

# Afdampning fra beton

Jørn Bødker

Teknologisk Institut

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

<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>7</b>
<b>SUMMARY AND CONCLUSIONS</b>	<b>9</b>
<b>1 PROBLEMSTILLING OG FORMÅL</b>	<b>11</b>
<b>2 LITTERATURSTUDIE</b>	<b>12</b>
2.1 KILDER TIL AFGASNING AF FLYGTIGE KOMPONENTER	12
2.2 MÅLINGER AF AFDAMPNING AF FLYGTIGE FORBINDELSER	13
2.3 RADON	14
<b>3 DATAINDSAMLING</b>	<b>15</b>
3.1 DATAINDSAMLINGENS METODE	15
3.2 RESULTAT	16
3.3 VALG AF BETONPRODUKTER TIL UNDERSØGELSE	17
<b>4 PRØVEEMNER</b>	<b>18</b>
<b>5 HEADSPACEANALYSER</b>	<b>19</b>
5.1 METODE	19
5.2 RESULTATER	19
5.3 DISKUSSION AF HEADSPACEANALYSER	20
<b>6 UNDERSØGELSER I KLIMAKAMMER</b>	<b>21</b>
6.1 KVANTITATIV BESTEMMELSE AF AFGASNING I KLIMAKAMMER	21
<b>6.1.1 Forberedelse af prøveemner</b>	<b>21</b>
<b>6.1.2 Prøvningsbetingelser</b>	<b>21</b>
<b>6.1.3 Målemetode</b>	<b>21</b>
<b>6.1.4 Kemisk analyse</b>	<b>21</b>
<b>6.1.5 Sensorisk bedømmelse</b>	<b>22</b>
6.2 INDEKLIMARELEVANTE TIDSVÆRDIER	22
6.2 RESULTATER AF KLIMAKAMMERMÅLING	23
6.3 RESULTATER AF SENSORISK BEDØMMELSE	24
<b>7 DISKUSSION</b>	<b>25</b>
7.1 ORGANISKE FORBINDELSER	25
7.2 AMMONIAK	26
7.3 INDEKLIMAMÆRKE	29
<b>8 KONKLUSION</b>	<b>30</b>
<b>9 REFERENCER</b>	<b>31</b>
<b>BILAG</b>	
Bilag A	33
Bilag B	39
Bilag C	41
Bilag D	45



# Forord

Denne rapport er en del af "Produktområdeprojekt vedrørende betonprodukter", som finansieres af Miljøstyrelsen.

Formålet med undersøgelsen er at undersøge afdampningen af flygtige stoffer fra betonkonstruktioner til indeklimaet og dermed bidrage til en vurdering af, hvorvidt betonbyggeri giver godt eller dårligt indeklima. Projektets målgruppe er betonprocenter og bygherrer, der anvender beton i forbindelse med husbygning.

Projektet er ansøgt af Teknologisk Institut, Betonindustriens Fællesråd og Ålborg Portland og følgende virksomheder og institutioner har været repræsenteret i følgegruppen:

Teknologisk Institut	Mette Glavind
Betonindustriens Fællesråd	Poul Erik Hjorth, Betonelement-Foreningen Jacob Hougaard Hansen, Dansk Byggeri K. Bernth Eriksen, 4K-Beton A/S
Dansk Byggeri	Kjeld Almer Nielsen. Fra 1/12 2005 repræsenteret af Niels Nielsen
Aalborg Portland A/S Betonproducenter	Jesper Sand Damtoft Erik Fredborg, H+H, nu Expan A/S Gunnar Hansen, Leo Nielsen, nu Guldborgsund Elementfabrik A/S
Byggepanelet* Miljøstyrelsen	Ninkie Bendtsen, Erik K. Jørgensen A/S Inge Werther og Gert Sønderkov Hansen

\* Miljøstyrelsens sekretær til at koordinere Byggepanelets projektaktiviteter

Laboratorieundersøgelser og kemiske analyser er udført af Teknologisk Institut, og der har i projektet været en aktiv deltagelse fra:

- Betonindustrien, som har leveret prøvestykker af beton udsavet i de rette størrelser
- Leverandører af formolier og andre additiver, som åbent har fortalt om sammensætning af formolier.
- E-mineral A/S som har medfinansieret undersøgelsen.

Projektet er gennemført i perioden fra 1/5 2004 til 1/10 2005



# Sammenfatning og konklusioner

Formålet med denne undersøgelse er at afklare virkningen af beton på indeklimaet i huse. Der er i den forbindelse fokuseret på den mulige afdampning af kemiske stoffer til indeklimaet.

En række betonproducenter er ved hjælp af spørgeskemaer blevet spurgt om sammensætningen af de betontyper, som de producerer. På baggrund af en vurdering af, hvilke af betontyperne der eksponeres til indendørs luften i bygninger, er der udvalgt 4 betontyper til test:

- Et huldækelement
- Et vægelement af normalbeton
- Et vægelement af letklinkerbeton
- En gulvbeton

Prøver af huldækelement og letklinkerbetonen blev nedknust, og der blev gennemført en headspace analyse for flygtige kulbrinter. Der blev identificeret kulbrinter i headspace over materialerne i mængder, der retfærdiggør de efterfølgende omfattende målinger af afdampning i klimakamre.

Der er enten støbt eller udsavet prøvestykker af de 4 ovenfor nævnte betontyper. Disse prøvestykker er testet i klimakammer, hvor der er gennemført målinger af afdampningen af kulbrinter, alkoholer, aldehyder og flygtige aminer.

Desuden er der gennemført sensorisk (lugt) bedømmelse af to udvalgte betontyper.

I laboratoriet er der endvidere støbt to betonemner af næsten samme sammensætning som det ovenfor nævnte vægelement. De to laboratorieprøver adskiller sig fra hinanden ved, at den ene foruden cement indeholder flyveaske fra Avedøreværket, mens den anden prøve kun indeholder cement. I flyveasken er der 63 ppm ammoniak/ammonium.

Disse to betonprøver er testet i klimakammer med henblik på en kvantificering af ammoniakafdampningen.

På grundlag af ovennævnte målinger og litteraturgennemgang må det konkluderes, at:

- Beton støbt med anvendelse af mineraloliebaseret formolie afgiver flygtige kulbrinter, men problemets omfang er begrænset og vil sandsynligvis ikke, medmindre der anvendes overdrevet store mængder formolie, give anledning til indeklimaproblemer i den færdige bygning.
- Beton som indeholder flyveaske med ammoniak/ammonium afgiver ammoniak til atmosfæren. Afdampningshastigheden af ammoniak fra beton er med den cement og den flyveaske, der er anvendt i disse forsøg, meget lav og vil ikke give anledning til indeklimaproblemer i den færdige bygning.

- Beton som er fremstillet uden brug af flyveaske kan også afgive ammoniak. Afdampningshastigheden af ammoniak fra beton er med den cement, der er anvendt i disse forsøg, meget lav og vil ikke give anledning til indeklimaproblemer i den færdige bygning.
- Afdampningen af ammoniak kan tilnærmelsesvis beskrives ved hjælp af Fick's anden lov, således at afdampningshastigheden er omvendt proportional med kvadratroden af tiden.
- Beton afgiver ikke aldehyder, alkoholer eller aminer i nævneværdige mængder til indeklimaet.
- Lugtafgivelsen af beton er moderat til svag og lugten er aftagende med tiden
- Alle de testede betonprøver ville kunne indeklimamærkes.
- Kulbrinteafdamningen fra beton kan elimineres fuldstændigt ved at anvende vegetabilsk baseret formolie.



# Summary and conclusions

The purpose with this project is to describe the impact of concrete on the indoor climate. Focus has been on the potential evaporation of chemical substances to the indoor air.

A number of concrete manufacturers have been asked, which kind of concrete they produce. Based on an assessment of the kind of concrete exposed to the indoor air, four types of concrete have been collected for further testing.

- A hollow core slab
- A wall element of ordinary concrete
- A wall element of light-weight aggregate concrete
- A ready-mixed floor concrete

Samples of a hollow core slab and a wall element of light-weight aggregate concrete were crushed and the head space over the crushed material was analysed for volatile organic compounds (VOC). VOC in the head space was monitored in concentrations to justify further testing in chambers.

Measurements of the emissions of VOC, alcohols, aldehydes and volatile organic amines from the concrete samples were carried out in the chambers. On two selected concrete samples additional sensory evaluations (odour tests) were performed.

In the laboratory, two samples of concrete with almost the same composition as the wall element of ordinary concrete previous mentioned were cast. The only difference between the two samples was that one sample contained cement and fly ash while the second sample only contained cement. The fly ash contained 63 ppm ammonium/ammonia

The two samples were tested in chambers and the evaporation of ammonia was quantified.

Based on measurements and literature review, the following conclusions were drawn:

- Concrete casts using mineral-oil-based form-oil emits volatile organic hydrocarbons. However the problem is rather limited and will probably not give any indoor climate problems unless excessive amounts of form-oils are used.
- Concrete which contains fly ash from coal-fired power plants emits ammonia to the atmosphere. When using the fly ash tested in this project, the rate of evaporation however is rather low and will not give any indoor climate problems.
- Concrete made without any fly ash but purely on the basis of cement also emits ammonia. When using cement testing in this project, the rate of evaporation was low and did not give any indoor climate problems.

- The evaporation of ammonia can be modelled using Fick's second law. The rate of evaporation is proportional to one divided by the square root of time
- Concrete releases neither amines, nor alcohols and aldehydes to the indoor climate in significant amounts.
- The release of odour from concrete is moderate to weak and the odour declines over time.
- All the tested concrete samples could be approved in the indoor climate test.
- Hydrocarbon emissions from concrete are eliminated completely if vegetable-based form-oils are used instead of mineral-oil-based form-oil.

# 1 Problemstilling og formål

Beton anklages ofte for at afgive flygtige stoffer til indeklimaet og dermed bevirke, at indeklimaet i betonbygninger generelt er dårligt.

Beton består i det væsentligste af uorganiske materialer som sand, sten, flyveaske og cement. Disse komponenter kan ikke forventes at afgive flygtige forbindelser.

I moderne beton anvendes imidlertid en lang række additiver som fx luftindblandingsmidler, superplastificerende stoffer og formolier, og det kan ikke på forhånd udelukkes, at disse produkter kan afgive flygtige forbindelser til indeklimaet.

Formålet med denne undersøgelse er derfor at undersøge afdampningen af flygtige stoffer fra beton til indeklimaet og dermed bidrage til en vurdering af, hvorvidt betonbyggeri giver godt eller dårligt indeklima.

Indeklimaet bestemmes af mange andre faktorer end kemiske dampe i luften fx varme, træk, støj, lys og mikroorganismer. I denne undersøgelse er udelukkende fokuseret på kemiske dampe.

## 2 Litteraturstudie

### 2.1 Kilder til afgasning af flygtige komponenter

Beton fremstilles i langt overvejende grad af uorganisk materiale, som ikke har noget nævneværdigt damptryk, og som derfor ikke afgiver dampe til omgivelserne.

I forbindelse med fremstilling af beton anvendes dog også små mængder organiske additiver som plastificerende stoffer og luftindblandingsmidler. Disse stoffer er typisk højmolekylære stoffer, som heller ikke har et nævneværdigt damptryk.

Som plastificerende stof anvendes ofte modificeret lignin (træstof) eller syntetiske polymerer med høj molekylvægt, og som derfor ikke afgiver dampe. Som luftindblandingsmidler anvendes ofte overfladeaktive stoffer (sæbelignende stoffer), som heller ikke har et nævneværdigt damptryk ved stuetemperatur.

Ved udstøbning af beton i forme anvendes ofte formolie for at sikre, at betonemnerne kan slippe formen. Formolien smøres i et tyndt lag på formen inden udstøbning. Også blandeudstyr og transportudstyr bliver smurt ind i formolie for at lette den efterfølgende rengøring af udstyret.

Der findes en række forskellige typer formolier på markedet. De kan typisk opdeles i mineralolier og olier på vegetabilsk grundlag.

De mineralske olier består som oftest af rene kulbrinter eventuelt tilsat en rustinhibitor og eventuelt en mindre mængde fedtsyre. Som regel er mineralolierne, der anvendes i formolie, mættede hydrogenerede kulbrinter med et meget lavt aromatindhold.

De vegetabilsk baserede formolier består typisk hovedsagelig af blandinger af rene planteolier (triglycerider), esterificerede fedtsyrer fra planteolier og frie fedtsyrer. Blandingsforholdet spænder fra helt rene planteolier (triglycerider) til overvejende esterificeret planteolie.

Der er imidlertid også eksempler på formolier, der består af vegetabiliske olier blandet med lavviskose mineralolier (kulbrinter). Formålet med denne iblanding af mineralolie er sandsynligvis at reducere viskositeten af det færdige produkt.

I enkelte vandholdige formolier, der foreligger som emulsioner, er der tilsyneladende tilsat syntetiske tensider, som kendes fra rengøringsmidler og lignende for at stabilisere emulsionen således, at den ikke skiller ved henstand (Bødker, 2004).

I forbindelse med fremstilling af cement anvendes små mængder organiske tilsætningsstoffer i forbindelse med formaling af cementen. Nogle af disse

stoffer kan være lavmolekylære aminer med et ikke uvæsentligt damptryk, som teoretisk kan tænkes af afgive dampe (Hjellström).

I de fleste betontyper anvendes foruden cement også flyveaske fra kulfyrede kraftværker. I forbindelse med røgrensning for  $\text{NO}_x$  på kraftværkerne tilsættes røgen ammoniak, som til en vis grad ender i flyveasken. Den typiske ammoniakkoncentration i flyveasken er under 50 mg/kg flyveaske; men der er eksempler på, at man i forbindelse med svigtende styring af ammoniakdoseringen har fået højere koncentrationer af ammoniak i flyveasken (Personlig kommunikation med en række kemikere på kraftværkerne).

## 2.2 Målinger af afdampning af flygtige forbindelser

Der findes ikke meget litteratur om afgivelse af dampe fra betonkonstruktioner. En licenciat afhandling fra Lunds Universitet viser, at afdampningen af flygtige organiske forbindelser fra beton er meget begrænset (Hjellström).

Såvel tidligere målinger på Teknologisk Institut som erfaringer fra Finland viser, at beton alene afgasser meget lave koncentrationer af flygtige organiske forbindelser (VOC'er),  $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , samt at der ikke er nogen enkeltkomponent i afgangningen, som kan siges at være typisk for beton. I finske undersøgelser er der blandt andet fundet afgangning af formaldehyd og ammoniak. Dette er muligvis afhængig af de additiver der er anvendt (Funch og Clorius, 2002; Tirkkonen, 2004).

Det viser sig, at beton på grund af det meget store interne overfladeareal kan fungere som en absorbent af fx organiske forbindelser fra gulvbelægning og maling for senere langsomt at afgive disse forbindelser igen. De organiske forbindelser, som afdamper, stammer sjældent fra betonen i sig selv, men stoffer der er optaget fra andre byggematerialer.

Der er eksempler på, at der ved anvendelse af PVC-belægning på et betongulv kan optages op til halvdelen af den butanol og 2-ethyl hexanol, der afgives fra belægningen. Disse flygtige forbindelser kan så senere frigives til rumluften. De fleste af de undersøgelser, der handler om afgangning fra beton, beskriver, hvordan alkalisk og fugtig beton angriber lime og visse gulvbelægninger (PVC) og omdanner blødgørere til blandt andet 1-butanol og 2-ethylhexanol, det vil sige kemiske forbindelser, der giver en kvalm og sødlig lugt i indeluften (Johnsson 1995, Bornehag, 1996, Follin, 1996, Alexanderson, 1996, Fuglsang 2001 og Persson 2003).

Undersøgelser har endvidere vist, at de ovenfor nævnte flygtige organiske komponenter kan trænge adskillige centimeter ind i betonen og derfra senere afgives (Hjellström).

I forlængelse af ovenfor nævnte licenciat afhandling fra Lunds Universitet er der endvidere undersøgt afdampningen af ammoniak fra beton. Det konkluderes, at selvom afgivelse af ammoniak fra frisk udstøbt beton kan give problemer på betonfabrikken, hvis der er en dårlig ventilation, vil ammoniak ikke give anledning til problemer med indeklimaet i det endelige byggeri (Hjellström).

### 2.3 Radon

Selvom radonproblematikken ligger uden for dette projekts rammer, må man erkende, at radon kan være et alvorligt indeklimaproblem.

En omfattende undersøgelse "Radon i danske boliger 2001" udført af Statens Institut for Strålehygiejne, Forskningscenter Risø samt Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser konkluderer, at der ikke kan påvises nogen væsentlige sammenhænge mellem indendørs radon og anvendte byggematerialer, og at den væsentligste kilde til radon i indeklimaet er radonudsivning fra undergrunden.

Risø har også undersøgt en række prøver af såvel letklinkerbeton som almindelig beton. Radonafgivelsen fra prøverne er målt i klimakamre, og man har fundet, at disse betontyper afgiver meget begrænsede mængder radon. Radonafgivelsen fra betonen resulterer i radonkoncentrationer, der er af samme størrelsesorden, som man normalt finder udendørs (Andersen).

## 3 Dataindsamling

Der er indsamlet oplysninger om anvendte delmaterialer og formslipmidler for forskellige betonprodukter: huldækelementer, fabriksbeton til gulve samt vægelementer af henholdsvis normal beton og letklinkerbeton.

Det er af brancheforeningen Betonelement-Foreningen oplyst, at der alene på elementsiden årligt produceres følgende mængder til indendørs formål:

- 945.000 m<sup>2</sup> huldæk (318.000 tons)
- 674.000 m<sup>2</sup> vægelementer af normal beton (261.000 tons)
- 2.000.000 m<sup>2</sup> letklinkerbetonelementer
- ca. 500.000 m<sup>2</sup> andre elementer (facadeelementer, filigran, ribbedæk osv.)

Der vil derfor hyppigt optræde beton i de indendørs konstruktioner i nybyggeri, og derfor er det vigtigt at få belyst betons betydning for indeklimaet.

Formålet med dataindsamlingen er, at der ønskes et overblik over de delmaterialer og formslipmidler, der i Danmark anvendes til betonprodukter til indendørs konstruktioner, og som derfor kan have betydning for indeklimaet. Dette er i sig selv værdifuld information, men den danner samtidigt grundlag for valg af de betonprodukter, der skal prøves videre i projektforsøbet.

### 3.1 Dataindsamlingens metode

Dataindsamlingen er foretaget ved udsendelse af spørgeskemaer til producenter af henholdsvis huldækelementer, fabriksbeton, betonelementer og letklinkerbetonelementer. Der er udarbejdet spørgeskemaer målrettet hver enkelt producentgruppe med de spørgsmål, der er relevante for netop deres produkt. Spørgeskemaerne ses i bilag A.

Dataindsamlingen er foretaget med hjælp fra Betonindustriens Fællesråd (BIF), idet spørgeskemaer er sendt til medlemmer af to af BIFs medlemsorganisationer: Betonelement-Foreningen og Dansk Fabriksbetonforening. Spørgeskemaerne er sendt elektronisk i april 2004 til 35 producenter. Nogle producenter har modtaget mere end et spørgeskema, fordi de eksempelvis både producerer huldæk og vægelementer.

Besvarelserne fordeler sig som følger:

- Huldæk: 3 besvarelser af 5 mulige
- Fabriksbeton: 4 besvarelser af 14 mulige
- Vægelementer: 8 besvarelser af 15 mulige
- Letklinkerbeton: 2 besvarelser af 9 mulige

Svarprocenten er lav for fabriksbeton og letklinkerbeton, henholdsvis 29% og 22%. I begge tilfælde gælder dog, at Danmarks to største producenter af det pågældende produkt har svaret. På den måde repræsenterer de indkomne svar en langt større del af markedet, end svarprocenten umiddelbart indikerer.

De indkomne besvarelser vurderes på den baggrund at være tilstrækkelige til at give et repræsentativt billede af anvendte delmaterialer, formslipmidler mm.

### 3.2 Resultat

Nedenfor er resultaterne af dataindsamlingen resumeret i fire tabeller svarende til de fire produkttyper.

Tabel 3.1 Resultat af dataindsamling vedrørende huldelementer

Produktbeskrivelse	Den altovervejende produktion er i miljøklasse P, styrke B55-B60
Betonsammensætning (recept)	Som pulver anvendes ren cement, i nogle tilfælde er der dog tale om Basiscement® med kalkfiller.  Der anvendes ikke plastificerende eller superplastificerende tilsætningsstoffer. En enkelt producent angiver dog tilsætning af et luftindblandingsmiddel.
Formslipmiddel	Der anvendes såvel vegetabilsk som mineraloliebaseret formolie.

Tabel 3.2 Resultat af dataindsamling vedrørende gulvbeton

Produktbeskrivelse	Gulvbeton produceres i et bredt spektrum af styrkeklasser og i princippet i alle miljøklasser. Til indendørs konstruktioner er det dog beton til passivt miljø (P-beton), der dominerer.
Betonsammensætning (recept)	Der er eksempler på både 1-, 2- og 3-pulverblandinger, det vil sige både blandinger med cement som eneste pulver, beton med cement og flyveaske samt beton med cement, flyveaske og micro silica. Rapidcement er i alle tilfælde den foretrukne cementtype.  Der anvendes luftindblandingsmiddel og plastificerende tilsætningsstoffer samt i nogle tilfælde også superplastificerende tilsætningsstoffer.
Formslipmiddel	Der anvendes forskellige typer formslipmiddel i forbindelse med indsmøring af blandere og andet maskineri. Der anvendes typisk ingen formolie i forbindelse med selve udstøbningen

Tabel 3.3 Resultat af dataindsamling vedrørende vægge af normal beton

Produktbeskrivelse	Hovedparten af produktionen er i miljøklasse P, styrkeklasse 25-30 MPa.
Betonsammensætning (recept)	Der anvendes både rapid- og basiscement. Antalmæssigt er det halvdelen af producenterne, der anvender flyveaske, men da de største producenter alle anvender flyveaske, er ca. 2/3 af alle elementer produceret med flyveaske. Derimod anvendes ingen micro silica.  Der anvendes typisk superplastificerende tilsætningsstoffer, men ikke plastificerende tilsætningsstoffer. ¾ af producenterne anvender luftindblandingsmiddel.
Formslipmiddel	Der anvendes både vegetabilske og mineraloliebaserede formolier til såvel indsmøring af blander m.m. og til selve støbeformene

Der anvendes forskellige produkter til finish og overfladebehandling af vægge af normal beton, fx reparationsmørtel med betonklæber. Dette er dog klart undtagelsen frem for reglen, og derfor er de forskellige typer af behandling udeladt her.



Tabel 3.4 Resultat af dataindsamling vedrørende letklinkerbeton

Produktbeskrivelse	Der produceres typisk LB5-LB15 i passiv miljøklasse (densitet 1200-1850 kg/m <sup>3</sup> , dog er densiteten for nogle elementer helt oppe på 2000 kg/m <sup>3</sup> )
Betonsammensætning (recept)	Der anvendes cement og flyveaske som pulver, sand og letklinker som tilslag samt plastificerende eller superplastificerende tilsætningsstoffer. Der anvendes ikke luftindblandingsmiddel.
Formslipmiddel	Der anvendes mineralske formolier.

### 3.3 Valg af betonprodukter til undersøgelse

På baggrund af de indsamlede oplysninger er der valgt følgende fire betonprodukter til undersøgelse i nærværende projekt:

- B60 huldækelement fremstillet med tysk cement af typen teutonia, mineralolie baseret formolie.
- P25 gulvbeton med rapidcement, flyveaske samt forskellige tilsætningsstoffer (luftindblandingsmiddel, plastificerende og superplastificerende stoffer samt accelerator), ingen brug af formolie
- P30 betonelement (væg) med rapidcement, flyveaske og luftindblandingsmiddel, vegetabilsk formolie.
- LB6/1350 letklinkerbetonelement (væg) med basiscement, flyveaske og superplastificeringsmiddel. Mineralsk formolie.

De valgte betonprodukter vurderes hver især at være repræsentative for deres produktgruppe. Samtidigt betyder ovennævnte valg, at der prøves:

- Beton med forskellige cementtyper
- Beton med og uden flyveaske
- Beton med forskellige kombinationer af tilsætningsstoffer (plastificerende, superplastificerende og luftindblendende tilsætningsstoffer)
- Forskellige typer af formolie (ingen, vegetabilsk og mineralsk olie).

Dette forventes at give et godt udgangspunkt for at vurdere betonprodukters generelle belastning af indeklimaet.

## 4 Prøveemner

Der er indsamlet en række typiske betonprøver til prøvning.

- Huldækelement
- Gulvbeton
- Vægelement af normalbeton
- Vægelement af letklinkerbeton

Alle betonprøverne på nær gulvbetonen er ude på produktionsstedet skåret ud af et element fra den normale produktion.

Gulvbeton er på produktionsstedet udstøbt i en  $40 \times 40 \times 10$  cm træform uden nogen anvendelse af formolie.

Til test af afdampning af ammoniak fra beton, er der i laboratoriet støbt prøveemner med og uden indhold af flyveaske. Disse prøver har lige som de øvrige testemner dimensionerne  $40 \times 40 \times 10$  cm og prøverne er udstøbt i plastform.

Recepterne på prøveemner støbt i laboratoriet er næsten lig recepten for vægelement af normalbeton.

Sammensætning af samtlige betonprøverne er beskrevet i detaljer i bilag B.

I forbindelse med fremstilling af prøveemner til test for ammoniakafdampningen er der gennemført analyser af såvel flyveaskens som cementens indhold af ammoniak/ammonium.

Ammonium-/ammoniak-indholdet i flyveasken er bestemt ved kemisk analyse udført på analyselaboratoriet på Avedøreværket. Måling af ammoniakindholdet i flyveaske og cement er foretaget på en Ammoniak-måler ThermoRussel Model RL250 med ammoniumselektiv elektrode.

Tabel 4.1 Indhold af ammoniak/ammonium i flyveaske og i cement

	ppm ammoniak/ ammonium
Avedøre værket	63
RAPID® cement	10

# 5 Headspaceanalyser

## 5.1 Metode

Med henblik på at afgøre hvilke flygtige kulbrinter, der skal fokuseres på i forbindelse med klimakammerundersøgelserne, er der gennemført nogle indledende headspace-undersøgelser på nedknuste betonprøver.

To betonprøver af henholdsvis huldækelementet og vægelement af letklinkerbeton, som er beskrevet i foregående afsnit, er nedknust. Knusningen forgår i en kæbeknuser til en partikelstørrelse på ca. 3 mm.

De to betonprøver placeres i en 1 liters Redcab glasflaske således, at ca. halvdelen af volumen fyldes af knust beton og halvdelen er frit luftrum.

Nedknusning og afdampningsforsøg starter for huldækkets vedkommende 8 dage efter udstøbning og for letklinkerbetonens vedkommende 15 dage efter udstøbningen.

I hver af flaskerne placeres to passiv samplere, som indeholder absorptionsmaterialet Tenax. Flaskerne opbevares ved stuetemperatur, og den første sampler fjernes fra flaskerne efter 47,5 times eksponering, mens den sidste sampler fjernes efter 70 timers eksponering. Begge samplere er således til stede i flasken i de første 47,5 time, mens der kun er en sampler i flasken i perioden fra 47,5 timer til forsøgets slutning efter 70 timer.

De flygtige organiske forbindelser på samplerne desorberes termisk, og gasserne identificeres og kvantificeres ved hjælp af gaschromatografi koblet til massespektroskopi (GC-MS).

Denne metode er beskrevet i Draft International Standard ISO/DIS 16017-2, "Indoor, ambient and workplace air – Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography – part 2 Diffusive sampling".

Metoden er meget følsom og kan derfor anvendes til at identificere hvilke typer af organiske forbindelser, der er tale om og eventuelt til afgøre, om det overhovedet er formålstjenligt at gennemføre de mere omfattende klimakammerprøvninger.

## 5.2 Resultater

På alle samplere blev der identificeret kulbrinter af mineralolietypen, som findes i de formolier, der er anvendes ved fremstilling af betonprodukterne.

Følgende indhold blev fundet på samplerne:

Tabel 5.1 Indhold fundet i samplere

	1. periode fra 0 – 47,5 time	2. periode fra 0 – 70 timer
Vægelement af letklinkerbeton	3,3 µg	5,6 µg
Huldækelement	41 µg	51,7 µg

### 5.3 Diskussion af headspaceanalyser

På grundlag af indholdet af flygtige organiske forbindelser på samplerne kan man overslagsmæssigt beregne koncentrationen af flygtige forbindelser i det frie headspace i flaskerne.

Tabel 5.2 Beregnet koncentration af flygtige forbindelser i det frie headspace

	1. periode fra 0 – 47,5 time	2. periode fra 0 – 70 timer
Vægelement af letklinkerbeton	3 mg/m <sup>3</sup>	3 mg/m <sup>3</sup>
Huldækelement	36 mg/m <sup>3</sup>	31 mg/m <sup>3</sup>

Der er imidlertid en række ukontrollerbare fejlkilder i forbindelse med beregning af koncentration af kulbrinte i headspace. Fx vil absorptionen af kulbrinter på selve prøverørene i så lille et luftvolumen, som der her er tale om, muligvis påvirke koncentrationen af kulbrinter i selve headspace. Der er imidlertid god overensstemmelse mellem koncentrationerne fundet på rør, der har været eksponeret i 47,5 timer, og rør, der har været eksponeret i 70 timer, hvilket tyder på, at man godt kan anvende resultaterne som en indikation af en størrelsesorden af en ligevægtskoncentration i flaskerne.

Under alle omstændigheder må man konkludere, at de målte koncentrationer af kulbrinter i headspaceforsøg retfærdiggør, at der gennemføres mere omfattende forsøg i klimakamre.

# 6 Undersøgelser i klimakammer

## 6.1 Kvantitativ bestemmelse af afgasning i klimakammer

De kvantitative bestemmelser blev gennemført ved klimakammermåling i henhold til EN 13419 "Building Products – Determination of the emission of volatile organic compounds. Part 1: Emission test chamber method".

### 6.1.1 Forberedelse af prøveemner

Prøveemnerne er tildannet i passende størrelse i forhold til kammervolumen.

Emnerne er kantforsegledede med alufolie forud for prøvning.

### 6.1.2 Prøvningsbetingelser

Klimakammer:	225 l poleret rustfrit stål
Temperatur:	$23 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Relativ fugtighed:	$45 \pm 5\% \text{ RH}$
Luftskifte i klimakammer:	$0,5 - 1,0 \pm 0,005 \text{ h}^{-1}$
Lufthastighed:	$0,15 \pm 0,05 \text{ m/s}$
Eksponeret overflade:	$0,32 \text{ m}^2$

Prøveemnerne har været placeret i klimakammer i hele prøvningsperioden.

### 6.1.3 Målemetode

Det generelle princip for emissionsmålinger i klimakammer er, at prøveemnet der skal undersøges, placeres i et klimakammer ved kontrollerede prøvningsbetingelser. Gasser og dampe, der afgives fra prøveemnet, blandes med kammerluften. Luftprøver udtages ved fastsatte tidspunkter og analyseres ved forskellige analyseteknikker.

### 6.1.4 Kemisk analyse

Emissionerne fra de undersøgte betonprøver blev opsamlet på Tenax TA, desorberet termisk og efterfølgende analyseret ved kapillarkolonne gaschromatografi kombineret med massespektrometrisk detektion (GC-MS) i henhold til ISO/DIS 16000 – 6 (2002).

Aldehyder blev opsamlet på dinitrophenylhydrazin (DNPH) filtre og efterfølgende analyseret ved væskechromatografi med UV detektion (HPLC-UV).

Organiske aminer blev opsamlet på Silicarør og efterfølgende analyseret ved gaschromatografi med flammeionisationsdetektion (GC-FID).

Ammoniak blev opsamlet på svovlsyrecoatede silicagelrør og efterfølgende analyseret ved hjælp af spektrofotometri/ionchromatografi.

Ved alle analyser er kvantificering foretaget i forhold til eksterne kalibreringsstandarder af det detekterede stof eller tæt beslægtede kemiske stoffer.

Detektionsgrænse for VOC'er på Tenax	0,3 – 1 µg/m <sup>3</sup>
Detektionsgrænse for aldehyder på DNPH	1,2 µg/m <sup>3</sup>
Detektionsgrænse for aminer på Silica	5 µg/m <sup>3</sup>
Detektionsgrænse for ammoniak opsamlet på absorptionsrør	30 µg/m <sup>3</sup>
Usikkerhed på analyseresultater	10-15%

Der er analyseret blindværdier for det tomme kammer før prøvning, ligesom der er analyseret ueksponerede rør.

Kortfattede resultater af klimakammermåling er gengivet i rapportens afsnit 7.2. Detaljerede resultater er gengivet i rapportens bilag C.

Ammoniakkoncentrationen er endvidere forsøgt kvantificeret ved hjælp af fotoakustisk IR instrument fra firmaet Brül og Kjær.

### 6.1.5 Sensorisk bedømmelse

Sensorisk bedømmelse af lugtindtrykket blev gennemført for 2 af de 4 udvalgte materialer: letklinkerbeton og vægbeton.

Den sensoriske bedømmelse blev gennemført ved klimakammerprøvning (Dansk Selskab for Indeklima, Standard Test Method for Determination of the Indoor-Relevant Time- Value by Chemical Analysis and Sensory Evaluation, 2003) i klimakamre med tragt til brug ved bedømmelse af lugtindtryk. Ved metoden bedømmes oplevelsen af kvaliteten af den luft, der har været i kontakt med prøvematerialet af et utrænnet personpanel på ca. 20 personer, der afspejler sammensætningen af befolkningen. Lugtindtrykket bedømmes med hensyn til intensitet (på en skala fra "ingen lugt" til "overvældende lugt") og acceptabilitet (på en skala fra "klart acceptabel" til "klart uacceptabel").

Den anvendte metode er beregnet for materialer, der har et fugtindhold i ligevægt med klimakammerluften (23°C, 50% RH). Da de prøvede betontyper var forholdsvis nyproducerede, blev der løbende foretaget målinger af kammerluftens relative fugtighed, da undersøgelser har vist, at den oplevede luftkvalitet ved et givent indhold af kemiske stoffer forværres ved øget temperatur og luftfugtighed (Fang *et al.*, 1998).

Bedømmelserne er gennemført 2, 3 og 4 uger efter produktion og ved en materialebelastning svarende til 0,4 m<sup>2</sup> pr. m<sup>3</sup> rumluft.

Kortfattede resultater af sensorisk bedømmelse er gengivet i rapportens afsnit 7.3. Detaljerede resultater er gengivet i rapportens Bilag D.

## 6.2 Indeklimarelevante tidsværdier

De undersøgte produkter er vurderet ud fra en komfortmæssig betragtning ved den indeklimarelevante tidsværdi (Dansk Selskab for Indeklima, 2003). De komfortmæssige effekter omfatter lugt og slimhindeirritation.

Den indeklimarelevante tidsværdi for et materiale eller produkt er den tid, det tager de afgassende stoffer at nå ned på 50% af tærskelværdien for lugt eller irritation.

Alle koncentrationer, der blev målt i klimakammer, er ved hjælp af en faktor omregnet, så de er relevante i relation til indeklimasammenhænge. Beregningen fremgår af nedenstående formel, hvor  $C_m$  [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] er den beregnede ligevægtskoncentration i indeklimaet;  $n$  er luftskiftet i indeklimaet [gange pr. time];  $V$  er volumenet af det aktuelle rum i  $\text{m}^3$ ;  $R_s$  er den specifikke afgangshastighed, [ $\text{mg h}^{-1} \times \text{m}^2$ ] bestemt ved klimakammerforsøg, og  $A$  er emnets areal i det aktuelle rum [ $\text{m}^2$ ].

$$C_m = R \times A/n \times V$$

Beregningerne er foretaget med anvendelse af et volumen på  $17,4 \text{ m}^3$  jævnfør DS/INF 90 (1994). For prøver af huldækelement og gulvbeton blev der anvendt en materialebelastning på  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$  svarende til gulvarealet i et standardrum. For vægelement af letklinkerbeton og vægelement af normalbeton blev der anvendt en materialebelastning på  $1,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$  svarende til vægarealet i standardrummet.

Den indeklimatelevante tidsværdi er for gulvbeton og huldækelement alene bestemt på baggrund af de kemiske målinger. Sædvanligvis er den indeklimatelevante tidsværdi baseret på såvel kemisk bestemmelse, som sensorisk bedømmelse af emissionen.

Den indeklimatelevante tidsværdi i døgn er et direkte udtryk for, hvor lang tid der går fra montering af et produkt, til afgangningen fra produktet ikke længere forventes at kunne give anledning til lugt eller irritation af slimhinder i øjne, næse og øvre luftveje.

Den største begrænsning ved at bruge tærskelværdier for lugt og irritation er, at der kun findes tærskelværdier for et begrænset antal stoffer. Lugt er ikke ensbetydende med, at afgangningen giver anledning til sundhedseffekter, ligesom på den anden side ingen lugt ikke er ensbetydende med, at afgangningen ikke giver anledning til sundhedseffekter.

## 6.2 Resultater af klimakammermåling

Ved de kvantitative klimakammermålinger af afgangningerne fra de 4 produkter blev i alt 15 forskellige kemiske stoffer kvantificeret, se bilag C hvor også er angivet stoffernes lugt- og irritationstærskler.

Aldehyder og alkoholer blev målt i meget lave koncentrationer, som for alle stoffers vedkommende ligger under lugtgrænseværdierne.

Organisk aminer kunne ikke måles i koncentrationer over målemetodens detektionsgrænse.

Kulbrinter blev detekteret i luften fra to betonprøver, nemlig fra huldækelementet og fra vægelement af letklinkerbeton, mens der i forbindelse med vægelement af normalbeton og gulvbeton ikke kunne detekteres kulbrinter i luften.

Ammoniak kan detekteres i luften fra såvel betonprøver som indeholder cement uden flyveaske som betonprøver der indeholder flyveaske.

### 6.3 Resultater af sensorisk bedømmelse

Resultater af de sensoriske bedømmelser af såvel vægelement af letklinkerbeton som vægelement af normalbeton viste, at lugtindtrykket var acceptabelt og med moderat til svag lugt.

Der måles efter 2, 3 og 4 uger efter udstøbning, og der er en svagt faldende tendens i lugtens intensitet. For alle målinger gælder, at lugtindtrykket var moderat i begyndelsen af testperioden og faldende til svag sidst i prøvningsperioden.

Ved ingen af de gennemførte målinger af kammerluftens relative fugtighed blev der registreret fugtigheder over 50% RH. Den mængde vand, der er afgivet til klimakammerluften fra betonprøverne, har altså været så lille i forhold til luftskiftet i kammeret, at der ikke har kunnet registreres en ændring af luftens relative fugtighed.

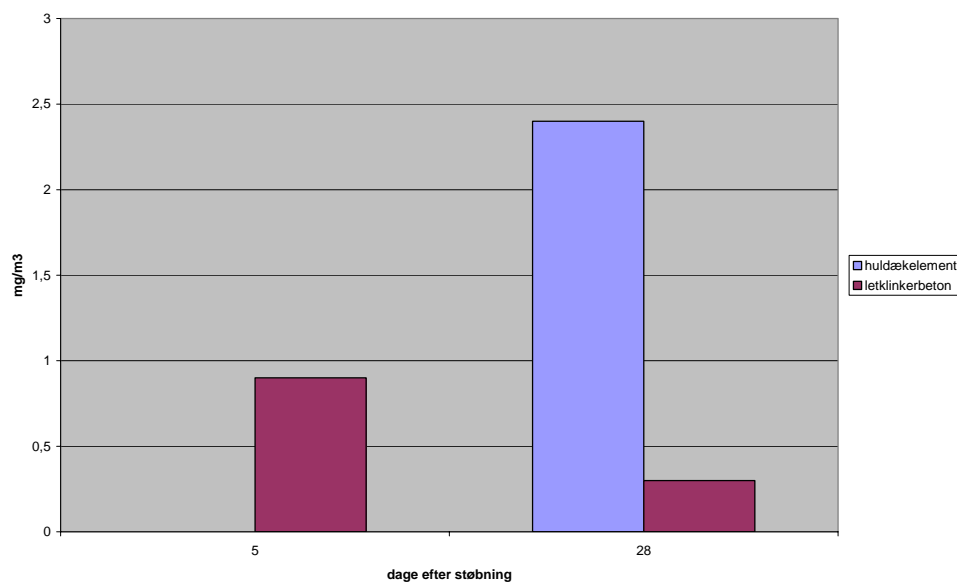


# 7 Diskussion

## 7.1 Organiske forbindelser

Kun fra de betonprøver, som er udstøbt under anvendelse af mineralolie-baseret formolie, er det muligt at måle en nævneværdig afdampning af flygtige organiske stoffer.

Afdampningshastigheden af kulbrinte målt i klimakammer kan omregnes til koncentrationen i et standardlokale, og i Figur 7.1 er disse koncentrationer afbildet.



Figur 7.1 Koncentrationen af kulbrinte i et standardlokale afbildet som funktion af tiden efter støbning af betonen

Den betonprøve, der er udstøbt under anvendelse af vegetabilsk baseret formolie (vægelementet), og betonprøven der er udstøbt helt uden brug af formolie, afgiver ikke kulbrinte. Detektionsgrænsen er ca.  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Den kraftigste afdampning blandt de 4 testede betonprøver ser man fra huldækket, som 28 døgn efter udstøbning afgiver en kulbrintemængde svarende til, at man i et standardlokale med et normalt luftskifte vil kunne opnå en koncentration på  $2,4 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Denne afdampning må forventes at aftage med tiden. Målingerne tyder på, at afdampningshastigheden falder til en ca. 1/3 fra 5. dagen til 28. dagen efter udstøbning. Man må derfor forvente, at når et hus er indflytningsklart, vil de kulbrintekoncentrationer i rumluften, som stammer fra betonen være endnu lavere end målingerne og beregninger på 28. døgnets beton viser. På den anden side er denne koncentration af kulbrinter blot betonens bidrag, mens afdamp-

ningen fra andre byggematerialer let kan bringe koncentrationerne endnu højere op.

Der er ingen officielle grænseværdier for det acceptable indhold af flygtige organiske forbindelser i indeklimaet.

Arbejdstilsynet udstikker grænseværdier (GV) for en række kemiske stoffer i arbejdsmiljøet. I AT-vejledning C.0.1. "Grænseværdier for stoffer og materialer, oktober 2002" angives grænseværdien i arbejdsmiljøet for petroleum C9 – C14 med mindre end 5 % aromater til  $180 \text{ mg/m}^3$ . Petroleum med denne karakteristik er meget lig de kulbrinter, der er afdampet fra beton fremstillet med mineralolie baseret formolie.

I Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 2 fra 2002 "B-værdivejledningen" angives grænseværdien for aromatfri mineralsk terpentin til  $1 \text{ mg/m}^3$ . Denne grænseværdi er lugtbaseret.

B-værdierne er en grænseværdi for den enkelte virksomheds bidrag til forurening af omgivelserne, og Arbejdstilsynets grænser er værdier i arbejdsmiljøet, hvor man forventes kun at opholde sig i arbejdstiden. Derfor er ingen af de to ovennævnte grænseværdier dækkende for indeklimaet.

Ofte ser man, at der i forbindelse med vurdering af indeklimaet anvendes fx 1/40 eller 1/100 af Arbejdstilsynets grænseværdi. En 1/40 del af grænseværdien for petroleum er  $4,5 \text{ mg/m}^3$ , mens 1/100 af grænseværdien er  $1,8 \text{ mg/m}^3$ .

I Finland opererer man med en tredelt klassifikation for indeklima. Klasserne kaldes S1, S2 og S3, hvor S1 svarer til det bedste indeklima, S2 er godt indeklima, og S3 er tilfredsstillende. Kravet til indhold af flygtige organiske komponenter i de tre klasser er henholdsvis 200, 300 og  $600 \mu\text{g/m}^3$ . Det skal bemærkes, at man kun skal medregne komponenter, der hidrører fra byggematerialerne, ikke emissioner, der hidrører fra andre aktiviteter. (FiSIAQ 2001)

En anden undersøgelse i Finland indikerer, at det er vanskeligt at opnå så lave koncentrationer af forurenede stoffer i indeklimaet, selvom bygningerne er opført af de mest hensigtsmæssige materialer (Jarnstrom og Saarela, 2003).

På grundlag af disse grænser, må det forventes, at afdampning af formolier til indeklimaet er et om end ikke fuldstændigt negligabelt problem så dog et meget begrænset indeklimaproblem.

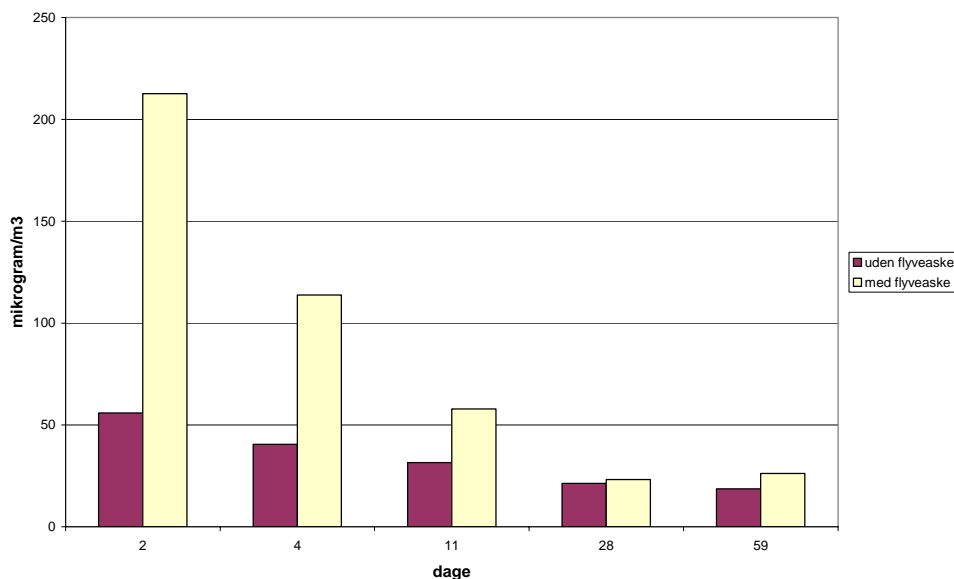
Indeklimaproblemet hidrørende fra formolien er som sagt relativt begrænset, og det kan i mange tilfælde elimineres fuldstændigt ved at substituere den mineraloliebaserede formolie med vegetabilsk baseret formolie.

## 7.2 Ammoniak

Ved klimakammerforsøg er det muligt at måle ammoniakafdampning både fra beton, som indeholder flyveaske og fra beton, som er fremstillet med ren cement uden flyveaske.

I Figur 7.2 er afbildet de beregnede koncentrationer af ammoniak, der teoretisk ville opstå i et lokale, hvor væggene er fremstillet af de pågældende betontyper. Søjlerne repræsenterer beton, der er 2, 4, 11, 28 eller 59 dage

gammelt. Især de første søjler er ikke praktisk relevante, idet man ikke i praksis kan anvende en bygning, hvor betonen er udstøbt få dage før ibrugtagelsen.



Figur 7.2 Beregnede koncentrationer af ammoniak i et rum, hvor væggene er opført af beton med og uden flyveaske

Der er lige som for kulbrinter ingen anerkendte grænseværdier for den acceptable ammoniakafgivelse fra beton eller for den acceptable ammoniakkoncentration i indeklimaet.

På samme måde som for kulbrinter i indeklimaet kan man vælge at anvende mellem 1/40 og 1/100 del af den arbejds hygiejniske grænseværdi som i Danmark er 14 mg/m<sup>3</sup>. Indeklimaværdierne bliver beregnet på denne måde mellem 140 µg/m<sup>3</sup> og 350 µg/m<sup>3</sup>.

Det finske normsæt for indeklima FiSIAQ indeholder også grænseværdier for ammoniak. Grænseværdierne for ammoniak i de to mest restriktive klasser (S1 og S2) er 30 µg/m<sup>3</sup> medens der i den mest lempelige indeklimaklasse (S3) tillades op til 40 µg/m<sup>3</sup>.

Forsøgene viser, at afgasningshastigheden aftager med tiden, og den afgasningshastighed, der er målt på beton der er mere end 28 gammelt, tyder på, at alle de ovennævnte grænseværdier vil blive overholdt i et hus bygget af den pågældende beton.

Hvis man forudsætter, at ammoniakken i betonen fra begyndelsen er jævnt fordelt, at fordampningen er styret af diffusion gennem betonen, at diffusionskonstanten er konstant, og der er tale om et relativ tykvægget betonemne, så kan koncentrationsprofilerne i betonen beskrives ved hjælp af Fick's anden lov.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Løsning af denne ligning viser, at fluxen er proportional med tiden opløftet til  $-1/2$ . (Se fx Bird, Stewart and Lightfoot, 1960)

$$F = K / t$$

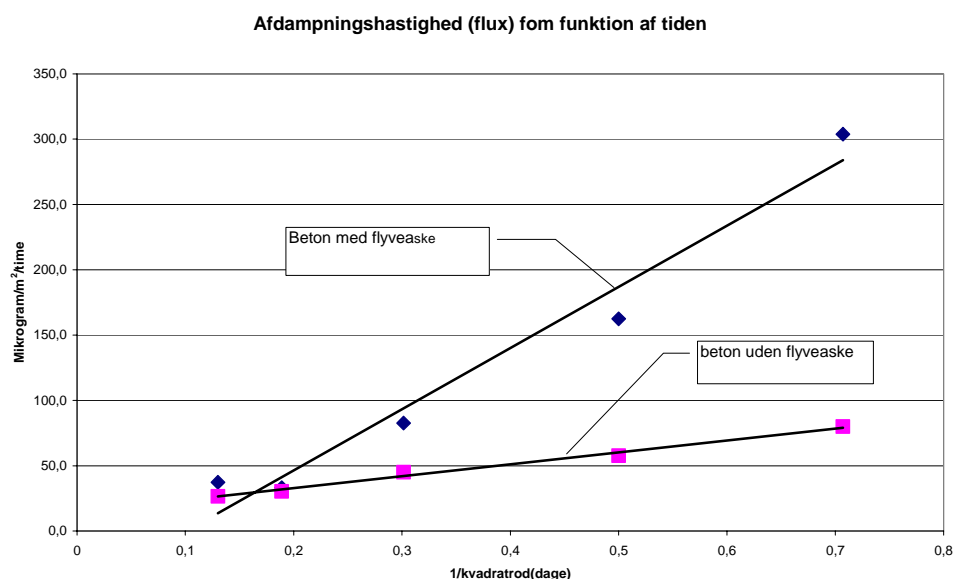
Hvor:

F er flux i  $\mu\text{g}/\text{time}/\text{m}^2$

K er en konstant

t er tiden i dage

I Figur 7.3 er afbildet fluxen som funktion af 1 divideret med kvadratroden af tiden.



Figur 7.3 Flux afbildet som funktion af 1 divideret med kvadratroden på tiden

Man må forvente, at ikke alle forudsætninger for den ovenfor beskrevne model kan holde. For eksempel må man forvente, at fugtigheden og hydratiseringsgraden påvirker diffusionshastigheden i betonen.

Sandsynligvis vil diffusionshastigheden gennem beton aftage med tiden.

Litteraturværdier for diffusionskonstanten for ammoniak gennem en cementmørtel er opgivet til  $6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  for en to dage gammel mørtel.

Diffusionskonstanten falder til  $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  efter 10 dage og til  $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  efter 22 dage. (Mark A.Tyra and T.L.Robl; 2001)

Beregningerne forudsætter endvidere, at betonemnet er så tykt, at koncentrationen i midten af emnet ikke ændres nævneværdigt i prøveperioden. Denne forudsætning vil næppe holde set over et tidsperspektiv på flere måneder eller år.

Alligevel ser det ud, som om den relativt simple model for afdampningshastigheden passer relativt godt med de observerede data.

På grundlag af koncentrationerne af ammoniak i klimakammeret og kammerets luftskifte kan den samlede mængde ammoniak, der er afdampet, estimeres. Tilsvarende kan den samlede mængde ammoniak i betonen estimeres ud fra analyser af cement og flyveaske. Disse overslagsberegninger viser, at ca. 10 % af den samlede ammoniakmængde er fordampet i klimakammeret. Heri

medregnes ikke den ammoniakmængde, der fordamper under selve blandeprocessen og i det første døgn, inden betonprøven placeres i kammeret.

### 7.3 Indeklimamærke

Heller ikke de øvrige stoffer, som afgives fra betonen, er fundet i nævneværdige koncentrationer i de her gennemførte klimakammerundersøgelser, og lugtbestemmelserne viser, at lugten fra betonen er moderat til svag.

Der findes i dag ingen godkendte prøvnings- og mærkningskriterier for indeklimamærkning af betonprodukter. Indeklimamærkningen bygger på lugt og på de flygtige stoffers irritationstærskel, og hvis der formuleres krav til indeklimamærkning af beton på samme måde som for andre byggematerialer, ville de undersøgte betontyper kunne indeklimamærkes. Dette gælder både, når betonen anvendes som væg og som gulv/loft.

## 8 Konklusion

Der er gennemført måling af afdampning af flygtige forbindelser fra 4 typiske betonprodukter. På grundlag af målinger og litteraturgennemgang må det konkluderes, at:

- Beton støbt under anvendelse af mineraloliebaseret formolie afgiver flygtige kulbrinter, men problemets omfang er begrænset og vil sandsynligvis ikke, medmindre der anvendes overdrevet store mængder formolie, give anledning til indeklimaproblemer i den færdige bygning.
- Beton afgiver ikke aldehyder eller aminer i nævneværdige mængder.
- Beton med flyveaske fra Avedøreværket indeholdende ca. 63 ppm ammoniak/ammonium afgiver ammoniak til atmosfæren. Afgivelsen er lav, og selv de mest restriktive grænseværdier angivet i FiSIAQ vil kunne overholdes 28 dage efter udstøbning af betonen.
- Beton med ren cement uden flyveaske afgiver også ammoniak. Afgivelsen af ammoniak er mindre end fra beton med flyveaske; men efter 28 dage er afdampningshastigheden fra de to betontyper (med og uden flyveaske) tilnærmelsesvis lige stor.
- Afdampningen af ammoniak kan sandsynligvis beskrives som:

Fluxen er omvendt proportional med kvadratroden af tiden
---

- Afdampningshastigheden af ammoniak (flux) vil ikke i den første periode efter udstøbningen være nævneværdigt påvirket af betonemnernes dimensioner. Afdampningstiden vil derimod for svære emner blive væsentligt forlænget.
- Alle de prøvede betonprøver vil kunne indeklimamærkes, såfremt kriterierne formuleres i lighed med kriterierne for andre byggematerialer.
- Kulbrinte afdampningen fra beton kan elimineres fuldstændigt ved at anvende vegetabilsk baseret formolie.

Sammenfattende må man konkludere at beton er et materiale der afgiver meget lidt forurening til indeklimaet.

## 9 Referencer

Alexanderson, J. (2001) Emissions Resulting from Alkali Attack on Adhesives and Floor Coverings. Proceedings of Second FLEC Symposium. 76 – 80.

Andersen, C.E. (1999) Radon-222 Exhalation from Danish Building Materials: H+H industry A/S Results

Bornehag, C.G. (1996) Evaluation of a method for dealing with humidity and odour problems in concrete floors. Proceedings of Indoor Air 96. Vol. 4. 325 – 330.

Bird, Stewart and Lightfoot: Transport Phenomena , Wiley and Son Inc. 1960)

Bødker.J., (2004) Kulbrinte i betonslam.

Dansk Selskab for Indeklima (2003) Standard Test Method for Determination of the Indoor-Relevant Time-Value by Chemical Analysis and Sensory Evaluation. Dansk Selskab for Indeklima, Taastrup.

DS/INF 90 (1994) Anvisning for bestemmelse og vurdering af afgangning fra byggevarer. Dansk Standard, København.

ENV 13419-1 (2001) Building Products. Determination of the emission of volatile organic compounds – Part 1: Emission test chamber method. European Committee for Standardisation, Brussels.

Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O. (1998) Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. Indoor Air, 8, 80-90.

FiSIAQ. 2001. Classification of Indoor Climate 2000.

Fuglsang, K. (2001) Måling af indtrængningen af gasformige forbindelser fra forurenede jord til indeluften: Foliemetoden. Del 1. Laboratorieundersøgelse. Miljøprojekt Nr. 646

Follin.T. (1996) Measuring during out pollutions from Concrete Slabs. Proceedings of Indoor Air 96. Vol. 3. 65 – 70

Funch, L.W., Clorius, C. (2002) Indoor climate of a single-family house constructed by use of glued wood elements. Nordisk Industrifond.

Hjellström, T. Chemical emissions from concrete. Licentiate Thesis TVBM-3114 Lund institute of technology, Lund University

ISO/DIS 16000-6 (2002) Indoor air - Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID. International Organization for Standardization, Geneva.

Jarnstrom, H.; Saarela, K. (2003) The development of indoor air quality during the first year in new, residential buildings. Proceedings of healthy buildings 2003

Johnsson, H.W. (1995) The Emission of VOCs from Floor Constructions. Proceedings of Healthy Buildings 95, Vol. 2. 875 – 880

Mark A. Tyra and T.L. Robl. Research in Ammonia Diffusivity in Portland Cement Based Mixes  
<http://www.flyash.org/2001/ashpdf/100.pdf>

Persson, B. (2003) Golvsystem på betong. Fuktpåverkan, kemisk emission og vidhäftning.  
ISBN 91-631-1993-5

Tirkkonen, T. (2004) Technical Research Centre VTT, Finland.  
Personlig kontakt.

Vares, S., Technical Research centre VTT, Finland. Environmental burdens of concrete and concrete products.



# A Spørgeskemaer

De spørgeskemaer, der er anvendt til indsamling af oplysninger om henholdsvis huldæk, gulvbeton, vægge af normal beton samt letklinkerbeton.

## *Bilag A*

AA.1 Spørgsmål vedrørende produktion af huldæk:

1. Hvad var produktionen af huldækelementer på din virksomhed i 2003?

---

2. Hvilke betontyper anvendes til huldæk på din virksomhed (miljøklasse, styrkeklasse mv.)?

---

3. Hvilke delmaterialer anvendes typisk i de forskellige betontyper til huldæk (cementtype, flyveaske, silica, tilslagstyper og typen på tilsætningsstoffer)?

Betontype 1:

---

Betontype 2:

---

Betontype 3:

---

4. Hvilke typer form slipmidler (fx vegetabiliske eller mineraloliebaserede) anvendes ved fremstilling af huldæk?

---

5. Anvendes der andre produkter i forbindelse med finish/overfladebehandling af huldæk?

---

Andre bemærkninger:

---

AA.2 Spørgsmål vedrørende produktion af færdigblandet beton til bolig- og erhvervsbyggeri:

1. Hvor stor var produktionen af færdigblandet beton din virksomhed i 2003?

---

2. Hvor stor en andel af denne produktion anvendes til gulve i bolig- i erhvervsbyggeri?

---

3. Hvilke betontyper (de typiske) produceres til ovennævnte formål (miljøklasse, styrkeklasse mv.)?

---

4. Hvilke delmaterialer anvendes typisk i de forskellige betontyper til ovennævnte formål (cementtype, flyveaske, silica, tilslagstyper og typen på tilsætningsstoffer)?

Betontype 1:

---

Betontype 2:

---

Betontype 3:

---

5. Hvilke typer smøremidler (fx vegetabiliske eller mineraloliebaserede) anvendes på din virksomhed til indsmøring af maskiner (blandere, biler, osv.)?

---

Andre bemærkninger:

---

## *Bilag A*

AA.3 Spørgsmål vedrørende produktion af vægge (ikke facader) i normal beton

1. Hvor stor var produktionen af vægelementer på din virksomhed i 2003?

---

2. Hvilke betontyper (de typiske) anvendes til vægelementer (miljøklasse, styrkeklasse mv.)?

---

3. Hvilke delmaterialer anvendes typisk i de forskellige betontyper til vægelementer (cementtype, flyveaske, silica, tilslagstyper og typen på tilsætningsstoffer)?

Betontype 1:

---

Betontype 2:

---

Betontype 3:

---

4. Hvilke typer formlipmidler (fx vegetabiliske eller mineraloliebaserede) anvendes ved fremstilling af vægelementer ?

---

5. Anvendes der andre produkter i forbindelse med finish / overfladebehandling af vægelementer ?

---

Andre bemærkninger:

---

A.4 Spørgsmål vedrørende produktion af vægelementer i letklinkerbeton:

1. Hvor stor var produktionen af vægelementer i letklinkerbeton i din virksomhed i 2003?

---

2. Hvilke forskellige betontyper til vægelementer i letklinkerbeton produceres typisk i din virksomhed? (miljøklasse, styrkeklasse, densitet mv.)?

---

---

3. Hvilke delmaterialer anvendes typisk i de forskellige betontyper til vægelementer i letklinkerbeton?  
(cementtype, flyveaske, silica, sandtype, klinkertype og typen på tilsætningsstoffer) ?

Betontype 1:

---

Betontype 2:

---

Betontype 3:

---

4. Hvilke typer formslipmidler (fx vegetabiliske eller mineraloliebase-rede) anvendes ved fremstilling af vægelementer i letklinkerbeton?

---

5. Anvendes der andre produkter i forbindelse med finish / overfladebehandling af vægelementer i letklinkerbeton ?

---

*Bilag A*

---

Andre bemærkninger:

---

## B Beskrivelse af prøver

Sammensætning af de betontyper, der er undersøgt ved hjælp af henholdsvis headspace analyse og indeklimateundersøgelser.

Tabel B.1 Hul dækelement

Delmateriale
Cement, Teutonia
Vand
0-4 mm sand (oprindelse ikke oplyst)
4-8 mm grus (oprindelse ikke oplyst)
Formolie: Benocoat NO (en blanding af vegetabilsk olie og mineralolie)

Tabel B.2 Gulvbeton

Delmateriale
Cement, Aalborg Portland Rapid
Flyveaske, type B4
Vand
0-4 mm sand, Svogerslev kl. P
4-8 mm sten Prøvestenen kl. M
8-16 mm sten, Prøvestenen kl. M
Plastificeringsmiddel (type ikke oplyst)
Superplastificeringsmiddel (type ikke oplyst)
Luftindblandingsmiddel (type ikke oplyst)
Accelerator (type ikke oplyst)
Formolie: Ingen

Tabel B.3 Væg element af normalbeton

Delmateriale
Cement, Aalborg Portland Rapid
Flyveaske
Vand
0-2 mm sand (oprindelse ikke oplyst)
4-8 mm perler (oprindelse ikke oplyst)
8-16 mm ærter (oprindelse ikke oplyst)
Luftindblandingsmiddel (type ikke oplyst)
Formolie: Emulfix LL (vegetabilsk)

## Bilag B

Tabel B.4 Vægelement af letklinkerbeton

Delmateriale
Cement, Aalborg Portland Basis
Flyveaske, type B4
Vand
0-4 mm sand, Nymølle kl. P
0-4 mm letklinker, Fibo knæk.
Plastificeringsmiddel, Lubricon 2000
Formolie: Lasol M100 (mineraloliebaseret)

Tabel B.5 Sammensætning af betonemner støbt i laboratoriet med henblik på test af afdampning af ammoniak

	Uden flyveaske	Med flyveaske
Cement , Aalborg Portland Rapid	8,96	7,42
Flyveaske	-	1,90
0-4 mm sand, Svogerslev kl P	21,89	21,89
4 -16 mm sten, Svogerslev kl P	33,09	33,09
Plastificeringsmiddel (Conplast EAE)	0,006	0,015
Vand	6,26	5,91



## C Klimakammermålinger

I dette bilag gengives skemaer med detaljerede resultater for kvantitative klimakammermålinger af 4 udvalgte produkter.

Emne nr. 1: Huldækelement

Emne nr. 2: Gulvbeton

Emne nr. 3: Vægelement af normalbeton

Emne nr. 4: Letklinkerbeton

Resultaterne er angivet i separate skemaer for hvert produkt

Tabel C.1 Huldæk

Stof	CAS nr.	Måletidspunkt (døgn efter produktion)	Emissions-hastighed ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{xh}$ )	Koncentration i standardrum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Lugttærskel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Acetaldehyd	75-07-0	28	7	6	340
Propanal	123-38-6	28	9	7	14
Pentanal	110-62-3	28	3	2	22
Hexanal	66-25-1	28	23	18	58
Heptanal	111-71-7	28	2	2	23
Oktanal	124-13-0	28	2	2	7
Butanol	71-36-3	28	5	4	90
Hexanol	111-27-3	28	2	2	5
Isooktanol	26952-21-6	28	2	2	-
Kulbrinter C10-C16	-	28	2973	2378	-
Organiske aminer	-	28	Nd	-	-
Indeklimarelevante tidsværdi					28 døgn på basis af lugt

"Nd": Under detektionsgrænsen

## Bilag C

Tabel C.2 Gulvbeton

Stof	CAS nr.	Måletidspunkt (døgn efter produktion)	Emissionshastighed ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{xh}$ )	Koncentration i standardrum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Lugttærskel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Acetaldehyd	75-07-0	12 28	6 i.a	5 -	340
Butanol	71-36-3	12 28	13 8	10 6	90
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	12 28	2 Nd	6 -	500
2-Methoxyethanol	109-86-4	12 28	2 Nd	2 -	3550
Alkohol uidentificeret	-	12 28	3 Nd	2 -	-
Alkohol uidentificeret	-	12 28	2 Nd	2 -	-
Organiske aminer	-	12 28	Nd Nd	- -	-
Indeklimarelevante tidsværdi					Mindre end 12 døgn på basis af lugt

"Nd": Under detektionsgrænsen

"i.a": Ikke analyseret

Tabel C.3 Vægелеment af normalbeton

Stof	CAS nr.	Måletidspunkt (døgn efter produktion)	Emissionshastighed ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{xh}$ )	Koncentration i standardrum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Lugttærskel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Acetaldehyd	75-07-0	25 28	4 i.a	6 -	340
Propanal	123-38-6	25 28	1 i.a	1 -	14
Hexanal	66-25-1	25 28	4 2	6 3	58
Butanol	71-36-3	25 28	25 20	35 28	90
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	25 28	1 Nd	1 -	500
Organiske aminer	-	25 28	Nd Nd	- -	-
Indeklimarelevante tidsværdi					Mindre end 25 døgn på basis af lugt

"Nd": Under detektionsgrænsen

"i.a": Ikke analyseret

Tabel C.4 - Letklinkerbeton

Stof	CAS nr.	Måletidspunkt (døgn efter produktion)	Emissionshastighed ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{xh}$ )	Koncentration i standardrum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Lugttærskel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Acetaldehyd	75-07-0	5 28	7 i.a	10 -	340
Propanal	123-38-6	5 28	4 i.a	6 -	14
Hexanal	66-25-1	5 28	1 Nd	1 -	58
Butanol	71-36-3	5 28	4 3	6 4	90
Isooktanol	26952-21-6	5 28	4 Nd	6 -	-
Kulbrinter C10-C16	-	5 28	622 211	858 291	-
Organiske aminer	-	5 28	Nd Nd	- -	-
Indeklimarelevante tidsværdi					Mindre end 5 døgn på basis af lugt

"Nd": Under detektionsgrænsen

"i.a": Ikke analyseret

Tabel C.5 Koncentration af ammoniak i klimakammer

Dage efter udstøbning	Uden flyveaske	Med flyveaske
2	0,23 $\text{mg}/\text{m}^2$	0,86 $\text{mg}/\text{m}^2$
4	0,16 $\text{mg}/\text{m}^2$	0,46 $\text{mg}/\text{m}^2$
11	0,13 $\text{mg}/\text{m}^2$	0,24 $\text{mg}/\text{m}^2$
28	0,087 $\text{mg}/\text{m}^2$	0,094 $\text{mg}/\text{m}^2$

## *Bilag C*

## D Sensoriske bedømmelser

I dette bilag gengives skemaer med resultater for de sensoriske bedømmelser af 2 udvalgte betonprodukter

Emne nr. 3: Vægelement af normalbeton

Emne nr. 4: Letklinkerbeton

Tabel D.1 Vægelement af normalbeton

	Accepterbarhed	Intensitet
2 uger efter produktion	0,2	1,6
3 uger efter produktion	0,3	1,1
4 uger efter produktion	0,2	1,1

Tabel D.2 Letklinkerbeton

	Accepterbarhed	Intensitet
2 uger efter produktion	0,3	1,8
3 uger efter produktion	0,6	1,0
4 uger efter produktion	0,8	1,0

**ACCEPT**

Forestil dig, at du i det daglige ville blive udsat for luften i denne Climpaq.

Hvor acceptabel synes du luften er ?

Markér med en streg på skalaen:

-1

Klart uacceptabel

0

Netop uacceptabel  
.....  
Netop acceptabel

1

Klart acceptabel

**INTENSITET**

Hvor intens synes du lugten er ?

Markér med en streg på skalaen:

5

Overvældende lugt

4

Meget stærk lugt

3

Stærk lugt

2

Moderat lugt

1

Svag lugt

0

Ingen lugt

Figur D.1