes bundkammeret ved injektion af 4,2 liter 1% v/v SF₆ ind i bundkammeret. Startkoncentrationen i bundkammer (vol. 212 liter) bliver herved teoretisk ca. 200 ppm. Ved hjælp af en gastæt pumpe recirkuleredes luften i bundkammeret ved 5 l/min indtil stabil koncentration blev opnået. Pumpen slukkedes, og bundkammeret blev lukket helt på det tidspunkt, at koncentrationen var konstant i bundkammeret.

B&K 1302 blev umiddelbart herefter konstant sat til at måle i topkammer. Efter at stationær flux kunne antages ud fra det målte koncentrationsforløb i topkammeret, tilførtes kortvarige overtryk i bundkammeret for at påvise evt. revnedannelser i betonpladen. Overtrykket blev tilført ved hjælp af en pumpe med justerbart bypass, og pumpen påførte et overtryk på 200Pa i bundkammeret. Trykket blev fulgt visuelt på et skrårørsmanometer, der viste trykdifferensen mellem top- og bundkammer.

Overtrykket blev påført i 1-5 minutter ad gangen.

2. Massebalance

Forsøg med massebalance blev udført med det formål at undersøge, hvor stort en del af den indkommende stofmængde, der blev tabt som følge af adsorption til betonen. Forsøgene krævede, at topkammeret var lukket, dels at

der blev udført ekstra flow- og koncentrationsmålinger, som massebalancen krævede.

3. Test af tab af stof til folie eller tape

Tabet af TCE h.h.v. toluen blev testet som funktion af tiden ved måling på:

1. TEDLAR pose med N₂
2. TEDLAR pose med TCE/toluen
3. TEDLAR pose med tape og N₂
4. TEDLAR pose med tape og TCE/toluen

Forsøgene blev udført med følgende koncentrationer:

	TCE	Toluen	Udført dato
"Høje koncentrationer"	35	15	13.04 - 25.04.2000
"Lave koncentrationer"	1,0	0,6	19.09 - 29.09.2000

I pose 3 og 4 blev tape af fabrikat Nichiban, størrelse 5 cm x 37 cm, klæbet på indersiden af posen. I forsøget "høje koncentrationer" var tapen fastgjort fladt mod posens inderside, men – for at øge kontakten til tapens gummierede side og dermed fremprovokere "worst case", blev tapen i forsøget "lave koncentrationer" sammenrullet og placeret således, at begge sider af tapen var i berøring med gassen, jf. figur A.1.

Figur A.1. Tape sammenrullet og fastgjort til Tedlar posers inderside i forsøget "lave koncentrationer".



Koncentrationen af TCE og toluen i poserne blev målt efter ca. 0, 2, 24, 240 og 410 timer ved gaschromatografisk analyse.

4. Test af indflydelsen af flowbetingelser og folietype

For at undersøge om det har arealspecifikke flow eller folietypen, har indflydelse på den flux, der måles ved hjælp af foliemetoden, er der udført en forsøgsrække, hvorefter de to faktorer er testet i to niveauer (højt og lavt niveau), jf. tabel A1.

Table A1. Forsøgsbetingelser ved test af indflydelsen af folietype og flow på foliemetoden.

		Flow, folie	
		0,07 m ³ /h/m ² (500 ml/min.)	0,28 m ³ /h/m ² (2000 ml/min.)
Folietype	Nalophan	(1)	(b)
	TEDLAR	(a)	(ab)

Hvert forsøg blev udført to gange, og forsøgene blev udført i randomiseret rækkefølge som vist i tabel A2.

Der blev til hvert forsøg anvendt nyt, udskåret Tedlarfolie i størrelsen 0,7 m x 0,7 m (0,49 m²), og folien blev placeret i samme position (centralt på flise) i alle forsøg.

Alle forsøg blev udført med åbent topkammer. Tid for indstilling af stabil koncentration i gassen ud af folien var under alle forsøg mindre end 12 timer. Hvert forsøg blev udført over 3-7 dage med det formål at vise, om en stabil flux havde indfundet sig. Temperaturen i bundkammeret var 21-23 °C under alle forsøg. Der blev målt koncentrationer i udgangsluften fra folien 1 gang i timen med betingelser som beskrevet i bilag B.

Table A2. Udførelse af forsøg til test af indflydelsen af folietype og flow på foliemetoden. Tal i parentes angiver det faktiske, målte flow.

	Start:	Slut:	Forsøgsindstilling			
Forsøg nr.	Dato, kl.	Dato, kl.	Betegnelse	Folietype	Flow ind, folie *	Flow pumpet ud, folie *
9-1	18-05-00	22-05-00	(a)	TEDLAR	500 ml/min. (540)	300 ml/min. (300)
9-2	22-05-00	24-05-00	(ab)	TEDLAR	2000 ml/min. (2070)	1000 ml/min. (1020)
9-3	25-05-00	29-05-00	(1)	Nalophan	500 ml/min. (520)	300 ml/min. (300)
9-4	31-05-00	07-06-00	(b)	Nalophan	2000 ml/min. (2080)	1000 ml/min. (1020)
9-5	08-06-00	13-06-00	(ab)	TEDLAR	2000 ml/min. (2390)	1000 ml/min. (1020)
9-6	23-06-00	30-06-00	(a)	TEDLAR	500 ml/min. (464)	300 ml/min. (250)
9-7	30-06-00	06-07-00	(1)	Nalophan	500 ml/min. (622)	300 ml/min. (250 ml/min.)
9-8	07-07-00	14-07-00	(b)	Nalophan	2000 ml/min. (2200)	1000 ml/min. (1020)

Analysemetoder.

Indhold:

1. Analyse af TCE og toluen ved hjælp af gaschromatografi.	57
2. Analyse af TCE ved hjælp af fotoakustisk infrarød spektrometri.	58
3. Trykdifferensmåling.	59
4. Temperaturmåling.	59

1. Analyse af TCE og toluen ved hjælp af gaschromatografi

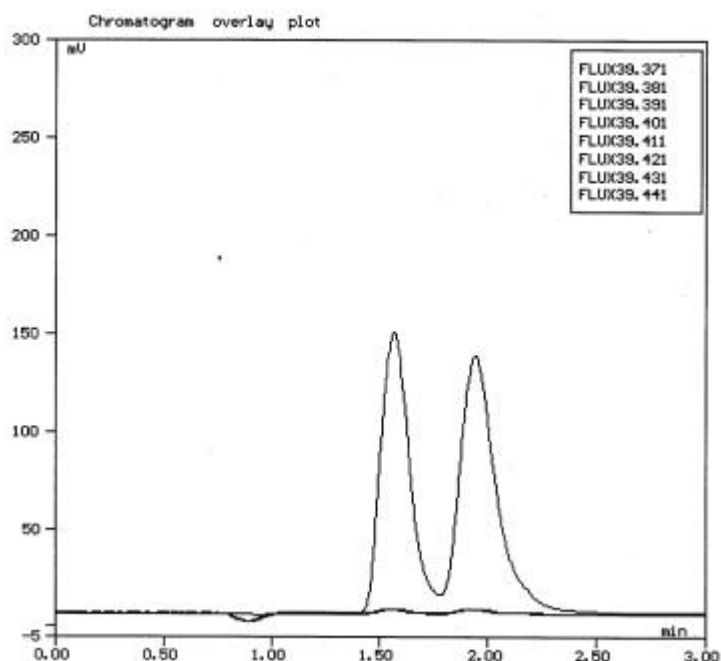
Til måling af TCE og toluen benyttedes en gaschromatograf mrk. HNU 311. Med gaschromatografen er der udført en automatisk prøvetagning (sample flow 250 ml/min) og analyse af TCE og toluen hver time. Den målte respons på GC'ens PI-detektor opsamles på en computer, der ved hjælp af et integrationsprogram automatisk identificerer TCE og toluen ud fra retentionstiderne og bestemmer stoffernes tophøjder og areal. I forbindelse med hver forsøgsrække er der udført mindst en kalibrering. Kalibrering er udført ved injektion af en kendt mængde TCE og toluen ind i et kendt volumen rent kvælstof (N_2 renhedsgrad 5.0). Der er ved kalibrering typisk injiceret 0,5 μ l stof i 10 liter N_2 med en resulterende koncentration på 14,4 mg toluen/ m^3 og 24,4 mg TCE/ m^3 .

Betingelser for analyse af TCE og toluen med on-line gaschromatograf under laboratorieforsøgene:

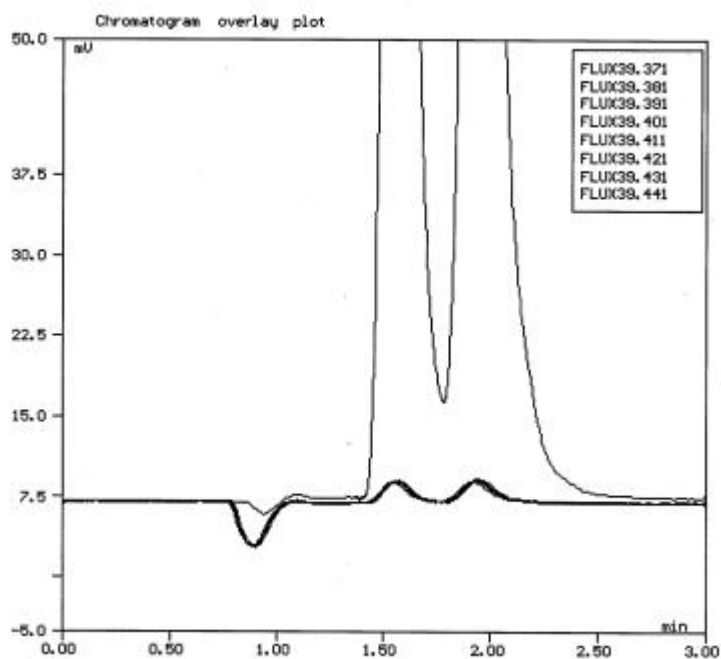
Gaschromatograf mrk.:	HNU 311
Kolonne:	Kapillar 0,53 mm
Type:	WCOT
Stationær fase:	CP-SIL – 8 CB
Længde:	25 m
Film:	8 μ m
Bæregas:	N_2 5,0
Forkolonne:	1 m WCOT/CP-SIL – 8 CB/8 μ m
Bæregas tryk:	10 psi
Ovn:	115 °C isotherm
Detektor/injektor:	125 °C
Detektor:	PID 10,6 eV lampe
Sample loop, volumen:	1 ml
Kvantifikationsgrænse	30 μ g TCE/ m^3
e	30 μ g toluen/ m^3

Eksempler på chromatogrammer er vist på figur B.1 og B.2.

Figur B.1. Chromatogrammer, TCE (Rt = 1,6 min) og toluen (Rt = 1,9 min.). Højeste toppe viser målinger foretaget i bundkammer, laveste toppe viser målinger i topkammer.



Figur B.2. Samme chromatogrammer som vist i figur A.1, zoom på målte toppe.



2. Analyse af TCE ved hjælp af fotoakustisk infrarød spektrometri

Med det formål at undersøge stabiliteten af koncentrationen i bundkammeret - og dermed doseringen til forsøgsopstillingen - blev der som kontrol i visse af forsøgsrækkerne udført analyse af koncentrationen af TCE og vand i luften i bundkammeret ved måleprincippet PAIR (fotoakustisk infrarød

spektrometri). Det benyttede PAIR instrument er af typen B&K 1302, og metoden har den fordel, at målingen udføres non-destruktivt, og at den luft, der udtages fra bundkammeret, kan recirkuleres. Herved kan luften tages ud af bundkammeret, uden at der opstår forstyrrende trykproblemer i kammeret. Der er i denne forbindelse udført automatisk måling med B&K 1302 hver time. Måling af TCE blev udført ved absorption ved bølgelængden 10,6 μm .

3. Trykdifferensmåling.

Trykdifferensmåling blev udført i top/bundkammer ved hjælp af et elektronisk mikromanometer, der har et måleområde på $-1000 \text{ Pa} - +1000 \text{ Pa}$, og en opløsning på 0,1 Pa. Udgangssignalet fra mikromanometeret blev opsamlet på PC. Instrumentets visning blev kontrolleret ved hjælp af et skrårørsmanometer.

4. Temperaturmåling.

Temperaturmåling blev udført i top/bundkammer ved hjælp af en Pt100 føler (måleområde $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$), hvis signal blev opsamlet på PC.

Beregning af tab af TCE og toluen ud fra massebalance

FLUX IND/UD AF TESTKAMMER, FORSØG 5 og 7.

Betonpladen i forsøgsopstillingen havde inden forsøg 5 og 7 været eksponeret for TCE og toluen (dosering af TCE og toluen startede i forbindelse med forsøg 3 den 10-12-1999), og tid for ligevægt eller "mætning" af betonen kan ikke angives ud fra forsøgene.

Startdato forsøg 5: 07-02-2000, stabilitet fra den 26-02-2000.

Startdato forsøg 7: 27-04-2000, stabilitet fra den 30-04-2000.

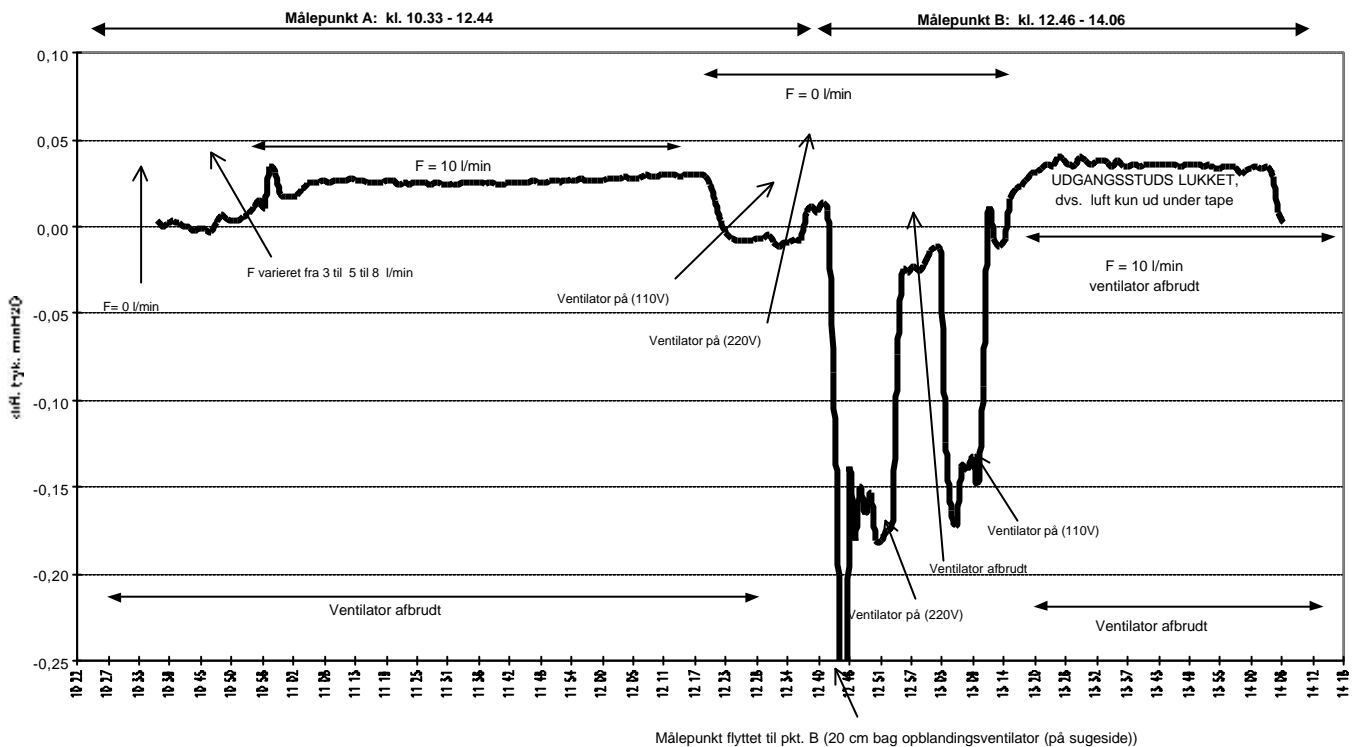
Forsøg nr.	Komponent	IND			UD								
		BUNDKAMMER			BUNDKAMMER			TOPKAMMER			FOLIE		
		målt konc.	målt flow	flux ind	målt konc.	målt flow	flux ind	målt konc.	målt flow	flux ind	målt konc.	målt flow	flux ind
	mg/m ³	m ³ /sek	mg/sek	mg/m ³	m ³ /sek	mg/sek	mg/m ³	m ³ /sek	mg/sek	mg/m ³	m ³ /sek	mg/sek	
5	TCE	39	1,86E-05	7,3E-04	25	1,96E-05	4,9E-04	0,70	1,79E-05	1,3E-05	2,00	5,00E-06	1,0E-05
	Toluen	23	1,86E-05	4,3E-04	17	2,0E-05	3,2E-04	0,40	1,8E-05	7,2E-06	1,60	5,0E-06	8,0E-06
7	TCE	40	1,83E-05	7,3E-04	30	1,96E-05	5,9E-04	0,50	1,79E-05	8,9E-06	1,00	5,00E-06	5,0E-06
	Toluen	23	1,83E-05	4,3E-04	18	2,0E-05	3,2E-04	0,30	1,79E-05	7,2E-06	0,60	5,0E-06	8,0E-06

Forsøg nr.	Komponent	Målte værdier		TAB	
		Samlet flux IND	Samlet flux UD	Beregnet tab pr. sek.	TAB i % af IND
		mg/sek	mg/sek	mg/sek	
5	TCE	7,27E-04	5,10E-04	2,2E-04	30%
	Toluen	4,29E-04	3,39E-04	9,0E-05	21%
7	TCE	7,31E-04	6,00E-04	1,3E-04	18%
	Toluen	4,29E-04	3,39E-04	9,0E-05	21%

BILAG D

Differenstryk målt over 0,7 m x 0,7 m Nalophan folie klæbet til betongulv ved hjælp af Nichiban tape.

Målt differenstryk under folie under forskellige flow- og opblandingsbetingelser, d. 20/11 1998.



Variansanalyse – test af indflydelsen af folietype og flow.

2-sidet variansanalyse

		Flow (faktor B)	
		lav	høj
Folietype (faktor A)	lav	(1) = forsøg 3 og 9-7	(b) = forsøg 4 og 9-8
		(a) = forsøg 1 og 9-6	(ab) = forsøg 2 og 9-5
	høj	(1)	(b)
		(a)	(ab)

Resultater for TCE.

		Flow		mg/m2/sek *10 ⁻⁶	mg/m2/sek *10 ⁻⁶		
		(C1) 500 ml/min (0,07 m3/h/m2)	(C2) 2000 ml/min (0,28 m3/h/m2)				
Folie	Nalophan (R1)	1	19,1	8,6	51	SUM R1	
		2	14,1	9,2			
	TEDLAR (R2)	1	8,0	6,3	36,3	SUM R2	
		2	8,2	13,8			
			49,4	37,9			
			SUM C1	SUM C2			

hjælpetabel

cellesummer

	C1	C2
R1	33,2	17,8
R2	16,2	20,1

Antal R	r =	2
Antal C	q =	2
Antal observationer	n =	2
Antal obs. ialt	N =	8

Hypotese, der testes: Effekten af folietype og flow på fluxmålingen = 0, dvs. den målte flux er uafhængig af folietype og flow.

Variation	(1) SAK	(2) f	(3) s ² =(1)/(2)	(1) F		
Rækker (Folietype)	SAK _R = 2,59861742	1	s ² _R = 2,598617	F _R = s ² _R /s ² _m	0,5067	> F _{0,95} (f _R ,f _m)= F _{0,95} (1,5)= 6,61 ?
Søjler (flow)	SAK _C = 2,032932	1	s ² _C = 2,032932	F _C = s ² _C /s ² _m	0,3964	> F _{0,95} (f _C ,f _m)= F _{0,95} (1,5)= 6,61 ?
Vekselvirkning	SAK _{RC} = 6,99409573	1	s ² _{RC} = 6,994096	F _{RC} = s ² _{RC} /s ² ₀	1,5002	> F _{0,95} (f _{RC} ,f ₀)= F _{0,95} (1,4)= 7,71 ?
Gentagelser	SAK ₀ = 18,6481265	4	s ² ₀ = 4,662032			
TOTAL	SAK _{tot} = 30,2737717	7	4,324825			
SAK _{celler}	SAK _{celler} = 11,6256451					
s _m ²	s _m ² = 5,12844445					
f _m	f _m =	5				
s _{2total}	s _{2total} = 4,32482452					

2-sidet variansanalyse

		Flow (faktor B)	
		lav	høj
Folietype (faktor A)	lav	(1) forsøg 9-3 og 9-7	(b) forsøg 9-4 og 9-8
	høj	(a) forsøg 9-1 og 9-6	(ab) forsøg 9-2 og 9-5

Resultater for Toluen.

			Flow			
			(C1) 500 ml/min (0,07 m3/h/m2)	(C2) 2000 ml/min (0,28 m3/h/m2)		
gentagelse			mg/m2/sek *10 ⁻⁶	mg/m2/sek *10 ⁻⁶		
Folie	Nalophan (R1)	1	12,9	4,0	28	SUM R1
		2	7,3	3,8		
	TEDLAR (R2)	1	4,5	2,8	17,2	SUM R2
		2	4,0	5,9		
			28,7	16,5		
			SUM C1	SUM C2		

hjælpetabel

cellesummer

	C1	C2
R1	20,2	7,8
R2	8,5	8,7

Antal R	r =	2
Antal C	q =	2
Antal observationer	n =	2
Antal obs. ialt	N =	8

Hypotese, der testes: Effekten af folietype og flow på fluxmålingen = 0, dvs. den målte flux er uafhængig af folietype og flow.

Variation		(1) SAK	(2) f	(3) s ² =(1)/(2)	(1) F		
Rækker (Folietype)	SAK _R	1,909188309	1	s ² _R = 1,909188	F _R = s ² _R /s ² _m	0,5121	> F _{0,95} (f _R ,f _m)= F _{0,95} (1,5)= 6,61 ?
Søjler (flow)	SAK _C	2,156675683	1	s ² _C = 2,156676	F _C = s ² _C /s ² _m	0,5785	> F _{0,95} (f _C ,f _m)= F _{0,95} (1,5)= 6,61 ?
Vekselvirkning	SAK _{RC}	4,852936376	1	s ² _{RC} = 4,852936	F _{RC} = s ² _{RC} /s ² ₀	1,4078	> F _{0,95} (f _{RC} ,f ₀)= F _{0,95} (1,4)= 7,71 ?
Gentagelser	SAK ₀	13,78846719	4	s ² ₀ = 3,447117			
TOTAL	SAK _{tot}	22,70726756	7	3,243895			
SAK _{celler}	SAK _{celler} =	8,918800368					
s _m ²	s _m ² =	3,728280713					
	f _m		5				
	s _{2total}	3,243895366					