

CHALMERS



Golvvärmes inverkan på kemiska emissioner - en studie av betonggolv med limmad PVC-matta

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och vattenbyggnad

J E N N Y T Ö R N

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete 2005:08

Examensarbete för civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnad

EXAMENSARBETE 2005:08

Golvvärmes inverkan på kemiska emissioner

- En studie av betonggolv med limmad PVC-matta

JENNY TÖRN



Institutionen för bygg- och miljöteknik
Byggnad teknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2005

Golvvärmes inverkan på kemiska emissioner

- En studie av betonggolv med limmad PVC-matta

Influence of floor heating on chemical emissions

- A study on concrete floors with adhesive PVC-flooring

JENNY TÖRN

© JENNY TÖRN, 2005

Examensarbete 2005:08

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggnadsfysik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: 031- 772 1000

<http://www.chalmers.se>

Chalmers reproservice

Göteborg, Sverige, 2005

Sammanfattning

Eftersom många människor i västvärlden tillbringar den största delen av dygnet inomhus bör denna miljö vara hälsosam att vistas i. Trots det finns det i dagsläget byggnadsmaterial och konstruktioner som kan avge höjda halter av kemiska emissioner till inomhusluften. Hur material och konstruktioner påverkas då golvvärme används som uppvärmningskälla jämfört med om den inte gör det är därför intressant.

Detta examensarbetet har genomförts som en mätstudie med laboratorieförsök och analys kompletterad med datorsimuleringar men också som en litteraturstudie. Studien syftar till att kartlägga hur golvvärme påverkar golvkonstruktioner av betong med limmad PVC-matta vad gäller andelen uppkomna och avgivna kemiska emissioner till omgivningen.

Laboratoriestudien innefattar mätningar på åtta provkroppar med avseende på mängden emissioner i form av butanol och 2-etylhexanol som avgår från konstruktioner med respektive utan golvvärme och med två olika sorters lim. Studien innefattar även temperaturen och den relativa fuktigheten i betongen vid användning av golvvärme jämfört med om golvvärme inte används. Under slutskedet av arbetet har datorsimuleringar genomförts som hjälp dels för att förstå mätningarna men också för att beskriva mer realistiska fall.

Resultaten visade att golvvärme har inverkan på mängden uppkomna emissioner vid användandet av traditionella lim, medan nya alkalisäkrare lim inte påverkas.

De gränsvärden som satts av Arbetsmiljöverket för butanol i arbetslokaler, på 15 ppm, överskrids inte utav någon av provkropparna i studien. Även den högst uppmätta emissionsmängden av butanol ligger långt under gränsvärdet.

Analysen visar också att temperaturgradienten, och därmed även fuktvandringen, i konstruktioner med golvvärme har stor påverkan på mängden emissioner som kan uppkomma. Simuleringarna visade dessutom att användning av golvvärme året runt ger en högre halt avgivna emissioner jämfört med användning endast under uppvärmningssäsongen.

Nyckelord: emissioner, golvvärme, PVC-matta, golvlim, fukt, betong

Abstract

Since many people in the western world spend most of their time indoors, the environment should be healthy. In spite of that, there are today building materials and constructions that can give increased levels of chemical emissions to the indoor air. How materials and constructions are affected when floor heating is used, is therefore of interest.

This master thesis has been carried out as a measurement study with laboratory experiments and analyses, complemented with computer simulations and a review of the literature study. This study investigates how floor heating affects floor constructions of concrete with adhesive PVC-flooring, regarding produced and emitted chemical emissions to the surroundings.

The laboratory study includes measurements on eight test specimens with consideration to the quantity emissions of butane and 2-ethylhexanol which is emitted from the construction with or without floor heating and with two different types of adhesives. The study also includes the temperature and the relative humidity in the concrete when the floor heating is used compared to if it isn't used. During the end of this work, computer simulations were carried out to understand the measurements and to understand more realistic cases.

The results show that floor heating has an influence on the amount of produced emissions when traditional adhesives are used, while new more alkali resistant adhesives are unaffected.

The threshold value which has been set by Arbetsmiljöverket for butane in workplaces, 15 ppm, is not exceeded by any of the test specimens in this study. Even the highest measured amount of butane emissions is much lower than the threshold value.

The analyses also show that the moisture transfer and the temperature gradient in the construction with floor heating have a large influence on the amount of emissions. The simulations show furthermore that the use of floor heating during the whole year results in a higher amount of emissions, in comparison to the use of floor heating only under the heating season.

Key words: emission, floor heating, PVC-flooring, adhesive, moisture, concrete

Förord

Detta examensarbete har utförts på avdelningen för Byggnadsteknologi, Byggnadsfysik vid Chalmers tekniska högskola under vintern 2004-2005. Arbetet på 20 poäng utgör ett obligatoriskt moment och är den avslutande delen i civilingenjörsutbildningen vid Institutionen för bygg- och miljöteknik.

Kristina Mjörnell på Sp i Borås kom med idén till arbetet och Anders Sjöberg vid institutionen bygg- och miljöteknologi, Byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola utvecklade den.

Jag vill tacka alla inblandade på Institutionen för Byggnadsteknologi, såväl personal som övriga examensarbetare. Ett särskilt tack vill jag rikta till Paula Whalgren som varit handledare och bollplank under arbetets gång, Marek Machowski och Nidal Yousif för all hjälp nere i labbet samt Angela Sasic Kalagasidis och Henrik Karlsson för hjälp med simuleringarna.

Dessutom vill jag tacka Olle Ramnäs på avdelningen för kemisk miljövetenskap vid Chalmers tekniska högskola för all hjälp med mina mätningar, Anders Lindén på Forbo Flooring AB och Henrik Mikaelsson på Akzo Nobel AB för material och materialfakta.

Göteborg, Mars 2005

Jenny Törn

Nomenklatur

Beteckningar och enheter

ρ	kg/m ³	densitet
ϕ	%	relativa fuktigheten
λ	W/m · K	värmeledningsförmåga
Δw	W/m · K	korrigeringsfaktor för fuktigheten i ett material
δ	m ² /s	ånggenomsläpplighet för material
c_1	kg/m ³	den lägre koncentrationen
c_2	kg/m ³	den högre koncentrationen
C_{int}	kg _{voc} /m ³ _{luft}	koncentration flyktiga kolväteföreningar (VOC) i materialet
d	m	tjocklek hos materialet
EF	kg/m ² s	emissionsfaktor
g	kg/m ² s	fuktflödestäthet
g_{in}	kg/m ² s	flödestätheten in i konstruktionen
g_{ut}	kg/m ² s	fuktflödet ut från konstruktionen
G_{kond}	kg/m ²	fuktmängd som kondenserats
G_{torkn}	kg/m ²	avgående fuktmängd vid uttorkning
K_{int}	-	sorptionsisoterm gällande depån i materialet
m_0	kg	torra materialets vikt efter uttorkning i 105 °C
m_w	kg	vikt av fysikaliskt bundet vatten
q	W/m ²	värmeflödestäthet
q_{air}	kg/m ² s	kolväteföreningars (OC) flöde genom diffusion i ångfas
R	m ² K/W	värmemotstånd
R_{fc}	s/m	genomgångsmotstånd för kolväteföreningar (OC) hos matta (floor covering)
R_i	m ² K/W	de olika ingående materialens värmemotstånd
R_{se}	m ² K/W	värmeövergångsmotståndet för konstruktionens yttertor
R_{si}	m ² K/W	värmeövergångsmotståndet för konstruktionens innertor
R_{tot}	m ² K/W	totala värmemotståndet för en konstruktion
t	s	tid
t_{kond}	s	kondensationstid
T	°C eller K	temperatur
T_e	°C eller K	temperaturen ute
T_i	°C eller K	temperaturen inne
ΔT	°C eller K	temperaturdifferensen
u	kg/kg	fuktkvot
v	kg/m ³	aktuell ånghalt
v_1	kg/m ³	den högre ånghalten
v_2	kg/m ³	den lägre ånghalten
$v_s(T)$	kg/m ³	mättnadsånghalten
Δv_i	kg/m ³	ånghaltsdifferensen
V	m ³	volym
w	kg/m ³	fukthalt
$Y_{\text{int}}(t)$	kg _{voc} /m ³ _{matr}	mängden flyktiga kolväten (VOC) som lagras på ytan av ett material

Z_v	s/m	ånggenomgångsmotstånd
$Z_{v,se}$	s/m	ånggenomgångsmotståndet för konstruktionens yttertor
$Z_{v,si}$	s/m	ånggenomgångsmotståndet för konstruktionens inneritor
$Z_{v,tot}$	s/m	summan av alla ånggenomgångsmotstånd
ΔZ_{vi}	s/m	ånggenomgångsmotståndet för det aktuella materialskiktet
δ_{OC}	m ² /s	diffusionskoefficient för kolväteföreningar (OC) i gasfas

Förklaringar

Alkali	Lösningar med ett pH-värde högre än 7.
Alkalinitet	En vätskas förmåga att leda ström. Beror av antalet joner.
Alkalisk hydrolys	Annat namn för förtvålning, vilket innebär en spaltning av estrar med hjälp av natriumhydroxid (natronlut), varvid alkoholer och syror bildas.
Avspalta	Ämnen eller molekyler avges från kemiska föreningar.
Egenemission	Den mängd flyktiga ämnen som ett material kan ge ifrån sig då det inte är påverkat av intilliggande material. Kallas även primär emission.
Emission	Avgivning av flyktiga ämnen till omgivningen.
FLEC	Field and Laboratory Emission Cell, mätkammare för emissionsmätningar.
Förtvålning	Hydrolytisk spaltning av estrar med hjälp av natriumhydroxid (natronlut), varvid alkoholer och syror bildas.
GC-FID	Gaskromatograf med flamjonisationsdetektor, används för analys av organiska ämnen.
Gränsvärde	Värde som anger högsta tillåtna gränsen för besvärande eller skadlig kemisk eller fysikalisk påverkan.
Hydratationsprodukt	Det ämne som gör att den kemiska reaktionen mellan vatten och cement sätter igång. Detta sker direkt vid blandning av betong och medför att betongen successivt börjar hårdna.
Hydrolys	Kemisk reaktion vid vilken en molekylbindning spjälkas genom reaktion med vatten.
Hygroskopisk fukt	Fukt som absorberas, det vill säga upptas, av ett material från luft med en relativ fuktighet under 98 % ($\phi < 98 \%$).
Hysteres	Gäller om man får två olika kurvor, till exempel för uppfuktning respektive uttorkning, i ett diagram.

Isomera former	Ämnen med samma procentuella sammansättning och samma molekylvikt men åtminstone någon åtskiljande egenskap, till exempel strukturen då atomerna kan bindas samman i olika ordning.
Katalytisk process	Upplösning och avgasning av kemiska ämnen.
Konvektion	I detta arbete främst när luft eller vatten transporterar värme i material, konstruktioner eller utrymmen.
PPM	Parts per million.
Riktvärde	Värde i villkor enligt miljöbalken (1998:808) vars överskridande medför skyldighet att vidta åtgärd så att värdet åter kan hållas.
Sekundär emission	Då material reagerar med till exempel fukt eller alkalisk fukt så att emissioner bildas och kommer ut i luften.
Sjuka hus	Byggnader som framkallar någon form av besvär hos personer som vistas i dem. Symptomen är ofta mycket diffusa som onaturlig trötthet, huvudvärk, slemhinnebesvär med mera.
Strålning	Sker mellan ytor med olika temperatur, det vill säga nettovärme strålar från den varmare ytan till den kallare.
Tenax-rör	Rör av glas eller metall fyllt med den porösa polymeren Tenax som ofta används för adsorbentprovtagning av organiska luftföroreningar. Tenax är handelsnamnet för polymeren poly-2,6-difenyl-para-fenyleneoxid.
Toxisk	Ämnen som är toxiska är giftiga och ofta lättflyktiga.
U-värde	Värmegenomgångskoefficient ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$). Sammanfattar värmeövergången mellan de två sidorna av den värmväxlande ytan samt värmeledningen genom ytan.
Vattencementtal	Innebär kvoten mellan mängden vatten och mängden cement i en betong, vid blandning.
VOC	Volatile Organic Compounds eller flyktiga organiska ämnen som det heter på svenska.

Innehållsförteckning

Nomenklatur

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Tidigare studier	1
1.3	Syfte	4
1.4	Avgränsningar	4
1.5	Metod	4
2	Hälsopåverkan	6
2.1	Symptom	6
2.2	Gränsvärden	6
2.3	Tidsaspekter	7
3	Golvvärme.....	9
3.1	Uppbyggnad	9
3.2	Installation.....	9
4	Kemiska emissioner.....	12
4.1	Tiden.....	12
4.2	Det fysikaliska tillståndet	12
4.3	Depålagring	14
4.4	Verksamhet.....	14
4.5	Tecken på emissioner	14
4.6	Materialegenskaper hos betong, lim och matta	15
5	Teori.....	17
5.1	Värmetransport.....	17
5.2	Fukttransport	20
5.2.1	Luftburen fukt	20
5.2.2	Fukt i material	20
5.2.3	Diffusion genom material.....	22
5.3	Koncentration	24
6	Provkropparnas uppbyggnad och tillverkning	27
6.1	Plåtburk	27
6.2	Betong	28
6.3	Lim	29
6.4	Matta.....	31
6.5	Golvvärmeanläggning	31
7	Mätningar	34
7.1	Temperatur	34
7.2	Relativ fuktighet.....	34
7.3	Emission	35
8	Datorsimuleringar	38
9	Resultat.....	40
9.1	Mätresultat.....	40
9.2	Simuleringsresultat.....	45
10	Analys	52
11	Slutsatser	55
12	Vidare studier	56
13	Referensförteckning	57
14	Litteraturförteckning.....	59

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Många människor i västvärlden tillbringar så mycket som 90 % av sin tid inomhus. Detta på grund av att de flesta arbeten är lokaliserade till inomhusmiljö och att klimatet ofta gör det bekvämare att vistas inomhus än utomhus. Att inomhusmiljön då måste vara hälsosam är en självklarhet för många. Så enkelt är det dock inte i verkligheten eftersom vissa byggnadsmaterial kan orsaka höjda halter av kemiska ämnen i inomhusluften, så kallade emissioner (vilket betyder utsändande, från latinets *emi'ssio*). Luften inomhus är dessutom förorenad på grund av hushållskemikalier, föroreningar från ventilationskanaler, möbler och annan inredning, matlagning, verksamhet med mera.

Till största delen består emissioner av flyktiga organiska kolväten (VOC, Volatile Organic Compounds) vilket är ett samlingsnamn för kolföreningar med kokpunkt mellan 50 °C och 240 °C (Björk och Eriksson, 2000). Det är dessa ämnen som oftast förknippas med och antas orsaka "Sjuka hus syndromet" (SBS, Sick Building Syndrom), vilket innebär att en ovanligt stor andel av byggnadens brukare har symptom som irritation i ögon, näsa och hals, känsla av torrhet i hud och slemhinnor, hudrodnad, hudutslag, onaturlig trötthet eller dylikt.

Man vet i dagsläget att golvkonstruktioner är en stor emissionskälla i byggnader och att kombinationer av olika material kan vara extra känsligt (Sjöberg, 2001). Tidigare studier har visat på att vissa kombinationer av plastmattor, lim och betong kan skapa stora problem. Om konstruktionen eller bjälklaget har en hög fukthalt ökar risken för problem ytterligare. Dessutom vet man att åldring och saneringsarbeten påverkar avgivningen av kemiska ämnen, hur mycket är dock oklart i dagsläget.

Generellt sett uppstår mycket fler emissionsproblem i golvkonstruktioner jämfört med både väggar och tak. Detta eftersom golvkonstruktioner oftast är fuktigare på grund av byggfukt och påskjutande markfukt än vad väggar och tak är. Tapetlim och tapeter är inte heller uppbyggda på samma sätt som golvlim och mattor. Mögelpåväxt förekommer däremot oftare på vägg- och takkonstruktioner än på golvkonstruktioner. Orsaken kan vara läckage och felaktiga tryckförhållanden. Dessa problem tas dock inte upp i den här rapporten, utan inriktas på emissionsproblem från betonggolv.

Eftersom installation av golvvärme i byggnader blir allt mer vanligt ökar frågetecknen kring huruvida det ökade värmetillskottet och därmed också fuktvandringen i betongkonstruktionen påverkar emissionsförloppet och mängden kemiska ämnen som avges till omgivningen.

1.2 Tidigare studier

Flera studier har tidigare utförts när det gäller kemiska emissioner från golvkonstruktioner med limmad PVC-matta på betong. I Wengholt Johnsson (1995) beskrivs de viktigaste studierna gjorda på området före 1995. De flesta av dessa undersökningar har inriktats på att

mäta emissioner från ytan, då främst som egenemissioner¹ från ytmaterial. Några undersökningar går dock in på och mäter emissioner från hela golvkonstruktioner med eller utan mellanskikt. Då mellanskikt finns, består det av en fukt- eller alkalispärr eller en avjämningsmassa mellan betongen och den limmade mattan.

Kemiska emissioner från golvsystem

- effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning, Wengholt Johnsson (1995).

Wengholt Johnsson (1995) studerade hur förändringar i betongmaterialet under lim och PVC-matta inverkar på emissioner. Ett flertal olika undersökningar genomfördes där avgivning av kemiska ämnen, Relativ Fuktighet (RF) samt alkali² i betong mättes. Dessutom undersöktes vad avjämningsmassor hade för inverkan samt hur sambandet såg ut mellan uppmätt emission från golvsystem och koncentration i luften.

Studien visade att:

- Mellan 91 % och 95 % relativ fuktighet finns en kritisk fuktbelastning i betongen, vad gäller bildandet av kemiska emissioner.
- Även betong med låga vct-tal³ emitterade förhöjda halter, detta trots en uttorkning till 85 % relativ fuktighet.
- Golvkonstruktioner med avjämningsmassa gav ifrån sig en mindre mängd emissioner än en konstruktion utan avjämningsmassa på grund av den lägre alkalihalten.

I Sjöberg (2001) har en sammanställning gjorts av de viktigaste studierna på området mellan 1995 och 2000. Dessa studier inriktar sig främst på den alkaliska hydrolysen⁴ i golvmaterial och lim. Några av studierna inriktar sig på bakomliggande orsaker medan andra utvidgar kombinationerna så att de innehåller fler komponenter som avjämningsmassa och olika sorters mattor.

Nedan sammanställs några av de studier som genomförts inom området emissioner, då främst från golvmaterial och golvkonstruktioner, och publicerats efter 2000.

Sekundära emissioner från betonggolv med limmade golvmaterial

– effekter av alkalisk hydrolys och deponerade nedbrytningsprodukter, Sjöberg (2001).

Sjöberg (2001) studerade nedbrytningsprodukternas transportegenskaper i material samt limfuktens betydelse vid emissioner från limmade mattor på betonggolv. Studien innefattar fyra sorters mätroppar och tre mätmetoder.

I första studien uppmättes genomgångsmotståndet för 1-butanol och 2-etylhexanol genom mattor av linoleum respektive PVC. Parallellt studerades transporten av 1-butanol genom betong. Syftet var att utvärdera diffusionskoefficienten, δ_{OC} , för 1-butanol i gasfas i torr betong.

¹ Den mängd flyktiga ämnen som ett material kan ge ifrån sig då det inte är påverkat av intilliggande material.

² Lösningar med ett pH-värde högre än 7.

³ Innebär kvoten mellan mängden vatten och mängden cement i en betong, vid blandning.

⁴ Annat namn för förtvålning, vilket innebär en spaltning av estrar med hjälp av natriumhydroxid (natronlut), varvid alkoholer och syror bildas.

Den andra studien utfördes för att kontrollera inträngningen av 1-butanol och 2-etylhexanol i gammal betong där limmet hydrolyserats⁵. Syftet med undersökningen var att utvärdera den effektiva diffusionskoefficienten D_{eff} , vilken är ett mått på ämnets diffusionsförmåga i ett material.

Sista studien utfördes för att se hur limmet påverkar konstruktionen. Detta skedde genom att undersöka insugningen av fukt från limmet in i betongen, avdunstad mängd limfukt vid olika limningsmetoder samt emissionsmätningar från provkroppar med olika lim och mattor.

Studien visade att:

- Fukt och organiska ämnen (Organic Compounds, OC) kan flytta sig i och mellan material samt avgå från konstruktioners yta.
- Fuktnivån avgör nedbrytningen av limmet då detta är i kontakt med den alkaliska miljön som betongytan utgör.
- Transporten och bindningen av OC i materialen är betydelsefull för emissioner från ytan.
- Det är främst limmet och inte mattan som bryts ned.
- Den alkaliska hydrolysen av limmet är en katalytisk process⁶.

Egenskaper och funktion hos fukt- och alkalispärrar på betong, Sjöberg (2001)

Sjöberg (2001) studerar den spärrande förmågan hos tio olika preparat som stryks på betonggolv. Studien innefattar fukt-, alkali- samt emissionsspärr men ej avjämningsmassor.

Preparatens funktion som fuktspärr bestämdes genom att mäta preparatens genomgångsmotstånd för vattenånga samt för vatten i vätskefas.

Preparatens funktion som alkalispärr uppmättes genom långtidsförsök där två betongkvaliteter belades med respektive preparat innan PVC-matta limmades. Nedbrytningen av limmet registrerades med fortlöpande emissionsmätningar från ytan samt i betongen.

Preparatets funktion som emissionsspärr bestämdes genom mätningar av preparatens genomgångsmotstånd för 1-butanol respektive 2-etylhexanol.

Studien visade att:

- Epoxibaserade preparat hade den största fuktspärrande förmågan. De silanbaserade preparaten hade en något sämre fuktspärrande förmåga.
- Alla testade preparat förutom ett visade sig minska eller förhindra att alkalisk hydrolys uppstod vid en fuktnivå på 96 % relativ fuktighet, på rekommenderat djup i betongen.
- Endast de epoxibaserade preparaten minskade nämnvärt emissionsflödena av 1-butanol och 2-etylhexanol.

⁵ Kemisk reaktion vid vilken en molekylbindning spjälkas genom reaktion med vatten.

⁶ Upplösning och avgasning av kemiska ämnen.

Branschstandard:**Mätning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner.**

Golvbranschens Riksorganisation, GBR (2004), har givit ut en nyare version av sin standard från 1999 som möjliggör testning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner. Samtliga prover ska utföras i dubbelprov vilket innebär att två referensprovkroppar och två testprovkroppar ska tillverkas. Noggrannheten för samtliga viktmätningar ska vara ± 1 gram där ej annat anges. Vid konditionering eller förvaring i konditioneringsrum gäller att 23 ± 2 °C och 50 ± 5 % RF skall råda. Emissionsprovtagning från ytan mäts på båda provkropparna och görs med FLEC⁷ efter 26 veckor, räknat från tidpunkten för golvbeläggning.

1.3 Syfte

Syftet med denna studie har varit att öka kunskapen om emissioner vid användning av golvvärme i betonggolv med limmad PVC-matta. Det handlar då om andelen kemiska emissioner som avgår från konstruktionen vid användning av golvvärme jämfört med konstruktioner utan golvvärme. Det handlar också om hur den relativa fuktigheten ändras över betongens tvärsnitt under uttorkning, efter limning av matta och under uppvärmning med golvvärme.

1.4 Avgränsningar

Denna studie har avgränsats till att gälla endast en betongkvalitet, vilken består av snabbhårdande betong då projektet har tidsbrist. Av praktiska och ekonomiska skäl används enbart en matta och två sorters lim. Konstruktionen värms dessutom enbart till en temperaturnivå.

Vid kontroll av kemiska emissioner har endast 1-butanol och 2-etylhexanol mätts då dessa ämnen även uppmätts under tidigare studier och resultaten därför lätt kan jämföras.

Mätningarna har begränsats till att gälla endast åtta provkroppar, det vill säga fyra med golvvärme och fyra utan samt endast vid ett mättillfälle för emissioner. Kontinuerliga mätningar har utförts för värme och fukt.

1.5 Metod

Examensarbetet har genomförts som en mätstudie med laboratorieförsök, mätningar och analys samt datorsimuleringar, kompletterad med en litteraturstudie. Litteraturstudien har varit inriktad på emissioner och då främst på hur de uppkommer och varför, men också på hur de påverkar människan. Ett flertal tidigare undersökningar har ingått i litteraturstudien liksom normer och branschstandarder.

⁷ Field and Laboratory Emission Cell, mätkammare för emissionsmätningar.

Laboratoriestudien innefattade framförallt mätningar med avseende på mängden emissioner som avgår från konstruktioner med respektive utan golvvärme och med olika sorters lim. Den innefattade dessutom betonggjutning och limning av matta, kontinuerliga mätningar av den relativa fuktigheten och temperaturen i betongkropparna samt analys av samtliga mätningar.

Under slutskedet av arbetet har datorsimuleringar genomförts som hjälp för att förstå mätningarna. Simuleringar gjordes dels för emissionerna från ytan men också för temperaturen och den relativa fuktigheten i provkropparna under försöksperioden samt hur dessa två sistnämnda påverkar uppkomsten och avgivningen av emissioner.

2 Hälsopåverkan

2.1 Symptom

Ämnen som kommer in i kroppen kan påverka hälsan på olika sätt. När man talar om emissioners påverkan är det bland annat hälsopåverkan man syftar på. Vanligen försvinner symptomen och därmed också problemen när källan och dess emissioner är borta. Symptom som räknas till sjuka hus symptom⁸ är inte ovanliga i befolkningen. För att ett hus ska klassas som sjukt måste en ovanligt stor andel av brukarna ha symptom. Det kan också vara så att symptomen försvinner när brukaren inte vistas i huset för att sedan återkomma när denne är tillbaka. Det är också känt att en högre frekvens kvinnor drabbas av symptomen än män och att det är vanligare på arbetsplatser än i bostäder (Björk och Eriksson, 2000).

De vanligaste symptomen är irritation i ögon, näsa och hals, känsla av torrhet i hud och slemhinnor, hudrodnad, hudutslag samt trötthet. Dessa symptom är desamma som vid överkänslighet och allergier och förväxlingar kan därför lätt uppstå. I dagsläget finns ett flertal kända kemiska ämnen och föreningar som har stor påverkan på människors hälsa. Framförallt har tester gjorts för att se vilka ämnen som är reproduktionsstörande, allergi- eller cancerframkallande. Klassificeringslistor finns på kemikalieinspektionens hemsida.

I denna studie mäts 1-butanol vilket i första hand verkar irriterande på ögon och slemhinnor. Vid inandning irriterar det luftvägarna vilket kan leda till huvudvärk och yrsel. Höga koncentrationer kan dessutom leda till att andningsorganen förlamas. Förtäring kan orsaka samma symptom som vid inandning, men även kräkningar. Om 1-butanol kommer i kontakt med huden kan det ge irritation som eksem eller nässelutslag och vid kontakt med ögonen kan irritation och ögonskador uppstå. Även 2-etylhexanol mäts i studien. Detta ämne kan i första hand ge ögon och hudirritationer. Vid inandning kan det orsaka irritation i näsa och hals, vilket kan leda till hosta, huvudvärk och yrsel. Höga koncentrationer kan dessutom leda till förvirring, muskelsvaghet och diarré.

2.2 Gränsvärden

När man talar om emissioner och den nivå då ett ämne inte ger några skador på människan benämns NOEL (No Observable Effect Level), vilket betyder att 100 000 människor ska kunna vistas under en livstid i miljöer med en viss koncentration av ett ämne och endast en av personerna drabbas av några symptom. Normalt sett eftersträvar man dock att ingen ska behöva utsättas så lång tid för denna halt (Björk och Eriksson, 2000).

Det finns både gräns⁹- och riktvärden¹⁰ för en mängd olika ämnen som Arbetsmiljöverket tagit fram. Dels finns det gränsvärden som är tänkta för arbetsmiljöer, vilka är satta med tanke

⁸ Byggnader som framkallar någon form av besvär hos personer som vistas i dem. Symptomen är ofta mycket diffusa som onaturlig trötthet, huvudvärk, slemhinnebesvär med mera.

⁹ Värde som anger högsta tillåtna gränsen för besvärande eller skadlig kemisk eller fysikalisk påverkan.

¹⁰ Värde i villkor enligt miljöbalken (1998:808) vars överskridande medför skyldighet att vidta åtgärd så att värdet åter kan hållas.

på att man vistas i luften under arbetstid, det vill säga åtta timmar om dagen. Men också lägre värden som är satta med tanke på vistelse i luften under en hel livstid. Det är därför högre värden för arbetsplatser än för till exempel bostadshus eftersom man vistas längre tider och oftare i hemmiljön än på arbetsplatsen (Åsbrink, 2004).

I denna studie kommer 1-butanol och 2-etylhexanol att betraktas. Detta eftersom dessa båda ämnen mätts vid tidigare studier inom ämnet och därför kan jämföras med tidigare resultat. Arbetsmiljöverket har satt upp gränsvärden för dessa och andra ämnen, vilka avser exponering under en arbetsdag, det vill säga åtta timmar. När det gäller 1-butanol finns det i flera olika isomera former¹¹ där 1-butanol har ett nivågränsvärde på 15 ppm¹² och övriga butanoler har ett nivågränsvärde på 50 ppm. Skillnaden beror på deras olika toxiska¹³ egenskaper. 2-etylhexanol har däremot inget hygieniskt gränsvärde i Sverige.

2.3 Tidsaspekter

Under hur lång tid en människa kan exponeras för olika ämnen beror dels på hur känslig man är, men också på koncentrationen i luften. Om ett ämne finns i hög koncentration i luften kanske en timme eller mindre räcker för att symptom som irritation, trötthet, huvudvärk eller yrsel ska uppkomma. Om koncentrationen däremot är låg är det inte säkert att man till en början känner av det alls när man vistas i luften. Är då ämnet till exempel toxiskt eller cancerframkallande kan det ta ett antal år innan man upptäcker att man tagit skada av luften och då kanske bara om man vistats i den varje dag (Linda Åsbrink, 2004).

Byggtid

Redan under byggskedet bör man ha i åtanke att emissioner ska ha svårt att uppkomma i bruksstadiet av en byggnad. Eftersom fukt har stor påverkan på material och reaktioner mellan olika material bör byggnaden skyddas mot regn och annan fukt under byggtiden.

Konstruktioner av betong bör få god tid på sig att torka ut så att den byggfukt som finns kvar ligger på en låg nivå. Detta för att försvåra för exempelvis reaktioner i lim vid matläggning, vilket kan leda till förtvålning¹⁴ av limmet och avgivning av emissioner till omgivningen. I många fall uppkommer emissioner vid avdunstning till exempel när lacker och färger torkar. Dessa emissioner är därför högst då materialen är nya och minskar därefter snabbt. På grund av detta bör de därför beaktas av hälsoskäl för arbetaren mer än för brukaren. Ur bostadshygieniskt syfte är dessa emissioner oftast inget större problem eftersom de i stort sett redan försvunnit när byggnaden tas i bruk. Vattenbaserade färger är dock ett undantag eftersom de har en längre avklingning än vad andra färger har och kan ge emissioner i flera månader efter målning. Vanligast är dock att avklingningen sker på några timmar eller längst några dygn.

¹¹ Ämnen med samma procentuella sammansättning och samma molekyylvikt men åtminstone någon åtskillande egenskap, till exempel strukturen då atomerna kan bindas samman i olika ordning.

¹² Parts per million.

¹³ Ämnen som är toxiska är giftiga och ofta lättflyktiga.

¹⁴ Hydrolytisk spaltning av estrar med hjälp av natriumhydroxid (natronlut), varvid alkoholer och syror bildas.

Brukstid

Under en byggnads brukstid kan emissioner både uppkomma och försvinna. Många emissioner är verksamhetsberoende och uppkommer från elektronisk utrustning, matlagning, material och så vidare.

Att emissioner uppkommer i bruksstadiet kan också bero på att byggnaden fått skador som vattenläckor eller liknande, vilket påverkar byggnadsdelar negativt. Det kan också vara så att material reagerar med varandra under en längre tid. Påverkan på inomhusklimatet ökar då successivt och upptäckten av problemet sker inte förrän i bruksstadiet. Då emissioner uppkommer en bit in i en konstruktion tar det tid innan de når konstruktionens yta varifrån eventuella emissioner kan avges till inomhusluften.

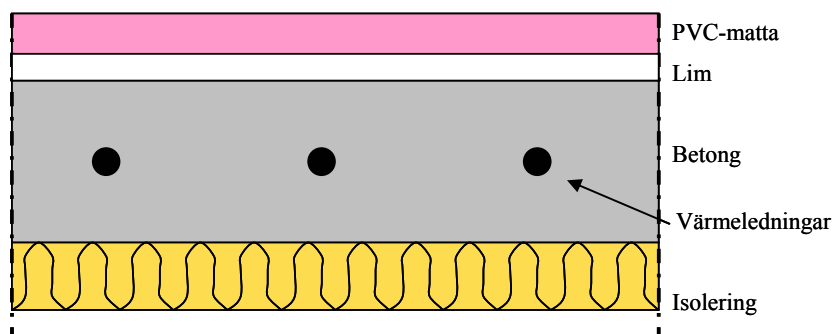
Eftersom bland annat os från matlagning och kemiska ämnen i till exempel hårspray räknas som emissioner är mängden ämnen i luften högre under vissa tider av både dygnet och året. I praktiken innebär det att emissionsvärdena i en byggnad är som högst när många människor vistas och är aktiva, medan värdena är som lägst då huset står tomt eller alla sover. Det är dock inte dessa emissioner som ger symptom på människan och tas därför inte upp vidare i rapporten.

3 Golvvärme

I dag är det många som av komfortskäl väljer att värma sina hus, eller delar av hus med golvvärme. Detta ger dels en jämnare temperaturfördelning i byggnaden men framför allt känns det behagligt att gå på ett uppvärmt golv. Ytterligare en fördel kan vara att det inte finns några radiatorer som gör rummen svärmöblerade. Å andra sidan finns risk för kallras vid fönster om radiatorerna tas bort och fönstren inte är energieffektiva (lågt så kallat U-värde¹⁵). En annan nackdel är att det finns en viss tröghet i systemet, vilket innebär att värmen inte når rummet omedelbart då systemet startas. När det gäller marknadsföring av golvvärme används sänkta energikostnader som argument. Det kräver dock att huset är lämpat för en sådan uppvärmningsform, samt att värmen inte används för den sköna känslans skull under de delar av året då den inte behövs av uppvärmningsskäl.

3.1 Uppbyggnad

Den vanligaste golvkonstruktionen är betongbjälklag, oftast i form av platta på mark. Golvvärmerören gjuts då in i betongen som lagrar värmen från rören, se figur 3.1. Värmen fördelas i betongen som sedan värmer upp rummet. Det är den här metoden som använts i denna rapport.



Figur 3.1. Principiell uppbyggnad av golvvärmesystem i betongbjälklag (ej skalenligt).

3.2 Installation

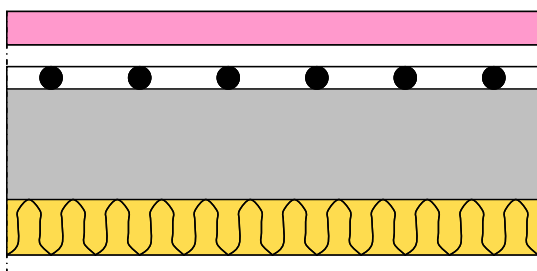
Vid inläggning av golvvärme bör man ha i åtanke att en felaktigt gjord installation kan leda till fuktskador i husgrunden. Detta på grund av att fukt kan vandra från varmare delar av konstruktionen till kallare där den kondenseras, men också genom att marken under husgrunden värms upp så att fukt kan vandra från marken och upp i konstruktionen. Risken för detta är störst på våren eftersom värmen då stängs av och konstruktionen blir kallare, medan marken under huset är varm efter uppvärmning under hela vinterhalvåret. Isoleringen under plattan fungerar som kapillärbrytande skikt så någon diffusionsspärr monteras ej under

¹⁵ Värmeigenomgångskoefficient ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$). Sammanfattar värmeövergången mellan de två sidorna av den värmeväxlande ytan samt värmeledningen genom ytan.

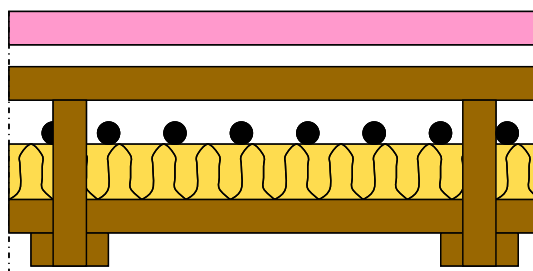
plattan, däremot läggs en diffusionsspärr som skydd ovanpå betongen om golvbeläggningen består av trä.

I ett hus med golvvärme i bottenbjälklaget är värmeförlusterna från grunden till den underliggande marken större än i ett hus med annan uppvärmning om isoleringen under plattan är den samma i de båda fallen. Hur stor skillnaden är beror på isoleringens tjocklek, (Konsumentverket, 2001). Isoleringen under bottenplattan bör därför kontrolleras innan man installerar golvvärme. Detta gäller så väl vid nyproduktion som vid installation i befintliga byggnader, för att minimera risken för skador samt minska energiåtgången.

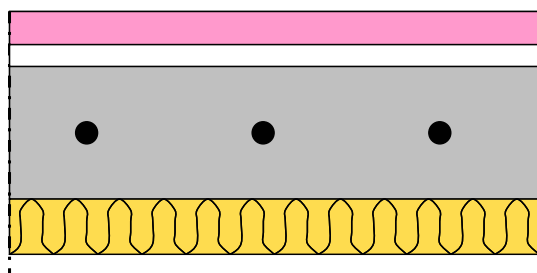
Vid val av golvvärme finns tre alternativa system; vattenburen värme, luftburen värme och värmeavgivande el-slingor. Ett vatten- eller luftburet system ger större valmöjligheter än el-slingorna eftersom de kan kombineras med bland annat solfångare, värmepump eller pelletspanna (Konsumentverket, 2001). Det luftburna systemet är dock inte så vanligt i dagsläget då verkningsgraden är lägre på detta system jämfört med det vattenburna systemet. Vid mindre installationer, som exempelvis endast badrummet i en byggnad, läggs oftast el-slingor, av praktiska skäl. Vid installation i existerande byggnader är alla tre möjliga, om takhöjden tillåter, genom en påbyggnad av den befintliga golvkonstruktionen enligt figur 3.2 eller 3.3 (ej skalenliga). Vanligast är dock vattenburna system eller el-slingor då dessa tar minst plats. Vid nyproduktion sker oftast en ingjutning av värmeledningarna i betongplattan och då väljs vanligen antingen vatten- eller luftburna system, se figur 3.4 (ej skalenlig).



Figur 3.2. Värmekabel i tunt spackelskikt.



Figur 3.3. Värmekabel i luftskikt i träbjälklag.



Figur 3.4. Värmekabel ingjuten i betong.

I praktiken går de flesta golvmaterial att kombinera med golvvärme. Material som lättare släpper igenom värmen till inomhusluften, såsom plastmattor och klinker, är emellertid lämpligare än material med höga värmemotstånd som exempelvis parkettgolv. Vilken temperatur som behövs i systemet beror framför allt på hur hög inomhustemperaturen ska vara, men också på hur konstruktionen ser ut samt hur stora förluster som finns i systemet.

Vad gäller ytan på golvet bör den dock inte överskrida 29 °C enligt Europeisk standard EN 1264.

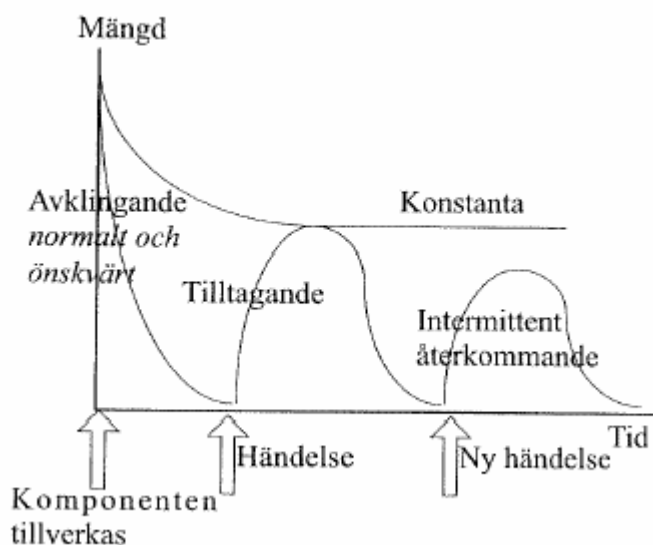
4 Kemiska emissioner

4.1 Tiden

Det finns tre olika sorters emissioner om man ser det ur ett tidsperspektiv. Dessa är avklingande, intermittent återkommande och tilltagande emissioner, se figur 4.1.

- Avklingande emissioner är de emissioner som är störst i början och sedan avklingar med tiden. Som exempel kan nämnas avgasningar från nymålade ytor, nytt trä etc.
- Intermittenta emissioner varierar med tiden, det vill säga att de uppkommer, försvinner och uppkommer igen. Dessa emissioner kan exempelvis vara verksamhetsberoende eller årstidsberoende. Som verksamhetsberoende kan nämnas matlagning i en restaurang eller träbearbetning i en industri, årsvariationer är exempelvis trädets avgivning av pollen.
- Tilltagande emissioner ger ifrån sig mer och mer emissioner med tiden. Dessa kan till exempel vara orsakade av nedbrytningsprocesser.

Intermittenta och tilltagande emissioner är de som troligen orsakar de största problemen.



Figur 4.1. Emissioner från byggnadsmaterial ur ett tidsperspektiv. Figuren är hämtad ur Björk och Eriksson (2000).

4.2 Det fysikaliska tillståndet

Faser

Kemiska emissioner kan uppträda i tre olika faser; fast, flytande eller gasfas. Beroende på i vilken fas de befinner sig, har de olika lätt att påverka inomhusmiljön och människans hälsa.

Emissioner som befinner sig i gasfas är förmodligen de som påverkar människan mest. Antingen är de i denna fas redan när de produceras eller så är de vätskor som förångas efter hand. Olika ämnen kan reagera med varandra vid blandning, vilket gör att vissa ämnen lättare förångas än andra. Vid inverkan av värme sker dessa reaktioner både lättare och snabbare.

Golv mattor innehåller ofta komponenter som är i flytande fas vid tillverkning. Även nedbrytningsprodukter från lim och golv kan vara i flytande fas. Vid förångning kan sedan dessa ämnen nå människan i form av kemiska emissioner.

Betong har ett väldigt högt pH-värde, omkring 13-14, vilket gör att den kallas alkalisk. Det höga pH-värdet beror på att porvätskan innehåller joniserade ämnen i form av bland annat OH^- , Ca^{2+} , K^+ och Na^+ joner. När betongen torkar kan dessa joner transporteras med vattnet och reagera med ämnen i både lim och matta, enligt Wengholt Johnsson (1995).

Till fasta partiklar räknas främst damm och då framför allt i form av textilfiber, hår från pälsdjur eller cigarettaska. Dessa räknas inte till kemiska emissioner och beskrivs därför inte närmare i rapporten.

Värme

Värme har stor inverkan på hur gaser och vätskor förflyttar sig. Det innebär att vid användning av golvvärme kommer fukt och värme att vandra från varma till kallare områden i konstruktionen. Vid denna omfördelning av fukten kan andra ämnen som joner och liknande transporteras med vätskan (inte med ånga), vilket gör att både mycket fukt och joner ansamlas mellan betongen och mattan. Värmen hjälper dessutom kemiska emissioner att starta och fortplanta sig genom att molekylerna rör på sig mer vid högre temperaturer än vid lägre. Detta leder till att limmet lättare reagerar med betongens joner och mjukgörarna i mattan, något som i sin tur kan leda till inte bara kemiska emissioner utan också en förtvålning av mattan med minskad vidhäftningsförmåga som följd.

Fukt

Man vet att fukt har stor inverkan på många olika material, däribland konstruktioner av betong, lim och matta. Fuktiga betonggolv får i lindriga fall problem som ger uttryck i ökad avgasning av egenemissioner från betongen. Vid något svårare fall uppstår kemiska reaktioner med tillhörande sekundära emissioner¹⁶ och i extrema fall sker stark förtvålning av mattlimmet och vidhäftningsproblem med tillhörande bubblor i mattan. Oavsett vilket av dessa tre problem som uppstår släpper materialen ifrån sig emissioner till omgivningen som därmed mer eller mindre påverkar människan. För att undvika problemen bör man därför se till att bygga torrt och låta byggfukt torka ut före limning av mattan.

Koncentration

Beroende på vilka material som används samt hur mycket dessa kommer att reagera med varandra kommer olika koncentrationer av kemiska emissioner att avdunsta från konstruktionen. Hur stor koncentration som når luften och därmed människan beror bland annat på mattans genomsläpplighet och betongens förmåga att ta upp och lagra emissioner.

¹⁶ Då material reagerar med till exempel fukt eller alkalisk fukt så att emissioner bildas och kommer ut i luften.

4.3 Depålagring

Den tid som emitterade gaser eller vätskor befinner sig i ett utrymme kan avsevärt förlängas om de absorberas in i andra material än de som de avgivits ifrån. Till exempel kan textilier eller böcker ta upp emissioner för att senare återigen avge dem till omgivningen.

4.4 Verksamhet

Det är inte bara material utan även verksamheten i en byggnad som påverkar halten luftföroreningar. Detta gör att totalhalten av kemiska föroreningar kan variera starkt under till exempel en arbetsdag. Emissioner produceras även i stor skala vid matlagning, duschning, användning av kemiska produkter såsom kosmetika och hårvårdsprodukter samt användning av elektronisk utrustning som exempelvis datorer.

4.5 Tecken på emissioner

Gustafsson (1990) har delat in hur emissionsproblem kan yttra sig i följande delar:

Luktavgivning

Vissa typer av linoleummattor kan avge lukt vid solbelysning. Dessa mattor kan även avge lukt vid våtstädning, då starka rengöringsmedel kan skada ytskiktet så att smuts och vatten kan tränga ner i mattan och genom alkalisk hydrolys av fettpartiklar i smutsen eller bindemedlet orsaka en obehaglig lukt. Lukten brukar dock försvinna efter en kort tid då mattan torkat.

Ventilationsanläggningar bör regelbundet underhållas, då främst genom städning av kanaler och byten av filter. Ventilationsanläggningar kan annars vid normal drift ge ifrån sig dålig lukt på grund av mikrobiell tillväxt. Sådan tillväxt kan ske i det tillstängda systemet även då omgivande luft inte är mättad av vattenånga.

Fuktpåverkan

Fukt kan påverka material på flera olika sätt. Till exempel kan

- den tidigare använda typen av kaseinhaltigt ej typgodkänt flytspackel avge ammoniak.
- golvlim förtvålas om det läggs på fuktig alkalisk betong.
- mjukmedel i vinylmattor sönderdelas.
- linoleummattor avspalta¹⁷ aldehyder och luktande karboxylsyror efter felaktigt utförd våtstädning.
- mineralull avspalta aldehyder.

Antalet påverkade material är alltså begränsat. Trots det uppstår de flesta skadefallen i byggnader vid inverkan av fukt, och då främst vid materialläggning på fuktig alkalisk betong som hydrolyserar mjukgöraren i ovanliggande lim och matta. Detta problem är speciellt stort i

¹⁷ Ämnen eller molekyler avges från kemiska föreningar.

Sverige där säkerhetsmarginalerna, med avseende på tiden, för att rätt relativ fukthalt ska ha inställt sig vid mattläggning är små. I praktiken innebär det att inte konstruktionen har fuktdimensionerats ordentligt, att betongen inte torkat ut innan golvbeläggning lagts på eller att betongen inte skyddats mot nederbörd i byggstadiet.

4.6 Materialegenskaper hos betong, lim och matta

Betong

Betong med ett lågt vattencementtal (vct) är mer alkalisk än en betong med ett högre vct-tal, om de är baserade på samma cementsort. En betong med lågt vct har dessutom ett finare porsystem och är därmed tätare mot fukt än vad en betong med högt vct är. Förklaringen är att vct-talet blir högre desto mer vatten i förhållande till cement som betongblandningen innehåller, vilket i sin tur leder till att fler porer bildas i betongen vid uttorkning (Sjöberg, 2001).

För att kemisk hydrolys ska kunna äga rum krävs tillgång till både alkali och vatten, vilket gör att både betongens sammansättning och fukthalt har stor betydelse när det gäller hur mycket emissioner som genereras i eller i samverkan med ett material. Detta eftersom emissionerna ökar vid högre alkalinitet¹⁸. Tidigare studier har visat att det kritiska värdet på den relativa fuktigheten ligger runt 90 % i de flesta betongsorter, något högre för standardbetong och något lägre för självtorkande betong, Wengholt Johnsson (1995).

En vattenlösning kan kallas alkalisk då pH-värdet är högre än 7. I betong är det hydrationsprodukten¹⁹ kalciumhydroxid som upprätthåller en alkalisk miljö. Enbart kalciumhydroxiden gör att betongens pH-värde ligger på ungefär 12,5. Koncentrationen hydroxidjoner är dock vanligtvis högre eftersom betongen oftast förutom kalciumhydroxid även innehåller de lättlösliga jonerna K^+ och Na^+ . Normalt brukar därför pH-värdet i betong ligga mellan 13-14 och i vissa fall även över 14 (Wengholt Johnsson, 1995).

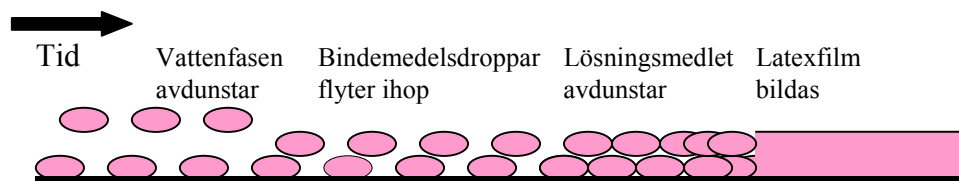
Nu för tiden används allt oftare självtorkande eller byggfuktfri betong. Det innebär en betong med ett så lågt vct-tal att nästan allt blandningsvattnet avgår under härdning. Givetvis gäller olika vct-tal för olika betongsorter. Det positiva vid användandet av den här sortens betong är att ingen byggfukt som måste torkas ut finns kvar i materialet när det härdat färdigt. Det negativa är, som tidigare nämnts, att betongen blir mer alkalisk vid låga vct-tal och kan därför orsaka emissioner vid lägre relativ fuktighet än annan betong (Sjöberg, 2001).

Lim

För att ett golvlim ska bli lättarbetat innehåller det olika mjukgörare, vilka är finfördelade i vätskefas. När limmet torkar avgår först vätskefasen, det vill säga vattnet, sedan flyter bindemedelsdropparna samman och till sist avdunstar lösningsmedlet, (se figur 4.2). Denna avdunstning utgör limmets egenemission eller primära emission.

¹⁸ En vätskas förmåga att leda ström. Beror av antalet joner.

¹⁹ Det ämne som gör att den kemiska reaktionen mellan vatten och cement sätter igång. Detta sker direkt vid blandning av betong och medför att betongen successivt börjar hårdna.



Figur 4.2. Principiell bild på torkningsförloppet hos ett vattendispergerat akrylatlim (latex). Bilden baseras på Björk (1996).

Vattenburna golvljm innehåller ofta bindemedel innehållande akrylatsampolymerer av 2-etylhexylakrylat och butylakrylat. Då de utsätts för fukt eller alkalisk fukt (i betong) bryts esterbindningar i molekyllkedjorna. Vid dessa brytningar bildas alkoholerna 2-etylhexanol och 1-butanol som frigörs och kommer ut i luften. Detta kallas sekundär emission (Sjöberg, 1998).

Matta

Mattor består i stora drag av bindemedel, fyllmedel, eventuellt bärare samt tillsatsmedel. Som bindemedel används antingen naturliga eller processframställda polymerer. En naturlig polymer är bland annat linoleum som tillverkas av linväxtens frö, medan plaster som exempelvis polyvinylklorid (PVC) är en processframställd polymer. Fyllmedel tillsätts mattan för att dryga ut materialet samt för att ge den önskade egenskaper. Bäraren består ofta av en glasfiberväv och används dels för att ge mattan dimensionsstabilitet och dels för att vara startmaterial i produktionslinjen. Tillsatsmedel är till exempel mjukgörare, stabilisatorer, processhjälpmedel samt pigment.

Mjukgörare tillsätts bland annat vid tillverkning av PVC-mattor vilket gör mattan lättarbetad. Det vill säga att man tillsätter ämnen till materialet som försvagar krafterna mellan molekyllkedjorna så att materialet blir mjukare. Dessa ämnen kan sedan vid inverkan av fukt och alkali sönderdelas och avgå från materialet som flyktiga organiska kolväten (Volatile Organic Compounds, VOC).

5 Teori

I detta kapitel beskrivs de processer som inverkar på konstruktionen i denna studie. Alla har betydelse för uppkomsten av emissioner i material och konstruktioner.

5.1 Värmetransport

Värmeledningen genom ett material bestäms av materialets värmeledningsförmåga, λ (W/m · K), temperaturskillnaden, $T_1 - T_2$ (°C eller K) över materialet och materialets tjocklek, d (m).

Vid homogena material med endimensionell strömriktning och stationära förhållanden kan detta uttryckas som värmeflödestätheten per kvadratmeter yta q (W/m²) enligt Fouriers lag (se figur 5.1).

$$q = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.1)$$

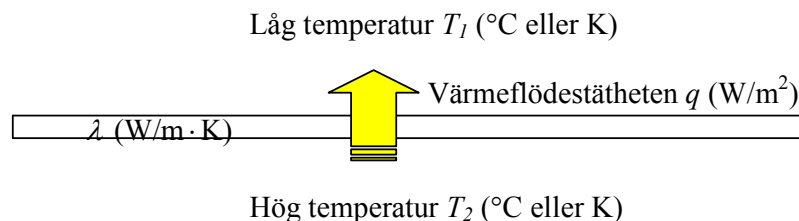
λ = värmeledningsförmåga (W/m · K)

d = tjocklek (m)

T_1 = den högre temperaturen (°C eller K)

T_2 = den lägre temperaturen (°C eller K)

Värmeledningsförmågan, λ , varierar med materialets fuktinnehåll och temperatur. Vanligtvis kan man bortse från temperaturvariationen i intervallet mellan inomhustemperaturen och utomhustemperaturen då det brukar vara ganska litet, däremot korrigerar man ibland för fuktigheten i intervallet med Δw .



Figur 5.1. Värmeledningen genom ett material med värmeledningsförmågan λ .

Ett material har ett värmemotstånd R (m²K/W) bestående av kvoten mellan tjockleken och värmeledningsförmågan.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (5.2)$$

Insatt i ekvation (5.1) ger detta den förenklade formeln:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.3)$$

Värmeflödestätheten är alltså kvoten mellan temperaturdifferensen och materialets värmemotstånd. Denna förenkling gör det lättare att beräkna värmeflödestätheten q (W/m^2) genom flera hopsatta material med olika värmemotstånd. För att detta ska vara möjligt krävs dock uträkningar av de olika ingående materialens värmemotstånd R_i ($\text{m}^2\text{K/W}$).

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (5.4)$$

d_i = det enskilda materialets tjocklek (m)

λ_i = det enskilda materialets värmeledningsförmåga ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

Hela konstruktionens värmemotstånd R är sedan summan av de olika skiktens värmemotstånd R_i .

$$R = \sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 \dots \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (5.5)$$

R_1 , R_2 , R_3 och så vidare är respektive materialskikts värmemotstånd

För konstruktioner som golv, väggar och tak vilka angränsar till luft måste även hänsyn tas till motståndet som luften utgör mot omgivningen. Detta värmemotstånd är beroende av det konvektiva²⁰ värmeutbytet och strålningsutbytet²¹ med omgivningen och normalt gäller för konstruktioners inner- och yttertor.

$$\begin{array}{ll} R_{si} = 0.13 \quad (\text{m}^2\text{K/W}) & \text{konstruktionens innertor} \\ R_{se} = 0.04 \quad (\text{m}^2\text{K/W}) & \text{konstruktionens yttor} \end{array}$$

Vid beräkning av R_{tot} över en konstruktion behöver även dessa motstånd läggas till i formel (5.5) så att det totala motståndet mellan luften på ömse sidor om konstruktionen finns med.

$$R_{tot} = R_{si} + \sum R_i + R_{se} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (5.6)$$

Värmeflödestätheten q (W/m^2) i material av flera skikt blir då beroende av temperaturdifferensen mellan inneluft och uteluft $T_i - T_e$. Jämför med formel (5.3).

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_{tot}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.7)$$

Med denna ekvation kan man även beräkna temperaturer inuti en konstruktion. Förutsättningarna är fortfarande stationära förhållanden och endimensionella flöden.

²⁰ I detta arbete främst när luft eller vatten transporterar värme i material, konstruktioner eller utrymmen.

²¹ Sker mellan ytor med olika temperatur, det vill säga nettovärme strålar från den varmare ytan till den kallare.

Samma värmeflödestäthet q (W/m²) går genom alla skikten om värmeflödena är konstanta genom konstruktionen. Detta ger att temperaturdifferensen ΔT (°C eller K) över respektive skikt blir proportionell mot skiktets värmemotstånd R (m²K/W).

$$q = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3} = \dots \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.8)$$

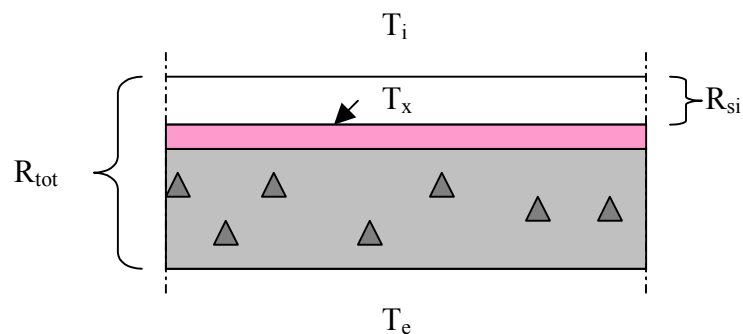
$\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ och så vidare är temperaturdifferensen över respektive skikt
 R_1, R_2, R_3 och så vidare är värmemotståndet för respektive skikt

Temperaturändringen över ett godtyckligt skikt blir då genom kombination av de två ovanstående formlerna:

$$\Delta T_i = \frac{R_i}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) \quad (^\circ\text{C eller K}) \quad (5.9)$$

ΔT_i och R_i är temperaturdifferens respektive värmemotstånd för ett specifikt skikt.

I praktiken innebär det en jämviktsekvation där flödet är den konstanta parametern. För beräkning av yttemperatur används ett flertal parametrar i och utanför konstruktionen, se figur 5.2.



Figur 5.2. Temperaturberäkning på ytan av en konstruktion.

Vid beräkning av T_x , i figur 5.2, fås:

$$q = \frac{(T_i - T_e)}{R_{tot}} = \frac{(T_i - T_x)}{R_{si}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.10)$$

Vid omändring i formeln fås temperaturen på ytan T_x (°C eller K) enligt:

$$T_x = T_i - \frac{R_{si}}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) \quad (^\circ\text{C eller K}) \quad (5.11)$$

På samma sätt kan man beräkna temperaturen på godtyckliga djup in i ett material och på så vis också bestämma temperaturfördelningen genom hela konstruktionen.

$$T_x = T_i - \frac{R_x}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) \quad (^\circ\text{C eller K}) \quad (5.12)$$

T_x = temperaturen ($^\circ\text{C}$ eller K) på avståndet x in i konstruktionen

T_i = temperaturen ($^\circ\text{C}$ eller K) inne, eller varma sidan ($x=0$)

T_e = temperaturen ($^\circ\text{C}$ eller K) ute, eller kalla sidan

R_x = värmemotstånd (m²K/W) för skikten från $x=0$ till x

För att kunna bestämma fukttillstånden genom konstruktionen är dessa beräkningar nödvändiga.

5.2 Fukttransport

Värme och fukt hör ihop, därför ändras även fuktparametrarna i ett material om temperaturen ändras.

5.2.1 Luftburen fukt

Luft innehåller oftast en viss mängd fukt (vattenånga), men beroende på luftens temperatur kan den innehålla olika mycket ånga. Det betyder att ju varmare luften är desto mer vattenånga kan den innehålla. Den maximala andelen vattenånga som luften kan innehålla vid en viss temperatur skrivs som mättnadsånghalten $v_s(T)$ (kg/m³) och vad den i verkligheten innehåller, den absoluta ånghalten, skrivs som v (kg/m³). Oftast är luften inte helt mättad och man talar då om den relativa fuktigheten ϕ (%) som är ånghalten i relation till mättnadsånghalten vid en viss temperatur och anges i procent.

$$\phi = \frac{v}{v_s(T)} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5.13)$$

v = aktuell ånghalt (kg/m³)

$v_s(T)$ = mättnadsånghalt (kg/m³)

Den relativa fuktigheten kan även skrivas som RH (Relative Humidity), RF (Relativ Fuktighet), RÅ (Relativ Ånghalt) eller ϕ . När den relativa fuktigheten når sitt maximala värde på 100 % bildas kondens.

5.2.2 Fukt i material

När det gäller fukt i material talar man om fysikaliskt eller kemiskt bundet vatten. Det kemiskt bundna vattnet, till exempel kristallvatten i gips eller reagensvatten vid härdning av betong, är så fast fixerat i materialet att det inte har någon inverkan på fukttransporter i materialet, därför kommer detta inte att nämnas vidare i rapporten. Det fysikaliskt bundna vattnet däremot finns i materialets porer och hålrum och går att torka ut eller förångas bort helt

vid en temperatur av 105 °C (Petersson, 2001). Denna fukt delas in i hygroskopisk fukt²² som beror av omgivande lufts relativa fuktighet och kapillärfukt som sugts upp i materialet vid kontakt med fritt vatten.

Mängden fukt ett material innehåller kan benämnas antingen som dess fuktkvot u (kg/kg eller vikt-%) eller fukthalt w (kg/m³). I trämaterial används främst fuktkvot.

$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad (\text{kg/kg eller vikt-\%}) \quad (5.14)$$

m_w = fysikaliska vattnets vikt (kg)

m_0 = torra materialets vikt efter uttorkning i 105 °C (kg)

Fukthalten, w (kg/m³) bestäms enligt:

$$w = \frac{m_w}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.15)$$

V = materialets volym (m³)

Fuktkvoten och fukthalten hänger samman genom formeln:

$$w = \rho \cdot u \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.16)$$

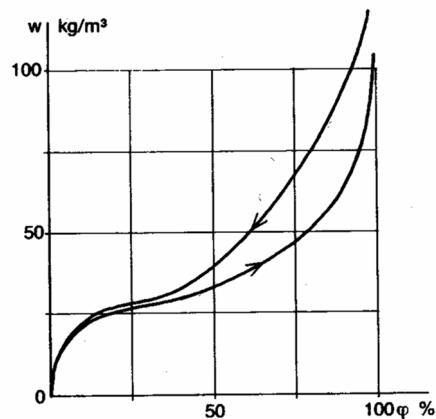
ρ = torra materialets skrymdensitet (kg/m³)

Fukttinnehållet i en konstruktion påverkas av den omgivande luftens relativa fuktighet, på så sätt att materialet strävar efter fuktjämvikt med omgivningen. Det vill säga att om den relativa fuktigheten i omgivningen ökar, ökar även fuktigheten i materialet och om den relativa fuktigheten i omgivningen minskar släpper materialet ifrån sig fukt.

För varje enskilt material kan detta beskrivas med materialets specifika sorptionskurva $w(\phi)$. Sorptionskurvan för betong ses i figur 5.3. Olika material har olika sorptionskurvor beroende på deras olika jämviktssamband. Eftersom absorptionen (uppfuktningen) och desorptionen (uttorkningen) har en viss tröghet kallad, hysteres²³, bildas skilda kurvor i diagrammet. Oftast används ett medelvärde mellan de båda kurvorna vid beräkningar.

²² Fukt som absorberas, det vill säga upptas, av ett material från luft med en relativ fuktighet under 98 % ($\phi < 98 \%$).

²³ Gäller om man får två olika kurvor, för till exempel uppfuktning respektive uttorkning, i ett diagram.

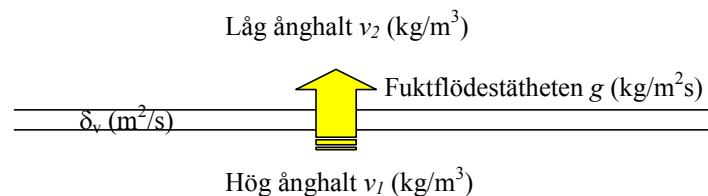


Figur 5.3. Sorptionskurva för betong K 25.

Vad gäller temperaturen har den mindre inverkan på materialets jämviktsfukthalt än vad den relativa fuktigheten har. Däremot har den stor inverkan på luftens relativa fuktighet och på så vis också materialets fuktjämvikt.

5.2.3 Diffusion genom material

Diffusion genom ett material innebär att vattenånga i materialet vandrar från områden med höga koncentrationer av vattenånga till områden med lägre. Om förhållandena är endimensionella och stationära kan det beskrivas med fuktflödestätheten g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), se figur 5.4.



Figur 5.4. Diffusion genom ett material med ånggenomsläppligheten δ_v .

Med hjälp av Ficks första lag kan flödet g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) för en konstruktion uttryckas som:

$$g = \delta_v \cdot \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (\text{kg}/\text{m}^2\text{s}) \quad (5.17)$$

δ_v = ånggenomsläppligheten för material (m^2/s)

d = materialskiktets tjocklek (m)

$v_1 - v_2$ = skillnaden i ånghalt mellan skiktets två sidor (kg/m^3)

Alla material har ett ånggenomgångsmotstånd Z (s/m).

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (\text{s}/\text{m}) \quad (5.18)$$

Insatt i formel (5.17) ger det förenklingen:

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.19)$$

Med hjälp av detta kan ånggenomgångsmotståndet för flera hopsatta materialskikt beräknas. Detta görs genom att alla ingående materials ånggenomgångsmotstånd Z_{vi} (s/m) adderas, på samma sätt som värmemotstånd.

$$Z_v = \sum Z_{vi} = Z_{v1} + Z_{v2} + Z_{v3} \dots \quad (\text{s/m}) \quad (5.20)$$

Z_{v1} , Z_{v2} , Z_{v3} och så vidare är ånggenomgångsmotstånden i de olika materialskikten

För konstruktioner som golv, väggar och tak vilka angränsar till luft kan hänsyn även tas till motståndet som luften utgör mot omgivningen. Detta ångövergångsmotstånd gäller normalt för konstruktioners inner- och yttertor.

$$\begin{array}{ll} Z_{v,si} = 360 \quad (\text{s/m}) & \text{konstruktionens innertor} \\ Z_{v,se} = 60 \quad (\text{s/m}) & \text{konstruktionens yttor} \end{array}$$

Vid beräkning av $Z_{v,tot}$ över en konstruktion från, luft till luft, behöver ibland även dessa motstånd läggas till i formel (5.20) så att det totala motståndet mellan luften på ömse sidor om konstruktionen finns med.

$$Z_{v,tot} = Z_{v,si} + \sum Z_i + Z_{v,se} \quad (\text{s/m}) \quad (5.21)$$

Fuktflödet i material av flera skikt blir då beroende av ånghaltsdifferensen mellan inneluft och uteluft $v_i - v_e$. Jämför med formel (5.19).

$$g = \frac{v_i - v_e}{Z_{v,tot}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.22)$$

Med denna ekvation kan man även beräkna ånghalter inuti en konstruktion. Förutsättningarna är fortfarande stationära förhållanden och endimensionella flöden.

Ånghaltsfördelning

Vid stationära förhållanden gäller samma fuktflödestäthet g ($\text{kg/m}^2\text{s}$) genom hela konstruktionen. Detta ger att ånghaltsförändringen Δv (kg/m^3) över respektive skikt blir proportionell mot skiktets ånggenomgångsmotstånd Z (s/m).

$$g = \frac{\Delta v_1}{Z_{v1}} = \frac{\Delta v_2}{Z_{v2}} = \frac{\Delta v_3}{Z_{v3}} = \dots \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.23)$$

Δv_1 , Δv_2 , Δv_3 och så vidare är ånggenomgångsmotståndet över respektive skikt.

Detta gäller även över hela konstruktionen genom:

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_{v,tot}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.24)$$

$v_1 - v_2$ = ånghaltsskillnaden över hela konstruktionen
 $Z_{v,tot}$ = summan av alla ånggenomgångsmotstånd

Ånghaltsskillnaden Δv_i (kg/m^3) över ett godtyckligt materialskikt kan skrivas som en kombination av de två ovanstående formlerna.

$$\Delta v_i = \frac{\Delta Z_i}{Z_{v,tot}} \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.25)$$

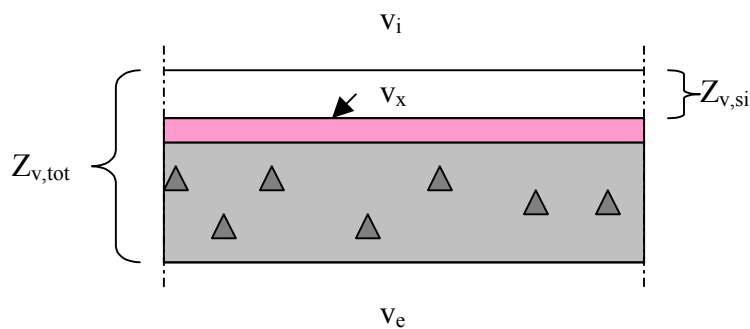
Δv_i = ånghaltsdifferensen över det aktuella materialskiktet (kg/m^3)
 ΔZ_i = ånggenomgångsmotståndet för det aktuella materialskiktet (s/m)

Ånghalten v_x kan beräknas på önskat djup och ånghaltsfördelningen kan bestämmas genom hela konstruktionen.

$$v_x = v_1 - \frac{Z_{v,x}}{Z_{v,tot}} \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.26)$$

v_x = ånghalten (kg/m^3) på avståndet x in i konstruktionen
 $Z_{v,x}$ = ånggenomgångsmotståndet (s/m) för materialen fram till gränssytan x
 $v_1 - v_2$ = ånghaltsdifferensen mellan konstruktionens båda sidor (kg/m^3)

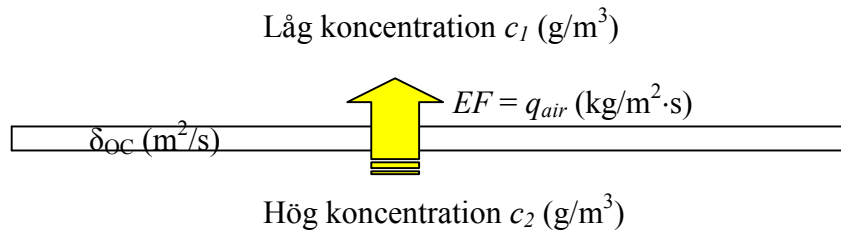
Ånghaltsbestämningen på konstruktionens yta ses i figur 5.5.



Figur 5.5. Ånghaltsberäkning på ytan av en konstruktion.

5.3 Koncentration

Alla flyktiga material strävar, precis som fukt, efter en koncentrationsjämvikt vilket innebär ett flöde från höga koncentrationer till lägre. Flödet i detta sammanhang är detsamma som emissionsfaktorn EF ($\text{kg/m}^2\text{s}$), se figur 5.6 (Sjöberg, 2001).



Figur 5.6. Flödet q genom en konstruktion är samma sak som emissionsfaktorn EF .

Under vilken hastighet detta sker bestäms dels av skillnaden i koncentration, men också av genomgångsmotståndet i materialet (vilket i denna rapport kommer vara en PVC-matta). Precis som vid värme och fuktberäkningar antas förhållandena vara stationära och endimensionella.

Med hjälp av Ficks första lag kan flödet q_{air} ($\text{kg/m}^2\text{s}$) för en konstruktion uttryckas som:

$$q_{air} = -\delta_{OC} \cdot \frac{c_1 - c_2}{d} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.29)$$

δ_{OC} = diffusionskoefficient för kolväteföreningar (OC) i gasfas (m^2/s)

c_1 = den lägre koncentrationen (kg/m^3)

c_2 = den högre koncentrationen (kg/m^3)

d = skiktets tjocklek (m)

Genomgångsmotståndet för mattan, R_{fc} (s/m), definieras som:

$$R_{fc} = \frac{d}{\delta_{OC}} \quad (\text{s/m}) \quad (5.30)$$

och vid insättning i formel (5.29) fås den förenklade formeln:

$$q_{air} = \frac{c_2 - c_1}{R_{fc}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (5.31)$$

Genomgångsmotståndet R_{fc} (s/m) kan då efter omskrivning lösas ut ur formeln.

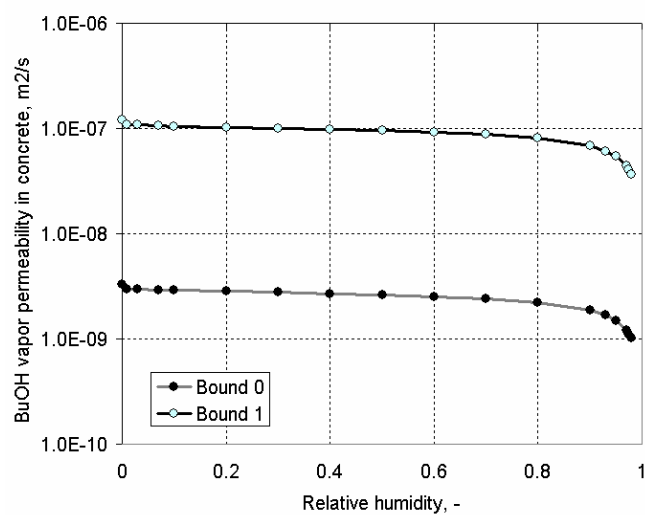
$$R_{fc} = \frac{c_2 - c_1}{q_{air}} \quad (\text{s/m}) \quad (5.32)$$

Eftersom koncentrationen är högst i limmet kommer även betongen under att påverkas. Betong är dessutom ett sådant material som kan lagra emissioner i så kallade depåer. Hur mycket som lagras på ytan av materialet, $Y_{int}(t)$ ($\text{kg}_{voc}/\text{m}^3_{mtrl}$) beror av sorptionsisotermen $K_{int}(-)$, se figur 5.7, och koncentrationen c_{2int} flyktiga kolväteföreningar (VOC) i materialet ($\text{kg}_{voc}/\text{m}^3_{luft}$).

$$Y_{\text{int}}(t) = K_{\text{int}} \cdot c_{2\text{int}} \quad (\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}) \quad (5.33)$$

K_{int} = sorptionsisoterm gällande depån i materialet (-)

$c_{2\text{int}}$ = koncentration flyktiga kolväteföreningar (VOC) i materialet ($\text{kg}_{\text{voc}}/\text{m}^3_{\text{luft}}$)



Figur 5.7. Ångpermeabilitet för 1-butanol i betong.

innebära att kolväten kunnat kondenseras på stålets yta och stanna kvar. Denna effekt ansågs dock försumbar i studien (Sjöberg, 2001).

6.2 Betong

Ett recept till betongblandningen skrevs för alla åtta betongkropparna enligt tabell 6.1. Vid betongtillverkningen torrblandades först cement (Byggcement, Skövde), sand och makadam i ungefär tre minuter. Efter det tillsattes vattnet och allt sammanblandades i ytterligare tre minuter.

Tabell 6.1. Betongrecept, vct = 0.66. Alla material anges i (kg)

Material	vikt material/m³	för 8 provkroppar
Cement	290	10.2
Vatten	191	6.7
Sand (0-8 mm)	980	34.3
Makadam (8-12 mm)	899	31.5

Betongen till alla åtta provkropparna tillverkades i en sats och tillvägagångssättet vid gjutning av kropparna var det samma i samtliga fall. Formarna fylldes till bredden med betong varvid de vibrerades på ett vibreringsbord. Vid behov fylldes och vibrerades formarna ytterligare så att betongen gick ända upp till kanten. Ingen märkbar vattenseparation uppstod i något av fallen.

Efter två och fyra timmar avjämnades ytorna med ett stål och täcktes sedan med tättslutande plast så att inte för snabb uttorkning och därmed för stora spänningar skulle uppstå i materialet. De inplastade provkropparna placerades sedan i ett klimatstabilt rum med en temperatur på 20 °C och en relativ fuktighet på 50 %.

Efter tre dygn avlägsnades plasten och betongen fick torka i ytterligare 21 dygn i det klimatstabila rummet. Efter denna tid hade RF nivån på 40 % av djupet uppnått värden mellan 88-92 % medan RF-nivån i givarna som placerats 5 mm under betongytan var i stort sett densamma som omgivningen, det vill säga ca 50 %.

6.3 Lim

De två olika lim som använts i studien är båda vattenbaserade dispersionslim. De två sorter som användes var CascoProff och CascoProff Solid, se tabell 6.2. Båda införskaffades direkt från tillverkaren.

Tabell 6.2. Limsorter som använts i studien. Uppgifter enligt tillverkare.

Benämning	Lim 1	Lim 2
Namn	CascoProff 3448	CascoProff Solid 3480
Tillverkare	Casco	Casco
Lösningsmedel	Vatten	Vatten
Sampolymerer	Akrylat-copolymer Eten- Vinylacetat copolymer	Etylen- Veova- Vinylacetatpolymer
pH	7,3	7,5-8,5
Densitet (kg/m ³)	1340	1300
Torrhalt (%)	72	75

CascoProff 3448 (Lim 1) är enligt tillverkaren ett golvlim avsett för limning av golv- och väggmaterial i både torra och våta utrymmen. Det är lämpligt för många olika material och då bland annat PVC-mattor, med eller utan baksidebeläggning. Limmet kan användas på sugande underlag som t.ex. betong, spackel, spån- och gipsskivor mm. Är underlaget ej sugande rekommenderas ett spackelskikt. Detta eftersom limmet innehåller ca 30 vikt-% vatten som måste avdunsta eller sugas upp av intilliggande material för att limmet ska torka

CascoProff Solid 3480 (Lim 2) är enligt tillverkaren ett golvlim för limning på högpresterande betong och normala betonggolv, lämpligt för de flesta golvmaterial såsom PVC, polyolefin (primad baksida) och textila mattor. Detta lim har mycket låga emissioner både vid normal applicering och vid närvaro av alkalisk fukt. Standardlim, såsom Lim 1, kan enligt tillverkaren hydrolyseras i kontakt med betong med hög fukthalt (> 85 % RH) och avger då så kallade sekundära emissioner i form av alkoholer, exempelvis 1-butanol och / eller 2-etylhexanol.

Vid användning på sugande underlag och PVC-matta rekommenderas enligt tillverkaren en limmängd på 0,20-0,25 l/m² för de båda limsorterna.

Limningsmetod

Endast metoden våtlimning användes i studien, vilket innebär att limmet endast appliceras på betongytan och att väntetiden var så kort att limmet fortfarande vätte vid beröring då mattan lades på.

En pensel användes vid bestrykningen av limmet på provkropparnas yta. För att samma mängd lim skulle påföras samtliga provkroppar vägdes limburken med dess innehåll tillsammans med penseln före respektive efter varje limning. Viktminskningen kontrollerades och registrerades så att denna blev i stort sett den samma i varje enskilt fall, se tabell 6.3. Vågen som användes var en Mettler PM 4000, vilken har en noggrannhet på ±0,02 g.

Tabell 6.3. Limåtgång vid mattlimning

Provkropp	Mängd lim (g)
1	10,76
2	10,57
3	10,59
4	10,59
5	10,88
6	10,88
7	10,82
8	10,44

Samtliga mattor trycktes dit 2-5 minuter efter det att limningen påbörjats på varje provkropp. En tyngd placerades på varje provkropp för att mattan skulle ligga tätt an mot betongen under vidhäftningen. Detta för att minska risken för blåsor mellan betong och matta då FLEC:en kräver ett absolut jämnt underlag. När tyngderna tagits bort tejpades kanterna med en aluminiumtejp. Detta för att inte limfukten skulle kunna torka ut åt sidorna. Utförandet beskrivs i Golvbranschens Riksorganisations branschstandard (2004).

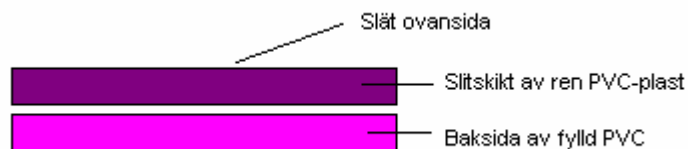
6.4 Matta

Endast en typ av matta har ingått i studien. Detta var en PVC-matta, Aqualon Plus, vilken införskaffades direkt från tillverkaren, se tabell 6.4. Den hade varken utsatts för UV-ljus eller (städ)-kemikalier.

Tabell 6.4. Matta som använts i studien. Uppgifter enligt tillverkare.

Benämning	Matta
Namn	Aqualon Plus
Tillverkare	Forbo
Bindemedel	PVC
Mjukgörare	DOP Bensoat
Fyllmedel	Dolomit
Baksida	Fylld PVC
Tjocklek (mm)	2,0
Vikt (kg/m ²)	2,8
Ångmotstånd (s/m)	2,0*10 ⁶

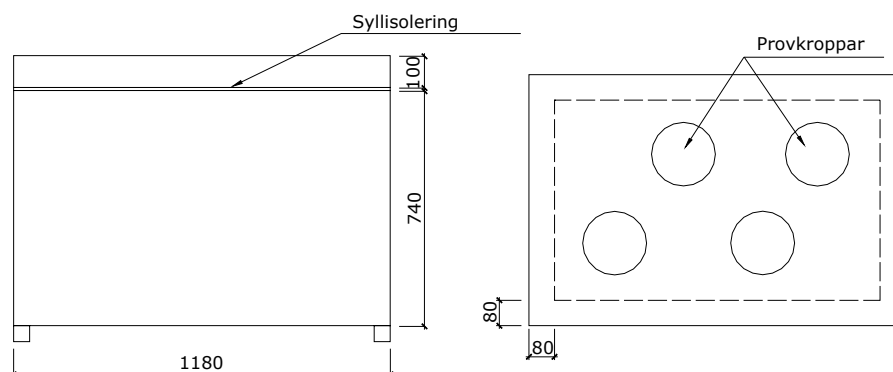
Aqualon Plus är uppbyggd enligt figur 6.2 och är avsedd att användas i våtutrymmen. Mattan består av ett slitskikt av ren PVC-plast och ett bottenskikt av fylld PVC. Aqualon Plus innehåller cirka 53 vikt-% PVC, 17 vikt-% mjukgörare i form av di-isononyl-ftalat (DOP) och bensoat samt fyllmedlet dolomit till cirka 23 vikt-%. Stabilisatorer, pigment och övriga komponenter, som brandskyddsmedel och ytskydd, utgjorde tillsammans mindre än 9 vikt-%.



Figur 6.2. Principiell uppbyggnad av PVC-mattan Aqualon Plus.

6.5 Golvvärmeanläggning

Golvvärmekonstruktionen för provkropparna bestod av en låda med insida av stål och utsida av trä med isolering däremellan. Som lock användes en 10 cm tjock expanderad cellplastskiva med fyra utskurna hål för provkropparna. Mellan cellplastskivan och lådan lades en syllisolering för att säkra tätningen däremellan så att inte luft och därmed kyla skulle kunna läcka in i konstruktionen. Konstruktionens uppbyggnad ses i figur 6.3 och 6.4.



Figur 6.3. Värmelåda för simulering av golvvärme under provkropparna, sett från sidan och uppifrån.

Inuti lådan placerades två radiatorer med en maxtemperatur på 40 °C, som skulle stå för värmetillförseln, samt en fläkt som skulle rotera luften för en jämn temperatur i hela lådan. På utsidan placerades en styrenhet innehållande bland annat en temperaturregulator med termotrådsgivare så att radiatorernas temperatur skulle kunna regleras under försökstiden. Detta för att "golvvärmetemperaturen" skulle kunna ökas successivt, under försöksperioden, utan att provkropparna behövde flyttas. Även sladdarna från RF- och temperaturgivarna gick från respektive provkropp och placerades utanför lådan för att mätningar enkelt skulle kunna ske under hela försöksperioden. Temperaturen på utsidan av lådan var ca 20 °C under hela försöksperioden.



Figur 6.4. Fotografi av värmelådan sett från sidan.

En överslagsberäkning visade att temperaturen i värmelådan skulle hålla 37 °C för att provkropparnas ytemperatur skulle bli 29 °C, se bilaga 1. Ytemperaturen bör inte överstiga 29 °C av komfortskäl enligt Europeisk standard EN 1264. Ett dygn efter limning placerades fyra av de åtta provkropparna i cellplastens utskurna håligheter och temperaturen i lådan

sattes till 25 °C. Efter ett dygn höjdes temperaturen till 30 °C för att efter ytterligare ett dygn ökas till 35 °C och slutligen efter ytterligare ett dygn sätts till maxtemperaturen på 40 °C. Under fyra dygn sänktes temperaturen till det beräknade värdet på 37 °C. Det visade sig dock att ytan på provkropparna då inte uppnådde önskad temperatur. Senare visade det sig att inte heller maxtemperaturen på 40 °C säkerställde den önskade yttemperaturen, som stannade på mellan ~25-26 °C.

Den gradvisa ökningen av temperaturen gjordes för att inte få spänningar och därmed sprickor i betongen. På utsidan av golvvärmeanläggningen var temperaturen konstant 20 °C. De resterande fyra provkropparna förvaras i ett klimatstabilt rum med temperaturen 20 °C och 50 % relativ fuktighet under hela försöksperioden.

7 Mätningar

Fortlöpande mätningar utfördes på provkropparna (Tabell 7.1) vad gäller relativ fuktighet och temperatur för att dokumentera betongens egenskaper under försöksperioden. I slutet av studien, 14 veckor efter limning, utfördes de emissionsmätningar som ligger till grund för analysen.

Tabell 7.1. Beskrivning av provkropparna. Alla provkroppar består av samma betong och matta.

Benämning	K1A	K1B	V1A	V1B	K2A	K2B	V2A	V2B
Placering	Klimat*	Klimat	Värme*	Värme	Klimat	Klimat	Värme	Värme
Lim	1	1	1	1	2	2	2	2

*Klimat = Klimatstabil rum, Värme = Värmelåda

7.1 Temperatur

Temperaturmätningar inuti provkropparna har skett kontinuerligt under hela försöksperioden, med början en vecka efter gjutning. Mätnoggrannheten för utrustningen från VAISALA är $\pm 0,4$ °C för HMP44-mätprober och $\pm 0,1$ °C för HMI41-handindikator vid rumstemperaturen + 20 °C, vilket ger ett totalvärde på $\pm 0,5$ °C för hela mätutrustningen.

Temperaturmätningar på provkropparnas yta utfördes kontinuerligt efter placering i värmelådan. Vid dessa mätningar användes ett testo 925 VVS-set från Testo. Mätnoggrannheten för detta instrument var $\pm 1,8$ °C i intervallet -50 - +199,9 °C. Tester utfördes med kokande vatten respektive vatten och isblandning för att se om detta stämde då instrumentet ej varit kontrollerat på länge. Resultatet visade att instrumentet stämde bra överens med verkligheten och att felet max var $\pm 0,7$ °C.

Ett dygn efter limningen av mattan placerades fyra av de åtta provkropparna i den värmelåda som skulle simulera golvvärme. Temperaturen i lådan var då 25 °C. Temperaturen ökades sedan successivt med 5 °C varje dag till en temperatur på 35 °C. Efter ytterligare en dag höjdes detta till sluttemperaturen på 40 °C. För att uppnå önskad yttemperatur på provkropparna ändrades denna temperatur några gånger, men låg alltid mellan 37-40 °C. Mätnoggrannheten för temperaturen i värmelådan var ± 2 °C och kontrollerades av en temperaturregulator med termotrådsgivare.

7.2 Relativ fuktighet

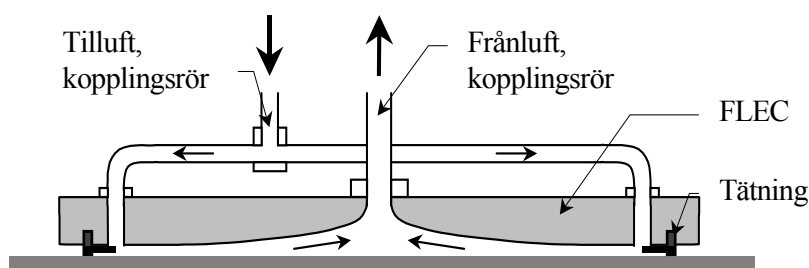
Mätningar av den relativa fuktigheten i provkropparna skedde kontinuerligt under hela försöksperioden, med början en vecka efter gjutning. Mätutrustningen bestod av HMP44-mätprober med noggrannhet ± 2 % i intervallet 0-90 % och ± 3 % mellan 90-100 %, som placerades i provkropparna, samt en HMI41-handindikator med mätfelet $\pm 0,1$ % från VAISALA, vilken kopplades in vid varje mättillfälle.

7.3 Emission

Emissionsmätningar från provkropparnas materialytor utfördes i två steg. Det första steget var provtagning på den från mätkammaren, FLEC (se figur 7.1) utströmmande luften med hjälp av adsorbentrör (Tenaxrör²⁴). Flyktiga organiska ämnen anrikades på absorbenten när luft sögs genom Tenaxröret. I det andra steget injicerades ämnena genom termisk desorption på en gaskromatograf med flamjonisationsdetektor, GC-FID²⁵ (se figur 7.3). Mätningarna utfördes på samtliga provkroppar nio veckor efter mattlimning i samarbete med Docent Olle Ramnäs på avdelningen för kemisk miljövetenskap, Chalmers.

FLEC

Den mätkammare som användes vid provtagningarna var en FLEC (Field and Laboratory Emission Cell). Den kan liknas vid ett lock som läggs direkt på den materialyta som skall mätas, se figur 7.1. Ren luft (0,1 ppm kolväten) från gastub renades ytterligare genom ett kolrör och fuktades till ca 50 % relativ fuktighet genom att ett delflöde leddes genom en gastvättflaska innan det fick strömma in i mätcellen genom ett rör. Anordningen för fuktning av luften beskrivs detaljerat av Wengholt Johnsson (1995). Luften strömmar sedan över materialytan och ut genom ett rör i mitten av mätcellen. Med hjälp av en pump sögs ett delflöde av luften, 25 ml/min i fyra minuter, genom ett Tenax-rör där kolväten adsorberas, se figur 7.2.

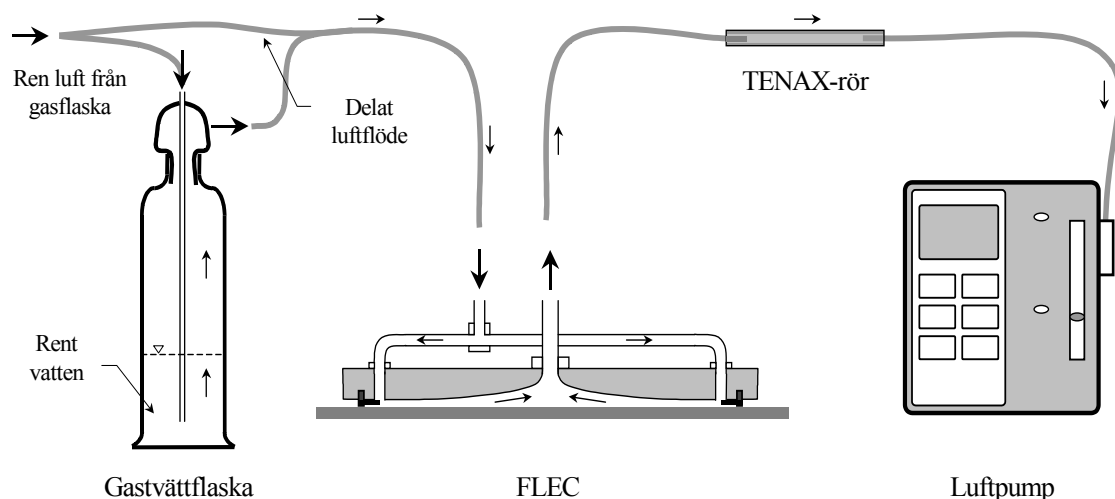


Figur 7.1. Principiell bild i genomskärning av hur en FLEC är uppbyggd.
Bilden är hämtad ur Sjöberg (2001).

Innan provtagningen konditionerades proverna i 4 timmar genom att FLEC:en låg på materialytan och ett konstant luftflöde på 100 ml/min ren luft strömmade över ytan. Detta gjordes för att minimera eventuell påverkan på utrustningen från tidigare försök.

²⁴ Rör av glas eller metall fyllt med den porösa polymeren Tenax som ofta används för adsorbentprovtagning av organiska luftföroreningar. Tenax är handelsnamnet för polymeren poly-2,6-difenyl-para-fenyleneoxid.

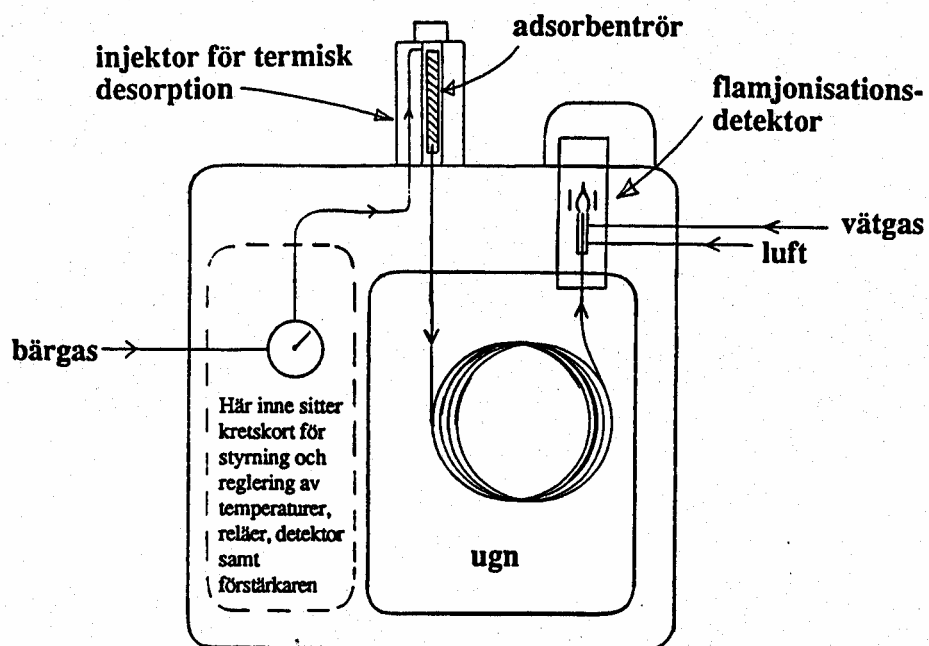
²⁵ Gaskromatograf med flamjonisationsdetektor, används för analys av organiska ämnen.



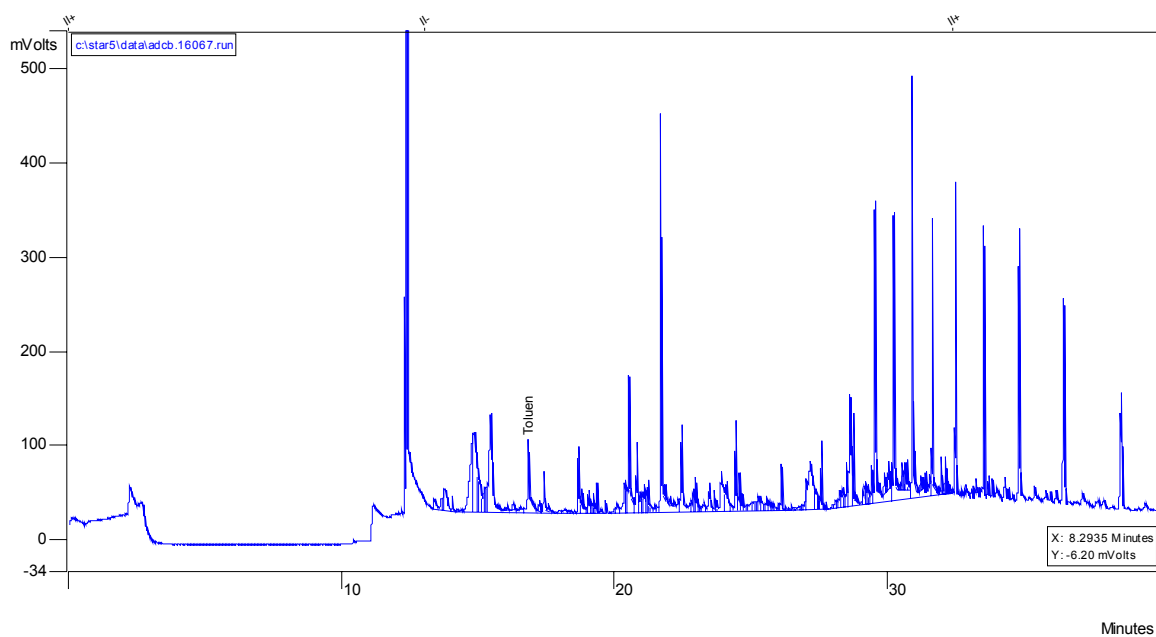
Figur 7.2. Principiell bild över hur ren luft från en gastub går genom en glasflaskan med avjonat vatten för fuktning och in i FLEC-en. Luften sugas sedan med hjälp av en pump genom ett TENAX-rör för senare analys i GC-FID. Bilden är hämtad ur Sjöberg (2001).

Gaskromatograf (GC)

Vid analysen av det som adsorberats på Tenax-rören användes en gaskromatograf med flamjonisationsdetektor (FID). De organiska föreningar (VOC) som adsorberats i Tenax-röret desorberades termiskt när röret sattes in i en desorptionsugn (250 °C). De desorberade föreningarna fördes med bärgasen (vätgas) in på en kapillärkolonn (inre diameter på 0.32 mm och en längd på 30 m), se figur 7.3. Kolonnen hölls nedkyld till -30 °C under 10 minuter så att all VOC kondenserades och anrikades i början av kolonnen. Efter det höjdes temperaturen enligt ett givet tidsschema upp till 250 °C. När temperaturen höjdes i kolonnen började VOC att vandra genom kolonnen och samtidigt separeras på grund av att de hölls kvar olika hårt i kolonnens stationära fas. Över lågan i FID:en låg en konstant spänning och när de organiska föreningarna passerade genom lågan bildades kol-väte-radikaler vilket resulterade i en högre strömstyrka. Detta betyder att en högre strömstyrka innebär en större mängd ämne och toppar vid olika tider innebär att det är olika ämnen som detekteras. Den relativa strömstyrkan plottades mot tiden i ett kromatogram, se figur 7.4. Vätgas (H_2) användes både som bärgas och som bränslegas till flamjonsdetektorn och flytande kväve (N_2) användes för att hålla kolonnen nerkyld. Metoden finns närmare beskriven i Wengholt Johnsson (1995).



Figur 7.3. Schematisk bild över en gaskromatografs uppbyggnad.



Figur 7.4. Typiskt utseende för ett kromatogram. Topparna visar mängden av olika ämnen i provet.

8 Datorsimuleringar

Som hjälp för att analysera gjorda mätningar och för att se hur ett verkligt fall skulle kunna se ut, vid användande av golvvärme, användes ett simuleringsprogram utvecklat av Angela Sasic Kalagasidis. Programmet som var en vidareutveckling av tidigare program utförda i HAM-Tools och VOC-Tools, vilka beskrivs nedan, finns på International Building Physics Toolbox hemsida www.ibpt.org.

HAM-Tools

- An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics, Sasic Kalagasidis (2004)

Sasic Kalagasidis (2004) utvecklade ett simuleringsprogram för beräkningar av värme-, fukt- och luftströmningar i material. Beräkningarna kan användas för att bedöma termisk komfort (yttemperaturer), värmeförluster, beständighet och inneklimat.

Verktyget är uppbyggt av ett antal grafiska komponenter (lådor eller boxar) som länkas samman och kommunicerar med varandra. Varje komponent representerar ett fysikaliskt objekt såsom en vägg, ett fönster, en fläkt, ett värmeaggregat och så vidare. Beräkningar som utförs i väggkomponenterna använder avancerad beskrivning av kopplad värme-, fukt- och luftströmning.

En numerisk modell för dynamisk simulering av flyktiga organiska kolväten i inomhusmiljön, Karlsson (2004).

Karlsson (2004) utvecklade ett simuleringsprogram, VOC-Tools, för emissionsmängder i inomhusluften, antingen för enskilda rum eller för hela byggnader. Programmet är en vidareutveckling av The International Building Physics Toolbox (IBPT), utvecklat på Institutionen för byggnadsteknologi, Byggnadsfysik vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Department of Civil Engineering vid Danmarks tekniske universitet.

Studien inriktar sig på den totala mängden emissioner från material, ventilation och verksamhet som kan lagras och diffundera från olika material i en byggnad eller ett rum. Beräkningar kan göras för såväl nyuppkomna som depålagrade emissioner i material och byggnadskonstruktioner.

Uppbyggnad och indata

Det nya sammansatta programmet var ett kombinerat program av de båda ovan nämnda och användes för värme-, fukt-, luft- och emissionsberäkningar (VOC). Programmet var numeriskt och innehöll 40 noder, vilket innebar att när dimensionerna för en provkropp matades in i programmet delades denna in i 40 mindre celler, eller skivor, där resultatet beräknades för varje enskild cell. Dessa celler samverkade sedan och itereringar gjordes med hjälp av differensmetoden så att en helhetsbild över hela provkroppen bildades. Materialdata och randvillkor som bland annat värmeledningsförmåga, olika övergångsmotstånd, fuktkapacitet, diffusionskoefficienter, över- och undersidans temperaturer samt att fukten endast kunde torka ut uppåt matades in i programmet. Även värden på den totala mängden emissioner som kunde bildas under mattan matades in i modellen och att endast den kemiska reaktionen kunde ske på ett ställe i konstruktionen, mellan mattan och betongen. Alla indata till programmet kan ses

i bilaga 2. Programmet utförde sedan beräkningar för den relativa fuktigheten och temperaturen i konstruktionen, för att när RF-värdena nådde över 90 % i limmet, starta den kemiska reaktionen. Detta innebar att emissionsberäkningarna berodde av fuktberäkningarna som i sin tur berodde av temperaturberäkningarna och randvillkoren. De värden som programmet räknade fram plottades i grafer på liknande sätt som vid gjorda mätningar.

De simuleringar som utfördes baserades på de provkroppar som placerats i värmelådan, vilket innebar att de haft golvvärme under försöksperioden.

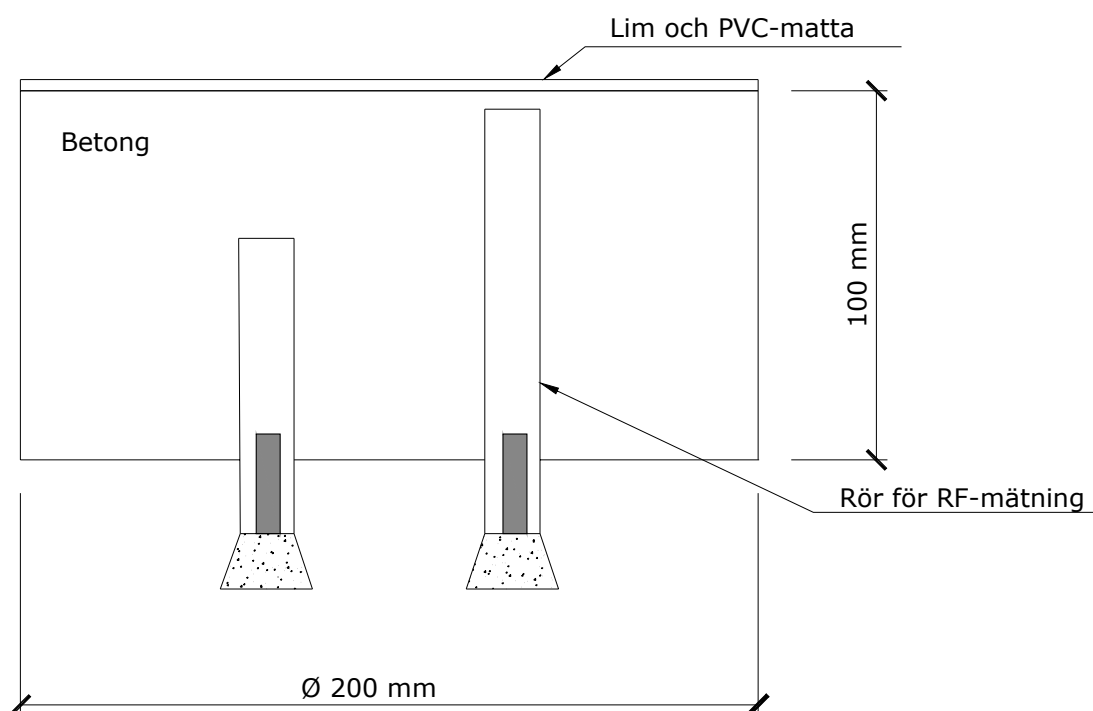
9 Resultat

9.1 Mätresultat

De mätningar som är utförda är alla gjorda i laboriemiljö på provkroppar speciellt tillverkade för denna undersökning.

Temperatur

Efter gjorda mätningar upptäcktes att temperaturmätningarna från de provkroppar som placerats i värmelådan inte stämde. Givarna som mäter relativ fuktighet och temperatur registrerar den temperatur och den relativa fuktighet som finns i röret. Det vill säga att fukttillståndet i röret bestäms av fukten som finns på den angivna ytan i rörets topp. Temperaturen som registreras är däremot ett medelvärde av den temperatur som finns i röret, vilket innebär att den påverkas av värmestrålningen från hela rörlängden. Detta gör att den registrerade temperaturen är mycket högre än den verkliga temperaturen i rörets topp, se figur 9.1. På grund av detta gjordes simuleringar av hur temperaturen på de två djupen i konstruktionen borde ha sett ut vid olika tidpunkter, enligt figur 9.2. Givarna och därmed temperaturen i de provkroppar som varit placerade i det klimatstabila rummet under hela försöksperioden påverkades aldrig på grund av att det inte var någon temperaturgradient i dessa provkroppar.

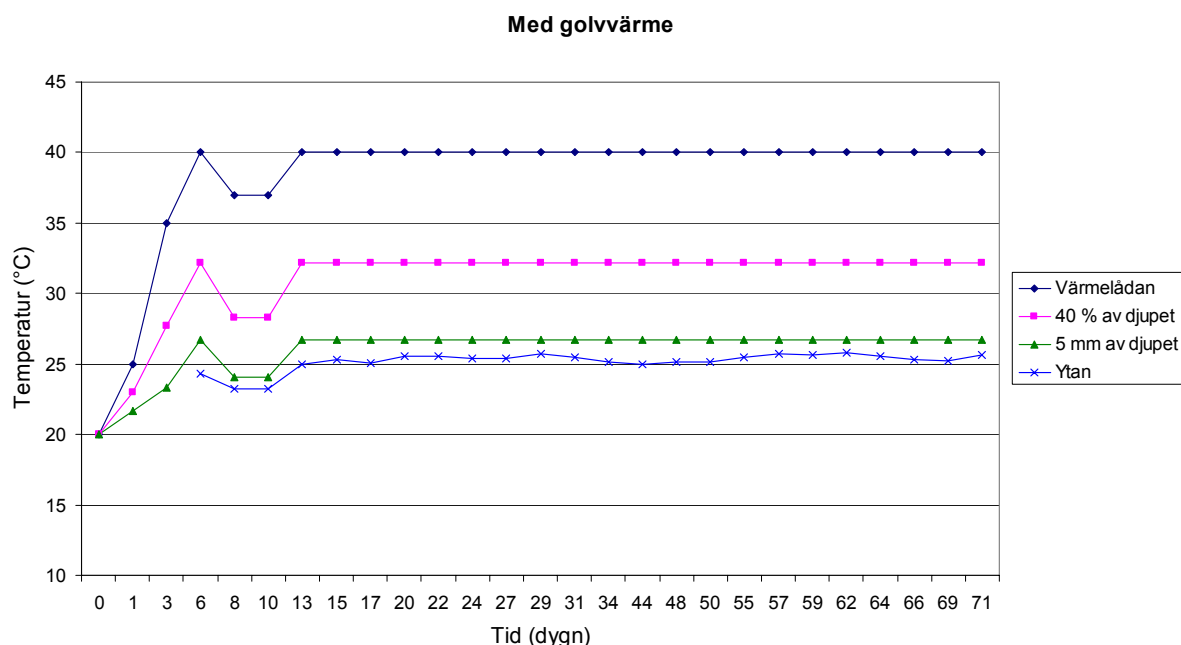


Figur 9.1. Placering av givare i provkropparnas plaströr.

Betongen hade redan vid första mätningen, det vill säga en vecka efter gjutning, samma temperatur som omgivande luft. I de provkroppar som bevarades i det klimatstabila rummet under hela försöksperioden ändrades inte denna temperatur någon gång. Temperaturen i de provkroppar som efter limningen av mattan placerades i en värmelåda ökades däremot

successivt i något långsammare takt än vad temperaturen i värmelådan ökades för att sedan stabilisera sig enligt figur 9.2. Temperaturvärdena i provkropparna är simulerade.

Tre dagar efter det att värmelådan första gången uppnått en temperatur på 40 °C mättes provkropparnas ytemperatur. Mätningar utfördes sedan i samband med att RF- och temperaturmätningar gjordes i provkropparna. Resultatet visas i figur 9.2.



Figur 9.2. Temperaturen på 40 % av provkropparnas djup, på 5 mm av djupet, på ytan och i värmelådan. Värdena på 40 % och 5 mm av djupet är simulerade. Vardera kurva är medelvärde av fyra provkroppar förutom värmelådans värden.

Relativ fuktighet

Eftersom värdet på den relativa fuktigheten beror av temperaturen var omräkningar tvungna att göras på de provkroppar som varit placerade i värmelådan under försökstiden. Detta på grund av den felaktigt avmätta temperaturen. Det värde på den relativa fuktigheten som därför fått fram vid varje mätning multiplicerades med ånghalten för den uppmätta temperaturen och dividerades med ånghalten för den simulerade temperaturen, enligt formel 9.1.

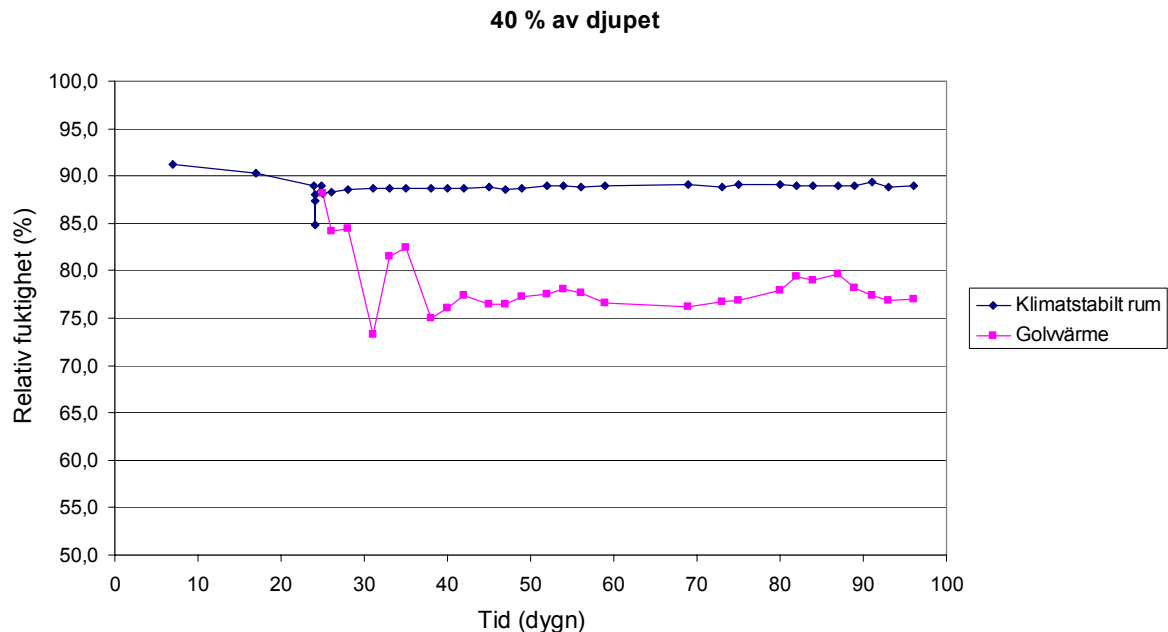
$$\phi_{\text{verklig}} = \frac{\phi_{\text{uppmätt}} \cdot v(T_{\text{uppmätt}})}{v(T_{\text{simulerad}})} \quad (\%) \quad (9.1)$$

På grund av temperaturökningen kan de värden som mättes upp i början av värmningen vara något osäkra. Detta berodde bland annat på att utrustningen behövde tid för att ställa in sig och att temperaturen i betongen ställde in sig snabbare än vad den relativa fuktigheten gjorde. De värden som uppmättes i slutet av försöksperioden antogs vara mer korrekta.

Rekommenderat djup

Den relativa fuktigheten på 40 % av provkropparnas djup var efter en vecka ca 92 %. Efter ytterligare tio dagar hade detta sjunkit till ungefär 90,5 % för att efter 24 dygn, då mattan limmades, ligga på ca 85 %. Den relativa fuktigheten höjdes efter limning till ca 89 % och de provkroppar som förvarades i det klimatstabila rummet hade sedan denna relativa fuktighet,

på 40 % av provkropparnas djup, under hela försöksperioden. Den relativa fuktigheten i de provkroppar som placerades i värmelådan sänktes däremot vid omplaceringen och var vid tiden för emissionsmätningarna runt 77 %, se figur 9.3. De ojämna värdena i början av värmelådans användning kan dels ha berott på att givarna krävde tid för att ställa in sig och att temperaturen i värmelådan varierades något, men också på att temperaturen i betongen ställde in sig snabbare än vad den relativa fuktigheten gjorde. Diagram för den relativa fuktigheten i respektive provkropp kan ses i bilaga 3.

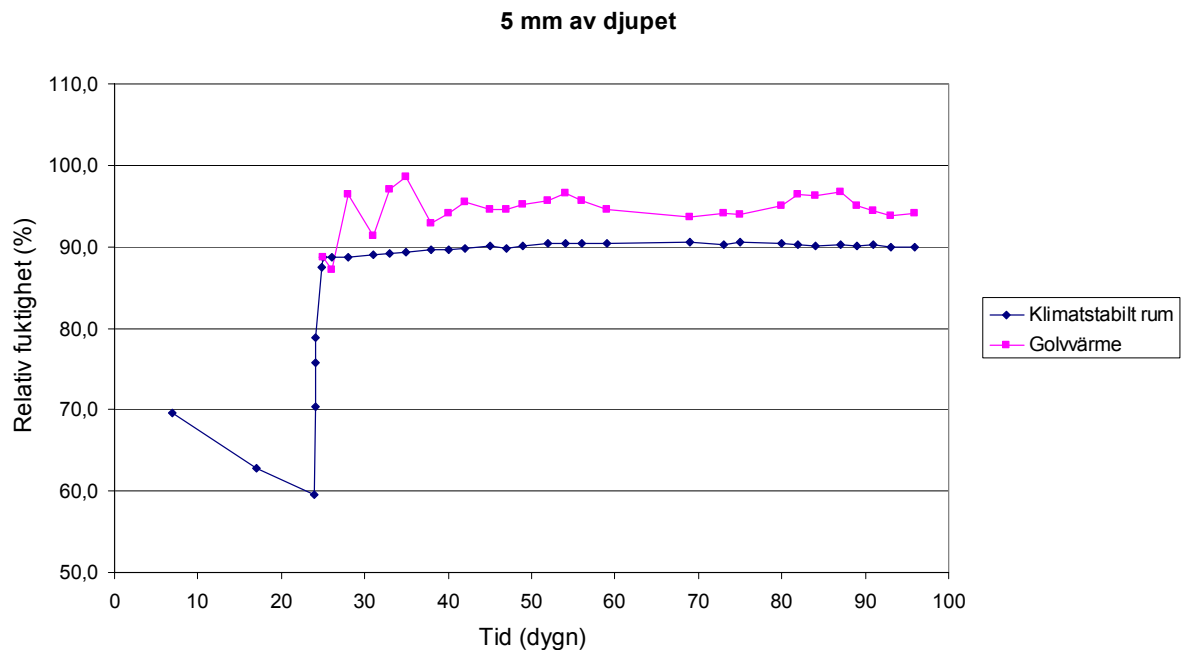


Figur 9.3. Den relativa fuktigheten på 40 % av provkropparnas djup. Fyra av provkropparna har varit placerade i det klimatstabila rummet under hela försöksperioden medan de andra fyra placerades i värmelådan efter mattlimningen (därav de sänkta värdena på dessa kurvor). Limningen skedde efter 24 dygn. Vardera kurva är medelvärde av fyra provkroppar.

Direkt under mattan

Den relativa fuktigheten ca 5 mm under provkroppens överkant varierade ganska mycket mellan olika provkroppar. Skillnaderna kan bero på att små variationer förekommer i plaströrens placering i höjdlid. Detta eftersom all montering i provkropparna är gjorda för hand. Någon millimeters skillnad av mätdjupet kan orsaka någon procents skillnad av den relativa fuktigheten. Skillnaderna kan även bero på att mätarna har en felmarginal på $\pm 2\%$ i intervallet 0-90 % och $\pm 3\%$ vid värden på den relativa fuktigheten över 90 %. Medelvärden gav dock att den relativa fuktigheten låg på ca 70 % en vecka efter gjutning och efter ytterligare tio dygn var nivån nere i ungefär 63 % för att precis före limning ligga på en nivå av ca 60 %. En timme efter pålimningen av mattan gjordes en ny mätning. RF-nivån på provkropparna var då nästan 71 %. Efter ytterligare en timma hade nivån nått upp till omkring 76 % och efter ett dygn ca 88 %. Fyra av provkropparna placerades nu i en värmelåda för att simulera golvvärme. Den relativa fuktigheten varierade sedan ganska mycket under resten av försökstiden, detta framför allt på grund av ändringar av värmelådans temperatur. När mätningar av emissioner utfördes på provkropparna var den relativa fuktigheten, direkt under mattan, ca 90 % på de provkroppar som under hela försökstiden bevarats i det klimatstabila rummet medan provkropparna i värmelådan, 5 mm under mattan, hade en relativ fuktighet på ungefär 95 %, se figur 9.4. De ojämna värdena i början av värmelådans användning kan bero på att givarna kräver tid för att ställa in sig och att temperaturen i värmelådan varierades

något. Det kan också bero på att temperaturen ställde in sig snabbare än vad den relativa fuktigheten i betongen gjorde. Den relativa fuktigheten i respektive provkropp kan ses i bilaga 3.



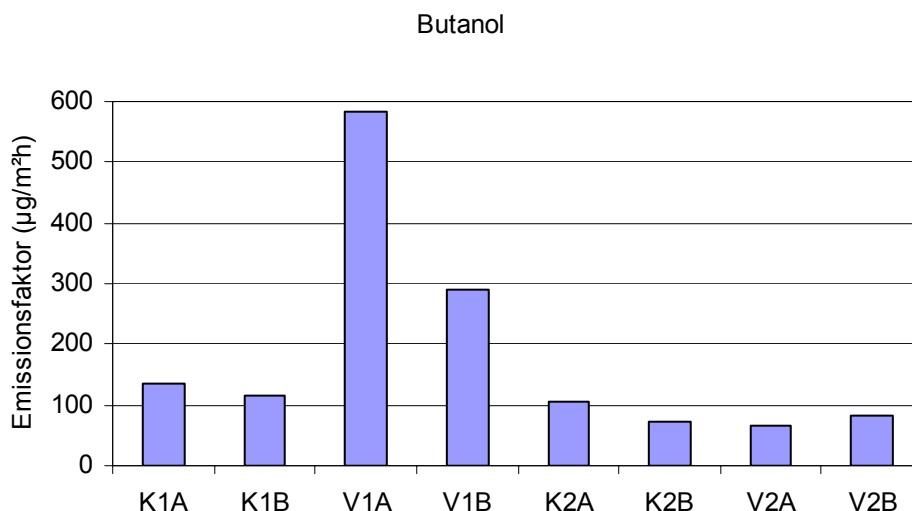
Figur 9.4. Den relativa fuktigheten 5 mm under betongens yta. Fyra av provkropparna har legat i det klimatstabila rummet under hela försöksperioden, medan de övriga fyra har varit placerade i värmelådan. Limningen skedde efter 24 dygn.

Emissioner

Efter 14 veckor utfördes emissionsmätningar på provkropparna. Dessa utfördes med så kallade dubbelprov, vilket innebär att två prover togs direkt efter varandra på vardera provkropp.

1-Butanol

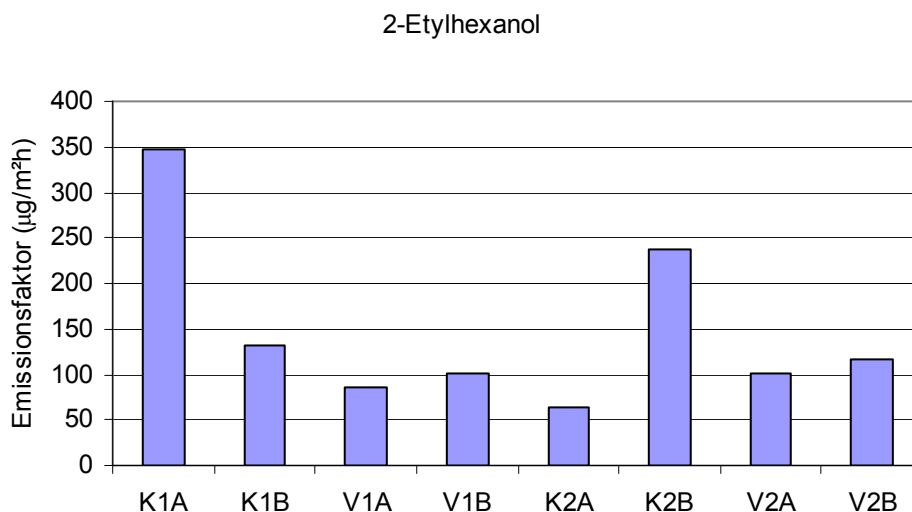
Inga stora skillnader av mängden avgivet 1-butanol kan påvisas från någon av provkropparna. De enda provkroppar som avger något högre värden är de två som är limmade med lim 1 och som har förvarats i värmelådan under försökstiden, enligt figur 9.5. Resultaten från samtliga provtagningar kan ses i bilaga 4.



Figur 9.5. Resultaten från emissionsmätningarna av 1-butanol. Staplarna visar ett medelvärde av gjorda dubbelprov.

2-Etylhexanol

Inte heller för 2-etylhexanolen kan några större skillnader mellan provkropparna påvisas. Provkropp K1A, det vill säga en av de två provkropparna med limtyp 1 som har placerats i det klimatstabila rummet, har något högre värden av emissioner än vad de övriga provkropparna har, men även en av de provkroppar med limtyp 2 som placerats i det klimatstabila rummet har en något förhöjd emissionsmängd. Ingen av de provkroppar som placerats i värmelådan under försökstiden visar några höjda halter, se figur 9.6.



Figur 9.6. Resultaten från emissionsmätningarna av 2-etylhexanol. Staplarna visar ett medelvärde av gjorda dubbelprov.

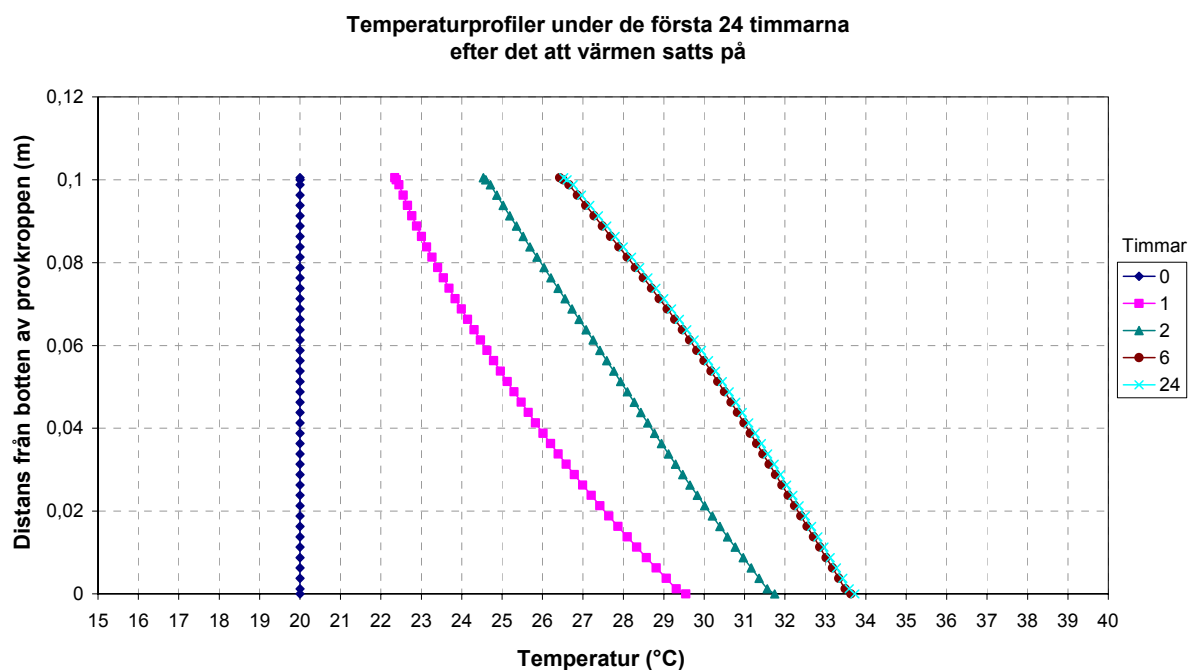
9.2 Simuleringsresultat

De simuleringar som har utförts gäller endast de provkroppar som varit placerade i värmelådan under försökstiden. Dessutom är det endast den relativa fuktigheten, temperaturen och alstringen av 1-butanol som är simulerad, det vill säga inte 2-etylhexanol. Simuleringar har även utförts för ett mer verkligt fall då randvillkoren och geometrin ändrades något för att bättre stämma överens med en vanlig golvkonstruktion.

Provkroppar

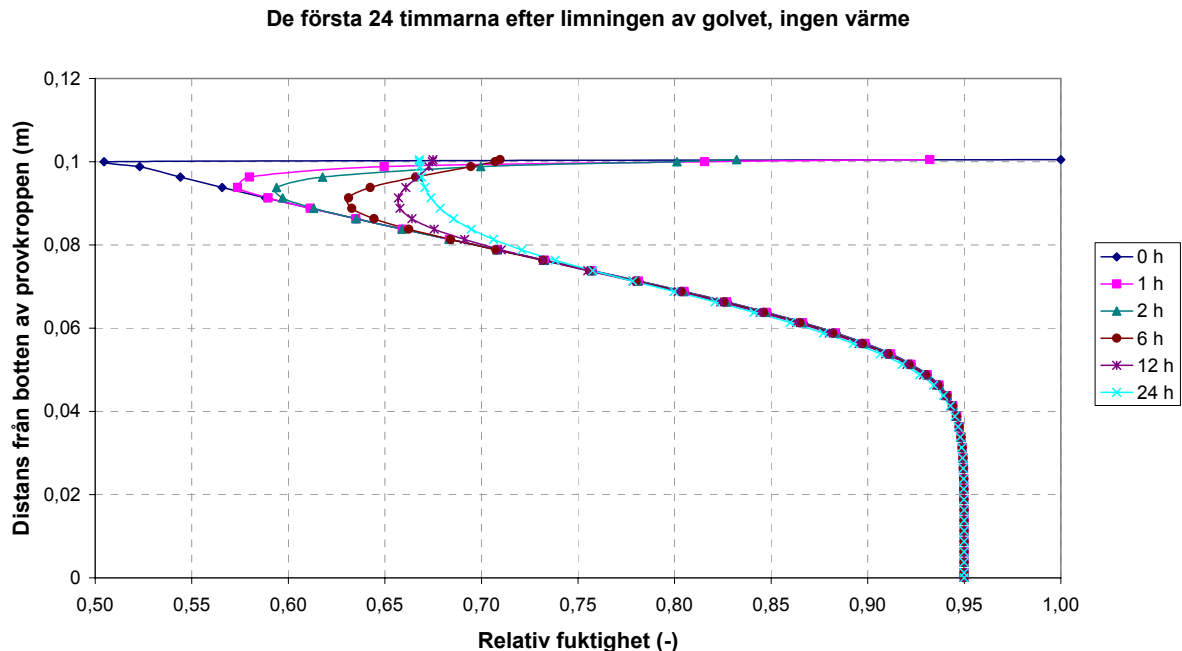
Vid simuleringarna antogs att temperaturen i värmelådan hade varit konstant 40 °C under hela försöksperioden, vilket inte riktigt stämde överens med mätningarna då temperaturen stegvis höjdes upp till temperaturen 40 °C och sedan varierades något under försöksperioden. Temperaturen i provkropparna då de placerades i värmelådan var 20 °C precis som luften ovanför provkropparna under studiens gång.

Simuleringarna gav med dessa indata en temperaturökning i provkropparna, med golvvärme, som efter 24 timmar stabiliserats enligt figur 9.7. Varför kurvan är något krökt beror på att värmeledningsförmågan λ beror av den relativa fuktigheten. Eftersom inte temperaturen i golvvärmen ändrades någon gång under simuleringarna, behöll provkropparna denna temperaturprofil genom hela försöket.



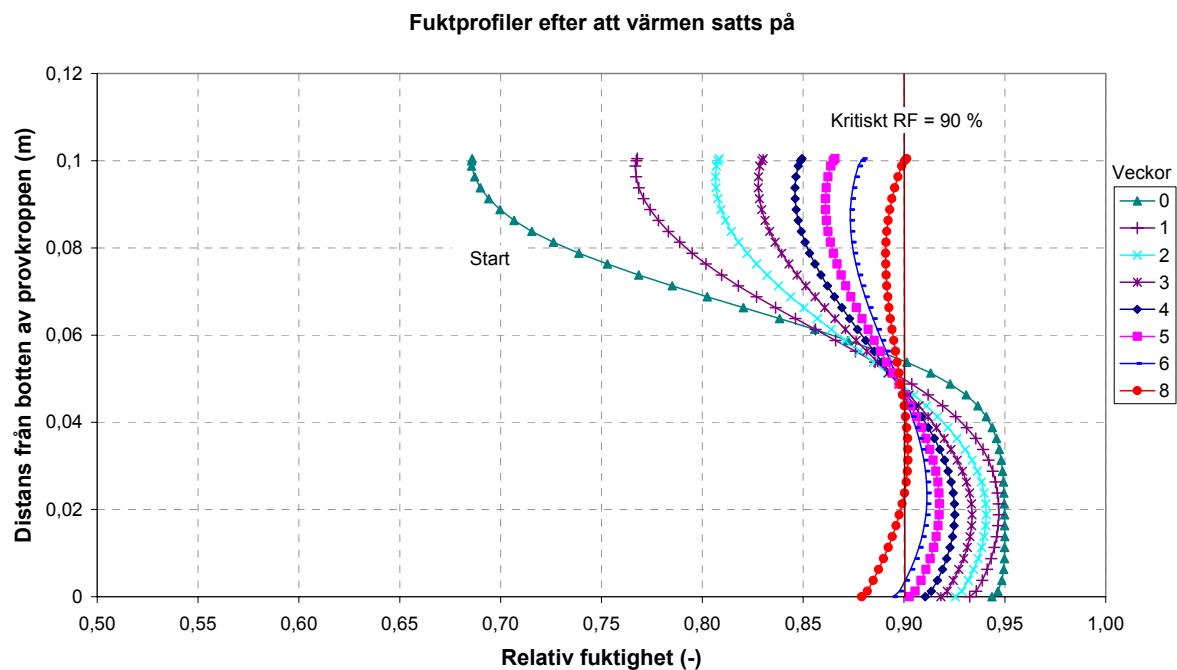
Figur 9.7. Simulerade temperaturprofiler i provkropparna under de första 24 timmarna som golvvärmen är igång.

Simuleringar gav en profil över hur den relativa fuktigheten i provkropparna och på ytan, förändrades efter limningen av mattan, se figur 9.8. Dels höjdes värdet på den relativa fuktigheten av den fukt som tillförts via limmet, men framförallt höjdes den av fukt som vandrade underifrån och upp genom provkroppen. Denna fuktvandring beror på utjämningen av fukten i betongen, då jämvikt vill ställa in sig så att hela profilen får en jämn fuktnivå.

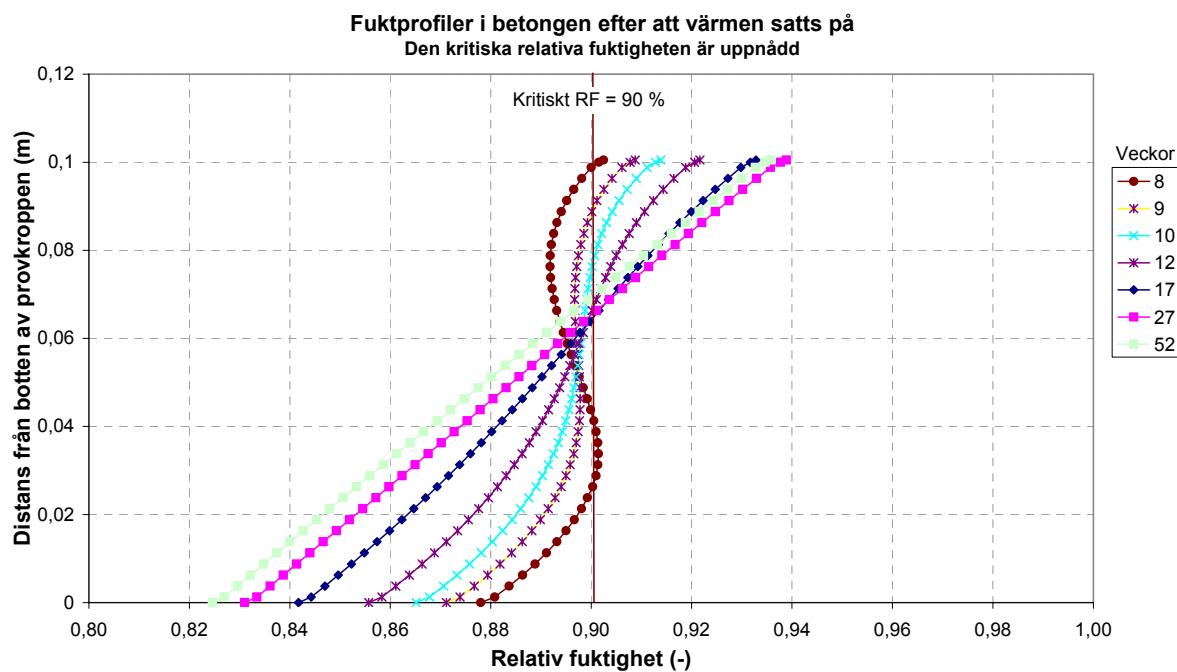


Figur 9.8. Förändringen av den relativa fuktigheten i provkropparna under de första 24 timmarna efter det att mattan limmats på. Under denna tid fanns ingen golvvärme påkopplad.

Ett dygn efter det att mattan limmats fast höjdes temperaturen till 40 °C under provkropparna. Profilen över den relativa fuktigheten ändrades då och åtta veckor efter limningen hade provkropparnas yta nått den kritiska nivån, för att kemiska reaktioner ska kunna starta, på 90 % relativ fuktighet, se figur 9.9. Detta på grund av att en ökad temperatur under provkroppen ger en högre ånghalt i botten och en ökande fukttransport uppåt genom konstruktionen. Den relativa fuktigheten på provkropparnas yta fortsatte sedan att öka. Fukthalten sjönk inte på provkropparnas yta förrän efter mellan 27 och 52 veckor, enligt figur 9.10.

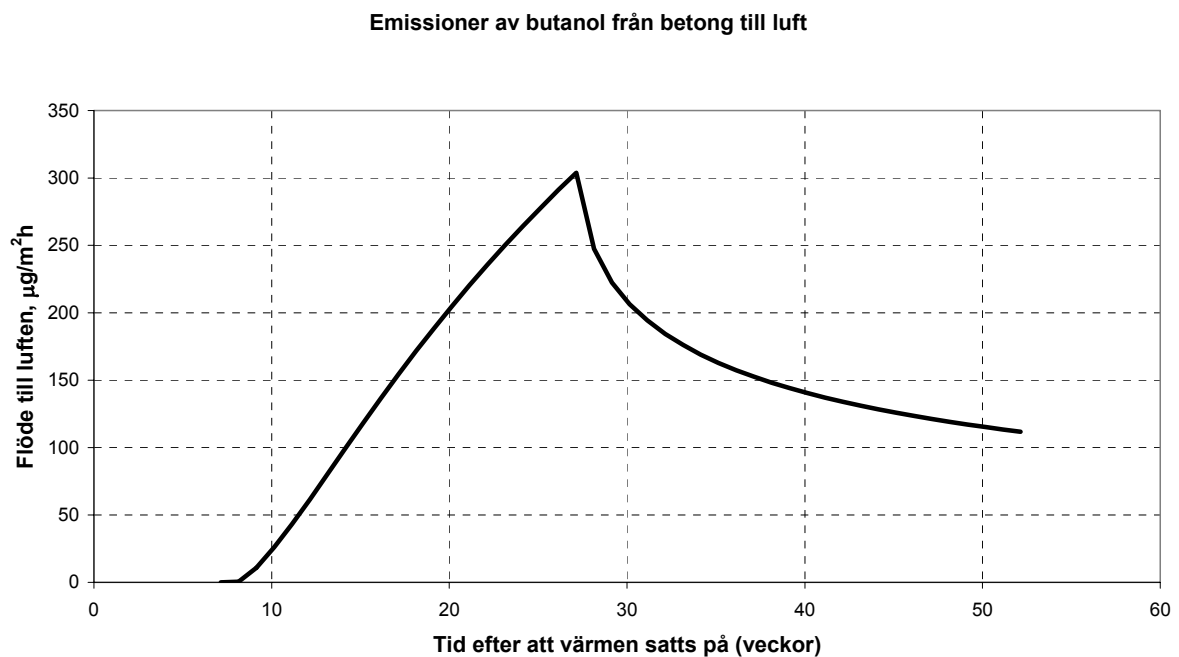


Figur 9.9. Profiler på den relativa fuktigheten i provkropparna efter det att golvvärmen satts på.



Figur 9.10. Simulerade profiler på den relativa fuktigheten i provkropparna fram till det att betongens yta börjar torka ut i stället för att fuktas upp.

Emissionsmängden från betongen ut i luften simulerades. Från det att reaktionen startade, åtta veckor efter limningen, tillfördes luften en ökande mängd emissioner, fram till vecka 27, då produktionen av 1-butanol slutade. Detta beror på att den mängd emissioner som kan uppkomma i limmet då är slut. Efter det började sedan emissionsmängderna att avta, se figur 9.11. Koncentrationen fortsatte dock att öka nedåt i konstruktionen, eftersom betongen strävar efter att ställa in sig i koncentrationsjämvikt. Detta på grund av att det sker en transport från ytan ner i betongen där den lagras. De mätningar som utförts gjordes efter 14 veckor, vilket innebär att produktionen av 1-butanol fortfarande pågår och att maxhalterna av emissioner ännu inte uppnåtts. Den spetsiga toppen på kurvan beror på att fukttransporten i betongen är så stor att reaktionen sker med väldigt stor intensitet. Om hastigheten på fukttransporten varit lägre hade kurvan inte fått ett så spetsigt utseende.

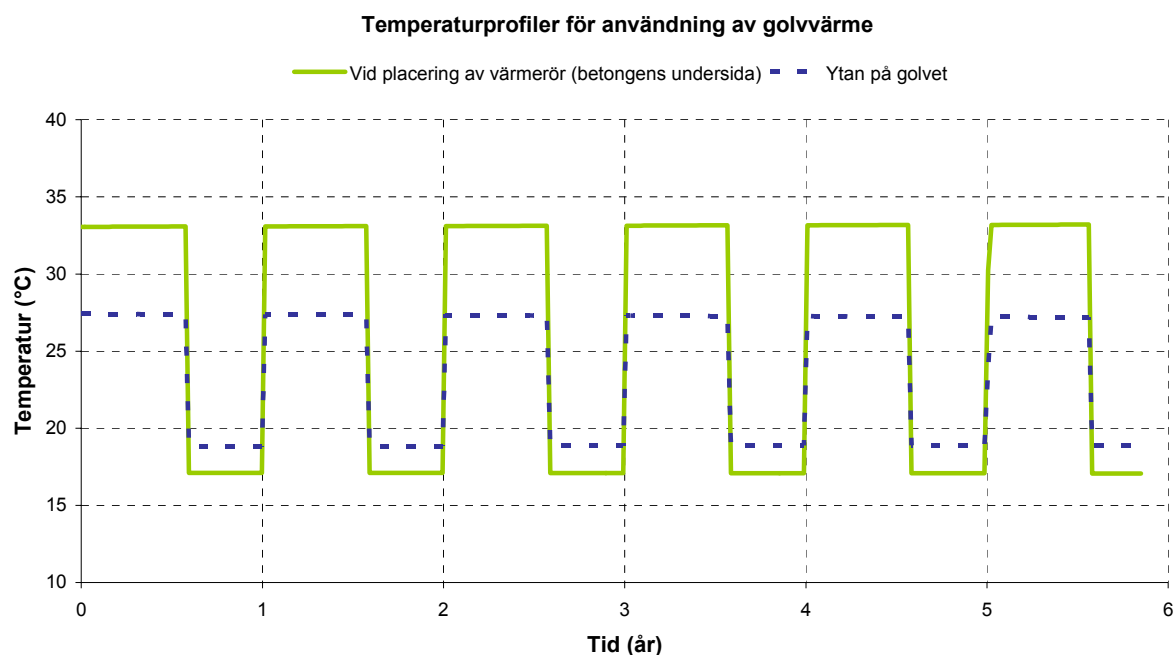


Figur 9.11. Simulerade emissionsflöden av 1-butanol från betongen ut i rumsluften.

Verkligt fall

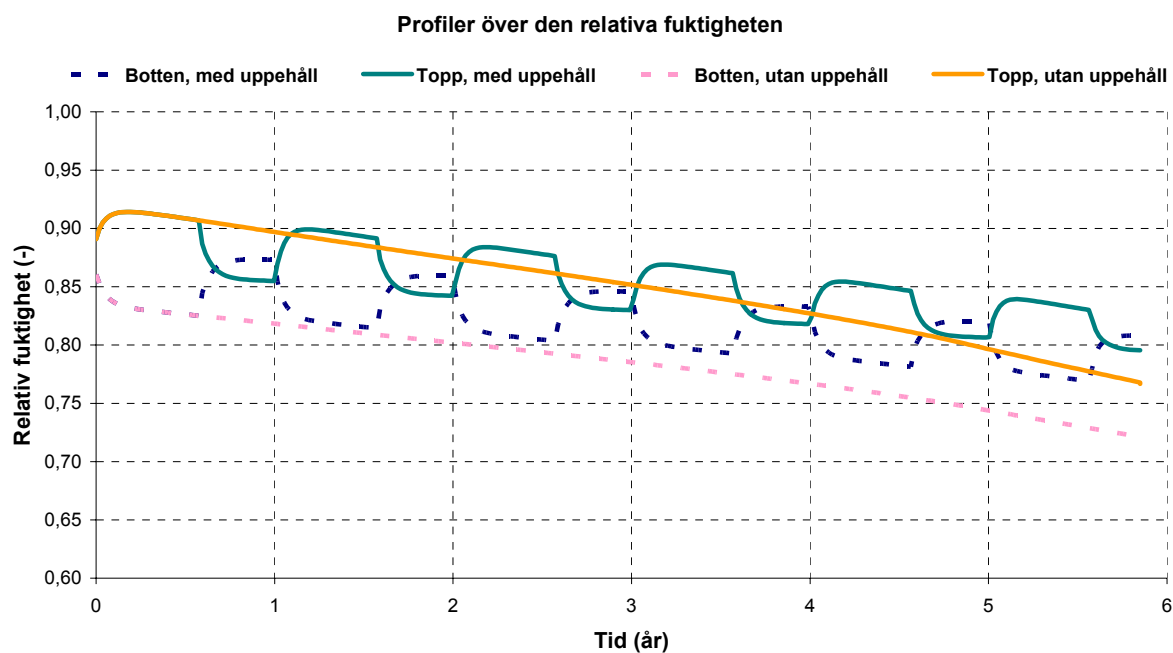
Eftersom golvvärme i normala fall inte används under hela året, utan vanligen under oktober till april, gjordes även simuleringar där temperaturen stängdes av efter sju månader för att efter ytterligare fem månader återigen sättas igång. Temperaturen i golvvärmerören antogs då vara 40 °C, under den delen av året då värmen var påslagen. Denna temperatur på 40 °C är antagen för luftburen värme och motsvarar ungefär 35 °C för ett vattenburet system.

Temperaturen på undersidan av provkroppen antogs ha en temperatur på 18 °C under sommarmånaderna, vilket ungefär motsvarar temperaturen under en platta på mark under denna period. Tjockleken på betongen ändrades vid dessa simuleringar också till 7 cm i stället för provkropparnas 10 cm. Denna ändring av tjockleken gjordes för att betonggolvet vanligen inte har en tjocklek större än 7 cm över golvvärmeslingorna. Temperaturen på ovan- och undersidan av provkroppen, under sex år, kan då ses i figur 9.12.



Figur 9.12. Simulering av temperaturen på provkropparnas över och undersida då golvvärmen antas användas under sju månader per år.

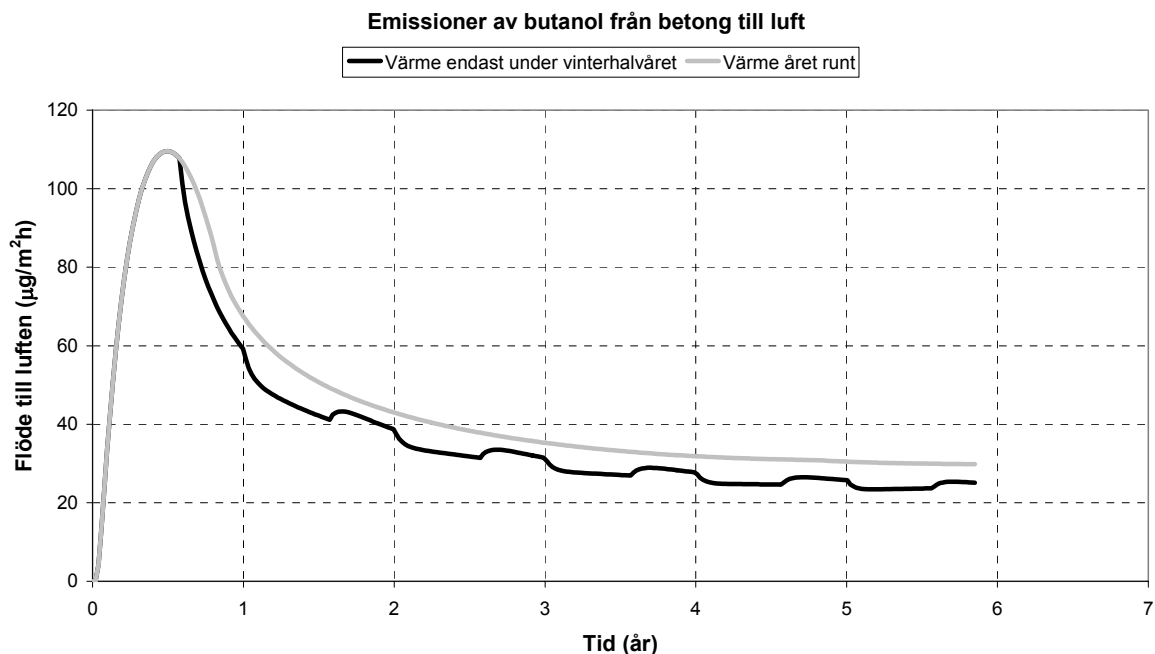
Även för den relativa fuktigheten gjordes simuleringar under mer realistiska förhållanden då golvvärmen användes och stängdes av under vissa delar av året. Detta visade att den relativa fuktigheten på ytan av provkropparna endast nådde över den kritiska nivån på 90 % under den första uppvärmningscykeln och låg på 90 % under första delen av den andra cykeln. Efter detta överskreds aldrig värdet även om den relativa fuktigheten varierade beroende på om golvvärmen var påkopplad eller inte, se figur 9.13. Om golvvärmen var inkopplad under hela året överskreds det kritiska värdet under en något längre period. Uttorkningen av betongen skedde dock fortare när golvvärmen var inkopplad under hela året jämfört med om den endast användes under uppvärmningssäsongen, vilket också var att förvänta.



Figur 9.13. Profiler över hur den relativa fuktigheten varierar, på över och undersidan av provkropparna, då golvvärme används under sju månader per år och under hela året.

Mängden emissioner i form av 1-butanol, som alstras och avges från golvet yta, har även simulerats för detta, mer verkliga fall. Butanolkurvan (figur 9.14) kommer då att se lite annorlunda ut. Beroende på temperaturvariationerna och därmed variationerna av den relativa fuktigheten kommer mängden producerad 1-butanol att variera under året. Dessutom kommer temperaturändringarna medföra att 1-butanolen vandrar ner i betongkonstruktionen under de delar av året då inte konstruktionen är uppvärmd. Denna transport ner i konstruktionen beror på att emissionerna följer med den fukt som vandrar nedåt när temperaturen sjunker i betongens underkant och temperaturprofilen ändras.

Simuleringen visar också att koncentrationen 1-butanol som avges från ytan är större om golvvärme används under hela året jämfört med om värmen endast är påslagen under uppvärmningssäsongen. Detta beror på att den mängd emissioner som följer med fukten ner genom konstruktionen, då undersidan blir kallare än ovansidan, lagras längre ned i betongen och avges därför inte lika snabbt till inomhusluften.



Figur 9.14. Simulerade emissionsmängder av 1-butanol till inomhusluften då golvvärme endast används sju månader per år och då det används året runt.

10 Analys

Under tidigare studier av Wengholt Johnsson (1995) har man kunnat konstatera att gränsen för ökade emissioner ligger vid ungefär 90 % relativ fuktighet. Att emissionsvärdena för de olika provkropparna inte skiljer sig uppseendeväckande mycket i denna undersökning kan därför bero på att provkropparna hade en relativ fuktighet under 90 % vid rekommenderat mätdjup men framförallt på att ytan hade fått torka ut till en relativ fuktighet på ca 60 %, 5 mm under betongens yta, vid limningen av mattorna. Denna uttorkning leder till att den relativa fuktigheten inte kan nå upp till högre värden mellan betongen och mattan än vad provkroppen hade på 40 % av djupet vid limningen av mattorna. Limning av mattor på betonggolv med högre relativ fuktighet kan innebära stora skillnader vad gäller emissionsalstring jämfört med vad som skett i denna studie, både vad gäller mängden emissioner från olika sorters lim men också mängden beroende på om konstruktionen värms upp av golvvärme eller inte.

Alla material och alla konstruktioner ger ifrån sig en större eller mindre mängd emissioner. Den minsta mängd som ett material ger ifrån sig då det inte är påverkat av sin omgivning, kallas materialets egenemissioner. En viss mängd emissioner har därför mätts upp från samtliga provkroppar i studien.

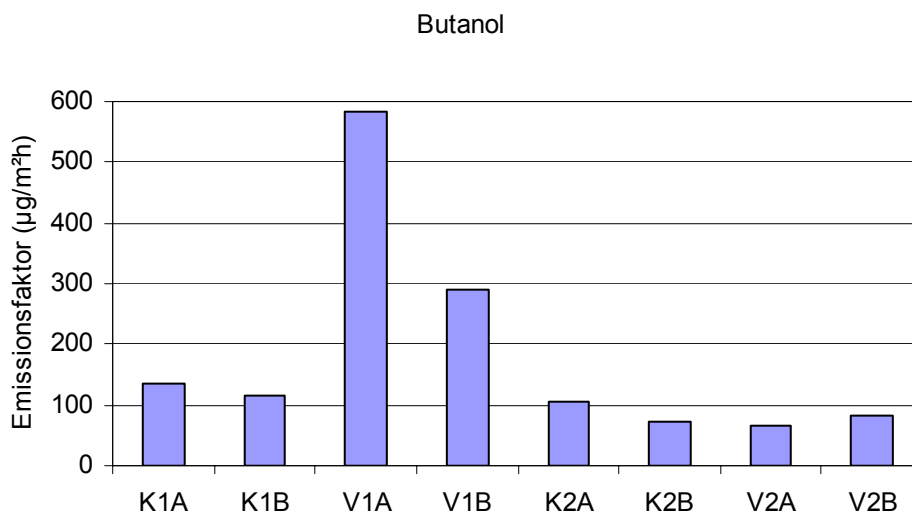
1-Butanol

Undersökningarna visar tendenser på att de provkroppar som varit limmade med det traditionella limmet och haft golvvärme under försöksperioden, avger högre halter 1-butanol-emissioner än vad de provkroppar gör som har limmats med samma lim men placerats i det klimatstabila rummet under försöksperioden, se figur 10.1.

Förmodligen beror skillnaden i emissionsmängd mellan provkropp V1A och V1B på att den relativa fuktigheten under mattan var ca 100 % efter placeringen i värmelådan på den förstnämnda medan den var ca 96 % i den andra. Ingen av de provkroppar som varit placerade i det klimatstabila rummet under försöksperioden har haft en relativ fuktighet över 91 % mellan betongen och mattan under försöksperioden, se bilaga 3. Skillnaderna på den relativa fuktigheten mellan olika provkroppar, som förvarats på samma ställe under försökstiden, kan bero på att små variationer förekommer i plaströrens placering i höjddled. Detta eftersom all montering i provkropparna är gjorda för hand. Någon millimeters skillnad av mätdjupet kan orsaka någon procents skillnad av den relativa fuktigheten. Skillnaderna kan även bero på att mätarna har en felmarginal på ± 3 % vid värden på den relativa fuktigheten över 90 %.

De provkroppar som har varit limmade med det andra, alkalisäkrare och därför mindre emissionsbenägna limmet avger inte några höga halter av emissioner i form av 1-butanol, varken från de provkroppar som placerats i det klimatstabila rummet eller de med golvvärme. Några tydliga skillnader kan inte heller urskiljas mellan de provkroppar som varit limmade med olika lim men alla varit placerade i det klimatstabila rummet. Små antydningar finns dock att provkropparna i det klimatstabila rummet vilka är limmade med lim 1, det traditionella limmet, avger något högre halter emissioner än vad de provkroppar med lim 2 gör, vilket också var att förvänta.

Sammanfattningsvis kan sägas att mängden emissioner i form av 1-butanol från de provkroppar som varit förvarade i värmelådan och varit limmade med det traditionella limmet under försöksperioden är mellan 2,5-5 gånger högre än från övriga provkroppar.



Figur 10.1. Resultaten från emissionsmätningarna av 1-butanol.

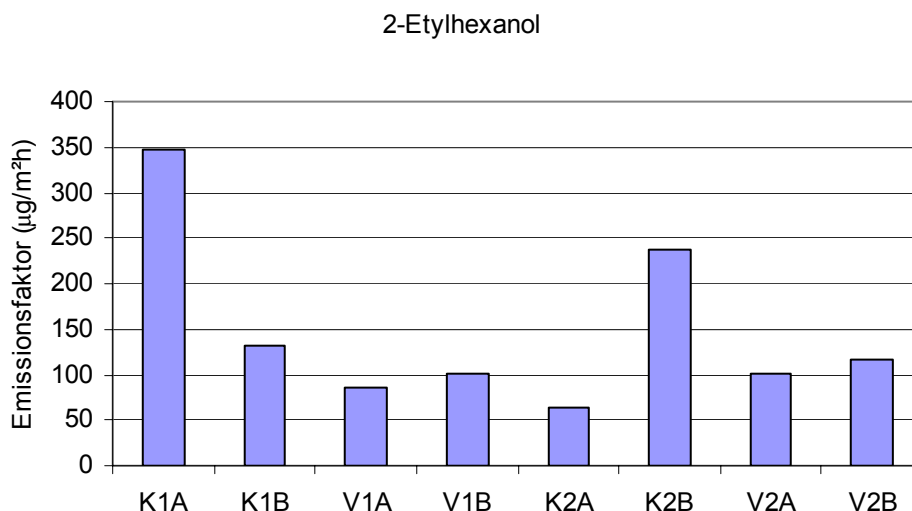
Eftersom det finns satta gränsvärden i arbetslokaler för 1-butanol på 15 ppm, vilket motsvarar ungefär 45 mg/m^3 (enligt Docent Olle Ramnäs), jämfördes de värden som mätts upp under försöken med det gränsvärdet. För att göra jämförelsen utfördes beräkningar, som visas i bilaga 5. Det värde som då räknades fram för den högsta uppmätta emissionsmängden av 1-butanol var på $0,48 \text{ mg/m}^3$, vilket är betydligt lägre än gränsvärdet på 45 mg/m^3 . De värden som mätts under studien är något lägre än vad tidigare undersökningar av Wengholt Johnsson (1995) och Sjöberg (2001) har visat. Att mätningarna blir lägre beror på att betongen fått självtorka utan byggplast i denna undersökning, vilket den inte gjort under tidigare studier.

2-Etylhexanol

Inte heller här kan några stora mängder emissioner påvisas. De två provkroppar som trots detta har något förhöjda halter har båda varit placerade i det klimatstabila rummet under hela försökstiden. Att det blivit förhöjda halter på de provkroppar som limmats med det traditionella limmet, var att förvänta, men att en av provkropparna med lim 2 har förhöjda emissionshalter förvånande, då detta lim inte skulle alstra några höjda halter emissioner av 2-etylhexanol, se figur 10.2. Skillnaderna mellan provkropp K1A och K1B kan bero på att mängden lim skiljer något. Den förstnämnda är limmad med något större mängd än den andra. Vad det gäller den relativa fuktigheten skiljer det endast 1 % mellan de båda provkropparna, men det är den procenten som gör att provkropp K1A kommer över 90 % medan provkropp K1B inte gör det under försöksperioden, se bilaga 3.

Sammanfattningsvis kan sägas att framförallt en av de provkroppar som förvarats i det klimatstabila rummet under försökstiden och som har varit limmad med det traditionella limmet har ungefär 3-4 gånger högre emissionsfaktor än de flesta övriga provkroppar. Denna skillnad gäller för såväl de provkroppar som förvarats i värmelådan som för de i det klimatstabila rummet och för båda limsorterna.

För 2-etylhexanol finns inga satta gränsvärden i Sverige. Däremot kan jämförelser göras med resultat från tidigare undersökningar. Dessa jämförelser visar att de uppmätta värdena i denna studie ligger på samma nivå som i tidigare studier gjorda av Wengholt Johnsson (1995) och Sjöberg (2001).



Figur 10.2. Resultaten från emissionsmätningarna av 2-etylhexanol.

Att det blir skillnader på mängden emissioner som avgår från provkroppar med samma sorts lim och som har förvarats på samma ställe kan bero på skillnader i provkropparnas relativa fuktighet och temperatur, men också på att mängden lim inte varit exakt densamma på samtliga provkroppar.

Om förhållandena varit sådana att större mängder emissioner hade bildats under mattan skulle förmodligen tydligare skillnader kunnat ses både mellan de båda limsorterna och mellan den varmare och den kallare konstruktionen. Det skulle då ha varit lättare att se hur golvvärme påverkar mängden uppkomna emissioner av både 1-butanol och 2-etylhexanol.

Simuleringarna ger att den relativa fuktigheten mellan betongen och mattan inte överskrider det kritiska värdet på 90 % förrän ungefär åtta veckor efter det att golvvärmen satts igång. Vid mätningarna överskreds dessa värden redan då provkropparna placerades i värmelådan. Skillnaderna mellan simuleringarna och mätningarna beror förmodligen på att betongen i provkropparna torkat ut mycket mer i simuleringsfallet än vad den gjorde i verkligheten. Jämförelser mellan simuleringarna och mätningarna stämmer därför inte riktigt överens tidsmässigt, men fukt beteendet i övrigt stämmer.

Simuleringarna kunde ge indikationer om vilken relativ fuktighet som fanns på olika djup i hela provkroppen, något som inte kunde fastställas med hjälp av mätningarna. Profiler kunde då fås fram hur fukten fördelar sig i betongen om golvvärmen inte användes under hela året, något som i sin tur visade att mängden emissioner från ytan varierade med fukthalten vid ytan. Då betongens underkant blev kallare än dess överkant, vid avstängningen av golvvärmen, började fukt vandra nedåt genom konstruktionen och tog då med sig de emissioner som var lagrade i vattnet. Den totala koncentrationen 1-butanol som avgick från golvytan var därför lägre då golvvärme endast användes under delar av året enligt figur 9.14.

11 Slutsatser

Användande av golvvärme i betonggolv med limmad PVC-matta kan leda till förhöjda halter emissioner av 1-butanol från golvet till inomhusluften jämfört med om inte golvvärme används. Orsaken är att värmen på betongens undersida startar en värmetransport genom konstruktionen, något som i sin tur ger fuktvandringar från betongens undersida till dess översida. Den relativa fuktigheten mellan betongen och mattan kan i värsta fall bli så hög att kemiska reaktioner startar i limmet, vilket innebär att 1-butanol bildas och avges som ånga till inomhusluften.

Undersökningen har också visat att olika lim skiljer sig åt vad gäller uppkomsten av emissioner. Nya alkalisäkrare lim ger inte, som traditionella lim, några avsevärt höjda halter av emissioner, varken vid användning av golvvärme eller inte.

De gränsvärden som Arbetsmiljöverket satt upp, på 15 ppm för 1-butanol, överskrids inte av något av de två testade limsorterna, varken med eller utan användning av golvvärme.

Utförda simuleringar visar att fukthalten mellan betong och matta inte är så hög, att kemiska emissioner sätter igång, förrän några veckor efter limning av matta och igångsättning av golvvärme.

Simuleringarna visar också att då den kemiska reaktionen väl sätter igång ökar emissinsmängden från betongen till luften linjärt ända tills det att 1-butanolen i limmet tagit slut. Efter det sjunker den avgivna nivån ganska snabbt i början för att sedan plana ut och lägga sig på en sakta sjunkande nivå, vilket innebär att även om mängden emissioner, som kan tillverkas mellan limmet och mattan är slut, upphör inte avgivandet av emissioner från konstruktionen ut i luften. Detta på grund av att den mängd emissioner som lagrats i betongen nu sakta börjar avges till omgivningen.

Simuleringar gjordes även för golv där golvvärme endast användes under uppvärmningssäsongen, det vill säga mellan oktober och april. Resultaten visar att värmen genom konstruktionen snabbt ställer in sig, medan den relativa fuktigheten tar lång tid på sig. Simuleringarna visar också att den relativa fuktigheten sjunker snabbare i konstruktionen då golvvärme används under hela året jämfört med användning endast under delar av året. Till följd av att betongens underkant blir kallare än dess överkant, då golvvärmen stängs av, vandrar fukt nedåt genom konstruktionen. Fukten tar då med sig de emissioner som är lagrade i vattnet. På grund av detta avges en högre halt kemiska emissioner till omgivningen om golvvärme används året runt än om den endast används under uppvärmningssäsongen. Koncentrationen till inomhusluften är dock lägst om inte golvvärme används alls.

12 Vidare studier

För att få en bredare och säkrare bild över mängden emissioner som uppkommer vid användning av golvvärme bör fler och utförligare försök utföras. Undersökningar av hur emissionerna påverkas av skillnader i den relativa fuktigheten vid limningstillfället bör göras. Undersökningar bör också göras både vad det gäller olika sorters lim och mattor, men också vad som händer och hur emissionerna påverkas vid användandet av avjämningsmassor, alkali- och fuktspärrear vid olika temperaturnivåer på golvvärmen. Det skulle även vara intressant att se om golvvärmeslingornas placering i konstruktionen påverkar mängden emissioner som bildas.

När det gäller datorsimuleringar skulle fler materialdata behöva tas fram. I dagsläget saknas relevant information om en mängd material vilket gör att programmen blir begränsade och att osäkerheten blir stor. Skulle däremot korrekta parametrar för olika material finnas tillgängligt och programmen för simuleringar vara lättåtkomliga och enkla att använda kan undersökningar lätt utföras innan byggstart. Detta torde då kunna leda till att många problem med kemiska emissioner skulle kunna undvikas.

13 Referensförteckning

Afshari, A, 2000. *Determination of VOC Emissions from Surface Coatings by Environmental Test Chamber Measurements*. Document D30:1995, Institutionen för installationsteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

AB Svensk byggtjänst, 1998. *HusAMA 98*. Nordstedts Tryckeri AB, Stockholm.

Björk, F, 1996. *Utvecklingsmöjligheter för plaster i byggtillämpningar*. Institutionen för byggnader och installationer, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm.

Björk, F, och Eriksson, C-A, 2000. *Sjuk av att vara inne?* Graphium Print & Distribution AB, Bromma.

CEN 1997. *EN ISO 1264: Flooring heating- Systems and Components*. European Committee for Standardization, CEN.

Golvbranschens riksorganisation, 2004. *Mätning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner, branschstandard; version 2*.

Hämtad från <http://www.golvbranschen.se/upl.PDF> 14-10-04.

Gustafsson, H, 1990. *Kemisk emission från byggnadsmaterial – beskrivning av skadefall, mätteknik och åtgärder*. SP-rapport 1990:25, Kemisk analys, Borås.

IBPT. *International Building Physics Toolbox*. www.ibpt.org

Karlsson, H, 2004. *En numerisk modell för dynamisk simulering av flyktiga organiska kolväten i inomhusmiljön*. Publikation E-04:01, Institutionen för byggnadsteknologi, Byggnadsfysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Konsumentverket, Boverket, Energimyndigheten, 2001. *Grundtips för golvvärme: isolering & fönster, golvmaterial, inomhustemperatur*. Konsumentverket, Stockholm.

Nevander, L E och Elmarsson, B, 1994. *Fukt handbok – praktik och teori*. AB Svensk Byggtjänst, Svenskt Tryck AB, Stockholm

Petersson, B-Å, 2001. *Tillämpad byggnadsfysik*. Studentlitteratur, Lund.

Ramnäs, O, 2004-2005. *Personlig kommunikation med Docent Olle Ramnäs*, avdelningen för kemisk miljövetenskap, Chalmers.

Sasic Kalagasidis, A, 2004. *HAM-Tools – An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics*. Publication P04:1 Department of Building Technology, Building Physics Division, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Sjöberg, A, 1998. *Transportprocesser och reaktioner i belagda betonggolv – olika faktorerers inverkan på emission från golvkonstruktioner*. Publikation P-98:13, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Sjöberg, A, 2001. *Egenskaper och funktion hos fukt- och alkalispärrar på betong*. Publikation P-01:5, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Sjöberg, A, 2001. *Sekundära emissioner från betonggolv med limmade golvmaterial – effekter av alkalisk hydrolys och deponerade nedbrytningsprodukter*. Publikation P-01:4, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Sjöberg, A och Wengholt Johnsson, H, 1999. *Fukt och emissionsförhållanden vid limning av golvmaterial på betong*. Publikation P-99:1, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Wengholt Johnsson, H, 1995. *Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betingkvalitet och fuktbelastning*. Publikation P-95:4, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Åsbrink, L, 2004-2005. *Personlig kommunikation med Fil. mag Linda Åsbrink*, analytisk kemist på PP Polymer AB, Vällingby.

14 Litteraturförteckning

Bornehag, C-G, 2004. *Innemiljö och Hälsa*, Bygg & Teknik 5/04.

Burström, P-G, 2001. *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur, Lund.

Chalmers Lindholmen, 2000. *Skrivhandledning*. Institutionen för fackspråk och kommunikation, Chalmers Lindholmen, Göteborg.

Gustafsson, H, 1996. *Golvmaterial på olika typer av fuktiga betongunderlag – Översikt och kommentarer till undersökningar med inriktning på kemisk nedbrytning och emission*. SP-rapport 1996:25, Kemisk analys, Borås.

Hagentoft, C-E, 2001. *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur, Lund.

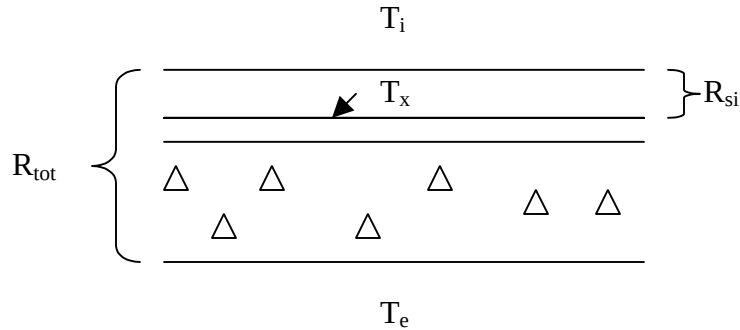
Wiglusz, Sitko, Nikel, Jarnuszkiewicz, Igielska, 2002. *The effect of temperature on the emission of formaldehyde and volatile organic compounds (VOCs) from laminate flooring – case study*. Building and Environment 37:41-44

Bilaga 1

Temperaturberäkningar för värmelådan

- Maxtemperatur 29 °C på provkropparnas yta

Temperaturberäkning för värmelådan



$$q = \frac{(T_i - T_e)}{R_{TOT}} = \frac{(T_i - T_x)}{R_{si}} \Rightarrow T_x = T_i - \frac{R_{si}}{R_{TOT}}(T_i - T_e) \quad (^\circ\text{C})$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{matta} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,002}{0,16} = 0,0125 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{btg} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,1}{1,7} = 0,0588 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{TOT} = R_{si} + R_{se} + R_{matta} + R_{btg} = 0,13 + 0,0125 + 0,0588 + 0,04 = 0,2413 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Kravtemperatur i värmelådan för att uppnå 29 °C på provkropparnas yta.

$$T_x = 29 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_e = \frac{(T_x - T_i) \cdot R_{TOT}}{R_{si}} + T_i = \frac{(29 - 20) \cdot 0,2413}{0,13} + 20 = 36,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

I denna beräkning har standardfall antagits, men då övergångsmotståndet R_{si} i detta fall inte är precis som i ett standarfall, stämmer inte beräkningen exakt med verkligheten.

Bilaga 2

Indata till simuleringsprogrammet

- HAM-VOC simuleringar

Indata för HAM-VOC simuleringar

Diffusionen av butanol i betong är beräknad med:

$$K_{int}(\phi, S) \cdot \frac{\partial c_{int}(x, t)}{\partial t} = D_{BuOH}(\phi) \cdot \frac{\partial^2 c_{int}(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial q_{BuOH}(\phi)}{\partial x} \quad (1)$$

där K_{int} (-) är en linjär sorptionsisoterm gällande depån i det inre av ett material, D (m²/s) är diffusionskoefficienten för butanol i betong, $c_{int}(x, t)$ (kg_{voc}/m³_{air}) är gasfasens koncentration av butanol i betongen, x (m) är avståndskordinaten mätt från ytan av materialet, och q_{BuOH} (kg/m²s) är hastigheten för tillverkningen av butanol.

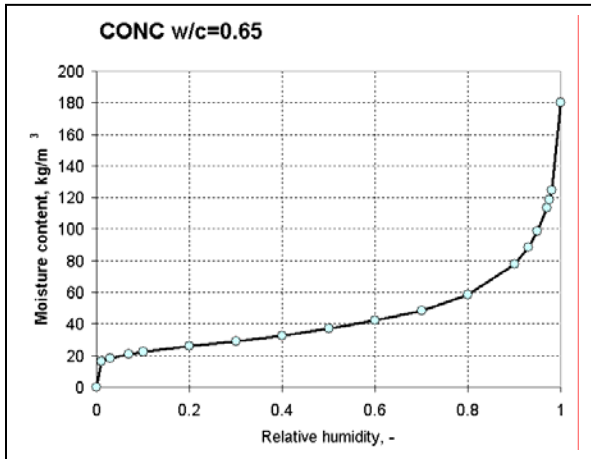
Den inre sorptionsisotermen representerar en klumpsumma av mängden butanol som kan lagras i betong. Enligt Sjöberg (2001), är K_{int} definierad som:

$$K_{int}(\phi, S) = \left(\varepsilon - \frac{w(\phi)}{\rho_w} \right) + \left(S \cdot \frac{w(\phi)}{\rho_w} \frac{1}{c_{BuOH, sat}(T)} \right) \quad (2)$$

där ε (-) är porositeten för betong, $w(\phi)$ (kg/m³_{mtl}) är fuktighalten i betong, ρ_w är densiteten för vatten, S (kg/m³_{water}) är lösligheten för butanol i vatten, $c_{BuOH, sat}$ (kg/m³_{air}) är mättnadskoncentrationen för butanol i luft, T (°C) är temperaturen.

Termen på höger sida av ekvation 2 beskriver lagring i luft i porerna respektive lagring i vattnet i porerna.

För en vald betongtyp med vattencementtalet 0.65, definieras funktionen $w(\phi)$ som en sorptionsisoterm, vilken syns i figur B2.1.



Figur B2.1 Sorptionsisoterm för betong med vct=0.65.

Den inre sorptionsisotermen beror starkt av värdena på lösligheten för butanol i vatten. Två värden på S är analyserade, Tabell B2.1 (Sjöberg, 2001), och den inre sorptionsisotermen för båda är givna i figur B2.2.

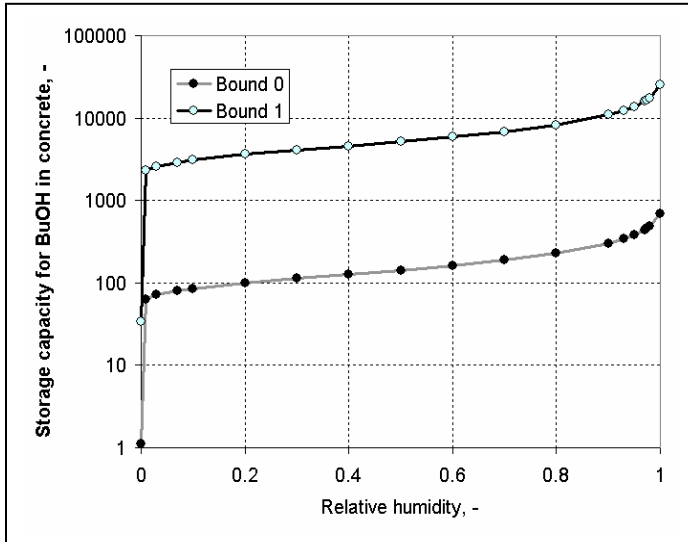
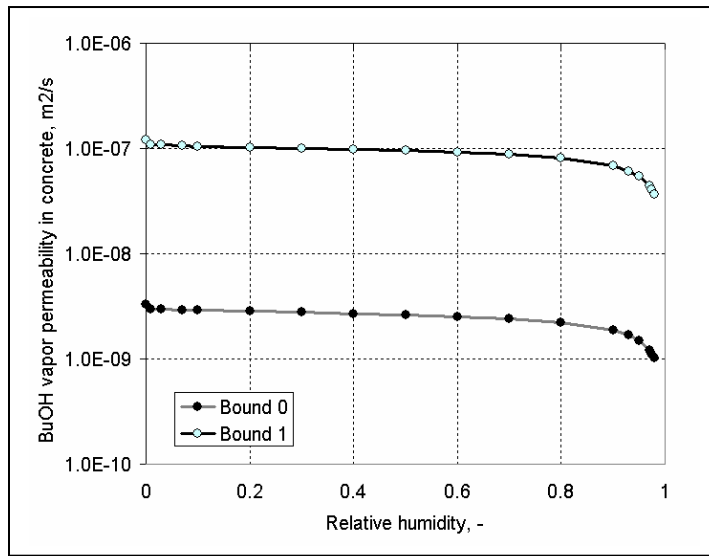


Figure B2.2. Den inre sorptionsisotermen för två olika lösningar.

Butanols ångpermeabilitet i betong, δ_{BuOH} , är definierad genom följande förhållande:

$$\delta_{BuOH}(\phi) = \frac{D_{BuOH}(\phi)}{K_{int}(\phi, S)}$$

I Sjöberg (2001), är δ_{BuOH} definierad för $w=100 \text{ kg/m}^3$ och för två möjliga bindningsmodeller, Tabell B2.1. Antagandet att ångflödet av butanol genom betong är proportionellt mot mängden tillgängliga luftporer, beskrivs med hjälp av relationen $\varepsilon - w(\phi)/\rho_w$, där ångdiffusionskoefficienten $\delta_{BuOH}(\phi)$ är modellerad i figur B2.3. Notera att $\delta_{BuOH}(w=100\text{kg/m}^3)$ matchar värdet från Sjöberg (2001).



Figur B2.3. Ångpermeabilitet för butanol i betong.

Mängden producerad butanol q_{BuOH} startar från noll. Efter det att det kritiska värdet på den relative fuktigheten $\phi_{crit}=0.9$ är uppnått, ökar mängden linjärt till ett maximalt värde $q_{BuOH,max}$ då $\phi=1$:

$$q_{BuOH} = \begin{cases} \frac{q_{BuOH,max}}{1-\phi_{crit}} \cdot (\phi - \phi_{crit}), & \phi \geq \phi_{crit} \\ 0, & \phi < \phi_{crit} \end{cases}$$

Tabell B2.1

Mängd	Enhet	Bound 0	Bound 1
$q_{BuOH,max}$	kg/m²s	2.6E-9	7.3E-9
S	kg/m³	0.077	2.8
$\delta_{BuOH}(\phi=0.65)$	m²/s	2.5E-9	93E-9

Den här källan är endast aktiv i betongen närmast limmet.

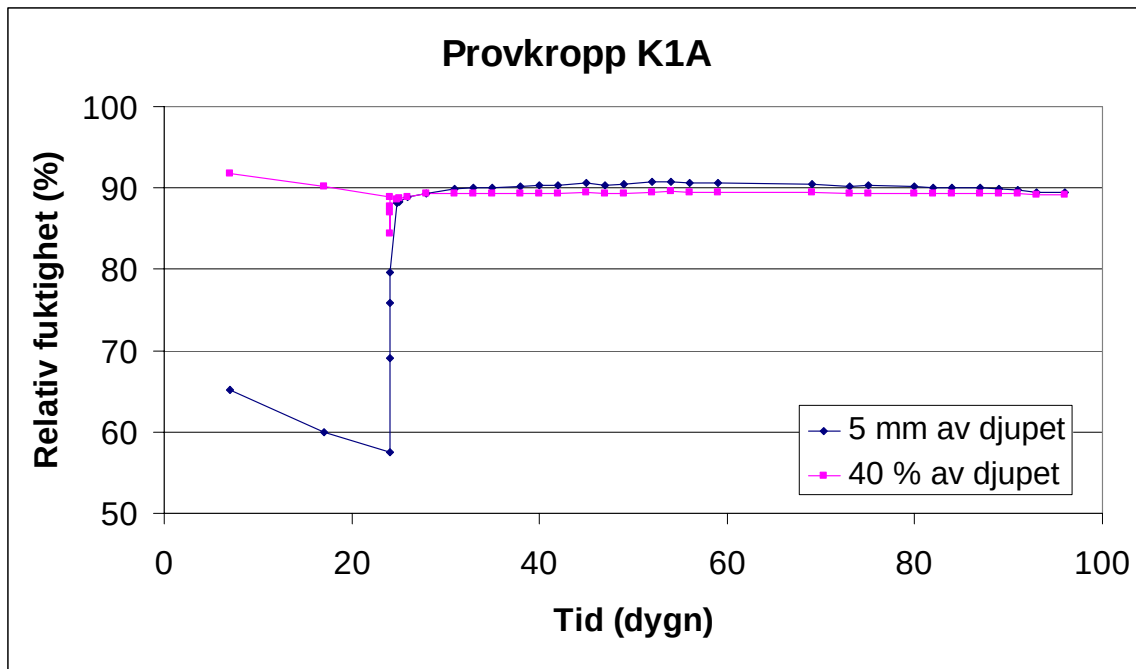
Bilaga 3

Resultat från analys av den relativa fuktigheten i betongkropparna under försöksperioden

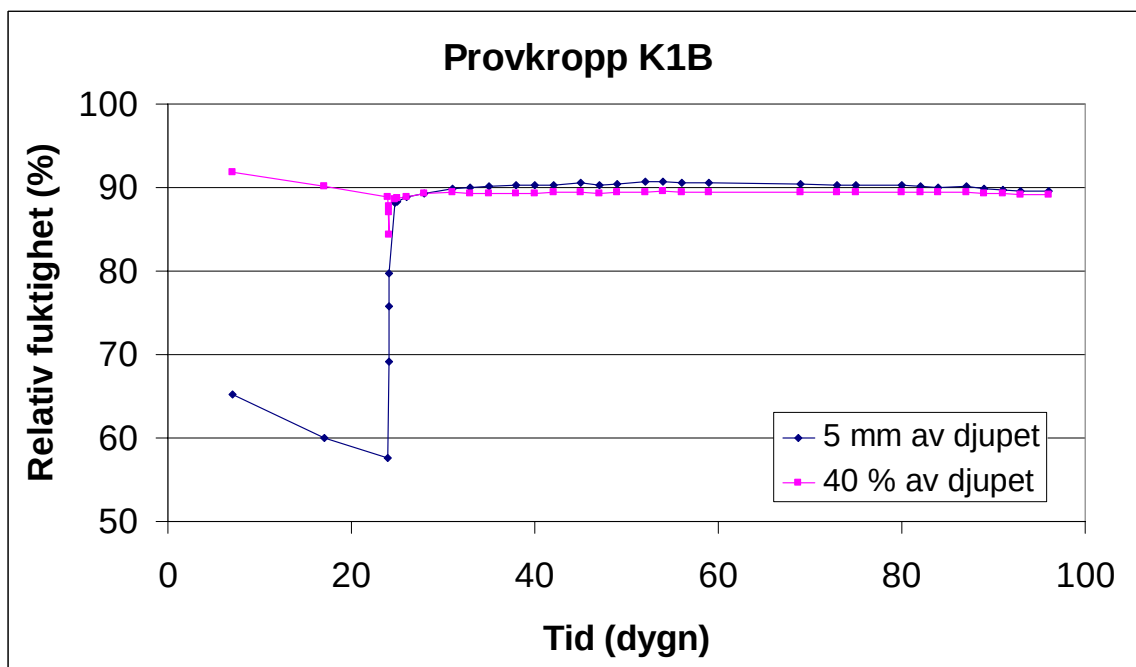
- Provkropp **K1A**, på 5 mm och 40 % av djupet, uppmätta värden.
- Provkropp **K1B**, på 5 mm och 40 % av djupet, uppmätta värden.
- Provkropp **K2A**, på 5 mm och 40 % av djupet, uppmätta värden.
- Provkropp **K2B**, på 5 mm och 40 % av djupet, uppmätta värden.
- Provkropp **V1A**, på 5 mm och 40 % av djupet
- Provkropp **V1B**, på 5 mm och 40 % av djupet
- Provkropp **V2A**, på 5 mm och 40 % av djupet
- Provkropp **V2B**, på 5 mm och 40 % av djupet

Värdena för de provkroppar som varit placerade i värmelådan är uppmätta under de första 25 dygna (innan omplaceringen till värmelådan), efter det är värdena framräknade med hjälp av formeln:

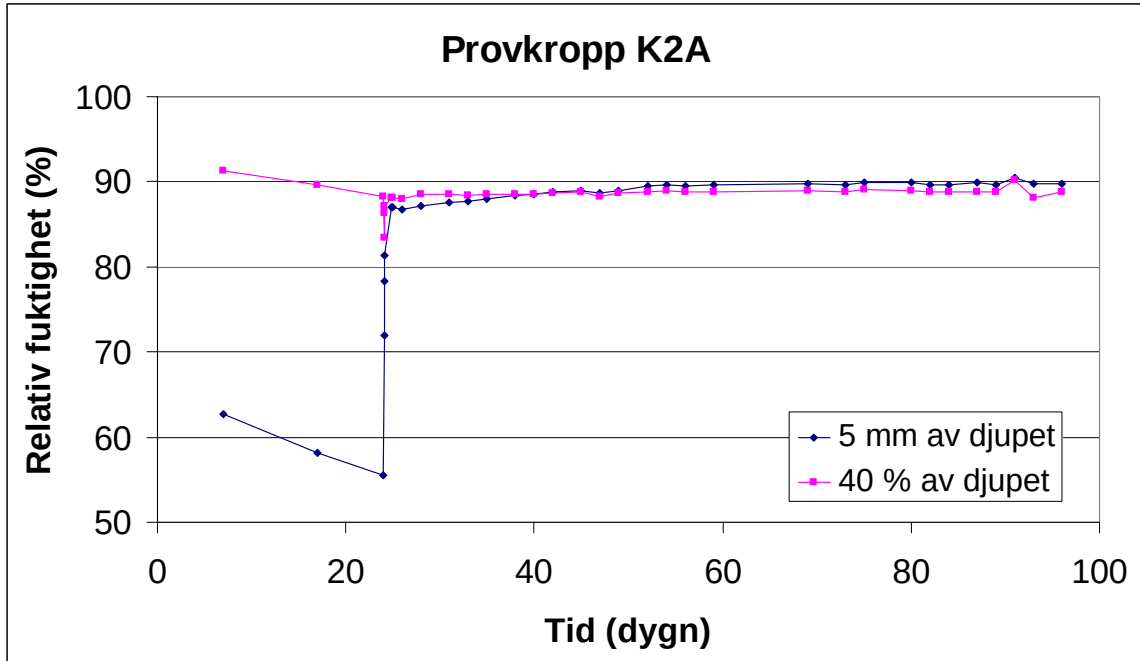
$$\phi_{\text{verklig}} = \frac{\phi_{\text{uppmätt}} \cdot \nu(T_{\text{uppmätt}})}{\nu(T_{\text{simulerad}})} \quad (\%)$$



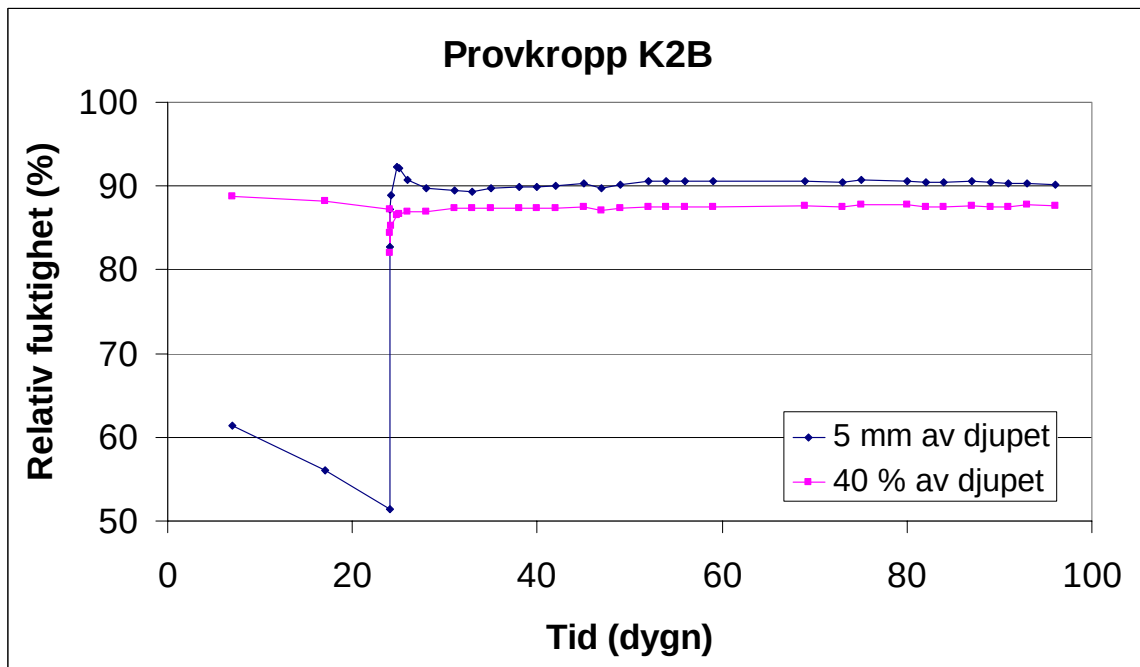
Figur B3.1. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



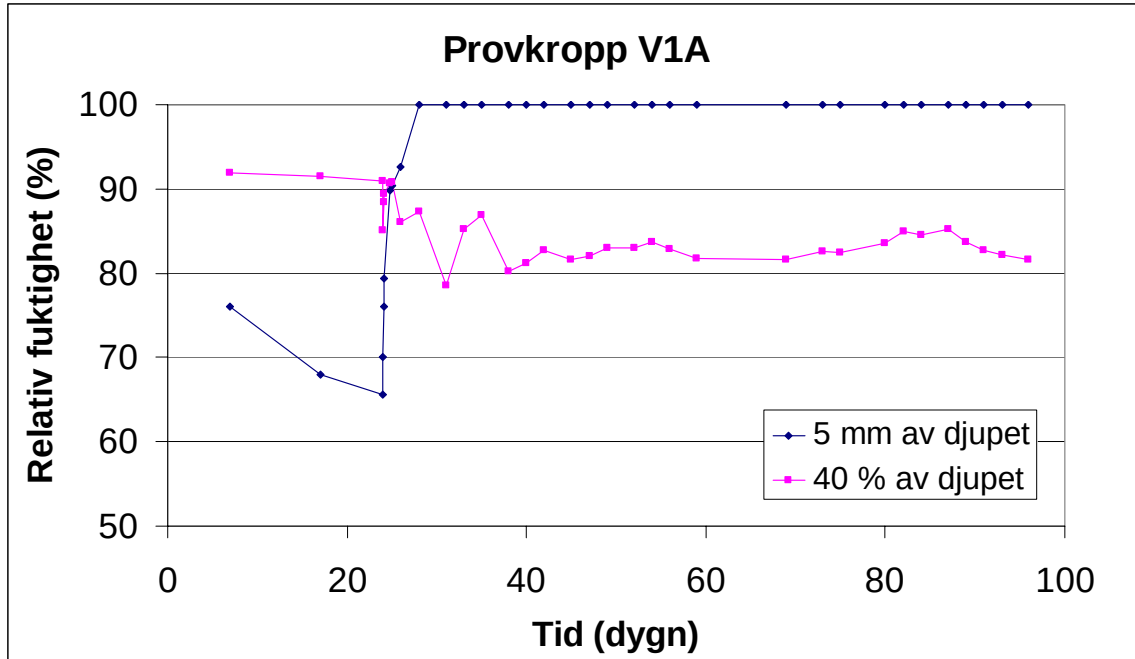
Figur B3.2. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



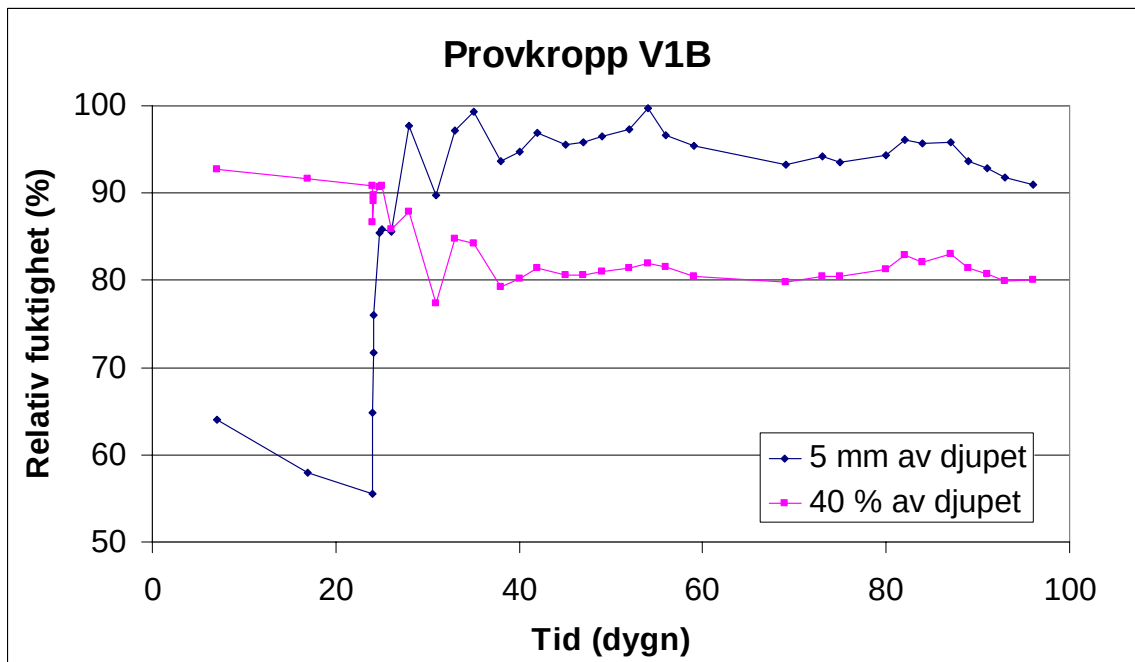
Figur B3.3. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



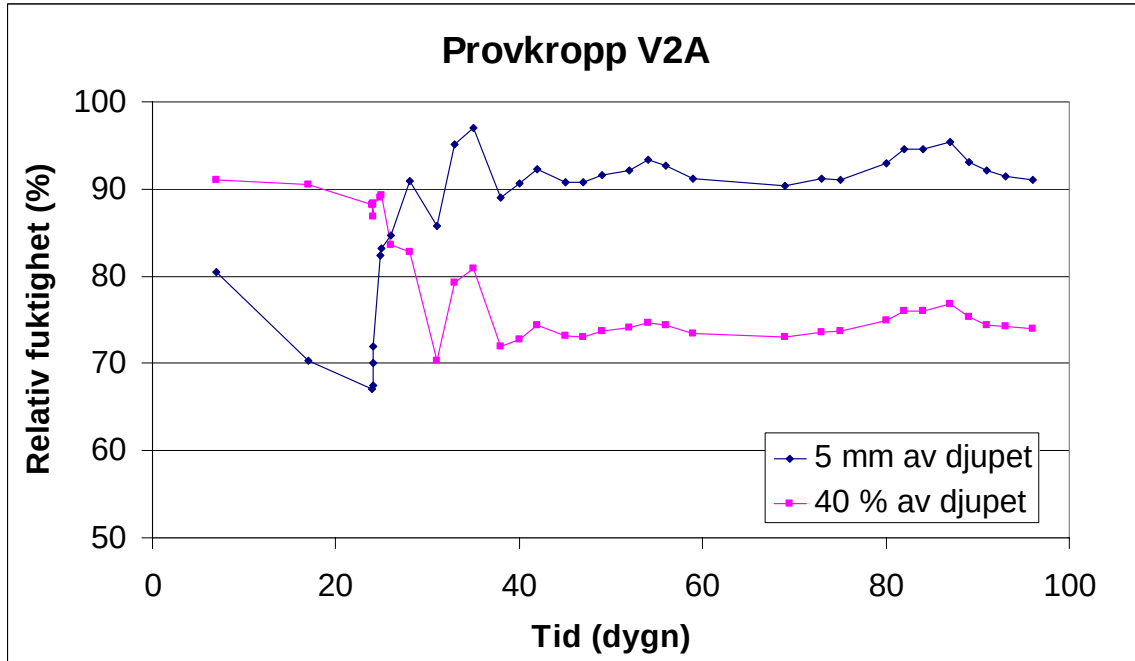
Figur B3.4. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



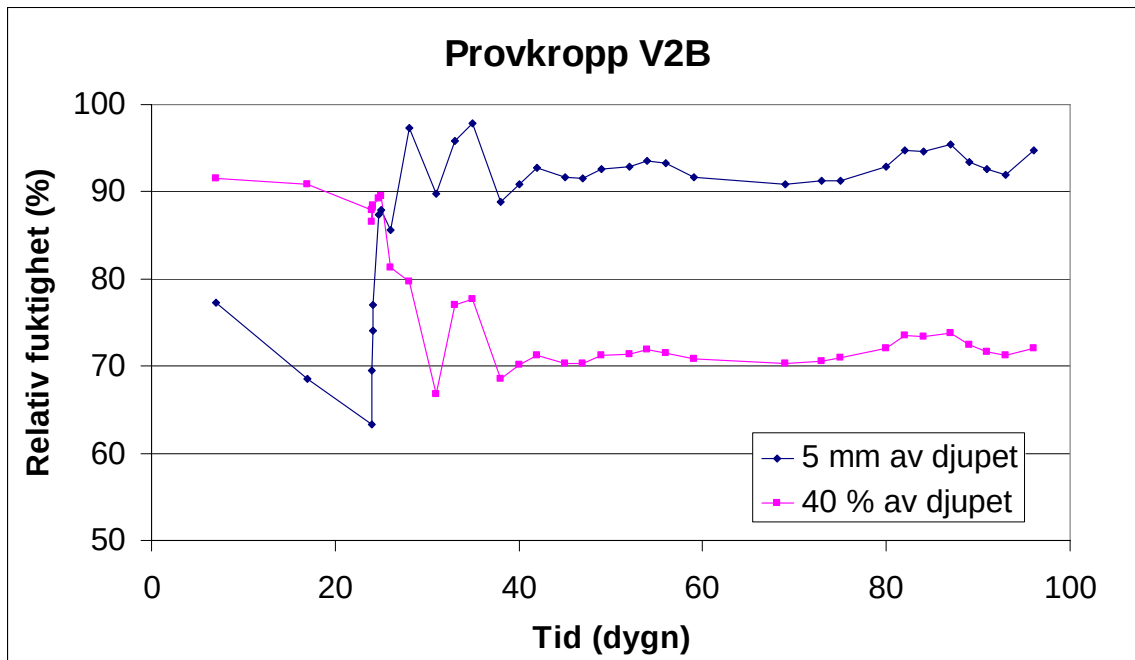
Figur B3.5. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



Figur B3.6. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.



Figur B3.7. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.

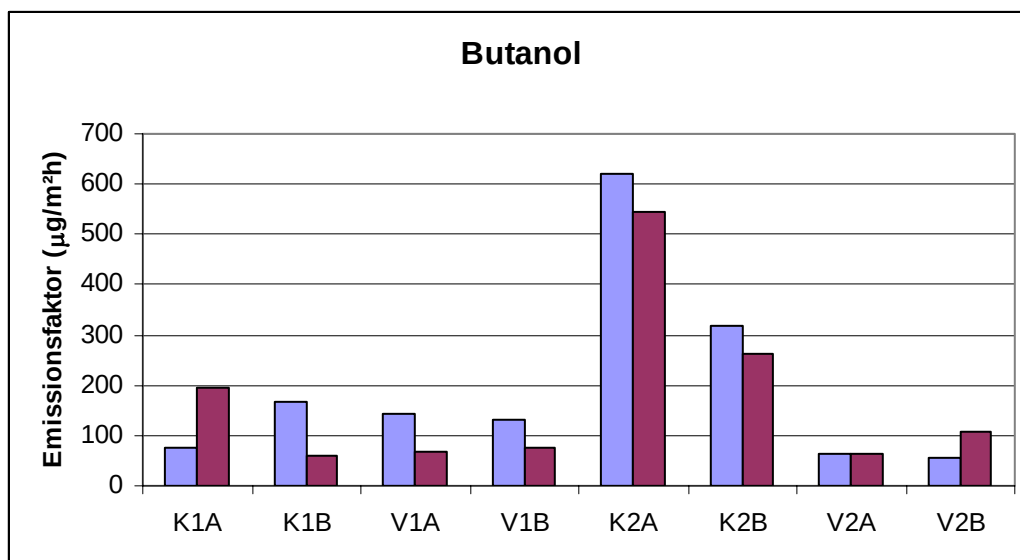


Figur B3.8. Relativ fuktighet på 5 mm och 40 % av djupet.

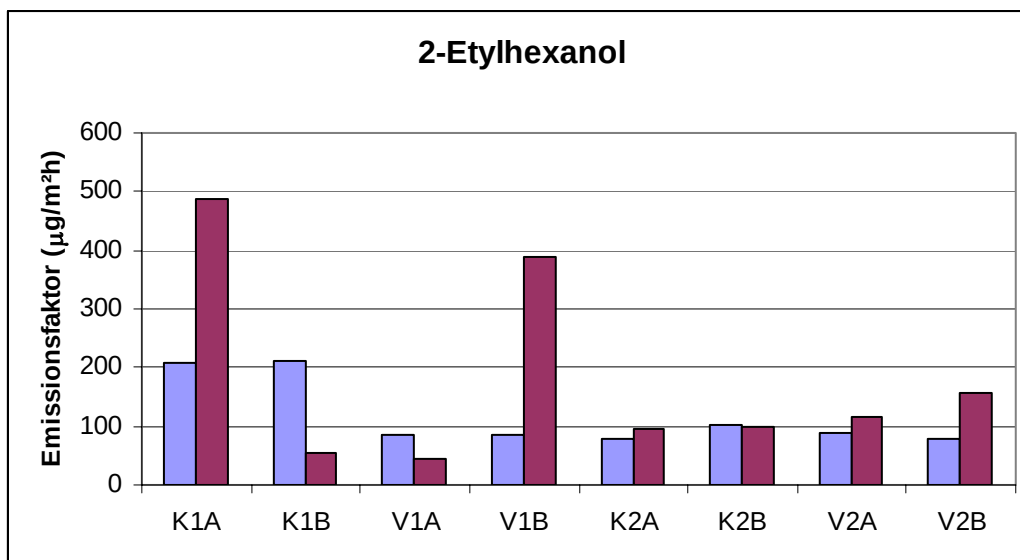
Bilaga 4

Emissionsmätningarnas resultat på gjorda dubbelprover

- Butanol
- 2-Etylhexanol



Figur B4.1. Emissionsresultaten av gjorda dubbelprover.



Figur B4.2. Emissionsresultaten av gjorda dubbelprover.

Bilaga 5

Gränsvärdesberäkning för 1-butanol från betong till inomhusluft

- Provkropp V1A
- Arbetsmiljöverkets gränsvärde på 15 ppm för butanolemissioner

Gränsvärdesberäkning

Gränsvärdet för butanol i arbetslokaler ligger på 15 ppm vilket motsvarar ungefär 45 mg/m^3 enligt Docent Olle Ramnäs. För att kontrollera om de uppmätta emissionsvärdena överskred detta gränsvärde utfördes några lätta beräkningar.

Inneluftens koncentration kontrollerades och jämfördes med gränsvärdet

För att kunna utföra beräkningarna gjordes vissa antaganden som att arean för lokalen var 150 m^2 , takhöjden var 2,4 m, luftomsättningarna var 0,5 oms/h och att det inte fanns någon koncentration butanol i rummet från början.

Formeln för koncentrationen i inomhusluften kunde då skrivas som:

$$\nu_i = \nu_e + \frac{G}{n \cdot V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$G = \frac{EF \cdot A}{10^9} \quad (\text{kg/h})$$

$$\begin{aligned} A &= 150 \text{ m}^2 \\ V &= 150 \cdot 2,4 = 360 \text{ m}^3 \\ n &= 0,5 \text{ oms/h} \\ EF_{\text{max}} &= 580 \text{ } \mu\text{g/m}^2\text{h} \\ \nu_e &= 0 \text{ kg/m}^3 \\ \nu_{\text{gräns}} &\sim 45 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

Insatt i ekvationerna ger det

$$\nu_i = 0 + \frac{580 \cdot 150}{0,5 \cdot 360 \cdot 10^9} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3 = 0,48 \text{ mg/m}^3 \leq 45 \text{ mg/m}^3$$

Minsta luftomsättning som skulle klara kravet beräknades

$$n = \frac{G}{V \cdot \nu_{\text{gräns}}} = \frac{8,7 \cdot 10^{-5}}{360 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5}} = 0,0054 \quad (\text{oms/h})$$

Vilken emissionsfaktor som skulle krävas för att gränsvärdet skulle överskridas

$$EF = \frac{\nu_{\text{gräns}} \cdot n \cdot V}{A} = \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 360}{150} = 5,4 \cdot 10^{-5} = 54000 \text{ } \mu\text{g/m}^2\text{h}$$